

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE ECONOMÍA

**“ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL PROCESO DE EMPAQUE Y EMBALAJE EN
LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ EN MÉXICO”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADA EN ECONOMÍA

PRESENTA:

MARÍA GUADALUPE FABELA OLMOS

ASESOR:

DR. RICARDO RODRÍGUEZ MARCIAL

REVISORES:

DR. EN EDUCACION FÉLIX HÉCTOR ALCÁNTARA CRUZ

DR. EN C. E. Y E. JUAN JOSÉ LECHUGA ARIZMENDI

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

OCTUBRE 2025

Contenido

Glosario	2
Introducción	4
Capítulo 1: Marco Teórico.....	5
1.1 Revisión a través de la historia	5
1.2 Economía circular	9
1.3 Logística Inversa	13
1.4 Definición análisis de Ciclo de Vida	16
Capítulo 2: Marco Referencial	17
2.1 Casos de estudio del ACV	17
2.2 Casos con excepciones	21
2.3 Discusión del tipo de empaque y embalaje	24
Capítulo 3: Metodología.....	26
3.1 Metodología del análisis del ciclo de vida (ACV)	26
3.2 Proceso de empaque y embalaje	28
3.3 Identificación y evaluación de etapas clave en el ciclo de vida del empaque.....	31
Capítulo 4: Análisis de resultados.....	81
4.1 interpretación de resultados	81
4.2 Propuestas de mejora.....	83
Conclusión	86
Referencias	88

Glosario

1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Metodología científica estandarizada (ISO 14040/44) que evalúa los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto, proceso o servicio, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

2. Eutrofización

Fenómeno por el cual el exceso de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) en cuerpos de agua provoca el crecimiento acelerado de algas y disminuye el oxígeno disuelto, afectando la biodiversidad.

3. Ecotoxicidad

Potencial de un compuesto químico para causar daño a organismos vivos en ambientes acuáticos o terrestres. Se mide en unidades de equivalencia de dicloro benceno (kg 1,4-DCB eq).

4. Formación de Material Particulado Fino (PM2.5)

Generación de partículas con un diámetro $\leq 2.5 \mu\text{m}$ que pueden penetrar en el sistema respiratorio humano, asociadas a enfermedades pulmonares y cardiovasculares.

5. Escasez de Recursos Fósiles

Indicador que mide el agotamiento de combustibles no renovables como petróleo, carbón o gas natural, expresado en kilogramos equivalentes de petróleo (kg oil eq).

6. Degradación de la Capa de Ozono

Proceso mediante el cual compuestos como los clorofluorocarbonos (CFCs) destruyen moléculas de ozono en la estratósfera, reduciendo la protección contra la radiación ultravioleta.

7. Radiación Ionizante

Energía emitida por átomos en forma de partículas o rayos, capaz de ionizar átomos y moléculas. En ACV, se evalúa su impacto en salud humana usando unidades como kBq Co-60 eq.

8. Acidificación Terrestre

Proceso causado por la emisión de gases como SO₂ y NO_x que, al reaccionar con la humedad atmosférica, generan lluvia ácida, afectando suelos y vegetación.

9. Formación Fotoquímica de Ozono (Smog fotoquímico)

Reacción química entre óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV), inducida por la luz solar, que genera ozono troposférico (O₃), dañino para la salud.

10. Huella Hídrica

Indicador que mide el volumen total de agua dulce utilizada directa o indirectamente en la producción de bienes y servicios, considerando consumo y contaminación.

11. Huella de Carbono

Total de emisiones de gases de efecto invernadero expresadas como equivalentes de dióxido de carbono (kg CO₂ eq), generadas por un producto o actividad.

12. Toxicidad Humana (cancerígena y no cancerígena)

Medición del potencial daño a la salud humana por exposición a sustancias tóxicas a lo largo del ciclo de vida de un producto. Se expresa en kg 1,4-DCB eq.

13. Indicadores de Impacto (Impact Categories)

Parámetros cuantificables en ACV que representan efectos ambientales específicos (e.g., calentamiento global, acidificación, toxicidad), utilizados para la toma de decisiones.

14. ReCiPe

Método de evaluación de impacto del ciclo de vida que traduce inventarios ambientales en 18 categorías de impacto intermedio y final, facilitando decisiones sostenibles.

15. OpenLCA

Software de código abierto para análisis de ciclo de vida que permite modelar procesos, simular flujos ambientales y aplicar metodologías como ReCiPe, CML y Eco-indicator.

Introducción

La creciente preocupación por los efectos negativos del cambio climático, la sobreexplotación de los recursos naturales y el aumento de los residuos sólidos ha impulsado a gobiernos, industrias y sociedad civil a replantear sus modelos de desarrollo económico, en este contexto, conceptos como sustentabilidad, economía circular y logística inversa han adquirido una importancia estratégica, ya que proponen soluciones innovadoras que buscan equilibrar el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente y la equidad social.

Este trabajo tiene como objetivo principal realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativo entre dos tipos de empaques utilizados en la industria automotriz: el empaque retornable de plástico PE y el empaque desechable de cartón. Para ello, se toma como caso de estudio el modelo logístico de la empresa Robert Bosch, reconocida por su compromiso con la sostenibilidad, a través del análisis de variables de entrada y salida, como consumo de energía, uso del agua, emisiones de CO₂, generación de residuos y uso de materias primas, se busca identificar cuál de los dos sistemas de empaque genera un menor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida.

La metodología utilizada se fundamenta en las normas ISO 14040 e ISO 14044, y se apoya en la herramienta de software OpenLCA, junto con la base de datos GreenDelta 3.2, lo que permite una evaluación cuantitativa y rigurosa de los impactos ambientales. Asimismo, se incorpora la metodología ReCiPe 2008, que permite transformar los datos del ciclo de vida en indicadores de impacto como calentamiento global, toxicidad humana, escasez de recursos, eutrofización y degradación de la capa de ozono, entre otros.

Este análisis no solo aporta evidencia sobre el comportamiento ambiental de los empaques, sino que también se inscribe en una visión más amplia que reconoce la necesidad de transición hacia modelos de producción sostenibles. En este sentido, se exploran los beneficios y retos de la economía circular como alternativa al modelo lineal tradicional, así como el papel de la logística inversa como herramienta clave para el cierre de ciclos productivos; de igual forma, se discute cómo las decisiones en el diseño de

empaques, embalaje y transporte inciden directamente en los costos operativos, la eficiencia de la cadena de suministro y la responsabilidad ambiental de las empresas.

A través de este enfoque integral, la investigación busca no solo generar conocimiento técnico y práctico, sino también contribuir a la toma de decisiones estratégicas orientadas a la sustentabilidad empresarial y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

Capítulo 1: Marco Teórico

1.1 Revisión a través de la historia

A lo largo de los años, el hombre se ha regido a través de sus necesidades y valores; los inicios de la organización de las sociedades, así como sus primeros acercamientos al ámbito económico vienen delimitados desde el descubrimiento de la agricultura cuando el hombre demarcaba su territorio y dividía y asignaba tareas según el “poder”, entre mayor población y territorio más poderosa se consideraba su tribu.

Años más tarde con el mercantilismo, se aseguraba que los países que más piedras preciosas acumulaban eran los países más ricos y poderosos, para finales del siglo XVII nace la fisiocracia que predica que la verdadera fuente de riqueza es la agricultura.

Para finales del siglo XVIII, Adam Smith hace hincapié en la fuente de riqueza, que considera, es el trabajo, por tanto, un país es rico por la riqueza repartida entre sus habitantes.

Thomas Malthus y David Ricardo, contemporáneos de Smith, son los pioneros en la preocupación por la limitante de los recursos, con sus teorías acerca de la ventaja comparativa (la eficiencia en recursos es la mejor manera de aprovecharlos), la teoría de los rendimientos decrecientes (que los recursos deben extraerse con limitantes porque tienden a desaparecer y dificultar su extracción) y la teoría de la distribución de la renta (la base de la riqueza de un país es la equitativa distribución de la riqueza); dichas teorías dieron pauta a la preocupación por la sustentabilidad, al argumentar que la base de riqueza de toda nación es la naturaleza y son actualmente, teorías de gran relevancia para el análisis del sistema contemporáneo y su relación con los recursos naturales finitos. (Muñoz, R., 2021).

Ahora bien, la sustentabilidad es un término bastante ambiguo, que puede, o no, asociarse con la sostenibilidad, en términos lingüísticos la sustentabilidad y la sostenibilidad son completamente iguales, es decir, que solo se diferencian por su traducción, según el área geográfica, en América es sustentable y en Europa es sostenible, sin embargo, ambos hacen referencia al desarrollo sostenible en el tiempo de los países, que implica factores económicos, políticos, sociales y ambientales (Ávila, P. 2018).

Dada la aclaración lingüística y conceptual, para efectos del presente documento, no se diferencia la sostenibilidad de la sustentabilidad, siendo la última, una aplicación a países subdesarrollados de la sostenibilidad.

Si hablamos de desarrollo sustentable nos enfocamos en un término no totalmente moderno, y que ha sufrido distintos cambios a lo largo de la historia, se podría considerar la primera aplicación del término en los años 40, con la producción sostenible, que se aplicaba específicamente a los recursos naturales, para los años 50, se da un cambio que establece la relación norte – sur de los países que permitió identificar a los, en ese entonces, países de tercer mundo que son potenciadores en materias primas, y posteriormente se dio un nuevo orden mundial así como la introducción del concepto de países subdesarrollados (Palacios, Guzmán-Hernández, Tomás, 2018).

Para el año 1983, gracias a la Organización Mundial de las Naciones Unidas (ONU) surge en Noruega la creación de la Comisión Mundial de Ambiente y Desarrollo (WCED por sus siglas en inglés) o también llamada informe Brundtland en honor a la ministro de Noruega, nacieron las primeras negociaciones y acuerdos relacionados al desarrollo sustentable mundial, que indica, debe tomar en cuenta rubros económicos, políticos, sociales y ambientales, el fruto más reconocido de dicha comisión fue el informe conocido como Nuestro Futuro Común, del cual se obtiene la primera definición aceptada de desarrollo sustentable, que es, por su traducción de la ONU: (Muñoz, R., 2021).

“El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. (ONU, 1987, p. 67, citado en Muñoz, R., 2021 p. 413).

En 1992 se celebró en Rio de Janeiro la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, en donde se aprueba la Agenda 21, que establece la prioridad de los países en desarrollo para mejorar la calidad de vida, así como la necesidad de tomar acciones en conjunto, encaminadas al desarrollo y a la protección del medio ambiente. (Palacios, Guzmán-Hernández, Tomás, 2018).

En el año 2000 se pactó la cumbre del milenio de las naciones unidas con el objetivo de reducir la hambruna, la pobreza, la desigualdad y el hambre, entre otros aspectos, con los conocidos ocho objetivos del milenio, sin embargo, fue hasta el año 2015 que se estableció la agenda 2030, en la que se plasman diecisiete objetivos de desarrollo sostenible (ODS) encaminados a la reducción de la desigualdad, la pobreza, el analfabetismo, justicia social, medio ambiente y preservación (Ávila, P. 2018).

Debido a los importantes cambios que ha sufrido el campo del medio ambiente en el ámbito político y de interés social, es común que hoy en día se confunda el termino crecimiento sostenido, crecimiento sostenible y por ende, desarrollo sustentable, sin embargo, es importante tener en cuenta que existe una diferencia, el crecimiento sostenido es lo relacionado al crecimiento económico a largo plazo, específicamente del crecimiento del PIB, mientras que el desarrollo sustentable, es un concepto que engloba distintos campos y disciplinas, sociales, políticas, ambientales y, económicas, intentando que la interacción entre ellas sea armoniosa y funcional. (Ávila, P. 2018).

Ante el mal uso del término sostenible, poco a poco se ha ido distorsionando y separando de su verdadero significado, en los tiempos actuales lo sostenible se relaciona a todo aquello que es perdurable en el tiempo y no necesariamente al aspecto ambiental, es por lo anterior que para algunos autores lo sostenible puede verse como algo externo al ambiente y no como parte de él.

Tras el debate de lo sostenible y lo sustentable como parte elemental del medio ambiente, surgen tres términos asociados a la sustentabilidad, la sustentabilidad débil, la sustentabilidad fuerte y la sustentabilidad muy fuerte, siendo la primera una parte del sistema humano que tiende a considerar que los recursos pueden ser reemplazados y se rige bajo la sustituibilidad del capital, que se refiere a que no es prioridad preservar el capital natural si es posible sustituirlo con capital más capital manufacturado; la segunda

hace referencia a la suposición de la interacción y estrecha relación de los ecosistemas y la sociedad basándose en que los ecosistemas no pueden ser por ningún motivo sustituidos por sistemas sociales; mientras que la tercera hace referencia a todos los intentos por preservar cualquier tipo de capital natural y los recursos, dejando en segundo término el capital económico y social. (Ávila, P. 2018) (Palacios, Guzmán-Hernández, Tomás, 2018).

Los efectos de la sustentabilidad son variados y bastante amplios, comenzaremos haciendo referencia a la sustentabilidad como algo que tiene que ver con la finitud de los recursos, que a su vez se relaciona con la contaminación de los mismos, la producción limpia y el comportamiento exponencial de la población, cuando estos componentes interactúan entre sí, ocurre un desgaste de los recursos naturales más grande que su capacidad de restauración, además del uso de energías que son no renovables, es decir, no pueden volver a surgir en un muy largo periodo de tiempo o probablemente nunca, debido al sistema de producción y consumo de los recursos naturales.

Hoy en día la capacidad de renovarse se agota, así como la capacidad de absorción de gases contaminantes que se generan por la vida cotidiana y la producción de bienes, mejor conocidos como gases de efecto invernadero; el sistema de producción y la creciente población en el mundo, así como la finitud de recursos nos indican el colapso de la calidad de vida humana en los próximos años, debido a que se sobrepasa la capacidad de los ecosistemas a regenerarse.

Para mayor manejo del concepto, el termino sustentabilidad nos hace referencia a que estamos en un mundo cuyos recursos de producción son limitados y debemos tomarlos con sabiduría, es por esto, que lo primero que debemos cuestionarnos es el modo de producción en serie con la cultura del desecho.

Diferenciaremos también dos conceptos que son parte de la sustentabilidad, sin embargo, pueden ser utilizados de manera autónoma, el desarrollo económico sostenible puede lograrse cuando las empresas pueden mantener crecimiento financiero a largo plazo, sin importar la cantidad de capital social que se encuentre en dicha empresa, de tal forma que pueden denominarse a sí mismas, socialmente responsables.

Por otro lado, la sostenibilidad social puede nacer en los proyectos que aportan una mejora a la calidad de vida de las personas y que están encaminados a una vida digna; sin embargo, debemos tener en cuenta que la sustentabilidad ambiental solo se lograra cuando el límite y capacidad de la naturaleza no sea sobrepasado por la producción y para satisfacer necesidades humanas creadas por el mismo hombre.

Tal es el caso de la moda y la cultura del desecho, que se basa en la utilización de un producto por un tiempo determinado por la marca o empresa y después de esa “vida útil” el objeto se torna obsoleto; para el estudio y comprensión de la sustentabilidad ambiental como un concepto que lleva implícito la economía, surge la economía verde que nace tras la necesidad de mejorar la relación económico – ambiental, que existe a través de la economía lineal que es un sistema que fabrica, consume y desecha; y cuyo fin es la producción amigable con el ambiente con inversiones públicas y/o privadas que sean estratégicas, considerando a la naturaleza como parte fundamental de un sistema que genere beneficios globales a partir del cuidado y preservación de los ecosistemas, lo que incide en la posibilidad de tener un sistema económico que sea amigable con el medio ambiente.

1.2 Economía circular

La economía verde tiene como pilar central la reducción de gases de efecto invernadero, siendo las tecnologías con combustibles renovables o energías limpias (solar, eólica, hídrica) la principal fuente de energía y dejando al lado los combustibles fósiles; además el uso de estas tecnologías podría acelerar el desarrollo de nuevos sectores y generar empleos, llamados empleos verdes, esto a su vez contribuye a la inclusión social, siendo esta un pilar de gran importancia dado que busca que, tras su aplicación, el crecimiento económico sea alcanzable para toda la población (Ávila, P. 2018) (Palacios, Guzmán-Hernández, Tomás, 2018) (Muñoz, R., 2021). (Rea-Toapanta, 2023) (WorldBank 2024).

Otro aspecto fundamental de la economía verde es el reciclaje, la reutilización y la reducción, que, a su vez, beneficiaría a los ecosistemas, a raíz de tales principios de la economía verde, nace la economía circular, que es una corriente económica, que busca la máxima explotación de los productos, es decir, que se basa en los principios de reutilización, reducción y reciclaje.

Algunos autores señalan y la diferencian de la economía verde con la utilización de 5R, las cuales son: Reducir, Reciclar, Reutilizar, Rediseñar y Recuperar, de esta manera la economía circular, predica el eficiente uso de los recursos, la reducción de los residuos y la reducción del daño ambiental, sin poner en riesgo la estabilidad económica. La economía circular, a diferencia de la economía lineal, busca crear bucles de materiales y energía, de esta manera, los principios de la economía circular se derivan de la transición hacia un sistema en el que el valor de los productos que se consumen perdure en el mayor tiempo posible para así, disminuir la cantidad de desechos y residuos, de esta manera se incentiva la innovación y nuevas formas de desarrollo sostenible, dichos principios, según Mendoza y Aguilera (2023) se pueden resumir en cuatro puntos:

1. Regeneración: la propuesta del uso óptimo y consiente de los recursos naturales renovables y no renovables
2. Optimización: que implica el uso eficiente de las materias primas, así como la reducción de residuos, por lo cual se busca calidad y durabilidad de materiales, así como tecnologías que optimicen el uso de materiales y residuos.
3. Circularidad: involucra a la reutilización, le remanufactura y el reciclaje de los materiales para maximizar su uso y mantenerlos dentro de la cadena de suministro el mayor tiempo posible esto con diseños fáciles de desmoldar para eficientizar el proceso de reinserción a la cadena de suministro.
4. Colaboración y creación de sinergias: alianzas entre los participantes de la cadena de suministro (gobierno, consumidores y empresas principalmente) para maximizar los beneficios a través de intercambios inteligentes, de información y estrategias para el buen funcionamiento de la circularidad.

Es importante resaltar que la economía circular va de la mano con el correcto empleo de los ODS y también apoya de dos maneras esenciales a su cumplimiento, la primera son estrategias circulares que implementen la reutilización de los recursos y la segunda es la reducción directa de residuos dañinos al medio ambiente; sin embargo, lo que la economía circular propone es la innovación en el sistema de consumo y no solo enfocándose en las prácticas medioambientales y abarcando la innovación y el desarrollo regional, que impacte en la sociedad, reorientando las políticas públicas y las estrategias de las

empresas con el objetivo de crear Inter eficiencia y replantear el ritmo de consumo de las personas. (Rosa, LA, Cohen, M., Campos, WY, Ávila, LV y Rodrigues, MC 2023).

Los principios de la economía circular buscan un cambio en el proceso de fabricación y consumo de los bienes es por esta razón que presenta un cambio bastante importante para las empresas, pues trata de reinventar las prácticas económicas y de consumo principalmente, en las que se basa su producción para así contribuir al equilibrio entre lo económico y lo sustentable, de tal forma que las empresas deben comenzar a incluir los principios de la economía circular como bases de su estrategia y compromiso social, existen tres aspectos importantes por los que la economía circular es relevante para las empresas:

1. Medio ambiente: la explotación de recursos y la exagerada emisión de gases de efecto invernadero, hacen cada vez menos sostenible el uso de recursos y la armonía ambiental.
2. Presiones sociales: el aumento de la clase media global, para el año 2030, ocasionara inevitablemente el aumento del consumo y la presión sobre los recursos naturales.
3. El acceso a las materias primas: la escasez de recursos, así como la disminución de su accesibilidad.

Por lo tanto, la aplicación de la economía circular en las empresas es una alternativa bastante aceptable al sistema de producción tradicional que se enfoca en la reducción del desperdicio a través de la reutilización, incurriendo así en un círculo ambiental que responde a los problemas económicos y sociales a los que se enfrenta el mundo ante la creciente población, como consecuencia de esto, se dará un aumento de la operatividad y la eficiencia de los costos de producción, así como una reducción de la dependencia entre desarrollo económico y recursos ambientales, de tal forma que contribuye al ahorro no solo ambiental, sino también económico.

La aplicación de la economía circular en las empresas traerá grandes beneficios en países desarrollados y también en países en desarrollo, en el ahorro de costos, la eficiencia de los recursos, la productividad y el empleo, los participantes de la cadena de suministro entran a un círculo virtuoso del que la reducción de desechos es el protagonista.

(Venanzi, Délvio; Silva, Roque da; Seifert, 2021) (Rosa, LA, Cohen, M., Campos, WY, Ávila, LV y Rodrigues, MC 2023).

La economía circular abarca distintos rubros y estrategias que se inspiran principalmente en procesos naturales, en los cuales se puede desempeñar y también puede influenciar, tales como la política, la innovación, educación, infraestructura entre otros, dichos campos pueden ser aplicados dentro de las empresas como parte de su reducción de costos, generación de empleos, productividad, la eficiencia y la innovación, por lo tanto, podríamos decir que la economía circular prácticamente fortalece la interacción entre la sociedad y la industria, debido a que se implementa un circuito cerrado.

Una aplicación de la economía circular es generar valor a través de la obtención de recursos que son residuales para otras empresas, de esta manera el residuo de una, puede ser materia prima para otra y así, generar ganancias y reducir costos para cada una, respectivamente.

En la actualidad, existen barreras, principalmente culturales que son consideradas estragos de la economía lineal, y la cultura del usar, desechar, otra barrera importante es el área en la cual es dirigida la sustentabilidad en las empresas, ya que se encuentra dentro de la responsabilidad social, y no dentro de áreas con mayor peso en la toma de decisiones como el ámbito financiero u operativo.

Además, existen barreras de mercado que son principalmente altos precios de inversión inicial de materia prima, así como escasas fuentes de financiamiento a los modelos de economía circular, finalmente estas tres limitantes están interconectadas entre sí, las materias primas que son renovables o sustentables tienden a ser más caras que las fabricadas por un sistema lineal debido al elevado precio de la tecnología con la que se producen y la falta de financiamiento para hacerlo.

De tal modo, los resultados sociales de la economía circular pueden medirse a través de políticas encaminadas que apoyen la circularidad y no serán medibles por la propia circularidad, sin embargo, un punto que nos queda claro es que la economía circular es más sostenible que la economía lineal, sin embargo, el método para determinar si un material puede o no ser reutilizado, es decir si reutilizar o reciclar un material es

ambientalmente viable debe ser un análisis del ciclo de vida. (Venanzi, Délvio; Silva, Roque da; Seifert, 2021).

1.3 Logística Inversa

La logística, es una parte fundamental dentro de la cadena de suministro, sin embargo, dentro de las empresas es un concepto relativamente nuevo, tiene sus orígenes en la segunda guerra mundial cuando los ejércitos debían incorporar prácticas de organización y movilización para el eficiente flujo de tropas en la guerra, pero fue hasta los años sesenta que la logística toma relevancia dentro de las empresas pero solo hacía referencia al proceso de la entrega de producto terminado a su consumidor final, sin embargo, debido a las circunstancias sociales de los años sesenta, como la crisis del petróleo y las crisis políticas de los países subdesarrollados donde se produjo un aumento de demanda de materias primas, dieron pauta para el interés de la movilización y el flujo de dichos bienes como parte fundamental del proceso para la reducción de costos.

La logística es por definición un conjunto de estrategias y métodos aplicados para el correcto funcionamiento de las empresas, además es la parte de la cadena de suministro que facilita el flujo directo e inverso, así como el almacenaje óptimo de los bienes y servicios desde el punto de origen hasta el destino último. A lo largo de los años, la definición de logística ha ido evolucionando, sin embargo, podemos listar las principales actividades que forman parte de la logística, tales como:

- Transporte: movimiento de bienes
- Almacenamiento: gestión de inventarios
- Empaquetamiento: es el envoltorio del producto terminado, que depende del tipo de transporte a utilizar y el destino final del producto.
- Movimiento de materiales: gestión de almacenes
- Secuenciación del pedido: Flujo del pedido desde la recepción hasta su entrega
- Previsión de inventarios: es fundamental para facilitar la gestión
- Planificación de la producción: no sobre pasar límites productivos y siempre disponer de recursos para la producción.
- Compras
- Servicio al cliente

- Localización: de transporte y costes productivos.

Actualmente, las definiciones incluyen dos conceptos importantes para su correcto empleo y la diferenciación entre la logística tradicional y la logística contemporánea, cuyo fin es ser amigable con el medio ambiente, la logística directa que está estrechamente relacionada con la logística tradicional, es decir, del punto A al punto B, los bienes o servicios involucrados son trasladados u utilizados de un punto a otro, sin retorno, y el fin último es convertirse en desecho. Por otro lado, la logística inversa está estrechamente relacionada con el cuidado del medio ambiente, es un concepto contemporáneo que se refiere a la parte de la logística que, al contrario de la logística tradicional, busca que los bienes y servicios retornen a su punto inicial o en su defecto a un punto ultimo donde el fin es el reúso y no el desecho. (Badenes y Francisco)

En la última década ha cobrado importancia el proceso de reutilización y flujos de retorno, sin embargo, no es una práctica nueva, ya que anteriormente, el reciclaje de papel, vidrio y chatarra como fierro viejo y electrodomésticos se practicaba como fuente de ingresos y trabajo, sin embargo, en las empresas a tomado gran relevancia dada la promesa de la reducción de costos tras estas prácticas, así como el cuidado del medio ambiente

La logística inversa nace como respuesta a las nuevas necesidades de las empresas; el concepto de logística inversa ha sufrido cambios a lo largo del tiempo, en 1999 Rogers y Tibben Lembke la definían como una serie de ejecuciones, planificación y control de eficiencia en el flujo de materia prima, inventario y producto terminado desde su punto de origen hasta su retorno, con el fin de recuperar valor o eliminarlos correctamente.

En 2002 Brito et. Al. La define como las actividades relacionadas con el manejo y gestión de un grupo de herramientas involucradas en la recuperación de productos o algunos componentes.

En 2004 la definición de logística inversa sufre dos modificaciones la primera con Bekker et. al. Que la define como la reintegración de productos obsoletos a la cadena de suministro con valor agregado; mientras que European Working Group on Reverse Logistics, la define como el conjunto de operaciones involucradas en la reutilización de productos y materiales que incluye cualquier actividad logística dentro del proceso de

recolección y desembalaje de material usado para su correcta recuperación logrando que esta sea sostenida.

Dadas las definiciones anteriores podemos deducir que la logística inversa es el conjunto de actividades involucradas en el proceso logístico de reinserción de materiales y productos de uso en la cadena de suministro para agregar valor a los mismos.

La logística inversa es un proceso fundamental dentro del marco de la economía circular, ya que juega un papel crucial en la optimización del retorno de productos al final de su ciclo de vida dentro de la cadena de suministro. Este proceso no solo busca maximizar la recuperación del valor residual que los productos aún puedan ofrecer, sino que también se enfoca en garantizar una correcta disposición final, ya sea mediante su reutilización, reciclaje o eliminación de manera responsable.

Existen diversos métodos de aplicación de logística inversa dentro de las empresas ya que estos varían de acuerdo con las necesidades particulares y el alcance ambiental que cada una posee, sin embargo, de forma general podemos anunciar que las principales actividades de la logística inversa se basan en:

1. La recolección de productos y materiales para reincorporarlos a la cadena de suministro y agregarles valor,
2. Separación de materiales o desintegración del producto,
3. Clasificación de estos según sus componentes o posibles usos,
4. Transportación hacia su tratamiento
5. Tratamiento intermedio que implica el lavado y preparación de los materiales para su correcto tratamiento
6. Retratamiento, que permite al material volver a ser utilizado.

Al implementar estas acciones, la logística inversa contribuye directamente a la reducción del impacto ambiental, prolongando la vida útil de los recursos disponibles. Esto se traduce en una disminución en la necesidad de extraer nuevos recursos, lo que a su vez minimiza la explotación de materias primas y reduce la presión sobre los ecosistemas naturales. Además, en aquellos casos en los que los productos no pueden ser reutilizados o reciclados, la logística inversa se encarga de que su desecho se realice de la manera

menos perjudicial posible para el medio ambiente, asegurando que cualquier residuo generado tenga un impacto mínimo en los ecosistemas y la salud pública.

Así, este proceso no solo favorece la sostenibilidad, sino que también apoya la transición hacia un modelo económico más responsable y consciente del entorno. (Chavez Gallegos, Valenzo-Jiménez, & Lara, 2019, citado en Zapata, Pereira, y Lasso Espitia, 2022).

Sin embargo, es importante resaltar que la logística inversa, si bien es un término que nace y bastante amigable con la logística verde, son términos distintos, la logística verde hace referencia a el proceso de disminución de contaminación principalmente empresarial per desde el punto del rediseño de los materiales, hablando específicamente del empaque o embalaje de los productos, la logística verde es rediseñar el empaque o embalaje de los productos o bien, modificar el material con el que se elaboran, mientras que la logística inversa hace referencia a todo material con retorno.

La logística verde es un apoyo a la logística tradicional para culminar sus actividades de manera eficiente y amigable con el medio ambiente, mientras que la logística inversa se apoya de sí misma durante todo su proceso.

Por lo tanto, los procesos de logística inversa pueden estar asociados con la logística verde, sin embargo, hay una diferencia entre términos.

1.4 Definición análisis de Ciclo de Vida

Por otro lado, el análisis de ciclo de vida, como ya se mencionó anteriormente, es un proceso mediante el cual es posible calcular si es viable reciclar o reutilizar un material, este análisis puede convertirse en una herramienta útil para tomar decisiones informadas para los distintos procesos logísticos de una empresa, es por esta razón que distintas empresas han implementado esta metodología para medir impactos principalmente ambientales.

Como sabemos, el empaque de los productos es fundamental para la transportación de los mismos y son un campo de oportunidad para la aplicación de la economía circular, debido a que en la mayoría de los casos, los materiales, principalmente de los envases o empaquetados de los productos, son utilizados y desechados sin ningún tipo de separación o cuidado a pesar de tratarse de materiales potenciales para el reciclaje, lo

cual representa un problema y una barrera para la aplicación de la economía circular dentro de la industria, y es de esta manera que la logística inversa juega un papel importante dentro del proceso productivo.

Estos materiales suelen cumplir con el mecanismo de llegar a manos del consumidor, el consumidor lo entrega a un intermediario, responsable de la recolección para posteriormente llegar a su destino final, que puede ser: las empresas, que podrían ser las propias empresas dueñas de ese empaque, o bien, las empresas encargadas del reciclaje de estos productos, o en el peor de los casos, el destino de estos materiales es un relleno sanitario.

Si los materiales terminan en un relleno sanitario cumplen con el ciclo de la economía lineal y la logística tradicional, sin embargo, si los materiales son reciclados, cumplen con los principios de la economía circular y el ciclo de logística inversa, de esta manera los materiales son reintegrados a la cadena de suministro y pueden continuar siendo parte de ella, a largo plazo. (Streit, Cerqueira, Guarnieri, Souza & Salviano 2023).

Parte del ACV es retomar las medidas de contaminación existentes para hacer un análisis acerca de procesos que involucren emisiones de gases, agotamiento de agua, contaminación del suelo, entre otras, para evaluar el impacto ambiental, en este apartado, queda definido el concepto de ACV, sin embargo, en los siguientes capítulos se escribirá acerca de su aplicación y se contextualizará de acuerdo con los rubros adecuados para la presente investigación.

Capítulo 2: Marco Referencial

2.1 Casos de estudio del ACV

En los últimos años, la aplicación de la economía circular, así como de la logística inversa ha tomado gran relevancia para las empresas, debido a que se busca la transacción a modelos económicos amigables con el medio ambiente, principalmente en países desarrollados, sin embargo, empresas en América Latina también han adoptado modelos de economía circular y logística inversa, para entender mejor el proceso que podría seguirse para una correcta aplicación de la economía circular y la logística inversa.

Supongamos a una empresa ABC que está inmersa en el mercado de la electrónica; la empresa ABC apostó por una tecnología e infraestructura que involucra la interacción con los clientes, consiste en recolectar y transformar productos electrónicos en materias primas o posibles piezas para otros productos, el sistema empleado trata de recolectar a través de centros de acopio los materiales que las personas suelen desechar como cartuchos, celulares, entre otros, mismos que son desmontados, triturados y se busca, sean remodelados para que se generen nuevas piezas que sean iguales o al menos, sean parecidas en calidad a la pieza predecesora, para así, estos materiales sean reinsertados en la cadena de suministro y cumplan con uno de los principios de la economía circular.

La empresa ABC hace uso de la logística inversa y es así como reduce costos industriales y aumenta la productividad, incluso la empresa incluye los materiales desecho que no pueden ser reutilizados para convertirlos en energía, por lo tanto, al re incluir los desechos en la cadena de suministro, reduce el consumo de energía, lo que convierte a la misma logística inversa en el costo más elevado de este sistema. (Venanzi, Délvio; Silva, Roque da; Seifert, 2021).

La economía circular puede aplicarse en distintos rubros de la vida cotidiana, en 2023 Mendoza y Aguilera realizaron una revisión teórica acerca de los efectos de la economía circular en la industria del cemento, en dicho documento se destaca la importancia de la economía circular, así como de esta industria y su aplicación para lograr los ODS, y su relación con los mismos, dada la importancia de la reducción de residuos, los autores señalan que la industria de construcción y cemento, junto con una correcta aplicación de economía circular, es relevante para una disminución significativa del daño ambiental, debido a que tal industria contiene distintas áreas de oportunidad para la aplicación.

Además se realiza un análisis del ciclo de vida, de manera teórica, donde argumentan es factible reemplazar algunos materiales que contiene el cemento por materiales orgánicos y/o desechos orgánicos como la cascara de huevo, el análisis se realiza con ayuda de esquemas para la visualización de las etapas de producción y vida útil, de esta manera se pueden identificar los procesos necesarios para la aplicación de la economía circular así como las distintas etapas posibles para la misma, se concluye también, que la aplicación

en América latina, específicamente en Colombia, aún se encuentra con muchos desafíos, tales como políticas públicas, infraestructura y culturales.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de evaluación ambiental que puede ser aplicada en una amplia variedad de empresas e industrias, adaptándose a diferentes procesos productivos y permitiendo un análisis detallado del impacto ambiental asociado a cada etapa de producción. Dada la versatilidad lo ha llevado a que sea empleado en la evaluación de procesos tan diversos como la producción de azúcar de caña, la elaboración de yogur y la producción de leche de vaca, entre otros.

En cada uno de estos casos, los estudios suelen seguir la metodología establecida por las normas ISO para el Análisis del Ciclo de Vida, lo que asegura una estructura organizada con divisiones y pasos específicos para cada fase del proceso. Esto significa que los autores de estos estudios detallan minuciosamente las etapas que conforman sus procesos productivos, proporcionando una visión clara de los impactos ambientales asociados a cada una de ellas.

Además, en muchos de estos estudios, se lleva a cabo una comparación de escenarios para analizar las diferencias entre la implementación de propuestas basadas en la economía circular y el escenario actual que no incorpora tales prácticas. Esta comparación es fundamental para identificar oportunidades de mejora en términos de sostenibilidad y reducción de impactos ambientales negativos.

Es importante destacar que cada aplicación del ACV puede variar significativamente, ya que los parámetros considerados y los métodos de medición empleados pueden diferir dependiendo del proceso específico que se esté evaluando. Esto se debe a que cada proceso productivo presenta sus propias características y desafíos, lo que requiere un análisis adaptado a sus particularidades.

Por lo tanto, los autores de estos estudios deben determinar cuidadosamente los parámetros a utilizar, ajustándolos a las necesidades específicas que desean abordar, asegurando que el ACV sea una herramienta eficaz para la evaluación y mejora de la sostenibilidad en cada caso particular.

Un ejemplo es un estudio de análisis de ciclo de vida realizado en 2021 en la producción de yogur colombiano, para realizar dicho estudio, los autores sustentan teóricamente el porqué es probable el daño ambiental tras la producción de yogur en Colombia, posteriormente, para la aplicación del ACV explican y hacen uso de las normas ISO de las cuales se sustenta, para la elección de parámetros específicos de acuerdo con su investigación, además agregan dos etapas extras y técnicas y herramientas de gestión que fueron útiles para profundizar en el análisis del proceso productivo del yogur.

Para el ACV del proceso productivo del yogur se toman en cuenta como datos de entrada: el consumo de materias primas, consumo de energía, consumo de agua y consumo de materias auxiliares (bolsas y materiales de desinfección).

Y como datos de salida: Emisiones al agua (evacuación de aguas residuales), emisiones al aire (emisiones de gases, principalmente amoníaco), emisiones al suelo (generación de residuos sólidos) y emisiones al entorno (contaminación auditiva que pudiera generar el proceso productivo).

Para la aplicación del ACV los autores identifican las etapas o procesos del ciclo de vida que corresponden o contribuyen a las entradas y salidas, de tal modo que, como parte del proceso, de entrada, determinan uso de petróleo, generación de dióxido de carbono (CO₂) y generación de dióxido de azufre (SO₂), y como datos de salida la generación de vapor y la emisión correspondiente al proceso tecnológico, ambos correspondientes a las toneladas por año.

Posterior al cálculo de los porcentajes de los datos de entrada y salida, se realiza la clasificación de los resultados para determinar la categoría de impacto tomando en cuenta el método de indicadores intermedios basado en la norma ISO 14:040 2000.

Dados los resultados obtenidos por los autores, como herramienta para elaborar propuestas de mejora y una interpretación profunda acerca de los resultados arrojados por el ACV, toman en cuenta los indicadores Ethos empresariales, seleccionando ocho de ellos para la correcta aplicación de estos. Por último, los autores realizan el análisis correspondiente y agregan conclusiones y propuestas de mejora.

En 2023, diversos autores publicaron una prospectiva ambiental para la producción de leche de vaca en México, los autores hacen uso de la herramienta del ACV, al igual que en el análisis de ciclo de vida del yogur, los autores, contextualizan a los lectores acerca de la situación actual en el sistema de producción de leche y eligen las variables de entrada y salida.

Posteriormente el análisis de los datos arrojados lo hacen mediante la metodología ReCiPe 2008, que se adapta a las necesidades de su investigación por la clasificación de categorías que considera, además estos autores presentan una comparativa entre el escenario actual y el posible escenario 2030, finalmente, realizan conclusiones y propuestas de mejora.

Como es posible observar, el análisis de ciclo de vida puede ser utilizado por distintos sectores que generan impacto ambiental, a su vez es importante resaltar que, pese a su versatilidad para su aplicación, el método y normas ISO son exactamente las mismas en cualquier ejemplo, sin embargo, la herramienta de análisis puede variar de acuerdo con las necesidades de la investigación y los parámetros previamente establecidos.

2.2 Casos con excepciones

En México, la adopción de prácticas de economía circular y logística inversa está cobrando impulso en diversas industrias, impulsada por la necesidad de reducir el impacto ambiental, conservar los recursos y responder a las expectativas de los consumidores por un enfoque más sustentable. Varias de las principales empresas del país están liderando este cambio, implementando estrategias innovadoras para cerrar los ciclos de vida de los productos y minimizar los residuos.

Estas empresas implementan dentro de su esquema de producción los principios de economía circular y logística inversa, según su conveniencia y el giro en el que se desenvuelven, como parte de empresas de magnitud internacional, operando en México encontramos:

Grupo Bimbo, que, a partir de 2018, aproximadamente, ha implementado las plantas que operan bajo principios de cero residuos al relleno sanitario, que hace uso de sus desechos para otros procesos, de esta manera asegura que sean reutilizados o reciclados.

También ha asumido un papel pionero en este ámbito al introducir empaques reciclables y biodegradables en su cadena de suministro. Su objetivo es lograr que todos sus empaques sean 100% sostenibles, lo cual no solo disminuye los residuos, también contribuye a la disminución de la demanda de materias primas.

Estos esfuerzos van de la mano con un aspecto clave de su logística inversa que es la recuperación de empaques post-consumo, que son recolectados, procesados y reincorporados en la cadena productiva, cerrando el ciclo de vida de los materiales plásticos y disminuyendo su impacto ambiental.

Por su parte, Cemex ha adoptado un enfoque basado en la economía circular para su industria, en la que tradicionalmente los residuos de construcción han sido un problema importante a lo largo de los años.

Cemex ha implementado soluciones que permiten reciclar los escombros de obras y reutilizarlos como agregados en la fabricación de nuevos productos de construcción, asando su modelo de logística inversa en la recolección de escombros, los cuales son tratados en sus plantas y devueltos al ciclo productivo, generando un verdadero ciclo cerrado en la industria de la construcción.

Este enfoque no solo reduce la necesidad de extraer nuevas materias primas, sino que también disminuye los desechos que terminan en los vertederos.

Además, la empresa ha desarrollado una estrategia para utilizar combustibles alternativos derivados de residuos industriales y agrícolas, como biomasa y llantas usadas, lo que le permite reducir significativamente sus emisiones de carbono.

En el sector de alimentos y bebidas, PepsiCo México está aplicando una visión integral de sostenibilidad que abarca desde la producción agrícola hasta la gestión de residuos. La empresa ha establecido un ambicioso objetivo de que el 100% de sus empaques sean reciclables, compostables o biodegradables para 2025. Para lograrlo, han rediseñado sus envases y colaboran con recicladores para asegurar que los materiales recolectados se reincorporen en nuevos productos.

Además, PepsiCo está implementando prácticas de agricultura regenerativa, que buscan mejorar la salud del suelo, promover la biodiversidad y secuestrar carbono, lo cual reduce

el impacto ambiental asociado con la producción de materias primas. A través de su logística inversa, PepsiCo de la mano con su embotelladora principal, GEPP han establecido sistemas eficientes de recolección de botellas de PET y otros plásticos post-consumo, asegurando que estos materiales sean reciclados y reutilizados en la producción de nuevos envases, reduciendo así la demanda de plástico virgen y contribuyendo a la disminución de residuos plásticos.

Otra empresa que se ha destacado en el ámbito de la sostenibilidad es Heineken México, que ha centrado gran parte de sus esfuerzos en reducir el consumo de agua y energía en sus procesos de producción. Su planta en Meoqui, Chihuahua, es un ejemplo sobresaliente, ya que opera casi completamente con energía solar y cuenta con sistemas que permiten reutilizar el agua, logrando así una operación de "agua cero".

La empresa también se ha comprometido con el reciclaje de los envases de vidrio y aluminio, elementos clave en su ciclo de vida de productos. Para ello, Heineken promueve activamente el uso de botellas retornables, incentivando a los consumidores a devolver los envases para su reutilización.

En este sentido, su logística inversa se basa en un sistema robusto de recolección y limpieza de botellas, que luego son reincorporadas en el proceso productivo, generando menos residuos y fomentando la cultura del reciclaje.

Por su parte Nestlé México ha trazado una hoja de ruta ambiciosa para hacer que el 100% de sus empaques sean reciclables o reutilizables para 2026.

Además de trabajar en el rediseño de sus envases, la empresa ha establecido alianzas con gobiernos y organizaciones para fomentar la recolección de residuos y su correcta disposición. Esto incluye la creación de programas que facilitan el reciclaje en las comunidades donde opera, asegurando que los consumidores tengan acceso a sistemas de recolección eficientes.

A nivel de logística inversa, Nestlé está implementando iniciativas que permiten recolectar y procesar los empaques post-consumo, reincorporando estos materiales en su ciclo de producción, lo que reduce la dependencia de recursos vírgenes y disminuye el impacto ambiental de sus operaciones.

Por último, Danone México está comprometido con la reducción del uso de plásticos a través de la incorporación de plástico reciclado en sus botellas y la creación de una línea de productos en envases hechos 100% de plástico reciclado (PET). Este esfuerzo forma parte de su estrategia de economía circular, que busca disminuir la huella de carbono de la empresa y cerrar el ciclo de vida de sus productos.

La logística inversa en Danone también juega un papel crucial, ya que la empresa colabora con recicladores y organizaciones para recolectar las botellas post-consumo y reintegrarlas en su proceso productivo. De esta manera, no solo se reduce la generación de residuos plásticos, sino que también se fomenta la reutilización de materiales.

En conjunto, estas empresas están liderando el camino hacia un futuro más sostenible en México. Sus estrategias de economía circular y logística inversa no solo ayudan a reducir el impacto ambiental, sino que también representan un cambio en la manera de operar, enfocado en la reutilización de recursos y la reducción de residuos. Con el apoyo de consumidores, gobiernos y organizaciones, estas iniciativas están marcando una diferencia significativa, promoviendo una cultura empresarial más responsable y consciente del entorno.

2.3 Discusión del tipo de empaque y embalaje

La logística inversa puede verse dividida en 2 áreas para su mayor comprensión, la primera es la logística de reposición, que se basa en el retorno del producto al punto de origen con fines de reposición esto debido a la insatisfacción de los clientes con el producto que fue entregado, por otro lado, está la logística inversa de residuos, en ella podemos encontrar todo proceso por el cual pasan los desechos de los productos para volver a integrarse en la cadena de suministro y es, donde principalmente encontramos a los empaques y embalajes.

Para un correcto ACV es fundamental conocer los procesos que se desean analizar, por tanto, es importante resaltar que el proceso de empaque y embalaje es una parte esencial de la cadena de suministro que asegura la protección, integridad y presentación adecuada de los productos desde el punto de producción hasta el consumidor final. Este proceso abarca una serie de actividades que van desde la selección de materiales, el diseño del empaque, hasta su implementación en la logística de distribución.

La principal función del empaque es proteger el producto de daños físicos, contaminación y degradación durante el almacenamiento, transporte y manipulación. Además, el empaque juega un papel crucial en la comunicación con el consumidor, al proporcionar información esencial como ingredientes, instrucciones de uso, y detalles sobre la marca.

El embalaje, por otro lado, se centra más en la protección y eficiencia logística a nivel macro. Incluye la agrupación de múltiples unidades de productos en contenedores más grandes que facilitan su manejo y transporte. Este aspecto del proceso es fundamental para garantizar que los productos lleguen en condiciones óptimas a su destino, minimizando el riesgo de daños durante el tránsito. Además, el embalaje también debe considerar factores como la optimización del espacio y la sostenibilidad, aspectos que se han vuelto cada vez más importantes a medida que las empresas buscan reducir su impacto ambiental.

La sostenibilidad en el empaque y embalaje ha cobrado gran relevancia en las últimas décadas. Con el creciente enfoque en la reducción de residuos y la huella de carbono, las empresas están invirtiendo en materiales más ecológicos y en diseños que faciliten el reciclaje y la reutilización. Esto no solo responde a las demandas regulatorias y de los consumidores, sino que también puede ofrecer beneficios económicos al reducir costos asociados con el manejo de residuos y mejorar la eficiencia del transporte. (Soroka, 2008; Paine, 2019).

A lo largo de los años, el empaque y embalaje de los productos ha evolucionado de acuerdo con las necesidades que se buscan satisfacer, es decir, se adapta a los distintos cambios que sufre, no solo el entorno en el que se fabrica, sino también el tipo de transporte, los demandantes e incluso, la época que enfrenta tal es el ejemplo de la adaptación de empaques y embalajes durante la pandemia de la COVID-19.

En el año 2019, tras la presencia del virus y el confinamiento, las ventas en línea se dispararon y con ello, se dio un aumento bastante significativo en el empaque y el embalaje de los productos finales, lo cual resultó bastante significativo para el área de la logística dentro de las empresas, debido a que, por el aumento del empaque y embalaje se incrementaron igualmente los gastos económicos y el impacto ambiental dado el tipo de

empaque y materiales que algunas empresas utilizaban, como el plástico y el unicel, que son materiales de alto costo ambiental.

Debido a la situación, las empresas se vieron orilladas a rediseñar sus métodos de empaque y embalaje, lo cual resultaba difícil en tiempo de pandemia dada la situación viral, el virus podría sobrevivir hasta tres días en el plástico.

Inicialmente algunas empresas tomaron medidas de no devolución, esto no solo contribuía al impacto económico dentro de las empresas sino también, significaba un ahorro en el impacto ambiental debido a la reducción de reempaque y desecho de plásticos y unicel destinados al empaque y embalaje de productos.

Cabe mencionar que el proceso del empaque y embalaje fue también altamente afectado por la pausa que sufrió la logística inversa en los años pandémicos, pues debido al cierre de fronteras logísticas era imposible que la logística inversa se llevara con éxito a la práctica.

Por tal motivo, las empresas idearon nuevas formas de empaque y retorno de sus desechos, tal es el caso de la empresa Bosch que se preocupó por el uso del unicel dentro de los empaques y que rediseño su empaque y embalaje iniciando principalmente por el cambio en empaques y embalajes de plantas hermanas, el primer cambio consistió en pasar de unicel a charolas de plástico biodegradable, y posteriormente de empaque y embalajes desechables a empaque y embalaje reutilizable.

Capítulo 3: Metodología

3.1 Metodología del análisis del ciclo de vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología ampliamente utilizada para evaluar los impactos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este enfoque permite a las empresas y organizaciones identificar áreas de mejora en términos de sostenibilidad y eficiencia, lo que es fundamental en un contexto donde las preocupaciones ambientales y el cambio climático están cada vez más en el centro de la toma de decisiones.

El ACV se aplica no solo a productos individuales, sino también a procesos y sistemas completos, proporcionando una visión integral de los impactos ambientales acumulativos.

Esto incluye la evaluación de la extracción y procesamiento de recursos naturales, la fabricación, distribución, uso y el final de la vida útil del producto. Cada una de estas etapas puede contribuir de manera significativa a la huella ambiental total, y el ACV permite cuantificar estas contribuciones para compararlas y priorizar acciones de mejora.

Esta metodología está ligada a las normas ISO 14000, que está relacionada con la gestión medioambiental. La norma ISO 14000 es una serie de estándares internacionales que se enfocan en la gestión ambiental y su objetivo principal es proporcionar a las organizaciones un marco para mejorar su desempeño ambiental y reducir su impacto en el medio ambiente mientras cumplen con las regulaciones y expectativas de las partes interesadas

Dentro de esta serie, la norma más conocida es la ISO 14001, que establece los requisitos para un sistema de gestión ambiental y proporciona un marco para desarrollar políticas y objetivos ambientales, realizar auditorías y mejorar continuamente el desempeño ambiental. También se destaca la ISO 14004, que ofrece directrices sobre los principios y técnicas de gestión ambiental y se puede utilizar junto con la ISO 14001 para implementar un sistema efectivo.

Además, las normas ISO 14040 y 14044 se centran en el análisis de ciclo de vida, proporcionando un marco para evaluar el impacto ambiental de productos y servicios a lo largo de su ciclo de vida.

Implementar un sistema de gestión ambiental basado en la norma ISO 14000 puede ofrecer diversos beneficios, como la mejora en la eficiencia operativa a través de un uso más eficiente de los recursos y la energía, así como el cumplimiento normativo que ayuda a las organizaciones a evitar sanciones. Además, las empresas que demuestran un compromiso con el medio ambiente pueden mejorar su reputación y atraer a consumidores y socios comerciales, lo que también les permite acceder a nuevos mercados que prefieren trabajar con empresas certificadas en gestión ambiental

La implementación de un sistema de gestión ambiental conforme a la norma ISO 14000 implica varios pasos que comienzan con el compromiso de la alta dirección, que debe estar dispuesta a proporcionar los recursos necesarios para la gestión ambiental. Luego se realiza una evaluación inicial del estado actual de las prácticas ambientales de la

organización, se establecen políticas y objetivos medibles y se implementan los procesos necesarios para cumplir con esos objetivos.

Finalmente, se lleva a cabo un monitoreo y revisión del desempeño ambiental de manera regular, ajustando y mejorando el sistema en función de los resultados obtenidos.

Para el presente trabajo se abordarán las normas ISO 14040 e ISO 14044 que son las principales normas que definen los principios y requisitos del Análisis de Ciclo de Vida y que proveen las directrices para evaluar las variables de impacto en el proceso del empaque y el embalaje de los productos.

3.2 Proceso de empaque y embalaje

El proceso de empaque y embalaje en la industria automotriz es casi nulo tratándose de producto terminado, sin embargo, para la materia prima, debe seguirse un protocolo que determina cada empresa según sus lineamientos y parámetros dado que, la calidad de productos, así como las condiciones óptimas de materia prima son fundamentales para asegurar que el producto terminado sea de calidad y garantiza el buen funcionamiento del proceso productivo.

Es por esta razón que el diseño del empaque y embalaje de los productos y principalmente de la materia prima recibida en cada planta es una pieza clave dentro del proceso productivo y que tiene bastante peso en la cadena de suministro.

Para el presente trabajo se abordará el proceso y reglamento de empaque y embalaje de la empresa Robert Bosch, para materia prima.

Bosch trabaja mediante proveedores externos que satisfacen la demanda de casi todas sus plantas ensambladoras, y es responsable de proveer un reglamento que va de la mano con sus objetivos como empresa, en el intento de ser una empresa socialmente responsable, Bosch ha decidido implementar el empaque retornable dentro de su cadena de suministro.

El Manual de Embalaje de Robert Bosch Treto (RBET) establece los requisitos de embalaje para los proveedores de las plantas y busca optimizar el intercambio de materiales cumpliendo con estándares de calidad y medioambiente.

Define las normas de embalaje que deben seguir los proveedores para asegurar una logística eficiente y segura enfocándose en optimizar el diseño de los contenedores estandarizar dimensiones y definir cantidades de piezas por embalaje.

El manual diferencia entre embalajes retornables y no retornables. Los embalajes no retornables solo se emplean en casos excepcionales y deben cumplir con normas de reciclabilidad mientras que los embalajes retornables incluyen grandes contenedores y cajas KLT estándar para intercambios específicos entre los proveedores y la planta.

Además, establece normas de entrega que regulan los límites de peso y tamaño de las unidades de embalaje y requieren el uso de europallets adecuados y en óptimas condiciones. Para asegurar la trazabilidad de cada unidad debe contar con una etiqueta principal y etiquetas secundarias que cumplan con las normas VDA 4902 o la normativa Odette y evitar etiquetas antiguas en los embalajes retornables.

La responsabilidad del proveedor es clave debiendo garantizar la integridad del embalaje y la protección de las piezas enviadas bajo los requisitos de calidad y seguridad establecidos en el manual.

En caso de incumplimiento se pueden emitir reclamaciones logísticas y los costos derivados pueden ser cargados al proveedor. La gestión de embalajes y su reciclaje también son esenciales dentro del manual ya que se requiere que los proveedores mantengan existencias adecuadas y notifiquen con antelación cualquier cambio en la demanda de embalaje para asegurar disponibilidad.

Para los embalajes de madera el manual exige el cumplimiento de la norma fitosanitaria ISPM-15 que regula el tratamiento térmico o la fumigación de la madera, así como su etiquetado adecuado.

El manual establece procedimientos claros para que los proveedores gestionen el embalaje de manera eficiente y sostenible protegiendo las piezas y contribuyendo a la sustentabilidad mediante el uso de materiales retornables y reciclables.

Para poder determinar si un empaque es retornable o desechable, la empresa realiza un análisis de costos financieros y determina la viabilidad del empaque, así como también,

realiza un análisis de deterioro y calidad de la pieza al trasladarse en empaque retornable o desechable.

Cabe mencionar que la empresa hace uso de pallets o tarimas de material uniforme, es decir, si la caja (empaque) es retornable, el pallet deberá serlo también, y, por el contrario, si la caja es de cartón (desechable) la tarima también deberá serlo. Además, el empaque debe ser “espejo” es decir, cada empaque retornable, deberá contar con empaque desechable en mismas medidas y capacidad de peso bruto.

El manual de empaque y embalaje de Bosch especifica diferentes tamaños de empaque retornable y desechable, para simplificar el presente trabajo se tomará el contenedor estándar en ambos empaques y se realizará el análisis correspondiente para cada uno de ellos.

Según las exigencias medioambientales del manual, se considera:

- Solo se permite el uso de plásticos PP o PE en empaques retornables
- Solo uso de cartón sin grapas para empaques desechables
- Ambos tipos de empaques pueden hacer uso de cintas adhesivas de pegamento hidrosoluble
- Las etiquetas y pegatinas deben contener pegamento hidrosoluble para ambos tipos de empaque

Para el empaque desechable o no retornable, se tomarán en cuenta distintas especificaciones, tales como:

	Retornable	Desechable
Medidas exteriores	400 x 300 x 147 mm	400 x 300 x 147 mm
Medidas interiores	345 x 260 x 129 mm	345 x 260 x 129 mm
Peso	1.1 kg	500 – 700 gr
Peso máximo bruto	15 kg	15 kg
Tamaño pallet	1240x835x970 mm	1240x835x970 mm
Carga máxima pallet	1000kg	1000kg
Cajas pallet	48 cajas máximo	48 cajas máximo

Material	Plástico PE	Cartón
Vida útil	Hasta cincuenta ciclos	Un ciclo
Tipo de residuo	No degradable	Degradable
Ciclo de vida	Reutilizable	No reutilizable
Transporte	Tráiler	Tráiler

Una vez definido el tipo de empaque que se implementará, el proceso que se sigue en la industria es sencillo, el empaque desechable se compra a un proveedor externo, se empaca el material vendido y se envía. Para el empaque retornable el proceso es similar, la diferencia es que el empaque es propiedad de Bosch y se utiliza principalmente para enviar a plantas hermanas o bien, proveedores nacionales.

3.3 Identificación y evaluación de etapas clave en el ciclo de vida del empaque

Según la norma ISO 14043:2000 que habla de gestión ambiental y la interpretación del análisis del ciclo de vida, para un correcto ACV debemos considerar variables de entrada y variables de salida, según esta norma se pueden clasificar de la siguiente manera:

Variables de entrada: Materias primas, energía consumida, agua consumida, uso de químicos, transporte y logística.

Variables de salida: Emisiones, residuos, agotamiento de recursos, biodiversidad, toxicidad.

Por lo tanto, primero es importante identificar las etapas clave en el proceso del empaque y embalaje de los productos, que se definirán como:

1. Extracción y procesamiento de materias primas:

Este punto hace referencia a la extracción y el proceso de materias primas para ser aptas y poder ser utilizadas en el empaque, así como el tipo de impacto que generan

2. Fabricación del empaque:

Aquí se considerarán los recursos utilizados para el proceso de fabricación de empaque, es decir el procesamiento de las materias primas del punto 1, así como los residuos de esta.

3. Transporte y distribución:

En este punto es de suma importancia el diseño del empaque debido a la optimización de espacios y empaques para el uso del transporte, se tomará en cuenta las emisiones de CO2 que genere transportar el producto terminado.

4. Uso del empaque:

En este punto se abordará la eficiencia y la durabilidad del empaque propuesto

5. Fin de vida útil:

Aquí se tomará en cuenta el destino final del residuo que genera el material del empaque y embalaje, así como la degradación y que tan amigable con el medio ambiente es.

Los principales indicadores de impacto que tomaremos en cuenta son, la huella de carbono, el uso del agua o huella hídrica la generación de residuos y el consumo de energía.

Según los datos anteriores y los pasos clave en el proceso de empaque y embalaje especificados anteriormente, así como los principales indicadores de impacto se identifican las siguientes variables de entrada y salida para el ACV del empaque retornable y desechable.

VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA
Materias primas (material para el empaque)	Emisiones de gases de efecto invernadero y / o contaminantes atmosféricos
Energía consumida	Generación de residuos
Agua consumida	Tipo y agotamiento de recursos naturales
Uso de químicos y aditivos	Impacto sobre la biodiversidad
Tipo de transporte y logística	Toxicidad a ecosistemas

Tomando en cuenta las especificaciones de empaque y embalaje según el Manual de Empaque y Embalaje Bosch vigente, se identifican las siguientes especificaciones para las variables de entrada

Variable	Retornable (Plástico PE)	Desechable (Cartón)
Medidas exteriores	400 x 300 x 147 mm	400 x 300 x 147 mm
Medidas interiores	345 x 260 x 129 mm	345 x 260 x 129 mm
Peso por caja	1,1 kilogramos	0,5 - 0,7 kilogramos
Material	Plástico PE (no degradable)	Cartón (biodegradable)
Vida útil	Hasta 50 ciclos	1 ciclo
Peso máximo bruto por caja	15 kilos	15 kilos
Tamaño del pallet	1240 x 835 x 970 mm	1240 x 835 x 970 mm
Cajas para pallets	48 cajas máximo	48 cajas máximo
Consumo de energía (fabricación)	22 MJ (1,1 kg x 20 MJ/kg)	5 - 7 MJ por caja
Agua utilizada	2 litros por ciclo (limpieza)	5 litros por fabricación

Así mismo, bajo los mismos parámetros de las variables de entrada, se identifican las siguientes variables de salida,

Variable	Retornable (Plástico PE)	Desechable (Cartón)
Emisiones de CO₂ (fabricación)	1,1 kg (amortizado a 0,022 kg/ciclo)	0,4 - 0,56 kg por caja
Carga total por pallet	52,8 kilogramos (48 x 1,1 kilogramos)	28,8 kg (48 x 0,6 kg promedio)

Variable	Retornable (Plástico PE)	Desechable (Cartón)
Residuos al final de la vida	1,1 kg por caja (si no se recicla)	0,5 - 0,7 kg por caja
Efluentes generados	Aguas residuales por limpieza (~2 litros/ciclo)	Aguas residuales en fabricación (~2 litros)
Transporte por palets	Mayor impacto por peso (52,8 kg/pallet)	Menor impacto por peso (28,8 kg/pallet)
Ciclo de vida	50 ciclos	1 ciclo

Es importante destacar que las variables de entrada y salida serán aplicables para ambos tipos de empaque para poder realizar una comparativa de resultados al finalizar el ACV correspondiente para cada empaque.

La metodología ReCipre 2008 es utilizada para asignar ponderaciones para el cálculo del impacto ambiental de los procesos productivos y se apoya de una tabla ya establecida de valores según el tipo de insumo y su finalidad; El impacto ambiental según el método RECIPRE se muestra en la unidad puntos, donde 1 punto representa la centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo medio.

Para un mejor análisis comparativo, recurrimos a open LCA, un software que permite realizar un análisis de ciclo de vida, exhaustivo y con bases de datos precargadas, para fines de este trabajo, se utiliza la base de datos greendelta 3.2 debido a que contiene una base de datos extensa incluyendo procesos de materiales utilizados en la industria, como en nuestro caso, plástico PE (polietileno) y Cartón (Kraft). Además, para el análisis se considera la metodología recipre, que el mismo software ofrece.

Lo primero que hay que definir son los procesos que se van a analizar, en este caso el proceso de fabricación, uso y transporte para cada caso de empaque y embalaje, son los mencionados anteriormente como reglamentarios por Bosch, es decir, en la base de datos se ven:

Para plástico

Home Welcome PLASTICO PE *EXTRACCION PLASTICO PE CARTON *EXTRACCION CARTON

Inputs/Outputs - EXTRACCION PLASTICO PE

Inputs + 1.23

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location	Description
polyethylene high d...	Materials production/...	1.10000	kg		none		Polye...			
Electricity	Energy carriers and te...	22.00000	MJ		none		Electri...			
Water for industrial ...	Materials production/...	2.00000	kg		none		Steel ...			
transport in t*km	Transport services/Oth...	3.08880E4	t*km		none		Articu...			

Outputs + 1.23

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location	Description
PLASTICO PE		1.10000	kg		none					
Carbon dioxide	../Emission to air/high...	1.10000	kg		none					
Water	../Emission to air/high...	2.00000	kg		none					
Packaging waste, pl...	../Waste/ecopoints 97...	1.10000	kg		none					

General information **Inputs/Outputs** Documentation Parameters Allocation Social aspects Direct impacts

Para cartón

Home Welcome PLASTICO PE *EXTRACCION PLASTICO PE CARTON *EXTRACCION CARTON

Inputs/Outputs - EXTRACCION CARTON

Inputs + 1.23

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location	Description
Graphic paper (typi...	Materials production/...	0.60000	kg		none		Graph...			
Electricity	Energy carriers and te...	7.00000	MJ		none		Electri...			
Water for industrial ...	Materials production/...	5.00000	kg		none		Dum...			
transport in t*km	Transport services/Oth...	2.97600E4	t*km		none		Articu...			

Outputs + 1.23

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location	Description
CARTON		0.50000	kg		none					
Carbon dioxide	../Emission to air/high...	1.00000	kg		none					
Water	../Emission to air/high...	1.00000	kg		none					
Packaging waste, p...	../Waste/ecopoints 97...	1.00000	kg		none					

Una vez asignado el material y procesos que se tomaran en cuenta en el ACV para cada empaque, se procede a ejecutar el software, elegimos la metodología Recipre, que es la elegida en esa investigación, y los resultados que arroja son los siguientes:

Para empaque de plástico PE:

Impact category	Reference	
	unit	Result
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0.241975156
Fossil resource scarcity	kg oil eq	570.014586
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.063092243
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.002345492
Global warming	kg CO2 eq	2056.324136
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0.129732521
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	3.89789581
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	14.73253661
Land use	m2a crop eq	0.00147742
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.395997652
Marine eutrophication	kg N eq	0.009447938
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0.056624055
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	12.54549001
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	12.6303217
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.000136995
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	6.717356914
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	160.4597864
Water consumption	m3	0.412200343

Los resultados anteriores son la aproximación al impacto por categoría que tiene la fabricación, el uso y el transporte del empaque para cada categoría seleccionada, a continuación, se describirá a detalle la relevancia de cada indicador y su impacto en el ambiente o salud, así como su participación y relevancia en el proceso del empaque.

1. Formación de Material Particulado Fino (0,24198 kg PM2,5 eq.)

Se generan aproximadamente 0.24 kg equivalentes de partículas finas (PM2.5) a lo largo del ciclo de vida del empaque. Las PM2.5 son partículas diminutas suspendidas en el aire, con un diámetro menor a 2.5 micrómetros, que pueden penetrar profundamente en los pulmones al ser inhaladas. Este impacto está relacionado con la contaminación del aire por partículas finas, que afectan la salud respiratoria y pueden contribuir a enfermedades como asma y bronquitis. El valor obtenido indica que la producción y el transporte del empaque retornable generan una cantidad moderada de estas partículas, lo que resalta la necesidad de optimizar procesos industriales y reducir emisiones en la cadena de suministro. El material particulado fino se genera durante el transporte del producto (por ejemplo, camiones diésel) y la producción de energía para fabricar el polietileno. El polietileno de alta densidad (PE-HD), un material derivado del petróleo requiere procesos energéticamente intensivos, que contribuyen significativamente a la formación de partículas finas en el aire.

2. Escasez de Recursos Fósiles (570,01 kg de aceite eq)

El resultado indica que la cantidad de recursos fósiles consumidos en el ciclo de vida del empaque es equivalente a 570 kg de petróleo crudo.

El PE-HD es derivado de hidrocarburos fósiles (petróleo y gas natural), lo que genera una alta dependencia de recursos no renovables. La extracción de petróleo, además, genera impactos en ecosistemas terrestres y marinos debido a derrames y emisiones de gases.

La Agencia Internacional de Energía (IEA) informa que cerca del 8% del petróleo extraído a nivel mundial se destina a la producción de plásticos, siendo el PE uno de los más utilizados en empaques. La producción global de plásticos consume alrededor de 1,5 millones de barriles de petróleo por día.

Este valor alto refleja una fuerte dependencia del petróleo y otros combustibles fósiles en la producción del polietileno (PE). Cada kilogramo de plástico producido requiere una cantidad significativa de petróleo, lo que enfatiza la importancia del reciclaje y reutilización para reducir la extracción de recursos no renovables y minimizar el impacto ambiental.

3. Ecotoxicidad de Agua Dulce (0,06309 kg 1,4-DCB)

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que el 80% de las aguas residuales industriales son vertidas sin tratamiento adecuado, contribuyendo a la degradación de los ecosistemas de agua dulce.

El impacto tóxico en ecosistemas de agua dulce es equivalente a la toxicidad de 0.60 kg de diclorobenceno (1,4-DCB) que se debe principalmente a las sustancias químicas tóxicas generadas en la extracción de materias primas, producción de plásticos y procesos industriales.

Estas sustancias, como metales pesados y solventes, pueden filtrarse al agua dulce, afectando los ecosistemas acuáticos.

4. Eutrofización de Agua Dulce (0,00235 kg P eq)

Aproximadamente 0.0023 kg de fósforo equivalente son liberados al medio ambiente, promoviendo la eutrofización.

Aunque el valor es relativamente bajo, indica una contribución a la sobrecarga de nutrientes en cuerpos de agua, lo que puede causar proliferación excesiva de algas y afectar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos, este impacto puede estar relacionado con procesos industriales que liberan compuestos de fósforo.

La eutrofización ocurre cuando los nutrientes, como fósforo y nitrógeno, son liberados al agua dulce, en el caso del PE-HD, este impacto proviene principalmente del uso de fertilizantes en la extracción y procesamiento de materias primas o de vertidos industriales.

El exceso de nutrientes en ecosistemas acuáticos es una de las principales causas de la pérdida de biodiversidad en lagos y ríos. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) indica que la eutrofización afecta al 60% de los cuerpos de agua en América del Norte.

5. Calentamiento Global (2056,32 kg CO₂ eq)

El ciclo de vida del empaque emite gases de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global equivalente a 2056 kg de CO₂.

El impacto más alto en esta evaluación, el calentamiento global, este valor elevado indica una contribución significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente provenientes del uso de energía en la producción, transporte y procesamiento del plástico. Durante todo el ciclo de vida del PE-HD, la quema de combustibles fósiles y las emisiones indirectas de electricidad son los mayores contribuyentes.

Para mitigar este impacto, es fundamental mejorar la eficiencia energética de la cadena de suministro y fomentar el uso de fuentes renovables de energía.

6. Toxicidad cancerígena humana (0,12973 kg 1,4-DCB)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que la exposición prolongada a metales pesados como el cadmio y el mercurio está asociada con un mayor riesgo de cáncer y enfermedades renales.

Indica una exposición potencial a compuestos con efectos cancerígenos equivalentes a 0.13 kg de diclorobenceno.

Las emisiones de sustancias cancerígenas, como metales pesados y solventes, provienen de procesos químicos en la producción de polietileno. Estas sustancias representan un riesgo directo para los trabajadores y las comunidades cercanas a las plantas de producción, aunque el valor no es extremadamente alto, sugiere la necesidad de controles rigurosos en la fabricación y el uso del empaque para minimizar la exposición humana a sustancias potencialmente cancerígenas.

7. Toxicidad Humana no cancerígena (3,89789 kg 1,4-DCB)

La toxicidad no cancerígena es equivalente a casi 3.9 kg de diclorobenceno.

La Agencia de Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) ha documentado que la exposición prolongada a sustancias químicas como el tolueno y el benceno puede causar problemas neurológicos y hepáticos.

Este impacto mide el daño potencial de sustancias tóxicas que, aunque no son cancerígenas, pueden causar efectos crónicos en la salud humana, el valor significativamente mayor en comparación con la toxicidad cancerígena indica que la exposición a químicos no letales sigue siendo un problema relevante.

Esto puede estar vinculado a sustancias como plastificantes, estabilizadores y otros compuestos que pueden afectar la salud humana a largo plazo si no se gestionan adecuadamente, los ejemplos incluyen óxidos metálicos y solventes usados en el procesamiento de PE-HD.

8. Radiación Ionizante (14.7325 kBq Co-60 eq)

Se generan aproximadamente 14.73 kilobequereles (kBq) de radiación ionizante, equivalente al Cobalto-60.

Este impacto refleja la cantidad de radiación generada indirectamente a lo largo del ciclo de vida del empaque, principalmente debido al uso de electricidad en su producción, si la energía utilizada proviene de fuentes nucleares, este valor puede ser más alto.

Según el OIEA (2020), aunque la energía nuclear produce menores emisiones de CO₂, su manejo inadecuado puede causar contaminación radiactiva de larga duración.

El impacto proviene de la generación de electricidad a partir de energía nuclear utilizada en el ciclo de vida del PE-HD. La radiación ionizante afecta la salud humana y los ecosistemas debido a la liberación de isótopos radiactivos, como el cobalto-60, durante el manejo y almacenamiento de residuos nucleares.

9. Uso de suelo (0.00147 m²·a cultivo eq)

Aproximadamente 0.0015 metros cuadrados-año de suelo agrícola se utilizan o se ven afectados.

El uso del suelo está relacionado con las actividades agrícolas necesarias para obtener biocombustibles o productos químicos auxiliares en la fabricación del plástico. Aunque el impacto es relativamente bajo, refleja la presión en los ecosistemas para mantener la demanda industrial.

10. Ecotoxicidad Marina (0,3960 kg 1,4-DCB)

Estudios del PNUMA (2021) destacan que la contaminación marina afecta directamente la biodiversidad y puede bioacumularse en las cadenas alimentarias, afectando especies de alto valor ecológico y comercial.

El impacto tóxico en ecosistemas marinos equivale a 0.40 kg de diclorobenceno, se genera principalmente por el vertido de sustancias químicas tóxicas, como metales pesados y compuestos orgánicos persistentes, en cuerpos de agua que conectan con ecosistemas marinos.

Estos contaminantes provienen de las etapas de producción del plástico y de transporte y el valor, si bien es bajo, sugiere que el empaque tiene el potencial de afectar la vida marina, ya sea por la liberación de sustancias químicas tóxicas o la posible generación de micro plásticos.

11. Eutrofización Marina (0,00945 kg N eq)

Se liberan alrededor de 0.0094 kg de nitrógeno equivalente, contribuyendo a la eutrofización marina.

La eutrofización marina genera zonas muertas, donde los niveles de oxígeno son insuficientes para sustentar la vida marina. Las emisiones de compuestos nitrogenados, como óxidos de nitrógeno (NOx), son responsables de la eutrofización marina. Estas emisiones ocurren principalmente durante el transporte y generación de energía para la producción de PE-HD.

Aunque el valor es bajo, sugiere que existe una contribución a la contaminación marina, posiblemente debido a efluentes industriales.

12. Escasez de Recursos Minerales (0,05662 kg Cu eq)

El consumo de recursos minerales es equivalente a 0.056 kg de cobre, aunque el valor es menor en comparación con la escasez de recursos fósiles, indica el uso de minerales como cobre, aluminio y otros metales necesarios en la producción del empaque. Esto puede estar relacionado con el uso de catalizadores metálicos o maquinaria en el proceso de fabricación.

El USGS (2021) reporta que la minería para obtener estos metales afecta directamente la calidad del suelo y los ecosistemas locales, además de generar grandes cantidades de residuos.

13. Formación de Ozono, Salud Humana (12,5455 kg NOx eq)

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) son equivalentes a 12.54 kg, contribuyendo a la formación de ozono troposférico.

Este impacto proviene de las emisiones de NOx y compuestos orgánicos volátiles (VOC), que reaccionan con la luz solar para formar ozono troposférico, afectando la salud humana, el valor indica un impacto significativo, principalmente derivado del transporte y la producción del plástico.

La OMS (2020) establece que la exposición prolongada al ozono troposférico puede provocar enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente en poblaciones vulnerables.

14. Formación de Ozono, Ecosistemas Terrestres (12,6303 kg NOx eq)

Similar al impacto en la salud humana, este valor refleja la contaminación del aire que puede dañar la vegetación y alterar los ecosistemas y puede ser causante de la reducción de la producción agrícola. La reducción de emisiones de NOx mediante procesos más limpios y eficientes ayudaría a mitigar este efecto.

La EPA (2021) señala que altos niveles de ozono troposférico reducen significativamente el crecimiento de cultivos sensibles, como el maíz y el trigo, impactando la seguridad alimentaria.

15. Degradación de la Capa de Ozono (0,000137 kg CFC11 equivalente)

Representa un bajo potencial de degradación de la capa de ozono, equivalente a 0.00013 kg de CFC-11, este impacto está asociado al uso de productos químicos como halones y CFC en ciertas etapas del proceso de fabricación o refrigeración, es un indicador de contribución al agotamiento de la capa de ozono.

Un valor bajo, lo que indica es que el proceso de fabricación del empaque tiene un impacto mínimo en la reducción de la capa de ozono. Esto sugiere que no se utilizan grandes cantidades de sustancias destructoras de ozono en la producción del PE.

16. Acidificación Terrestre (6,71736 kg SO₂ eq)

Se emiten aproximadamente 6.72 kg de dióxido de azufre equivalente, el valor está asociado a las emisiones resultantes durante la producción de energía y transporte.

Este impacto está asociado con la emisión de dióxido de azufre (SO₂) y otros gases que contribuyen a la lluvia ácida, la cual puede degradar suelos y afectar la vegetación. La reducción de estas emisiones es clave para proteger los ecosistemas naturales.

17. Ecotoxicidad Terrestre (160,4598 kg 1,4-DCB)

La ecotoxicidad terrestre es causada por sustancias químicas liberadas durante el ciclo de vida del plástico, como metales pesados o productos químicos persistentes, que afectan directamente a los ecosistemas terrestres.

Estudios de la FAO (2021) muestran que estos contaminantes afectan negativamente la productividad agrícola y la biodiversidad.

Este es un valor muy alto, equivalente a 160 kg de dicloro benceno, lo que indica que los compuestos químicos involucrados en la fabricación y disposición del empaque pueden contaminar el suelo y afectar la biodiversidad terrestre. Esto sugiere la necesidad de una mejor gestión de residuos y una mayor adopción de prácticas de producción más limpias.

18. Consumo de Agua (-0,4122 m³)

Aproximadamente 0.41 metros cúbicos de agua se utilizan en todo el ciclo de vida del empaque, aunque el valor no es extremadamente alto, indica que el proceso de producción y limpieza del empaque requiere una cantidad significativa de agua, el resultado negativo sugiere que el sistema compensa parcialmente el consumo de agua, probablemente por procesos de reciclaje o reutilización en el ciclo de vida del empaque.

Según la ONU (2021) , los procesos que integran sistemas cerrados de agua pueden reducir significativamente el estrés hídrico industrial.

El análisis y los resultados de cada empaque, si bien, son complementarios, debemos realizarlos de forma independiente, los resultados anteriores nos muestran el impacto ambiental por el total del ciclo de vida de un empaque retornable de plástico PE, a continuación, se muestran los resultados para un empaque de cartón no reutilizable y con un solo uso a lo largo de su ciclo de vida.

Impact category	Reference unit	Result carton
	kg PM2.5	
Fine particulate matter formation	eq	0.23141567
Fossil resource scarcity	kg oil eq	537.341592
	kg 1,4-	
Freshwater ecotoxicity	DCB	0.06189891
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.00223346
Global warming	kg CO2 eq	1931.84801
	kg 1,4-	
Human carcinogenic toxicity	DCB	0.11467871
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-	
	DCB	3.41761233
	kBq Co-60	
Ionizing radiation	eq	12.9876681
	m2a crop	
Land use	eq	0.00047009
	kg 1,4-	
Marine ecotoxicity	DCB	0.38104796
Marine eutrophication	kg N eq	0.00832258
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0.05093816
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	12.0258177
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	12.1070069
	kg CFC11	
Stratospheric ozone depletion	eq	0.00012764

Terrestrial acidification	kg SO2 eq	6.2909253
	kg	1,4-
Terrestrial ecotoxicity	DCB	156.610374
Water consumption	m3	-0.320767

1. Formación de Material Particulado Fino (0.2314 kg PM2.5 eq)

Este valor indica que el ciclo de vida del empaque de cartón genera aproximadamente 0.23 kg de equivalentes de PM2.5.

La formación de material particulado fino durante la producción y transporte del empaque de cartón tiene un impacto significativo sobre la calidad del aire. Este resultado es comparable al impacto en el caso del empaque plástico, lo que indica que ambas opciones tienen emisiones similares de partículas finas durante su ciclo de vida.

El PM2.5 afecta la salud respiratoria humana y los ecosistemas. Se estima que cada kg de PM2.5 emitido tiene un efecto adverso equivalente en áreas urbanas densamente pobladas.

2. Escasez de Recursos Fósiles (537.34 kg oil eq)

El uso equivalente a 537 kg de petróleo refleja la dependencia de combustibles fósiles para energía y productos químicos durante la producción del cartón. Este impacto está relacionado tanto con la extracción de recursos como con el transporte y la transformación, o un uso intensivo de energía en procesos como el secado del cartón.

El consumo de recursos fósiles contribuye al agotamiento de reservas naturales, encareciendo los costos futuros de producción. Aunque el cartón es un material renovable, este resultado indica una alta dependencia de combustibles fósiles para la producción, especialmente en el transporte y procesamiento.

3. Ecotoxicidad en Agua Dulce (0.0619 kg 1,4-DCB)

Representa el potencial tóxico equivalente a 0.061 kg de 1,4-diclorobenceno para organismos acuáticos, generalmente vinculado a los químicos y tintas utilizadas en el procesamiento del cartón.

Un impacto relativamente bajo, indicando prácticas moderadamente limpias en términos de vertidos industriales

El impacto ecotóxico en agua dulce es similar al del empaque plástico, lo que sugiere que el proceso de fabricación y los residuos químicos tienen un peso importante. Los productos químicos utilizados en el blanqueamiento y preparación del cartón pueden ser responsables de esta cifra.

4. Eutrofización de Agua Dulce (0.00223 kg P eq)

Indica la liberación de nutrientes equivalentes a 0.0022 kg de fósforo, lo que puede promover el crecimiento excesivo de algas en cuerpos de agua dulce y afectar la biodiversidad.

Este impacto mide el aporte de nutrientes al agua dulce, causado principalmente por el vertido de aguas residuales en el proceso industrial. Aunque es bajo, la acumulación de nutrientes puede contribuir a la proliferación de algas y la pérdida de oxígeno en cuerpos de agua.

5. Calentamiento Global (1931.85 kg CO₂ eq)

El valor equivalente a 1931 kg de CO₂ refleja emisiones durante todo el ciclo de vida, desde la tala y procesamiento de madera hasta el transporte y el reciclaje.

El impacto es alto, pero más bajo que en el caso del empaque plástico. Este resultado refleja las emisiones totales de gases de efecto invernadero, principalmente del uso de combustibles fósiles y procesos energéticamente intensivos en la producción. Contribuye significativamente al cambio climático, generando impactos como aumento de temperaturas globales y eventos climáticos extremos.

6. Toxicidad Carcinogénica Humana (0.1147 kg 1,4-DCB)

Equivale a la exposición a 0.11 kg de 1,4-diclorobenceno, asociado a químicos utilizados en el blanqueado y la impresión del cartón.

El impacto carcinogénico está asociado con la exposición a compuestos peligrosos, como metales pesados y subproductos del procesamiento del cartón. Aunque el cartón tiene una

menor huella tóxica que el plástico, este valor muestra que sigue siendo un área de preocupación.

7. Acidificación Terrestre (6.2909 kg SO₂ eq)

Equivalente a 6.29 kg de SO₂, contribuyendo a la lluvia ácida y afectando el suelo y la vegetación.

Este valor refleja las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno durante el ciclo de vida del cartón, estas emisiones contribuyen a la lluvia ácida, que afecta los suelos, la vegetación y los cuerpos de agua.

8. Consumo de Agua (-0.3208 m³)

El resultado negativo sugiere que la producción de cartón tiene algún componente de ahorro neto de agua, posiblemente debido a la reutilización o reciclaje en el proceso industrial. Esto es una ventaja frente al plástico, que generalmente consume más agua en su producción.

9. Toxicidad Humana No Carcinogénica (3.4176 kg 1,4-DCB)

Equivalente a 3.4 kg de 1,4-diclorobenceno, refleja la exposición a metales pesados y otros contaminantes en el ciclo de vida del cartón.

El impacto en esta categoría refleja la liberación de sustancias químicas que, aunque no sean carcinógenas, son tóxicas para los seres humanos. Las fuentes incluyen compuestos como metales pesados liberados durante la fabricación del cartón, estas sustancias pueden causar problemas de salud a largo plazo, incluyendo daños a órganos o sistemas específicos como el hígado y los riñones.

10. Radiación Ionizante (12.9877 kBq Co-60 eq)

Equivale a la radiación de 12.98 kBq de Co-60, asociada a la producción de energía nuclear utilizada indirectamente.

Este resultado mide el impacto de la radiación ionizante asociada con el ciclo de vida del cartón, derivada principalmente del uso de energía nuclear en la generación de electricidad

para las plantas de producción, aunque es un valor moderado, indica la dependencia de redes energéticas con componentes nucleares.

11. Uso de Suelo (0.00047 m²a crop eq)

Implica el uso equivalente de 0.00047 m²-año de tierra agrícola, relacionado con la tala de árboles y la gestión forestal.

El impacto en el uso del suelo es relativamente bajo, lo que refleja un bajo requerimiento de tierra para la producción del cartón en comparación con otros materiales, esto se relaciona con la gestión eficiente de plantaciones forestales destinadas a la producción de papel y cartón.

El bajo impacto en esta categoría es positivo, ya que minimiza la degradación del suelo y la conversión de ecosistemas naturales.

12. Ecotoxicidad Marina (0.3810 kg 1,4-DCB)

Equivalente a 0.38 kg de 1,4-diclorobenceno, asociado a vertidos industriales y transporte marítimo.

El impacto eco tóxico marino proviene de vertidos y emisiones químicas que terminan en el mar, incluyendo tintes, adhesivos y subproductos del proceso de fabricación del cartón. Aunque el valor es moderado, destaca la importancia de mitigar los impactos sobre los ecosistemas marinos.

13. Eutrofización Marina (0.0083 kg N eq)

Este resultado refleja la contribución de nitrógeno a los cuerpos marinos, lo cual puede provocar un crecimiento excesivo de algas (floraciones algales nocivas). Aunque el impacto es bajo, es una variable crítica en la salud de los océanos.

14. Escasez de Recursos Minerales (0.0509 kg Cu eq)

Equivale a 0.051 kg de cobre, indicando el uso de metales en maquinaria.

El impacto en esta categoría mide la extracción y uso de recursos minerales (ej., cobre) en el ciclo de vida del cartón. Este valor es bajo, lo que indica que la producción de cartón

tiene una menor dependencia de materiales minerales en comparación con otros materiales de empaque.

15. Formación de Ozono, Salud Humana (12.0258 kg NOx eq)

Este impacto está relacionado con las emisiones de precursores de ozono troposférico, como óxidos de nitrógeno (NOx), que afectan negativamente la salud humana al contribuir a la formación de ozono a nivel del suelo.

Equivale a 12 kg de NOx, asociado a emisiones de vehículos y fábricas.

16. Formación de Ozono, Ecosistemas Terrestres (12.1070 kg NOx eq)

Equivalente a 12.1 kg de NOx.

Similar a la categoría anterior, estas emisiones afectan principalmente a los ecosistemas terrestres, dañando la vegetación y afectando procesos como la fotosíntesis.

17. Depleción de Ozono Estratosférico (0.00013 kg CFC11 eq)

Equivale a 0.00013 kg de CFC-11, relacionado con solventes y refrigerantes usados indirectamente.

El impacto es mínimo y refleja el uso limitado de compuestos clorofluorocarbonos (CFC) en el ciclo de vida del cartón.

18. Ecotoxicidad Terrestre (156.6104 kg 1,4-DCB)

Equivalente a 156.6 kg de 1,4-diclorobenceno, este impacto es considerablemente alto y refleja la liberación de sustancias químicas que afectan negativamente al suelo, como metales pesados o pesticidas utilizados en las plantaciones forestales, representado un riesgo significativo para la flora y fauna terrestres.

Ambos empaques representan un impacto para el medio ambiente, en distintos rubros uno mas que otro, sin embargo, es importante considerar que los resultados arrojados para cada tipo de empaque no son por un solo uso, sino por el total en su ciclo de vida, es decir, el empaque de cartón, no reutilizable representa un ciclo en toda su vida útil, mientras que el empaque de plástico, retornable, representa al menos 50 ciclos de uso en toda su vida.

Por lo tanto, los resultados reflejan el daño total causado a lo largo del ciclo de vida de cada tipo de empaque y es correcto dividir el total del resultado arrojado para el empaque de plástico entre los 50 ciclos considerados para el presente trabajo.

Sin embargo, para los resultados anteriores, se mantendrá el valor original ya que solo es el reflejo del daño causado y es posible interpretarlos teóricamente.

El siguiente paso para el ACV consiste en asignar ponderaciones a los resultados más relevantes, es decir a los de mayor impacto ambiental por ambos empaques.

Para la correcta asignación de ponderaciones es importante evaluar cada criterio utilizado para la asignación de variables de entrada y de salida, considerando su relevancia en términos ambientales y su contribución al impacto ambiental general. La selección de las categorías clave nos ayudara a reducir los datos a evaluar y dado que son etapa clave, reflejan el impacto de todas las categorías, estas categorías se identifican considerando los criterios:

- Magnitud del impacto: Las categorías con los valores más altos, ya que representan los mayores aportes al impacto ambiental total.
- Relevancia ambiental: Categorías que están estrechamente relacionadas con la sostenibilidad, como cambio climático, agotamiento de recursos, toxicidad y consumo de agua.
- Sensibilidad al material y a su uso: Impactos que son más relevantes para materiales como plástico y cartón (por ejemplo, emisiones de CO₂ y consumo de recursos fósiles).

Para efectos del presente trabajo y siguiendo los aspectos mencionados anteriormente, se identificaron las siguientes etapas clave:

- Calentamiento global (Global warming)
- Escasez de recursos fósiles (Fossil resource scarcity)
- Eutrofización de agua dulce (Freshwater eutrophication)
- Toxicidad no cancerígena humana (Human non-carcinogenic toxicity)
- Consumo de agua (Water consumption)

Tomando en cuenta las etapas clave de ambos procesos, se realiza primero la normalización por ciclo, como ya se había mencionado anteriormente, los resultados obtenidos reflejan el total por un ciclo de vida de cada producto, en este caso los resultados obtenidos para el cartón son los resultados que se ocuparan para el análisis, sin embargo, los resultados obtenidos para el empaque retornable de plástico PE, deben dividirse entre los ciclos efectivos de uso que tiene a lo largo de su ciclo de vida.

La siguiente formula, es la más común utilizada para realizar la normalización de un producto:

$$\text{Impacto normalizado} = \frac{\text{Impacto total del material}}{\text{Número de ciclos de vida}}$$

Por lo tanto, tomamos en cuenta nuestras etapas clave y los resultados arrojados por open LCa para poder aplicar la formula, tomando en cuenta que, el impacto total del material será el dato arrojado por nuestro software, y el número de ciclos de vida se considerara: 1 para empaque de cartón y 50 para empaque de plástico.

Impact Category	Unidad	Cartón	Plástico PE Total	Plástico PE por Ciclo
Global warming	kg CO ₂ eq	1931.85	2056.32	41.1264
Fossil resource scarcity	kg oil eq	537.34	570.01	11.4002
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.00223	0.00235	0.000047
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	3.42	3.9	0.078
Water consumption	m ³	-0.32	-0.41	-0.0082

Una vez que tenemos el valor por ciclo, se asignan ponderaciones manuales para las categorías de impacto, considerando que la suma de las ponderaciones debe ser igual a 100% dichas sumas deben estar justificadas dependiendo el impacto y el valor que se

obtenga en los resultados, para el presente trabajo se ocuparan las ponderaciones siguientes:

Categoría	Peso (%)	Justificación
Global warming	30%	Relevancia global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero.
Fossil resource scarcity	25%	Representa la dependencia de recursos no renovables.
Freshwater eutrophication	15%	Afecta ecosistemas sensibles.
Human non-carcinogenic toxicity	20%	Impacta directamente la salud humana por exposición a sustancias tóxicas.
Water consumption	10%	Relevante en regiones con escasez hídrica.

Ya que contamos con la ponderación manual de las etapas clave, el siguiente paso es hacer una multiplicación de la ponderación por el resultado normalizado para obtener el impacto ponderado de cada tipo de empaque

Categoría	Ponderación	Impacto Cartón	Impacto Cartón (Ponderado)	Plástico PE por Ciclo	Impacto Plástico PE por Ciclo (Ponderado)
Global warming	30%	1931.85	579.555	41.1264	12.33792
Fossil resource scarcity	25%	537.34	134.335	11.4002	2.85005
Freshwater eutrophication	15%	0.00223	0.0003345	0.000047	0.00000705
Human non-carcinogenic toxicity	20%	3.42	0.684	0.078	0.0156
Water consumption	10%	-0.32	-0.032	-0.0082	-0.00082

Obtenidos los resultados de la ponderación, se hace la suma de ellos para evaluar el impacto ambiental final de cada uno y determinar cuál es el óptimo en el ejercicio.

Impacto Total Ponderado (Cartón):

$$579.555 + 134.335 + 0.0003345 + 0.684 + (-)0.032 = 714.5423345$$

Impacto Total Ponderado (Plástico PE por Ciclo):

$$12.33792 + 2.85005 + 0.00000705 + 0.0156 + (-)0.00082 = 15.20275705$$

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, 714.55 para cartón y 15.20 para empaque retornable, podemos defender que el empaque de plástico tiene un impacto ambiental menor que el empaque desechable, lo que nos indica que, para reducir su impacto ambiental, Bosch debe optar por empaques retornables y darles al menos 50 ciclos de vida durante toda la vida útil del empaque.

En el hipotético caso de que el empaque retornable solo fuera apto para 30 ciclos de uso durante su ciclo de vida, los resultados se modificarían de la siguiente manera, tomando en cuenta que para la normalización, la división se tendría que modificar entre 30 ciclos, de tal manera que:

Impact Category	Unidad	Cartón	Plástico PE Total	Plástico PE por Ciclo
Global warming	kg CO ₂ eq	1931.85	2056.32	68.544
Fossil resource scarcity	kg oil eq	537.34	570.01	19.00033333
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.00223	0.00235	7.83333E-05
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	3.42	3.9	0.13
Water consumption	m ³	-0.32	-0.41	-0.013666667

Ahora, estos valores serán tomados en cuenta para el impacto ponderado, considerando la misma ponderación manual establecida para el impacto por 50 ciclos, esta ponderación se considera igual ya que se establece con base en los resultados arrojados por el software y la relevancia de cada factor ambiental afectado, sin importar el número de ciclos que se utilice.

Por lo tanto, tomando en cuenta los valores ponderados para los 50 ciclos, la suma del impacto ponderado es la siguiente:

Categoría	Ponderación	Impacto Cartón	Impacto Cartón (Ponderado)	Plástico PE por Ciclo	Impacto Plástico PE por Ciclo (Ponderado)
Global warming	30%	1931.85	579.555	68.544	20.5632
Fossil resource scarcity	25%	537.34	134.335	19.0003333	4.750083333
Freshwater eutrophication	15%	0.00223	0.0003345	7.8333E-05	0.00001175
Human non-carcinogenic toxicity	20%	3.42	0.684	0.13	0.026
Water consumption	10%	-0.32	-0.032	- 0.01366667	-0.001366667
Suma Total de impacto ponderado		714.5423345		25.33792842	

El resultado anterior nos muestra que el empaque retornable sigue siendo aun la mejor alternativa para reducir el impacto ambiental, pese a la reducción de sus ciclos de uso durante su ciclo de vida, pero es importante resaltar que entre mas usos se le den al empaque menor es su impacto ambiental, lo cual también contribuye a la imagen de la empresa como una ESR.

Para el trabajo se consideraron 50 ciclos, sin embargo, existen pruebas empíricas de que el empaque retornable de plástico PE puede durar más de 50 usos a lo largo del ciclo de vida, esto dependiendo del cuidado que se le dé durante cada uso. Este cuidado va desde el pre empaquetado hasta el desempaquetado, es decir engloba campos como transporte de empaque con o sin producto, lavado y almacenaje, así como cuidados como precaución al manejo de este y peso soportado para almacenar y estibar.

Por todo lo anterior podemos concluir que el empaque de plástico PE es la mejor opción para reducir el impacto ambiental de una empresa.

Hay que recordar que el análisis se hace desde una perspectiva ambiental y no financiera, por lo tanto, para determinar el empaque óptimo se tendría que realizar un análisis de costos financieros y no solo ambientales.

Otra manera de realizar un ACV es realizando un ejercicio de Montecarlo, para este ejercicio se generarán 1000 valores aleatorios en Excel, por cada dato de las categorías obtenidas en el software open lca.

Utilizaremos una desviación estándar de 10%, posteriormente calculamos la media, la mediana, percentil 5% y 95% valor mínimo y valor máximo, este procedimiento se hará con cada tipo de empaque, y debemos tomar en cuenta que las categorías de impacto pueden resultar distintas algunas, sin embargo, si tres o más categorías son iguales, podemos concluir que el ACV por ponderación es confiable.

Para el ejercicio de Monte Carlo es importante resaltar que:

- Si la distribución es simétrica, el impacto ambiental tiene una variabilidad baja.
- Si hay valores extremos, hay riesgo de que el impacto sea mayor en ciertas condiciones.
- Si el percentil 95% es mucho mayor que la media, existe una alta incertidumbre en los impactos.

Iniciaremos con el ejercicio para el empaque retornable, plástico PE, el cual nos arroja los siguientes resultados

Categoría	Valor	Desviación 10%	Media	Mediana	Percentil 5%	Percentil 95 %	mínimo	Máximo
Fine particulate matter formation	0.24198	0.02420	0.24118	0.24190	0.24190	0.28024	0.17505	0.31545
Fossil resource scarcity	570.01459	57.00146	571.71438	571.50552	571.50552	672.31572	377.88388	743.45582
Freshwater ecotoxicity	0.06039	0.00604	0.06016	0.06019	0.06019	0.07024	0.03950	0.07715
Freshwater eutrophication	0.00235	0.00023	0.00235	0.00236	0.00236	0.00272	0.00160	0.00328
Global warming	2056.32414	205.63241	2059.46699	2063.85306	2063.85306	2401.10724	1411.78515	2695.35577
Human carcinogenic toxicity	0.19733	0.01973	0.19744	0.19738	0.19738	0.22833	0.11710	0.25818
Human non-carcinogenic toxicity	3.89790	0.38979	3.88299	3.87420	3.87420	4.52260	2.34297	5.33474
Ionizing radiation	14.73254	1.47325	14.65937	14.63631	14.63631	16.99708	10.00119	20.15139
Land use	0.00148	0.00015	0.00148	0.00147	0.00147	0.00172	0.00104	0.00204
Marine ecotoxicity	0.39600	0.03960	0.39642	0.39752	0.39752	0.46220	0.27213	0.51295
Marine eutrophication	0.00945	0.00094	0.00947	0.00945	0.00945	0.01114	0.00624	0.01252
Mineral resource scarcity	0.05662	0.00566	0.05668	0.05680	0.05680	0.06601	0.03837	0.07509

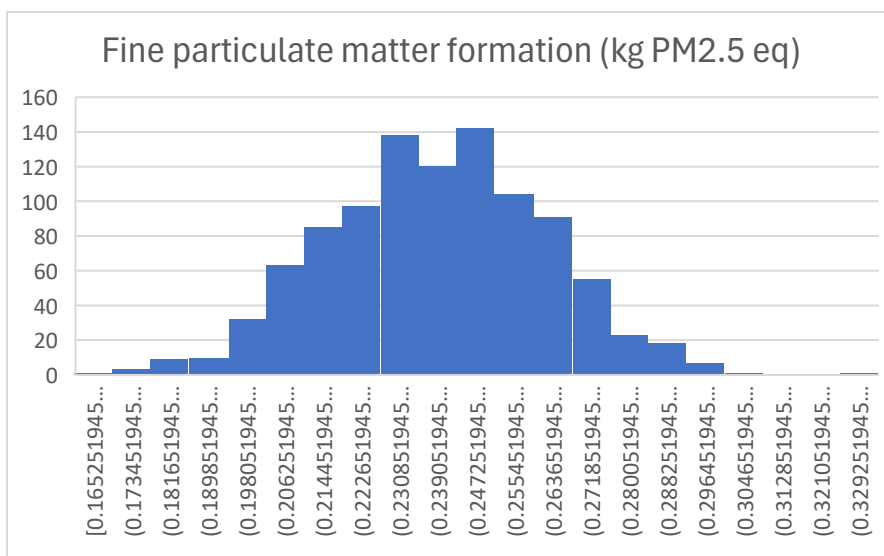
Ozone formation, Human health	12.54541	1.25454	12.57468	12.54891	12.54891	14.69493	9.15891	16.25924
Ozone formation, Terrestrial	12.63033	1.26303	12.64394	12.67988	12.67988	14.81671	7.68582	16.49539
Stratospheric ozone depletion	0.00014	0.00001	0.00014	0.00014	0.00014	0.00016	0.00010	0.00018
Terrestrial acidification	6.71736	0.67174	6.73522	6.72200	6.72200	7.92594	4.37866	8.72776
Terrestrial ecotoxicity	160.45979	16.04598	160.87720	160.92950	160.92950	185.87876	113.56841	213.64483
Water consumption	0.41220	0.04122	0.41286	0.41264	0.41264	0.48271	0.27819	0.52846

Ejercicio de Monte Carlo, elaboración propia con datos de open Ica

La simulación Monte Carlo nos da una distribución de resultados que permite entender variabilidad y riesgo, las categorías muestran los impactos ambientales promedio (valor medio y mediana), su variabilidad (desviación estándar, percentiles), así como extremos (mínimo y máximo).

Además de los datos anteriores realizamos un histograma por cada categoría que tenemos, estos nos sirven de apoyo para visualizar la distribución de los datos y se realiza con los 1000 datos aleatorios que obtenemos del resultado principal, a continuación, mostramos los histogramas de cada categoría, acompañado de un breve análisis de cada resultado.

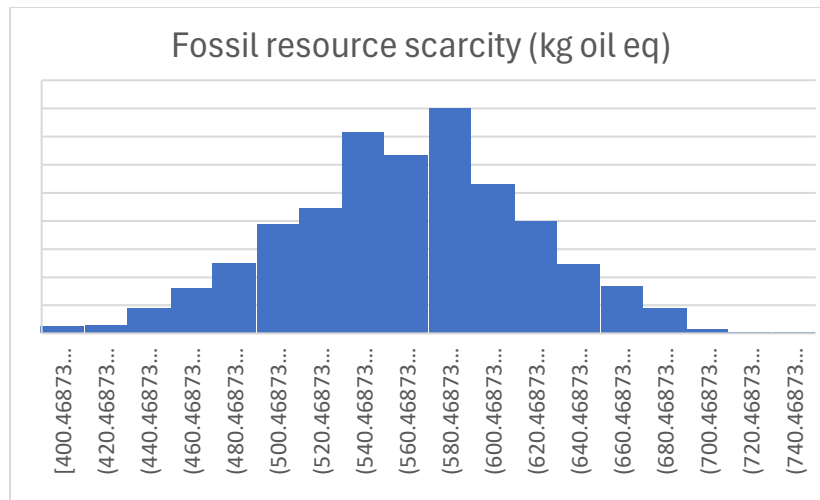
1. Fine particulate matter formation



Este valor representa la formación de material particulado fino, que afecta la calidad del aire y la salud humana, el histograma muestra baja dispersión, lo que significa que la variabilidad del impacto es controlada y predecible en los procesos industriales de PE.

Con un valor medio de 0.2419 kg PM2.5 eq, el empaque contribuye a la formación de material particulado fino en la atmósfera. La desviación estándar indica que los valores pueden variar ± 0.024 , en el peor caso, puede llegar a 0.3154 lo que podría empeorar la contaminación del aire en ciertas condiciones.

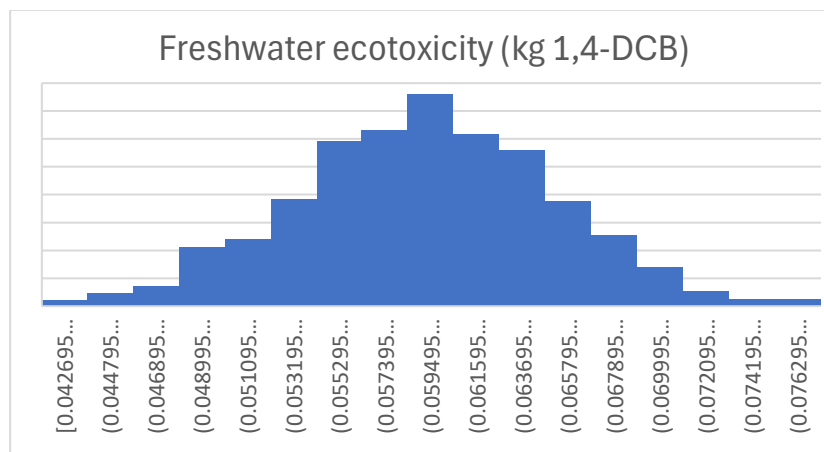
2. Fossil resource scarcity



El promedio de 570 kg oil eq indica que la producción del empaque depende fuertemente del petróleo y otros combustibles fósiles, en escenarios extremos, el valor llega a 743 kg, lo que sugiere un alto consumo energético y dependencia de recursos no renovables.

El histograma indica una distribución con colas hacia valores elevados, evidenciando escenarios donde el uso de combustibles fósiles es más intensivo.

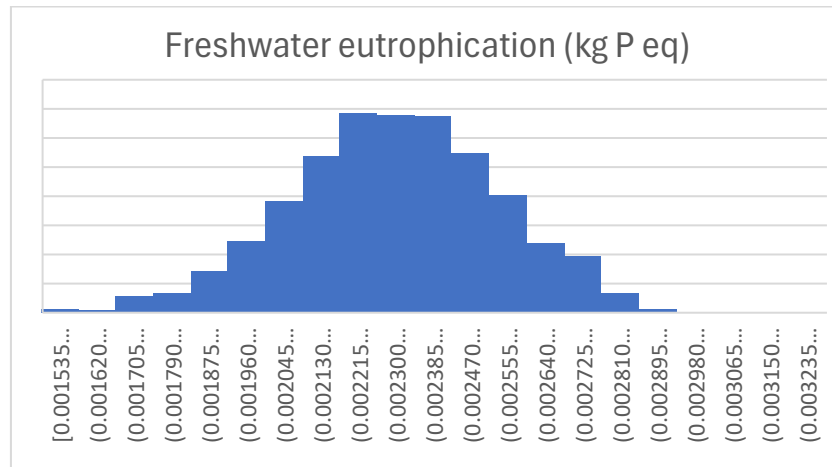
3. Freshwater ecotoxicity



Con una media de 0.0604 kg de 1,4-DCB, el empaque puede liberar sustancias tóxicas en cuerpos de agua dulce, el percentil 95 % (0.0702) muestra que en situaciones de alta contaminación el impacto puede ser hasta un 16 % mayor.

La toxicidad acuática es baja y estable, con poca variabilidad en el histograma, indicando un buen control de emisiones tóxicas al agua en la producción de PE.

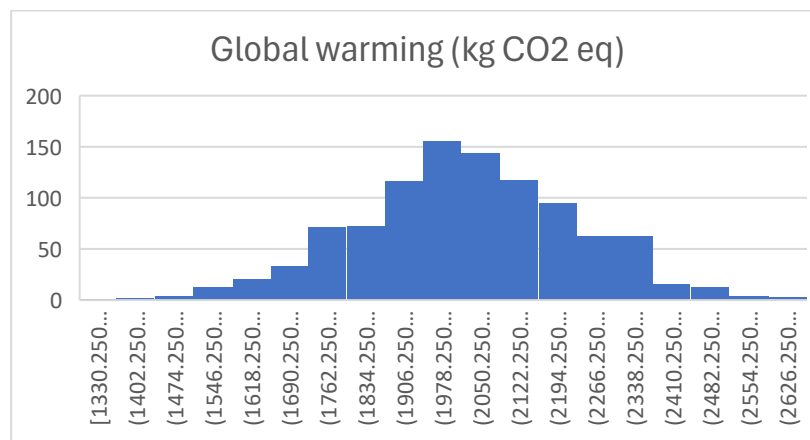
4. Freshwater eutrophication



El impacto es bajo (0.00235 kg P eq), pero no insignificante, si el empaque genera descargas de fósforo, podría contribuir al crecimiento excesivo de algas, afectando la biodiversidad acuática.

El histograma muestra una curva ajustada, lo que podría indicar que la eutrofización de agua dulce es mínima.

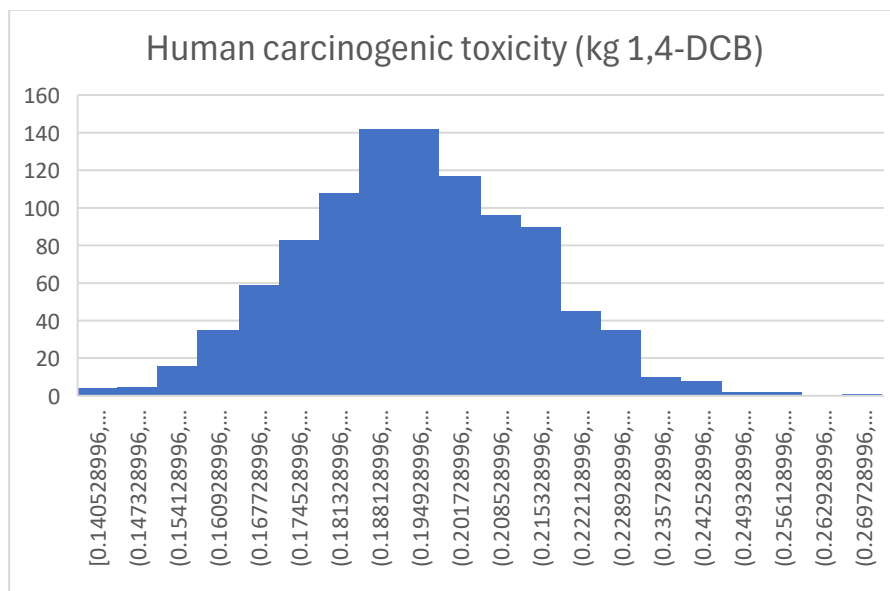
5. Global Warming



Con un valor medio de 2056 kg CO₂ eq, la producción y ciclo de vida del empaque contribuyen significativamente al calentamiento global, en el peor de los casos, puede alcanzar hasta 2695 kg CO₂ eq, lo que indica un alto nivel de emisiones de gases de efecto invernadero.

La huella de carbono es el impacto más elevado, el histograma muestra una amplia dispersión, reflejando variabilidad asociada a fuentes energéticas y eficiencia en producción.

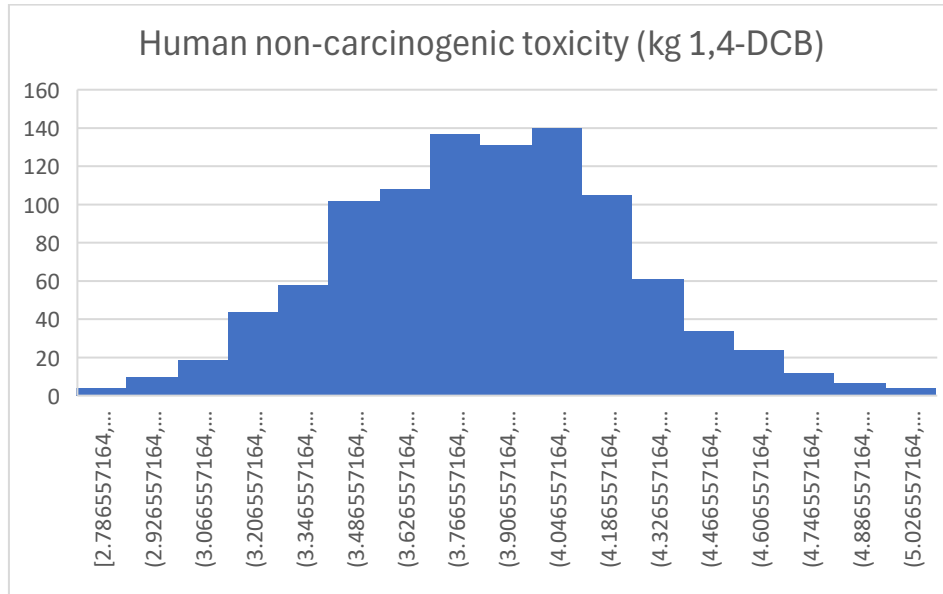
6. Human carcinogenic toxicity



El promedio de 0.1973 kg 1,4-DCB indica la presencia de sustancias con potencial cancerígeno, si bien el valor es bajo comparado con otros impactos, la toxicidad acumulada podría representar riesgos en el manejo y disposición del empaque.

Los valores son bajos, pero con cierta variabilidad, el histograma indica que en algunos escenarios la exposición a compuestos cancerígenos puede aumentar.

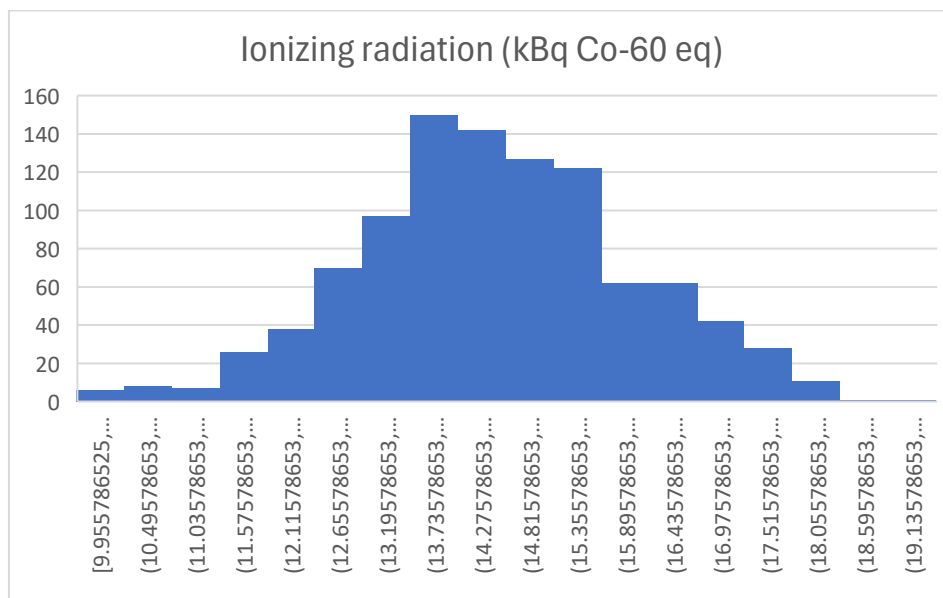
7. Human non carcinogenic toxicity



El valor medio (3.89 kg 1,4-DCB) y el percentil 95 % (4.52) indican que la exposición prolongada a este empaque podría generar efectos adversos en la salud humana sin ser necesariamente cancerígenos.

Impacto elevado y con dispersión notable, el histograma muestra que la toxicidad no cancerígena puede variar significativamente según el origen y control de procesos.

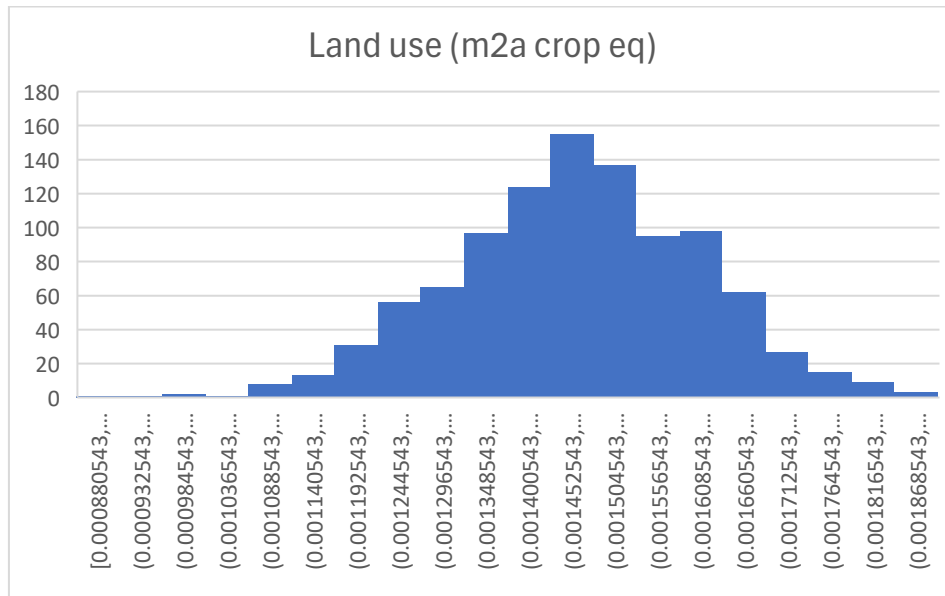
8. Ionizing radiation



Con una media de 14.73 kBq Co-60 eq, este empaque tiene una relación indirecta con fuentes de energía nuclear o procesos que generan radiación, su impacto podría estar asociado con el uso de electricidad en fabricación.

La radiación ionizante presenta una dispersión moderada el histograma muestra valores estables con algunos escenarios extremos ligados a la intensidad energética del proceso.

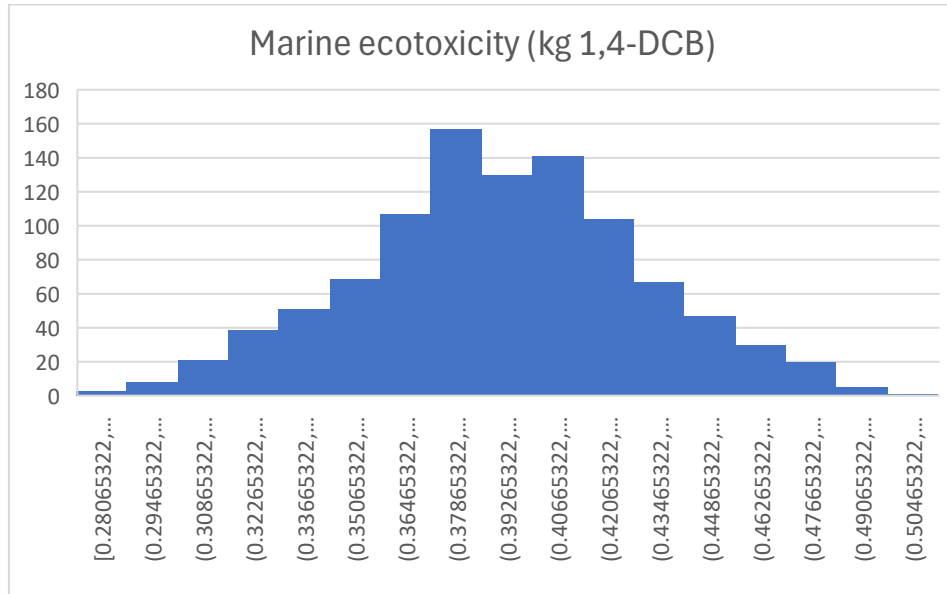
9. Land use



El impacto en uso de tierras agrícolas es casi insignificante (0.00147 m²/año), esto es positivo comparado con empaques de papel o bioplásticos que requieren mayor cantidad de materia prima renovable.

El uso del suelo es bajo y constante, el histograma es estrecho, lo que refleja poca variabilidad en el requerimiento de tierras.

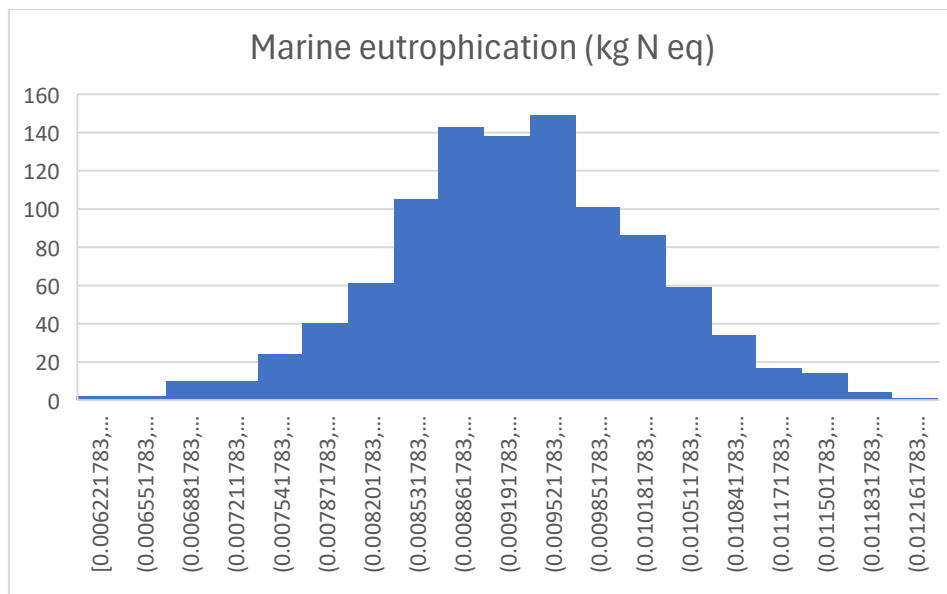
10. Marine ecotoxicity



El valor medio (0.396 kg 1,4-DCB) y el rango máximo de 0.5129 indican que los residuos plásticos y sustancias químicas pueden representar un riesgo para organismos marinos.

El impacto es moderado, y el histograma muestra cierta dispersión, indicando posibles variaciones en descargas contaminantes al ambiente marino.

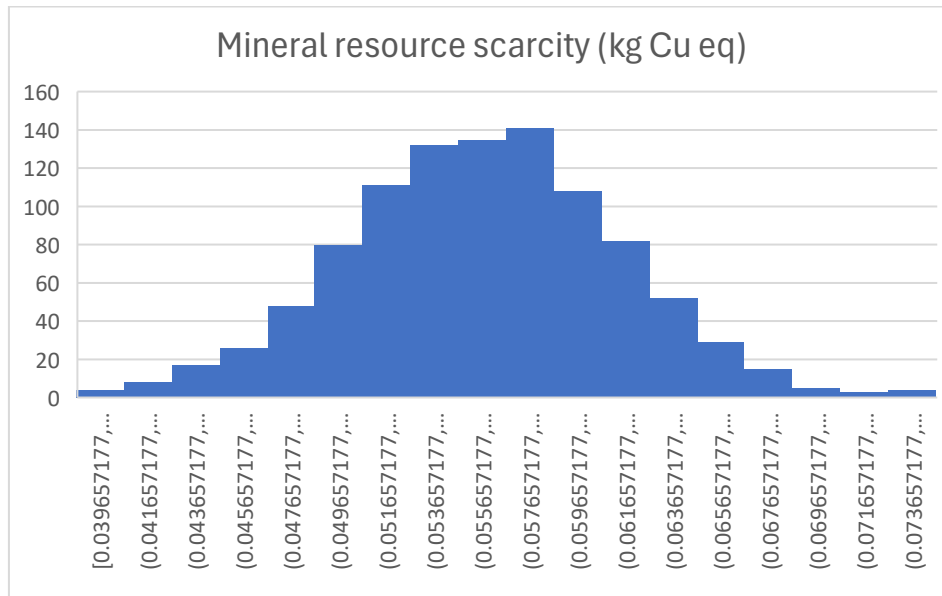
11. Marine eutrophication



Aunque el valor medio es bajo (0.00945 kg N eq), el percentil 95 % sugiere que en escenarios extremos podría aumentar en un 18 %, favoreciendo la proliferación de algas y afectando el oxígeno en el agua.

El histograma muestra una distribución ajustada con poca variabilidad, reflejando un control en la generación de nutrientes hacia ambientes marinos.

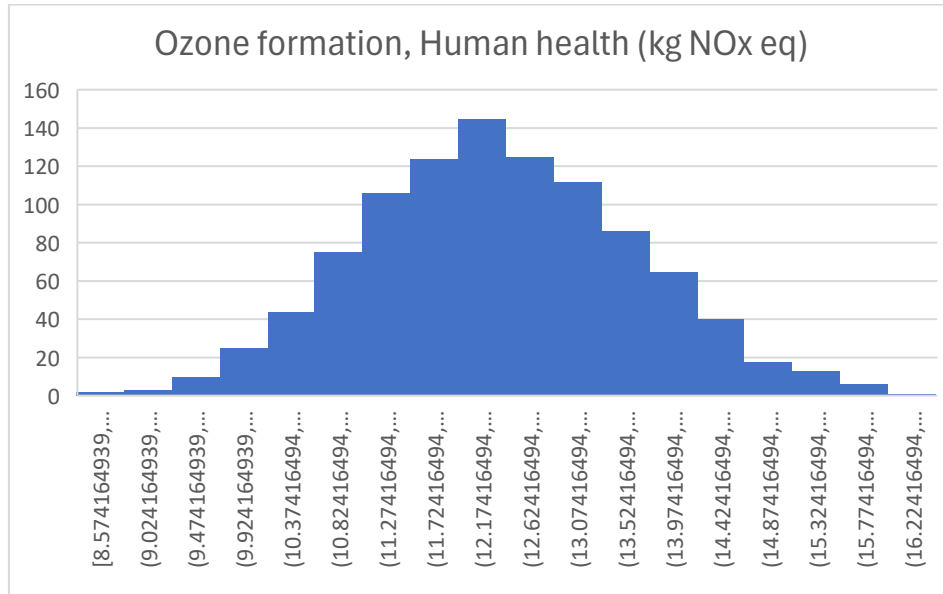
12. Mineral resource scarcity



El impacto en el uso de recursos minerales (0.0566 kg Cu eq) es moderado, reflejando la presencia de metales en procesos de producción.

Uso de recursos minerales moderado y estable en el histograma refleja poca variabilidad, indicando procesos bien controlados.

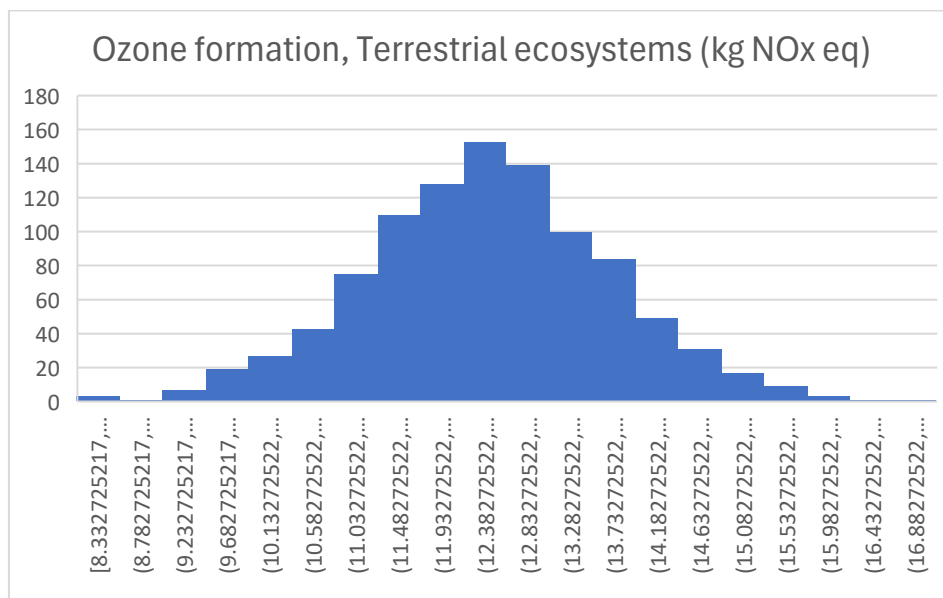
13. Ozone formation, human health



Con 12.54 kg NOx eq, este impacto afecta la calidad del aire y la salud humana, la variabilidad es significativa, con máximos de hasta 16,25 kg NOx eq en escenarios más contaminantes.

El histograma muestra una dispersión moderada, señalando que las emisiones que contribuyen a la formación de ozono varían dependiendo del tipo de energía utilizada.

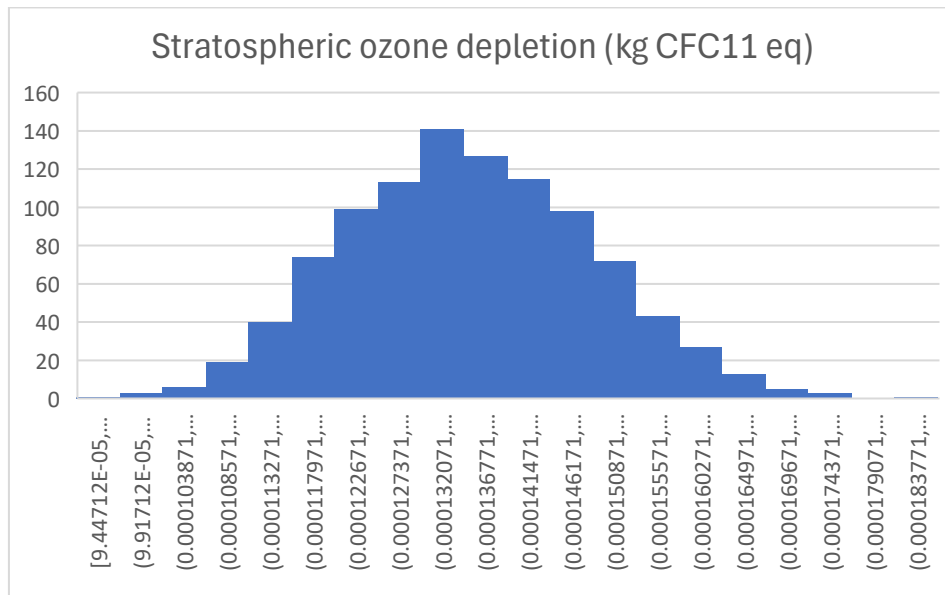
14. Ozone formation terrestrial ecosystems



Similar al impacto en salud, con valores de hasta 16.49 kg NOx eq. la producción de este empaque contribuye a la generación de ozono superficial, dañando la vegetación.

Comportamiento similar al anterior, afectado ecosistemas terrestres, el histograma revela cierta variabilidad en escenarios de mayor impacto.

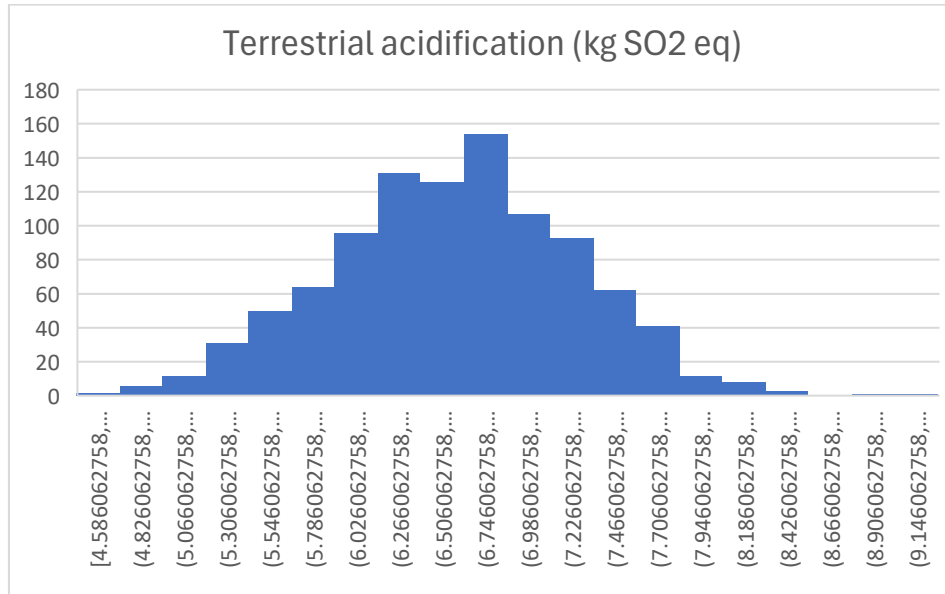
15. Stratospheric ozone depletion



Aunque el valor es extremadamente bajo (0.000137 kg CFC11 eq), cualquier contribución a la destrucción del ozono estratosférico es preocupante, ya que protege contra la radiación UV.

Impacto muy bajo y con histograma extremadamente estrecho, demostrando estabilidad y bajo riesgo en esta categoría.

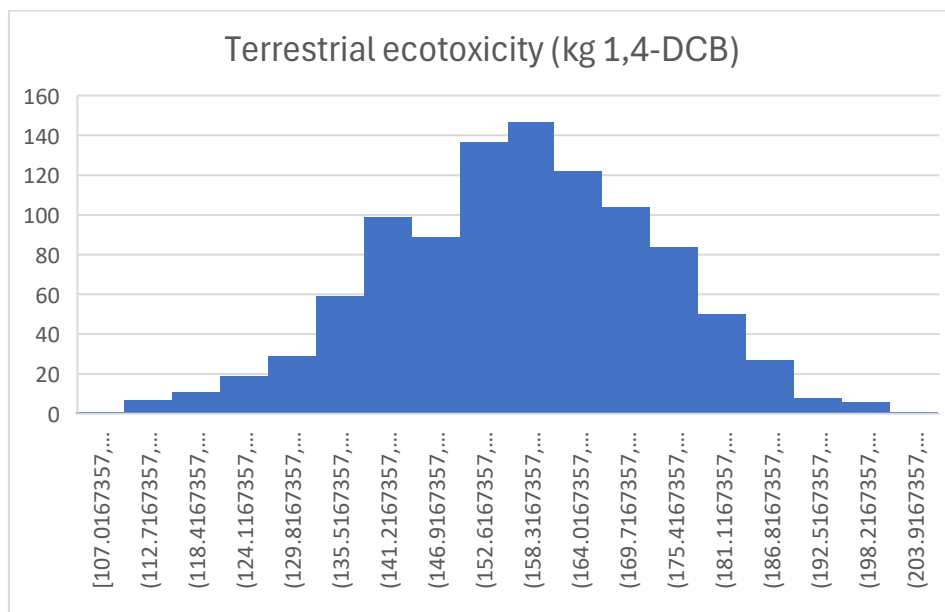
16. Terrestrial acidification



El promedio de 6.71 kg SO2 eq indica que la producción de este empaque contribuye a la acidificación del suelo y cuerpos de agua, en el peor escenario, este impacto llega a 8,72 kg.

La acidificación terrestre presenta dispersión moderada en el histograma, reflejando variabilidad asociada a emisiones industriales.

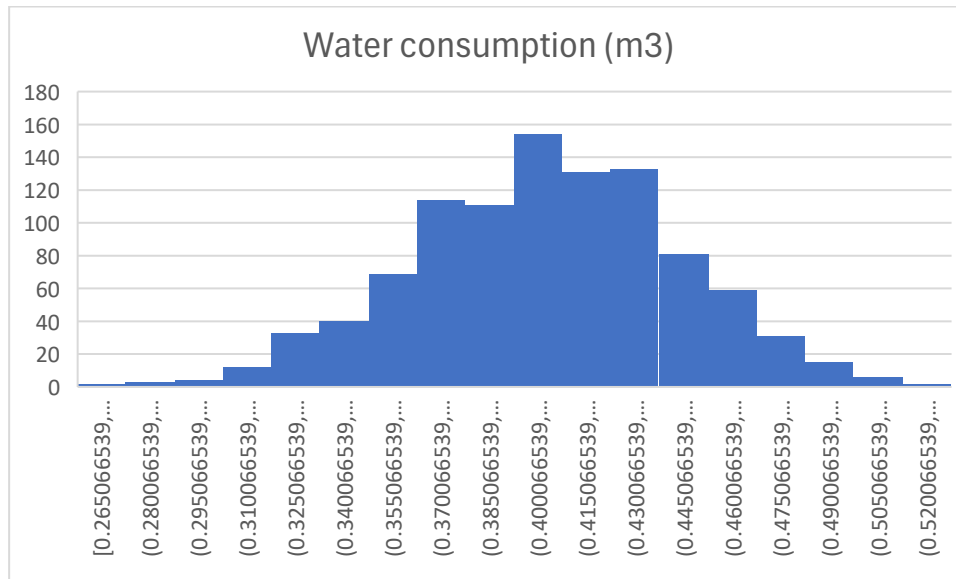
17. Terrestrial ecotoxicity



Con un valor medio de 160.46 kg 1,4-DCB y un percentil 95 % de hasta 185.87, este es uno de los impactos más críticos, la contaminación del suelo por sustancias tóxicas es una gran preocupación en el manejo de residuos plásticos.

Alto impacto con histogramas que muestran colas hacia valores elevados, indicando escenarios donde la contaminación del suelo es significativa.

18. Water consumption



La media es 0.4122 m³, con variabilidad moderada, comparado con empaques de cartón o vidrio, el consumo de agua en la producción de plástico es menor.

El consumo de agua es moderado, el histograma es simétrico y estable, mostrando poco riesgo de variabilidad inesperada.

Según los resultados analizados podemos identificar categorías con mayor variabilidad, es decir que pueden cambiar drásticamente, como lo son: calentamiento global (± 205 kg CO₂ eq), escasez de recursos fósiles (± 57 kg de petróleo eq) y ecotoxicidad terrestre (± 16 kg 1,4-DCB).

Así como categorías de alto impacto únicamente para el empaque retornable, es decir este análisis no toma en cuenta las categorías en conjunto para ambos tipos de empaque, por lo tanto, las categorías de impacto para el empaque retornable son:

Categoría	Valor medio	Explicación
Calentamiento global (kg CO2 eq)	2056,32 kg de CO2 equivalente	Es, sin duda, el impacto más grande. Representa la gran huella de carbono generada por la producción y ciclo de vida del empaque. Muy relevante para la contribución al cambio climático.
Escasez de recursos fósiles (kg de petróleo eq)	570,01 kg de aceite equivalente	Altísimo consumo de combustibles fósiles, lo que implica dependencia de recursos no renovables y gran gasto energético.
Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DCB)	160,45 kilogramos de 1,4-DCB	Muy alto riesgo de toxicidad para el suelo, afectando ecosistemas terrestres y la salud de la fauna y flora local.
Radiación ionizante (kBq Co-60 eq)	14,73 kBq Co-60 eq	Aunque es indirecto, la radiación ionizante proviene del uso energético asociado a procesos industriales y es un indicador importante de impactos en la cadena de suministro.
Formación de ozono (Salud humana y terrestre)	~12,5 - 12,6 kg de NOx equivalente	Contribuye tanto a la contaminación atmosférica como a problemas de salud pública y daño a los ecosistemas terrestres.

Esas categorías representan mayor impacto en el proceso del empaque retornable, sin embargo, podemos también destacar:

- Toxicidad humana no cancerígena (3,89 kg 1,4-DCB): Impacto importante en la salud humana.
- Ecotoxicidad marina (0,39 kg 1,4-DCB): Riesgo moderado pero preocupante para fauna marina.

Ahora bien, una vez que tenemos el análisis para el empaque retornable procedemos a hacer el mismo análisis para el empaque desechable, de cartón, los resultados del ejercicio de monte Carlo de cartón están especificados en la siguiente tabla.

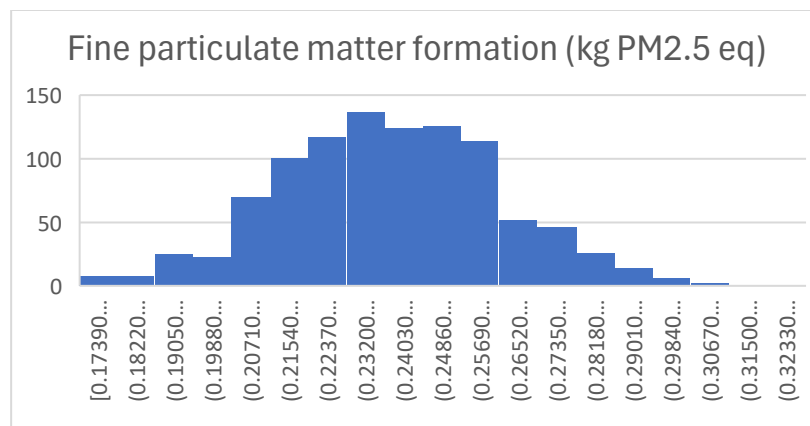
Impact Category	Valor	Desviación 10%	Media	Mediana	Percentil 5%	Percentil 95 %	mínimo	Máximo
Fine particulate matter formation	0.24198	0.02420	0.24142	0.24172	0.24172	0.27769	0.16425	0.31280

Fossil resource scarcity	570.01459	57.00146	572.53284	572.25986	572.25986	663.44675	384.03660	780.75000
Freshwater ecotoxicity	0.06039	0.00604	0.06020	0.05998	0.05998	0.07059	0.04074	0.07797
Freshwater eutrophication	0.00235	0.00023	0.00234	0.00234	0.00234	0.00272	0.00152	0.00302
Global warming	2056.32414	205.63241	2039.19153	2042.89861	2042.89861	2372.89457	1416.99920	2692.53534
Human carcinogenic toxicity	0.19733	0.01973	0.19645	0.19629	0.19629	0.22589	0.13361	0.26202
Human non-carcinogenic toxicity	3.89790	0.38979	3.89730	3.88040	3.88040	4.57579	2.67112	5.21947
Ionizing radiation	14.73254	1.47325	14.74344	14.74415	14.74415	17.20471	10.43505	19.60310
Land use	0.00148	0.00015	0.00147	0.00147	0.00147	0.00172	0.00096	0.00197
Marine ecotoxicity	0.39600	0.03960	0.39741	0.39741	0.39741	0.46044	0.23185	0.51785
Marine eutrophication	0.00945	0.00094	0.00942	0.00942	0.00942	0.01100	0.00691	0.01222
Mineral resource scarcity	0.05662	0.00566	0.05664	0.05667	0.05667	0.06590	0.04005	0.07411
Ozone formation, Human health	12.54541	1.25454	12.51743	12.47312	12.47312	14.61647	8.67360	16.33010
Ozone formation, Terrestrial	12.63033	1.26303	12.64275	12.64492	12.64492	14.84807	8.60460	18.01026
Stratospheric ozone depletion	0.00014	0.00001	0.00014	0.00014	0.00014	0.00016	0.00009	0.00018
Terrestrial acidification	6.71736	0.67174	6.73112	6.74393	6.74393	7.81328	4.62758	8.77596

Terrestrial ecotoxicity	160.45979	16.04598	160.23178	160.82925	160.82925	187.22474	98.61839	210.58145
Water consumption	0.41220	0.04122	0.41128	0.41320	0.41320	0.47481	0.28779	0.56349

Al igual que el empaque retornable, los resultados están acompañados de un histograma por cada categoría considerada, a continuación, se explica brevemente el impacto, considerando sus resultados y el histograma para cada categoría.

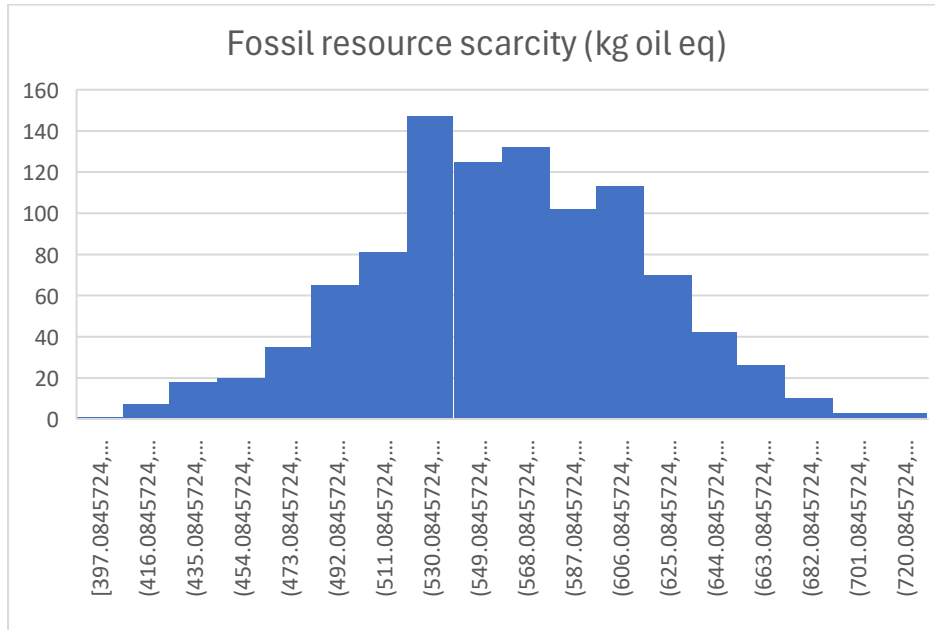
1. Fine particulate matter formation



El valor medio es de 0.24142 kg PM2.5 eq. con una dispersión baja, el percentil 5 % y 95 % son casi idénticos, lo que indica estabilidad en la distribución, sin embargo, los valores extremos muestran que en ciertos escenarios la emisión puede ser hasta un 30% mayor.

La distribución de los valores muestra variabilidad en la generación de estas partículas, con una tendencia central alrededor de la media y algunos valores extremos que indican posibles variaciones en los procesos de producción y disposición final del cartón.

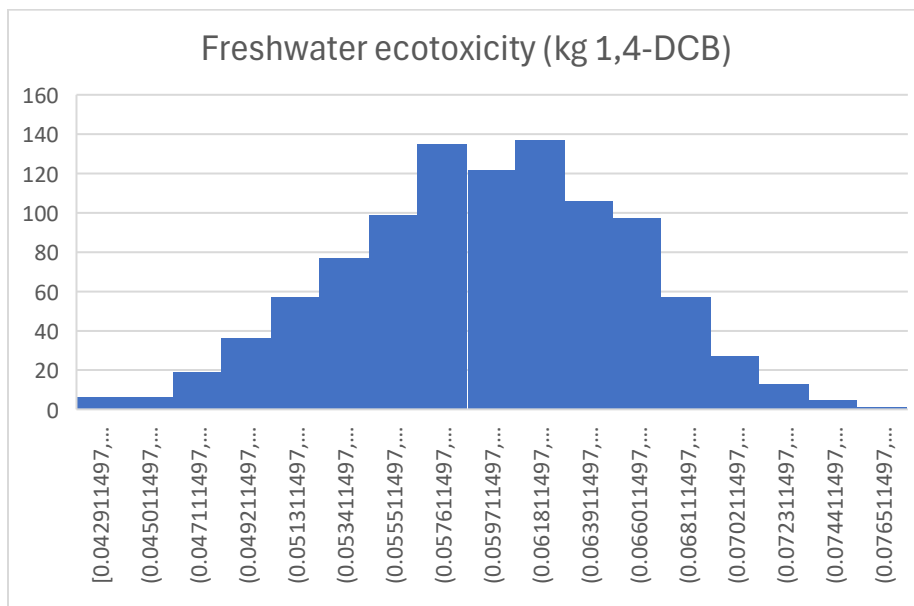
2. Fossil resource scarcity



El valor medio es de 572.53 kg oil eq, pero con alta dispersión, alcanzando hasta 780.75 kg en algunos escenarios, esto indica que el impacto depende de factores como el origen de la energía utilizada en el proceso productivo.

La distribución muestra que la mayoría de los valores están concentrados en un rango estrecho, lo que sugiere que el consumo de recursos fósiles es relativamente estable en los distintos escenarios de simulación.

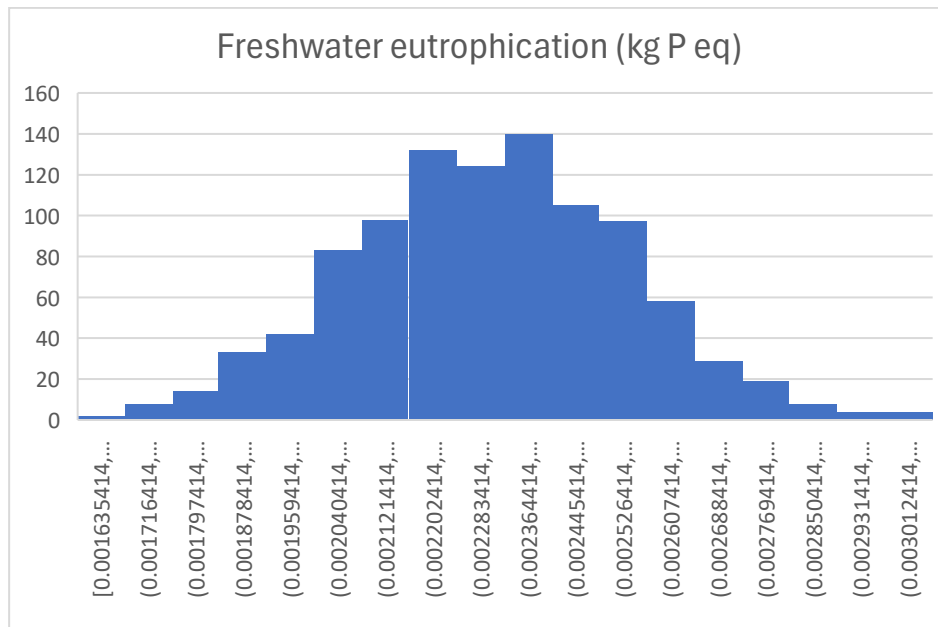
3. Freshwater ecotoxicity



El valor medio es de 0,06020 kg 1,4-DCB, con una distribución estable, los valores más altos indican un impacto ecológico significativo en escenarios específicos, posiblemente por variaciones en insumos y procesos de producción.

Se observa una distribución con una ligera asimetría, lo que sugiere que algunos escenarios pueden presentar un impacto significativamente mayor que otros en la ecotoxicidad del agua.

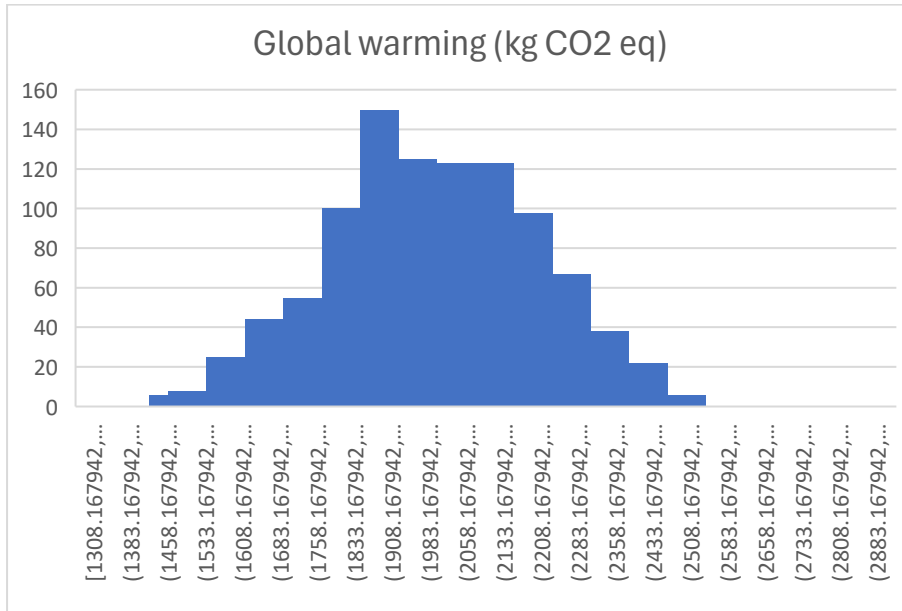
4. Freshwater eutrophication



El valor promedio es de 0.00234 kg P eq, con baja variabilidad, los valores extremos sugieren que ciertos procesos generan más nutrientes que otros, afectando la calidad del agua.

La distribución es relativamente homogénea, lo que indica que el impacto en la eutrofización no varía mucho entre las distintas simulaciones del modelo.

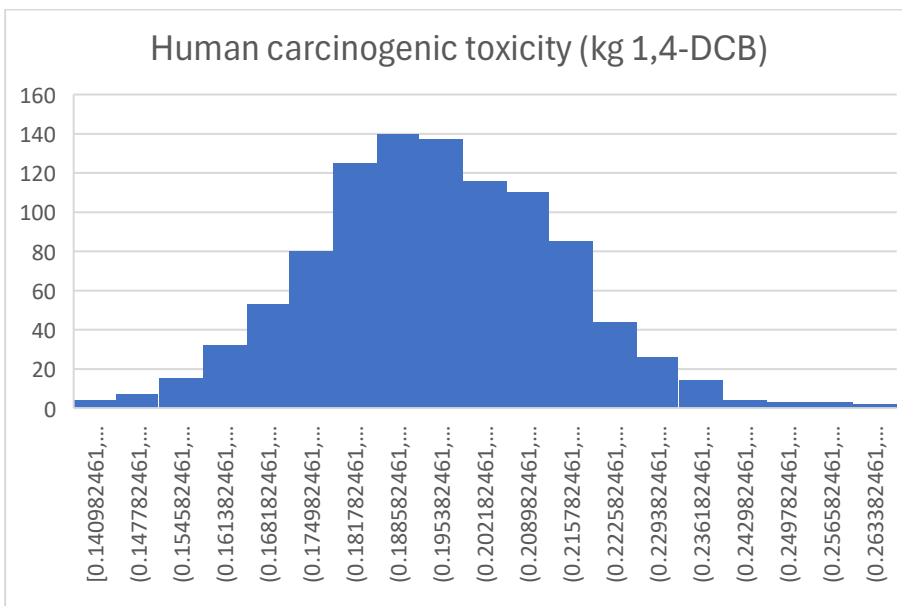
5. Global warming



La media es de 2039.19 kg CO₂ eq, pero la variabilidad es amplia, con escenarios donde las emisiones alcanzan hasta 2692.53 kg CO₂ eq. esto sugiere que, en algunas condiciones, el impacto del ciclo de vida del empaque es mucho mayor.

La distribución presenta una tendencia central clara, con algunos valores extremos que reflejan posibles variaciones en la fuente de energía utilizada en la producción del cartón.

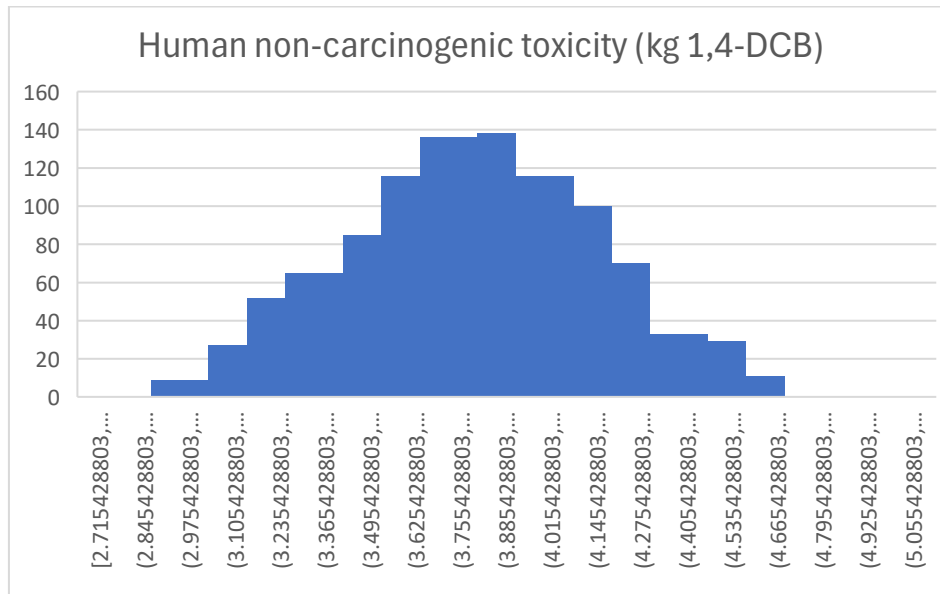
6. Human carcinogenic toxicity



El valor medio es de 0,19645 kg 1,4-DCB, con un rango entre 0,13361 y 0,26202, se observa que en algunos escenarios el riesgo de exposición a sustancias cancerígenas es mayor, lo que indica que la elección de materiales y procesos influye en la toxicidad.

Se observa una variabilidad relativamente baja, lo que sugiere que el impacto de este factor es más predecible en comparación con otros indicadores.

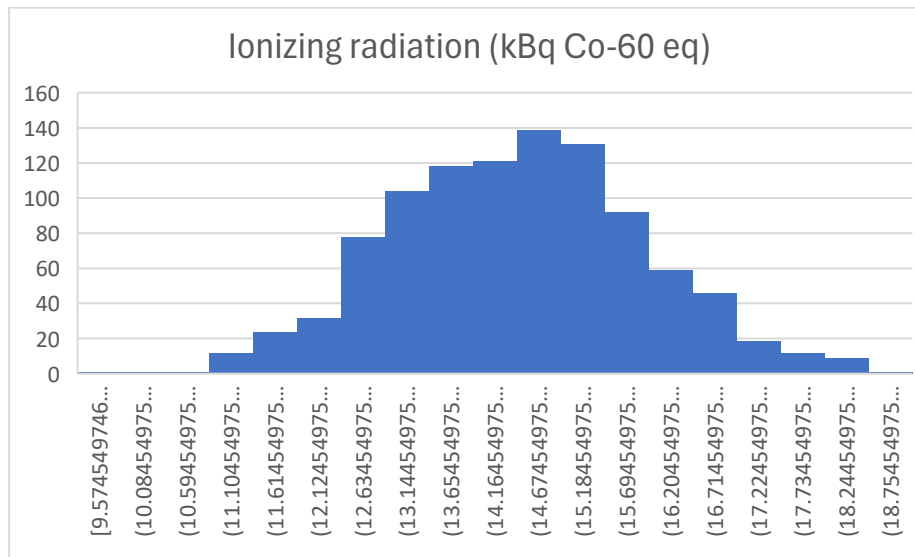
7. Human non carcinogenic toxicity



La media es de 3,89 kg 1,4-DCB, con escenarios en los que se alcanzan hasta 5,21 kg, esto sugiere que, en algunos casos, la liberación de sustancias tóxicas no cancerígenas es elevada.

La distribución es más dispersa, lo que indica que en ciertos escenarios el impacto puede ser significativamente mayor dependiendo de los materiales y procesos utilizados.

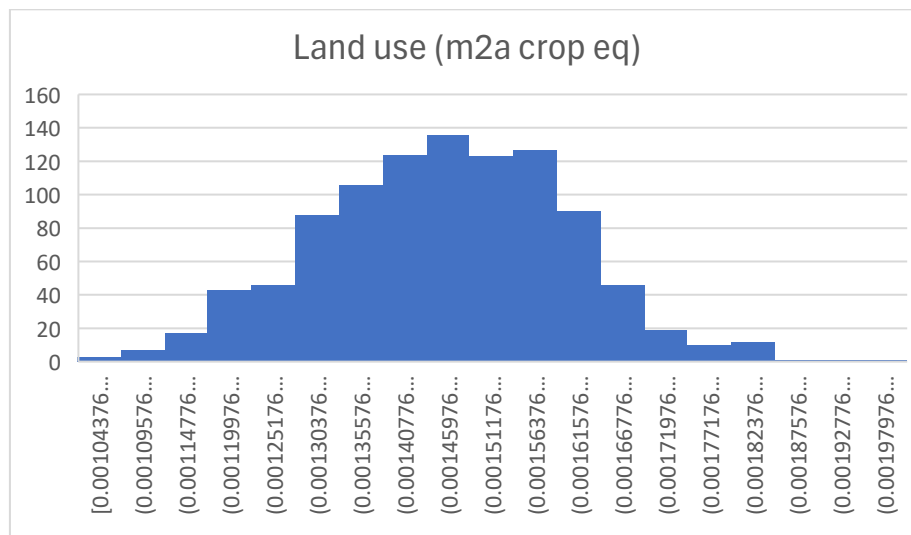
8. Ionizing radiation



El valor medio es de 14,74 kBq Co-60 eq, con un rango amplio de entre 10,43 y 19,60 kBq. esto indica que la variabilidad en el tipo de energía utilizada en la producción influye en la exposición a la radiación.

La variabilidad es baja, lo que sugiere que este impacto es relativamente constante en los distintos escenarios.

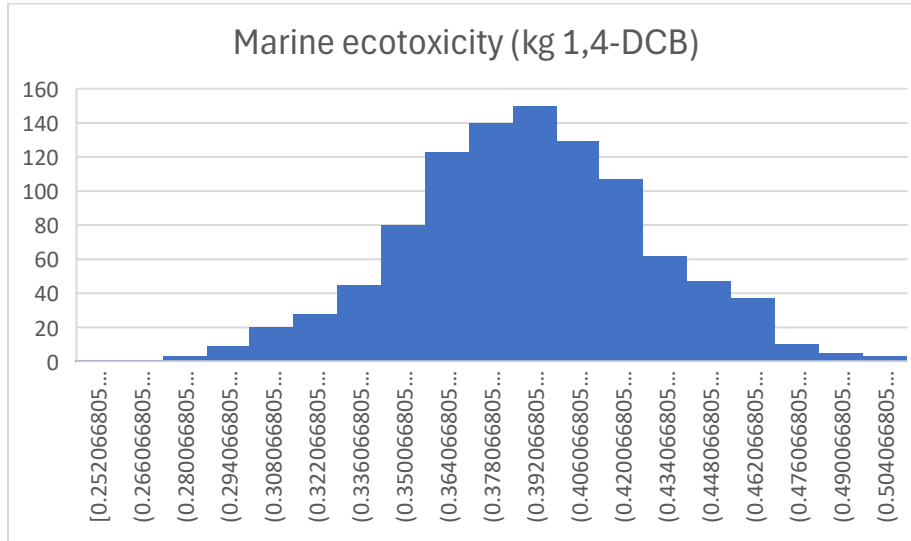
9. Land use



La media es de 0.00147 m²a, con una dispersión baja, los valores más altos reflejan escenarios donde el uso de materiales con mayor demanda de tierra aumenta el impacto ambiental.

La distribución muestra que en algunos casos el uso de suelo es significativamente mayor, posiblemente debido a diferencias en la fuente de materia prima.

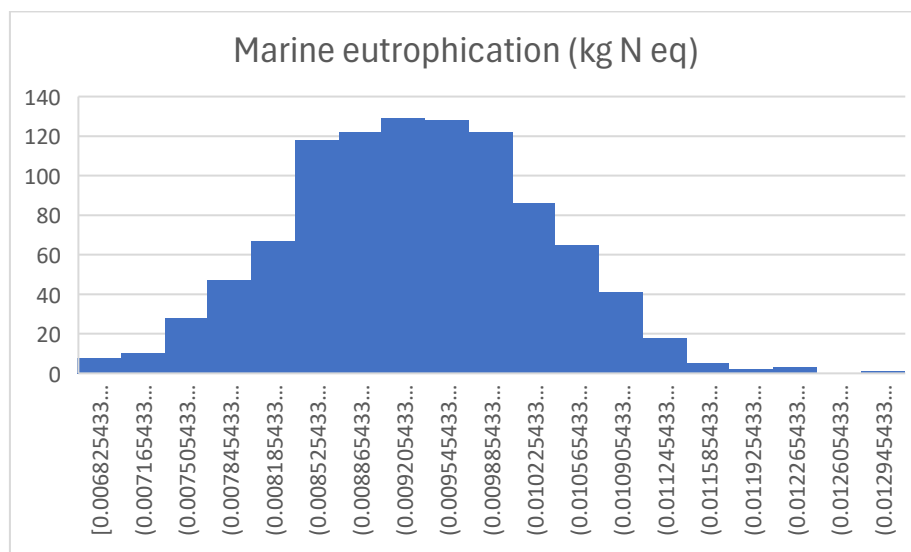
10. Marine ecotoxicity



El valor medio es de 0,39741 kg 1,4-DCB, con una variabilidad moderada, en algunos escenarios, el impacto sobre la vida marina puede ser hasta un 30% mayor.

Se observa una variabilidad moderada, lo que sugiere que algunos escenarios pueden tener un impacto considerablemente mayor en la toxicidad marina.

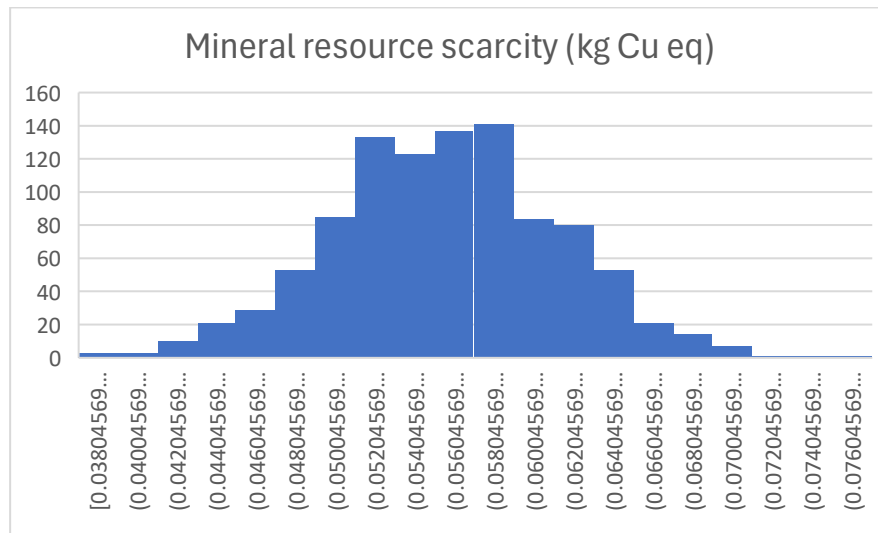
11. Marine eutrophication



La media es de 0.00942 kg N eq, con baja variabilidad, sin embargo, en los escenarios de mayor impacto, el aporte de nutrientes es un 30% mayor.

La mayoría de los valores se agrupan alrededor de la media, lo que indica que este impacto es relativamente estable.

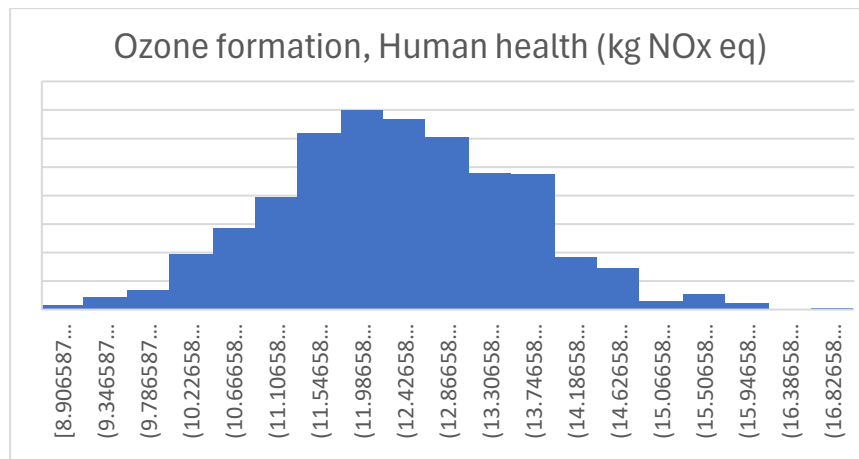
12. Mineral resource scarcity



El valor medio es de 0.05664 kg Cu eq, con variaciones menores, en algunos escenarios, el uso de materiales con mayor demanda de minerales puede generar un impacto mayor.

La distribución es simétrica, lo que indica una variabilidad baja en el uso de minerales entre los diferentes escenarios de simulación.

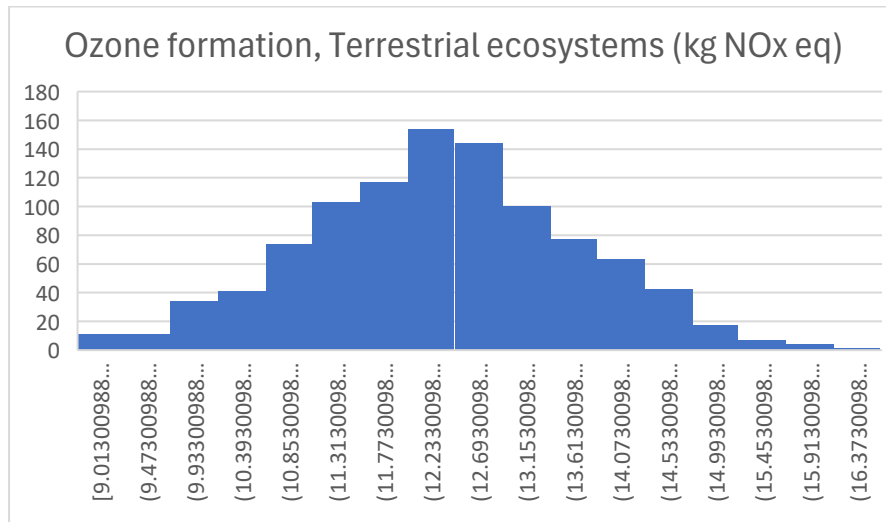
13. Ozone formation human health



La media es de 12.51 kg NOx eq, con escenarios en los que alcanza hasta 16.33, esto sugiere que en algunos casos las emisiones contribuyen significativamente a la contaminación del aire.

Se observa un ligero sesgo en la distribución, lo que sugiere que en algunos casos este impacto puede ser más alto de lo esperado.

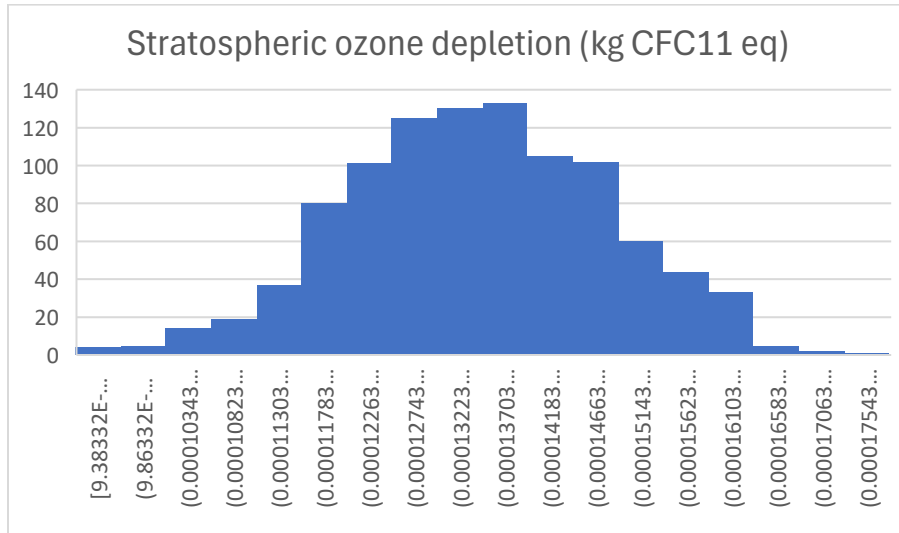
14. Ozone formation terrestrial ecosystems



La media es de 12,64 kg NOx eq, con un rango amplio, en algunos escenarios, la contaminación por ozono es mucho mayor.

La distribución es relativamente estable, indicando que el impacto ambiental en los ecosistemas terrestres varía poco entre los escenarios simulados.

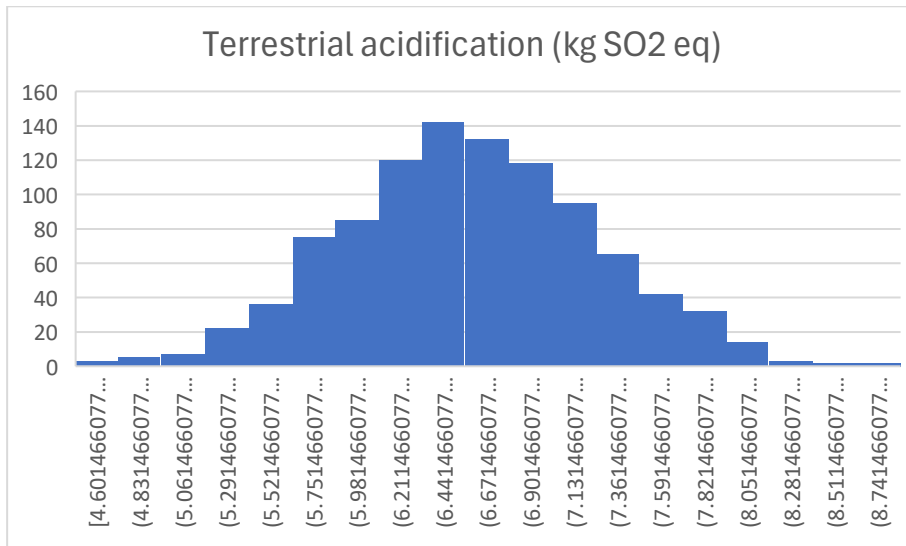
15. Stratospheric ozone depletion



El valor medio es de 0.00014 kg CFC-11 eq, con una variabilidad muy baja, no se observan diferencias significativas entre los escenarios.

Se observa una distribución con valores relativamente bajos, lo que indica que el impacto del cartón en la capa de ozono es mínimo en comparación con otros factores ambientales.

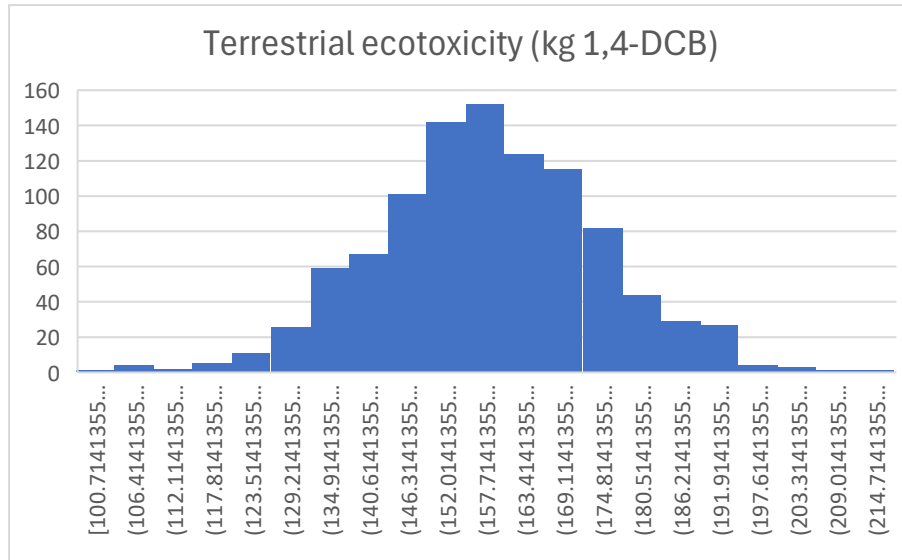
16. Terrestrial acidification



La media es de 6,73 kg SO₂ eq, con un rango amplio entre 4,62 y 8,77, en algunos escenarios, el impacto en la acidificación del suelo es significativamente mayor.

Se observa una ligera variabilidad, lo que indica que algunos escenarios pueden ser más perjudiciales que otros en términos de acidificación del suelo.

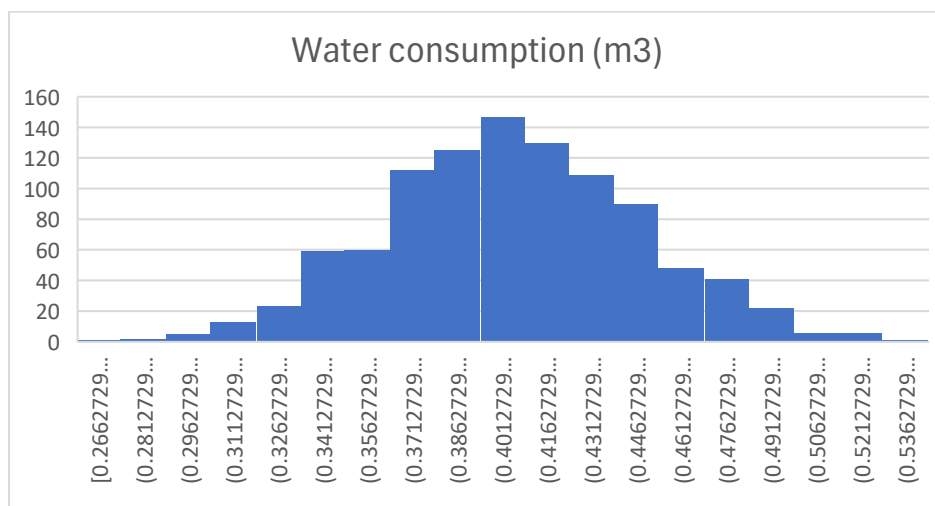
17. Terrestrial ecotoxicity



La media es de 160.23 kg 1,4-DCB, pero algunos escenarios muestran valores de hasta 210.58, lo que indica un posible impacto mayor en ciertas condiciones de producción.

Se observa una dispersión moderada en la distribución, lo que sugiere que ciertos escenarios pueden generar un impacto ambiental significativamente mayor.

18. Water consumption



La media es de 0,41128 m³, con valores máximos de 0,56349 m³ en algunos escenarios, el uso de agua es significativamente mayor, lo que indica que el origen de los materiales y los procesos de producción influyen en el consumo hídrico.

La distribución muestra que en algunos casos el consumo de agua es negativo, lo que podría indicar la presencia de procesos de reciclaje o reutilización del agua en la producción del cartón.

Al igual que en el empaque retornable, identificamos etapas clave o de mayor impacto para el empaque desechable de cartón, considerando los histogramas y resultados del ejercicio Monte Carlo, obtenemos:

- Calentamiento global (2039,19 kg CO₂ eq) → Emisiones altas por producción y transporte.
- Escasez de recursos fósiles (572,53 kg oil eq) → Aunque menor que en plásticos, sigue siendo significativo.
- Toxicidad terrestre (160,45 kg 1,4-DCB) → Problema grave por residuos químicos.
- Consumo de agua (0,41 m³) → El cartón usa mucha agua en su producción.
- Formación de ozono (12.63 kg NO_x eq) → Contribuye a la contaminación del aire y afecta la biodiversidad.

Es importante resaltar que, en este análisis, al igual que en el análisis para el cartón, influyen distintos factores, de sesgo en los resultados, por lo cual, para una conclusión más certera es recomendable guiarse por ambos resultados, del software y del ejercicio de monte Carlo.

Capítulo 4: Análisis de resultados

En este capítulo, abordaremos un análisis de los resultados para poder identificar el empaque con menor impacto ambiental considerando los resultados obtenidos en la ejecución de métodos del capítulo 3.

4.1 interpretación de resultados

Una vez que obtenemos los resultados, podemos tomar una decisión acerca de los empaques analizados, como se observa en el capítulo anterior, existen algunas discrepancias en las etapas clave seleccionadas inicialmente con las que se identifican en el ejercicio de monte Carlo, sin embargo, es importante resaltar que dichas discrepancias pueden deberse a distintos factores, el primero y principal, es la unidad de medida por ciclo, es decir, en el análisis de open lca el software toma en cuenta parámetros como

ciclos de vida, por otro lado el ejercicio de monte Carlo se lleva a cabo con los resultados del software open lca sin modificarse en el total de usos por ciclo de vida tomando en cuenta valores absolutos lo que puede sesgar los resultados.

Es importante resaltar que la metodología sugiere que, si al menos 3 de las etapas identificadas como etapas clave en las categorías de impacto son las mismas para ambos tipos de análisis, el ACV por ponderación es considerado confiable.

Dicho lo anterior y tomando en cuenta los resultados obtenidos de la comparación entre un empaque de cartón desechable y un empaque retornable de plástico PE, considerando escenarios de 30 y 50 ciclos para el empaque retornable, se concluye que el impacto ambiental del cartón es sustancialmente mayor en todas las categorías evaluadas.

El empaque de cartón presenta un impacto ponderado total de 714.54, mientras que el empaque de plástico PE utilizado durante 50 ciclos alcanza un impacto ponderado total de apenas 15.20, y en el escenario menos favorable de 30 ciclos, este valor es de 25.34, esta diferencia refleja que, aún en escenarios donde el empaque retornable no cumple con un ciclo de vida tan prolongado como el teóricamente esperado, sigue siendo mucho más beneficioso desde el punto de vista ambiental que un empaque de cartón de un solo uso.

Las categorías que más contribuyen a esta diferencia son el calentamiento global, con un peso del 30% en la ponderación total, y la escasez de recursos fósiles, con un peso del 25%. En ambas categorías, el cartón presenta impactos extremadamente elevados, alcanzando 579.56 y 134.34 en valores ponderados respectivamente.

En comparación, el plástico PE, incluso con solo 30 ciclos, presenta valores mucho más bajos: 20.56 en calentamiento global y 4.75 en escasez de recursos fósiles, lo cual demuestra que la producción y disposición de empaques desechables, aunque puedan parecer inofensivos o biodegradables, tienen un costo ambiental muy elevado debido al consumo de recursos y a las emisiones asociadas a su producción y transporte, por otro lado un empaque retornable, al ser reutilizado múltiples veces, diluye su impacto inicial a lo largo de su vida útil, haciendo que su huella ambiental por ciclo de uso sea mínima.

En categorías como eutrofización de agua dulce, toxicidad humana no carcinogénica y consumo de agua, si bien los valores absolutos son muy pequeños, la tendencia sigue

favoreciendo al plástico PE. Esto confirma que, además de ser eficiente en los aspectos más críticos como emisiones y uso de recursos, el empaque retornable no genera impactos negativos significativos en otros ámbitos ambientales.

Por otro lado, la diferencia entre 30 y 50 ciclos es también importante: al pasar de 30 a 50 ciclos, el impacto ambiental por uso del empaque plástico PE disminuye cerca de un 40%, esto resalta la importancia no solo de elegir un empaque retornable, sino de asegurar su correcta utilización a lo largo del mayor número de ciclos posible, evitando pérdidas, daños prematuros o sistemas de devolución ineficientes.

En conclusión, el empaque retornable de plástico PE representa una alternativa ambientalmente superior al empaque de cartón desechable, siempre y cuando se logre implementar un sistema de retorno y reutilización robusto que permita extender al máximo su ciclo de vida.

Este tipo de solución no solo reduce la presión sobre los recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también contribuye a la reducción de residuos sólidos y al cumplimiento de objetivos de sostenibilidad a nivel corporativo y global. Por lo tanto, para obtener el mayor beneficio ambiental, es fundamental no solo apostar por empaques retornables, sino también diseñar estrategias logísticas, campañas de concientización y modelos circulares que aseguren la máxima vida útil de estos empaques, optimizando así la relación entre uso e impacto ambiental, y avanzando hacia una economía más circular y responsable.

4.2 Propuestas de mejora

Con base en el análisis anterior, se identifican varias áreas de oportunidad para mejorar la aplicación de los conceptos de sustentabilidad, economía circular, logística inversa y ACV en la industria automotriz, particularmente en el sector del empaque y embalaje, estas propuestas buscan optimizar el desempeño ambiental y fomentar la adopción de prácticas más sostenibles para Bosch planta Toluca, específicamente en el empaque y embalaje de materia prima.

1. Optimización del Diseño y Uso de Empaques Retornables

Los resultados del ACV indican que los empaques retornables de plástico polietileno PE presentan un impacto ambiental significativamente menor por ciclo de vida en comparación con los empaques de cartón desechable, especialmente cuando se les da una vida útil de al menos 50 ciclos.

Para maximizar este beneficio, se propone rediseñar los empaques retornables con materiales más duraderos y ligeros, utilizando tecnologías avanzadas que mejoren su resistencia al desgaste durante el transporte, lavado y almacenaje, además, se recomienda establecer protocolos estrictos de mantenimiento y capacitación del personal para garantizar que los empaques alcancen o superen los 50 ciclos proyectados, reduciendo así el impacto ambiental por unidad. Empresas como Robert Bosch podrían implementar sistemas de monitoreo en tiempo real para evaluar el estado de los empaques y ajustarlos según las condiciones de uso.

2. Fortalecimiento de la Logística Inversa

La logística inversa se presenta como un pilar fundamental para cerrar ciclos productivos, pero enfrenta barreras como la falta de infraestructura y financiamiento, se sugiere integrar tecnologías de rastreo (por ejemplo, RFID) para optimizar el flujo inverso de materiales, reduciendo costos y mejorando la trazabilidad desde el consumidor hasta la reincorporación en la cadena de suministro.

3. Ampliación de la Economía Circular en la Industria

Aunque la economía circular ofrece beneficios como la reducción de residuos y la generación de empleos verdes, su implementación enfrenta obstáculos culturales y económicos, como la preferencia por la economía lineal y los altos costos iniciales de inversión. Se propone que las empresas adopten los principios de las “5R” (Reducir, Reutilizar, Reciclar, Rediseñar y Recuperar) como parte de su estrategia corporativa, integrándolos en los planes de responsabilidad social empresarial (RSE). Además, se recomienda que los gobiernos ofrezcan subsidios o incentivos fiscales para las inversiones en tecnologías circulares, como la producción de energías renovables o el reciclaje avanzado, facilitando la transición de industrias como la del cemento (ejemplo de Mendoza y Aguilera, 2023) o la electrónica (caso de la empresa ABC).

4. Educación y Cambio Cultural

Una barrera significativa identificada es la cultura del “usar y desechar”, arraigada en la economía lineal, se propone implementar campañas de concienciación dirigidas a consumidores, empleados y proveedores, destacando los beneficios de la economía circular y la logística inversa. En el ámbito educativo, se recomienda incluir módulos sobre sustentabilidad en los currículums de escuelas técnicas y universidades, fomentando una nueva generación de profesionales capacitados en estas prácticas.

5. Integración de Tecnologías Limpias y Economía Verde

La transición hacia energías renovables (solar, eólica, hídrica) y la reducción de gases de efecto invernadero son prioritarias, según los principios de la economía verde. Se propone que las empresas inviertan en tecnologías de producción limpia, como la incineración de residuos para generar energía (ejemplo de la empresa ABC), y adopten sistemas cerrados de agua para minimizar el consumo hídrico, como se sugiere en los resultados negativos de agua en el ACV.

Además, se recomienda colaborar con instituciones como el Banco Mundial (2024) para acceder a financiamiento verde que acelere estas transiciones, especialmente en sectores intensivos como la construcción y los alimentos.

6. Políticas Públicas y Regulación

La falta de políticas claras en países como México limita la adopción de prácticas sostenibles, se propone que los gobiernos establezcan regulaciones obligatorias para la gestión de residuos, incentiven la economía circular mediante exenciones fiscales y promuevan la certificación ambiental (ISO 14001) como requisito para contratos públicos.

Estas propuestas buscan no solo mitigar los impactos ambientales identificados, como el calentamiento global (2056.32 kg CO₂ eq para plástico y 1931.85 kg CO₂ eq para cartón) y la ecotoxicidad terrestre (160.46 kg 1,4-DCB para plástico), sino también posicionar a las empresas como líderes en sustentabilidad. La implementación requerirá colaboración interdisciplinaria, inversión inicial y un cambio de mentalidad, pero los beneficios a largo plazo justifican el esfuerzo.

Conclusión

El análisis realizado permitió identificar diferencias significativas entre el empaque retornable de plástico PE y el empaque desechable de cartón, en relación con su impacto ambiental durante todo su ciclo de vida. Aunque el empaque de plástico presenta una mayor huella de carbono inicial debido a su proceso de fabricación y uso de recursos fósiles, esta se amortiza con el tiempo gracias a su larga vida útil (hasta 50 ciclos), en cambio, el empaque de cartón, aunque biodegradable y con menor impacto en su fabricación, tiene una vida útil de un solo ciclo, lo cual genera un mayor volumen de residuos a largo plazo y un uso constante de recursos.

El ACV reveló que la mayor carga ambiental del empaque retornable proviene del uso de energía y las emisiones en su producción inicial, mientras que en el empaque desechable, el principal problema es la generación constante de residuos y el uso continuo de recursos vírgenes, desde esta perspectiva, la utilización de empaques retornables aparece como una opción más eficiente y sostenible si se gestionan adecuadamente los ciclos de reutilización y limpieza.

Asimismo, se constató que la economía circular y la logística inversa son fundamentales para optimizar la cadena de suministro y reducir el impacto ambiental de las operaciones industriales. La logística inversa permite recuperar materiales al final de su vida útil, reincorporarlos al sistema productivo y disminuir la presión sobre los ecosistemas, sin embargo, su implementación enfrenta retos como la falta de infraestructura, financiamiento inicial elevado y barreras culturales, especialmente en países en vías de desarrollo.

Otro hallazgo importante es la necesidad de integrar el área de sustentabilidad dentro de los ejes estratégicos de las empresas, y no limitarla al campo de la responsabilidad social empresarial; el rediseño de empaques, la innovación en materiales biodegradables y el uso de tecnología para rastrear y optimizar ciclos de vida son acciones que deben formar parte del núcleo de la planificación operativa y financiera.

Casos de empresas como Bosch, Bimbo, Nestlé, Cemex y Heineken México demuestran que es posible avanzar hacia modelos sostenibles mediante el uso de empaques reciclables, sistemas de logística inversa y energías limpias, estas estrategias no solo

generan beneficios ambientales, sino también ventajas competitivas, ahorro de costos y mejora en la imagen corporativa.

Por tanto, se concluye que el Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta poderosa para la toma de decisiones empresariales orientadas a la sostenibilidad. Su correcta implementación permite detectar puntos críticos, comparar escenarios y formular propuestas de mejora basadas en evidencia. No obstante, su efectividad depende de la calidad de los datos, la actualización de las bases de información y el compromiso organizacional con la mejora continua.

Finalmente, como recomendación general, se propone que las empresas incorporen el ACV como una práctica habitual dentro de su gestión ambiental, y que se fomente una cultura corporativa basada en la innovación, la educación ambiental y la corresponsabilidad entre los distintos actores de la cadena de suministro. Solo así será posible transitar hacia una economía más justa, eficiente y respetuosa con los límites del planeta.

Referencias

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (s.f.). Eutrophication: Nutrient Pollution. <https://www.epa.gov/nutrientpollution>

Ávila, P. Z. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, (28), 409–423.

Bare, J. C. (2011). TRACI 2.0: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts 2.0. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(5), 687–696. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0338-9>

Ecoinvent Association. (2021). ecoinvent database v3.8. <https://www.ecoinvent.org/>

European Commission - Joint Research Centre (JRC). (2011). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Publications Office of the European Union. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcdHandbook.html>

GreenDelta GmbH. (s.f.). openLCA. <https://www.openlca.org/>

Guinée, J. B. (Ed.). (2002). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7>

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan.

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2021). Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. <https://www.iaea.org>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Sixth Assessment Report (AR6). <https://www.ipcc.ch/report/ar6>

International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO.

International Organization for Standardization. (2006). ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 14067: Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. ISO.

Madroñero-Palacios, S., & Guzmán-Hernández, T. (2018). Desarrollo sostenible. Aplicabilidad y sus tendencias. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(3), 122–130. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i3.3907>

Malpica Zapata, W. A., Caicedo Pereira, C. A., & Lasso Espitia, D. A. (2022). Estudio de la logística inversa y su importancia en la gestión empresarial de organizaciones sostenibles. *Revista Estrategia Organizacional*, 11(1). <https://doi.org/10.22490/25392786.5657>

Muñoz, R. T. (2021). ¿Qué falta para entender la sustentabilidad? *Estudios sobre las Culturas Contemporáneas*, XXVII(54), 77–117.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Ambient (outdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Paine, F. A. (2019). *The Packaging User's Handbook*. Springer.

Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), 721–739. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.12.009>

PRE Sustainability. (2022). SimaPro Life Cycle Assessment Software. <https://simapro.com/>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2011). *Hacia una economía verde: Caminos hacia el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza*. <https://www.unep.org>

Rea-Toapanta, A. R. (2023). Daño ambiental y economía circular en la explotación de los recursos naturales no renovables. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 16(2), 93–105. <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4104>

ReCiPe. (2008). ReCiPe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. RIVM, Universiteit Leiden, PRé Consultants.

Rosa, L. A., Cohen, M., Campos, W. Y., Ávila, L. V., & Rodrigues, M. C. (2023). Economía circular y objetivos de desarrollo sostenible: principales tendencias de investigación. *Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria*, 16(1), 1–30. <https://doi.org/10.5902/1983465971448>

Soroka, W. (2008). *Fundamentals of Packaging Technology*. Institute of Packaging Professionals.

Streit, J. A. C., Guarnieri, P., & Souza, R. (2023). [Referencia incompleta, completar si se cuenta con más información].

United Nations Environment Programme (UNEP). (1987). *Our Common Future* (Informe Brundtland). Oxford University Press.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. <https://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/montreal-protocol>

USEtox International. (s.f.). *The USEtox® model*. <https://www.usetox.org/>

Venanzi, D., Silva, O. R. da, & Seifert, A. (2021). Economía circular: estudio de caso en la empresa ABC. *Revista Científica Hermes*, 30, 286–301.