

INFORME DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PRODUCTO

Compumax

Notebook Ónix Series

Agosto 2025

Contenido

GLOSARIO.....	5
ACRÓNIMOS.....	6
RESUMEN	7
1 OBJETIVO DEL ESTUDIO	8
1.1 ACLARACIÓN DEL PRESENTE ESTUDIO	8
2 ASIGNACIÓN.....	8
3 ALCANCE DEL ESTUDIO	8
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	8
3.2 UNIDAD FUNCIONAL Y FUNCIÓN DEL SISTEMA	10
3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA.....	10
3.4 LÍMITES DEL SISTEMA	11
3.4.1 COBERTURA TEMPORAL	11
3.4.2 COBERTURA TECNOLÓGICA.....	12
3.4.3 COBERTURA GEOGRÁFICA	12
3.5 LIMITACIONES Y SUPOSICIONES.....	12
3.6 REQUISITOS DE CALIDAD DE DATOS	13
4 INVENTARIO DE CICLO DE VIDA.....	14
4.1 DATOS POR ETAPAS	14
4.1.1 PRODUCCIÓN	14
4.1.2 TRANSPORTE AGUAS ARRIBA.....	14
4.1.3 TRANSPORTE AGUAS ABAJO	15
4.1.4 EMPAQUE DEL PRODUCTO	15
4.1.5 USO DEL PRODUCTO	15
4.1.6 FIN DE VIDA DEL PRODUCTO.....	16
5 EVALUACIÓN DE IMPACTO.....	17
5.1 METODOLOGÍA Y CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL.....	17
5.2 RESULTADOS	19
6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	21
7 CONCLUSIONES	37
Anexo numeral 5.2 ISO 14044.....	40
a) Aspectos generales.....	40
7.1 b) Objetivo del estudio	40
7.2 c) Alcance del estudio.....	40

7.3	d) Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).....	41
7.4	e) Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).....	42
7.5	f) Interpretación del ciclo de vida	43
7.6	g) Revisión crítica.....	44
8	BIBLIOGRAFÍA	45

Fecha de publicación	Agosto de 2025
Título del reporte	Análisis de ciclo de vida (ACV) del Notebook Onix (Series, Series CX10 y Series CX20) para el año 2024
Declaración de responsabilidad	La información de este reporte ha sido compilada y calculada de fuentes creíbles. La aplicación de los datos es estrictamente bajo criterio y responsabilidad del lector, no se asume ningún daño por parte de los autores causado por el uso de la información contenida en este documento.
Equipo del proyecto	Compumax: Soledad Santos (soledad.santos@compumax.com) Centro de Formación Sostenible: Jenny Lorena Victoria (contacto@centrodeformacionsostenible.com)
Unidad Funcional	Equipo Notebook Onix
Alcance geográfico	El equipo Notebook Onix Series es ensamblado en las instalaciones de Compumax Computer SAS. Ubicadas en la Carrera 106 15 - 25 Manzana 15 Bodega 99, Bogotá, Colombia. La mayoría de los componentes provienen de China.
Metodología	Análisis de ciclo de vida (ACV) según ISO 14040:2006 y 14044:2006

GLOSARIO

- **CICLO DE VIDA:** Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.
- **ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA:** recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida.
- **ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA ICV:** fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y salidas para un sistema del producto a través de su ciclo de vida.
- **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA:** Fase del análisis del ciclo de vida dirigida a conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a través de todo el ciclo de vida del producto.
- **INTERPRETACIÓN DEL CILO DE VIDA:** fase del análisis del ciclo de vida en la que los hallazgos del análisis del inventario o de la evaluación del impacto, o de ambos, se evalúan en relación con el objetivo y el alcance definidos, para llegar a conclusiones y recomendaciones.
- **SISTEMA DE PRODUCTO:** es el conjunto de etapas que componen el ciclo de vida en estudio. Un sistema puede tener varias funciones y las seleccionadas para el estudio dependen del objetivo y el alcance del ACV.
- **UNIDAD FUNCIONAL:** es la unidad de referencia en la cual se expresan, desde un punto de vista matemático, los datos de entrada y salida.
- **PROCESO:** Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.
- **FLUJO ELEMENTAL:** materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraído del medio ambiente sin una transformación previa por el ser humano, o materia o energía que sale del sistema bajo estudio, que es liberado al medio ambiente sin una transformación posterior por el ser humano.
- **CO₂ equivalente (CO₂ e):** Unidad universal de medida que indica el potencial de calentamiento global (PCG) de cada uno de los 6 gases efecto invernadero, expresado en términos del PCG de una unidad de dióxido de carbono. Se utiliza para evaluar la liberación de diferentes GEI contra un común denominador.
- **EMISIONES:** Liberación de Gases Efecto Invernadero a la atmósfera.
- **FACTOR DE EMISIÓN:** Factor que permite estimar emisiones de GEI a partir de los datos de actividades disponibles (como toneladas de combustible consumido, toneladas de producto producido) y las emisiones totales de GEI.
- **GASES EFECTO INVERNADERO (GEI):** Componentes gaseosos que se encuentran en la atmósfera y su origen es natural y antrópico. Los GEI son los 6 gases que están listados en el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO₂); metano (CH₄); óxido nitroso (N₂O); hidrofluorocarbonos (HFCs); perfluorocarbonos (PFCs); y hexafluoruro de azufre (SF₆).
- **HUELLA DE CARBONO DE PRODUCTO (HCP):** Es la cantidad de Gases Efecto Invernadero –emitidos a la atmósfera por efecto directo o indirecto de un individuo, organización o evento.
- **POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL - PCG:** Factor que describe el impacto de la fuerza de radiación de una unidad con base en la masa de un GEI determinado, con relación a la unidad equivalente de dióxido de carbono en un periodo determinado.
- **IPCC:** Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

ACRÓNIMOS

ACV Análisis de ciclo de vida

EICV Evaluación del impacto del ciclo de vida

ICV Análisis del inventario del ciclo de vida

GWP Potencial de calentamiento global

IPCC Panel intergubernamental de cambio climático

CO₂e Dióxido de carbono equivalente

RESUMEN

Con el objetivo de cumplir con los criterios establecidos por EPEAT y comprender cómo el análisis del ciclo de vida (ACV) puede contribuir al desarrollo de productos más sostenibles, Compumax ha llevado a cabo un estudio de ACV para su producto Notebook Ónix (Series, Series CX10 y Series CX20). Este análisis se ha desarrollado conforme a los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14044.

El estudio abarca todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Para la unidad funcional definida por Compumax, se ha considerado una vida útil estimada de 5 años, con un consumo energético basado en los valores establecidos por la certificación Energy Star.

La evaluación se realizó tomando como año base 2024, bajo el supuesto de que los materiales provienen preensamblados desde China y el ensamblaje final se lleva a cabo en Colombia.

El análisis presentado en el apartado 1.1 establece una aclaración fundamental para la correcta interpretación de los resultados de este estudio. Aunque el producto Ónix se comercializa en tres modelos diferentes, se ha determinado que el ciclo de vida completo de los tres modelos es técnicamente equivalente en términos de materiales, procesos de fabricación, transporte, uso y disposición final. Adicional de que su única diferencia es el procesador de cada modelo, no se cuenta con factores de emisión que detallen esos cambios.

Para la cuantificación de impactos, se empleó el método ReCiPe 2016 en su versión punto medio bajo la perspectiva jerárquica, el cual representa una visión temporal de 100 años y es ampliamente aceptado para estudios de sostenibilidad y toma de decisiones a largo plazo.

Los resultados del análisis muestran que la etapa que genera el mayor impacto ambiental en el ciclo de vida del producto es la fabricación de los componentes, seguida por la fase de uso del equipo.

1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El estudio tiene como objetivo evaluar los impactos ambientales potenciales del ciclo de vida del equipo Notebook Ónix (Series, Series CX10 y Series CX20) con el fin de obtener la ecoetiqueta EPEAT. Los resultados del estudio serán publicados a los consumidores y no están previstos para realizar aseveraciones comparativas de carácter público.

1.1 ACLARACIÓN DEL PRESENTE ESTUDIO

Para el equipo Ónix se establece una aclaración metodológica clave para la interpretación del presente estudio. Aunque el producto Ónix se encuentra disponible en tres variantes comerciales, se ha verificado que los modelos comparten un ciclo de vida idéntico en términos de composición de materiales, procesos de manufactura, logística de distribución, condiciones de uso y tratamiento al final de la vida útil.

En consecuencia, el análisis del ciclo de vida (ACV) se realizó bajo el supuesto de equivalencia funcional y técnica entre los modelos, lo cual permite consolidar los resultados en un único estudio representativo. Esta decisión metodológica está alineada con los lineamientos establecidos en la norma ISO 14040:2006 y 14044:2006, evitando redundancias analíticas sin comprometer la precisión ni la trazabilidad de los resultados en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

2 ASIGNACIÓN

Asignación (ISO 14044). En línea con la jerarquía de la ISO 14044, se evitó la asignación cuando se contó con información primaria específica de procesos. Cuando no fue posible (p. ej., consumo energético de la planta de ensamble, generación de residuos y uso de agua), se aplicó asignación másica. Para ello, se determinó la participación de la unidad funcional en la producción total (74,47 %) y se distribuyeron proporcionalmente los consumos totales de energía, agua y residuos. Posteriormente, los montos asignados se normalizaron frente a la producción total de la unidad funcional, a fin de dimensionar su contribución específica a dichos recursos.

Para la elaboración del análisis de ciclo de vida, se utilizó información proveniente de la base de datos Ecoinvent versión 3.11. Toda la documentación relacionada con los criterios de asignación empleados se encuentra disponible en línea en el siguiente enlace: <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.11>.

3 ALCANCE DEL ESTUDIO

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

El Notebook Ónix (**Fig. 1**) corresponde a una familia de portátiles compuesta por las líneas Series, CX10 y CX20, que comparten una misma arquitectura de diseño y proceso de ensamble. El equipo

se ensambla en Colombia; la mayor parte de los subconjuntos electrónicos (placa base, módulos, display, etc.) provienen de China y la unidad de almacenamiento proviene de Estados Unidos.

- Arquitectura común
- Chasis y carcasa: Diseño y materiales equivalentes entre modelos, con las mismas dimensiones exteriores y disposición de puertos.
- Pantalla (display): Misma tecnología y formato dentro de la familia.
- Placa base y fuente de alimentación: Plataforma común de hardware y conversión de potencia.
- Batería y sistema de gestión de energía: Misma tecnología y capacidad dentro de rangos equivalentes para la familia.
- Subconjuntos y cableado interno: Configuración estandarizada.
- Elementos variables entre configuraciones
- Procesador (CPU): Cambia por versión o serie, manteniendo la misma plataforma.
- Memoria RAM: Variaciones de capacidad, sin modificar la arquitectura base.
- Almacenamiento (SSD/HDD): Capacidades distintas; tecnología equivalente según línea.

Estas variaciones no implican cambios sustantivos en la masa total de materiales ni en la estructura del producto, por lo que la arquitectura de fabricación y las rutas de fin de vida se mantienen comparables dentro de la familia.

- Desempeño energético

Todas las configuraciones cuentan con certificación ENERGY STAR, lo que asegura requisitos mínimos de eficiencia y acota la variabilidad del consumo en uso entre modelos de la misma familia.

- Producto representativo para el ACV

Dado que las diferencias entre configuraciones se concentran en CPU, RAM y capacidad de almacenamiento, y no alteran la arquitectura principal, el estudio adopta una configuración intermedia representativa (“producto promedio”) de la familia Notebook Ónix para el modelado ambiental.



Fig. 1. Unidad funcional

3.2 UNIDAD FUNCIONAL Y FUNCIÓN DEL SISTEMA

La unidad funcional es 1 unidad Notebook Ónix (Series, Series CX10 y Series CX20) y su vida útil es de 5 años. El consumo medio de esta unidad, según certificaciones Energy Star, es de 54,00 kWh/año.

El sistema de producto bajo estudio tiene la función de cumplir tareas comunes de la informática moderna, es decir, permite navegar por Internet, estudiar, escribir textos y realizar otros trabajos de oficina o educativos, como editar textos y bases de datos, además de actividades de ocio, como escuchar música, ver videos, jugar, etc.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA

Las etapas del ciclo de vida del producto contemplan una unidad funcional que luego de ser desarrollada tendrá una vida útil aproximada de 5 años. **Fig. 2.**

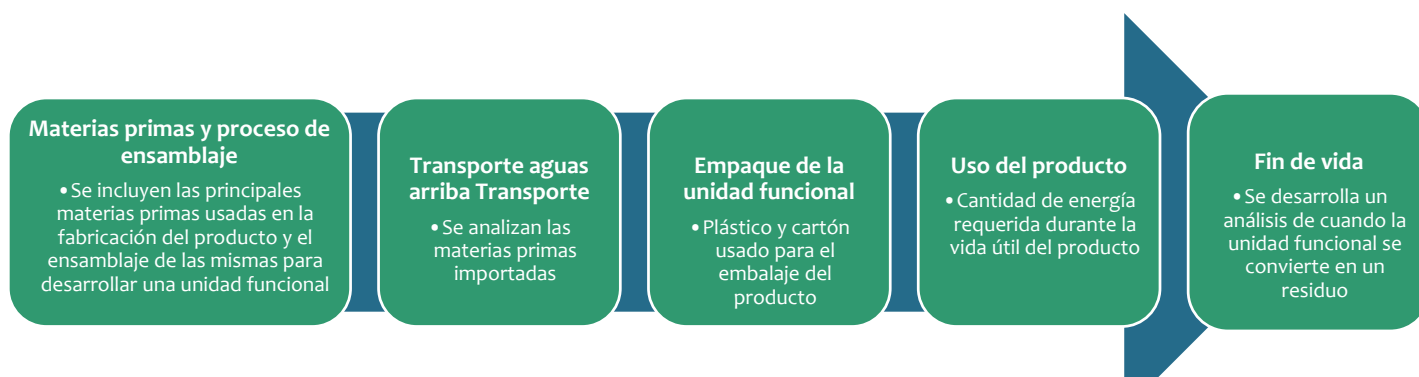


Fig. 2. Descripción del proceso de ensamblaje.

Compumax se dedica principalmente a una etapa crítica dentro del proceso de fabricación de equipos informáticos: el **ensamblaje**. Su labor se enfoca en la integración cuidadosa de los distintos componentes, con el objetivo de garantizar el óptimo desempeño y la calidad de cada unidad producida.

El proceso de ensamblaje incluye varias fases fundamentales:

- **Recepción y control de calidad de componentes:** Los insumos son adquiridos a proveedores confiables y, al llegar a la planta, se someten a un riguroso proceso de verificación para asegurar que cumplen con las especificaciones técnicas requeridas.
- **Adecuación del área de trabajo:** Se acondiciona el espacio de ensamblaje y se organizan las herramientas necesarias para facilitar un flujo de trabajo eficiente.
- **Montaje de componentes:** La integración de piezas se realiza de forma sistemática, siguiendo protocolos definidos por estándares del sector tecnológico.

- **Pruebas de funcionamiento:** Cada equipo ensamblado es evaluado mediante pruebas de rendimiento y calidad, con el fin de detectar y corregir posibles fallas antes de su salida de planta.
- **Empaque y distribución:** Finalmente, las unidades que superan los controles son embaladas con cuidado y despachadas a sus destinos finales.

Aunque su actividad principal es el ensamblaje, Compumax reconoce la importancia de la calidad de los componentes y la precisión en su integración, lo que se traduce en sistemas informáticos confiables, eficientes y listos para su uso inmediato.

3.4 LÍMITES DEL SISTEMA

El estudio incluye:

- Materiales
- Proceso de ensamblaje
- Empaque
- Transporte aguas arriba y aguas abajo
- Uso del producto
- Disposición final del producto

Se excluye:

- Repuestos usados durante la vida útil de la unidad funcional
- Reusó de partes
- Producción de bienes de capital (fábricas, etc.)

La razón por la que se han realizado las exclusiones es que no se dispone de la información suficiente sobre la recuperación de materiales y reúso en la zona de estudio. Se ha estimado que el impacto al final de la vida útil del producto, así como la infraestructura, es menor, comparado con las etapas de obtención y producción de materias primas. Adicionalmente se asume un criterio de corte de aquellos productos que representan menos de 5 gramos de la masa total como stickers y pequeños tornillos, lo anterior de acuerdo con bibliografía científica consultada¹.

3.4.1 COBERTURA TEMPORAL

La información empleada en este inventario se refiere al año calendario 2024, asegurando así la representatividad temporal de los datos considerados.

Por otro lado, teniendo en cuenta aspectos de hasta dónde puede ser pertinente los resultados del presente informe se toman 3 años según lo estipulado por EPEAT, así como también aspectos tecnológicos que puedan variar a las condiciones actuales.

¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617308090?via%3Dihub>

3.4.2 COBERTURA TECNOLÓGICA

Este estudio evalúa los impactos ambientales del producto a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, considerando una combinación de tecnologías y sistemas de producción representativos a nivel global.

La información relativa a la producción primaria fue recopilada directamente por Compumax y sus aliados estratégicos. Por su parte, los datos complementarios —como equivalencias o factores de emisión— provienen de fuentes oficiales y bases de datos reconocidas y certificadas por terceros, garantizando así la calidad y fiabilidad de la información utilizada.

3.4.3 COBERTURA GEOGRÁFICA

El producto es ensamblado en Colombia, mientras que la mayoría de los materiales utilizados en su fabricación provienen de China. En consecuencia, los datos empleados para evaluar el impacto asociado al consumo de energía durante el ensamblaje corresponden al contexto energético de Colombia. Por otro lado, la información relativa a las materias primas y procesos intermedios se basa en promedios globales disponibles en la base de datos Ecoinvent 3.11.

Para las etapas de uso y disposición final del producto, el análisis se centra en la unidad funcional localizada en Bogotá, Colombia. Por esta razón, tanto los factores de emisión como las distancias de transporte consideradas en estas fases están ajustados a las condiciones específicas de dicha ubicación.

3.5 LIMITACIONES Y SUPOSICIONES

Las siguientes suposiciones fueron consideradas:

- En la planta el 74,47% de producción corresponde a el ensamblaje de la unidad funcional, por ello, para estimar datos globales se toma siempre como referencia dicho valor respecto al total.
- El consumo de energía eléctrica en el proceso de ensamble corresponde a la relación entre la energía total consumida por la planta y la producción total de las unidades funcionales.
- El consumo de agua en el proceso de ensamble corresponde principalmente a la gestión administrativa, este se calcular a partir de la cantidad total de agua consumida por la planta y la producción total de las unidades funcionales, teniendo como año de referencia el 2024.
- Para la producción de materias primas, incluido el empaque, se usaron datos globales de Ecoinvent 3.11
- Para la etapa de uso del producto se tiene en cuenta la vida útil promedio de la unidad funcional y sus respectivos consumos de energía eléctrica.

3.6 REQUISITOS DE CALIDAD DE DATOS

Los datos de uso de energía y agua se tomaron de fuentes directas proporcionadas por Compumax. Mientras que los datos de componentes y transportes provienen de fuentes secundarias con un máximo de 10 años de antigüedad.

La calidad de los datos se evaluó con base en los siguientes criterios:

- **Precisión:** se refiere a las fuentes de datos, métodos de adquisición y métodos de verificación. Datos fiables son aquellos que se han verificado y medido directamente en terreno. El Criterio está relacionado con la cuantificación del flujo. Para los de uso directo de agua y energía la precisión es alta cuando provienen de medidores. Para el resto de datos la calidad es alta cuando son datos cuantificados en el inventario de la empresa.
- **Integridad:** representa la exhaustividad de los datos recolectados. Los datos son completos cuando todos los elementos necesarios para realizar una actividad son cuantificados. Se considera que los datos son altamente íntegros cuando se incluyen todos los datos importantes en la categoría o tipo de dato.
- **Representatividad:** evalúa la correlación geográfica y tecnológica (reflejan los datos de la realidad). Los datos directos son altamente representativos por sí mismos, pues son tomados del mismo proceso. Los datos de uso indirecto se evalúan según la representatividad del set de datos usado para modelarlos. La representatividad tecnológica es alta cuando la tecnología del set de datos usado es la misma que la de la producción del insumo utilizado. La representatividad geográfica es alta cuando el set de datos proviene de la misma región de donde se produce el insumo modelado.
- **Consistencia:** evalúa si la metodología del estudio se aplica de la misma manera para todos los datos.
- **Reproducibilidad:** evalúa si la información acerca de los datos y el método utilizado permite producir los resultados del estudio.
- **Incertidumbre:** entrega una evaluación cualitativa de la incertidumbre de los datos.

La evaluación de calidad de datos varía entre Alto, Suficiente, Medio y Bajo. La **tabla 1** muestra la evaluación de la calidad de los datos del estudio.

Tabla 1. Criterios para calificación cualitativa de confiabilidad/precisión de datos

Alta	Los datos cumplen con el criterio requerido de confiabilidad/precisión para el caso bajo consideración. Esto significa que es un dato medido y proporcionado directamente por la empresa.
Suficiente	Datos verificados por suposiciones o mediciones no auditadas (documentos proporcionados por personal de empresa o literatura)
Media	Datos no auditados basados en suposiciones o estimaciones de un experto. Se considera que este tipo de datos puede usarse pero su confiabilidad/precisión puede ser mejorada.
Baja	Datos estimados sin base sólida. Estos datos no cumplen con el criterio requerido de confiabilidad/precisión para el caso bajo consideración.

4 INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

4.1 DATOS POR ETAPAS

Para realizar la evaluación de impactos y la interpretación de resultados del ACV se ha dividido el ciclo de vida del producto en 6 etapas: producción, transporte aguas arriba, transporte aguas abajo, empaque, uso y fin de vida.

4.1.1 PRODUCCIÓN

Corresponde a la etapa de obtención de materias primas y ensamble del computador. Para este apartado se utilizaron datos del set de Ecoinvent 3.11 asociados a la producción de un computador². Cabe resaltar que, aunque Compumax adquiere el barebone y lo ensambla con una unidad de SSD, se contemplaron los consumos de energía, agua, generación de residuos y demás impactos tanto de la base de datos como de lo ocurrido en planta durante este proceso. Esto se debe a que en la base de datos no es posible modelar un computador sin SSD, razón por la cual se tomó como referencia la configuración disponible.

En cuanto al consumo energético, se consideraron los registros de la planta donde se lleva a cabo el ensamble de la unidad funcional, estableciendo una relación entre la producción neta y el consumo total de electricidad. Por su parte, los datos correspondientes a los componentes ensamblados y el empaque provienen de Ecoinvent 3.11. En este apartado, el flujo más representativo corresponde a la electricidad, para lo cual se empleó el set de datos de generación eléctrica para Colombia.

4.1.2 TRANSPORTE AGUAS ARRIBA

El transporte aguas arriba se refiere a todo el transporte de los materiales a ensamblar provenientes desde China hasta Colombia. Para el análisis de esta etapa se contemplan las distancias de la **tabla 2**:

Tabla 2. Distancias transporte aguas arriba

Detalle trayecto	Tipo de transporte	Distancia km	Locación – Ecoinvent	Fuente de datos de la distancia
Transporte de planta a puerto (promedio)	Transporte de carga, camión 16-32 toneladas métricas, EURO4	20	Promedio mundial	Promedio de la ciudad de recorrido en la ciudad de Bogotá
Puerto a puerto (Shangai - Buenaventura)	Transporte de carga marítimo en container	16.800	Promedio mundial	Sea Distance

² <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/2077/documentation>

Detalle trayecto	Tipo de transporte	Distancia km	Locación – Ecoinvent	Fuente de datos de la distancia
Puerto a planta (Buenaventura - Bogotá)	Transporte de carga, camión 16-32 toneladas métricas, EURO4	505	Promedio mundial	Google maps

4.1.3 TRANSPORTE AGUAS ABAJO

El transporte aguas abajo relaciona la distancia que recorre la unidad funcional desde el punto donde se ensambla. En la **tabla 3** se relacionan los recorridos planteados teniendo en cuenta que el producto se distribuye en la misma ciudad donde se ensambla y se realizará su disposición final.

Tabla 3. Distancias transporte aguas abajo

Detalle trayecto	Tipo de transporte	Distancia km	Fuente de datos de la distancia
Planta - sitio de distribución	Transporte de carga, camión 16-32 toneladas métricas, EURO4	15	Promedio de recorrido de una ciudad grande
Sitio de distribución - usuario final	Transporte de carga, camión 16-32 toneladas métricas, EURO4	15	Promedio de recorrido de una ciudad grande
Sitio de uso final - disposición final	Transporte de carga, camión 16-32 toneladas métricas, EURO4	15	Promedio de recorrido de una ciudad grande

4.1.4 EMPAQUE DEL PRODUCTO

Para evaluar el empaque con el cual se distribuye la unidad funcional se calcularon datos promedios para el peso de una caja de cartón y el plástico usado para empacar una computadora.

4.1.5 USO DEL PRODUCTO

Para evaluar el consumo de energía del producto durante su vida útil se tomó como referencia un lapso de 5 años. Según los datos suministrados por la certificación Energy Star se estimó un consumo anual calculado con la ecuación de la **Fig. 3**.

$$E_{TEC} = \frac{8760}{1000} \times (P_{OFF} \times T_{OFF} + P_{SLEEP} \times T_{SLEEP} + P_{LONG_IDLE} \times T_{LONG_IDLE} + P_{SHORT_IDLE} \times T_{SHORT_IDLE})$$

Where:

- P_{OFF} = Measured power consumption in Off Mode (W);
- P_{SLEEP} = Measured power consumption in Sleep Mode (W);
- P_{LONG_IDLE} = Measured power consumption in Long Idle Mode (W);
- P_{SHORT_IDLE} = Measured power consumption in Short Idle Mode (W); and
- T_{OFF} , T_{SLEEP} , T_{LONG_IDLE} , and T_{SHORT_IDLE} are mode weightings as specified in Table 4 (for Desktops, Integrated Desktops, and Thin Clients) or Table 5 (for Notebooks).

Fig.3. Ecuación E_{TEC} ³

La **tabla 4** muestra los datos utilizados y el resultado del consumo de energía eléctrica por los 5 años de vida de la unidad funcional para 4 escenarios (off, sleep, long_idle y short_idle) de estados del computador, según el porcentaje de tiempo de uso (25, 35, 10 y 30). Los datos de uso promedio son tomados de Energy Star.

Tabla 4. Datos para calcular el consumo de energía eléctrica

Estado del computador	Tiempo de uso	Energía (Watts)	E_{TEC} (kWh/año)	Consumo en 5 años (kWh)
off	25%	0,25	0,5475	2,7375
sleep	35%	0,86	2,63676	13,1838
long_idle	10%	3,38	2,96088	14,8044
short_idle	30%	18,21	47,85588	239,2794
Total			54,00	270,0051

El cálculo se basa en una matriz energética ajustada al contexto nacional, específicamente el modelo de **ecoinvent** para la matriz eléctrica de Colombia aplicado al consumo energético⁴.

4.1.6 FIN DE VIDA DEL PRODUCTO

Se toma como referencia el dato de la masa del computador para analizar el impacto que genera como residuo electrónico.

³<https://www.energystar.gov/sites/default/files/ENERGY%20STAR%20Computers%20Final%20Version%207.0%20Specification.pdf>

⁴ La información sobre el set de datos de la matriz energética Colombiana en ecoinvent se encuentra disponible en: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/16992/documentation>

5 EVALUACIÓN DE IMPACTO

La evaluación de impactos ha sido realizada conforme a la metodología de la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) ISO 14044:2006.

5.1 METODOLOGÍA Y CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL

El presente estudio empleó el método ReCiPe 2016 punto medio (midpoint), enfoque jerárquico, con el fin de obtener una evaluación ambiental más detallada del ciclo de vida del producto. Este enfoque permite analizar 18 categorías de impacto ambiental específicas, que describen directamente los mecanismos de presión que ejerce el sistema evaluado sobre el ambiente. Estas categorías abarcan aspectos clave como la formación de material particulado, asociada a la contaminación del aire y a problemas respiratorios; la formación de ozono troposférico, tanto por sus efectos en la salud como en la vegetación; la radiación ionizante y la degradación de la capa de ozono estratosférico, que están relacionadas con riesgos globales a largo plazo. También se consideran impactos relacionados con la toxicidad humana (dividida en efectos cancerígenos y no cancerígenos), la ecotoxicidad en medios dulceacuícolas, marinos y terrestres, y los procesos de acidificación y eutrofización, los cuales afectan directamente la calidad de los suelos y cuerpos de agua, alterando la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas. Otras categorías permiten cuantificar la presión sobre el uso del agua, la transformación del suelo y el agotamiento de recursos minerales y fósiles, lo cual resulta especialmente relevante para productos tecnológicos que dependen de materiales críticos con disponibilidad limitada.

De manera excepcional, la categoría de Cambio Climático (huella de carbono) se valoró con una metodología diferente a ReCiPe: se aplicó la metodología del IPCC 2021, utilizando los últimos Potenciales de Calentamiento Global (GWP) disponibles para garantizar mayor precisión. Este enfoque asegura, además, la plena alineación del resultado de huella de carbono con el estudio específico de huella de carbono previamente realizado para el mismo producto.

En conjunto, estas categorías de impacto permiten identificar de forma precisa dónde se concentran los mayores efectos ambientales del producto y ofrecen una base sólida para orientar estrategias de mejora, eficiencia y sostenibilidad en el diseño, producción y gestión del ciclo de vida. A continuación, se presenta esta metodología en la **Fig. 4:**

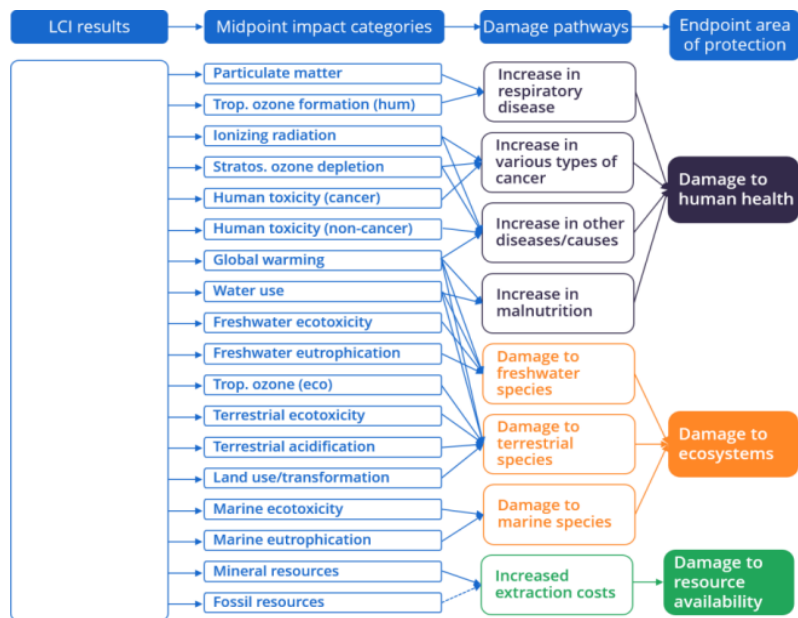


Fig. 4. Metodología ReCiPe.

5.2 RESULTADOS

La **tabla 5** presenta los resultados de la evaluación de impactos para cada una de las etapas del ciclo de vida del producto.

Tabla 5. Resultado de la evaluación de impactos del equipo

Categoría de impacto	Unidad	Producción computador	Transporte aguas arriba	Transporte aguas abajo	Empaque	Uso del computador	Fin de vida del computador	Resultado
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	4,04E-01	1,71E-03	1,45E-05	1,58E-03	8,23E-01	1,65E-04	1,23
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	4,27E+01	1,22E-01	4,29E-03	5,19E-01	8,59E+01	1,88E-02	129,28
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4-DCB	6,81E+01	8,05E-03	4,06E-04	4,90E-02	1,41E+02	5,04E-03	208,84
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0,16	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,48
Calentamiento global	kg CO2 eq	1,68E+02	4,16E-01	1,35E-02	1,13E+00	5,86E+01	1,33E-02	228,17
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DCB	4,73E+01	7,12E-02	2,61E-03	1,99E-01	9,78E+01	1,37E-02	145,41
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	1,10E+03	2,25E-01	1,33E-02	1,50E+00	2,18E+03	1,55E-01	3.283,74

Categoría de impacto	Unidad	Producción computador	Transporte aguas arriba	Transporte aguas abajo	Empaque	Uso del computador	Fin de vida del computador	Resultado
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	1,56E+01	2,65E-03	1,28E-04	4,16E-02	6,53E+01	8,30E-03	80,97
Uso del suelo	m2a crop eq	4,43E+00	6,79E-03	5,00E-04	3,44E-01	1,12E+01	1,92E-03	16,01
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	8,90E+01	1,27E-02	6,80E-04	6,55E-02	1,83E+02	7,17E-03	272,37
Eutrofización marina	kg N eq	4,16E-02	4,12E-06	1,75E-07	3,34E-04	8,31E-02	2,75E-06	0,13
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	8,04E+00	1,04E-02	4,20E-04	2,10E-02	7,81E+00	1,02E-03	15,88
Formación de ozono, Salud humana	kg NOx eq	4,78E-01	5,59E-03	5,57E-05	3,01E-03	9,72E-01	1,81E-04	1,46
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	kg NOx eq	4,92E-01	5,68E-03	5,82E-05	3,30E-03	1,00E+00	1,85E-04	1,50
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	7,31E-05	1,63E-07	3,30E-09	6,10E-07	1,61E-04	2,54E-08	0,00
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	8,00E-01	5,17E-03	3,30E-05	3,08E-03	1,65E+00	2,75E-04	2,45
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	8,17E+02	3,45E+00	2,44E-01	3,06E+00	1,64E+03	1,35E+00	2.468,67
Consumo de agua	m3	1,55E+00	4,84E-04	2,33E-05	9,25E-03	4,97E+00	4,43E-04	6,54

6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto ambiental evaluadas mediante el método ReCiPe 2016 punto medio (perspectiva jerárquica). Los valores se expresan de acuerdo con las unidades correspondientes a cada categoría y se distribuyen según las principales etapas del ciclo de vida del producto, desde la producción hasta su disposición final. Esta desagregación permite identificar con claridad las fases que generan mayores contribuciones al impacto total, facilitando el análisis y la toma de decisiones en torno al diseño y la gestión ambiental del producto.

La **Fig. 5** muestra los resultados de la categoría de impacto formación de partículas finas (medida en kg PM_{2.5} equivalentes) a lo largo del ciclo de vida del computador, según el método ReCiPe 2016 Midpoint (jerárquico).

Se observa que los mayores aportes a esta categoría provienen de dos etapas clave:

- Uso del computador, con aproximadamente 0,82 kg PM_{2.5} eq, representa la mayor contribución. Esto se asocia principalmente al consumo de energía eléctrica durante su vida útil, dependiendo de la matriz energética local (en este caso, Colombia).
- Producción del computador, con 0,404 kg PM_{2.5} eq, también genera una contribución significativa. Esta etapa incluye la fabricación de componentes y ensamblaje, especialmente los procesos en países como China con matrices energéticas intensivas en carbón.

Las demás etapas —transporte aguas arriba y aguas abajo, empaque y disposición final— tienen una contribución marginal (menor al 1 % del total), lo que indica que su influencia en este impacto específico es poco significativa.

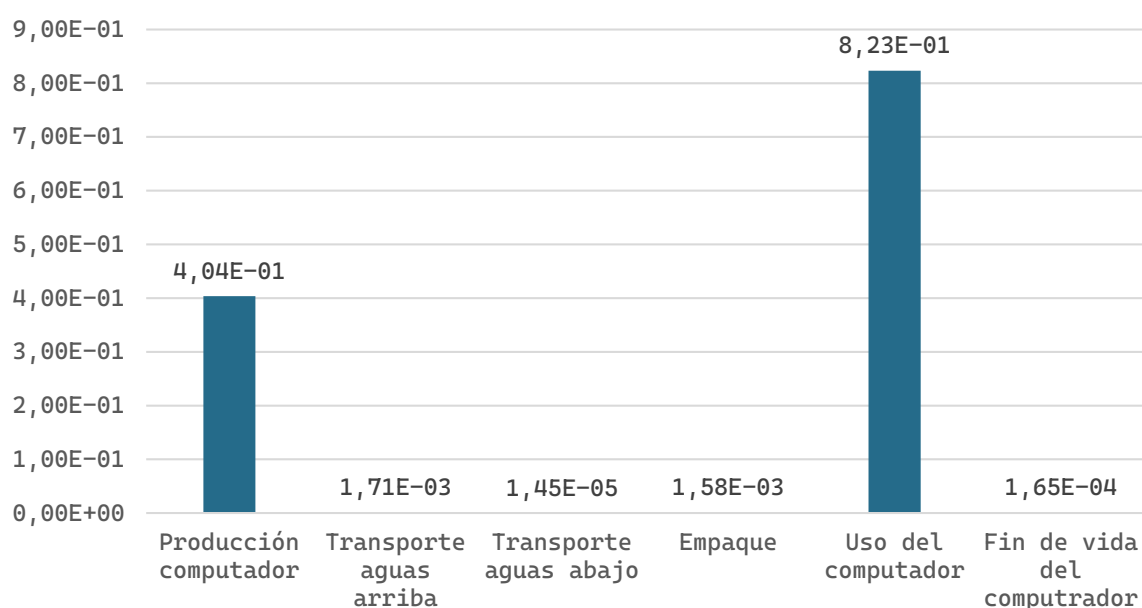


Fig. 5. Formación de partículas finas kg PM_{2.5} eq.

La **Fig. 6** titulada “Escasez de recursos fósiles (kg oil eq)” muestra el impacto ambiental asociado al uso de recursos fósiles en las diferentes etapas del ciclo de vida de un computador. A partir del análisis visual, se destacan los siguientes puntos clave:

- Uso del computador es la etapa con el mayor impacto, con un valor de 85,9 kg de equivalente de petróleo, lo que representa la mayor contribución al agotamiento de recursos fósiles. Esto se debe principalmente al consumo de energía eléctrica durante su vida útil, especialmente si proviene de fuentes no renovables.
- Le sigue la producción del computador, con un valor de 42,7 kg oil eq, reflejando el uso intensivo de energía y materiales derivados del petróleo en la fabricación de componentes electrónicos.
- Las demás etapas —transporte aguas arriba (0,122 kg), transporte aguas abajo (0,00429 kg), empaque (0,519 kg) y fin de vida (0,0188 kg)— tienen impactos significativamente menores, casi despreciables en comparación con las fases de producción y uso.

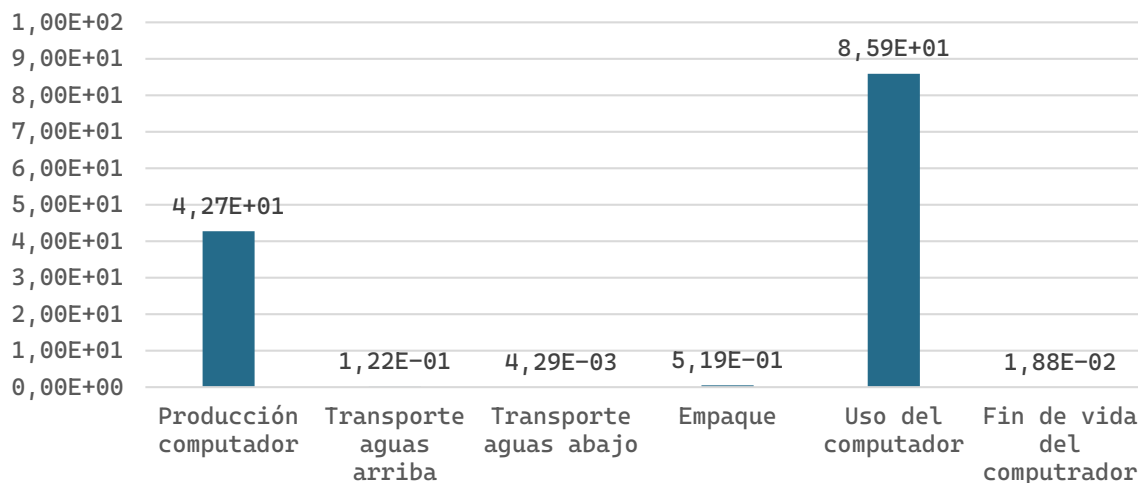


Fig. 6. Escasez de recursos fósiles kg oil eq.

La **Fig. 7** titulada “Ecotoxicidad en agua dulce (kg 1,4-DCB)” muestra el potencial de toxicidad en ecosistemas acuáticos asociado a las diferentes etapas del ciclo de vida de un computador. Este indicador evalúa la liberación de sustancias químicas que afectan organismos en agua dulce, expresadas en equivalentes de 1,4-diclorobenceno (1,4-DCB).

Los resultados muestran dos fases predominantes en la contribución a la ecotoxicidad:

- Uso del computador (141,00 kg 1,4-DCB eq): es la etapa de mayor impacto, atribuible al consumo energético durante la vida útil, que implica emisiones indirectas de contaminantes acuáticos asociadas a la generación de electricidad.
- Producción del computador (68,10 kg 1,4-DCB eq): también presenta un aporte significativo, relacionado con los procesos industriales de extracción y transformación de materias primas, así como el ensamblaje.

Las demás fases resultan marginales en comparación:

- Transporte aguas arriba: $8,05E-03$ kg
- Transporte aguas abajo: $4,06E-04$ kg
- Empaque: $4,90E-02$ kg
- Fin de vida del computador: $5,04E-03$ kg

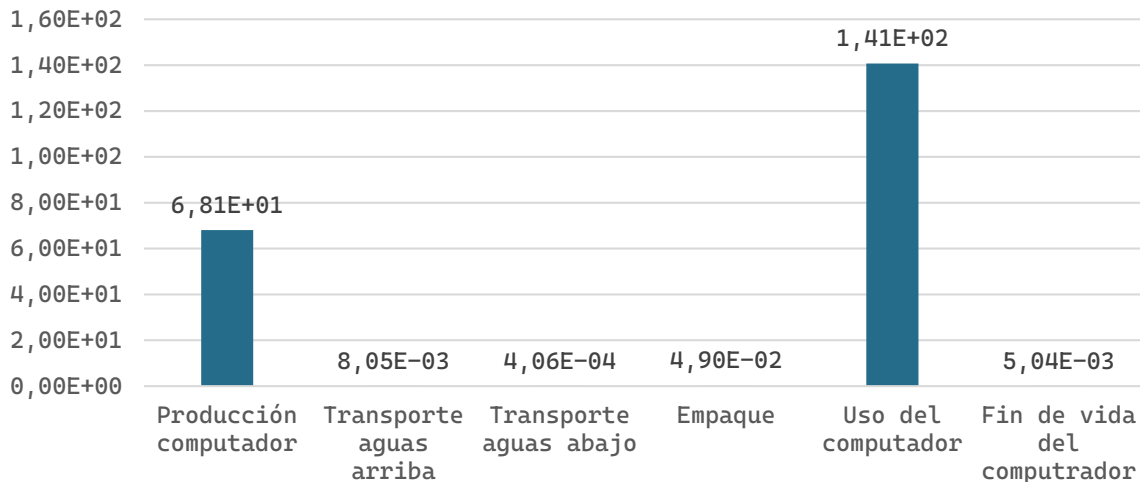


Fig. 7. Eutrofización de agua dulce kg 1,4-DCB.

La Fig. 8. titulada “Eutrofización de agua dulce (kg P eq)” muestra el aporte de fósforo equivalente que puede generar un exceso de nutrientes en cuerpos de agua dulce, lo cual puede causar proliferación de algas, disminución del oxígeno y afectaciones a la biodiversidad acuática.

Los resultados reflejan que:

- La fase de uso del computador es la responsable del mayor impacto, con $0,319$ kg P eq, lo cual está estrechamente relacionado con el consumo energético prolongado del equipo, especialmente si proviene de fuentes que generan emisiones con altos niveles de compuestos nitrogenados o fosforados (como centrales térmicas).
- La producción del computador representa una pequeña fracción del impacto, con $0,158$ kg P eq, posiblemente relacionada con los insumos utilizados y vertimientos en los procesos industriales.

Las demás etapas tienen contribuciones mínimas o despreciables, con los siguientes valores:

- Transporte aguas arriba: $2,63E-05$ kg
- Transporte aguas abajo: $1,47E-06$ kg

- Empaque: 4,12E-04 kg
- Fin de vida del computador: 3,70E-05 kg

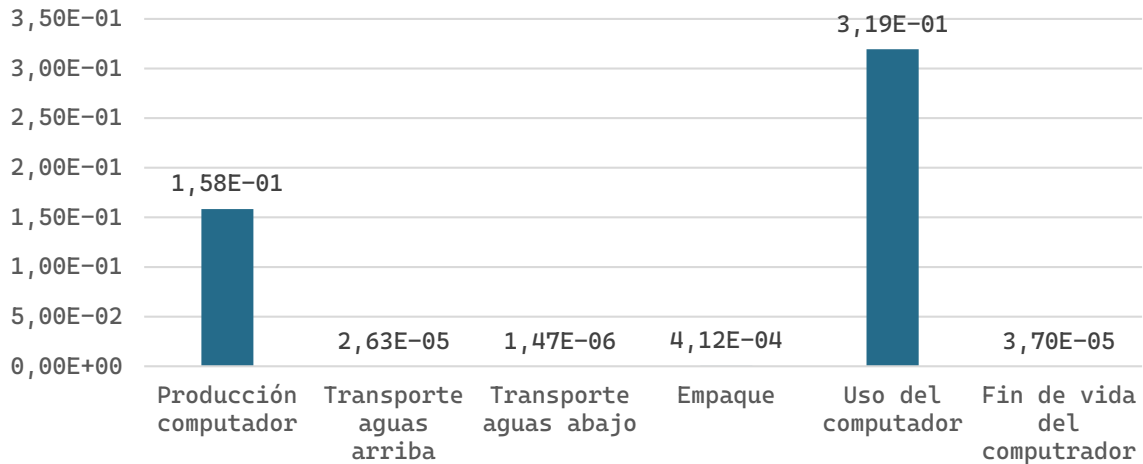


Fig. 8. Eutrofización de agua dulce kg P eq.

La Fig. 9 titulada “Calentamiento global (kg CO₂ eq)” representa el potencial de emisión de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida del computador. Este indicador mide el impacto sobre el cambio climático considerando diversos gases expresados en equivalentes de CO₂ (CO₂ eq).

Una característica relevante de esta evaluación es que los resultados corresponden a un enfoque particular de cuantificación de impactos ambientales, el cual puede diferir de otros comúnmente utilizados en estudios similares. Estas variaciones pueden deberse a diferencias en el horizonte temporal considerado, el conjunto de gases incluidos, los criterios de caracterización aplicados y las bases científicas empleadas para la estimación de los impactos. En consecuencia, los resultados no deben compararse directamente con aquellos obtenidos bajo otros enfoques sin tener en cuenta estos elementos técnicos, ya que podrían conducir a interpretaciones inadecuadas o inconsistencias en el análisis.

La producción del computador es la fase con mayor impacto, con 168,00 kg CO₂ eq, lo cual refleja los procesos intensivos en energía y materiales asociados a la manufactura (extracción de materias primas, refinación, ensamblaje).

La fase de uso del computador contribuye con 58,59 kg CO₂ eq, atribuibles al consumo energético a lo largo de su vida útil.

Las demás fases tienen un impacto significativamente menor:

- Transporte aguas arriba: 0,4156 kg
- Transporte aguas abajo: 0,0135 kg
- Empaque: 1,1334 kg

- Fin de vida del computador: 0,0133 kg

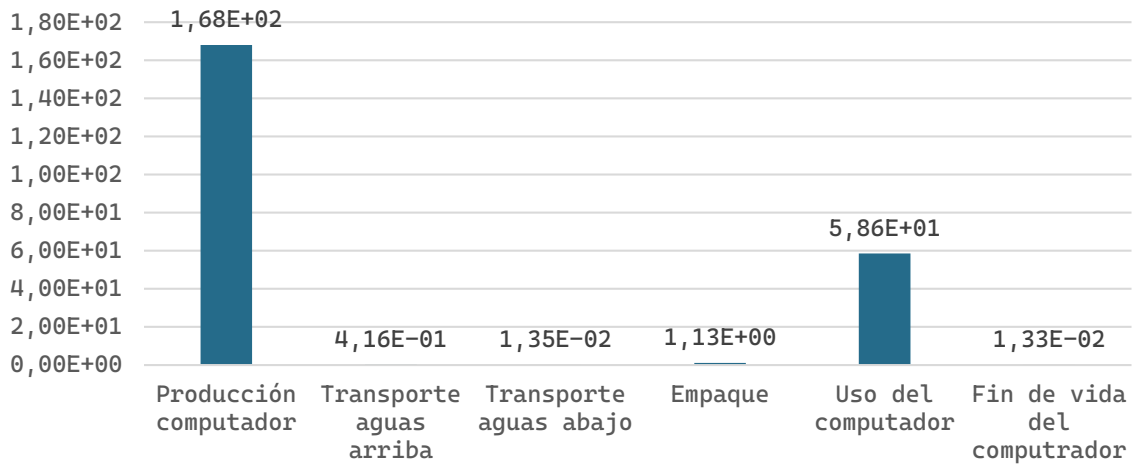


Fig. 9. Calentamiento global kg CO₂ eq.

La Fig. 10 titulada “Toxicidad cancerígena humana (kg 1,4-DCB eq)” muestra el impacto potencial que tiene el ciclo de vida del computador sobre la salud humana debido a sustancias con potencial cancerígeno. El indicador está expresado en kilogramos equivalentes de 1,4-diclorobenceno (1,4-DCB), un compuesto de referencia usado en métodos de evaluación como ReCiPe para cuantificar toxicidad.

El uso del computador es la etapa más impactante, con 97,8 kg 1,4-DCB eq, seguidamente la fase de producción también presenta un impacto considerable con 47,3 kg 1,4-DCB eq, posiblemente asociado al consumo energético y las emisiones indirectas de las fuentes de generación eléctrica, especialmente si la matriz energética incluye carbón o combustibles fósiles.

Las otras fases tienen impactos mucho menores:

- Transporte aguas arriba: 0,0712 kg
- Transporte aguas abajo: 0,00261 kg
- Empaque: 0,199 kg

- Fin de vida del computador: 0,0137 kg

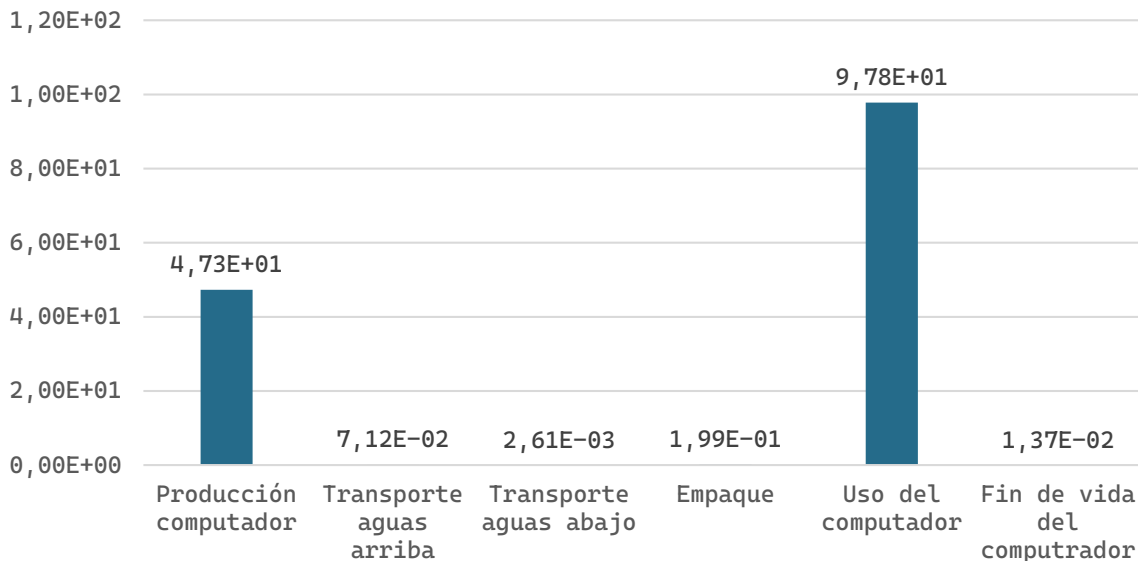


Fig. 10. Toxicidad cancerígena humana kg 1,4-DCB.

La Fig. 11 titulada “Toxicidad humana no cancerígena (kg 1,4-DCB eq)” muestra los impactos potenciales sobre la salud humana asociados a sustancias tóxicas que no causan cáncer, también expresados en kilogramos equivalentes de 1,4-diclorobenceno (1,4-DCB).

Los resultados indican que:

- El uso del computador representa el mayor aporte con 2.182 kg 1,4-DCB eq, lo que implica que gran parte de las sustancias químicas tóxicas no cancerígenas se generan durante la generación de electricidad que abastece al equipo, seguido de esta se encuentra la producción con 1.100 kg 1,4-DCB eq
- Las demás etapas presentan valores notablemente menores:
 - Empaque: 1,50 kg
 - Transporte aguas arriba: 0,225 kg
 - Fin de vida del computador: 0,155 kg
 - Transporte aguas abajo: 0,0133 kg

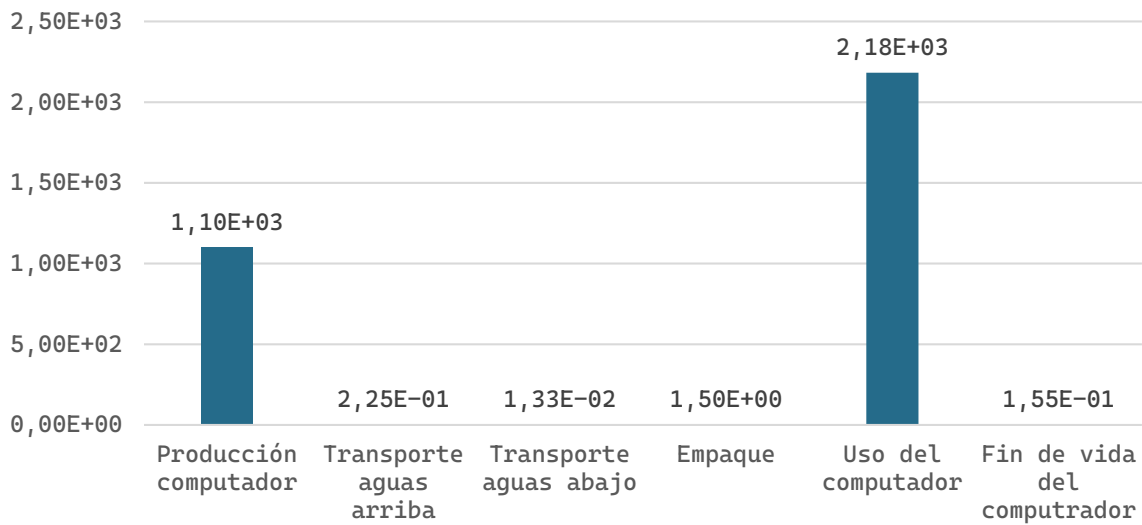


Fig.11. Toxicidad humana no cancerígena kg 1,4-DCB.

La Fig. 12 titulada “Radiación ionizante (kBq Co-60 eq)” evalúa los impactos potenciales sobre la salud humana debido a la exposición a radiación ionizante, utilizando como unidad de referencia los kilobequeres equivalentes de Cobalto-60 (kBq Co-60 eq), un isótopo radiactivo representativo.

Los resultados sugieren que:

- El uso del computador es lo más representativo con un total de 65,3 kBq Co-60 eq, luego la producción del computador con 15,6 kBq Co-60 eq, lo que representa prácticamente la totalidad del impacto.
- Las demás etapas aportan cantidades muy pequeñas:
 - Empaque: 0,0416 kBq
 - Fin de vida del computador: 0,0083 kBq
 - Transporte aguas arriba: 0,00265 kBq

- Transporte aguas abajo: 0,000128 kBq

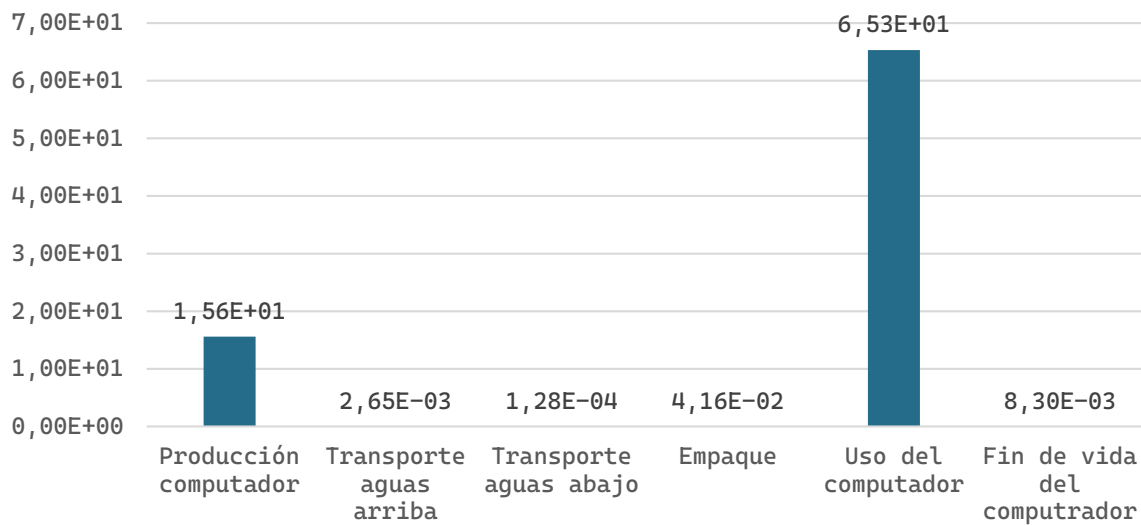


Fig. 12. Radiación ionizante kBq Co-60 eq.

La Fig. 13 titulada “Uso del suelo (m²a crop eq)” representa el área de cultivo ocupada durante un año equivalente (m²a crop eq) como indicador del impacto ambiental relacionado con el cambio en el uso del suelo, especialmente asociado a actividades agrícolas o deforestación.

Los resultados sugieren que:

- Uso del computador: genera el mayor impacto con 11,2 m²a crop eq, representando más del 80 % del total.
- Producción del computador: sigue con 4,43 m²a crop eq, un valor también considerable pero significativamente menor.
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Empaque: 0,344 m²a crop eq
 - Transporte aguas arriba: 0,00679 m²a crop eq
 - Fin de vida: 0,00192 m²a crop eq
 - Transporte aguas abajo: 0,0005 m²a crop eq

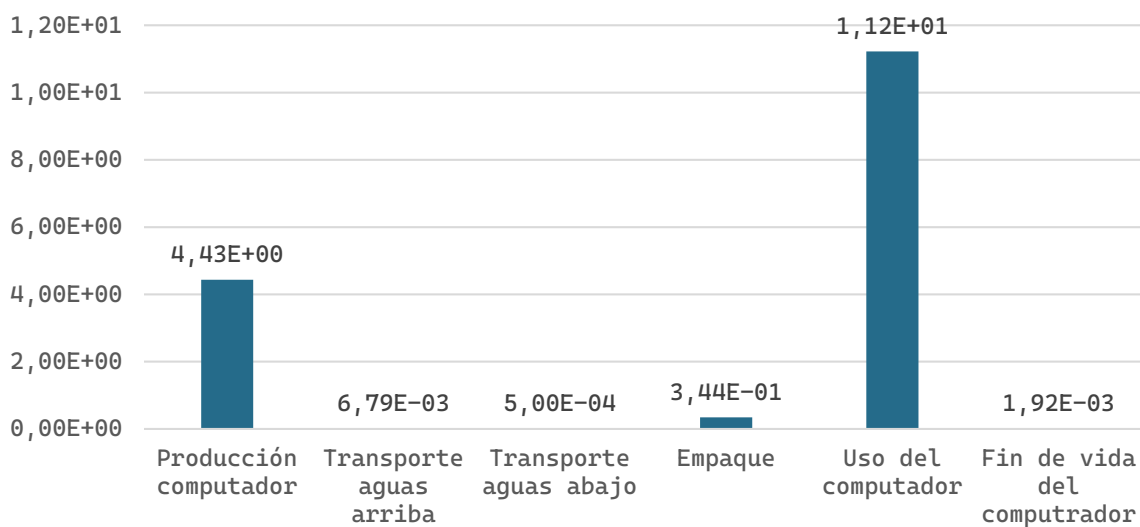


Fig. 13. Uso del suelo m2a crop eq.

La Fig. 14 titulada “Ecotoxicidad marina kg 1,4-DCB” representa el potencial de impacto sobre los ecosistemas marinos, expresado en kilogramos de 1,4-diclorobenceno equivalente (kg 1,4-DCB), como indicador del impacto ambiental relacionado con la liberación de sustancias tóxicas al medio acuático. Los resultados sugieren que:

- Uso del computador: genera el mayor impacto con 183 kg 1,4-DCB, representando la vasta mayoría del total.
- Producción del computador: sigue con 8,90 kg 1,4-DCB, un valor también considerable pero significativamente menor que el uso.
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Empaque: $6,55 \times 10^{-2}$ kg 1,4-DCB
 - Transporte aguas arriba: $1,27 \times 10^{-2}$ kg 1,4-DCB
 - Fin de vida del computador: $7,17 \times 10^{-3}$ kg 1,4-DCB
 - Transporte aguas abajo: $6,80 \times 10^{-4}$ kg 1,4-DCB

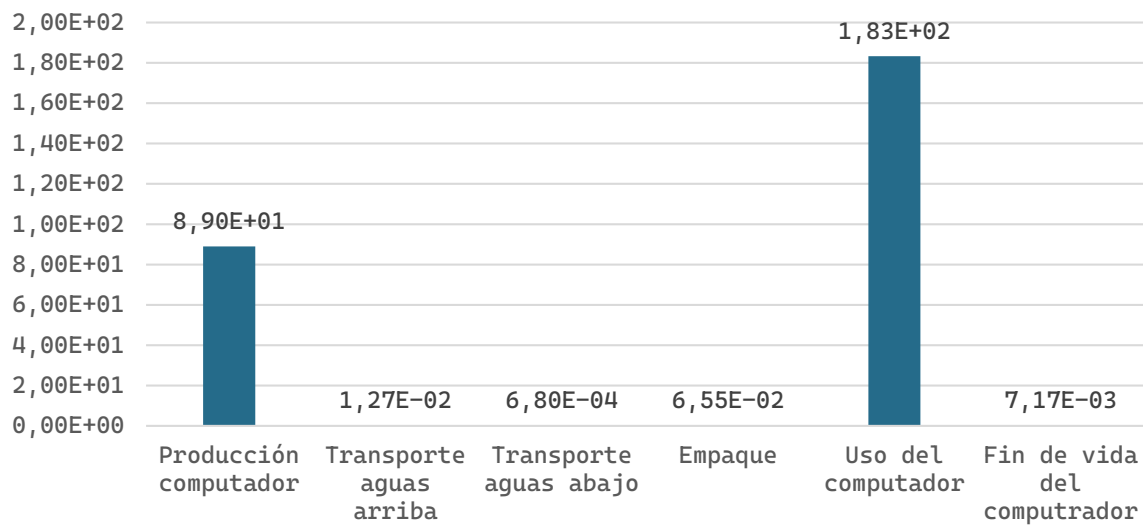


Fig. 14. Ecotoxicidad marina kg 1,4-DCB.

La Fig. 15 titulada “Eutrofización marina kg N eq” representa el potencial de eutrofización en ecosistemas marinos, expresado en kilogramos de nitrógeno equivalente (kg N eq), como indicador del impacto ambiental relacionado con el exceso de nutrientes que pueden provocar la proliferación de algas y la reducción de oxígeno en el agua. Los resultados sugieren que:

- Uso del computador: genera el mayor impacto con $8,31 \times 10^{-2}$ kg N eq, representando la vasta mayoría del total.
- Producción del computador: sigue con $4,16 \times 10^{-2}$ kg N eq, un valor significativamente menor que el uso.
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Empaque: $3,34 \times 10^{-4}$ kg N eq
 - Fin de vida del computador: $2,75 \times 10^{-6}$ kg N eq
 - Transporte aguas arriba: $4,12 \times 10^{-6}$ kg N eq
 - Transporte aguas abajo: $1,75 \times 10^{-7}$ kg N eq

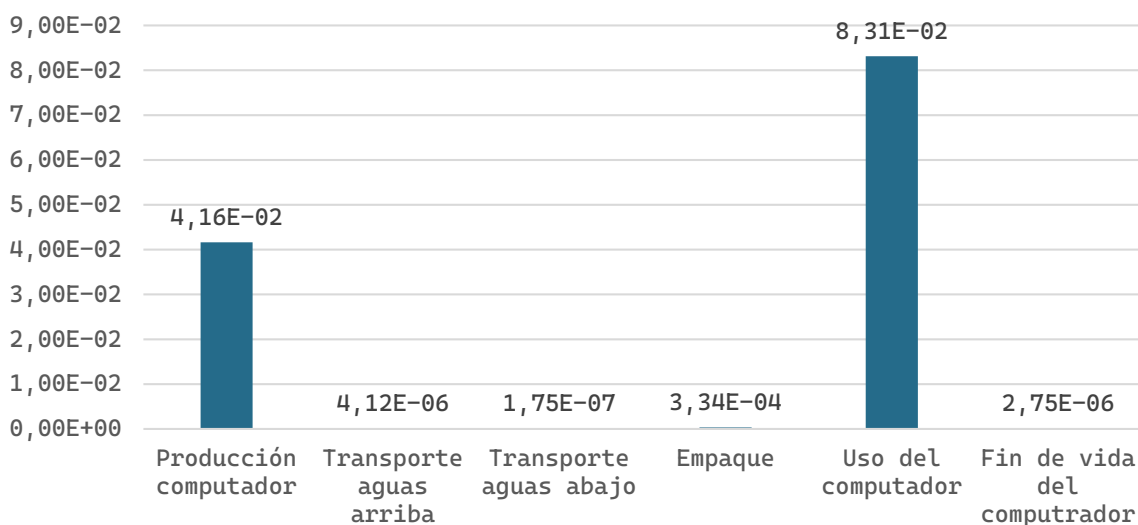


Fig. 15. Eutrofización marina kg N eq.

La Fig. 16 titulada “Escasez de recursos minerales kg Cu eq” representa el potencial de escasez de recursos minerales, expresado en kilogramos de cobre equivalente (kg Cu eq), como indicador del impacto ambiental relacionado con la extracción y el agotamiento de minerales. Los resultados sugieren que:

- Producción del computador: genera el mayor impacto con 8,04 kg Cu eq, representando la mayor parte del total.
- Uso del computador: sigue con 7,81 kg Cu eq, un valor también considerable, pero menor que la producción.
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Empaque: 2,10E-2 kg Cu eq
 - Transporte aguas arriba: 1,04E-2 kg Cu eq
 - Fin de vida del computador: 1,02E-3 kg Cu eq
 - Transporte aguas abajo: 4,20E-4 kg Cu eq

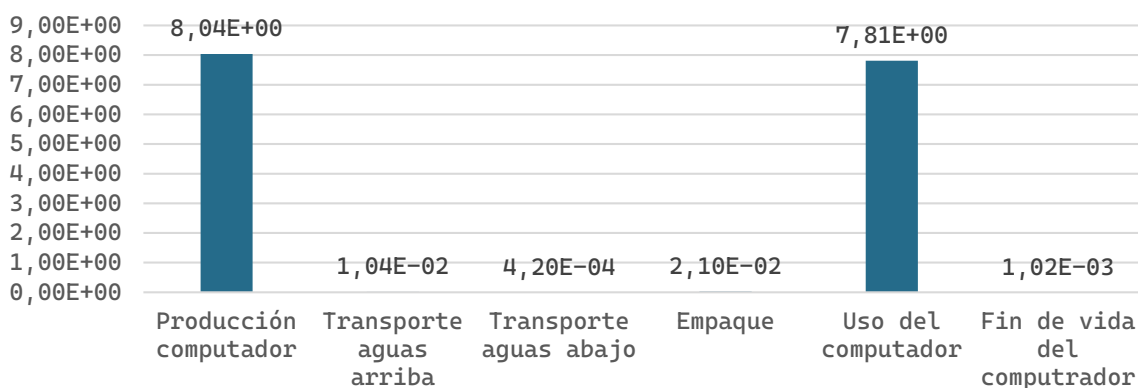


Fig.16. Escasez de recursos minerales kg Cu eq.

La Fig. 17 titulada “Formación de ozono, Salud humana kg NOx eq” representa el potencial de formación de ozono a nivel del suelo, que impacta la salud humana, expresado en kilogramos de óxidos de nitrógeno equivalente (kg NOx eq). Este indicador mide el impacto ambiental relacionado con la emisión de precursores del ozono, como los NOx y los compuestos orgánicos volátiles. Los resultados sugieren que:

- Uso del computador: genera el mayor impacto con 0,97 kg NOx eq, representando la vasta mayoría del total.
- Producción del computador: sigue con 0,47 kg NOx eq, un valor significativamente menor que el uso.
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Transporte aguas arriba: 5,59E-3 kg NOx eq
 - Empaque: 3,01E-3 kg NOx eq
 - Fin de vida del computador: 1,81E-4 kg NOx eq
 - Transporte aguas abajo: 5,57E-5 kg NOx eq

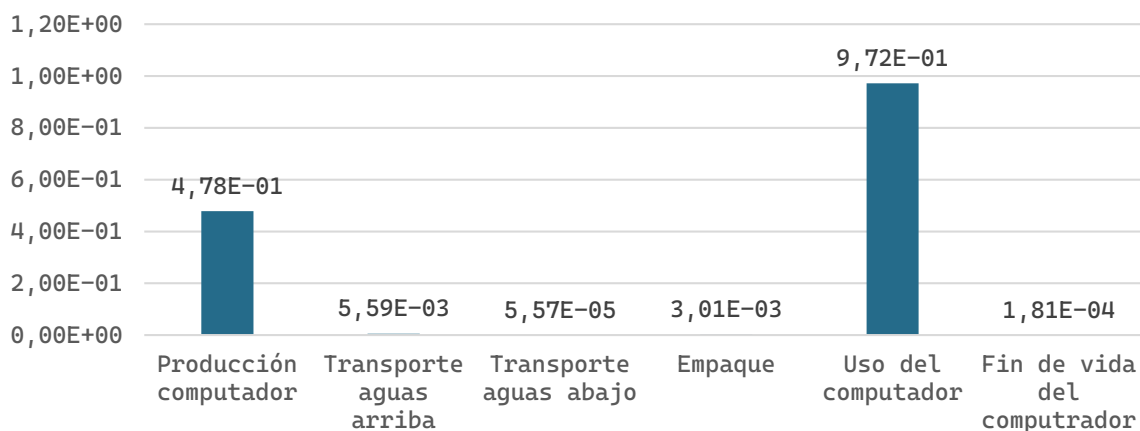


Fig.17. Formación de ozono, Salud humana kg NOx eq.

La **Fig. 18** titulada “Formación de ozono, Ecosistemas terrestres kg NOx eq” representa el potencial de formación de ozono a nivel del suelo que afecta a los ecosistemas terrestres, expresado en kilogramos de óxidos de nitrógeno equivalente (kg NOx eq). Este indicador mide el impacto ambiental relacionado con la emisión de precursores del ozono que pueden dañar la vegetación y la biodiversidad. Los resultados sugieren que:

- Producción del computador: genera el mayor impacto con $4,92 \times 10^{-1}$ kg NOx eq, representando la vasta mayoría del total.
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Transporte aguas arriba: $5,68 \times 10^{-3}$ kg NOx eq
 - Transporte aguas abajo: $5,82 \times 10^{-5}$ kg NOx eq
 - Empaque: $3,30 \times 10^{-3}$ kg NOx eq
 - Uso del computador: $4,70 \times 10^{-5}$ kg NOx eq
 - Fin de vida del computador: $1,85 \times 10^{-4}$ kg NOx eq

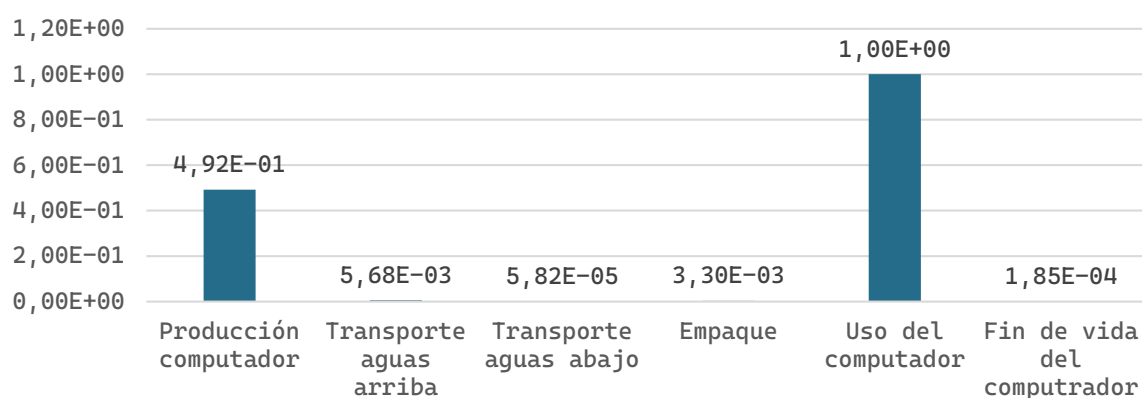


Fig. 18. Formación de ozono, Ecosistemas terrestres kg NOx eq.

La **Fig. 19** titulada “Agotamiento del ozono estratosférico kg CFC11 eq” representa el potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférico, expresado en kilogramos de triclorofluorometano equivalente (kg CFC11 eq). Este indicador mide el impacto ambiental relacionado con la emisión de sustancias que degradan la capa de ozono, como los clorofluorocarbonos (CFCs). Los resultados sugieren que:

- Uso del computador: genera el mayor impacto con $1,61 \times 10^{-4}$ kg CFC11 eq, representando la vasta mayoría del total.
- Producción del computador: sigue con $7,31 \times 10^{-5}$ kg CFC11 eq, un valor significativamente menor que el uso.
- Las demás etapas tienen una participación marginal:

- Transporte aguas arriba: $1,63\text{E}-7$ kg CFC11 eq
- Empaque: $6,10\text{E}-7$ kg CFC11 eq
- Fin de vida del computador: $2,54\text{E}-8$ kg CFC11 eq
- Transporte aguas abajo: $3,30\text{E}-9$ kg CFC11 eq

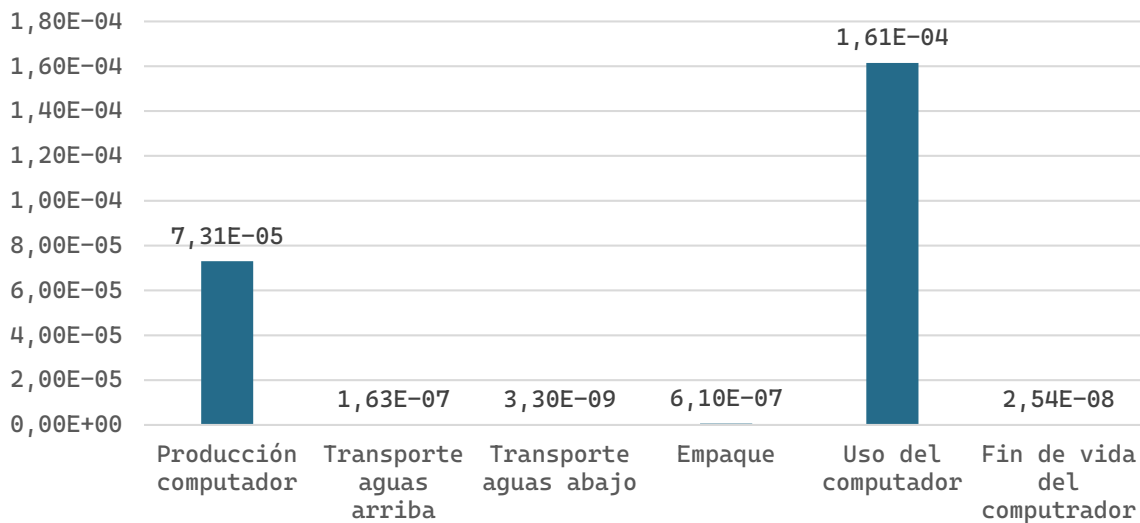


Fig. 19. Agotamiento del ozono estratosférico kg CFC11 eq.

La Fig. 20 titulada “Acidificación terrestre kg SO₂ eq” representa el potencial de acidificación de los ecosistemas terrestres, expresado en kilogramos de dióxido de azufre equivalente (kg SO₂ eq). Este indicador mide el impacto ambiental relacionado con la emisión de sustancias acidificantes, como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, que pueden provocar lluvia ácida y dañar suelos y vegetación. Los resultados sugieren que:

- Uso del computador: genera el mayor impacto con 1,65 kg SO₂ eq, representando la mayor parte del total.
- Producción del computador: sigue con 0,8 kg SO₂ eq, un valor también considerable, pero menor que la producción.
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Transporte aguas arriba: $5,17\text{E}-3$ kg SO₂ eq
 - Empaque: $3,08\text{E}-3$ kg SO₂ eq
 - Fin de vida del computador: $2,75\text{E}-4$ kg SO₂ eq
 - Transporte aguas abajo: $3,30\text{E}-5$ kg SO₂ eq

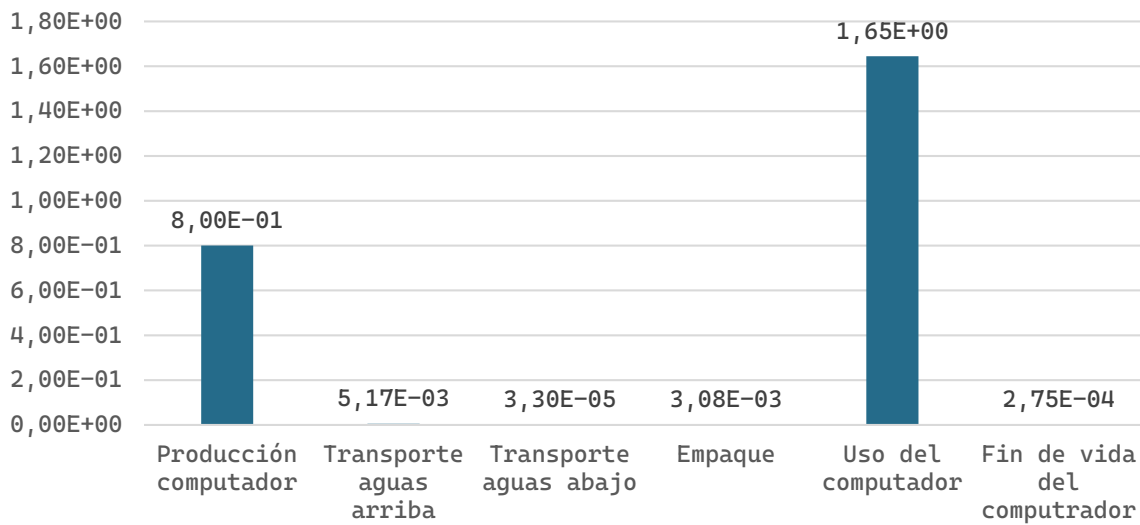


Fig. 20. Acidificación terrestre kg SO₂ eq.

La Fig. 21 titulada “Ecotoxicidad terrestre kg 1,4-DCB” representa el potencial de impacto sobre los ecosistemas terrestres, expresado en kilogramos de 1,4-diclorobenceno equivalente (kg 1,4-DCB), como indicador del impacto ambiental relacionado con la liberación de sustancias tóxicas al medio terrestre. Los resultados sugieren que:

- Uso del computador genera el mayor impacto con 1,64E+03 kg 1,4-DCB, seguido de producción del computador con 8,17E+02 kg 1,4-DCB representando la vasta mayoría del total
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Transporte aguas arriba: 3,45×100 kg 1,4-DCB
 - Empaque: 3,06×100 kg 1,4-DCB
 - Fin de vida del computador: 1,35×100 kg 1,4-DCB
 - Transporte aguas abajo: 2,44×10⁻¹ kg 1,4-DCB

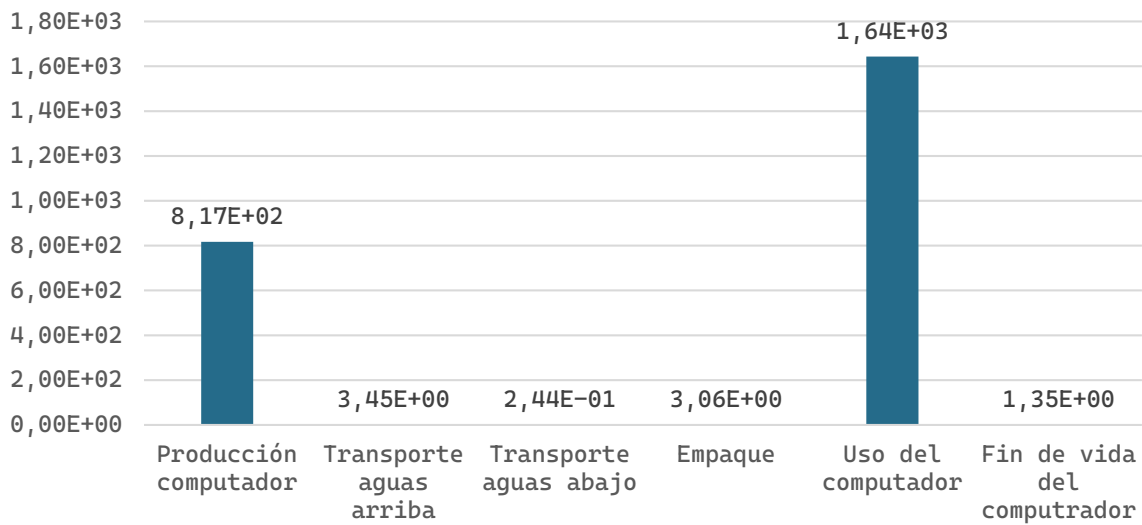


Fig. 21. Ecotoxicidad terrestre kg 1,4-DCB.

La Fig. 22 titulada “Consumo de agua m³” representa el consumo de agua, expresado en metros cúbicos (m³). Este indicador mide el impacto ambiental relacionado con la extracción de agua dulce de diversas fuentes a lo largo del ciclo de vida del producto. Los resultados sugieren que:

- Uso del computador genera el mayor impacto con 4,97 m³, seguido de producción del computador con 1,55 m³ representando la vasta mayoría del total
- Las demás etapas tienen una participación marginal:
 - Empaque: $9,25 \times 10^{-3}$ m³
 - Transporte aguas arriba: $4,84 \times 10^{-4}$ m³
 - Fin de vida del computador: $4,43 \times 10^{-4}$ m³
 - Transporte aguas abajo: $2,33 \times 10^{-5}$ m³

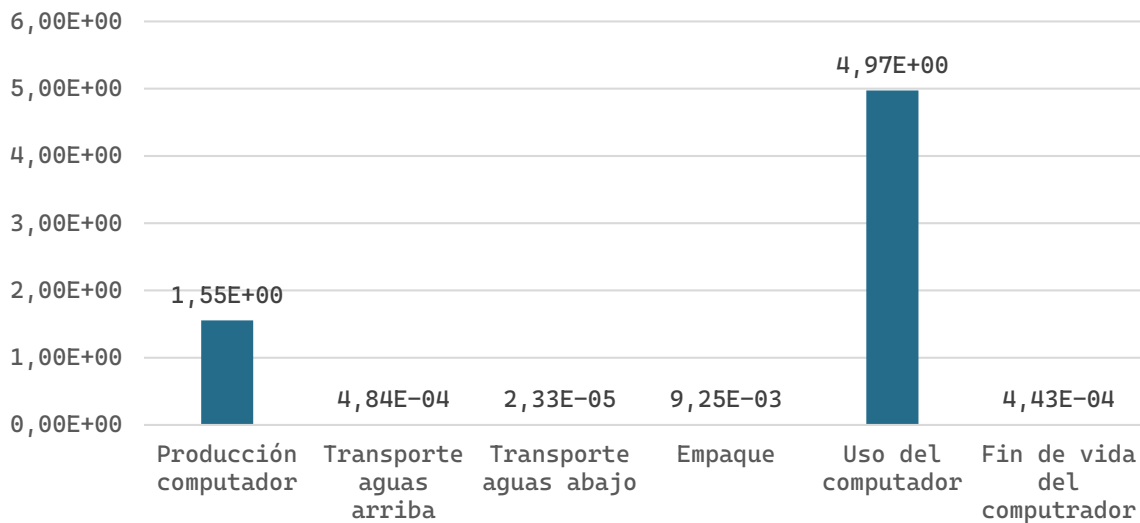


Fig. 22. Consumo de agua m³.

7 CONCLUSIONES

El análisis del ciclo de vida (ACV) de un computador, utilizando el método ReCiPe 2016 Midpoint (perspectiva jerárquica), revela consistentemente que los impactos ambientales significativos se concentran abrumadoramente en dos fases clave: la Producción del computador y el Uso del computador. Las etapas de transporte (aguas arriba y abajo), empaque y fin de vida muestran, en la gran mayoría de los indicadores, una contribución marginal o despreciable al impacto total.

Patrones de Impacto por Etapa:

1. Dominancia de la Fase de Uso:
 - Consumo energético y emisiones asociadas: La fase de uso del computador emerge como el principal factor contribuyente en categorías directamente relacionadas con el consumo de energía eléctrica y las emisiones derivadas de la matriz energética. Esto incluye la Formación de partículas finas, la Escasez de recursos fósiles, la Eutrofización de agua dulce, la Eutrofización marina, la Formación de ozono (Salud humana) y el Agotamiento del ozono estratosférico. Estos impactos se amplifican cuando la generación de electricidad se basa en fuentes no renovables o con altas emisiones (como la quema de carbón, mencionada en el informe).
 - Uso del suelo: Sorprendentemente, el Uso del suelo (m²·a crop eq) también muestra su mayor impacto en la fase de uso, lo que podría estar vinculado indirectamente a la demanda de terrenos para infraestructuras energéticas o la cadena de suministro asociada al consumo eléctrico prolongado.
2. Alta Carga en la Fase de Producción:

- Extracción de recursos y procesos industriales: La fase de producción del computador es la principal impulsora de impactos en categorías asociadas a la extracción y procesamiento de materias primas, la manufactura intensiva y la liberación de sustancias tóxicas. Destaca como el mayor contribuyente en la Ecotoxicidad en agua dulce, la Ecotoxicidad terrestre, la Toxicidad cancerígena humana, la Toxicidad humana no cancerígena (con un impacto varias órdenes de magnitud superior a otras fases en esta categoría), la Radiación ionizante, la Escasez de recursos minerales, la Acidificación terrestre y el Calentamiento global.
 - Consumo de agua: El Consumo de agua también es predominantemente imputable a la producción, reflejando el uso intensivo de este recurso en la fabricación de componentes.
 - Origen geográfico: El informe subraya que los procesos de fabricación en países con matrices energéticas intensivas en carbón (como China) contribuyen significativamente a estos impactos en la fase de producción.
3. Impacto Marginal de Otras Etapas:
- Transporte (aguas arriba y abajo), Empaque y Fin de vida: Estas etapas muestran consistentemente valores extremadamente bajos en todas las categorías de impacto analizadas. Esto indica que, si bien tienen una huella, su contribución al impacto ambiental global del computador es secundaria en comparación con las fases de producción y uso.

Implicaciones y Recomendaciones Clave:

Este análisis proporciona una base sólida para priorizar las estrategias de mitigación ambiental:

- Enfoque en la eficiencia energética durante el uso: Es crucial diseñar computadores con mayor eficiencia energética y promover hábitos de uso que minimicen el consumo eléctrico. Esto tiene un impacto directo y significativo en la reducción de la escasez de recursos fósiles, la formación de partículas finas, la eutrofización y los impactos en el ozono.
- Sostenibilidad en la Cadena de Suministro y Manufactura: Es indispensable mejorar la sostenibilidad de los procesos de producción. Esto implica la búsqueda de materiales menos tóxicos, la optimización de los procesos de extracción y fabricación para reducir el consumo de energía y agua, y la implementación de prácticas de economía circular para los componentes. La toxicidad humana (cancerígena y no cancerígena), la ecotoxicidad (terrestre y dulceacuícola), el calentamiento global, la acidificación y el agotamiento de recursos minerales son predominantemente influenciados por esta fase.
- Investigación en materiales y procesos alternativos: La enorme contribución de la producción a la toxicidad humana no cancerígena y la radiación ionizante sugiere la necesidad de investigar y desarrollar materiales y procesos de fabricación que sean inherentemente menos dañinos.

- Aunque menos críticos, considerar: Si bien el transporte, el empaque y el fin de vida son marginales, las mejoras en estas áreas (e.g., embalajes más sostenibles, logística optimizada, reciclaje eficiente) pueden complementar los esfuerzos en las fases principales.

En conclusión, para abordar los impactos ambientales de un computador, la atención debe centrarse en hacer que los dispositivos sean más eficientes energéticamente durante su vida útil y transformar fundamentalmente la manera en que se producen, desde la extracción de materias primas hasta el ensamblaje final.

Anexo numeral 5.2 ISO 14044

Este anexo reestructura el contenido existente del informe para cumplir con los requisitos de informes a terceros del numeral 5.2 de ISO 14044.

a) Aspectos generales

a.1 Quién encarga y quién realiza el ACV (interno o externo)

- Encarga: Compumax Computer S.A.S. (Interno)
- Realiza: Centro de Formación Sostenible – CFS (externo).

a.2 Fecha del informe

- Agosto de 2025.

a.3 Declaración de conformidad

El estudio se realizó de acuerdo con los requisitos de la Norma ISO 14044:2021 (en coherencia con ISO 14040).

7.1 b) Objetivo del estudio

b.1 Razones para realizar el estudio

- Soportar criterios de compras sostenibles/EPEAT y comprender los principales impactos ambientales del producto Notebook Ónix a lo largo de su ciclo de vida.

b.2 Aplicaciones previstas

- Comunicación técnica a partes interesadas y soporte a decisiones de ecodiseño. No se prevén aseveraciones comparativas de carácter público.

b.3 Público objetivo

- Consumidores, áreas internas de I+D y sostenibilidad de Compumax, y entidades de verificación de esquemas como EPEAT.

b.4 Declaración sobre aseveraciones comparativas

- No se prevén aseveraciones comparativas de carácter público.

7.2 c) Alcance del estudio

c.1 Función

- Función del sistema: equipo portátil para tareas de oficina/educación/ocio.
- Características de desempeño: consumo típico de energía de 54,00 kWh/año (perfil de uso ENERGY STAR/ETEC).
- Omisión de funciones adicionales en comparaciones: no se consideran funcionalidades de alto desempeño (p. ej., gaming) u otras no previstas en el uso declarado.

c.2 Unidad funcional (UF)

- Una (1) unidad de Notebook Ónix, vida útil de referencia de 5 años y consumo promedio anual de 54,00 kWh.

c.3 Límites del sistema

- Incluye: producción de materiales y componentes, ensamblaje, empaque, transporte aguas arriba y aguas abajo, fase de uso y fin de vida.

- Excluye: repuestos, reúso de partes y bienes de capital (máquinas e infraestructura).
- Cuantificación de entradas y salidas: ver tablas de ICV del informe principal (referencia cruzada a Tablas 5–8).

c.4 Criterios de corte

Criterio de corte por masa

Se excluyen aquellos materiales que de acuerdo con la literatura están por debajo de los 5 gramos

Cobertura temporal

Año base de datos primarios: 2024; fecha de referencia del inventario: 2024–2025; vigencia sugerida: 3 años.

Cobertura tecnológica

Conjunto de procesos promedio (global/regional) de Ecoinvent 3.11 y datos primarios de planta de ensamblaje.

Cobertura geográfica

Ensamblaje en Colombia; componentes mayoritariamente de Asia; uso y fin de vida modelados para Bogotá, Colombia.

7.3 d) Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)

d.1 Procedimientos de recopilación de datos

- Recopilación de datos primarios de consumo de energía y agua de la planta; distancias logísticas definidas; datos secundarios de Ecoinvent 3.11; ver secciones de metodología del informe principal.

d.2 Descripción cualitativa y cuantitativa de procesos unitarios

- Procesos modelados: producción de materiales/componentes, ensamblaje, empaque, transporte, uso (ETEC/ENERGY STAR) y fin de vida; con balances de entradas/salidas resumidos en el ICV.

d.3 Fuentes bibliográficas

- Ecoinvent 3.11 y bibliografía técnica citada en el informe principal (normas, manuales, literatura científica).

d.4 Procedimientos de cálculo

- Software: openLCA; Método: ReCiPe 2016 midpoint (H) e IPCC 2021 solo para cambio climático. Reglas de conversión/unidades según configuración de la base de datos. Se revisó consistencia de sólidos/energía y coherencia entre procesos.

d.5 Validación de los datos

- Evaluación de la calidad de datos: matriz cualitativa (Alta/Suficiente/Media/Baja) y verificaciones de coherencia (control de outliers, comparación con el año previo cuando aplica).

- Tratamiento de datos faltantes: sustitución mediante procesos análogos de Ecoinvent con documentación de supuestos.

d.6 Análisis de sensibilidad

- No realizado. Se sugiere en versión futura evaluar $\pm 10\%$ en consumo de electricidad en fase de uso y una variación de la vida útil entre 4–6 años.

d.7 Principios y procedimientos de asignación

- Documentación y justificación: se evitó asignación siempre que fue posible; cuando aplica, se empleó asignación másica para energía/agua/residuos de planta, con aplicación uniforme de los procedimientos.

7.4 e) Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

e.1 Procedimientos, cálculos y resultados

- Caracterización realizada con ReCiPe 2016 midpoint (jerárquico); resultados reportados por etapa (producción, uso, transporte, empaque, fin de vida) y por categoría de impacto.

e.2 Limitaciones de los resultados

- Dependencia de datos secundarios promediados, supuestos de uso y matriz eléctrica, y exclusiones según criterios de corte; los resultados deben interpretarse junto con la evaluación de incertidumbre cualitativa.

e.3 Relación de resultados con objetivo y alcance

- Los resultados apoyan el objetivo de priorizar acciones de ecodiseño y el cumplimiento de requisitos de compra sostenible/EPEAT bajo la UF de 5 años en Colombia.

e.4 Relación EICV–ICV

- Los flujos de inventario (Tablas 5–8 del informe principal) constituyen la base para la caracterización en ReCiPe (openLCA).

e.5 Categorías de impacto e indicadores considerados, y razones de selección

- Se seleccionaron las categorías midpoint de ReCiPe 2016 e IPCC 2021 para cambio climático por su adopción amplia y trazabilidad metodológica, con horizonte temporal de 100 años en el enfoque jerárquico.

e.6 Modelos/factores de caracterización y métodos utilizados (suposiciones y limitaciones)

- Paquete de factores: ReCiPe 2016 midpoint (H) y de IPCC 2021 del AR6. Limitaciones: elección del enfoque jerárquico, incertidumbres en los factores y falta de representatividad local en algunas cadenas.

e.7 Juicios de valor (normalización/ponderación/agrupación)

- No se aplicaron normalización, ponderación ni agrupación de resultados.

e.8 Declaración sobre la naturaleza relativa de los resultados

- Los resultados de la EICV son expresiones relativas; no predicen impactos reales en puntos finales ni la superación de umbrales.

7.5 f) Interpretación del ciclo de vida

f.1 Resultados

Categoría de impacto	Unidad	Producción computador	Transporte aguas arriba	Transporte aguas abajo	Empaque	Uso del computador	Fin de vida del computador	Resultado
Formación de partículas finas	kg PM _{2.5} eq	4,04E-01	1,71E-03	1,45E-05	1,58E-03	8,23E-01	1,65E-04	1,23
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	4,27E+01	1,22E-01	4,29E-03	5,19E-01	8,59E+01	1,88E-02	129,28
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4-DCB	6,81E+01	8,05E-03	4,06E-04	4,90E-02	1,41E+02	5,04E-03	208,84
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0,16	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,48
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	1,68E+02	4,16E-01	1,35E-02	1,13E+00	5,86E+01	1,33E-02	228,17
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DCB	4,73E+01	7,12E-02	2,61E-03	1,99E-01	9,78E+01	1,37E-02	145,41
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	1,10E+03	2,25E-01	1,33E-02	1,50E+00	2,18E+03	1,55E-01	3.283,74
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	1,56E+01	2,65E-03	1,28E-04	4,16E-02	6,53E+01	8,30E-03	80,97
Uso del suelo	m ² a crop eq	4,43E+00	6,79E-03	5,00E-04	3,44E-01	1,12E+01	1,92E-03	16,01
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	8,90E+01	1,27E-02	6,80E-04	6,55E-02	1,83E+02	7,17E-03	272,37
Eutrofización marina	kg N eq	4,16E-02	4,12E-06	1,75E-07	3,34E-04	8,31E-02	2,75E-06	0,13
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	8,04E+00	1,04E-02	4,20E-04	2,10E-02	7,81E+00	1,02E-03	15,88

Categoría de impacto	Unidad	Producción computador	Transporte aguas arriba	Transporte aguas abajo	Empaque	Uso del computador	Fin de vida del computador	Resultado
Formación de ozono, Salud humana	kg NO _x eq	4,78E-01	5,59E-03	5,57E-05	3,01E-03	9,72E-01	1,81E-04	1,46
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	4,92E-01	5,68E-03	5,82E-05	3,30E-03	1,00E+00	1,85E-04	1,50
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC ₁₁ eq	7,31E-05	1,63E-07	3,30E-09	6,10E-07	1,61E-04	2,54E-08	0,00
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	8,00E-01	5,17E-03	3,30E-05	3,08E-03	1,65E+00	2,75E-04	2,45
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	8,17E+02	3,45E+00	2,44E-01	3,06E+00	1,64E+03	1,35E+00	2.468,67
Consumo de agua	m ³	1,55E+00	4,84E-04	2,33E-05	9,25E-03	4,97E+00	4,43E-04	6,54

f.2 Suposiciones y limitaciones asociadas a la interpretación

- Vida útil de 5 años, consumo eléctrico promedio de 54,00 kWh/año, criterios de corte por masa, datos secundarios globales y representatividad geográfica/temporal/tecnológica.

f.3 Evaluación de la calidad de los datos

- Se empleó matriz cualitativa con niveles Alta/Suficiente/Media/Baja; se recomienda reforzar documentación de trazabilidad de lotes críticos y verificación de proveedores clave.

f.4 Transparencia de juicios de valor, justificaciones y opiniones de expertos

- No se aplicaron juicios de valor adicionales; la interpretación siguió guías del método ReCiPe 2016 e IPCC 2021 y la práctica de modelado en openLCA.

7.6 g) Revisión crítica

Nombre del revisor	Afiliación/Entidad	Rol	Fecha	Firma

8 BIBLIOGRAFÍA

ISO. (2018). ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization.

UNE-EN ISO 14040:2006 Environmental management. Life Cycle Analysis. Principles and reference framework

UNE-EN ISO 14064-1:2019 Greenhouse gases. Part 1: Specification with guidance, at the organization level, for the quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals

UNE-EN ISO 14067:2019 Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification

UNE-EN 16258:2013 Methodology for the calculation and declaration of energy consumption and greenhouse gas emissions in transport services (freight and passenger transport)

IEEE 1680.1 (2018) IEEE Standard for Environmental and Social Responsibility Assessment of Computers and Displays

Energy Star, E. (n.d.). ENERGY STAR ® Program Requirements for Computers Partner Commitments. Retrieved November 12, 2022, from www.energystar.gov/partners