

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE UN ADITIVO POLIMÉRICO
CON NANOPARTÍCULAS DE ZnO**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGIA AMBIENTAL

PRESENTA:

ELSA GABRIELA ALVARADO DÍAZ

ASESOR INTERNO : GUILLERMO GONZÁLEZ SÁNCHEZ

ASESOR EXTERNO : STIG IRVING OLSEN



CHIHUAHUA, CHIHUAHUA, MARZO DEL 2013

Resumen

La nanotecnología representa hoy en día una de las áreas de transferencia tecnológica con mayor potencial de desarrollo, sin embargo aún existe gran incertidumbre sobre el efecto al medio ambiente y a la salud humana producto del uso y liberación de nanopartículas, así como de su interacción con los organismos y sistemas biológicos. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es el único método estandarizado internacionalmente para la cuantificación de los potenciales impactos ambientales vinculados a la producción, uso y disposición final de productos y servicios (ISO 14040_2006, 2007). Su aplicación en “nano-productos” aún es incipiente y enfrenta grandes retos y limitaciones, sin embargo constituye un primer paso en la inclusión de la perspectiva ambiental en el desarrollo de nanotecnologías. El presente trabajo tuvo como objetivo realizar un estudio de ACV de la manufactura a escala piloto de un aditivo polimérico con nanopartículas (NPs) de Óxido de Zinc (ZnO), por la empresa Servicio de Administración Peñoles, S.A (S.A.P.S.A.), con el propósito de evaluar su impacto ambiental en las categorías de daño de punto final: calidad del ecosistema, salud humana, agotamiento de recursos y cambio climático. Por lo anterior se siguieron los métodos señalados por la normas NMX-SAA-14040-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008; las recomendaciones de la Guía General Europea para Análisis del Ciclo de Vida, además se utilizó el software para análisis de ciclo de vida GaBi ® versión 4.0. y la metodología de evaluación de ciclo de vida IMPACT 2002+ versión 2.1. Los resultados obtenidos indican que las categorías de impacto más relevantes para cada una de las áreas de protección analizadas son: efectos respiratorios y no carcinogénicos (salud humana), eco-toxicidad terrestre (calidad del ecosistema), energía no renovable (recursos) y calentamiento global. El daño a dichas categorías proviene principalmente de las entradas y salidas de materia y energía relacionadas a la extracción de la solución de ZnSO₄ (empleada en la fase de mezclado) y del homopolímero (utilizado en la fase de masterbatch). Dentro de la extracción de la solución

de ZnSO_4 , se identificaron a los procesos de beneficio y refinación de Zn, así como el consumo de energía eléctrica como las posibles áreas de oportunidad en la mejora del desempeño ambiental de la producción del aditivo, ya que se encuentran bajo el control operativo de S.A.P.S.A.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	2
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS	9
INTRODUCCIÓN	12
MARCO TEÓRICO	16
DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA: GABI SOFTWARE VERSIÓN 4	16
HIPÓTESIS.....	31
OBJETIVOS.....	32
OBJETIVO GENERAL	32
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
METODOLOGÍA.....	34
Modelos de caracterización	37
Categorías de impacto analizadas.....	39
Toxicidad Humana (carcinogénicos + no carcinogénicos).....	39
Efectos respiratorios (debido a compuestos inorgánicos).....	43
Radiación ionizante.....	45
Agotamiento de la capa de ozono	48
Oxidación fotoquímica.....	52
Eco toxicidad Acuática	57
Ecotoxicidad terrestre	61
Acidificación Acuática	64
Acidificación y Eutrofización Terrestre	66
Eutrofización acuática.....	68
Ocupación de suelo.....	71

Calentamiento global.....	77
Energía no renovable.....	82
Extracción mineral.....	84
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	87
ACV DEL MASTERBATCH DE ÓXIDO DE ZINC (ZNO) NANOMÉTRICO.....	87
<i>Introducción al caso de estudio</i>	87
<i>Definición del objetivo</i>	88
Consideraciones y limitaciones.....	89
Métodos y elección de métodos.....	90
Audiencia objetivo.....	91
<i>Definición del alcance</i>	91
Función.....	91
Unidad funcional.....	91
Límites del sistema.....	92
<i>Evaluación del impacto en el ciclo de vida (EICV)</i>	95
Descripción de la metodología seleccionada para la EICV, indicadores de categoría y modelos de caracterización.....	95
• Historia.....	95
Aspectos tomados en cuenta para la elección del método IMPACT 2002+.....	96
Clasificación y caracterización (elemento obligatorio).....	97
Normalización de los resultados a daño final (elemento opcional).....	102
<i>Interpretación del ciclo de vida</i>	109
Identificación de aspectos significativos.....	109
Análisis de sensibilidad.....	122
Chequeo de Integridad.....	124
CONCLUSIONES	127
RECOMENDACIONES	129

TRABAJO FUTURO	129
REFERENCIAS	130

Lista de Figuras

Figure 2. VISIÓN GENERAL DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA TESIS EN LÍNEA CON LAS FASES DEL ACV DESCRITAS POR (DS/ EN ISO 14040, 2006)	19
FIGURE 5 ELEM ENTOS OBLIGATORIOS Y OPCIONALES DEL AICV DE ACUERDO A LA ISO	27
Figura 3. Esquema general del marco IMPACT 2002+. Basado en (Jolliet et al., 2003a).	35
Figure 4 Representación gráfica del concepto AVPP, adaptado al español de http://en.wikipedia.org/wiki/File:DALY_disability_affected_life_year_infographic.svg extraído en diciembre del 2012.	37
Figure 5. Esquema general del camino de impacto para toxicidad humana y ecotoxicidad empleada en la herramienta IMPACT 2002+. Adaptado de	40
Figure 6, Panorama de las etapas de vías de impacto de las emisiones radioactivas en la Salud Humana, (adaptado al español de JRC-IES, 2010).....	45
Figure 7. Cadena de causalidad del modelo para la evaluación de los impactos de las sustancias agotadoras de ozono. Tomado y traducido al español de (JRC-IES, 2010).	49
Figure 8. Cadena causa-efecto para la formación de ozono fotoquímico para las emisiones aerotransportadas de COVs, CO y NOx. El grosor de las flechas indica la importancia de las vías de impacto involucradas. Esquema adaptado de (JRC-IES, 2010) ...	53
Figure 9. Esquema general del camino de impacto para toxicidad humana y ecotoxicidad empleada en la herramienta IMPACT 2002+. Adaptado de (Humbert et al., 2005)	63
Figure 10. Esquema de la cadena de causa-efecto para la categoría de impacto cambio climático. Adaptada de.....	79
Figure 1. Límites del sistema.	93
Figure 2. Esquema general de las etapas, flujos de entrada y salida considerados dentro del sistema para el ACV.....	94
Figura 11. Resultados caracterización por etapa para las categorías de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+.	101
Figura 12. Resultados de la normalización a nivel de categoría de punto final en puntos (personas equivalentes*año).	104

Figure 13. Categorías de punto intermedio normalizadas a daño final para el área de protección salud humana.....	105
Figure 17. Categorías de punto intermedio normalizadas a daño final para el área de protección calidad del ecosistema.....	106
Figure 20 Categoría de punto intermedio normalizada a daño final para el área de protección cambio climático.	107
Figure 23. Categorías de punto intermedio normalizadas a daño final para el área de protección recursos.	108
Figure 14. Resultados normalizados a nivel de daño sobre la categoría "salud humana" por etapa de manufactura.	110
Figure 15 a) Daño global sobre la categoría "efectos respiratorios" b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "efectos respiratorios"	111
Figure 16 a) Daño global sobre la categoría "no carcinogénicos". b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "no carcinogénicos".	112
Figure 18 Resultados normalizados a nivel de daño sobre la categoría "calidad del ecosistema" por etapa de manufactura.	113
Figure 19 a) Daño global sobre la categoría "eco-toxicidad terrestre". b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "eco-toxicidad terrestre".	114
Figure 21. Resultados normalizados a nivel de daño sobre la categoría "calentamiento global" por etapa de manufactura.	115
Figure 22 a) Daño global sobre la categoría "calentamiento global". b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "calentamiento global".	116
Figure 24 Resultados normalizados a nivel de daño sobre la categoría "recursos " por etapa de manufactura.	117
Figure 25 a) Daño global sobre la categoría "energía no renovable". b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "energía no renovable".	118
Figure 26 Resultados normalizados a daño final para las categorías de punto intermedio en IMPACT 2002+ por etapa de síntesis.	119

Lista de Tablas

Tabla 1. Categorías de impacto consideradas para la EICV, la referencia principal tomada para su modelo de caracterización, sustancias de referencia y unidades tanto de punto intermedio como de daño final usadas en IMPACT 2002+. Adaptada de (Humbert, Margni, & Jolliet, 2005) y (Humbert, De Schryver, Margni, & Olivier, 2012)....	36
Table 2. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Toxicidad Humana.....	42
Table 3. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Efectos Respiratorios.	44
Table 4. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Radiación Ionizante.	47
Table 5. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono.	51
Table 6. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Oxidación Fotoquímica.	56
Table 7. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Ecotoxicidad Acuática.	60
Table 8. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Ecotoxicidad Terrestre.	62
Table 9. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Acidificación Acuática.	65
Table 10. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Acidificación y Eutrofización Terrestre de acuerdo a (Humbert et al., 2005).	67
Table 11. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Eutrofización Acuática de acuerdo a (Humbert et al., 2005).	70
Table 12. Visión general de los parámetros que determinan los 4 tipos de uso del suelo. *) Área natural reducida significa número de especies que habitan cuando el área natural es reducida por la conversión o que se mantiene reducida debido a la ocupación. **) La reducción de especies sucede en el área natural fuera del terreno transformado o mantenido. Tomada de (Goedkoop & Spriensma, 2001a).....	73

Table 13. Clasificación, valores de PDF y descripción de las áreas de ocupación acorde con la metodología Eco-Indicador 99 extraído y adaptado de(Goedkoop & Spriensma, 2001b)	75
Table 14. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de uso de suelo de acuerdo con (Humbert et al., 2005)	76
Table 15. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Cambio Climático de acuerdo a (Humbert et al., 2005)	81
Table 16. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Energía no renovable de acuerdo con (Humbert et al., 2005)	83
Table 17. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Extracción Mineral de acuerdo con (Humbert et al., 2005)	86
Table 18. Resultados de caracterización para las categorías de impacto de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+ para la etapa de mezclado.....	97
Table 19. Resultados de caracterización para las categorías de impacto de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+ para la etapa de lavado.	98
Table 20. Resultados de caracterización para las categorías de impacto de punto intermedio consideradas por	98
Table 21. Resultados de caracterización para las categorías de impacto de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+ para la etapa de capping.	99
Table 22. Resultados de caracterización para las categorías de impacto de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+ para la etapa de masterbatch.....	99
Tabla 23. Relación entre las categorías de punto intermedio y punto final en la metodología IMPACT 2002+. Los factores de normalización corresponden a la versión 2.1 de la metodología para el Oeste de Europa.	102
Table 24 Contribución relativa del proceso a la categoría. (normalizada al impacto total de la extracción de la solución de ZnO.....	120
Table 25 Procesos considerados dentro de la extracción de la solución de ZnSO ₄ con mayor carga para las categorías más relevantes de acuerdo a los resultados de normalización.....	121
Table 26 Variación considerada en los parámetros para el análisis de sensibilidad mínimo-máximo.....	123

Table 27 Análisis de sensibilidad por el método "min-max" para los flujos de salida. 124

Table 28 Análisis de sensibilidad por el método "min-max" para los flujos de salida. 125

Introducción

El presente trabajo de tesis se desarrolla dentro del contexto del proyecto MINANO EUFP7, colaboración entre diferentes instituciones educativas y privadas la Unión Europea y México, entre ellas Servicios Administrativos Peñoles S.A. (S.A.P.S.A.), el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV, S.C.) y la Universidad Tecnológica de Dinamarca (DTU). El objetivo de MINANO es el desarrollo de un método de producción de nanocompositos a gran escala, continuo, eficiente y económico (Paajanen M.; Benavides R., 2010) que además asegure una producción sustentable y segura mediante la aplicación del estado del arte del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Particularmente el proyecto se centra en el desarrollo de los mecanismos de síntesis de nano-partículas minerales así como a la integración de éstas a bases poliméricas de polipropileno (PP), poliestireno (PS) y poli cloruro de vinilo (PVC) para la elaboración de productos plásticos de diversa índole. Los materiales de interés son el Hidróxido de Magnesio ($Mg(OH)_2$), Óxido de Zinc (ZnO) y la Plata (Ag), debido a que éstos poseen propiedades de retardancia de flama, de protección contra los rayos ultravioleta (UV) y bacteria-estáticas respectivamente. El interés del empleo de dichos materiales como precursores minerales de la síntesis de nanoconcentrados radica en que son subproductos directos del proceso de extracción y/o refinación de minerales realizados por la empresa S.A.P.S.A. por lo que su uso representa ventajas ambientales y económicas respecto a otros precursores similares.

La nanotecnología representa hoy en día una de áreas de transferencia tecnológica con mayor potencial de desarrollo. Dhingra, Naidu, Upreti, & Sawhney (2010) la definen como “el entendimiento y control de la materia a escalas que van entre 1 a 100 nanómetros, donde se

presentan fenómenos y propiedades únicas en los materiales que representan campos de aplicación realmente novedosos”.

La explotación de las propiedades de la materia a escala nanométrica ha acaparado la atención de científicos e industriales en aras del desarrollo de diversas aplicaciones nanotecnológicas, las cuales cada día más pasan del papel a la realidad, de los laboratorios a los estantes en los centros comerciales. En el año de 2009 los ingresos en nanotecnología en productos de consumo fueron de alrededor de \$ 1,545 millones dólares. En 2015 se espera que dichos ingresos aumenten a \$ 5,335 millones, debido a la demanda de electrónicos de consumo y productos de limpieza. (Peralta-Videa et al., 2011)

A pesar de las ventajas económicas y tecnológicas de la nanotecnología, aún existe gran incertidumbre en relación a los impactos ambientales y a la salud humana asociados su aplicación. La experiencia anterior en la fabricación y uso de múltiples sustancias químicas que resultaron en graves daños a la salud humana y el medio ambiente, debe llevarnos a considerar que el desarrollo nanotecnológico en fases tempranas no sólo se centre en el entendimiento de los mecanismos físicos y químicos de la materia a escala nanométrica, es imperativo que también considere e identifique los aspectos ambientales, sociales y económicos implícitos.

Investigadores, científicos y agencias reguladoras coinciden en que los riesgos potenciales a la salud humana y al medio ambiente de los nano-materiales producidos artificialmente deben de ser evaluados a lo largo de todo sus ciclo de vida (Grieger et al., 2012). El ACV representa hoy el único método estandarizado internacionalmente de evaluación de desempeño ambiental de productos (ISO 14040_2006, 2007) mediante la cuantificación de los potenciales impactos ambientales vinculados a su producción, uso y disposición final por lo que representa una herramienta de primera mano para la toma de decisiones desde el contexto de sustentabilidad.

Desafortunadamente existen muy pocos trabajos que consideren la dimensión ambiental durante el desarrollo de nanotecnologías, mediante la aplicación de ACV, Hirschier & Walser (2012) hacen una recopilación de sólo 17 estudios de ACV en nanomateriales artificiales del 2001 al 2011. Si bien dichos estudios enfrentan grandes retos y limitaciones constituyen un primer paso hacia la construcción del desarrollo sostenible de la nanotecnología.

El proyecto MINANO es muestra de las posibilidades para el establecimiento de actividades de cooperación y fuentes de financiamiento para el fomento y desarrollo de la nanotecnología entre países. Para México dicho proyecto representa la oportunidad de estar en la punta del conocimiento en base a una actividad económica de gran tradición e importancia para el país como es la minería. S.A.P.S.A. con más de 123 años de historia, encabeza la lista mundial en la extracción y comercialización de minerales metálicos y no ferrosos.

México posee las capacidades básicas para incorporarse al tren del progreso que representa la nanotecnología. El impulso a la nanotecnología es fundamental para el país, ya que representa una alternativa de crecimiento económico que permitiría incrementar su competitividad global, acortar la brecha tecnológica con respecto a otros países, mejorando las condiciones de vida de su población. Simultáneo al desarrollo y aplicación de la nanotecnología, es importante considerar las implicaciones sociales, medioambientales, éticas y de salud de productos nano-estructurados así como la regulación en esta materia. ((CIMAV), 2008).

En el contexto anterior el valor del presente trabajo radica en ser uno de los primeros esfuerzos en México, llevado a cabo por el CIMAV con apoyo de DTU, en la implementación de la metodología ACV para la generación de información y datos cuantificables relacionados al comportamiento ambiental y los riesgos potenciales a la salud y los ecosistemas asociados al desarrollo de nanotecnologías a partir de sustancias precursoras provenientes de subprocesos mineros. En específico de un aditivo polimérico funcionalizado con nanopartículas de Zinc a

partir de sulfato de zinc (ZnSO_4) sub- producto del proceso hidrometalúrgico de extracción del Zinc.

Marco Teórico

DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA: GaBi SOFTWARE VERSIÓN 4.0.

Este software es una herramienta de modelación y un método para la ingeniería de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) la cual se encuentra estandarizada acorde a los principios señalados por la norma ISO 14040, para la modelación se alimenta de distintas base de datos, la mayoría precargadas en el software, sin embargo los usuarios pueden adaptar las entradas de información a las necesidades del sistema así como configurar e introducir información externa al programa.

GaBi es desarrollado y distribuido como resultado de la colaboración entre el departamento de Ingeniería de Análisis de Ciclo de Vida (GaBi) de la Universidad de Stuttgart fundado en 1989 y la compañía de consultoría PE Internacional, creada en 1991. Las siglas GaBi provienen de la abreviación de las palabras alemanas “Ganzheitliche Bilanzwhich” cuyo significado es “Balance Holístico”. (Commission, LCA, Tools, Services and Data., 2010)

El software GaBi cuenta con 10, 000 usuarios, entre los que se encuentran empresas, compañías, universidades y centros de investigación y desarrollo alrededor del mundo. (PE INTERNATIONAL , 2012)

La ingeniería de Análisis de Ciclo de Vida es un método de análisis que permite ponderar los impactos técnicos, económicos y ambientales a lo largo de cada una de las etapas del ciclo de vida tanto de productos y servicios que integran un sistema, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final. (Stuttgart, 2010)

De acuerdo con (Merl, 2008), la aplicación de GaBi software se extiende más allá de la Ingeniería de ACV, a áreas como:

Cálculo de la huellas de carbono,

Análisis de flujos de material, energía y procesos, mapeo de cadenas de valor.

Análisis de escenarios diversos.

Exanimación de factores sociales y económicos de las organizaciones

Emisiones de gases invernadero

Benchmarking

VISION GENERAL DE LA HERRAMIENTA DE GaBi 4.0 DENTRO DE LA METODOLOGIA DE LA NORMA ISO: 14040:2006

La experimentación comprenderá la modelación del ACV a través de la herramienta GaBi 4.0, se basará en los principios de las normas ISO 14040 y las recomendaciones brindadas por el Manual Internacional de Referencia del Sistema de Datos para Análisis de Ciclo de Vida (ILCD Handbook), documentos que cubren los aspectos relacionados a la metodología para Análisis del Ciclo de Vida.

A continuación se hará una descripción general de los puntos descritos por la norma (DS/ EN ISO 14040, 2006) en los capítulos 4 y 5. Además se integran los avances que se tienen hasta el momento en lo concerniente a la definición de la investigación. Al final de este capítulo se

hace una descripción general de principales funciones de GaBi 4.0 en relación a los estándares ISO mencionados.

ALUNOS ASPECTOS DE LA METODOLOGIA ISO CAPITULO 4 Y 5

FASES DEL LCA

El marco de referencia en la elaboración de un ACV es un proceso iterativo compuesto de cuatro fases centrales:

1. Definición de los objetivos y alcance.
2. Análisis del inventario
3. Evaluación de Impacto
4. Interpretación.

Es importante enfatizar la naturaleza iterativa de la metodología, conforme se va progresando en la colección de datos o en la modelación, nuevos resultados e interpretaciones surgen, haciendo necesario la reconfiguración de los objetivos y alcances planteados.

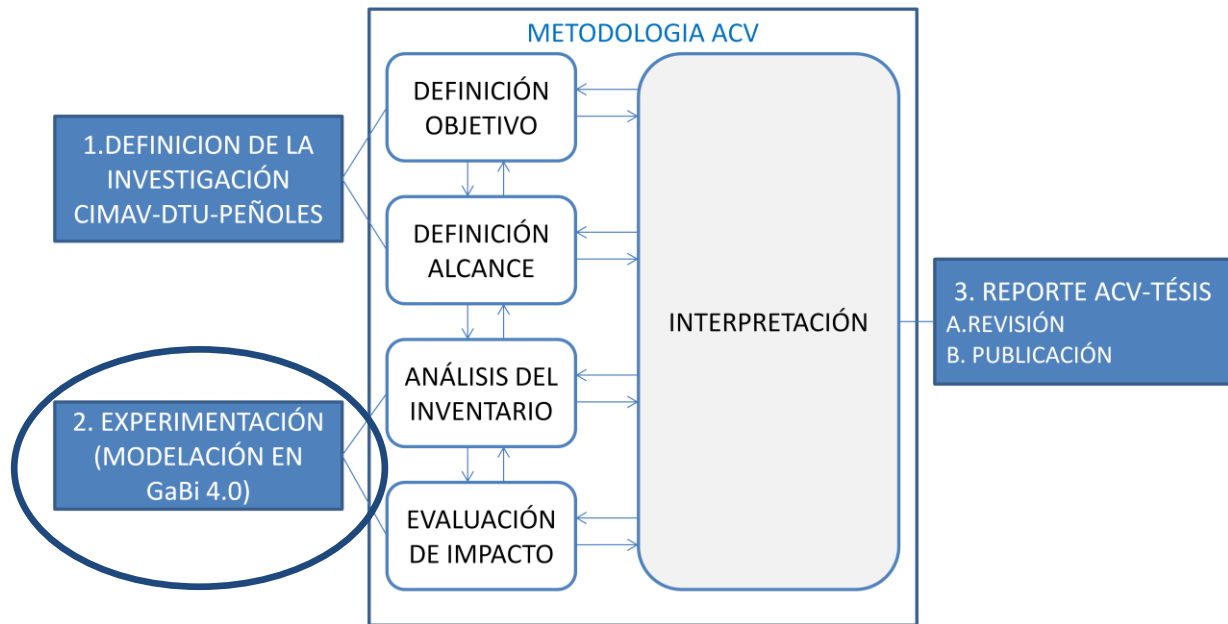


Figure 1. VISIÓN GENERAL DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA TESIS EN LÍNEA CON LAS FASES DEL ACV DESCRITAS

POR (DS/ EN ISO 14040, 2006)

MARCO METODOLÓGICO

- Requerimientos Generales.
- Cuando se lleva a cabo una ACV, los siguientes requerimientos deben de ser considerados.
- Definición del objetivo y alcance.
- Generalidades
- Objetivo

La definición del objetivo es el primer paso en la elaboración de un estudio de ACV, desempeña un papel central dado que da sentido y dirección al proyecto en desarrollo. El objetivo debe de responder los siguientes aspectos:

1. Intención del estudio.
2. Razones para llevar a cabo el estudio
3. Audiencia objetivo
4. Aseveraciones comparativas entre distintos procesos.

Alcance

El alcance debe:

Delimitar el producto objeto de estudio, el sistema.

Determinar las funciones del producto o de los sistemas a ser estudiados.

Establecer la unidad funcional.

Definir las fronteras del sistema.

Establecer los procedimientos de asignación.

Seleccionar las categorías de Impacto así como el método de evaluación de impacto y de interpretación subsecuente.

Especificar las características y la calidad de los datos requeridos.

Indicar las asunciones realizadas.

Identificar las limitaciones del estudio,

Especificar el tipo de revisión crítica a la que será objeto el estudio, así como tipo y formato del reporte.

El alcance debe de caracterizar y definir en detalle el tipo de estudio que se pretende realizar, establece los requerimientos metodológicos en línea con la definición de los objetivos. (Commission, 2010).

FUNCIÓN, UNIDAD FUNCIONAL Y FLUJOS DE REFERENCIA

Función

El sistema debe tener un número de posibles funciones, la selección de la función a evaluar dependerá del objetivo y el alcance del LCA.

Unidad Funcional.

La Unidad funcional cuantifica las funciones definidas del producto. El principal propósito de la unidad funcional es proveer una referencia a la cual estén relacionadas las entradas y las salidas. Lo cual es necesario para asegurar la comparación de los resultados del LCA. En casos donde se comparan sistemas distintos las comparaciones deben ser hechas en una base común.

La unidad funcional debe de responder a las siguientes cuestiones, (Commission, (International Reference Life Cycle Data System), 2010)

Función otorgada ¿Qué?

En qué cantidad ¿Cuánto?

Duración, ¿Por cuánto tiempo?

De que calidad, en relación a la forma y al desempeño de la función otorgada.

Cambios en el desempeños de la función a través del tiempo

Flujos de Referencia.

Es de suma importancia definir el flujo de referencia para cada sistema-producto, que ayuda a cumplir con la función buscada. Por ejemplo: el número de productos necesarios para realizar la función.

(Commission, (International Reference Life Cycle Data System), 2010) señala que la definición cuantitativa de la unidad funcional del un producto deberá responder a estándares técnicos siempre que sea apropiado y posible. Que tan apropiado sea un estándar depende de la forma en que éste capture la unidad funcional en relación a los requerimientos del LCA.

FRONTERAS DEL SISTEMA

La norma establece que antes de comenzar con la búsqueda de datos e información para la elaboración de ACV es indispensable tener una clara delimitación física del espacio en el que se desarrolla nuestro sistema, Para ello es necesario definir los componentes claves, procesos a los que se cuantificará en función de sus flujos de entrada y salida, etc. La elección de los elementos del sistema físico que será modelado dependerá de la meta y alcance definidos para el estudio.

ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

GENERALIDADES

Esta fase involucra la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar los efectos o cargas ambientales adversos asociados a todas las entradas y salidas relevantes dentro de un sistema de producción, en función de a la unidad funcional definida para ello.

El Análisis del Inventario es un proceso iterativo. Conforme los datos se van colectando, más se aprende acerca del sistema, nuevos datos o limitaciones son identificados lo que conlleva a cambios en los procedimientos de obtención de datos en orden de alcanzar las metas del estudio, incluso este proceso lleva a la redefinición de las metas y alcance del ACV.

Colección de Datos

A cada proceso dentro de las fronteras del sistema deben de asignarse sus correspondientes:

- Flujos de materia y energía
- Productos, subproductos y desechos
- Emisiones al medio ambiente, al aire, agua y suelo
- Otros aspectos medio ambientales.

El proceso de colección de datos puede considerarse como una de las etapas más intensivas en tiempo y recursos.

Calculo de Datos

Los procedimientos de cálculo:

Validación de los datos colectados

relación de los datos con las unidades de los procesos

relación de los datos con los flujos de referencia y las unidades funcionales,

Son necesarios para generar los resultados del inventario para cada unidad de proceso y para la unidad funcional definida del sistema-producto a modelar.

Para cada uno de los flujos de energía los cálculos deben de tomar en cuenta las diferentes mezclas de combustibles y energía usada, la eficiencia en la conversión y en la distribución de los flujos, así como las entradas y salida asociadas con su generación y uso.

Asignación de los flujos y emisiones

Pocos son los procesos industriales que generan una sola salida o que se basan en un sistema lineal de entrada y salida de materia prima. De hecho, la mayoría de los procesos industriales emiten más de un solo producto, reciclando productos intermedios o emitiendo productos como materias primas de procesos subsecuentes.

Ciertas consideraciones deben de emplearse para los procesos de asignación cuando se trabaja con sistemas que envuelven, por ejemplo, múltiples productos y sistemas de reciclado.

Teniendo presente que no todos los sistemas cuentan con unidades funcionales claras o únicas se pueden presentar los siguientes casos (Commission, (International Reference Life Cycle Data System), 2010):

- Procesos multifuncionales
- Cuando el proceso cuente con más de un producto como salida, o esté recibiendo como entrada más de un flujo de desecho. Se tiene más de un flujo de referencia, y cada uno debe ser definido y especificado.
- Sistemas mono funcionales.
- Para sistemas con sólo una función o combinación de funciones relevante, la unidad funcional debe de ser especificada.
- Sistemas con funciones alternativas.
- Para este tipo de casos en los que se poseen múltiples y paralelas funciones, se debe de especificar un flujo de referencia por función, son requeridas especificaciones técnicas detalladas y unidades funcionales para cada caso.
- Sistema con funciones alternativas.

Este tipo de sistemas pueden tener una gran variedad de funciones alternativas dependiendo del contexto en el que se esté empleando. Estos sistemas sólo pueden producir un producto para

cada función alternativa. Se debe de definir y especificar la función alternativa más relevante para el estudio, así como seleccionar su flujo referencia y documentar las especificaciones técnicas al respecto.

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.

General

Esta etapa del ACV está encaminada a la evaluación de la significancia de los potenciales impactos ambientales usando el Inventario del Ciclo de Vida (ICV).

Este proceso implica la asociación de los datos del inventario con categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos, con la intención de entender dichos impactos. La fase del AICV brinda información para la fase de Interpretación del Ciclo de Vida. Aspectos como la transparencia, son críticos para asegurar la claridad de las asunciones descritas en el reporte.

Esta fase se compone por: Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y caracterización de modelos, normalización y evaluación.

Clasificación: en esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado.

Los resultados del AICV deben de ser expresados como indicadores de impacto potencial de relevancia, generalmente conocidos como categorías de impacto.

Cada categoría de impacto representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de producto en términos de representaciones cuantitativas, denominadas indicadores.

La suma de diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría.

Caracterización: consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto.

Mediante los factores de caracterización, también llamados factores equivalentes, las diferentes intervenciones ambientales, emisiones de gases, por ejemplo, se convierten a unidades del indicador.

Es necesario el uso de modelos para obtener estos factores de caracterización. La aplicabilidad de los factores de caracterización dependerá de la precisión, validez y características de los modelos utilizados.

Elementos del AICV

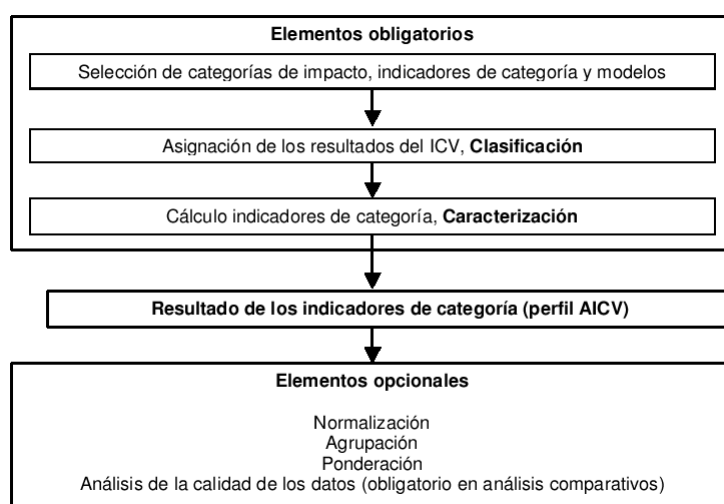


FIGURE 2 ELEMENTOS OBLIGATORIOS Y OPCIONALES DEL AICV DE ACUERDO A LA ISO

Limitaciones del AICV

El AICV direcciona solo las cuestiones ambientales que están especificadas en el objetivo y alcance. De tal forma que no implica una evaluación completa de todos los aspectos ambientales del sistema-producto bajo estudio.

El AICV no puede siempre demostrar diferencias significativas entre las categorías de impacto y los indicadores de resultados relacionados de productos-sistemas alternativos. Lo anterior puede deberse a:

Desarrollo limitando de los modelos de caracterización, de los análisis de sensibilidad y de incertidumbre para la fase de AICV.

La imposibilidad de englobar dentro de las fronteras de sistema de estudio todas las unidades de proceso posibles, con sus entradas y salidas correspondientes, lo cual genera inexactitudes de información.

Una calidad inadecuada en los datos empleados, puede proporcionar incertidumbre y diferencias en los procedimientos de asignación y agregación.

Limitaciones en la colección de los datos del inventario, que no se realice en una forma apropiada y representativa para cada categoría de impacto.

La ausencia de la dimensión temporal y espacial en los resultados del ICV introduce incertidumbre en los resultados del ACV.

Hasta el momento no hay metodologías consistente y precisa para la colección de los datos de los inventarios para la medición de los impactos ambientales potenciales específicos.

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.

Interpretación es la fase del ACV en donde se concatenan los resultados del análisis del inventario y la evaluación de impacto. La fase de interpretación debe de arrojar resultados que

sean consistentes con el objetivo y el alcance definido, que provean un entendimiento real, completo y consistente que permita obtener conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones.

La interpretación debe de reflejar la naturaleza relativa de los resultados del AICV, resultados que indican los efectos ambientales potenciales, más no la predicción de las categorías de impacto final o los márgenes de seguridad o riesgo.

La interpretación procede a través de tres actividades, (Commission, (International Reference Life Cycle Data System), 2010):

Identificación de los aspectos fundamentales, por ejemplo procesos clave, parámetros, asunciones, flujos elementales.

Evaluación de los aspectos fundamentales en lo concerniente a su sensibilidad o influencia sobre la totalidad de los resultados del ACV por medio de chequeos de sensibilidad, consistencia y completitud.

Evaluación de los resultados para la emisión de conclusiones y recomendaciones para el ACV.

Reporte

Los resultados y conclusiones del estudio ACV/ICV debe de ser reportados de forma completa y precisa sin sesgo hacia las preferencias de la audiencia objetivo. Un reporte estratégico es una parte integral de un LCA.

Un reporte efectivo debe:

Direccionar las diferentes fases del estudio bajo consideración.

Reportar los resultados y conclusiones del LCA en una forma adecuada para la audiencia objetivo

Declarar los datos, métodos, asunciones aplicados al estudio así como sus limitaciones.

Ser transparente y presentarse con suficiente detalle de tal suerte que permita al lector comprender las complejidades y balances inherentes al ACV.

De acuerdo con (Commission, (International Reference Life Cycle Data System), 2010) el reporte debe de establecer claramente:

El tipo de resultado (s)

El propósito y las aplicaciones buscadas del estudio y del reporte.

Especificar la audiencia a la que se dirige el estudio.

Revisión Crítica

El alcance y tipo de revisión crítica deseada debe de haberse definido durante definición del alcance de un ACV.

La revisión crítica es un aspecto principal en el ACV. Este proceso debe de asegurar, entre otras cosas, si:

Los métodos usados para llevar a cabo el ACV son consistentes con el documento guía y con ISO: 14040 e ISO: 14044:2006.

Los métodos empleados para desarrollar el ACV son científica y técnicamente válidos.

Si los datos están propia y razonadamente relacionados con el objetivo del estudio.

Las interpretaciones muestran las limitaciones identificadas así como el objetivo del estudio.

La publicación del reporte es transparente y consistente.

Hipótesis

La mayor carga del impacto potencial en las categorías de punto final, correspondientes a: salud humana, calidad al ecosistema, agotamiento de recursos y cambio climático, asociadas a la manufactura de un aditivo polimérico con nanopartículas de ZnO se deriva de los procesos de extracción y transformación primaria de los insumos empleados.

Objetivos

Objetivo General

Realizar un estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la manufactura a escala piloto de un aditivo polimérico con nanopartículas (NPs) de Óxido de Zinc (ZnO) a través de la metodología señalada por la normas NMX-SAA-14040-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008; y de las recomendaciones de la Guía General Europea para Análisis del Ciclo de Vida con el propósito de evaluar el impacto ambiental en categorías de daño de punto final.

Objetivos Específicos

- Determinar el objetivo y alcance del ACV en sesiones de trabajo con los integrantes del proyecto (S.A.P.S.A., CIMAV S.C. y DTU) y en base a los acuerdos, recabar la información necesaria para la recopilación del inventario del ciclo de vida (ICV).
- Conocer y utilizar el software para análisis de ciclo de vida GaBi ®. versión 4.0. y la metodología de evaluación de ciclo de vida IMPACT 2002+ versión 2.1 para calcular el impacto ambiental potencial en las categorías de daño final (calidad del ecosistema, salud humana, agotamiento de recursos y cambio climático) asociado a la manufactura a escala piloto de un aditivo polimérico con nanopartículas (NPs) de Óxido de Zinc (ZnO).
- Identificar las etapas de proceso de producción que representen la mayor carga ambiental para proporcionar al productor del aditivo polimérico un panorama de los aspectos críticos y áreas de oportunidad concernientes al desempeño ambiental del proceso.

Metodología

Las categorías de impacto de punto intermedio consideradas en IMPACT 2002+ son toxicidad humana, efectos respiratorios, radiación ionizante, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, eco-toxicidad acuática, eco-toxicidad terrestre, acidificación acuática, eutrofización acuática, acidificación terrestre, ocupación de suelo, calentamiento global, energía no renovable, extracción mineral.

Los factores de caracterización de punto intermedio se basan en principios de equivalencia, los resultados de una sustancia se expresan en kg equivalentes de una sustancia de referencia. En general el modelo del impacto es determinado a través de factores de efecto.

Las catorce categorías de impacto intermedias se agrupan en cuatro categorías de impacto final: salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos. Los factores de caracterización de daño de cualquier sustancia pueden ser obtenidos por la multiplicación del potencial de caracterización de punto intermedio por los factores de caracterización de la sustancia de referencia.

En la Figura 1 se esquematiza como a través AICV se conectan, en medida de lo posible y acorde con los objetivos planteados, los resultados del ICV con los daños ambientales ocasionados, además muestra como los resultados con vías de impacto similares se agrupan en categorías de impacto a nivel intermedio.

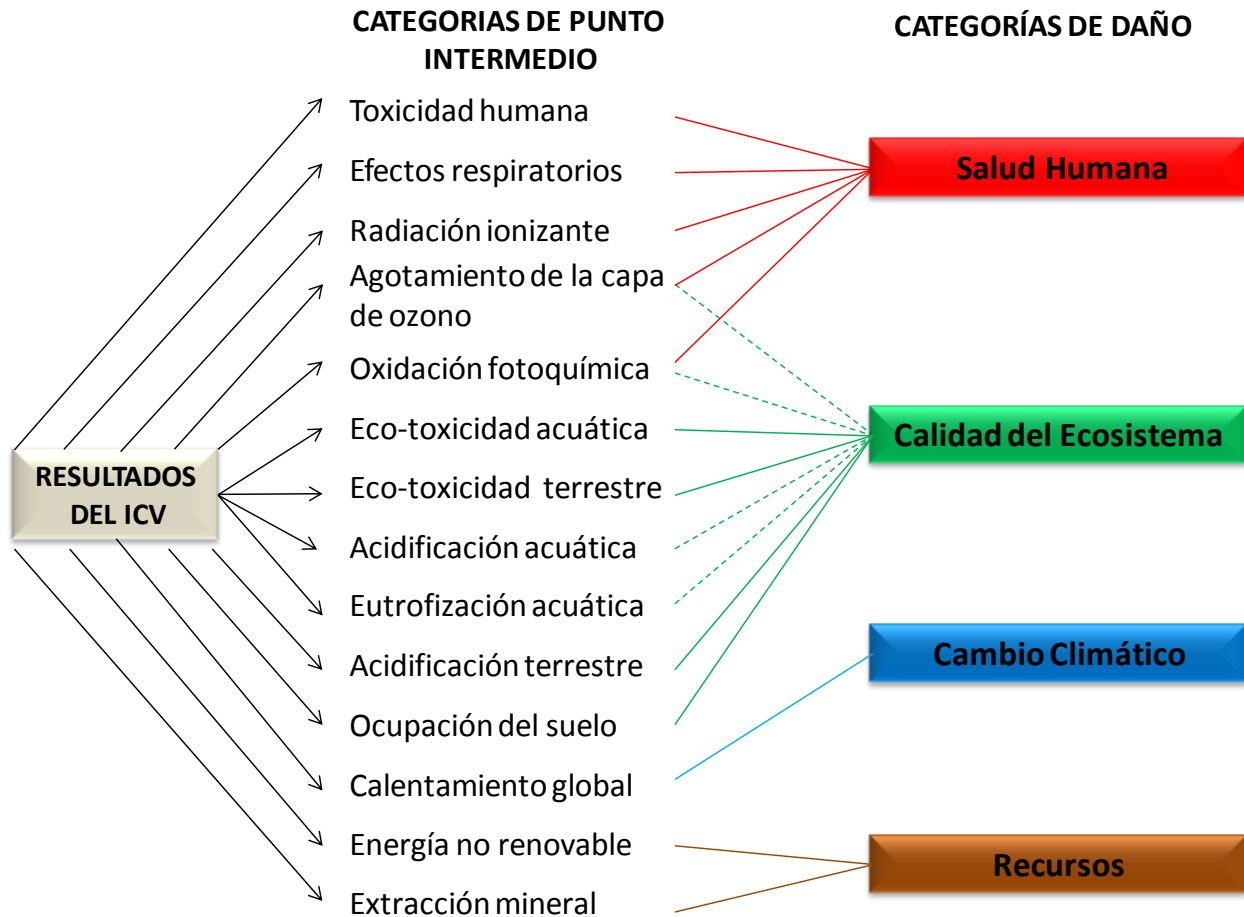


Figura 3. Esquema general del marco IMPACT 2002+. Basado en (Jolliet et al., 2003a).

Un indicador de punto intermedio caracteriza los flujos elementales y otras conexiones ambientales que contribuyen a la misma categoría de impacto de punto intermedio. El término punto intermedio se ubica en una posición de la vía de impacto intermedia entre el resultado del ICV y el daño o punto final de la vía de impacto. En consecuencia, estas categorías de punto intermedio deben asignarse a una o más categorías de impacto final, las cuales representan los cambios en la calidad del ecosistema. El resultado del indicador de daño es la representación cuantificada de dichos cambios en la calidad del ecosistema, en la práctica, e un modelo simplificado de la compleja realidad de los mecanismos e interacciones que ocurren en el medio ambiente, brindando una aproximación burda del resultado.

FUENTE	CATEGORÍA DE IMPACTO A PUNTO INTERMEDIO (PI)	SUSTANCIA DE REFERENCIA PARA PI	FN PARA PI PARA EL OESTE DE EUROPA.	UNIDAD DE NORMALIZACIÓN	CATEGORÍA DE DAÑO FINAL (DF)	FC PARA DF PARA EL OESTE DE EUROPA	FN PARA DF PARA EL OESTE DE EUROPA	UNIDAD DE CATEGORÍA DE DF
IMPACT 2002	TOXICIDAD HUMANA (CARCINOGENICOS)	kg C ₂ H ₃ Cl _{eq} al aire	45.5	punto (personas* año)	SALUD HUMANA	2.80E-6	0.0071	DALY
IMPACT 2002	TOXICIDAD HUMANA (NO CARCINOGENICOS)	kg C ₂ H ₃ Cl _{eq} al aire	173		SALUD HUMANA	2.80E-6		
Eco-Indicador 99	EFFECTOS RESPIRATORIOS (INORGANICOS)	PM 2.5 _{eq} al aire	8.8		SALUD HUMANA	7.00E-4		
Eco-Indicador 99	RADIACIÓN IONIZANTE	Bq C-14 _{eq} al aire	5.33E+5		SALUD HUMANA	2.10E-10		
USEPA y Eco-Indicador 99	AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO	kg CFC-11 _{eq} al aire	0.204		SALUD HUMANA	1.05E-3		
Eco-Indicador 99	OXIDACIÓN FOTOQUÍMICA	kg C ₂ H ₄ _{eq} al aire	12.4		SALUD HUMANA	2.13E-6		
				NA	CALIDAD DEL ECOSISTEMA	NA	NA	NA
IMPACT 2002	ECO TOXICIDAD ACUÁTICA	kg TEG _{eq} al agua	1.36E+6	Punto (personas* año)	CALIDAD DEL ECOSISTEMA	5.02E5	13700	PDF*m ² *año
IMPACT 2002	ECO TOXICIDAD TERRESTRE	kg TEG _{eq} al suelo	1.20E+6		CALIDAD DEL ECOSISTEMA	7.91E-3		
Eco-Indicador 99	ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	kg SO ₂ _{eq} al aire	315		CALIDAD DEL ECOSISTEMA	1.04		
CML 2002	ACIDIFICACIÓN ACUÁTICA	kg SO ₂ _{eq} al aire	66.2		CALIDAD DEL ECOSISTEMA	NA		
CML 2002	EUTROFIZACIÓN ACUÁTICA	kg PO ₄ ³⁻ _{eq} al agua	11.8		CALIDAD DEL ECOSISTEMA	NA		
Eco-Indicador 99	OCUPACIÓN DEL SUELO	m ² *año _{eq}	3460		CALIDAD DEL ECOSISTEMA	1.09		
IPCC	CALENTAMIENTO GLOBAL	kg CO ₂ _{eq} al aire	9950	Punto (personas* año)	CAMBIO CLIMÁTICO	1	9950	kg CO ₂ _{eq} al aire
Ecoinvent	ENERGÍA NO RENOVABLE	MJ	152000	Punto (personas* año)	RECURSOS	45.5	152000	MJ
Eco-Indicador 99	EXTRACCIÓN DE MINERALES	MJ surplus	292		RECURSOS	5.10E-2		

Tabla 1. Categorías de impacto consideradas para la EICV, la referencia principal tomada para su modelo de caracterización, sustancias de referencia y unidades tanto de punto intermedio como de daño final usadas en IMPACT 2002+. Adaptada de (Humbert, Margni, & Jolliet, 2005) y (Humbert, De Schryver, Margni, & Olivier, 2012)

Modelos de caracterización

A nivel de punto intermedio. “Kgeq de la sustancia r”, significa Kg equivalentes de la sustancia de referencia. Expresa la cantidad de la sustancia de referencia r que iguala el impacto del contaminante considerado.

A nivel de daño final. “DALY”, significa Años de Vida Potencialmente Pérdidos, las siglas provienen del inglés “Disability Adjusted Life Years”). Este concepto caracteriza la severidad de una enfermedad tomando en cuenta tanto la mortalidad en relación a una muerte prematura en función la expectativa de vida de un país o región (YLL, por sus siglas en inglés Years of Life Lost) , como la morbilidad, que representa el tiempo de vida con una menor calidad debido a una enfermedad (YLD, del inglés Years Lived with Disability). En resumen DALY es la suma algebraica de los factores YLD y YLL. Generalmente 13 y 1.3 (años/incidencia) son los valores que se adoptan para la mayoría de los efectos carcinogénicos y no carcinogénicos. Por ejemplo, un producto que tiene un daño a la salud final normalizado de 3 DALYs implica la pérdida de tres años de vida respect a la expectativa de vida de la población en cuestión.

AVPP (Años de Vida Potencialmente Perdidos) **DALY** (Disability Adjusted Life Year)

Es una medida de la carga global de la enfermedad, expresada por la acumulación de años perdidos debido a una deterioro en la salud, discapacidad o muerte temprana.



Figure 4 Representación gráfica del concepto AVPP, adaptado al español de http://en.wikipedia.org/wiki/File:DALY_disability_affected_life_year_infographic.svg extraído en diciembre del 2012.

“PDF•m²•año “, del inglés Fracción Potencialmente Desaparecida por m² por año , esta unidad mide el impacto sobre los ecosistemas. Esta unidad representa la fracción de especies desaparecidas sobre un m² de la superficie de la tierra durante un año. Por ejemplo un producto cuyo resultados en la categoría de calidad en el ecosistema sea de 0.2 PDF•m²•año, implica la pérdida que la pérdida del 20% de las especies sobre 1 m² de superficie terrestre durante un año.

A nivel de daños normalizados. “Puntos”, equivalentes a personas por año. Un “punto” representa el impacto promedio de una categoría de impacto específica ocasionado por una persona durante un año en Europa. En una primera aproximación para la salud humana también representa el impacto promedio sobre una persona durante un año. Por ejemplo un impacto de 3 puntos en la categoría de calidad en el ecosistema representa el impacto anual equivalentes a 3 personas europeas, esta última interpretación también es válida para cambio climático y recursos. Se calcula como los daños total anual debido a las emisiones y extracciones en Europa divididas entre en total de la población europea.

En las siguientes páginas se expone un resumen de los conceptos y modelos fundamentales sobre los cuales se constituyen las catorce categorías de impacto de punto intermedio y las cuatro de punto final consideradas dentro de la metodología IMPACT 2002 con la intención de brindar herramientas para la comprensión de los resultados arrojados por el presente ACV.

Categorías de impacto analizadas

Toxicidad Humana (carcinogénicos + no carcinogénicos).

Concepto. La presente categoría busca identificar los impactos en la salud humana originados por distintos de factores de estrés medioambientales, además tiene el objetivo de cuantificar los cambios tanto en la mortalidad como en la morbilidad asociados con bienes y servicios de una forma integrada.(JRC-IES, 2010)

Toxicidad humana dentro de la metodología Impact 2002+ representa todos los efectos en la salud humana, excepto los efectos respiratorios causados por: sustancias inorgánicas, radiación ionizante, agotamiento de la capa de ozono y efectos de oxidación fotoquímica, los cuáles son considerados por separado, debido principalmente a que su evaluación se basa en enfoques distintos. A continuación se presenta el modelo de caracterización propuesto por Humbert et al.(2005) en la metodología Impact 2002+.

Los *factores de caracterización (FC)* para los efectos toxicológicos crónicos sobre la salud humana brindan estimaciones del riesgo toxicológico acumulativo y de los impactos potenciales asociados con la masa específica (kg) de un químico emitido al medio ambiente. El modelo denota el destino multimedia, la exposición de vías múltiples y el modelo de efecto de 1500 tipos de emisiones tóxicas para los rubros de toxicidad humana y eco-toxicidad.

En siguiente Figura 3 se sintetizan los conceptos concernientes a toxicidad humana: *destino*. Trata lo concerniente al transporte en el medio ambiente, la exposición y la ingesta resultante de las sustancias químicas. Esto es después asociado a un *factor de efecto* que caracteriza los riesgos potenciales vinculados a las ingesta de sustancias tóxicas. Finalmente el factor de *gravedad* caracteriza la magnitud relativa de los *daños* debido a ciertas enfermedades.

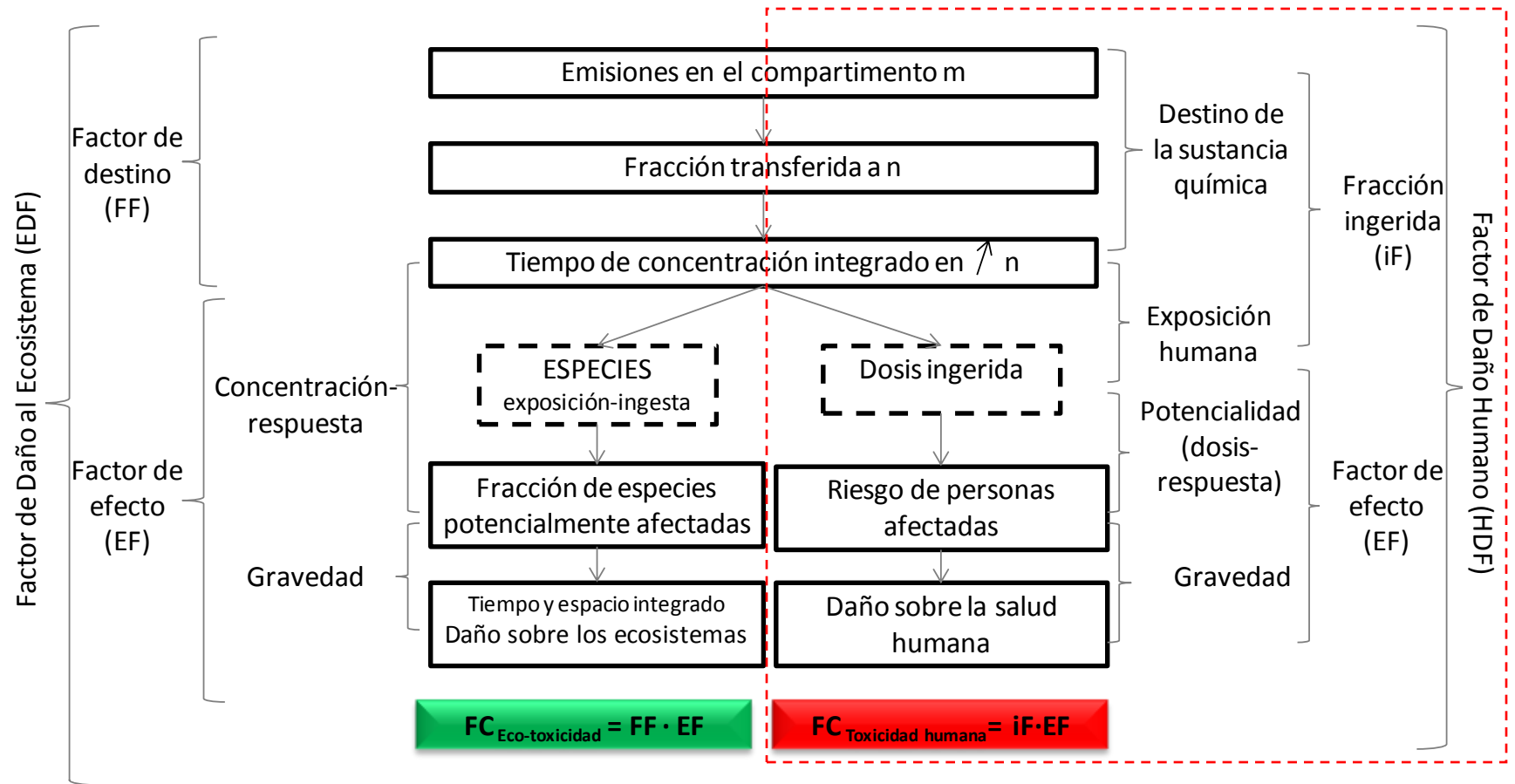


Figure 5. Esquema general del camino de impacto para toxicidad humana y ecotoxicidad empleada en la herramienta IMPACT 2002+. Adaptado de

Cálculo de factores a nivel de daño. El Factor de Daño Humano de una sustancia i (HDF_i) en DALYs por kg emitidos se calcula de la siguiente manera:

$$HDF_i = iF_i \cdot EF_i = iF_i \cdot \beta_i \cdot D_i$$

Donde:

iF = *Fracción de ingesta.* Es la fracción de masa de una sustancia química liberada en el medio ambiente que finalmente es ingerida por la población humana como resultado de la contaminación de los alimentos, inhalación o exposición cutánea. Representa el destino de una sustancia química en relación a su mecanismo y vías de transporte, así como a la exposición humana asociada con la producción de alimentos, abastecimiento de agua y la inhalación

$$iF = \frac{\sum_{personas, tiempo} \text{ingesta del contaminante por un individuo (kg)}}{\text{masa liberado al medio ambiente (kg)}}$$

EF = *Factor de efecto.* Es el producto de la pendiente del factor dosis-respuesta (β , riesgo de incidencia por kg ingeridos) y de la gravedad (D , en DALY por incidencia).

La evaluación completa del destino y la exposición permite la estimación de la masa de una sustancia química (o concentración) en el medio ambiente a una escala regional o global usando el mismo modelo básico. Por default, los FC se calculan para las emisiones del Oeste de Europa.

El modelo IMPACT 2002+ toma en cuenta las vías múltiples de exposición que relacionan la concentración de una sustancia química en la atmósfera, suelo, agua superficial o vegetación hacia la captación humana por medio de inhalación o ingestión. Las vías de ingestión incluyen el consumo de agua para beber, la ingestión incidental de suelo, y de contaminantes a través de productos agrícolas (frutas, verduras, granos, etc.), así como de productos de origen animal, tales como distintos tipos de carne (res, cerdo o ave), huevos, pescado y leche.

Cálculo de factores a nivel de punto intermedio. No existe un punto intermedio real para la toxicidad humana (como parámetros intermediarios para el destino y la exposición que puedan ser interpretados por sí mismos como es el caso de iF).

En consecuencia de lo anterior, los FC a nivel de punto intermedio se obtienen dividiendo el Factor de Daño Humano (HDF) de la sustancia en cuestión entre el de la sustancia de referencia, el cual se considera el HDF del cloroetileno (declarado como un sustancia carcinogénica para el ser humano, del cual se tiene bien identificado el destino y la vía de impacto por inhalación).

$$\text{HTP}_i = \text{HDF}_i / \text{HDF}_{\text{cloro etileno}} \text{ en kg}_{\text{eq}} \text{ de cloro etileno al aire por kg}_i$$

Al expresar los resultados en kg equivalentes de una sustancia de referencia se facilita la comunicación y subraya el hecho de que dichos factores de caracterización son principalmente relevantes cuando sus resultados se comparan en base a un valor relativo más que a un valor absoluto.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES	
PUNTO INTERMEDIO	kg _{eq} Cloroetileno al aire	HTP _i = HDF _i /HDF _{SR} i= sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (cloroetileno)	AGUA SUP	SI
			AIRE	SI
			SUELO	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	DALYS	IMPACT 2002+	SUELO AGRICOLA	SI
			ESTRATOSFERA	NO
			OCEANO(*)	NO
			AGUA SUBTERRANEA	NO

- *Los FC para toxicidad humana de metales pesados solo se aplican a las emisiones de metales en forma de iones disueltos.* En general los factores considerados fueron calculados a nivel de continental para el Oeste de Europa.
- El estado del arte en la evaluación toxicológica permite una precisión de aproximadamente un factor de 100 (2 órdenes de magnitud) comparado con una variación total de alrededor de 12 órdenes de magnitud. Por lo que todos los flujos con un impacto mayor al 1% del daño total deben considerarse como potencialmente importantes.

Table 2. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Toxicidad Humana.

Efectos respiratorios (debido a compuestos inorgánicos).

De acuerdo con (Goedkoop & Spriensma, 2001a) en varios estudios epidemiológicos previos se ha demostrado que varios compuestos inorgánicos y clases de polvo están relacionados con efectos respiratorios en humanos. Algunos compuestos reportados como causantes de efectos respiratorios son: materia particulada (PM_{10} y $PM_{2.5}$), nitratos y sulfatos, óxidos de azufre, ozono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos volátiles orgánicos VOCs, por lo que todas estas sustancias son consideradas como contaminantes primarios durante el análisis de destino.

La metodología IMPACT 2002, toma para esta categoría la metodología propuesta por Eco-Indicador 99, y se refiere a los efectos respiratorios que son causados por sustancias inorgánicas. Eco-indicador 99 determina las funciones de Exposición-Respuesta haciendo uso de los datos de concentraciones ambientales, densidad de población en el área de estudio, admisiones diarias en hospitales a causa de efectos respiratorios y riesgo relativo (Güereca & Gassó Domingo, 2006).

El material particulado (MP) se clasifica en base al tamaño de partícula. El tipo de material “ $PM_{2.5}$ ” engloba todas las partículas menores de $2.5 \mu m$. De acuerdo a estudios epidemiológicos previos, las partículas con tamaños mayores a $2.5 \mu m$ no tienen efectos adversos, debido a que no pueden entrar a los pulmones. Por lo anterior, los efectos respiratorios están relacionados sólo con la fracción de partículas que son menores a $2.5 \mu m$.

(Hauschild & Potting (2005) resaltan de la importancia de que el efecto estimado del MP sea entendido como un la contaminación global del aire más que una prueba basada en la relación causa efecto para el MP.

La metodología IMPACT 2002 establece que los FC se dan solamente para las emisiones al aire (ya que es poco probable que estos contaminantes se emitan al suelo o el agua). Los de FC de daño son expresados en DALY/kg y tomados directamente de Eco-indicador 99. Los punto intermedios se expresan en kg PM_{2.5} al aire equivalentes /kg, se obtienen al dividir los factores de daño de la sustancia en consideración entre el factor de daño de la sustancia de referencia (PM_{2.5} al aire) (Humbert et al., 2005).

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES	
PUNTO INTERMEDIO	kg PM _{2.5} al aire equivalentes /kg	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i=sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (PM _{2.5} al aire)	AGUA SUP	NO
			AIRE (*)	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	DALYS/kg	ECO-INDICADOR 99	SUELO	NO

- (*) Sólo se consideran factores para las emisiones al aire ya que es poco probable que este tipo de contaminantes se emitan al suelo o al agua.

Table 3. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Efectos Respiratorios.

Radiación ionizante.

Concepto. Se considera como radiación ionizante al resultado de la radiación radioactiva, de acuerdo con esta categoría abarca los impactos derivados de: las emisiones de sustancias radiactivas y de la exposición directa a la radiación.

La radiación ionizante se expresa en términos del número de átomos de desintegración (o en descomposición) por unidad de tiempo. La unidad del SI de la radiactividad es el becquerel (Bq), uno Bq correspondiente a una desintegración por segundo. La radiactividad de una sustancia se expresa en $Bq \cdot kg^{-1}$ o en $Bq \cdot l^{-1}$. La radiactividad siempre disminuye conforme al curso del tiempo, el tiempo necesario para que la radiactividad de una sustancia dada disminuya a la mitad se conoce como la vida media de la sustancia (Guinee, 2002). En la figura siguiente se muestra una descripción general del mecanismo ambiental de esta categoría.

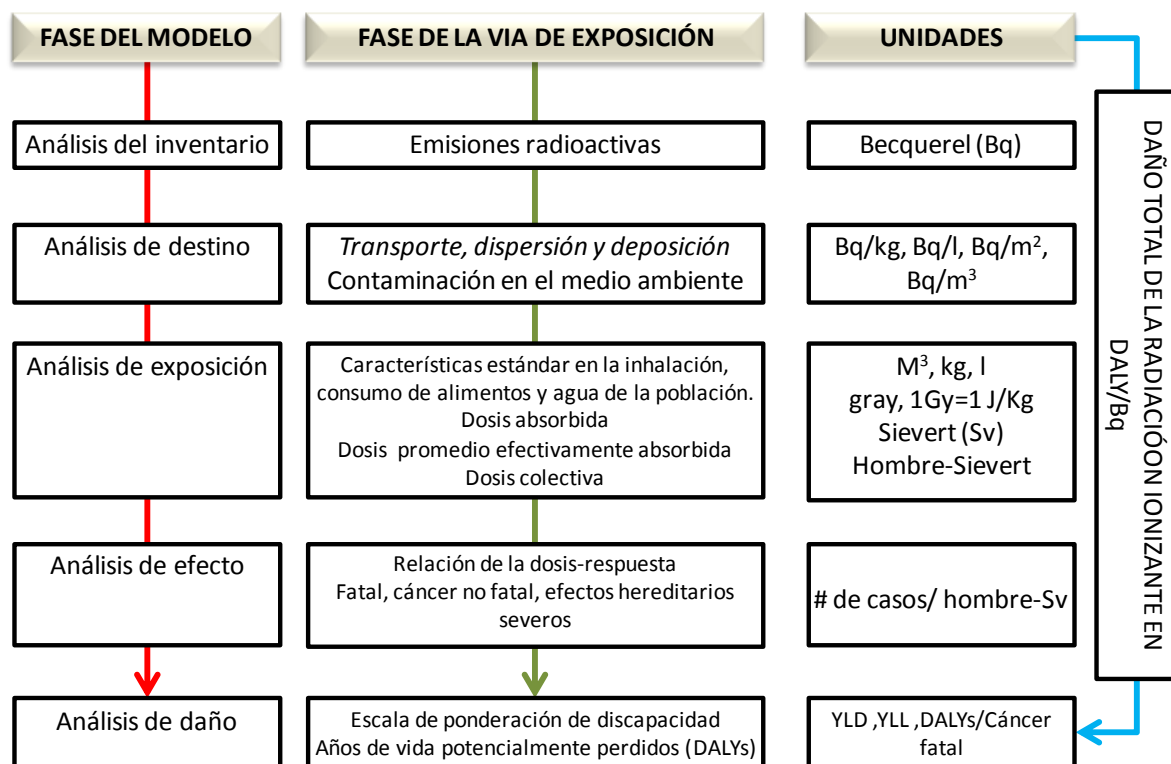


Figure 6, Panorama de las etapas de vías de impacto de las emisiones radioactivas en la Salud Humana, (adaptado al español de JRC-IES, 2010)

Como se puede observar en la Figura 4, el modelado comienza con las descargas en el punto de emisión, expresadas en Bq, para lo cual se calcula el destino radiactivo y la exposición, en base al conocimiento de la física nuclear vigente.

Acorde con lo publicado por JRC-IES (2010), para toxicidad humana, el análisis de la exposición calcula la dosis que una persona en realidad absorbe, teniendo en cuenta los niveles de radiación que se calculados en el análisis de destino. La medida de la dosis efectiva es el Sievert (Sv), basado en factores de equivalencia del cuerpo humano para los diferentes tipos de radiación ionizante (radiación alfa, beta y gamma, los neutrones: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Julio} / \text{kg}$ de peso corporal).

Los datos expresados en Sievert incluyen los datos físicos sobre dosis de energía y datos biológicos sobre las sensibilidades de los diferentes tejidos del cuerpo. Hombre- Sievert es la dosis colectiva, se calculada multiplicando la dosis individual promedio representativa de la población, por el número de personas afectadas y su integración en un horizonte de tiempo determinado. Una etapa intermedia en el cálculo de las dosis se expresa a menudo como Gray (Gy). Esta es la medida de la dosis absorbida sin tener en cuenta los tipos de reacción diferentes de los tejidos del cuerpo.

Aspectos metodológicos. La exposición a la radiación ionizante es perjudicial tanto para los seres humanos como para los animales y sus ecosistemas. Sin embargo la metodología IMPACT 2002 sólo toma en cuenta los efectos ocasionados a la salud humana. Los FC para la presente categoría se dan para las emisiones al aire y al agua, actualmente no hay FC disponibles para las emisiones al suelo. Los FC de daño son expresados en DALY/Bq_{emi} y tomados de la metodología Eco-indicador 99. Los FC a punto intermedio (Bq_{eq} Carbono-14 al aire/kg_{emi}) han sido obtenidos dividiendo el factor de daño de la sustancia a considerar entre el factor de daño de la sustancia de referencia (Carbon-14 al aire). (Humbert et al., 2005)

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES	
PUNTO INTERMEDIO	Bq _{eq} Carbono-14 al aire/kg _{emi}	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i=sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (Carbon-14 al aire)	AGUA SUP	SI
			AIRE	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	DALYS/ Bq _{emi}	ECO-INDICADOR 99	SUELO	ND

•
Table 4. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Radiación Ionizante.

Agotamiento de la capa de ozono

Concepto. En base a los preceptos publicados por (JRC-IES, 2010), el ozono se forma y destruye continuamente por la luz solar y las reacciones químicas que ocurren en la estratosfera. El agotamiento del ozono se produce si la tasa de destrucción de la capa de ozono incrementa debido a las fugas de sustancias antropogénicas que persisten en la atmósfera.

El ozono estratosférico, que integra el 90% del total de ozono en la atmósfera, es vital para la vida ya que impide que la radiación solar ultravioleta UV-B penetre a los niveles inferiores de la atmósfera. Actúa como un filtro absorbiendo las dañinas ondas cortas de luz ultravioleta, mientras permite el paso de las ondas largas. De no ser absorbida, la radiación UV-B de menos de 300 nanómetros alcanzaría a la tropósfera y a la superficie de la tierra, donde, de no tomarse las debidas precauciones, puede aumentar el riesgo de cáncer de piel humana y cataratas en los ojos. También puede causar envejecimiento prematuro y la supresión del sistema inmune. Además del aumento en el riesgo hacia la salud humana, la radiación UV-B, también puede tener implicaciones nocivas en los ecosistemas, por ejemplo afectando el ciclo de vida de las plantas terrestre, así como en la productividad de actividades económicas, como cultivos agrícolas o degradando materiales plásticos, estructuras, etc.

Mecanismo Ambiental. El factor de caracterización del agotamiento de la capa de ozono considerado para la destrucción de la capa de ozono estratosférica tiene que ver con las emisiones antropogénicas de sustancias agotadoras de ozono (SAO), las cuales son sustancias químicas persistentes que contienen átomos de Cloro (Cl) o Bromo (Br). Debido a que tienen una larga vida en la atmósfera, el Cl y el Br son capaces de alcanzar la estratosfera. Los átomos de Cl en los clorofluorocarbonos (CFC) y el Br en los halones son degradantes eficaces de la capa de ozono debido a la catálisis heterogénea que tiene lugar en presencia de las nubes estratosféricas

polares (PSCs). Los átomos de cloro y bromo que son liberados por estas reacciones tienen la capacidad de destruir una gran cantidad de moléculas de ozono en la estratosfera debido a que actúan como catalizadores de radicales libres en una secuencia de reacciones de degradación, en la que reaccionan con el ozono para dividirlo en su forma molecular y liberando oxígeno atómico, dichas reacciones son las siguientes:

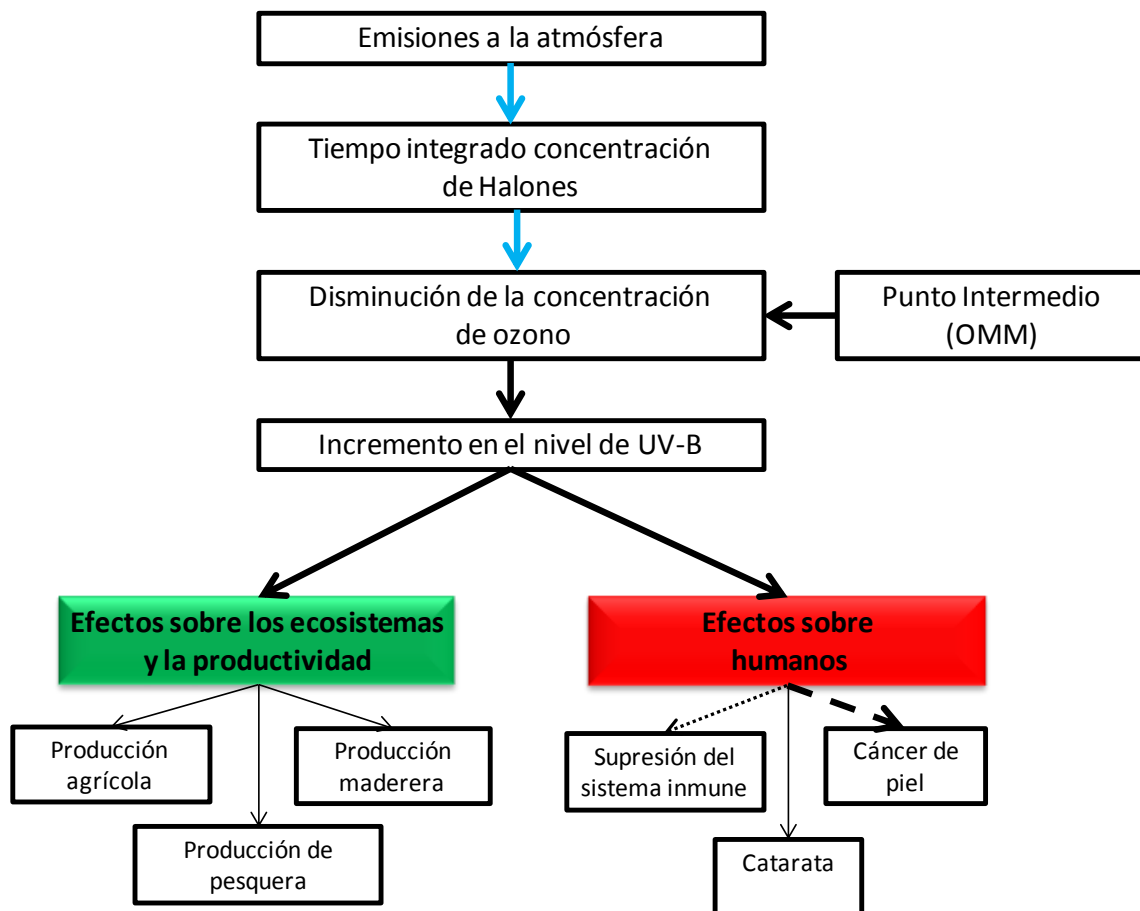
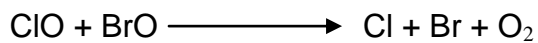
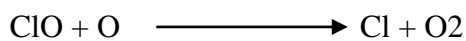
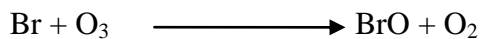
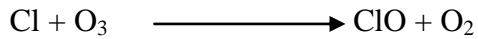


Figure 7. Cadena de causalidad del modelo para la evaluación de los impactos de las sustancias agotadoras de ozono. Tomado y traducido al español de (JRC-IES, 2010).

El cálculo de la disminución del ozono estratosférico (OD), se basa en la fórmula:

$$OD = \sum_i ODP_i \times m_i$$

Donde:

ODP_i = Potencial de disminución de ozono estratosférico para la sustancia i

M_i = Emisión del compuesto i en kg.

La disminución del ozono es expresada en kilogramos de CFC-11. El ODP para el compuesto i es definido como el ratio entre el rompimiento de ozono en estado de equilibrio debido a las emisiones anuales (en kg/año) de una cantidad de compuesto i emitido en la atmósfera, y el rompimiento de ozono estratosférico en estado de equilibrio debido a una cantidad igual de CFC-11, el cual es usado como referencia (Güereca & Gassó Domingo, 2006).

(JRC-IES, 2010) indica que el estado del arte para los ODP representan los efectos acumulativos en la capa de ozono a través de una escala de tiempo infinita:

$$ODP_x (\infty) = \frac{\partial[O_3]_x}{\partial[O_3]_{CFC-11}}$$

El estado del arte más reciente para los ODPs fueron los publicados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1999 y son los factores equivalentes considerados para el cálculo de la categoría de impacto de Cambio Climático por las distintas metodologías de EICV.

Aspectos Metodológicos. Los FC establecidos e Impact 2002+ para la presente categoría son sólo para emisiones al aire. Los FC para puntos intermedios (en kg_{eq} CFC-11 al aire / kg_{emi}) han sido tomados de la lista de Lista de potencial de agotamiento del ozono de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Los factores de daño, FD, (en $\text{DALY}/\text{kg}_{\text{emi}}$) para las sustancia de referencia (CFC-11) han sido tomados directamente de Eco-indicador 99. Para otras sustancias, los FD (en $\text{DALY}/\text{kg}_{\text{emi}}$) han sido obtenidos mediante la multiplicación del factor de punto intermedio (en kg_{eq} CFC-11 into air / kg_{emi}) por el factor del CFC-11, compuesto que también es conocido como “Triclorofluorometano”. (Humbert et al., 2005)

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES	
PUNTO INTERMEDIO	en kg_{eq} CFC-11 al aire / kg_{emi}	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i=sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (Carbon-14 al aire)	AGUA SUP	NO
			AIRE (*)	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	$\text{DALY}/\text{kg}_{\text{emi}}$	ECO-INDICADOR 99 SR=sustancia de referencia (CFC-11)	SUELO	NO

- (*) Solo se consideran las emisiones al aire ya que no es muy común que los contaminantes de esta categoría sean emitidos al agua o al suelo.

Table 5. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono.

Oxidación fotoquímica.

Contexto. Los impactos negativos de los contaminantes generados fotoquímicamente se deben a su naturaleza reactiva, la cual les permite oxidar moléculas orgánicas sobre la superficie a la que se exponen. Los impactos en seres humanos se originan cuando el ozono (O_3) y otros compuestos de oxígeno reactivos son inhalados y entran en contacto con la superficie de las vías respiratorias, donde ocasionan daño en el tejido y enfermedades. Por otro lado, los impactos en la vegetación surgen cuando los compuestos reactivos atacan la superficie de las plantas o se introducen en los estomas de sus hojas, causando daño oxidativo sobre los organelos fotosintéticos de éstas. Los impactos en materiales artificiales son causados por la oxidación y el daño a muchos tipos de materiales orgánicos que están expuestos a la intemperie. (JRC-IES, 2010)

La formación de fotooxidantes también es conocida como “smog de verano”, “smog de Los Angeles” o “contaminación secundaria del aire”, y contrasta con “smog de invierno” o “smog de London” el cual se caracteriza por altos niveles de compuestos inorgánicos. (Guinée et al., 2002)

Mecanismo Ambiental. El esquema de la reacción relacionada a la vía de impacto es complejo y depende de la fórmula del Compuesto Orgánico Volátil (COV), dicho esquema es el siguiente:

- En la tropósfera los COVs o el Monóxido de Carbono (CO) reaccionan con los radicales hidroxilos ($OH\bullet$) y forman radicales peroxilo ($ROO\bullet$).
- Los $ROO\bullet$ oxidan al Óxido Nítrico (NO) a Dióxido de Nitrógeno (NO_2).
- NO_2 se separa por acción de luz solar formando NO y liberando átomos de oxígeno.
- Los átomos de oxígeno reaccionan con el O_2 para formar O_3 .

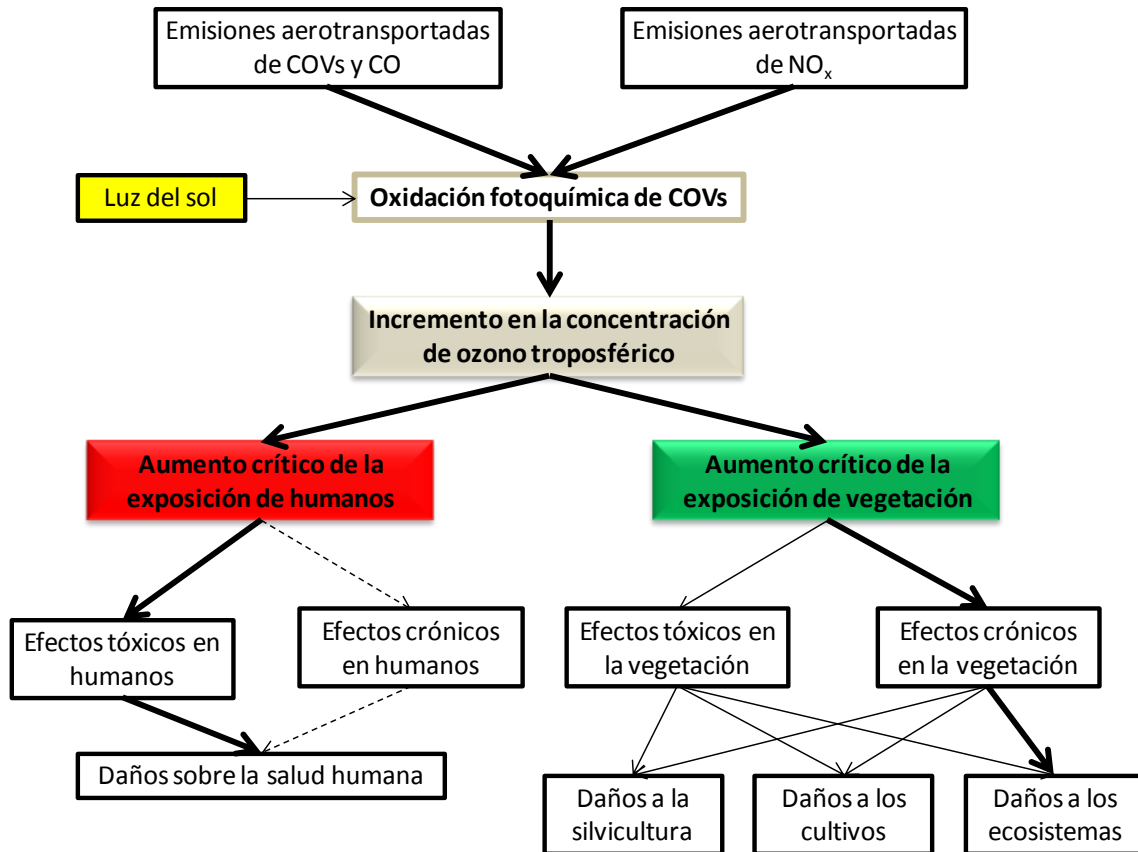


Figure 8. Cadena causa-efecto para la formación de ozono fotoquímico para las emisiones aerotransportadas de COVs, CO y NO_x. El grosor de las flechas indica la importancia de las vías de impacto involucradas. Esquema adaptado de (JRC-IES, 2010)

Ambos compuestos, COVs y NO_x, son necesarios para la formación de O₃ fotoquímico, por lo que son considerados por los modelos de caracterización. La distribución espacial heterogénea de las fuentes de COVs y NO_x a través de Europa, así como los cientos de especies químicas involucradas, hacen que la formación fotoquímica de O₃ a escala regional sea altamente no lineal y dinámica. Dicho proceso de formación está influenciado por las condiciones meteorológicas y la interacción entre los distintos tipos COVs, tanto de fuentes antropogénicas como de fuentes naturales.

Los modelos de caracterización disponibles hasta el momento permiten que el cálculo de los factores de caracterización para el gran número de sustancias vigentes pueda ser obtenido por medio de dos vías distintas:

1. Este enfoque es adoptado en los modelos basados en el Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (PCOF) o en la Reactividad Incremental Máxima (RIM), en donde se brindan factores de caracterización individuales para gran variedad de COVs . Aquí se ignora el comportamiento no-lineal y dinámico.
2. El enfoque adopta los modelos diferenciados por regiones que tratan de captar la naturaleza no lineal de la formación de O₃ con sus diferencias espaciales y temporales específicas. Sin embargo se ignora la variación individual entre los distintos tipos de COVs por lo que solo se ha calculado los factores de caracterización para algunas sustancias específicas.

Debido a la complejidad de los esquemas de las reacciones químicas subyacentes y al número de sustancias diferentes que contribuyen a la formación de O₃ fotoquímico, existe un compromiso entre el grado de detalle que se puede aplicar en el modelo del destino y el aplicado en la distinción de las características individuales de las sustancias para los COVs. Por lo anterior, se prefiere el primer enfoque, donde se simplifica el modelo de lado de la sustancia, en lugar de hacerlo del lado del modelado de la dinámica y de la naturaleza no lineal de la vía de impacto.

Aspectos Metodológicos. Como se ha mencionado anteriormente, los foto-oxidantes se pueden formar en la troposfera bajo la influencia de la luz ultravioleta, a través de reacciones de oxidación de los COVs y CO en la presencia de NO_x. El ozono es considerado como el más importante de estos agentes, junto con el peroxi-acetil-nitrato.(Barker, 2007)

Güereca & Gassó Domingo, (2006) señalan que el indicador de formación de foto-oxidantes se obtiene al identificar los factores de conversión o reactividad para los COVs. Estos factores son usados para convertir el inventario de COVs en etileno equivalentes.

$$\text{Formación de foto – oxidantes} = \sum_i \text{POCP}_i \times m_i$$

Donde:

POCP_i = Potencial de creación de ozono fotoquímico del compuesto i

M_i = Masa del compuesto i

El Potencial de Creación de Ozono Foto-químico (POCP) expresa el cambio en la concentración de ozono por el cambio en las emisiones para un COV específico, normalizado por la tasa del etileno. Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\text{POCP}_i = \frac{a_i/b_i}{a_{\text{C}_2\text{H}_4}/b_{\text{C}_2\text{H}_4}}$$

Donde:

a_i = Cambio en la concentración de O_3 debido al cambio en las emisiones del COV_i

b_i = Emisiones integradas de COVs a un tiempo dado

$a_{\text{C}_2\text{H}_4}$ = Cambio en la concentración de O_3 debido al cambio en las emisiones de etileno

$b_{\text{C}_2\text{H}_4}$ = Emisiones integradas de etileno a un tiempo dado

El etileno sirve como sustancia de referencia ya que es uno los COVs más reactivos.

Dentro de Impact 2002+ se toman las siguientes consideraciones para los factores de caracterización de la categoría de impacto en cuestión: los factores de caracterización se aplican para las emisiones al aire. El impacto de la oxidación fotoquímica sobre la salud humana también es nombrado “efectos respiratorios por orgánicos”. Los FC de daño para la oxidación fotoquímica (en DALY/kg_{emi}) son tomados directamente de la metodología Eco-indicador 99. Los FC de punto intermedio (en kg_{eq} Etileno al aire/kg_{emi}) han sido obtenidos dividiendo el FC de daño de la sustancia considerada por el factor de daño de la sustancia de referencia (Etileno al aire). El Etileno también es nombrado “Eteno”.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES	
PUNTO INTERMEDIO	en kgeq Etileno al aire/kg _{emi})	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i=sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (Etileno al aire)	AGUA SUP	NO
			AIRE (*)	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	DALY/kg _{emi}	ECO-INDICADOR 99 SR=sustancia de referencia (CFC-11)	SUELO	NO

- (*) Solo se consideran las emisiones al aire ya que no es muy común que los contaminantes de esta categoría sean emitidos al agua o al suelo.

Table 6. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Oxidación Fotoquímica.

Eco toxicidad Acuática.

Concepto general de Ecotoxicidad. Los modelos y factores para los efectos tóxicos dentro de las metodologías de evaluación de impacto en ACV se basan en el riesgo relativo y las consecuencias asociadas a la emisión de sustancias químicas tóxicas que son liberadas al medio ambiente, consideran factores como la trayectoria que siguen dichas sustancias en el ambiente en las distintas matrices ambientales (aire, agua y suelo), las especies expuestas y las diferencias entre las respuestas toxicológicas.(JRC-IES, 2010)

Concepto de Ecotoxicidad Acuática. Guinée et al., (2002) se refieren a la eco-toxicidad acuática como a los impactos de las sustancias químicas sobre los ecosistemas acuáticos. En muchos aspectos, los impactos sobre los ecosistemas acuáticos se abordan de forma similar a la toxicidad humana, incluyendo tanto el destino y como el efecto, sin embargo se presentan algunas diferencias notables.

Aspectos metodológicos. De acuerdo con la metodología Impact 2002 la categoría de impacto ecotoxicidad acuática representa a la ecotoxicidad presente en el agua dulce superficial de ríos y lagos.(Humbert et al., 2005). A continuación se expondrán los conceptos fundamentales considerados en el modelo Impact 2002+ publicados por Jolliet et al. (2003):

El factor destino permite relacionar las emisiones para el cambio en la concentración en la fase acuosa de agua dulce pura. . La exposición es generalmente tomada en cuenta de forma implícita en el factor de efecto que caracteriza a los riesgos a nivel de especie, lo que eventualmente lleva hacia a una Fracción Potencial de Afectación (PAF) o Fracción Potencial de Desaparición (PDF) las especies, ambas siglas de la abreviación de su nombre en inglés, hacia un indicador preliminar de los daños sobre los ecosistemas.

Para los ecosistemas acuáticos de agua dulce, el tiempo y el espacio-integrado de la Fracción de Especies Potencialmente Afectadas por unidad de emisión (APAF, de sus siglas en inglés, en $FPA \cdot m^3 \cdot \text{año} / \text{kg}$) se estima por lo tanto sobre la base de un factor de destino ($F \cdot \theta$, en años) y un factor de efecto (β , en m^3/kg) de la siguiente manera:

$$APAF_i = F_i^{mv} \cdot \theta_i^w \cdot \beta_i, \text{ en unidades de } PAF \cdot m^3 \cdot \text{año}/\text{kg}$$

El factor de destino es obtenido por la multiplicación de dos parámetros que son calculados usando el modelo IMPACT 2002:

F_i^{mv} , es la fracción adimensional de la emisión de la sustancia i en el compartimento m transferido hacia el cuerpo de agua dulce.

θ_i^w , en años, es el tiempo de residencia equivalente de las sustancia i en agua, equivalente al inverso de la tasa de decaimiento general constante en agua (k). También se corresponde al tiempo y el espacio integrado-aumento de la concentración en el agua dulce por entrada de masa de sustancia química M liberada al medio ambiente acuático:

$$\theta = 1/k = \Delta C \cdot V \cdot \Delta t / M$$

Dónde.

ΔC (en kg/m^3) es el incremento en la concentración en el volumen del agua V (en m^3), debido a un flujo de emisión de $M\Delta t$ (en $\text{kg}/\text{año}$).

Los factores de caracterización ecotoxicológica no incluyen un compartimento de exposición para la cuantificación de la bio-magnificación (exposición adicional ocasionada por contaminantes presentes en alimentos). Solo la bio-acumulación es considerada (la transferencia directa de productos químicos del medio de exposición a la especie).

El factor de efecto basado en el riesgo (β_i) es el cambio en la Fracción Potencialmente Afectada de especies que experimenta un aumento de estrés para un cambio en la concentración de contaminantes. El factor de efecto evalúa el impacto medio sobre las especies, usando la concentración media peligrosa que afecta al 50% de las especies presentes en el ecosistema (HC50), que es:

$$\beta_i = 0.5 / HC50_i^w \text{ (en PAF m}^3\text{/kg)}$$

A nivel del punto medio, el Potencial de Ecotoxicidad Acuática de agua dulce (AEP_i, por sus siglas en inglés, en unidades de trietilenglicol kg_{eq} al agua por KG_i) se obtiene por la normalización de la sustancia de referencia, trietilenglicol:

$$PEA_i = \frac{AFPA_i}{APAF_{\text{trietilenglicol}}}$$

Las consideraciones tomadas dentro del método Impact 2002+ para los FC de la categoría de impacto de ecotoxicidad acuática se enlistan a continuación:

- Los FC (en FPD•m²•año/kg_{emi}) han sido determinados por el modelo de IMPACT 2002+.
- Los FC (expresados en kg_{eq} trietilenglicol al agua/kg_{emi}) se han obtenido dividiendo el factor de daño de la sustancia considerada por el factor de daño de la sustancia de referencia (trietilenglicol al agua).
- Los FC se dan para las emisiones al aire, agua y suelo. No hay factores de caracterización disponibles para las emisiones al agua subterránea y ni a la estratosfera. Las emisiones a la mar puede considerarse como carentes de eco-toxicidad acuática de agua dulce. Aún no se han desarrollados FC para las emisiones al océano.
- Los FC de ecotoxicidad acuática de metales pesados solamente se aplican a las emisiones de metales en forma de iones disueltos.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES	
PUNTO INTERMEDIO	kg _{eq} trietilenglicol al agua/kg _{emi}	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i=sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (trietilenglicol al agua)	AGUA SUP	SI
			AIRE	SI
			SUELO	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	PDF•m ² •año/kg _{emi}	IMPACT 2002+	AGUA SUB	NO
			ESTRATOSFERA	NO
			OCEANO(*)	NO
<ul style="list-style-type: none"> (*)Las emisiones a la mar puede considerarse como carentes de eco-toxicidad acuática. Los FC de ecotoxicidad acuática de metales pesados solamente se aplican a las emisiones de metales en forma de iones disueltos. El estado del arte en la evaluación toxicológica permite una precisión de aproximadamente un factor de 100 (2 órdenes de magnitud) comparado con una variación total de alrededor de 12 órdenes de magnitud. Por lo que todos los flujos con un impacto mayor al 1% del daño total deben considerarse como potencialmente importantes. 				

Table 7. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Ecotoxicidad Acuática.

Ecotoxicidad terrestre.

Concepto. Esta categoría se refiere a los efectos de los tóxicos sobre los ecosistemas terrestres. (Guinée et al., 2002)

Güereca & Gassó Domingo (2006) recalcan que en las categorías de toxicidad el factor transporte es de especial relevancia ya que, una vez liberados al medio ambiente, los contaminantes tóxicos no permanecen fijos en el medio donde fueron emitidos (aire, suelo, agua superficial, etc.) sino que pueden desplazarse a través de diversos mecanismos de transporte ocasionando daños a otros ambientes. En este aspecto, el daño de un compuesto puede variar de un medio a otro, y en algunos casos llegar a ser más dañino en un medio diferente al que fue emitido.

Aspectos Metodológicos. En la metodología desarrollada en Impact 2002+, se ha estimado que las sustancias tienen efectos tóxicos solamente por la exposición a través de la fase acuosa en suelo. Los potenciales de ecotoxicidad terrestre se calculan de forma similar a los de ecotoxicidad acuática (Humbert et al., 2005).

Jolliet et al. (2003) expone que debido a que la disponibilidad de datos es limitada, los valores de la Concentración Peligrosa para el 50% de las especies en suelo ($HC50_s$) son en su mayoría extrapolados de los valores de la Concentración Peligrosa para el 50% de las especies en agua ($HC50_a$) con el método propuesto por Hauschild and Wenzel (1998), como una función del coeficiente de adsorción de la sustancia considerada i (K_{di} , en m^3/kg), la densidad del suelo (ρ_s , en kg/m^3), y el contenido volumétrico adimensional de agua del suelo (f_w):

$$HC50_i^s = HC50_i^w (K_{di}\rho^s + f^w)$$

Los aspectos más importantes considerados en el método Impact 2002+ para los FC de la categoría de impacto de ecotoxicidad terrestre fueron sintetizados en la siguiente tabla.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES	
PUNTO INTERMEDIO	kg_{eq} trietilenglicol al suelo / kg_{emi}	$\text{FC int} = \frac{\text{FC da\~{n}o}_i}{\text{FC da\~{n}o}_{\text{SR}}}$ i=sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (trietilenglicol al suelo)	AGUA SUP	SI
			AIRE	SI
			SUELO	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a\~{n}o} / \text{kg}_{\text{emi}}$	IMPACT 2002+		
<ul style="list-style-type: none"> Los FC de ecotoxicidad terrestre de metales pesados solamente se aplican a las emisiones de metales en forma de iones disueltos. El estado del arte en la evaluación toxicológica permite una precisión de aproximadamente un factor de 100 (2 órdenes de magnitud) comparado con una variación total de alrededor de 12 órdenes de magnitud. Por lo que todos los flujos con un impacto mayor al 1% del daño total deben considerarse como potencialmente importantes. 				

Table 8. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Ecotoxicidad Terrestre.

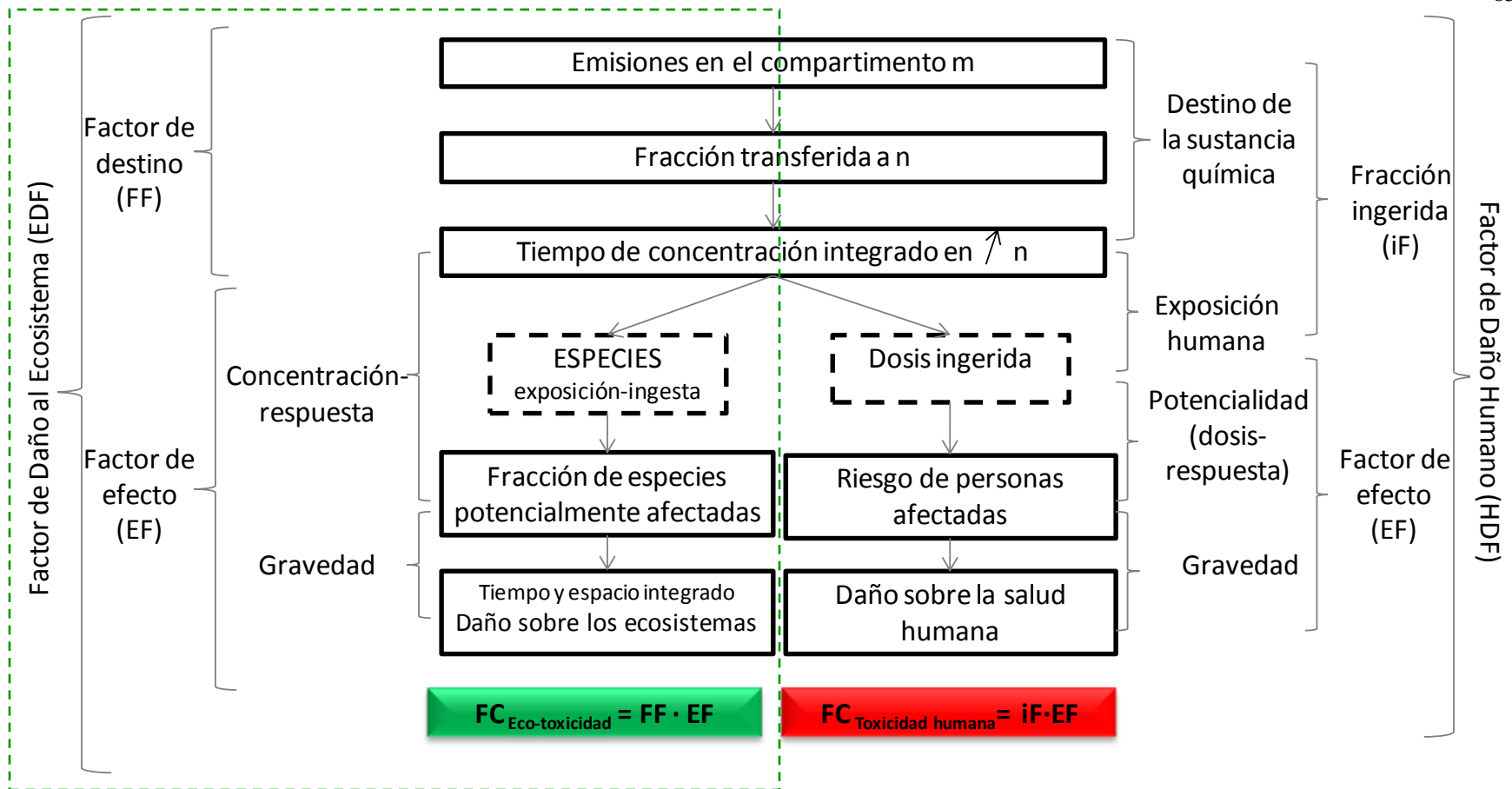


Figure 9. Esquema general del camino de impacto para toxicidad humana y ecotoxicidad empleada en la herramienta IMPACT 2002+. Adaptado de (Humbert et al., 2005)

Acidificación Acuática.

Concepto. Aborda los impactos de la acidificación generados por la emisión de productos químicos acidificantes transportados por vía aérea. La acidificación se refiere literalmente a los procesos que incrementan la acidez de los sistemas de agua y suelo mediante la concentración de iones de hidrógeno, causada por la deposición atmosférica de sustancias acidificantes.

Mecanismo ambiental. Las emisiones acidificantes generalmente se dispersan y transforman antes de ser depositadas en los sistemas acuáticos o terrestres. El área de deposición regional, depende de las características de la sustancia y de las condiciones atmosféricas, las principales sustancias acidificantes son transportadas de cientos a miles de kilómetros. El fenómeno de acidificación se produce cuando un donante aporta iones hidrógeno al sistema (agua o suelo), reduciendo su pH. (Hauschild & Potting, 2005)

Los contaminantes acidificantes tienen una amplia variedad de impactos sobre el suelo, las aguas superficiales y subterráneas, los organismos vivos, los ecosistemas y en las edificaciones (Guinée et al., 2002). La acidificación del medio ambiente se ha producido desde hace más de 100 años. El incremento masivo de emisiones de contaminantes al aire posterior a la Segunda Guerra Mundial, producto del crecimiento económico e industrial, ha hecho de la acidificación un problema medioambiental de primer orden en Europa y de América del Norte. (García Oca & Tapia Fernández, 2008).

Güereca (2006) explica que hay emisiones ácidas generadas directamente por el hombre y otras que se producen a partir de reacciones en el aire. Como ejemplos de emisiones antropogénicas se encuentran el dióxido de azufre (SO₂) y el óxido de nitrógeno (NO), presentes por ejemplo en vertidos de aguas residuales o escurrimientos de origen agrícola. El cálculo de la acidificación se basa en la siguiente fórmula:

$$\text{Acidificación} = \sum_i AP_i \times m_i$$

Donde:

AP_i = Potencial de acidificación del compuesto

M_i = Emisión del compuesto i

El potencial de acidificación puede expresarse en términos del potencial de iones de hidrógeno (H^+) equivalentes, por tanto éste es agregado sobre la base de la capacidad química a formar iones H^+ . El potencial de acidificación (AP) de un compuesto i ha sido definido como el número de iones H^+ producidos por kg de compuesto relativo a SO_2 :

$$AP_i = \frac{n_i}{n_{SO_2}}$$

Dónde:

n_i (mol/kg) = Número de iones H^+ potencialmente producidos por kg de compuesto i .

n_{SO_2} (mol/kg) = Número de iones H^+ potencialmente producidos por kg de compuesto SO_2 .

Aspectos metodológicos. En la siguiente tabla se resumen los principales aspectos considerados por el método Impact 2002+ para los FC de la categoría de impacto de acidificación acuática.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES	
PUNTO INTERMEDIO	$kg_{eq} SO_2 \text{ al aire}/kg_{emi}$	CML	AGUA SUP	SI
			AIRE	SI
			SUELO	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	-----	NO APLICA (*)		
<ul style="list-style-type: none"> (*) Por el momento no hay FC en $PDF \cdot m^2 \cdot \text{año}/kg_{emi}$ para la categoría de daño, debido que no existen estudios que avalen el análisis de los factores de daño para la acidificación acuática 				

Table 9. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Acidificación Acuática.

Acidificación y Eutrofización Terrestre.

Concepto. El efecto principal es el cambio en el nivel de nutrientes y en la acidez en el suelo, generado en gran parte por la emisión y deposición de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), amoníaco (NH₃), así como fosfatos. (JRC-IES, 2010). Otros contaminantes ligados a la acidificación son los compuestos volátiles orgánicos (COVs), metales pesados así como los contaminantes orgánicos persistentes (POPs). (García Oca & Tapia Fernández, 2008).

Mecanismo ambiental. La deposición de estos compuestos ocurre principalmente a través del aire hacia el agua. El efecto primario es un cambio en el nivel de nutrientes y de acidez presente en el suelo. (Goedkoop & Spriensma, 2001b).

A diferencia del la eco toxicidad, donde se asume que un incremento en la concentración de sustancias químicas resultará en un daño en al ecosistema, en la eutrofización, la predicción de las consecuencias asociadas al cambio en los niveles de nutrientes y acidez, no resulta tan sencillo.

Para la mayoría de las especies vegetales existe una combinación óptima y específica de nutrientes y acidez, cualquier cambio en los niveles de dichos parámetros causará una modificación en la población y composición de especies. El impacto primario sobre la comunidad vegetal produce después efectos secundarios sobre otras especies en el ecosistema terrestre.(JRC-IES, 2010).

El reto en este aspecto es determinar en qué medida un cambio puede ser considerado como un daño y las especies “objetivo” que representaran el estado natural de un ecosistema en específico.(Goedkoop & Spriensma, 2001b).

La eutrofización terrestre es causada principalmente por la deposición vía aérea de compuesto nitrogenados, como óxidos de nitrógeno ($\text{NO}_x = \text{NO}$ and NO_2) derivados de procesos de combustión, y de amoniaco, NH_3 , provenientes de la agricultura. El nitrógeno es el principal actor de la eutrofización terrestre, ya que el fósforo no es un factor limitante para el suelo. (Hauschild & Potting, 2005)

Aspectos metodológicos. En la siguiente tabla se resumen los principales aspectos considerados por el método Impact 2002+ para los FC de la categoría de impacto de acidificación y eutrofización terrestre.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES PARA EMISIONES AL	
PUNTO INTERMEDIO	$\text{kg}_{\text{eq}} \text{SO}_2 \text{ al aire}/\text{kg}_{\text{emi}}$	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i=sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (SO_2 al aire)	AIRE	SI
			SUELO	NO
PUNTO FINAL/ DAÑO	$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{año}/\text{kg}_{\text{emi}}$	ECO-INDICADOR 99		

Table 10. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Acidificación y Eutrofización Terrestre de acuerdo a (Humbert et al., 2005).

Eutrofización acuática.

Concepto. El nitrógeno (N) y el fósforo (F) son nutrientes esenciales para la vida, sin embargo en exceso, estas sustancias causan eutrofización tanto en ecosistemas acuáticos como terrestres. La eutrofización abarca los posibles impactos ambientales ocasionados por niveles excesivamente altos de dichos macro-nutrientes bio-disponibles en los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres (Jolliet et al., 2004).

Mecanismo Ambiental. Jolliet et al. (2004) y Guinée et al.(2002) señalan que el enriquecimiento de nutrientes puede ocasionar los siguientes efectos en los ecosistemas:

- Cambios no deseados en la composición de las especies. En el caso de un aumento en la turbidez del agua la población de peces del ecosistema puede verse afectada negativamente.
- Elevada producción de biomasa tanto en ecosistemas acuáticos como terrestres. En ecosistemas acuáticos esto se ve reflejado en un aumento en la tasa de crecimiento del fitoplancton y en la proliferación de algas.
- Afectación de aguas superficiales, provocando que éstas se tornen inviables como fuente de agua potable.
- Disminución en el nivel de oxígeno disponible en ecosistemas acuáticos, debido al consumo adicional de oxígeno derivado de la descomposición de la biomasa (parámetro medido como la demanda biológica de oxígeno, DBO).

En un cuerpo de agua, solamente uno de los dos nutrientes, P o N, será el factor limitante, en el caso de las aguas superficiales normalmente es el fósforo, mientras que en el caso de las aguas marinas es el nitrógeno.

El indicador de eutrofización es calculado de acuerdo a la fórmula siguiente, propuesta por Guinée et al. (2002), creadores de la metodología CML, en la cual se basan los factores de caracterización para la categoría de eutrofización en la metodología IMPACT 2002:

$$Eutrofización = \sum_i EP_i \times m_i$$

Donde:

EP_i = Potencial de eutrofización del compuesto i .

M_i = Emisión del compuesto i al aire, agua o suelo.

La eutrofización es el indicador resultante, se expresa en kg PO_4^{3-} equivalentes.

De acuerdo con Güereca & Gassó Domingo (2006), el EP_i refleja la contribución potencial de una sustancia en la formación de biomasa, de acuerdo a la formula:

$$EP_i = \frac{v_i/M_i}{v_{ref}/M_{ref}}$$

Donde:

v_i = Contribución potencial a la eutrofización de una mol de compuesto i

v_{ref} = Contribución potencial a la eutrofización de una mol del compuesto de referencia (por ejemplo PO_4^{3-}).

M_i = Masa del compuesto i (en kg/mol)

M_{ref} = Masa del compuesto de referencia (en kg/mol), (por ejemplo PO_4^{3-})

Los EPs están basados en la composición química promedio de organismos acuáticos: $C_{106}H_{263}N_{16}P$, por lo tanto en este enfoque 1 mol de P de biomasa requiere 16 moles de N. El factor de caracterización para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), esta basado en el hecho de que cuando 1 mol de biomasa es emitida, esta requiere 138 moles de oxígeno para su degradación.

Aspectos metodológicos. En la siguiente tabla se resumen los principales aspectos considerados por el modelo Impact 2002+ para los FC de la categoría de impacto eutrofización acuática.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES PARA EMISIONES AL	
PUNTO INTERMEDIO	$kg_{eq} PO_4^{3-}$ al agua/ kg_{emi}	CML	AGUA SUP	SI
			AIRE	SI
			SUELO	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	_____	NO DISPONIBLES (*)		
(*) Actualmente no hay estudios disponibles que soporten la evaluación de los factores de daño en unidades de $FPD \cdot m^2 \cdot año / kg_{emi}$ para eutrofización acuática.				

Table 11. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Eutrofización Acuática de acuerdo a (Humbert et al., 2005).

Ocupación de suelo.

Concepto. La categoría de uso de suelo refleja el daño a los ecosistemas producto de los efectos de la ocupación y transformación del suelo. Ejemplos del uso del terreno son la producción agrícola, la extracción mineral y los asentamientos humanos. (JRC-IES, 2010).

Jolliet et al.(2004) señala que el uso del suelo para la realización de actividades antropogénicas constituye una amenaza importante para las especies y los ecosistemas, tiene implicaciones negativas sobre los recursos naturales abióticos (suelo, agua) y el medio natural (estructura del paisaje). Además, los cambios sobre la cobertura terrestre no sólo afectan un área local específica, en muchas ocasiones los efectos se extienden a regiones adyacentes. La cuestión de si y cómo tomar en cuenta los cambios indirectos en el uso del suelo y sus efectos sobre el ecosistema representa el reto más significativo de la presente categoría de impacto.

Dentro de este contexto es importante distinguir la diferencia entre los términos “ocupación” de suelo y “transformación” de suelo. (Goedkoop & Spriensma, 2001b)

La *ocupación del suelo* se define como el mantenimiento de un área en un estado particular a lo largo de un periodo de tiempo específico (JRC-IES, 2010) . Por otro lado, el término *transformación del suelo* se refiere a la conversión del suelo de un estado a otro, por ejemplo de su estado original a un estado alterado o de un estado alterado a otro estado alterado. A menudo, la transformación es seguida de la ocupación, mientras que en otros casos la ocupación se presenta en una zona que ha sido transformada previamente.(JRC-IES, 2010)

Aspectos Metodológicos. Impact 2002+ se basa en los principios metodológicos de Eco-Indicador 99 (Goedkoop & Spriensma, 2001a) para la modelación de la presente categoría de impacto.

A diferencia de los modelos de daño para otras categorías de impacto, los datos necesarios para el modelado de la categoría de uso de suelo se basan en datos empíricos, por ejemplo en la observación del número de especies en los diferentes tipos de suelo, en lugar de extrapolaciones de datos de laboratorio y modelos computacionales. Dichos factores inciden sobre aspectos importantes en el proceso de modelación:

Existen muy diversas composiciones de suelo, y el número de especies presenten en dichos tipos de suelo puede variar ampliamente dependiente de la ubicación geográfica. El número de especies presentes es el resultado de múltiples factores, tales como la concentración de las sustancias químicas tóxicas y del nivel de nutrientes o acidez presentes en el suelo, incluso del incremento en los patrones de radiación de rayos ultravioleta (UV) o de los cambios climáticos. Por lo anterior resulta difícil separar el efecto de los cambios en el uso del suelo de las otras categorías de impacto. Actualmente, los datos disponibles enfrentan a las siguientes dificultades:

No hay datos suficientes y completos para todos los tipos de uso del suelo.

- No siempre los datos disponibles son adecuados para su aplicación práctica dentro de ACV.

La metodología Eco-Indicador 99 a su vez ha tomado los datos y los conceptos teóricos propuestos por Köllner (metodología desarrollada para la medición de los efectos regionales del uso de suelo) y Müller-Wenk (enfoque y colección de datos que refleja el efecto local del uso del suelo).

Como se mencionó anteriormente existe una diferencia distintiva entre los siguientes conceptos relacionados al uso del suelo: *transformación del suelo*, terreno que se ha convertido de un estado a otro y *ocupación del suelo*, terreno que ha sido convertido anteriormente y que es ocupado durante cierta cantidad de tiempo.

Un ejemplo típico es la producción de maíz en una zona agrícola antigua. En ACV, a esta actividad no se le puede hacer responsable por los impactos generados en el proceso de conversión del terreno por el hecho de que el área natural fue transformada tiempo atrás. Sin embargo, cada año cierta área permanece ocupada por lo que no puede volver a su estado natural. Por dicha razón el daño debido a la ocupación del terreno es visto como el daño causado de impedir que la zona ocupada vuelva a su condición natural.

En el modelo de Eco-Indicador 99 se consideran los impactos ocasionados por dos tipos de procesos (conversión y ocupación) en dos clases de áreas (regional y local) por lo que se tienen cuatro versiones distintas del modelo de daño. Sin embargo cabe mencionar que en IMPACT 2002+ sólo es considerada la categoría de ocupación del suelo. En la siguiente tabla se pueden observar los parámetros considerados para los cuatro tipos de uso de suelo.

TIPO	S _{REFERENCIA}	S _{USO}	TAMAÑO DEL ÁREA A	INTERVALO DE TIEMPO T
Transformación Local	Estado original	Especies S en el nuevo tipo de uso de suelo	Área transformada	Tiempo de restauración
Ocupación Local	Estado natural	Especies S en el nuevo tipo de uso de suelo	Área ocupada	Tiempo de ocupación
Transformación Regional	Estado original	área natural reducida *)	Área natural **)	Tiempo de restauración
Ocupación Regional	Estado natural	área natural reducida*)	Área natural **)	Tiempo de ocupación

Table 12. Visión general de los parámetros que determinan los 4 tipos de uso del suelo. *) Área natural reducida significa número de especies que habitan cuando el área natural es reducida por la conversión o que se mantiene reducida debido a la ocupación. **) La reducción de especies sucede en el área natural fuera del terreno transformado o mantenido. Tomada de (Goedkoop & Spriensma, 2001a)

Aspectos Metodológicos. El concepto de fracción potencial de especies desaparecidas (PDF) propuesto por la metodología Eco-Indicador 99 es fácilmente aplicable para modelar el daño regional y local ocasionado tanto por la ocupación como por la conversión del suelo. La PDF de la especie de plantas vasculares se expresa como la diferencia relativa entre el número de especies S , bajo las condiciones de referencia, y el número de especies en las condiciones de conversión u la ocupación. Entonces la PDF puede ser generalizada en la siguiente fórmula:

$$PDF = \frac{S_{referencia} - S_{uso}}{S_{referencia}}$$

$S_{referencia}$ = Diversidad de especies en el tipo de área de referencia.

S_{uso} = Diversidad de especies en el área transformada u ocupada.

El daño a la Calidad del Ecosistema (CE) puede calcularse cuando el FPD se multiplica por el área y lapso de tiempo correspondiente:

$$CE = PDF \times \text{área} \times \text{tiempo} = \frac{S_{referencia} - S_{uso}}{S_{referencia}} \times A \times t$$

Esta fórmula general puede ser empleada tanto para ocupación y conversión como para los efectos regionales y locales, los parámetros descritos en la Tabla 12 pueden ser usados combinando la ecuación anterior. Para las cuatro versiones del modelo de daño hay valores distintos para el área y el intervalo de tiempo. El tiempo de restauración debe de ser estimado considerando el tipo de terreno antes y después de la transformación. Un problema grave es que la mayoría de los tipos de uso de suelo nunca son restaurados exactamente o sus condiciones originales.

TIPO DE AREA	PDF DE OCUPACIÓN	DESCRIPCIÓN
Urbana continua	0.96	La mayoría del terreno está cubierto por edificios. Calles, carreteras y áreas superficiales artificiales cubren casi todo el terreno. Áreas no lineales de vegetación y suelo desnudo son escasas. Al menos el 80% de la superficie total está sellada.
Urbana discontinua	0.80	La mayoría del terreno está cubierto por estructuras. Edificios, carreteras y aéreas superficiales artificiales están asociadas con áreas de vegetación y suelo descubierto, las cuáles ocupan zonas discontinuas pero significativas. Menos del 80% del total de la superficie están selladas.
Tierra de cultivo convencional	0.95	Las áreas cultivadas regularmente con arado y generalmente bajo un sistema de rotación. Se aplican fertilizantes químicos sintéticos y pesticidas de forma regular.
Tierra de cultivo Integrada	0.95	Las áreas cultivadas regularmente con arado y generalmente bajo un sistema de rotación. Se aplican fertilizantes químicos sintéticos y pesticidas. Sin embargo la entrada de dichas sustancias es reducida.
Tierra de cultivo orgánica	0.91	Las áreas cultivadas regularmente con arado y generalmente bajo un sistema de rotación. No se permiten químicos sintéticos fertilizantes ni pesticidas, se emplean fertilizantes orgánicos.
Prado intensivo	0.94	Zona cubierta predominantemente por hierbas gramíneas, de composición floral, que no está bajo un sistema de rotación. Se utiliza principalmente para el pastoreo, sin embargo el forraje puede ser cosechado mecánicamente. Incluye áreas de bocage. La cosecha del prado es recolectada mecánicamente 3 o más veces al año.
Prado menos intensivo	0.85	Zona cubierta predominantemente por hierbas gramíneas, de composición floral, que no está bajo un sistema de rotación. Se utiliza principalmente para el pastoreo, sin embargo el forraje puede ser cosechado mecánicamente. Incluye áreas de bocage. La cosecha del prado es recolectada mecánicamente 1o 2 veces al año.
Prado orgánico Industrial	0.70	Superficies cubiertas artificialmente (con cemento, asfalto, tarmac, o estabilizadas con tierra) desprovistas de vegetación ocupan la mayor parte de la zona en cuestión, la cual también contiene edificios y / o áreas con vegetación.
De ferrocarriles	0.70	Autopistas, vías férreas, incluyendo instalaciones asociadas (estaciones, plataformas, terraplenes). Con un ancho mínimo de 1 00 m.
Urbana verde Bosque	0.10	Formaciones vegetales compuestas principalmente por árboles, incluyendo sotobosques de arbustos y matorrales, donde predominan especies latifoliadas. (Presencia de coníferas 0 - 10%)
Tierras bajas Suizas	0.00	

Table 13. Clasificación, valores de PDF y descripción de las áreas de ocupación acorde con la metodología Eco-Indicador 99 extraído y adaptado de(Goedkoop & Spriensma, 2001b)

En la Tabla 12 se resumen los principales aspectos considerados por el modelo Impact 2002+ para los FC de la categoría de uso de suelo.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO
PUNTO INTERMEDIO	m ² para tierra de cultivo orgánica _{eq} ·año sin embargo esta categoría usualmente se expresa en PDF·m ² ·año/m ² ·año	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i= tipo de suelo SR= tierras de cultivo orgánico
PUNTO FINAL/ DAÑO	FPD·m ² ·año/·m ² ·año	ECO-INDICADOR 99 (*)
(*) El modelo indicador contempla dos sub categorías para “uso de suelo”: ocupación y transformación del suelo, sin embargo en IMPACT 2002 sólo es considerada la categoría de ocupación del suelo. Los factores de daño se basan en observaciones empíricas del número de especies por tipo de área. En dichas observaciones se tomaron en cuenta todos los efectos del tipo de área. Lo que significa que también los efectos de las emisiones (pesticidas y fertilizantes) están incluidos. Para evitar un doble conteo en las categorías de eco toxicidad de pesticidas y potenciales de acidificación y eutrofización, solo deberán considerarse las emisiones que dejan el campo (a través del agua, la erosión y la cosecha) así como las emisiones que son usadas más de lo normal.		

Table 14. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de uso de suelo de acuerdo con (Humbert et al., 2005)

Calentamiento global.

Concepto. (Güereca & Gassó Domingo, 2006) define cambio climático como el impacto de las emisiones antropogénicas sobre las fuerzas radiativas (por ejemplo, la absorción de la radiación del calor) de la atmósfera, debido a la emisión de gases de efecto invernadero y por actividades que inciden en su concentración. El cambio climático puede generar efectos adversos sobre los ecosistemas, la salud humana y el estado de los materiales.

Los gases de efecto invernadero son sustancias con la capacidad de absorber la radiación infra roja de la tierra (forzante radiativo). En la determinación de la fuerza radiante de una emisión, el cambio en la concentración y fuerza radiante se determina considerando el tiempo de permanencia de la sustancia. (JRC-IES, 2010). La mayoría de las emisiones relevantes al clima, enriquecen las fuerzas radiativas, causando que la temperatura superficial de la Tierra aumente fenómeno conocido como “efecto invernadero” (Güereca & Gassó Domingo, 2006).

EL PICC define cambio climático como un cambio en el estado del clima que puede identificarse (por medio de pruebas estadísticas) por los cambios en la media y / o por la variabilidad de sus propiedades, efectos que persisten durante un período prolongado de tiempo, generalmente décadas o más. Se refiere a cualquier cambio en el clima a través del tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana sobre la composición de la atmósfera y/o en el uso de la tierra (Barker, 2007).

Esta acepción difiere de la del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) donde se define el "cambio climático" como: "un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (García Oca & Tapia Fernández, 2008).

Mecanismo ambiental. Cabe mencionar que los mecanismos ambientales usados para la categoría de calentamiento global difieren en su estructura en comparación con las etapas de destino, efecto y daño aplicadas en otras categorías de impacto (JRC-IES, 2010).

El Potencial de Calentamiento Global (PCG) es usado como el factor de caracterización para evaluar y agregar las intervenciones en la categoría de cambio climático dentro de la metodología de Impact 20002 (Güereca & Gassó Domingo, 2006).

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha desarrollado el modelo de Bern, para el cálculo del forzante radiativo de todos los gases de efecto invernadero es decir su Potencial de Calentamiento Global (PCG) (JRC-IES, 2010).

De acuerdo con IPCC 90 el PCG es la relación de la forzante radiativo integrado en el tiempo a partir de la liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero respecto a la emisión de 1 kg de un gas de referencia (CO₂). En palabras más sencillas el PCG es una medida de la contribución relativa del efecto radiativo de una sustancia determinada en comparación con otra, integrada en un horizonte de tiempo seleccionado

El Potencial de Calentamiento Global (PCG) es el indicador resultante que se expresa en kg CO₂ equivalentes.

$$PCG_i = \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_r(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_i(t) dt]}{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_r(t) dt]} \longrightarrow \frac{PCGA_i}{PCGA_r}$$

Dónde:

TH= es el horizonte de tiempo

RF= es la media global del forzante radiativo (eficiencia radiativa) del componente i para el numerador, y para la sustancia de referencia r en el caso del denominador.

$[C_i(t)]$ = la abundancia en función del tiempo del componente i para el numerador, y para la sustancia de referencia r en el caso del denominador. El numerador y el denominador se denominan potenciales de calentamiento global absolutos (PCGA) para i y para r respectivamente.

A continuación se esquematiza la cadena de causa-efecto para cambio climático, desde las emisiones hasta el daño final. El grosor de las flechas representa la importancia que la vía tiene sobre todo el mecanismo. El forzante radiativo es causado por efectos directos e indirectos. La casilla “otros impactos” se añadió debido a que existen varios impactos, los cuáles no han sido adecuadamente descritos para justificar su inclusión.

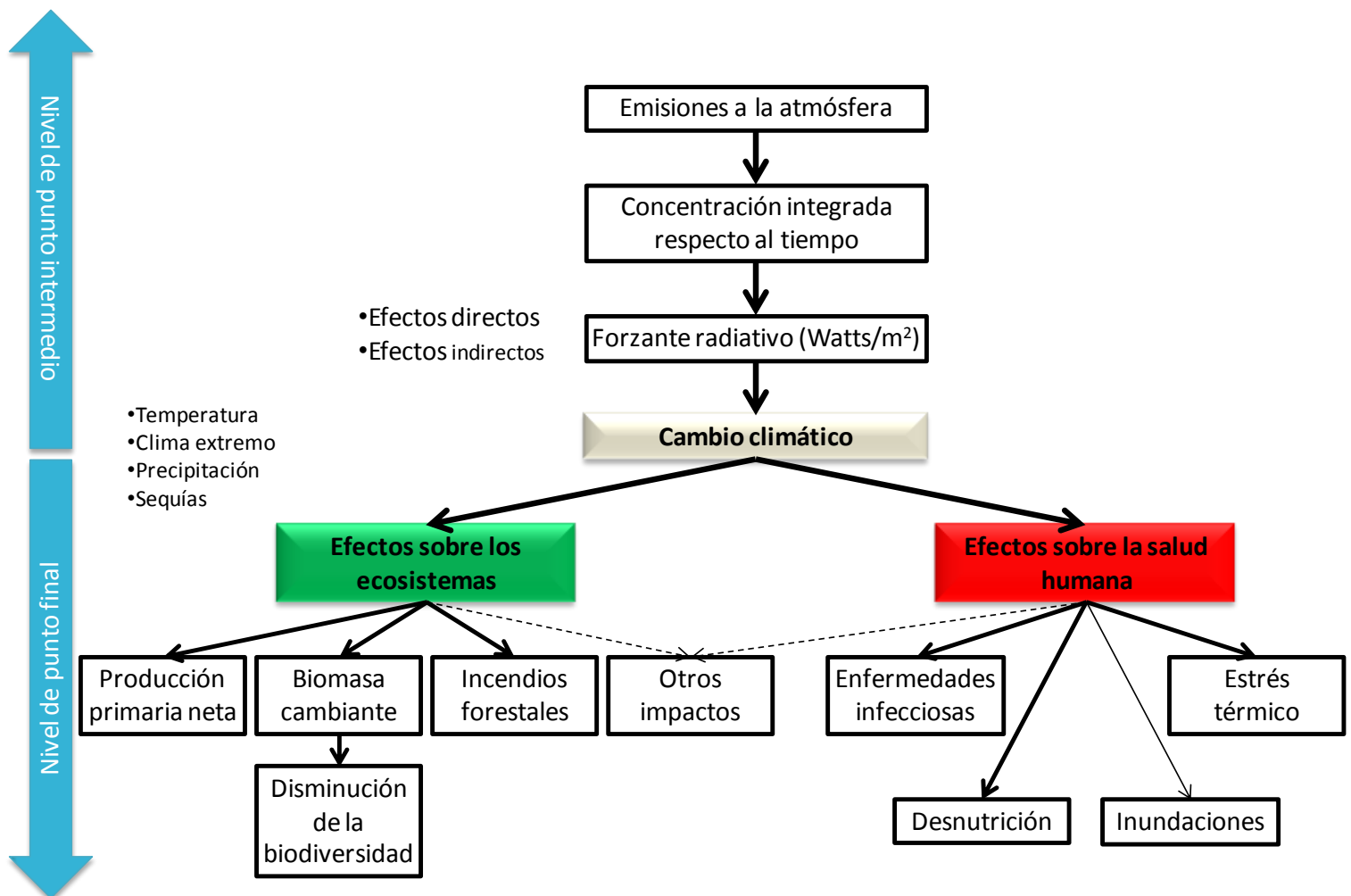


Figure 10. Esquema de la cadena de causa-efecto para la categoría de impacto cambio climático. Adaptada de

Como se puede observar del esquema anterior, las vías de impacto de los gases de efecto invernadero (el aumento de temperatura, los cambios en las precipitaciones, aumento del nivel del mar, el cambio de las corrientes oceánicas, las tormentas, los huracanes, entre otros) eventualmente van llevando a los impactos sobre la salud humana, el medio ambiente biótico y los recursos naturales. Todos los impactos dependen de los cambios en el forzante radiativo en la atmósfera (expresado en Watts/m^2).

Aspectos Metodológicos. (Güereca & Gassó Domingo, 2006) señalan que el indicador del PCG se deriva de dos propiedades básicas con las que cuenta cada gas. La primera: habilidad para reflejar el calor y la segunda: la permanencia del gas en la atmósfera. Estas propiedades se comparan con las propiedades del dióxido de carbono y convertidas en dióxido de carbono equivalentes.

Los equivalentes individuales de PCG para cada emisión del sistema de referencia pueden ser sumados para obtener un indicador de gases invernadero total. Por lo tanto, el indicador global de gases de efecto invernadero se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Cambio Climático} = \sum_i PCG_i \times m_i$$

Donde:

PCG_i = Potencial de Calentamiento Global del compuesto i con respecto al gas de referencia (CO_2)

M_i = Masa del compuesto i en kg

Como una regla general, las emisiones de CO_2 que tienen su origen en fuentes fósiles, climático mejor conocidas como gases de efecto invernadero, son contabilizadas dentro de la categoría de cambio climático, mientras las que se generan a partir de fuentes biogénicas se consideran como emisiones neutrales.

El IPCC recomienda el uso de los PCG como factores de caracterización de la categoría de impacto calentamiento global para la evaluación ambiental a punto intermedio dentro de la metodología de ACV ya que su uso permite expresar el destino y efecto combinado de las emisiones de gases de efecto invernadero en daños a la salud humana y a los ecosistemas (JRC-IES, 2010).

Esta categoría de impacto ofrece la oportunidad de tener un indicador a nivel de punto intermedio basado en principios científicos como lo es el PCG. Equilibrio climático puede considerarse como una función de soporte de vida a ser protegidas como tal: la capacidad del medio ambiente para proporcionar las condiciones para una estabilidad a largo plazo del clima en la Tierra. (Jolliet et al., 2004).

En la Tabla 15 se resumen los principales aspectos considerados por el modelo Impact 2002+ para los FC de la categoría de cambio climático.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO	FC DISPONIBLES PARA EMISIONES AL	
PUNTO INTERMEDIO	kg _{eq} -CO2 into air/kg _{emi}	IPCC 2001, considerando los factores de PCG en un horizonte de tiempo de 500 años	AGUA SUP	NO
			AIRE	SI
PUNTO FINAL/ DAÑO	kg _{eq} -CO2 into air/kg _{emi} (*)	IPCC 2001, considerando los factores de PCG en un horizonte de tiempo de 500 años	SUELO	NO
(*) Desde el punto de vista de los autores el modelo actual a nivel de daño final para los efectos del cambio climático en la calidad de los ecosistemas y la salud humana no es lo suficientemente precisa para derivar factores de caracterización de daño confiables. Por lo tanto la interpretación tiene lugar directamente a nivel de puntos intermedios, lo cual puede ser interpretado como el daño en los sistemas de soporte de vida.				

Table 15. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Cambio Climático de acuerdo a (Humbert et al., 2005)

Energía no renovable

Concepto. Para la categoría de Energía no renovable Impact 2002 toma los conceptos desarrollados por el Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida (ECOINVENT). La propuesta de Ecoinvent hace una evaluación del impacto del consumo energético del sistema bajo estudio en base a las fuentes de recursos energéticos no renovables primarias extraídas, lo anterior en línea al concepto de demanda acumulativa de energía (DAC). Dentro de los recursos energéticos no renovables primarios considerados se encuentran el carbón duro, lignita, petróleo, gas natural, carbón, gas de coque, gas natural, turba y uranio.

De acuerdo con Hischer et al. (2010), el Análisis de los Requerimientos de Energía Acumulativos (AREA) tiene el propósito de investigar el uso de energía a través del ciclo de vida de un producto o servicio. Incluyendo los usos de energía tanto directos como los indirectos de energía, por ejemplo de esto último la energía empleada en materiales de construcción y materias primas.

La información en la energía acumulativa de energía crea una base importante en la identificación de las prioridades en el ahorro potencial de energía a lo largo de la vida de un producto o servicio, en su compleja relación entre diseño, producción, uso y disposición. La Demanda Acumulativa de Energía (DAE) es ampliamente usada como un indicador en la detección de los impactos ambientales, sin embargo debe de combinarse con otros métodos como ACV dónde, como en el caso de la presente categoría, puede servir de base para el cálculo de indicadores ambientales.

La reducción del consume de energía es un pre-requisito importante para el desarrollo sustentable. Debido a que muchos problemas ambientales (ejemplo es el cambio climático o la disposición de desechos nucleares) están conectados al uso de energía, este indicador puede servir como un punto de referencia en el criterio para establecer mejoras. Además es un concepto

fácil de comprender para tomadores de decisiones a los distintos niveles como consumidores, políticos, administradores o empresas privadas.

Debe de considerarse, que si bien método de ARAE es útil para brindar una visión general del impacto ambiental relacionado con el uso de energía en el ciclo de vida de los productos, no brinda la imagen completa de las implicaciones ambientales por lo que no debe de usarse como único de evaluación ambiental.

Aspectos metodológicos. Existen diferentes criterios para la determinación el requerimiento primario de energía. En Impact 2002+ sólo fueron considerados los factores de caracterización desarrollados por Ecoinvent para el consumo de la energía no renovable en términos del total de la energía primaria extraída (recursos combustibles no renovables), dichos cálculos se hicieron en base al valor del poder calorífico superior de los recursos energéticos primarios. (Jolliet et al., 2003a).

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO
PUNTO INTERMEDIO	kg _{eq} crude oil (860 kg/m ³)/kg _{used} (*)	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i= sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (petróleo ,860 kg/m ³)
PUNTO FINAL/ DAÑO	MJ total primary non-renewable energy/kg _{used}	Ecoinvent
(*)Aún cuando el agotamiento de los recursos energéticos no renovables a nivel de punto intermedio se puede expresar en términos de kg _{eq} de las sustancia de referencia i, es más común que se exprese en MJ energía no renovable primaria total.		

Table 16. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Energía no renovable de acuerdo con (Humbert et al., 2005)

Extracción mineral.

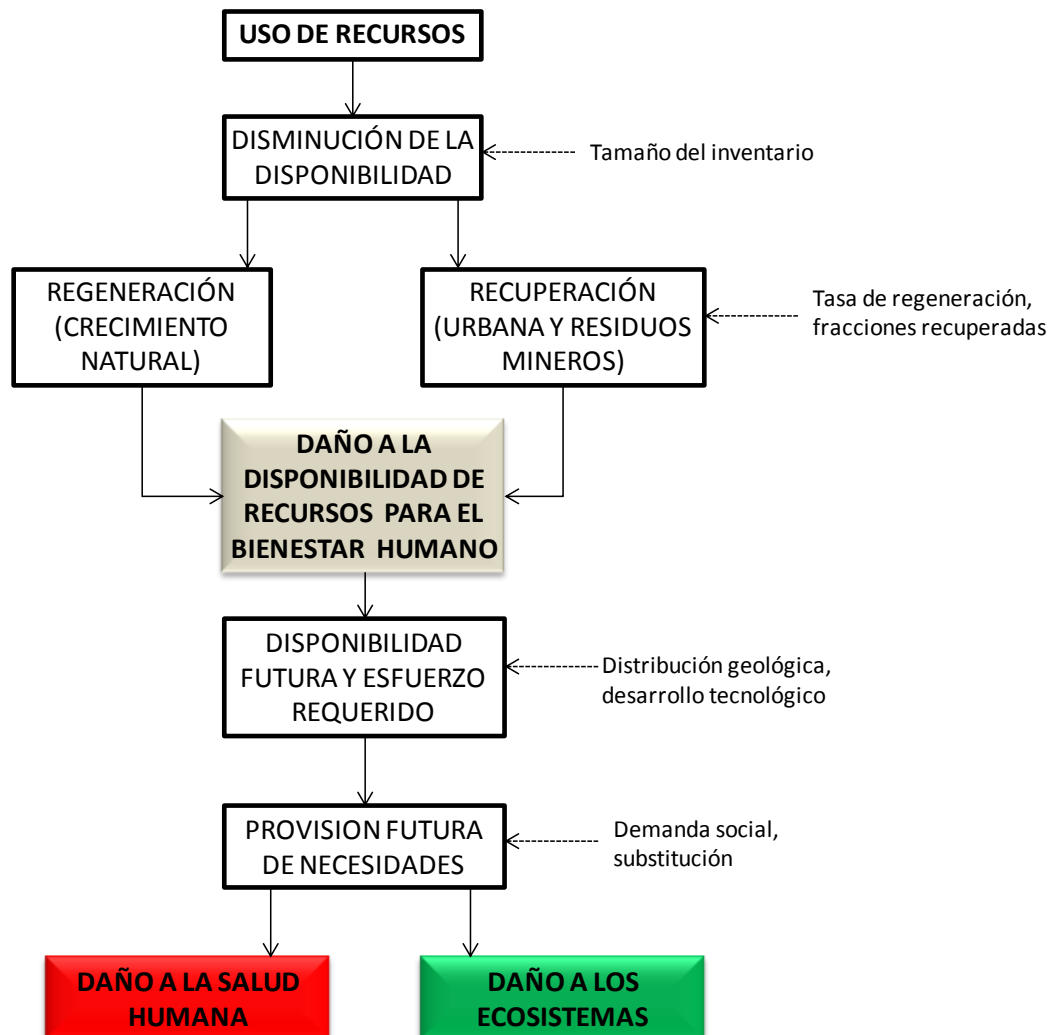
Concepto. Los minerales forman parte de los llamados recursos bióticos o no renovables. De forma general, el agotamiento de los recursos no renovables se ve como un daño a la naturaleza debido a que el recurso explotado deja el sistema debido a procesos antropogénicos, causando la disminución de la disponibilidad de la reserva total de las funciones potenciales de los recursos naturales, debido a una tasa de extracción y uso, superior a la de su regeneración. (Jolliet et al., 2004)

El agotamiento de los recursos bióticos es unas de las categorías de impacto más discutidas y por consiguiente existen una amplia variedad de métodos disponibles para la caracterización de las contribuciones hacia ella. (Guinee, 2002).

Lo anterior debido a que, a diferencia de otras categorías de impacto como Toxicidad Humana o Eutrofización, no se han encontrado unidades más o menos aceptables para expresar los daños asociados a la extracción de recursos naturales. (Goedkoop & Spriensma, 2001b)

En el contexto de ACV existen cuatro enfoques principales para la evaluación del impacto del uso de recursos no renovables, en donde los efectos de la extracción de cierta cantidad de recurso puede ser modelados en base a los siguientes criterios: masa o energía, exergía o entropía, consecuencias futuras de la extracción del recurso y uso de reservas. (JRC-IES, 2010)

Dentro de la presente categoría de impacto es de especial relevancia el concepto de agotamiento, que de acuerdo con SETAC es un decremento en la disponibilidad de un recurso natural debido a la reducción de su cantidad y calidad en la naturaleza, en el caso de los recursos no renovables es un hecho inevitable ya que el recurso el mineral se acabará inevitablemente en un lapso de tiempo debido a que su tasa de regeneración es despreciable respecto a su tasa de extracción.



Aspectos metodológicos. El factor de caracterización de punto final para el agotamiento de recursos minerales se evalúa considerando las implicaciones futuras de la extracción actual del recurso. Lo anterior se basa en la idea de que la extracción de altas concentraciones de recursos en el presente forzaría a las futuras generaciones a extraer menores concentraciones y valores de los mismos recursos a expensas de una mayor inversión de dinero y energía, lo cual conduciría a un aumento del impacto sobre el medio ambiente y la economía. (JRC-IES, 2010)

En Impact 2002+ se toma los conceptos de la metodología de Eco-Indicador 99 para la evaluación de impactos de la categoría de “extracción mineral”. Acorde con dicha metodología, publicada por (Goedkoop & Spriensma, 2001b) el indicador de la categoría de extracción

mineral, se calcula en términos de “energía surplus” o “excedente”. Este término fue acuñado por Ruedi Müller-Wenk, y se define como la diferencia de la energía requerida para extraer un recurso entre las condiciones actuales y las futuras.

Actualmente el ser humano extrae los mejores recursos, dejando los recursos con menos calidad para las futuras generaciones. (García Oca & Tapia Fernández, 2008). Dentro de Impact 2002, este esfuerzo extra se expresa en el caso específico de los minerales, la energía surplus analiza la relación entre el consumo de energía y la reducción de los grados de mineral de los minerales más comunes como la energía excedente por kg de hierro, como resultado de la disminución de las minas de hierro.

Müller-Wenk calculó la energía surplus futura como $Q*N$, en dónde Q representa la cantidad total que ha sido extraída por el hombre antes de 1900 y N representa el número de veces que dicha cantidad es extraída.

Goedkoop & Spriensma (2001) señala que el valor absoluto de la energía surplus no tiene significancia. El único propósito del concepto de energía surplus es tener una medida relativa del daño ocasionado por el agotamiento de los recursos minerales.

FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (FC)	UNIDAD	MODELO
PUNTO INTERMEDIO	kg_{eq} hierro(concentrado)/ kg_e extraídos (*)	$FC_{int} = \frac{FC_{daño_i}}{FC_{daño_{SR}}}$ i= sustancia correspondiente SR= sustancia de referencia (concentrado de hierro)
PUNTO FINAL/ DAÑO	MJ de energía adicional /kg extraídos	Eco-indicator 99
(*)Aún cuando el agotamiento de la extracción mineral nivel de punto intermedio se puede expresar en términos de kg_{eq} de las sustancia de referencia, es más común que se exprese en MJ adicionales de energía (energía surplus)		

Table 17. Consideraciones importantes dentro de IMPACT 2002+ para los factores de caracterización de la categoría de Extracción Mineral de acuerdo con (Humbert et al., 2005)

Resultados y Discusión

ACV del Masterbatch de Óxido de Zinc (ZnO) Nanométrico

Introducción al caso de estudio

El presente trabajo de tesis se desarrolla dentro del contexto del proyecto MINANO EUFP7, colaboración entre la Unión Europea y México cuyo objetivo es el desarrollo de un método de producción de nano-compositos a gran escala, continuo, eficiente y económico (Paajanen M.; Benavides R., 2010) que además asegure una producción sustentable y segura mediante la aplicación del estado del arte del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Particularmente el proyecto se centra en el desarrollo de los mecanismos de síntesis de nano-partículas minerales así como a la integración de éstas a bases poliméricas de polipropileno (PP), poliestireno (PS) y poli cloruro de vinilo (PVC) para la fabricación de productos plásticos de diversa índole. Los materiales de interés son el Hidróxido de Magnesio ($Mg(OH)_2$), Óxido de Zinc (ZnO) y Plata (Ag), debido a que éstos poseen propiedades de retardación de flama, protección contra los rayos ultravioleta y bacteria-estáticas respectivamente.

Las empresas e centros de investigación y desarrollo involucrados en el proyecto son por parte de México: Servicios de Administración Peñoles, S. A. (S.A.P.S.A), Centro de Investigación en Química Avanzada (CIQA), Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMA), Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Owens México. La contraparte Europea la integran: Centro de Investigación Técnica de Finlandia (VTT), Universidad Tecnológica de Dinamarca (DTU) y las empresas Italianas SOFTER y SOVERE.

Este estudio se centra en la evaluación ambiental de un aditivo funcionalizado con nanopartículas de (NPs) de Óxido de Zinc (ZnO), a partir de sulfato de zinc ($ZnSO_4$) sub-producto del proceso hidrometalúrgico de extracción del Zinc desarrollado por la empresa S.A.P.S.A.

Definición del objetivo.

Evaluar el desempeño ambiental de la síntesis a escala piloto de un aditivo polimérico funcionalizado con nanopartículas de (NPs) de Óxido de Zinc (ZnO) a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) llevada a cabo por la empresa Servicios Administrativos Peñoles (S.A.P.S.A) con el fin de identificar y cuantificar los potenciales impactos a la salud humana y al medio ambiente asociados al proceso de producción de dicho aditivo. En función de los resultados obtenidos del ACV:

- Determinar áreas de oportunidad y mejora en términos de reducción de impacto ambiental.
- Proponer alternativas tecnológicas y de ingeniería en el diseño del proceso para dar respuesta a los problemas ambientales encontrados.
- Establecer un marco de referencia (base de datos, información, etc.) así como las directrices que permitan a la empresa S.A.P.S.A. el desarrollo de nuevas nanotecnologías dentro de un contexto de sustentabilidad y su posterior comercialización bajo la normatividad ambiental impuesta por mercados nacionales e internacionales.
- Integrar criterios de sustentabilidad en la fabricación y comercialización de sus productos “nano” a la política ambiental interna de la compañía.

Consideraciones y limitaciones.

Las principales limitaciones de este estudio estuvieron relacionadas al el acceso y a la disponibilidad de la información requerida por el inventario de ciclo de vida de datos relacionados a procesos secundarios (es decir ajenos a la síntesis del aditivo fuera del alcance del departamento de desarrollo de nuevos materiales), ya que en muchas ocasiones los códigos de confidencialidad de la compañía no permitieron obtener datos como balances de materia y energía, flujos elementales, emisiones, tecnología empleada, etc. Por lo anterior y para cubrir dichas limitaciones se acudió a distintos tipos de fuentes bibliográficas como patentes, libros, artículos de revistas científicas, etc.

Otro aspecto a considerar es que tanto la base de datos de ECOINVENT como la metodología de impacto IMPACT 2002+ utilizadas para la modelación del sistema dentro del software GaBi ® están basadas en información correspondiente a las características de procesos tecnológicos y de la población de Europa del Oeste, por el momento no existen versiones de éstos para México, ni siquiera para América Latina. Las limitaciones impuestas en la regionalización es un tema a solucionar en conjunto por la comunidad científica y de usuarios de la herramienta de ACVs.

Cabe mencionar que, pese a lo anterior , este estudio es un primer ejercicio de S.A.P.S.A en la evaluación del desempeño ambiental en etapas de desarrollo temprano de nanotecnologías, en específico de la fabricación del aditivo funcionalizado con NPs de ZnO, la experiencia acumulada y resultados obtenidos durante su elaboración servirán de base y referencia para superar los obstáculos que se presentaron, y crear en las posibilidades de la compañía las condiciones óptimas en posteriores aplicaciones de ACV.

Métodos y elección de métodos.

Para llevar a cabo el presente estudio se siguieron los lineamientos establecidos por las normas mexicanas NMX-SAA-14040-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008; así como a las recomendaciones de la Guía General Europea para Análisis del Ciclo de Vida y de la Iniciativa de Ciclo de Vida UNEP/SETAC.

El cálculo de los potenciales impactos de vida fueron realizados a través del software para análisis de ciclo de vida GaBi® versión 4.0 mediante el apoyo y la asesoría brindada por el departamento de Evaluación Cuantitativa de la Sustentabilidad (QSA) de la Universidad Tecnológica de Dinamarca (DTU). La mayoría de los datos de ciclo de vida de los procesos secundarios del sistema se tomaron de la base de datos ECOINVENT; en tanto que para evaluación de impactos fue seleccionada la metodología de análisis de impacto de ciclo de vida IMPACT 2002+ versión 2.1. Cabe mencionar que tanto la base de datos ECOINVENT como la metodología IMPACT 2002+ vienen precargadas dentro del software GaBi®.

Las catorce categorías de impacto examinadas por la metodología IMPACT 2002+, y que fueron consideradas para el presente estudio son:

- Toxicidad humana (carinogénicos)
- Toxicidad humana (no carinogénicos)
- Efectos respiratorios
- Radiación ionizante
- Agotamiento de la capa de ozono
- Oxidación fotoquímica
- Eco-toxicidad acuática
- Eco-toxicidad terrestre
- Acidificación acuática
- Eutrofización acuática
- Acidificación terrestre
- Ocupación del suelo
- Calentamiento global
- Energía no renovable
- Extracción mineral

Audiencia objetivo.

Ese documento está dirigido a los integrantes de las empresas e instituciones educativas que participan en el proyecto MINANO, de manera especial a la empresa S.A.P.S.A. quien es la responsable del desarrollo y manufactura del producto objeto del presente estudio. Por lo anterior, los resultados del ACV serán publicados de forma interna, tanto en medios impresos como electrónicos, exclusivamente para los participantes del proyecto MINANO.

Definición del alcance.***Función.***

Adicionar protección en contra de los rayos ultravioleta (UV) y al interperismo para la fabricación de 20 kg de pellets de polipropileno.

Unidad funcional

El rango de protección en los parámetros mencionados dependerá de las especificaciones de los clientes, en base a las cuales se realizará la evaluación del desempeño del aditivo por medio de las pruebas mecánicas (resistencia a la tracción, alargamiento a la rotura y absorbancia) y colorimétricas correspondientes. A modo de referencia se tiene el desempeño del aditivo plástico Tinuvin 326, absorbente de rayos UV benzotriazole, que tiene su mayor absorbancia en la entre los 300-400 nm, y la mínima en el rango visible del espectro (>400 nm). Este material tiene dos picos máximos de absorción a los 312 y 352 nm. ($\epsilon = 15600 \text{ l/mol}\cdot\text{cm}$) en una solución de cloroformo. En forma general se puede decir que la función es brindar a la matriz de polipropileno empleada una absorbancia similar a la que proporcionaría el aditivo Tinuvin 326.

Flujo de referencia.

1 kg de aditivo polimérico funcionalizado con nanopartículas de Óxido de Zinc.

Limites del sistema

El esquema general del sistema considerado para la realización del presente estudio se observa en la Figura, la síntesis del aditivo fue dividida en cinco fases: mezclado, lavado, centrifugado, capping y masterbatch. Las primeras cuatro fases comprenden la síntesis de NPs de ZnO; la etapa de masterbatch es básicamente la adición de dichas nanopartículas y otros aditivos a una matriz de polipropileno lo que da por resultado un aditivo funcionalizado con nanopartículas de ZnO.

El Inventario del análisis de ciclo de vida incluyó la colección de la cantidad de los aditivos, otros insumos, el transporte y la energía empleados en cada sub-etapa del proceso de síntesis. Con la intención de simplificar el estudio y por cuestiones de confidencialidad no fueron considerados aspectos relacionados al uso del equipo o tecnologías, ni a la ocupación de las instalaciones de la planta piloto durante la fabricación del aditivo por S.A.P.S.A. Para la modelación de los procesos secundarios, es decir relativos a la fabricación de las materias primas y al transporte se tomaron de referencia los inventarios de la base de datos ECOINVENT. La empresa tiene a su cargo, además del proceso de manufactura del aditivo, la extracción de la solución de $ZnSO_4$ y el procesamiento de agua de alta calidad la cual obtiene por medio de una planta de tratamiento de aguas residuales donde se procesan el 10 % de las aguas residuales de la ciudad de Torreón, Coahuila. Para estos tres procesos se hicieron modificaciones con la finalidad de adaptarlos a las condiciones específicas del proceso.

En lo que respecta al rubro de energía se creó un modelo acorde a la mezcla energética mexicana con datos sobre las tecnología de la generación de energía eléctrica en México durante el año 20011, publicadas por la página del Sistema de Información Energética mexicana, dicho modelo se conectó a los consumos energéticos de la síntesis del aditivo, la extracción del $ZnSO_4$ y la planta de aguas, es decir a los procesos sobre los que S.A.P.S.A. tiene directa injerencia. Los datos relativos a las emisiones “al agua” del proceso fueron consideradas solo lo que respecta a cantidad ya que no se tuvieron datos disponibles sobre la caracterización de dichas emisiones. Para la modelación de los procesos que están fuera del control de la compañía, como el del Hidróxido de Sodio (NaOH), los aditivos, el homopolímero y el transporte se tomaron de referencia los procesos de la base de ECOINVENT.

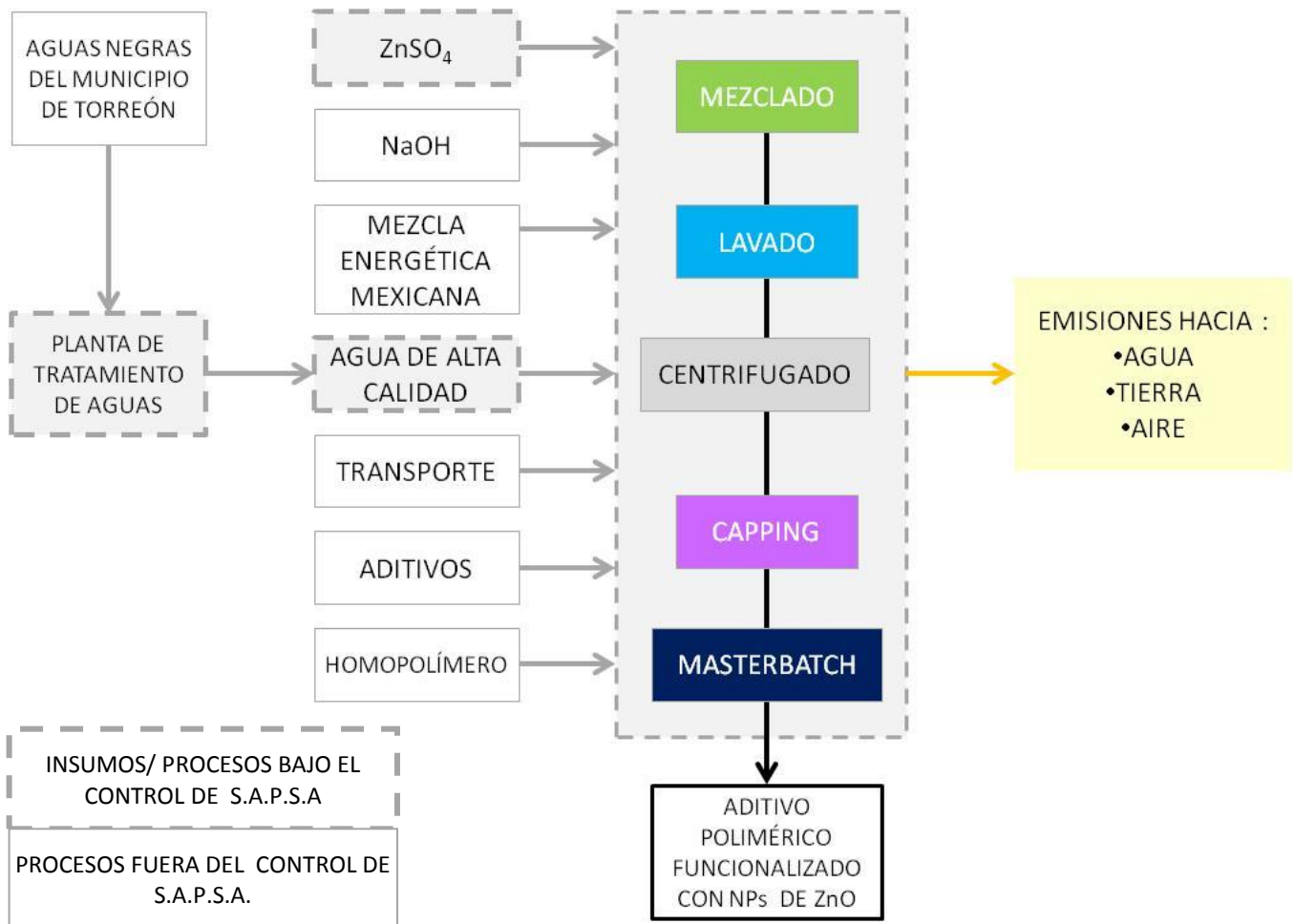


Figure 11. Límites del sistema.

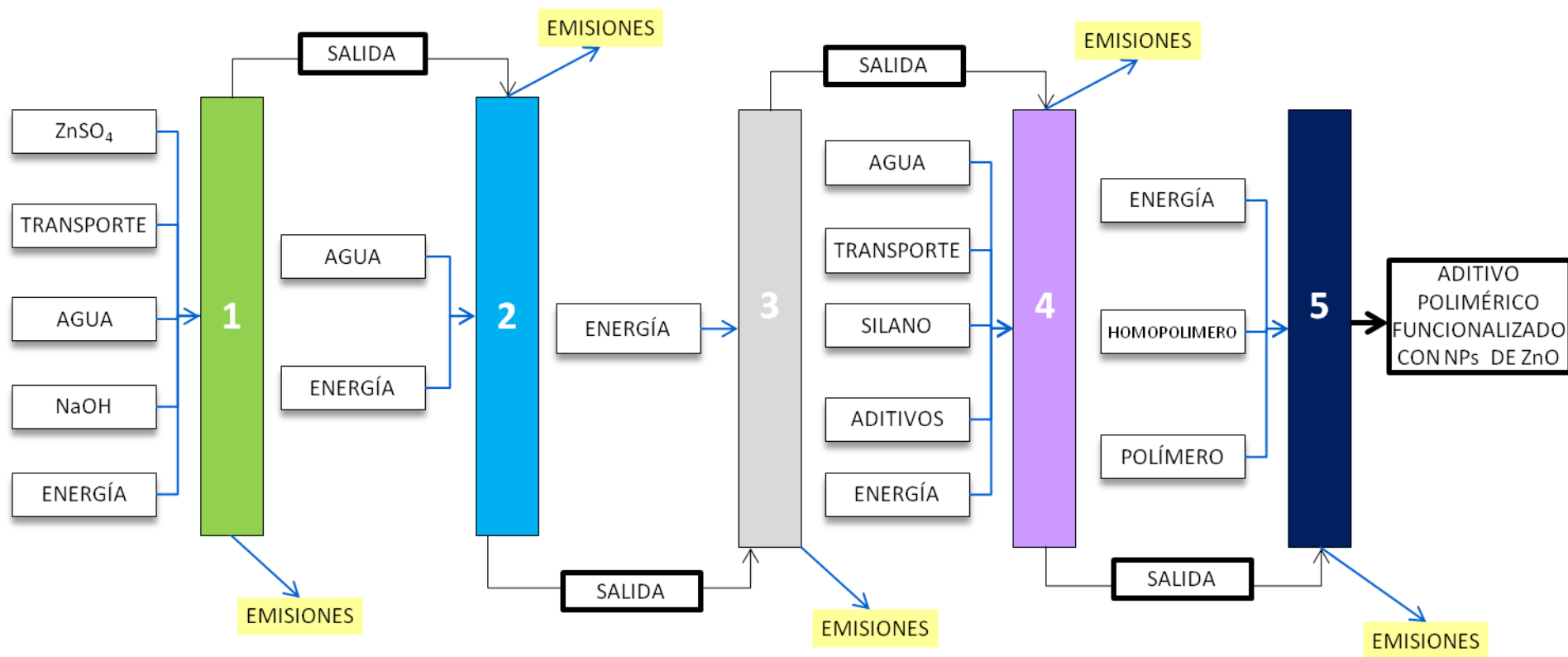


Figure 12. Esquema general de las etapas, flujos de entrada y salida considerados dentro del sistema para el ACV.

Evaluación del impacto en el ciclo de vida (EICV)

Descripción de la metodología seleccionada para la EICV, indicadores de categoría y modelos de caracterización.

De entre los distintos metodologías cargadas dentro del software GaBi para la evaluación de los impactos ambientales de análisis de ciclo de vida, la metodología IMPACT 2002+ versión 2.1 fue seleccionada para llevar a cabo el cálculo de los impactos ambientales potenciales derivados de la producción del aditivo polimérico con nanopartículas de Óxido de Zinc objeto del presente estudio.

- ***Historia.*** La metodología IMPACT 2002+ fue desarrollada por el Instituto Federal Suizo de Tecnología- Lausanne (EPFL) en el Instituto de Ciencias Ambientales y Tecnología, sus desarrolladores son: Dr. David Pennington, Dr. Manuele Margni, Dr. Ralph Rosenbaum, Christoph Ammann, Thierry Pelichet, Dr. Jerome Payet, Dr. Pierre Crettaz, Dr. Raphael Charles and Prof. Olivier Jolliet. El desarrollo actual del modelo es llevado por la Universidad de Michigan en Estados Unidos bajo supervisión del doctor Olivier Jolliet y el CIRAIIG en Montreal, Canadá bajo la coordinación de Manuel Margini. Otros colaboradores actuales del proyecto son Sébastien Humbert (Universidad de Berkeley California), Jérôme Payet (SETEMIP, Francia), Raphael Charles (Agroscope, Suiza) y Ralph Rosenbaum (DTU) y en interacción con la compañía [Ecointesys-Life Cycle Systems](#), de EPFL. Sus desarrolladores son de los grupos de trabajo más activos internacionalmente en el desarrollo de modelos para la medición y evaluación de los impactos al medio ambiente y la salud humana de la gran cantidad de sustancias químicas existentes hoy en día.

Aspectos tomados en cuenta para la elección del método IMPACT 2002+:

- Método que permite la combinación del enfoque de puntos intermedios y del enfoque de daños, lo cual hace posible observar la relación de los resultados del ICV a través de catorce categorías de impacto intermedias (por ejemplo eutrofización acuática, energía no renovable, toxicidad humana, etc.) hacia cuatro categorías de impacto final: salud humana, calidad del ecosistema, agotamiento de recursos y cambio climático (Jolliet et al., 2003a).
- El enfoque combinado hace posible una amplia cobertura y seguimiento de los caminos de impacto ambiental, además es recomendado por la Iniciativa de Análisis de Ciclo de Vida SETAC/UNEP, la cual trabaja en el desarrollo de un marco integral, común y consistente para la implementación de ambos enfoques en la realización de ACVs (Jolliet et al., 2004).
- La metodología ha desarrollado los factores de caracterización para la evaluación de las categorías de Toxicidad Humana y Eco-toxicidad Terrestre y Acuática. Éstos fueron publicados bajo el nombre del modelo Impact (del inglés Evaluación de Impacto de Sustancias Químicas Tóxicas).
- Para el resto de las categorías de impacto consideradas, IMPACT 2002+ ha adaptado e integrado los factores de caracterización de metodologías previas a ella, como CML 2001, Eco-Indicador 99, IPCC y la Demanda Acumulativa de Energía, las cuales constituyen el estado de arte y son referencia internacional en la cuantificación de los efectos potenciales de las categorías de impacto para las cuales fueron adecuadas.
- Es una metodología continuamente actualizada.

Clasificación y caracterización (elemento obligatorio)

Esta sección representa los resultados del cálculo de los distintos indicadores obtenidos a través del software GaBi. Después de que los flujos elementales del ICV fueron asignados a las catorce categorías de impacto de punto intermedio contempladas por la metodología IMPACT 2002+ (clasificación), cada uno de ellos se multiplicó por los factores de caracterización correspondientes (caracterización). Lo anterior implicó la conversión de los resultados del ICV a unidades comunes y la suma de los resultados convertidos dentro de la misma categoría de impacto. Los resultados para las catorce categorías de impacto por etapa de síntesis del aditivo polimérico con NPs de ZnO se muestran en las siguientes tablas.

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADES	TOTAL	MEZCLADO						
		GENERAL	ZnSO ₄	NaOH	ENERGÍA (1)	AGUA (1)	TRANSPORTE (1)	SINTESIS	TOTAL
Acidificación acuática	kg SO ₂ -Eq. al aire	2.83E-02	1.50E-02	2.48E-03	1.41E-03	1.58E-04	4.23E-05	0.00E+00	1.91E-02
Ecotoxicidad acuática	kg TEG-Eq. al agua	3.33E+03	2.24E+03	1.17E+01	1.01E+02	4.69E+02	1.49E+01	0.00E+00	2.84E+03
Eutrofización acuática	kg PO ₄ -Eq. al agua	4.71E-04	8.06E-05	2.76E-06	1.71E-06	9.27E-05	5.78E-07	0.00E+00	1.78E-04
Carcinogénicos	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire	5.96E-02	5.68E-02	7.66E-07	1.46E-04	1.95E-03	2.72E-05	0.00E+00	5.89E-02
Calentamiento global	kg CO ₂ -Eq. al aire	5.12E+00	1.19E+00	4.28E-01	4.18E-01	4.44E-02	4.09E-02	0.00E+00	2.12E+00
Radiación ionizante	Bq C-14-Eq. al aire	1.20E+02	5.81E+01	0.00E+00	7.68E+00	4.13E+00	2.29E+00	0.00E+00	7.22E+01
Ocupación del terreno	m ² *yr-Eq.	3.75E-06	3.16E-06	0.00E+00	8.30E-08	3.64E-08	3.27E-08	0.00E+00	3.31E-06
Extacción de minerales	MJ surplus	1.34E+00	1.27E+00	1.16E-04	4.78E-03	2.83E-02	1.66E-03	0.00E+00	1.30E+00
No carcinogénicos	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire	4.84E-01	4.57E-01	4.79E-05	1.09E-03	1.81E-02	4.24E-04	0.00E+00	4.77E-01
Energía no renovable	MJ	1.14E+02	1.50E+01	4.41E+00	6.28E+00	4.96E-01	6.65E-01	0.00E+00	2.68E+01
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11-Eq. al aire	3.00E-07	7.67E-08	0.00E+00	4.48E-08	1.25E-08	6.54E-09	0.00E+00	1.40E-07
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄ -Eq. al aire	2.65E-03	8.27E-04	9.36E-05	8.61E-05	8.91E-06	2.68E-05	0.00E+00	1.04E-03
Efectos respiratorios	PM 2.5-Eq. al aire	5.92E-03	3.15E-03	3.73E-04	2.78E-04	4.39E-05	5.56E-05	0.00E+00	3.90E-03
Acidificación terrestre	kg SO ₂ -Eq. al aire	1.34E-01	7.06E-02	7.59E-03	6.13E-03	9.73E-04	1.73E-03	0.00E+00	8.70E-02
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG-Eq. al suelo	1.21E+03	1.19E+03	2.35E-01	6.29E-01	1.55E+01	7.74E-01	0.00E+00	1.21E+03

Table 18. Resultados de caracterización para las categorías de impacto de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+ para la etapa de mezclado.

		GENERAL	SILANO	ADITIVOS	ENERGÍA (4)	AGUA (4)	TRANSPORTE (4)	SINTESIS	TOTAL
Acidificación acuática	kg SO ₂ -Eq. al aire	2.83E-02	7.37E-05	3.74E-04	2.73E-04	5.12E-07	1.10E-06	0.00E+00	7.23E-04
Ecotoxicidad acuática	kg TEG-Eq. al agua	3.33E+03	6.70E+00	1.73E+02	1.96E+01	1.52E+00	3.87E-01	0.00E+00	2.01E+02
Eutrofización acuática	kg PO ₄ -Eq. al agua	4.71E-04	3.56E-07	6.41E-06	3.31E-07	3.00E-07	1.50E-08	0.00E+00	7.41E-06
Carcinogénicos	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire	5.96E-02	1.66E-05	1.44E-04	2.83E-05	6.32E-06	7.06E-07	0.00E+00	1.96E-04
Calentamiento global	kg CO ₂ -Eq. al aire	5.12E+00	1.03E-01	1.54E-01	8.11E-02	1.44E-04	1.06E-03	0.00E+00	3.40E-01
Radiación ionizante	Bq C-14-Eq. al aire	1.20E+02	1.21E+01	5.92E+00	1.49E+00	1.33E-02	5.93E-02	0.00E+00	1.96E+01
Ocupación del terreno	m ² *yr-Eq.	3.75E-06	3.02E-08	3.89E-08	1.61E-08	1.18E-10	8.47E-10	0.00E+00	8.62E-08
Extacción de minerales	MJ surplus	1.34E+00	1.17E-03	1.65E-02	9.27E-04	9.17E-05	4.30E-05	0.00E+00	1.87E-02
No carcinogénicos	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire	4.84E-01	1.10E-04	1.56E-03	2.11E-04	5.85E-05	1.10E-05	0.00E+00	1.96E-03
Energía no renovable	MJ	1.14E+02	1.56E+00	5.58E+00	1.22E+00	1.61E-03	1.72E-02	0.00E+00	8.38E+00
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11-Eq. al aire	3.00E-07	1.43E-08	1.36E-08	8.68E-09	4.04E-11	1.70E-10	0.00E+00	3.68E-08
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄ -Eq. al aire	2.65E-03	2.89E-05	1.48E-04	1.67E-05	2.88E-08	6.94E-07	0.00E+00	1.94E-04
Efectos respiratorios	PM 2.5-Eq. al aire	5.92E-03	3.83E-05	1.01E-04	5.39E-05	1.42E-07	1.44E-06	0.00E+00	1.94E-04
Acidificación terrestre	kg SO ₂ -Eq. al aire	1.34E-01	1.22E-03	2.08E-03	1.19E-03	3.15E-06	4.48E-05	0.00E+00	4.54E-03
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG-Eq. al suelo	1.21E+03	8.09E-02	1.28E+00	1.22E-01	5.02E-02	2.01E-02	0.00E+00	1.56E+00

Table 21. Resultados de caracterización para las categorías de impacto de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+ para la etapa de capping.

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADES	TOTAL	MASTERBATCH	MASTERBATCH	MASTERBATCH	MASTERBATCH
		GENERAL	ENERGÍA (5)	TRANSPORTE (5)	SINTESIS	TOTAL
Acidificación acuática	kg SO ₂ -Eq. al aire	2.83E-02	5.74E-03	1.43E-03	2.64E-04	7.43E-03
Ecotoxicidad acuática	kg TEG-Eq. al agua	3.33E+03	1.70E+00	1.02E+02	9.33E+01	1.97E+02
Eutrofización acuática	kg PO ₄ -Eq. al agua	4.71E-04	2.76E-04	1.73E-06	3.61E-06	2.82E-04
Carcinogénicos	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire	5.96E-02	3.27E-07	1.48E-04	1.70E-04	3.18E-04
Calentamiento global	kg CO ₂ -Eq. al aire	5.12E+00	1.65E+00	4.24E-01	2.56E-01	2.33E+00
Radiación ionizante	Bq C-14-Eq. al aire	1.20E+02	0.00E+00	7.78E+00	1.43E+01	2.21E+01
Ocupación del terreno	m ² *yr-Eq.	3.75E-06	0.00E+00	8.41E-08	2.04E-07	2.88E-07
Extacción de minerales	MJ surplus	1.34E+00	1.20E-04	4.84E-03	1.04E-02	1.53E-02
No carcinogénicos	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire	4.84E-01	1.70E-05	1.10E-03	2.65E-03	3.77E-03
Energía no renovable	MJ	1.14E+02	6.33E+01	6.36E+00	4.16E+00	7.38E+01
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11-Eq. al aire	3.00E-07	0.00E+00	4.53E-08	4.09E-08	8.62E-08
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄ -Eq. al aire	2.65E-03	1.09E-03	8.72E-05	1.67E-04	1.35E-03
Efectos respiratorios	PM 2.5-Eq. al aire	5.92E-03	9.72E-04	2.81E-04	3.47E-04	1.60E-03
Acidificación terrestre	kg SO ₂ -Eq. al aire	1.34E-01	2.04E-02	6.21E-03	1.08E-02	3.75E-02
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG-Eq. al suelo	1.21E+03	1.16E-02	6.37E-01	4.84E+00	5.49E+00

Table 22. Resultados de caracterización para las categorías de impacto de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+ para la etapa de masterbatch.

La Figura 11 es otra forma de representar los resultados obtenidos de las fases de clasificación y caracterización. Es importante mencionar que se normalizó al 100% el valor máximo de la etapa de síntesis en cada una de las categorías de impacto intermedio consideradas, lo anterior con la intención de presentar los resultados dentro de una misma gráfica. Debido a lo anterior la gráfica muestra el impacto relativo por etapa de síntesis para cada una de las catorce categorías de punto intermedio evaluadas por el método IMPACT 2002+. Se observa que la mayor carga ambiental para las catorce categorías de impacto es generada por las etapas de mezclado, lavado y capping. La etapa de mezclado fue la más significativa para once de las categorías consideradas: acidificación acuática, eco-toxicidad terrestre, carcinogénicos, radiación ionizante, ocupación del terreno, extracción de minerales, no carcinogénicos, agotamiento de la capa de ozono, efectos respiratorios, acidificación terrestre y eco-toxicidad terrestre.

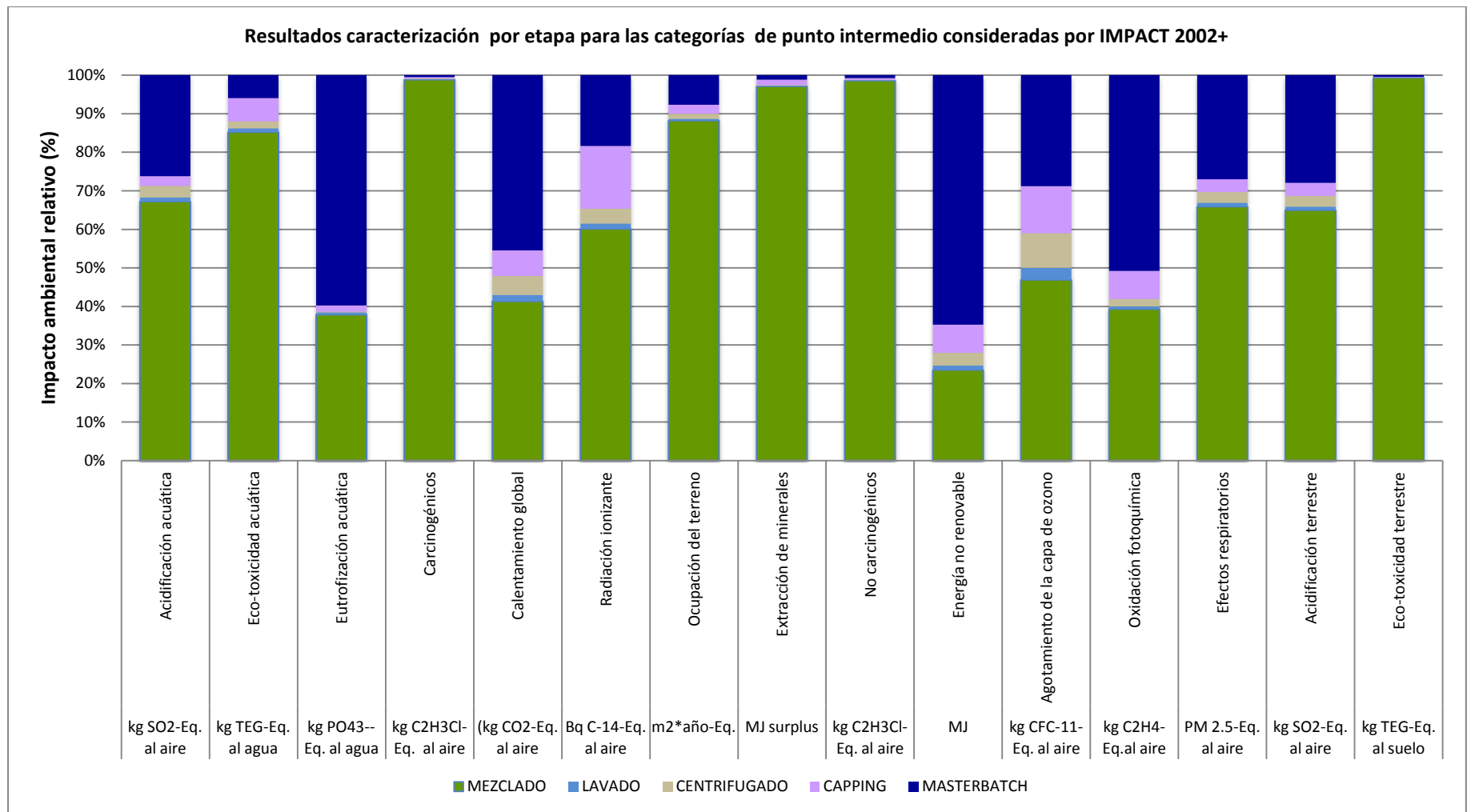


Figura 13. Resultados caracterización por etapa para las categorías de punto intermedio consideradas por IMPACT 2002+.

Normalización de los resultados a daño final (elemento opcional).

Siguiendo las recomendaciones de la norma (ISO 14044_2006, 2007) se procedió a la normalización de los resultados, que si bien es opcional bajo dicha normatividad, es un elemento de gran utilidad y soporte para la interpretación de los resultados.

Se determinó realizar la normalización de los resultados hasta el nivel de daño ya que es la sugerencia de los autores de la metodología IMPACT 2002+. Este enfoque, el impacto de las categorías de punto intermedio, a excepción de eutrofización y acidificación acuática, se traslada al daño final ocasionado sobre cuatro áreas de protección final: calidad del ecosistema, cambio climático, agotamiento de recursos y salud humana.

La normalización permite tener unidades comunes para los resultados de las diferentes categorías de punto final lo que posibilita mostrar una misma gráfica y hacer comparaciones entre categorías que tengan el mismo efecto o daño final. En la siguiente tabla se muestra la relación entre las categorías de punto intermedio y punto final en la metodología IMPACT 2002+.

CATEGORIA DE PUNTO INTERMEDIO	UNIDADES	CATEGORIA DE PUNTO FINAL	UNIDADES	FACTOR DE NORMALIZACIÓN
Carcinogénicos Radiación ionizante No carcinogénicos Agotamiento de la capa de ozono Efectos respiratorios Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire Bq C-14-Eq. al aire kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire kg CFC ₋₁₁ -Eq. al aire PM 2.5-Eq. al aire kg C ₂ H ₄ -Eq. al aire	Salud Humana	DALY	0.0071 DALY/punto
Eco-toxicidad acuática Ocupación del terreno Acidificación terrestre Eco-toxicidad terrestre	kg TEG-Eq. al agua m ² *año-Eq. kg SO ₂ -Eq. al aire kg TEG-Eq. al suelo	Calidad del ecosistema	PDF*m ² *año	13700 PDF*m ² *año/punto
Calentamiento global a 500 años	kg CO ₂ -Eq. al aire	Cambio Climático	Kg eq CO ₂	9950 Kg eq CO ₂ /punto
Extracción de minerales Energía no renovable	MJ surplus/ kg de Fe MJ/kg de petróleo	Recursos	MJ	152000 MJ/punto

Tabla 23. Relación entre las categorías de punto intermedio y punto final en la metodología IMPACT 2002+. Los factores de normalización corresponden a la versión 2.1 de la metodología para el Oeste de Europa.

La normalización es el cálculo de la magnitud de los resultados del indicador de categoría con respecto a cierta información de referencia. Proporciona, tanto para las categorías de impacto intermedio como de punto final, el impacto relativo del sistema objeto de estudio en relación al impacto total per cápita de una región geográfica específica. En el caso de la metodología IMPACT 2002+ se tienen como referencia de normalización el daño total anual debido a las emisiones y extracciones en Europa divididas entre el total de la población europea.

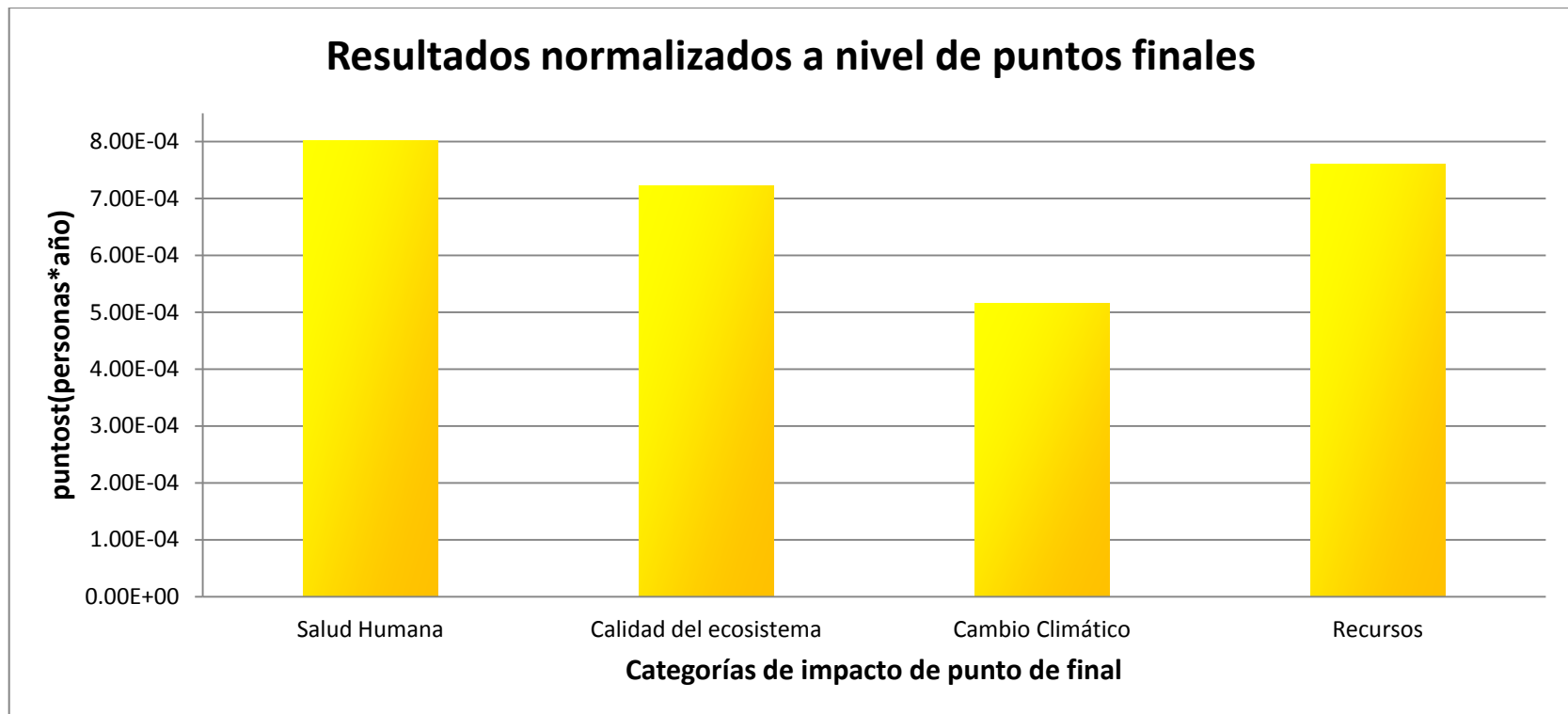


Figura 14. Resultados de la normalización a nivel de categoría de punto final en puntos (personas equivalentes*año).

La Figura 12 indica que los efectos de la producción de 1 kg aditivo polimérico con nanopartículas de ZnO para cada una de las categorías de daño final. Se observa que el impacto en orden descendente está dado por la categoría de salud humana, agotamiento de recursos y calidad del ecosistema, las tres categorías tienen un impacto superior al de $7E-4$ personas europeas durante un año. La categoría de cambio climático registra el menor efecto superando apenas los $5E-04$ puntos.

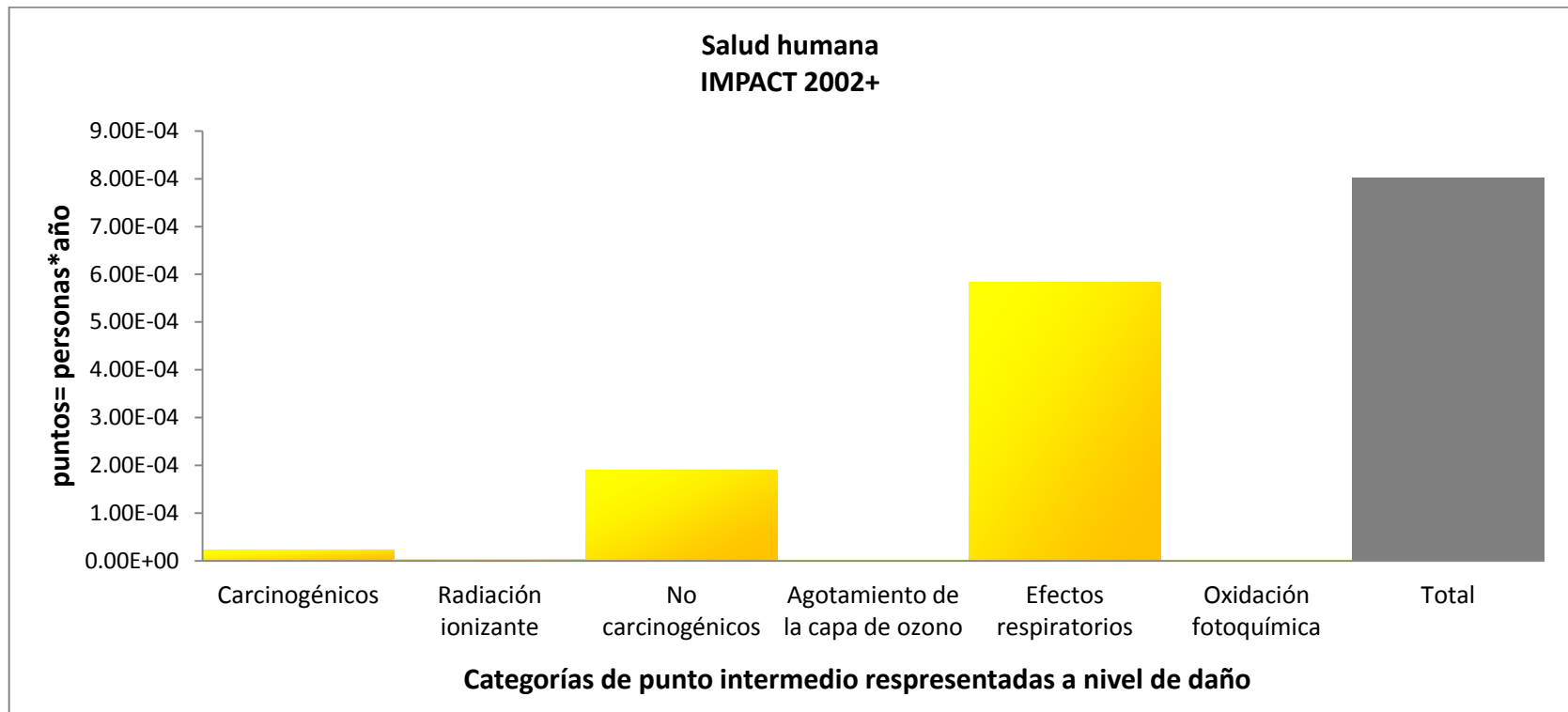


Figure 15. Categorías de punto intermedio normalizadas a daño final para el área de protección salud humana.

La Figura 13 muestra que el impacto a la categoría de salud humana es equivalente a los años de vida potencialmente perdidos (DALY) promedio por $8.02E-4$ personas al año en Europa. En otras palabras se requerirían producir 1246.88 kg de aditivo para causar la pérdida potencial de 0.0071 años o 2.6 días de vida a una persona europea durante 1 año. La categoría de punto intermedio “efectos respiratorios” es la más significativa dentro del daño a la salud humana, seguida por la categoría de “no carcinogénicos”.

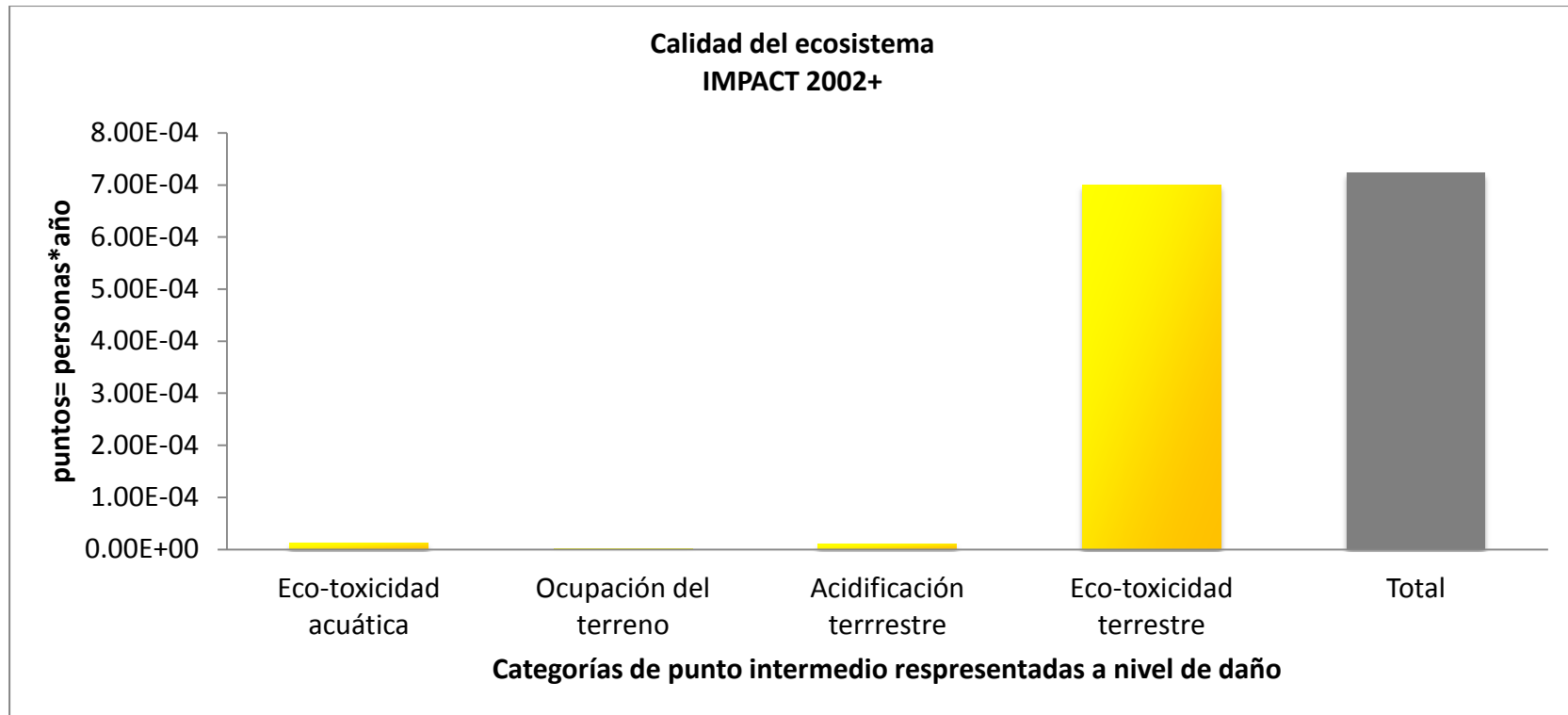


Figure 16. Categorías de punto intermedio normalizadas a daño final para el área de protección calidad del ecosistema.

Como se observa en la Figura 17, la categoría de daño a la calidad del ecosistema el impacto es equivalente al realizado por 7.23

E-04 personas en Europa traducido en un potencial de especies desaparecidas por m^2 por año. En otras palabras, serían necesario producir 1383.28 kg de aditivo para causar un impacto de una persona promedio en Europa durante un año en la calidad del ecosistema, el cual equivale a 13700 PDF* m^2 *año (fracción potencial de especies desaparecidas en un m^2 durante un año). El resultado total de la calidad del ecosistema se debe casi en un 100% a la aportación de la categoría de punto intermedio de eco-toxicidad terrestre.

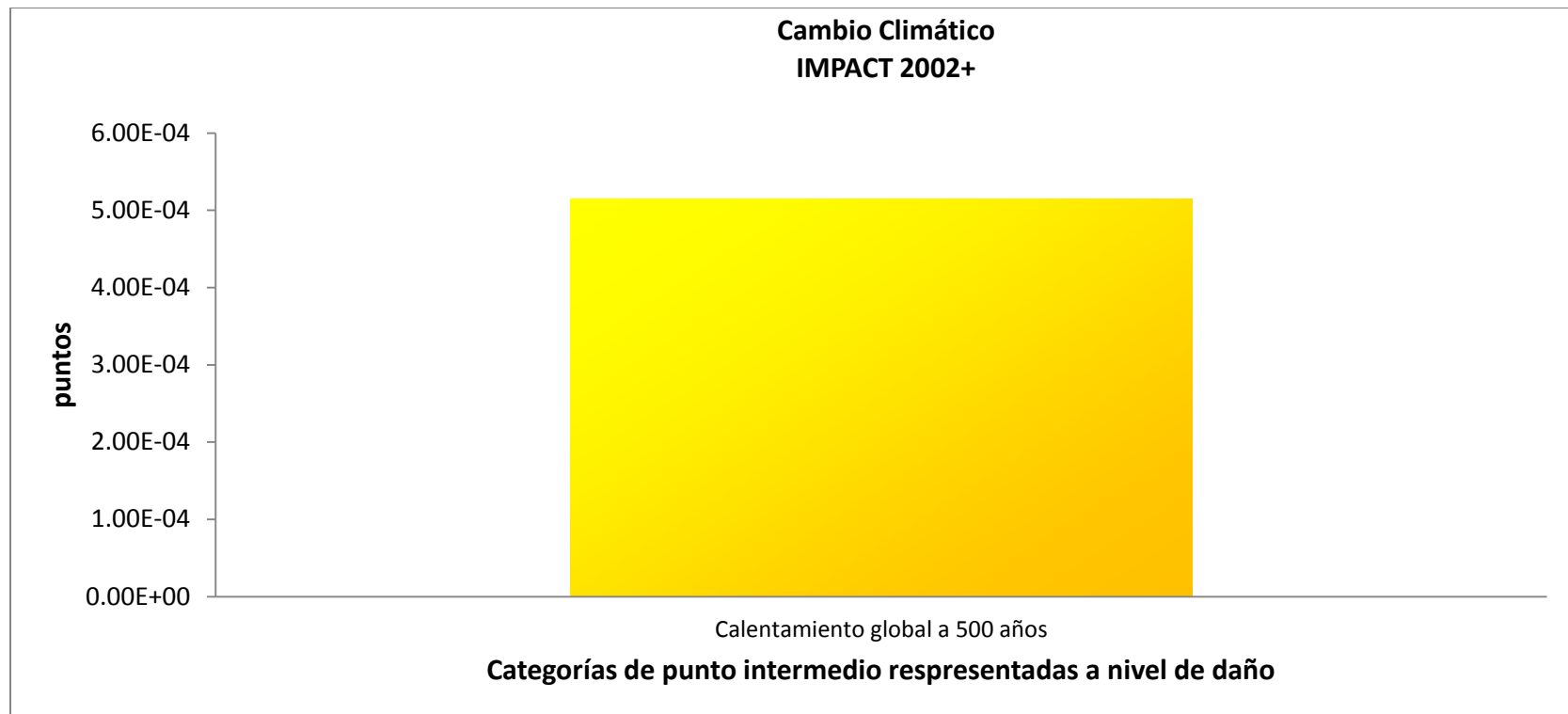


Figure 17 Categoría de punto intermedio normalizada a daño final para el área de protección cambio climático.

De la Figura 20 se analiza el resultado del impacto al cambio climático de la manufactura de un 1 kg de aditivo polimérico con NPs de ZnO. Dicho impacto corresponde al impacto ocasionado por 5.15E-4 personas durante un año en Europa. El resultado indica que serían necesarios 1941.75 kg del aditivo en cuestión para emitir 9950 kg de CO₂ equivalentes a la atmósfera, cantidad de CO₂ correspondiente a la generada por un Europeo a lo largo de un año.

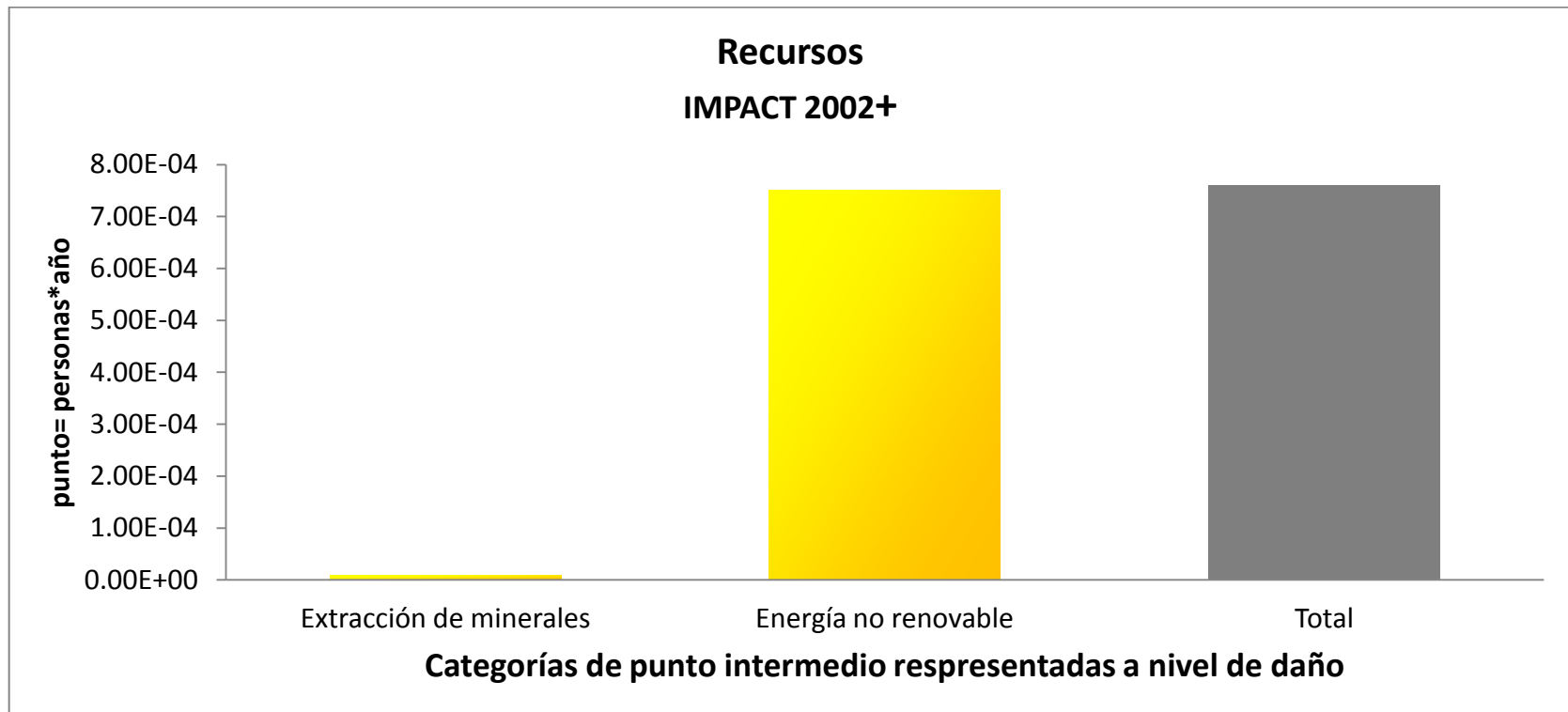


Figure 18. Categorías de punto intermedio normalizadas a daño final para el área de protección recursos.

La Figura 23 presenta el agotamiento de recursos ocasionados por la manufactura de la fabricación de 1 kg de aditivo polimérico de ZnO equivale al realizado anualmente por $7.51E+04$ europeos, o desde otro punto de vista, es necesario producir 1316.47 kg del aditivo para generar el impacto anual equivalente a un europeo en el agotamiento de los recursos. Se observa que casi el 100% de impacto ocasionado sobre el agotamiento de recursos se debe a la categoría de impacto de energía no renovable.

Interpretación del ciclo de vida

Durante esta etapa del ACV los resultados de las fases anteriores de ICV y EICV fueron considerados en conjunto conforme al objetivo y el alcance del estudio. Además, los datos y consideraciones implementados a lo largo del ACV se evaluaron en cuanto a exactitud, integridad y precisión. La fase de interpretación permitió responder a las preguntas planteadas en el inicio del ACV así como hacer conclusiones y recomendaciones. La descripción y resultados de las actividades realizadas para la interpretación de este estudio se exponen a continuación.

Identificación de aspectos significativos.

La identificación de los aspectos significativos se analizó en dos niveles. Primero empleando los resultados normalizados a nivel de daños para la identificación de las categorías de punto intermedio más relevante dentro de las cuatro categorías de daño final. Posteriormente, por medio de los resultados de caracterización, se rastrearon los procesos considerados dentro de los límites del sistema que mayor carga ambiental aportaron a las categorías de impacto identificadas como de mayor atención.

Con el fin de profundizar sobre las causas de los resultados normalizados a nivel de daño (salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos) se identificaron el origen de los impactos de las categorías de punto intermedio con mayor carga ambiental, lo anterior dividiendo los flujos de entrada en base al siguiente criterio: precursores (incluidos la solución de $ZnSO_4$, NaOH, silano, aditivo orgánico, homopolímero), el agua de proceso, la energía consumida, el trabajo realizado en la transportación de los precursores, así como las emisiones de cada una de las etapas de producción bajo el nombre de síntesis.

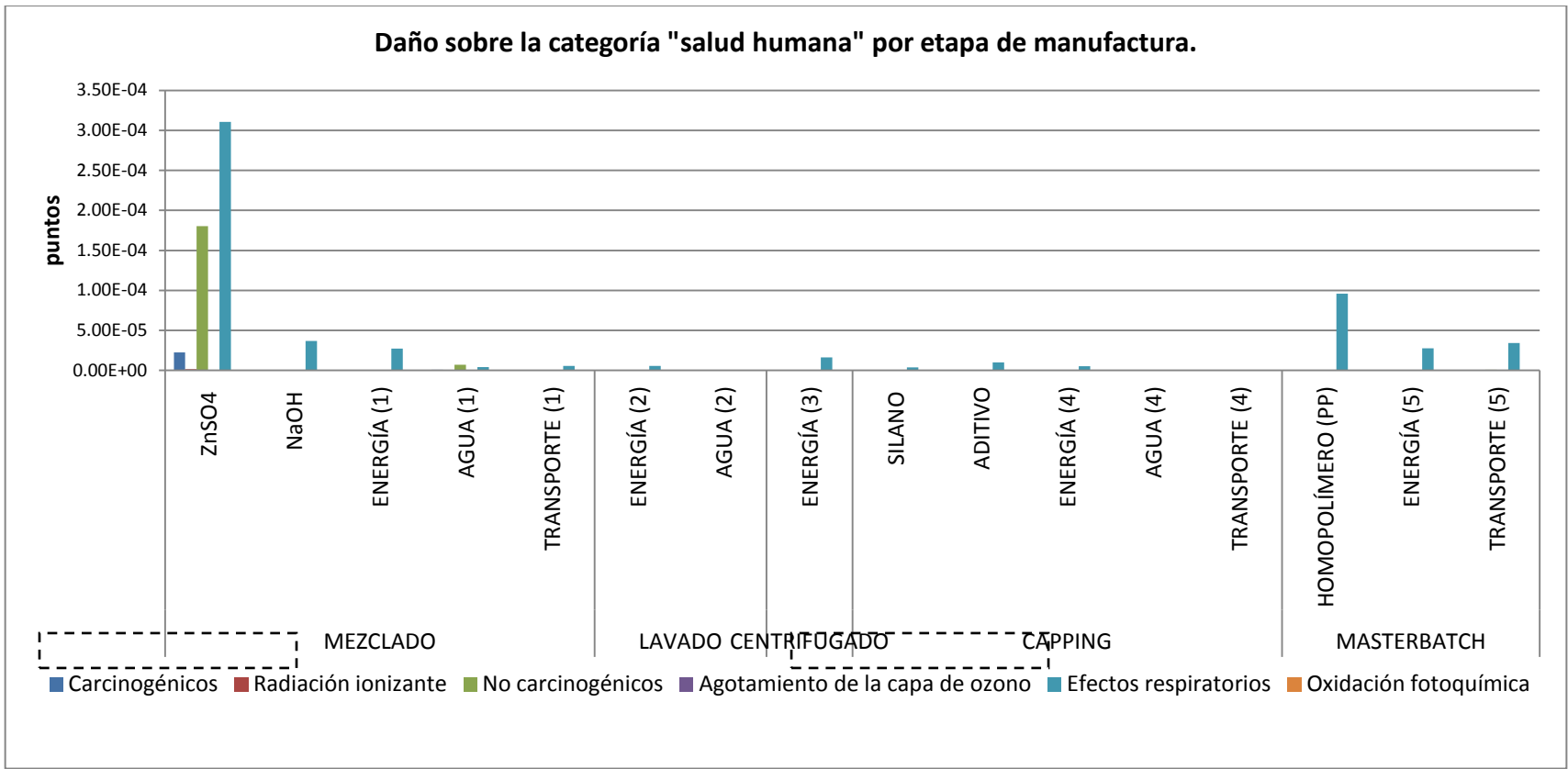
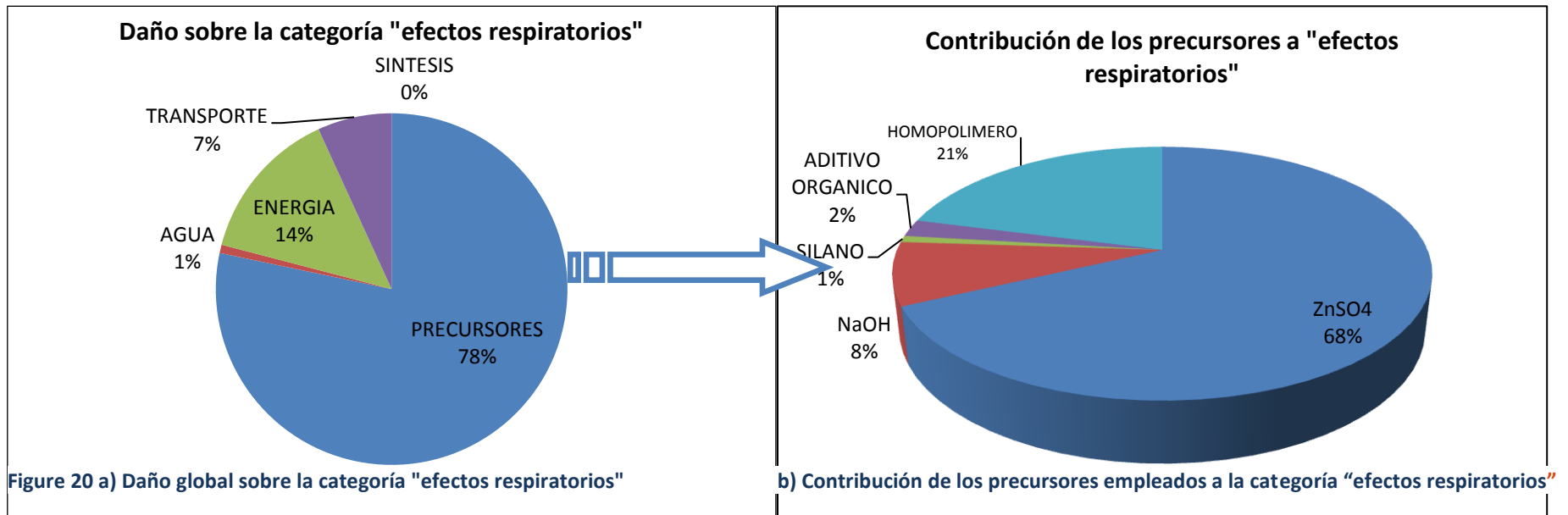


Figure 19. Resultados normalizados a nivel de daño sobre la categoría "salud humana" por etapa de manufactura.

La Figura 14 indica que las etapas de producción de un 1 kg de aditivo polimérico con nanopartículas de ZnO que más impactan al área de salud humana son la de mezclado y masterbatch. En la etapa de mezclado, la extracción de la solución de ZnSO₄ genera el mayor impacto tanto en la categoría de “efectos respiratorios”, como en la de “no carcinogénicos”. Mientras que la producción del homopolímero añadido en la fase de masterbatch es la segunda causa del impacto ocasionado en la categoría de “efectos respiratorios”.



La figura 15 (a) muestra que el origen del impacto de la categoría de efectos proviene en un 78 % por el uso de los precursores empleados y en un 14% derivado del consumo energético. El trabajo requerido en el transporte de los precursores sólo aporta el 7%. Dentro de esta categoría el consumo de agua de proceso añade el 1% de la carga ambiental a la categoría. En la Figura 15 (b) se observa a detalle la contribución de los precursores a la categoría de efectos respiratorios, dentro de la cual el proceso de extracción de la solución de ZnSO₄ (68%) es el más relevante seguido por el homopolímero (21%). El resto de los precursores empleados, NaOH, aditivo orgánico y silano, representan en conjunto el 11% del impacto global a la categoría. El efecto sobre esta categoría de los procesos citados se origina por las altas emisiones al aire de sustancias inorgánicas y polvos como material particulado PM 2.5, nitratos, sulfatos, SO₃, O₃, CO₂, NO_x y compuestos volátiles orgánicos (VOCs).

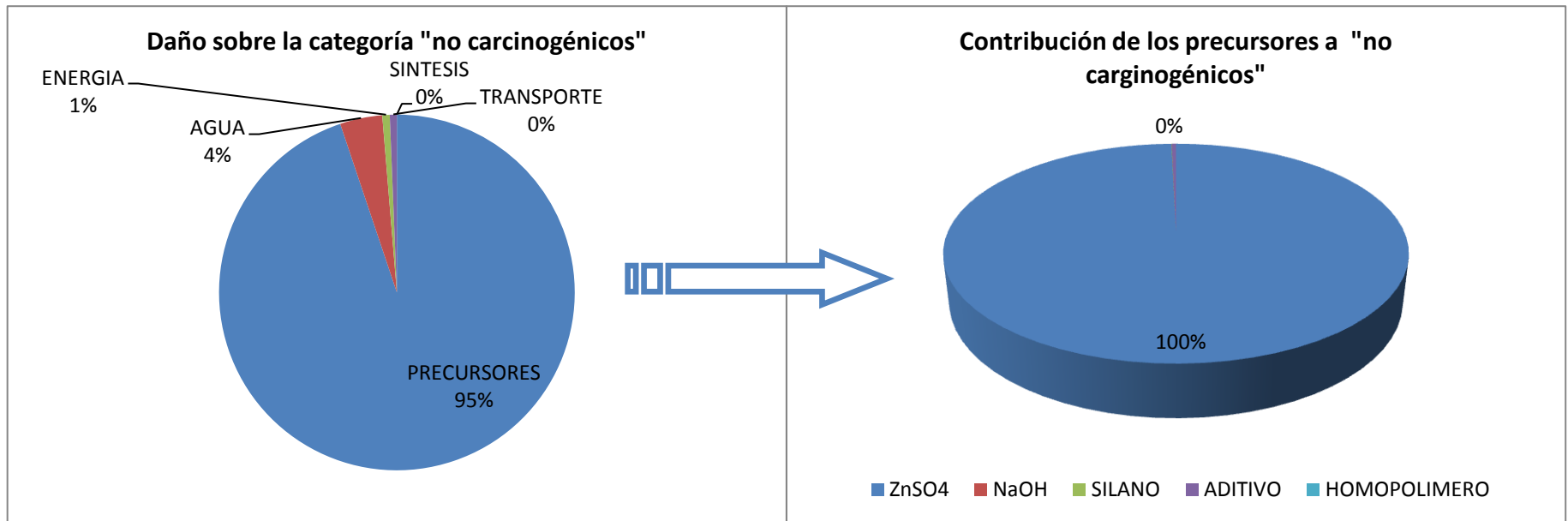


Figure 21 a) Daño global sobre la categoría "no carcinogénicos".

b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "no carcinogénicos".

En la Figura 16(a) se observa que los precursores empleados aportan el 95% del impacto ocasionado a la categoría de toxicidad humana "no carcinogénicos", mientras que el restante 5% de la contribución a la categoría se debe al consumo de agua de proceso (4%) y de energía eléctrica (1%). El transporte de los precursores no significó ningún impacto para esta categoría.

En la Figura 16 (b) se muestra que el único precursor que incide sobre la categoría "no carcinogénicos" es la extracción de la solución de ZnSO₄ empleada para la síntesis de NPs de ZnO, cuyo efecto sobre la salud humana se debe al uso de sustancias químicas tóxicas clasificadas como no carcinogénicas emitidas al aire, agua, suelo, dentro de las cuales se identificaron Aluminio, Antimonio, Amonio, Acetona, Arsénico +V, Arsano o hidruro de arsénico, ácido acrílico, acetonitrilo, acenaftileno y acenafteno.

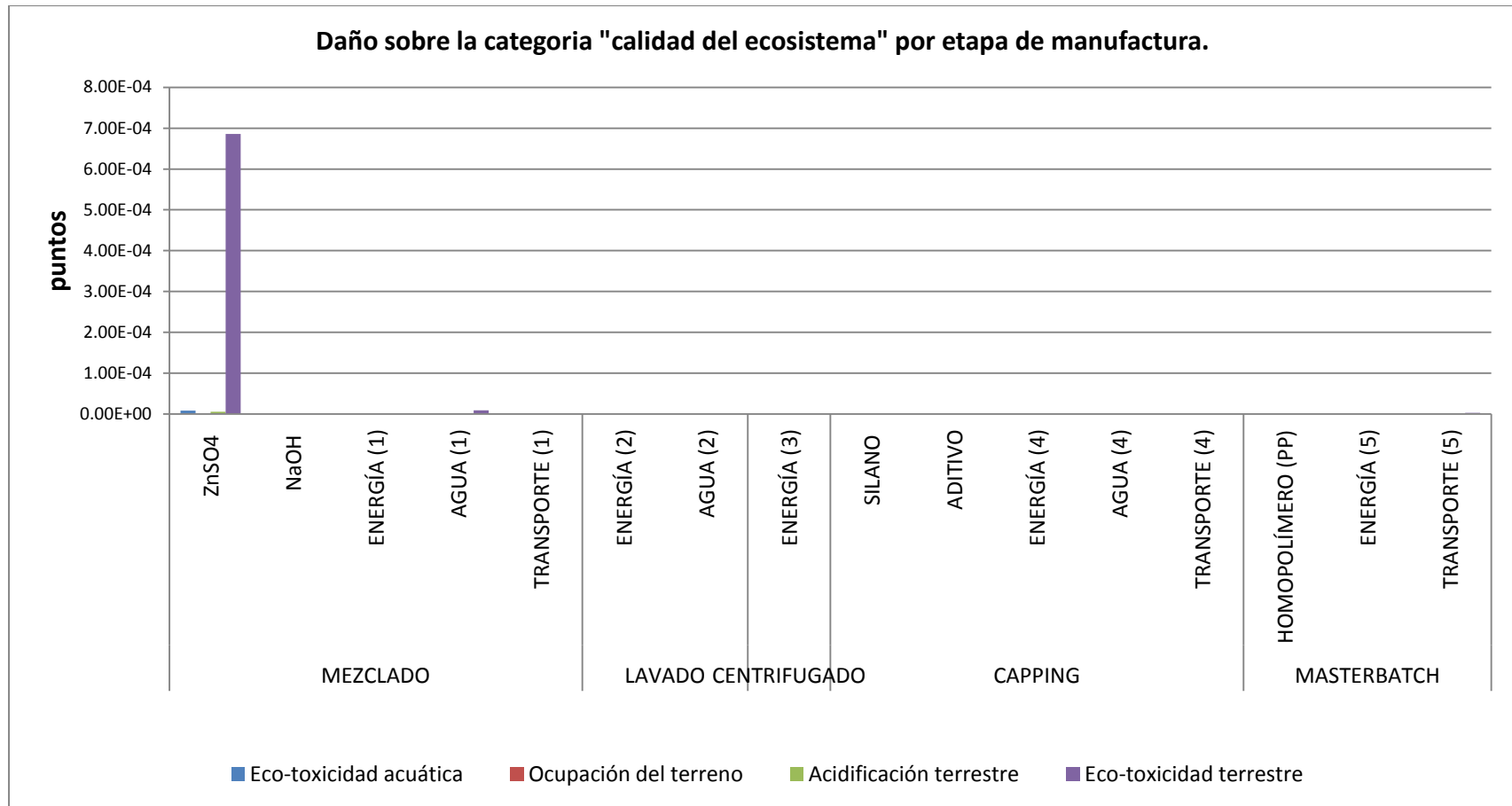


Figure 22 Resultados normalizados a nivel de daño sobre la categoría "calidad del ecosistema" por etapa de manufactura.

Para el área de protección de calidad del ecosistema la Figura 18 indica que el casi la totalidad del daño ocasionado por la producción de 1 kg de aditivo polimérico con NPs de ZnO incide sobre la categoría de “eco-toxicidad terrestre” y proviene del proceso de extracción de la solución de ZnSO₄ utilizada durante la fase de mezclado.

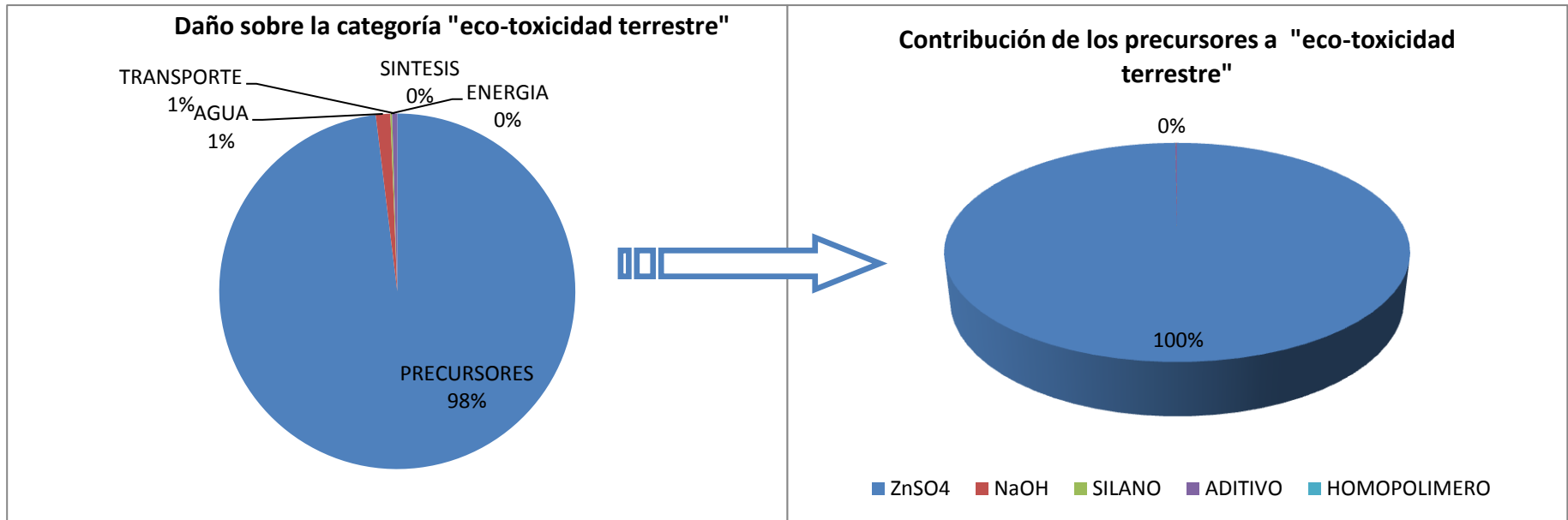


Figure 23 a) Daño global sobre la categoría "eco-toxicidad terrestre".

b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "eco-toxicidad terrestre".

En la sección (a) de la Figura 19 se aprecia que el 98% de la carga ambiental para la categoría de eco-toxicidad terrestre se debe al uso de los precursores (98%), el restante 2% es originado por el consumo de agua de proceso y por el trabajo realizado en la transportación de los precursores. Para la presente categoría los procesos relacionados a la generación y uso de la energía eléctrica no tienen incidencia sobre la categoría analizada.

En la Figura 19 (b) se muestra que el impacto a la categoría de eco-toxicidad terrestre se atribuye en un 100% a la obtención de la solución de ZnSO₄, esto se debe a las emisiones al agua, suelo y principalmente al aire de sustancias como níquel, cobre, mercurio, arsénico, zinc, tolueno, cadmio, fenol, benceno, cromo y diclorometano.

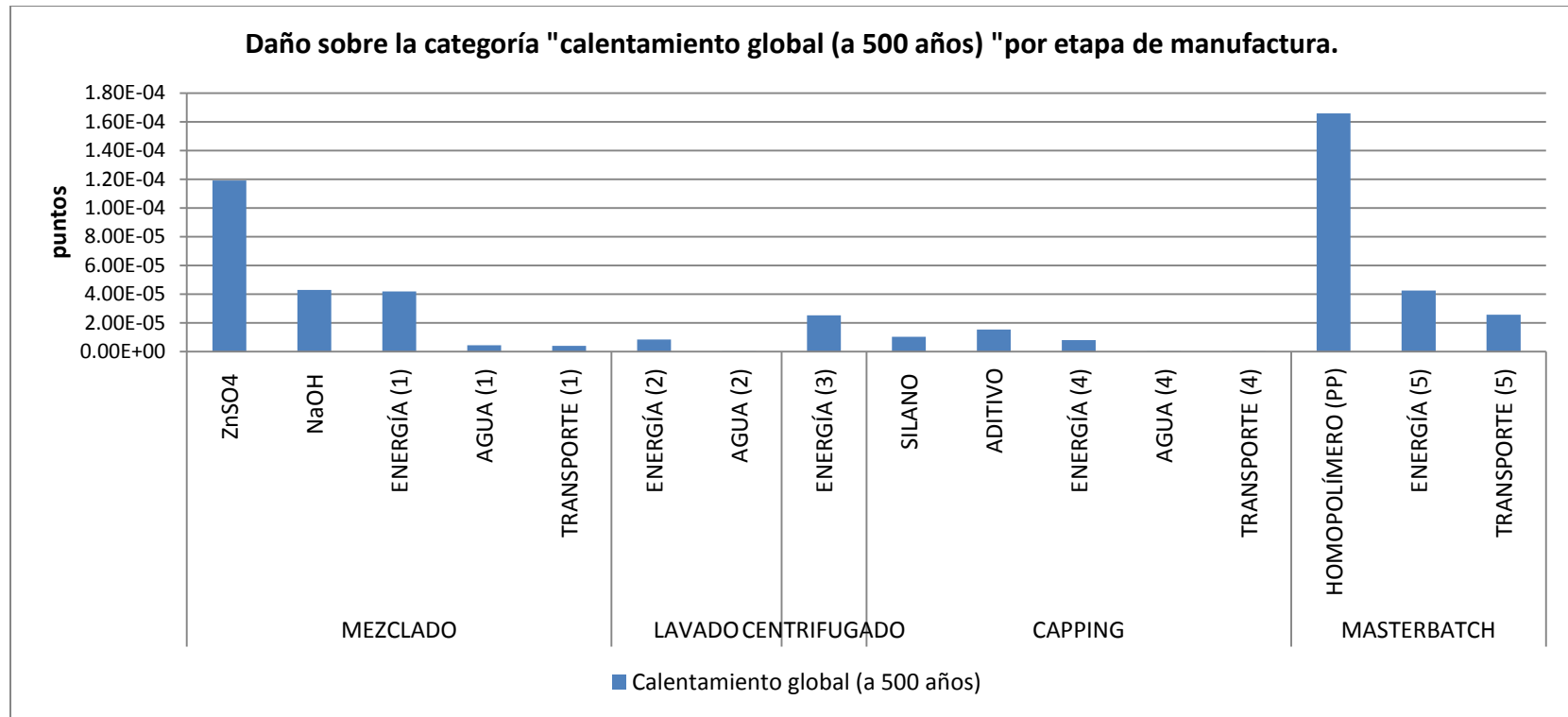


Figure 24. Resultados normalizados a nivel de daño sobre la categoría "calentamiento global" por etapa de manufactura.

La Figura 21 indica que la etapa de producción de un 1 kg de aditivo polimérico con nanopartículas de ZnO que más impacta al cambio climático es la masterbatch, dentro de cual el proceso de producción del homopolímero es el más relevante. Por debajo de la etapa de masterbatch, está el daño ocasionado la etapa de mezclado, en específico debido a la extracción de la solución de ZnSO₄. Puede observarse que el consumo energético y la fabricación de las sustancias químicas como el silano y el NaOH, así como el transporte de las materias primas empleadas a largo del sistema objeto de estudio tiene una aportación menor pero significativa al cambio climático.

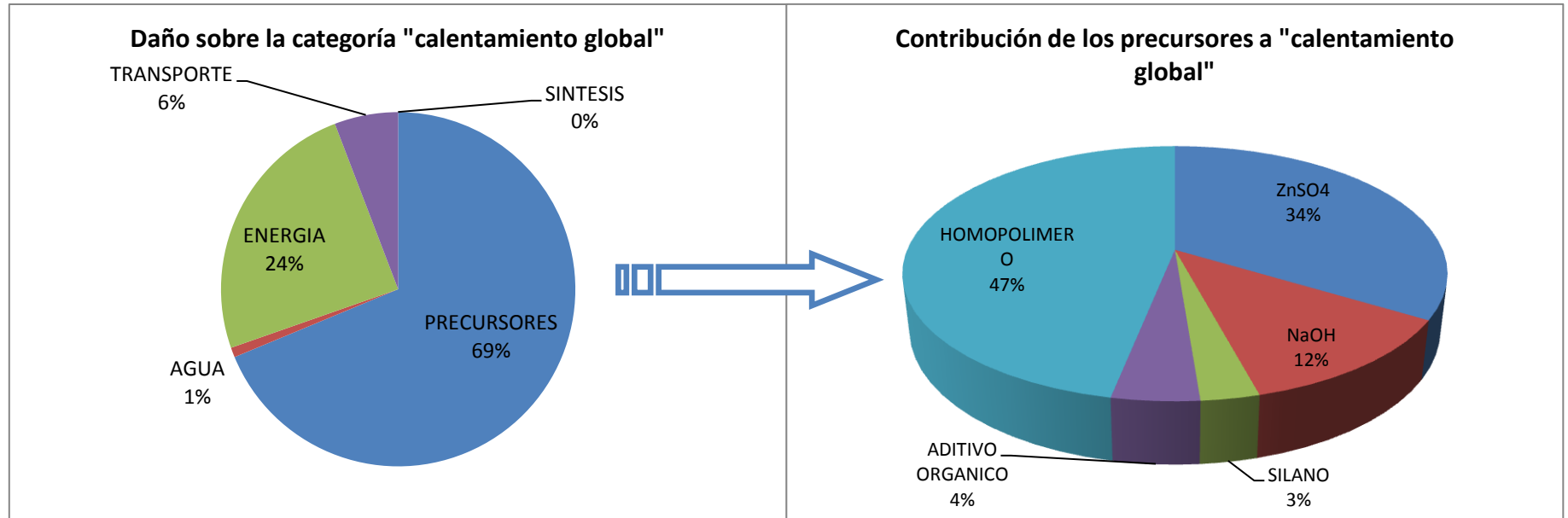


Figure 25 a) Daño global sobre la categoría "calentamiento global".

b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "calentamiento global".

De la Figura 22 (a) se observa que el impacto ocasionado sobre la categoría "calentamiento global" se debe a la producción de los precursores empleados (69%) y al consumo energético (24%) durante la manufactura de 1kg de aditivo polimérico de NPs de ZnO. El restante 1% es aportado por el tratamiento del agua de proceso empleada. La Figura 22 (b) indica como el impacto atribuido a los precursores se comparte más equitativamente entre las diferentes sustancias químicas empleadas, se muestra que entre el homopolímero (47%) y la extracción de la solución de ZnSO₄ (34%) se distribuye el daño sobre el de cambio climático, mientras que en tercera posición se ubica el NaOH (12%). La importancia sobre el cambio climático del consumo energético así como de la fabricación del homopolímero, la solución de ZnSO₄ y NaOH se explica por las emisiones al aire de distintos gases de efecto invernadero como el metano (CH₄), el dióxido de carbono (CO₂), el monóxido de carbono (CO) y el óxido nitroso (N₂O).

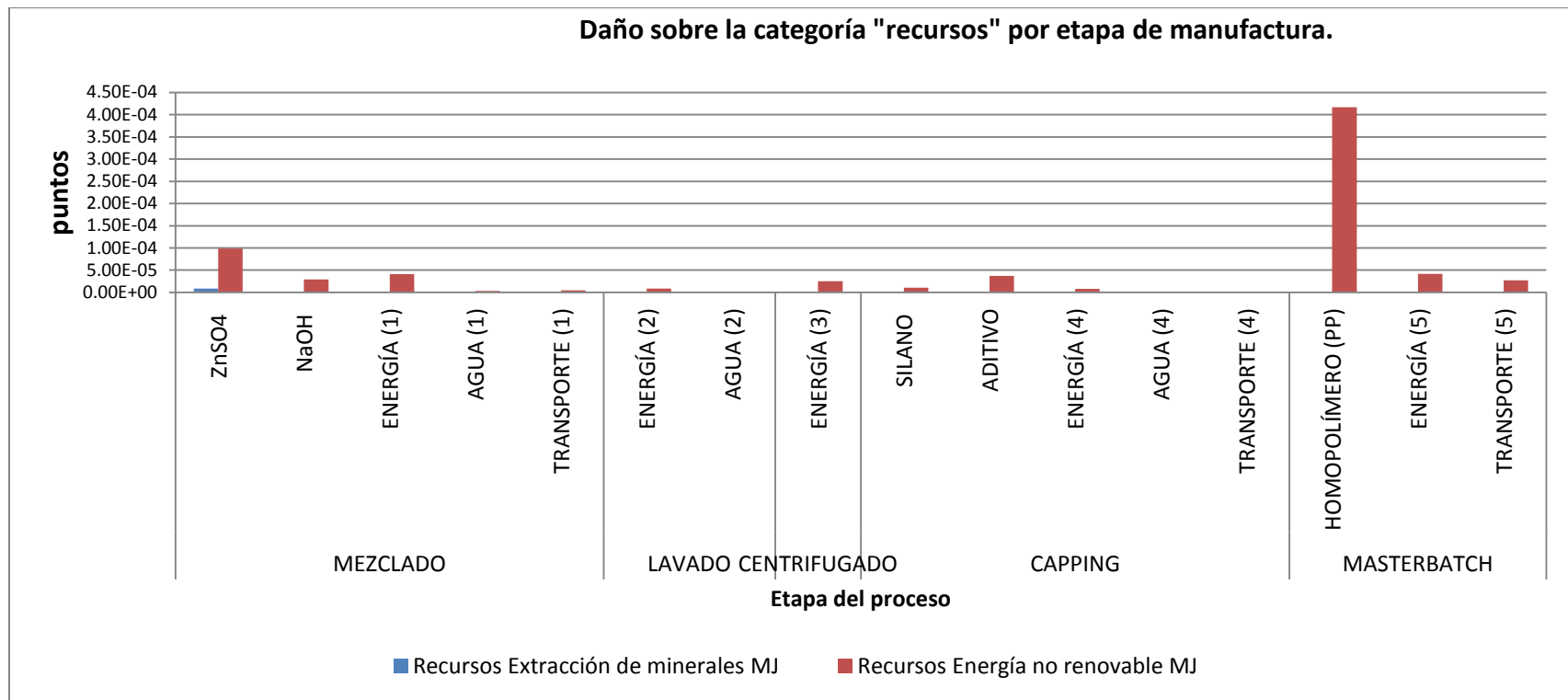


Figure 26 Resultados normalizados a nivel de daño sobre la categoría "recursos " por etapa de manufactura.

De la figura 24 se observa que los procesos de mayor carga ambiental para el agotamiento de los recursos (dentro de la categoría energía no renovabl), son en primer lugar la fabricación del homopolímero y en segundo, la extracción de la solución de $ZnSO_4$, sustancias empleados durante la etapa de masterbatch y mezclado respectivamente. Al igual que en la categoría de cambio climático se tiene que para el agotamiento de los recursos energéticos, el transporte de las materias primas y la producción de los precursores (ejemplo: NaOH, aditivo, etc.) aportan un impacto menor aunque significativo a la categoría.

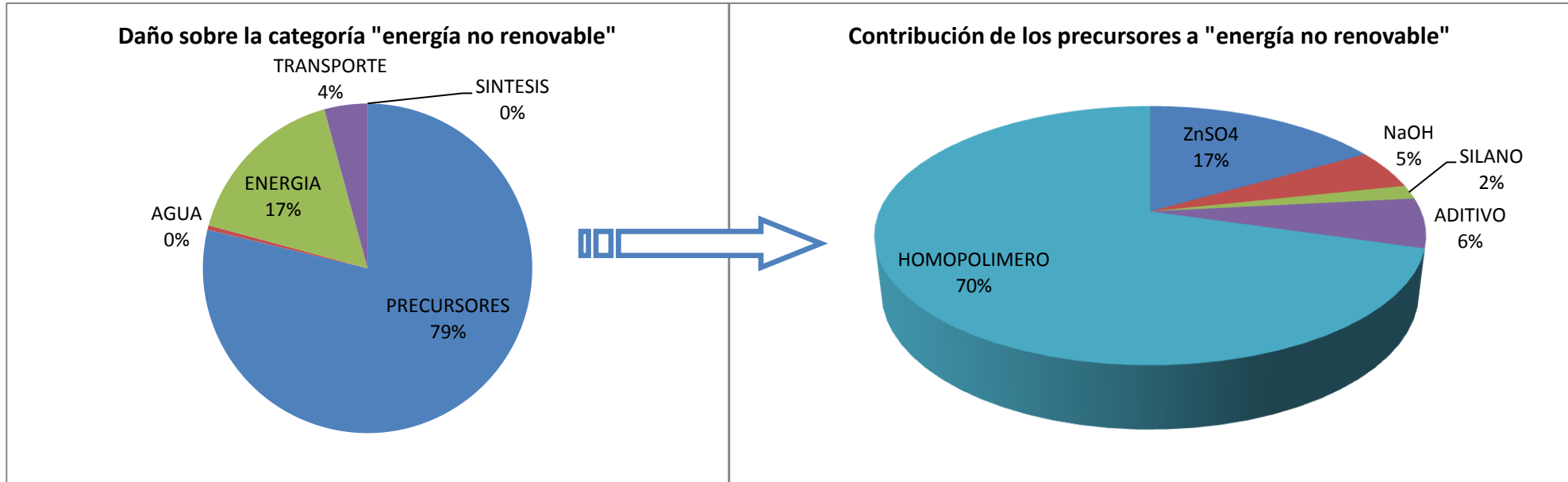


Figure 27 a) Daño global sobre la categoría "energía no renovable".

b) Contribución de los precursores empleados a la categoría "energía no renovable".

El impacto ocasionado a la categoría de "energía no renovable" tiene un comportamiento similar al de la categoría "calentamiento global", de hecho, autores de la metodología IMPACT 2002+ señalan una correlación entre los resultados de las categorías de daño "calentamiento global" y "recursos" lo cual resulta lógico. La figura 25 (a) indica que el 79% del daño global sobre la categoría "energía no renovable" proviene de los precursores, en tanto que un 17% proviene del consumo energético de la manufactura del aditivo objeto de estudio. Por otro lado el trabajo realizado durante el transporte de los precursores sólo significó un 4% del impacto ocasionado a la categoría, mientras que el tratamiento del agua consumida a lo largo del proceso no causó ningún efecto. La Figura 25 (b) muestra que el homopolímero y la extracción de la solución de ZnSO₄ son las más significativas, aportando un 70% y 17% respectivamente del impacto atribuido a los precursores.

En la Figura 26 muestra los resultados normalizados a nivel de daño final, se observa que en la producción de 1 kg de aditivo polimérico de NPs de ZnO, las etapas que tienen un mayor impacto a lo largo del proceso son la de mezclado y masterbatch. Siendo para el área de protección de salud humana “no carcinogénicos” y “efectos respiratorios” las categorías más relevantes, “ecotoxicidad terrestre” en el área de protección a la calidad del ecosistema, y “energía no renovable” en lo que respecta al agotamiento de recursos.

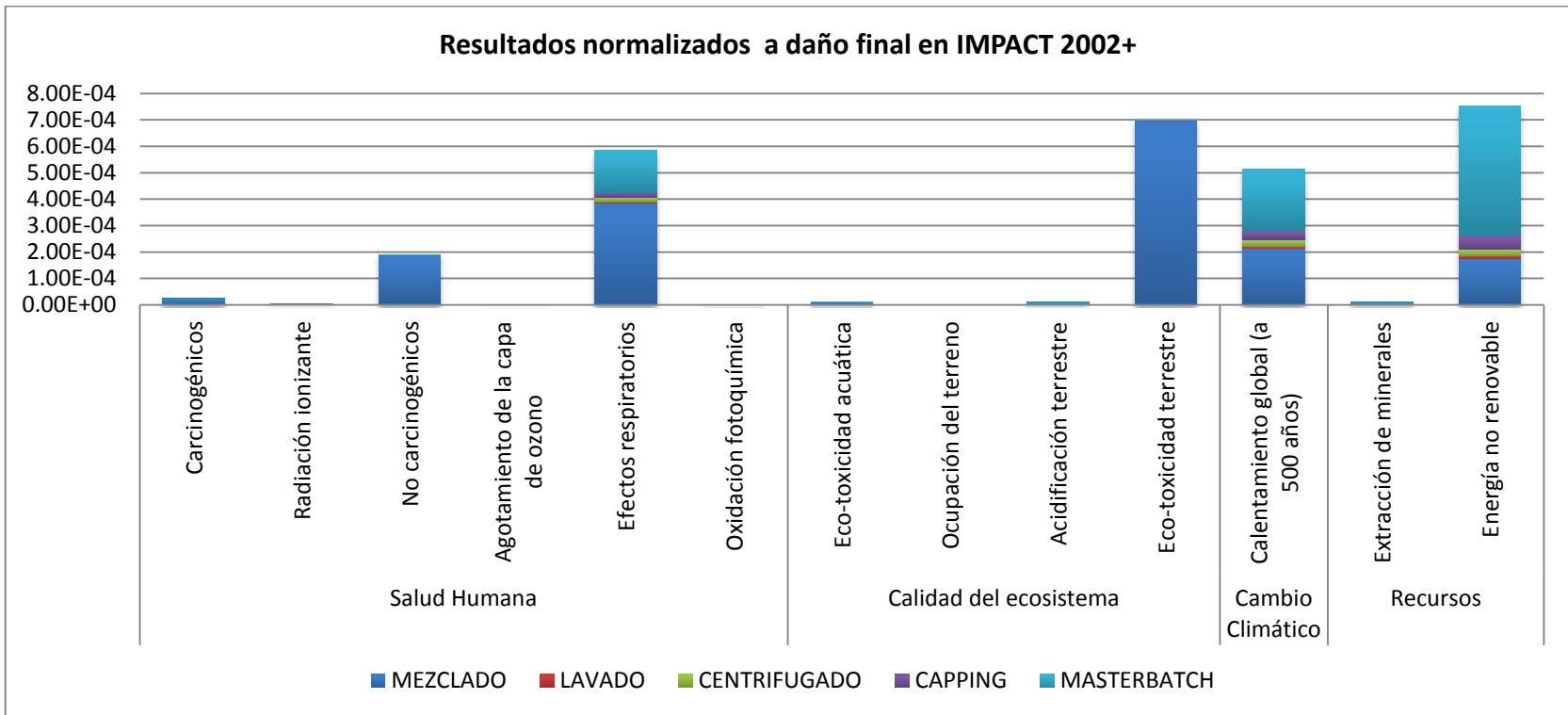


Figure 28 Resultados normalizados a daño final para las categorías de punto intermedio en IMPACT 2002+ por etapa de síntesis.

A lo largo del análisis de la contribución de las etapas del proceso de producción de 1 kg de aditivo polimérico con NPs de ZnO a las categorías de impacto consideradas por la metodología IMPACT 2002+ se observó que el mayor daño se genera por la extracción de la solución de ZnSO₄ empleada en la etapa de mezclado y por la fabricación del homopolímero añadido durante la fase de masterbatch. Ya que la extracción de la solución de ZnSO₄ es una operación llevada a cabo por la empresa S.A.P.S.A. se consideró importante identificar los procesos que integran el modelo de la producción de la solución de ZnSO₄ más significativos para las cinco categorías de mayor relevancia de acuerdo a los resultados de la normalización.

Procesos considerados en el modelo "solución de ZnSO ₄ "	No carcinogénicos	Efectos respiratorios	Eco-toxicidad terrestre	Calentamiento global	Energía no renovable
	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. al aire	PM 2.5-Eq. al aire	kg TEG-Eq. al suelo	kg CO ₂ -Eq. al aire	MJ
	%	%	%	%	%
Energía eléctrica	0.05	1.82	0.01	7.30	8.67
Fundición, producción primaria de zinc	92.90	26.17	94.50	0.00	0.00
Disposición, residuos inorgánicos, 5% agua, a relleno sanitario	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02
Tratamiento, aguas residuales, a planta de tratamiento de agua, clase 5	1.25	0.47	0.79	1.02	0.77
Diesel, quemado en la maquinaria de construcción	0.00	0.17	0.00	0.16	0.19
Concentrado de zinc, beneficio de mineral	3.85	50.83	4.46	38.13	35.05
Carbón duro, quemado en horno industrial 1-10 MW	1.55	11.32	0.03	27.89	22.86
Gas natural, quemado en horno industrial	0.01	0.23	0.00	4.62	5.69
Operación, tren de carga diesel	0.02	3.77	0.01	3.26	3.82
Oxígeno, líquido, en planta	0.08	0.54	0.01	1.90	3.05
Vapor, de proceso químico, en planta	0.05	1.51	0.02	10.55	12.87
Transporte, camión, de 16t, flota promedio	0.24	3.16	0.17	5.15	7.01
Contribución de la extracción de la solución de ZnSO a la categoría	94.48	53.24	97.93	23.14	13.14

Table 24 Contribución relativa del proceso a la categoría. (normalizada al impacto total de la extracción de la solución de ZnO.

Para cada categoría de impacto analizada se seleccionaron los tres procesos que mayor carga aportaron. Del análisis anterior se concluyó que gran parte del impacto ocasionado por la extracción de la solución de $ZnSO_4$ en las categorías de efectos respiratorios, no carcinogénicos, eco-toxicidad terrestre, calentamiento global y energía no renovable proviene del proceso de beneficio del concentrado de zinc, el proceso de fundición para la producción primaria de zinc, el carbón duro empleado como combustible en el proceso de fundición y de tratamiento de aguas residuales de la planta de fundición de producción primaria de zinc. Los resultados se muestran en la Tabla 25.

Procesos considerados en el modelo "solución de $ZnSO_4$ "	Efectos respiratorios (PM 2.5-Eq. al aire)			No carcinogénicos (kg C_2H_3Cl -Eq. al aire)			Eco-toxicidad terrestre (kg TEG-Eq. al suelo)			Calentamiento global (kg CO_2 -Eq. al aire)			Energía no renovable (MJ)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Concentrado de zinc, beneficio de mineral	1				2			2		1			1		
Fundición, producción primaria de zinc		2		1			1								
Carbón duro, quemado en horno industrial 1-10 MW			3			3					2			2	
Vapor, de proceso químico, en planta												3			3
Tratamiento, aguas residuales, a planta de tratamiento de agua									3						

Table 25 Procesos considerados dentro de la extracción de la solución de $ZnSO_4$ con mayor carga para las categorías más relevantes de acuerdo a los resultados de normalización.

Análisis de sensibilidad

El objetivo de análisis de sensibilidad es evaluar la confiabilidad en los resultados y conclusiones finales determinando cómo están afectados por las incertidumbres en los datos, métodos de asignación o cálculo de los resultados de los indicadores de categoría (ISO 14044_2006, 2007). Para este estudio se llevó a cabo un análisis de sensibilidad continuo del tipo “mínimo-máximo” en donde se evaluarán analíticamente los parámetros considerados en el modelo establecido de acuerdo rangos máximos y mínimos de variación. La finalidad fue conocer el efecto del cambio en cierto parámetro sobre el cambio en los resultados totales. Dicho cambio en el resultado total mostrará que tan importante fue un parámetro con respecto al resultado.

La Tabla 26 enlista los parámetros que alimentaron el modelo del sistema de producción de 1 kg de aditivo polimérico con NPs de ZnO en el software GaBi, dichos parámetros corresponden al básicamente al ICV. Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se estableció un rango de variación máximo y mínimo. En general, para las entradas de material al proceso se consideró un rango de estrecho de variación de $\pm 5\%$, ya que al ser un sistema muy controlado no puede haber amplios cambios en las cantidades de las materias primas utilizadas. Para el transporte de las materias primas se seleccionó un rango de variación $\pm 20\%$ ya que la ubicación de los proveedores puede cambiar fácilmente por cuestiones de tiempo y costo, sólo el transporte relacionado al movimiento de la solución ZnSO_4 y de los concentrados minerales de ZnO fue analizado en un margen de $\pm 5\%$ ya que al estar bajo el control de S.A.P.S.A. es un procedimiento con menor margen de variabilidad. Para el consumo energético se determinó una

variación de $\pm 15\%$ ya la eficiencia energética puede variar de un equipo a otro , además debido a la importancia del consumo energético en muchos aspectos de la operación de la empresa, se quiso analizar la influencia de su variabilidad sobre el desempeño ambiental del sistema.

Parámetro	Desviación estándar (-)	Valor	Desviación estándar (+)
Agua de proceso (capping)	5%	0.093	5%
Agua de proceso (mezclado)	5%	28.7346939	5%
Agua de proceso (lavado)	5%	0.77272727	5%
Emisiones al agua (capping)	5%	0.093	5%
Transporte (NaOH)	20%	400	20%
Transporte (aditivo)	20%	20	20%
Transporte (HP)	20%	963	20%
Transporte (silano)	20%	1010	20%
Transporte (ZnO)	5%	500	5%
Transporte (ZnSO4)	5%	2	5%
Energía (capping)	15%	0.15	15%
Energía (centrifugado)	15%	0.46382189	15%
Energía (masterbatch)	15%	0.7833	15%
Energía (mezclado)	15%	0.77272727	15%
Energía (lavado)	15%	0.15491651	15%
Pasta concentrada de ZnO (input)	5%	0.155	5%
Solución de nanopartículas de ZnO (input)	5%	0.15686	5%
Solución de nanopartículas de ZnO (output)	5%	0.15686	5%
Pasta concentrada de ZnO (output)	5%	0.15491651	5%
Aditivo polimérico con NPs de ZnO	5%	1	5%
NaOH	5%	0.35528757	5%
Aditivo orgánico	5%	0.093	5%
Homopolímero	5%	0.93614	5%
Silano	5%	0.00186	5%
Agua de desecho(capping)	5%	0.093	5%
Agua de desecho (centrifugado)	5%	0.77272727	5%
Agua de desecho (masterbatch)	5%	0.093	5%
Agua de desecho(lavado)	5%	29.9350649	5%
Pasta húmeda ZnO (input)	5%	0.92764379	5%
Pasta húmeda ZnO (output)	5%	0.92764379	5%
Solución de ZnO (output)	5%	30.0899815	5%
Solución de ZnO (input)	5%	30.0899815	5%
ZnSO4	5%	1	5%

Table 26 Variación considerada en los parámetros para el análisis de sensibilidad mínimo-máximo.

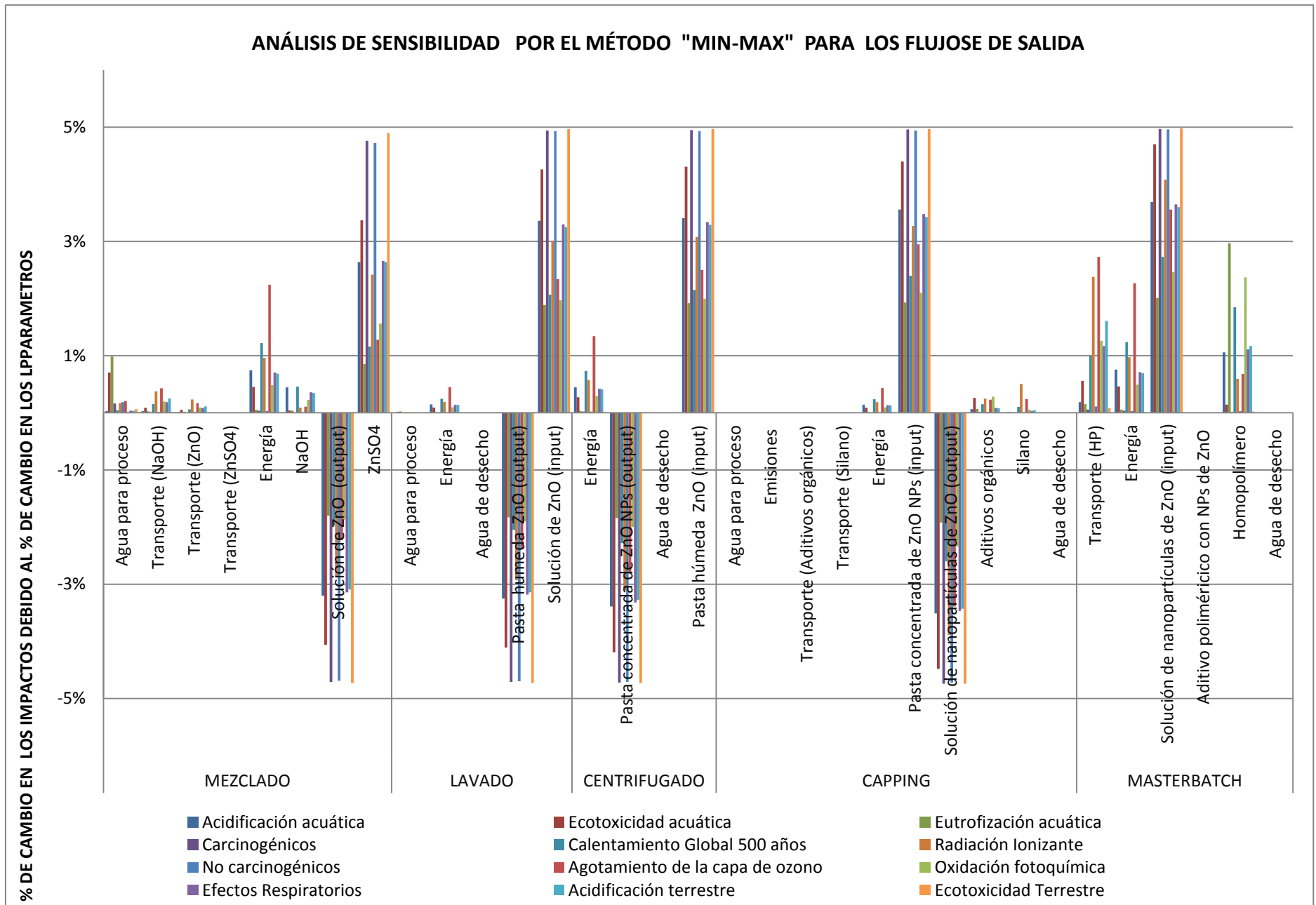


Table 27 Análisis de sensibilidad por el método "min-max" para los flujos de salida.

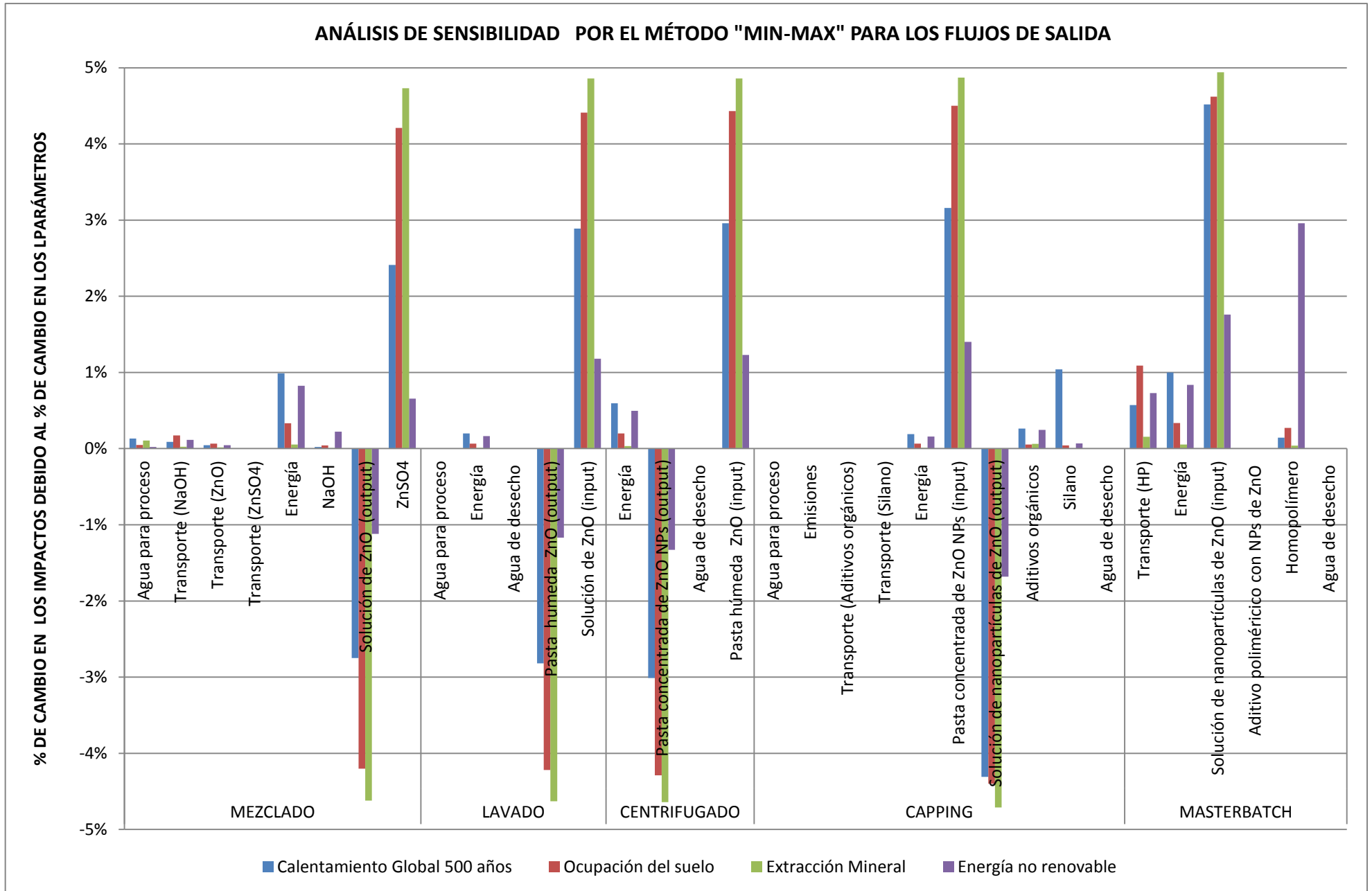


Table 28 Análisis de sensibilidad por el método "min-max" para los flujos de salida.

Los resultados del análisis de sensibilidad se muestra en dos gráficas, la Figura x muestra los resultados para las categorías de punto intermedio que se ven afectadas por los rangos de variación en los flujos de salida: acidificación acuática, calentamiento global, oxidación fotoquímica, eco-toxicidad acuática, radiación ionizante, efectos respiratorios, eutrofización acuática, no carcinogénicos, acidificación terrestre, carcinogénicos, agotamiento de la capa de ozono y eco-toxicidad terrestre. Mientras que la Figura presenta las categorías afectadas por los flujos de entrada, en este caso las categorías de calentamiento global, ocupación del suelo, extracción mineral y energía no renovable.

Se observa en las dos figuras anteriores un comportamiento similar, en donde la mayor variabilidad al proceso en todas las categorías de impacto es inducida por el paso del flujo del aditivo polimérico de NPs de ZnO, que es considerado como material de entrada y salida a través de las distintas etapas de síntesis. En la etapa de mezclado es una solución de ZnO, que ingresa a la etapa de lavado para convertirse en una pasta húmeda de ZnO, que entra a la etapa de centrifugado en donde se concentra para obtener nanopartículas de ZnO que son funcionalizadas en la etapa de capping para formar una solución de NPs de ZnO que será disuelta en el homopolímero durante la etapa de masterbatch. En todos los casos el flujo no contiene información específica o factores de caracterización que relacionen su emisión a las categorías de impacto consideradas por la metodología IMPACT 2002+.

CONCLUSIONES

La producción de 1 kg aditivo polimérico con nanopartículas de ZnO impactó en mayor escala a las áreas de protección final “salud humana” y “recursos”. En tercera posición se registró el efecto ocasionado sobre la categoría de “calidad del ecosistema”, en tanto que el menor daño se produjo para la categoría de “cambio climático”.

La categoría de punto intermedio “efectos respiratorios” es la más significativa dentro del daño a la salud humana, seguida por la categoría de “no carcinogénicos”. El proceso de extracción de la solución de ZnSO₄ es el primer factor de contribución dentro de las categorías mencionadas,

El daño ejercido sobre la calidad del ecosistema es ocasionado por la aportación de la categoría de punto intermedio de “eco-toxicidad terrestre”, área en la cual nuevamente la extracción de la solución de ZnSO₄ aparece como primer factor de peso.

El efecto en el agotamiento de recursos se debe en gran medida por la categoría de impacto intermedia de “energía no renovable”, debido en primer lugar a la producción del homopolímero, y en segundo a la extracción de la solución de ZnSO₄ utilizada en la fase de mezclado.

En relación al área de protección cambio climático, compuesta exclusivamente por la categoría de “calentamiento global”, la manufactura del homopolímero fue identificada como la mayor contribución a la categoría, seguida por la extracción de la solución de ZnSO₄.

En general se concluye que las cargas ambientales más relevantes en las categorías de impacto analizadas provienen de las entradas y salidas de materia y energía relacionadas a la extracción de la solución de $ZnSO_4$ (empleada en la fase de mezclado) y del homopolímero (utilizado en la fase de masterbatch).

El daño ocasionado por la extracción de la solución de $ZnSO_4$ sobre las categorías efectos respiratorios, no carcinogénicos, eco-toxicidad terrestre, calentamiento global y energía no renovable se origina en primer instancia por los proceso de beneficio del concentrado de zinc, en segundo término debido al proceso de fundición para la producción primaria de zinc, en tercer lugar originado por el carbón duro empleado como combustible en el proceso de fundición y en última instancia por el tratamiento de aguas residuales de la planta de fundición de producción primaria de zinc

Cabe destacar que el impacto derivado de la energía eléctrica consumida a lo largo del proceso de producción del aditivo impacta negativamente sobre las categorías de “calentamiento global” y “energía no renovable” con un 24% y 17% del total global respectivamente.

El efecto del trabajo realizado durante el transporte de los insumos ($ZnSO_4$, NaOH, silano, aditivo orgánico, y homopolímero) sobre las categorías de impacto evaluadas es tan sólo del 4%.

El tratamiento del agua residual para la generación del agua de proceso utilizada a lo largo de la producción del aditivo polimérico no representa un impacto significativo.

RECOMENDACIONES

La extracción de la solución de $ZnSO_4$, en específico en los procesos de beneficio y refinación de Zn, así como el consumo de energía eléctrica representan áreas de oportunidad para la mejora del desempeño ambiental del proceso ya que son operaciones bajo el control de la empresa S.A.P.S.A.. Se recomienda identificar entradas de materia y energía de dichos procesos.

Se requiere mayor cantidad de información tanto de los procesos de minería como de la fabricación de polímeros en nuestro país para disminuir substancialmente la incertidumbre de los cálculos de impactos ambientales relacionados a este proceso.

TRABAJO FUTURO

Con las aportaciones del presente estudio se piensa realizar una segunda iteración del ACV en donde en colaboración con el corporativo S.A.P.S.A. se defina dentro del alcance del estudio la inclusión del inventario de las entradas y salidas de los procesos de beneficio y fundición del mineral Zn para la extracción de la solución de $ZnSO_4$, así como de la mezcla energética propia de la compañía, además de un inventario más preciso de las emisiones a lo largo de todo el proceso de fabricación del aditivo polimérico con NPs de ZnO , así como una caracterización de las nanopartículas de Zn sintetizadas. En la actualidad las bases científicas bajo las cuales opera ACV y la falta de conocimiento no permiten hacer un perfil ambiental de las emisiones y comportamiento de las nanopartículas el medio ambiente y su interacción con los sistemas biológicos. Por lo anterior se recomienda seguir la tendencia en la evaluación ambiental de los nanomateriales y complementar el ACV con un análisis de riesgo.

Referencias

- (CIMAV), C. de I. en M. A. (2008). *Diagnóstico y Prospectiva de la Nanotecnología en México* (p. 193). Mexico.
- Barker, T. (2007). Climate Change 2007 : An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (R. K. Pachauri & A. Reisinger, Eds.) *Change*, 446(November), 12–17. doi:10.1256/004316502320517344
- Dhingra, R., Naidu, S., Upreti, G., & Sawhney, R. (2010). Sustainable Nanotechnology: Through Green Methods and Life-Cycle Thinking, 3323–3338. doi:10.3390/su2103323
- García Oca, L., & Tapia Fernández, C. V. P. científica U. (2008, August). *Análisis de Ciclo de Vida en la aplicación intensiva de energías renovables en el ciclo de agua*. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099.1/5502>
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001a). *The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment* (p. 132).
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001b). *The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Annex* (p. 83).
- Grieger, K. D., Laurent, A., Miseljic, M., Christensen, F., Baun, A., & Olsen, S. I. (2012). Analysis of current research addressing complementary use of life-cycle assessment and risk assessment for engineered nanomaterials: have lessons been learned from previous experience with chemicals? *Journal of Nanoparticle Research*, 14(7), 958. doi:10.1007/s11051-012-0958-6
- Güereca, L. P., & Gassó Domingo, S. (2006). *Desarrollo de una metodología para la valoración en el Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales*. UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA.
- Guinee, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. (J. Guinee, Ed.) *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(5), 311–313. doi:10.1007/BF02978897
- Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. de, Oers, L. van, et al. (2002). Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards (pp. 63–95). KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
- Hauschild, M., & Potting, J. (2005). Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003. *Environmental News*, 80.

- Hischier, R., Bo, W., Althaus, H., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Frischknecht, R., et al. (2010). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent report No. 3, v2.2.* (p. 271). Dübendorf.
- Hischier, R., & Walser, T. (2012). Life cycle assessment of engineered nanomaterials: state of the art and strategies to overcome existing gaps. *The Science of the total environment*, 425, 271–82. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.03.001
- Humbert, S., De Schryver, A., Margni, M., & Olivier, J. (2012). *IMPACT 2002 + : User Guide* (Vol. 2, p. 265).
- Humbert, S., Margni, M., & Jolliet, O. (2005). *Impact 2002+: user guide. Draft for version 2.1. Draft for version* (p. 36). Retrieved from http://www.sph.umich.edu/riskcenter/jolliet/IMPACT2002+/IMPACT2002+_UserGuide_for_v2.1_Draft_October2005.pdf
- ISO 14040_2006 ISO 14040:2006. Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia. (2007). A.C., Instituto Mexicano de Normalización y Certificació.
- ISO 14044_2006 ISO 14044:2006. Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida- Requisitos y Directrices (2007). A.C., Instituto Mexicano de Normalización y Certificació.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., & Rebitzer, G. (2003a). Presenting a New Method IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324–330. Retrieved from http://download.springer.com/static/pdf/980/art%3A10.1007%2F02979083.pdf?auth66=1360974847_0c8825d774d756ad91c767ad2e7de143&ext=.pdf
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., & Rebitzer, G. (2003b). Presenting a New Method IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology, 8(6), 324–330.
- Jolliet, O., Müller-Wenk, R., Bare, J., Brent, A., Goedkoop, M., Heijungs, R., Itsubo, N., et al. (2004). UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(6), 394–404. doi:10.1065/Ica2004.09.175
- JRC-IES. (2010). *ILCD Handbook: Framework and requirements for LCIA models and indicators First edition.* (European Commission Joint Research Centre Sustainability, Ed.) (First., p. 103). Ispra, Italy: Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2788/38719
- Kumari, L., Li, W. Z., Vannoy, C. H., Leblanc, R. M., & Wang, D. Z. (2010). Zinc oxide micro- and nanoparticles: Synthesis, structure and optical properties. *Materials Research Bulletin*, 45(2), 190–196. doi:10.1016/j.materresbull.2009.09.021

- Peralta-Videa, J. R., Zhao, L., Lopez-Moreno, M. L., De la Rosa, G., Hong, J., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Nanomaterials and the environment: a review for the biennium 2008-2010. *Journal of hazardous materials*, 186(1), 1–15.
doi:10.1016/j.jhazmat.2010.11.020
- Wang, H., Wick, R. L., & Xing, B. (2009). Toxicity of nanoparticulate and bulk ZnO, Al₂O₃ and TiO₂ to the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 157(4), 1171–7. doi:10.1016/j.envpol.2008.11.004
- Zhao, H., & Li, R. K. Y. (2006). A study on the photo-degradation of zinc oxide (ZnO) filled polypropylene nanocomposites. *Polymer*, 47(9), 3207–3217.
doi:10.1016/j.polymer.2006.02.089