

Vida Científica

COLABORACIONES EN CIENCIAS DE LA NATURALEZA

EVALUACIÓN AMBIENTAL EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

La relevancia de los materiales en nuestra civilización es mayor de lo que en un principio se puede pensar. La mayoría de nuestras acciones cotidianas están condicionadas en mayor o menor grado por los materiales: transporte, vivienda, vestimenta, comunicación, ocio, alimentación, etc. El desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros de producir y procesar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades.

A lo largo de la historia se pueden encontrar numerosos ejemplos que ilustran la trascendencia de la utilización de nuevos materiales (Ashby 2008). Las herramientas y armas en la prehistoria estaban realizadas de hueso y piedra; este último material podía ser manipulado para producir aristas afiladas más duraderas que cualquier otro material encontrado en la naturaleza. Alrededor de 3500 a.C., en los hornos usados para la alfarería, se alcanzó la temperatura necesaria para reducir minerales de cobre junto con otros con alto contenido en estaño lo que permitió obtener una aleación, el bronce, con mayor dureza y más apta que el cobre puro para la realización de armas. De nuevo por azar, alrededor de 1500 a.C., el carbono existente en el carbón usado para calentar los hornos permitió bajar la temperatura a la que la hematita se reduce para dar hierro. Este material propició una revolución en el armamento y en la agricultura y llegó a ser más apreciado que el oro. El uso de estos materiales ha caracterizado a las edades más tempranas de la historia de la humanidad dando lugar a los términos de Edad de Piedra, Edad de Bronce o Edad de Hierro.

Otra revolución asociada a los materiales fue la protagonizada por los polímeros en la primera mitad del siglo XX y cuyo punto de partida se produce en 1909 con la síntesis de la baquelita. Posteriormente vendrían el polipropileno, el polietileno, policloruro de vinilo, etc.,

alcanzando en muchos usos un grado de implementación en nuestras vidas próximos al de los metales.

Tal vez podríamos llamar a nuestra era la edad de los polímeros si no se solapase en el tiempo con otra revolución asociada al silicio. Para este elemento no se encontraron aplicaciones relevantes hasta que a mediados del siglo XX se comprobó que podía actuar como un rectificador de corriente al doparlo con pequeñas cantidades de otros elementos. El descubrimiento permitió la creación de la electrónica y la ciencia de computación revolucionando la capacidad de almacenamiento y transmisión de información.

La innovación en materiales ha sido motor y catalizador de cambios y ha permitido acometer los numerosos retos a los que se ha enfrentado la humanidad a lo largo de su historia. El desarrollo en el campo de los materiales ha influido de manera decisiva en el progreso de la humanidad y en la expansión de sus fronteras.

No obstante, dichos avances han venido acompañados de costosas contraprestaciones. Uno de los distintivos inequívocos de la sociedad industrializada es el aumento en la cantidad y el número de materiales que se consumen. El carácter lineal del perfil de este consumo (extracción de recursos, producción, uso y eliminación) unido a la presencia en su composición de un mayor número de sustancias de síntesis y al elevado nivel de energía incorporada en ellos pone en entredicho la manera en la que nos relacionamos con el medio al haberse superado su capacidad para amortiguar los impactos resultantes. De igual modo, esta actividad también supone un aumento de la toxicidad del medio poniendo en grave riesgo la salud humana.

Esta encrucijada ambiental se presenta como uno de los mayores retos a los que la humanidad ha de hacer frente en las próximas décadas. La ciencia e ingeniería de materiales no sólo no es ajena a este desafío sino que tendrá un importante peso específico en su logro.

Para tal fin, el uso y desarrollo de materiales deberá seguir los siguientes vectores, mostrados en la figura 1.

1. Expansión de las fronteras de la humanidad. Este vector es consistente con el modo tradicional de desarrollo de materiales en el cual se mejoran y se po-

nen en uso las características físicas, químicas y funcionales de éstos.

2. Coexistencia armoniosa con la ecosfera.¹ Vector cuyo objetivo es minimizar el daño provocado sobre el medio natural reduciendo el consumo de recursos, las emisiones y los desechos generados durante de vida de un material.
3. Respeto hacia el ser humano. Los materiales no sólo deben ser respetuosos con el medio natural sino que han de serlo también con el hombre reduciendo su toxicidad.

Este nuevo conjunto de directrices ha de ser complementado con un enfoque de ciclo de vida ya que la interacción de los materiales con la ecosfera y la tecnosfera no sólo se circunscribe a la etapa de producción sino que se produce desde el momento en que se extraen las materias primas y se generan los recursos energéticos empleados en su producción hasta el momento en que dejan de ser útiles y terminan en una planta de reciclaje, en una incineradora o en un vertedero. Entre medias hay otros procesos cuyos impactos también han de ser imputados como pueden ser la etapa de transporte de las materias primas hasta el lugar donde se procesan o la etapa de uso.

La adopción de esta perspectiva integradora y holística en la imputación de impactos a lo largo de todo el ciclo de vida supone una ampliación de los límites temporales y geográficos tradicionalmente inscritos únicamente dentro de los centros de producción. Muchas iniciativas de reducción de impactos se centran en alguna etapa en concreto del ciclo de vida del producto no considerando otras que pueden suponer igual o mayor afcción al medio. Además, en la imputación de cargas ambientales se hace necesario trabajar con una batería de impactos suficientemente amplia y representativa con el fin de caracterizar adecuadamente el perfil ambiental de las opciones evaluadas.

En el fondo de la cuestión subyace la idea de que cualquier mejora ambiental que se desee hacer a través de la elección de un material (para el desempeño de una

¹ La ecosfera es la totalidad de seres vivos que interactúan de forma natural unos con otros, con el medio ambiente que los rodea y con los componentes abióticos en forma de energía y materia. Es la suma de la biosfera, hidrosfera, geosfera y la atmósfera. Este término se usa de manera complementaria junto al de tecnosfera, que es el conjunto de medios artificiales que soportan el desarrollo de la sociedad humana.

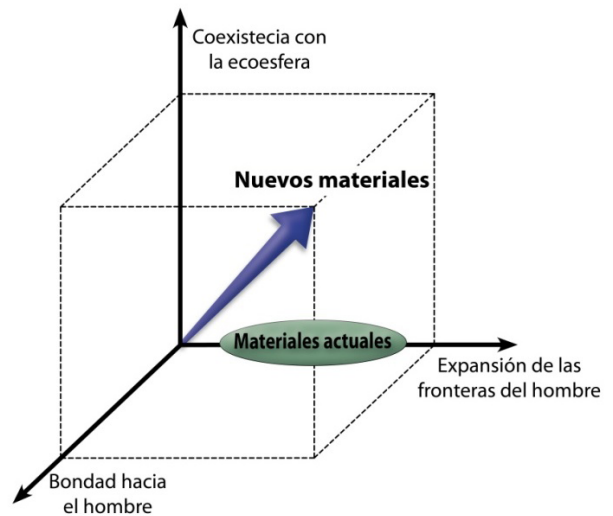


Figura 1: Directrices para el desarrollo de nuevos materiales (elaboración propia, a partir de Yagi y Halada, 2001).

función dentro de un producto) no puede suponer un trasvase o externalización de los impactos, ya sea en su naturaleza, ya sea en la escala temporal o geográfica en que se produzcan.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta que permite la obtención de información ambiental mediante la recopilación de las entradas y las salidas hacia y desde el ciclo de vida de un material o producto y la posterior evaluación de los impactos ambientales potenciales derivados (ISO 2006a, ISO 2006b). Esta metodología asiste en la toma de decisiones durante los procesos de optimización, diseño y desarrollo de materiales y productos. Mediante el ACV se obtiene información de impactos tales como el calentamiento global, la eutrofización, la acidificación, la energía incorporada, el agotamiento de capa de ozono o el agotamiento de recursos así como de aquellos impactos relacionados con la toxicidad humana y ecotoxicidad.

Desde este nuevo sistema de referencia (figura 1), unido a la perspectiva de ciclo de vida (figura 2), el desempeño funcional de los materiales deberá ser revisado, y el estudio de sus propiedades complementado con información acerca de las consecuencias sobre el medio ambiente y los seres humanos.

Los aspectos ambientales y de daño a la salud humana deben entrar, como enfoque adicional, dentro del análisis tradicional de los sistemas aportando luz a preguntas como ¿Qué material puede cumplir determinados requerimientos funcionales con la menor carga ambiental a lo largo del ciclo de vida del producto?

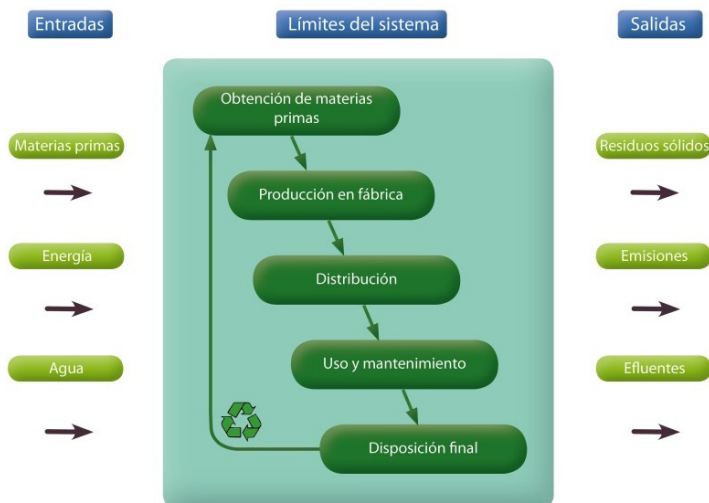


Figura 2: Etapas del ciclo de vida, límites del sistema y entradas/salidas en ACV (elaboración propia, basada en Ihobe, 2009).

Bajo este planteamiento, la idoneidad ambiental de un material se convierte en una cuestión compleja con cuya evaluación se pretende huir de ideas preconcebidas acerca de lo que es “ecológico”, sostenible o ambientalmente preferible a priori. En la mayoría de los casos, dichas aseveraciones son producto del desconocimiento de las interacciones reales de los materiales con el medio.

La respuesta a la pregunta arrojada anteriormente no es categórica y dependerá de los escenarios en que el material desempeñe una u otra función. Las propiedades del cobre lo hacen único para aplicaciones relacionadas con la conducción de la electricidad pero lo invalidan si se plantea usarlo como aislante térmico. En el perfil ambiental, como en cualquier otra característica técnica más, material y función han de ir indisolublemente unidos.

PROPIEDADES AMBIENTALES DE LOS MATERIALES

El mundo de la ciencia e ingeniería de los materiales no ha sido ajeno a algunos de los planteamientos expuestos hasta el momento. En su libro *“The principles of material selection for engineering design”* Mangonon incluye ya el perfil ambiental de los materiales (tanto en la producción como el procesado posterior) entre los factores a tener en cuenta en el diseño de un producto (Mangonon 1999). Más tarde, Ashby y Johnson utilizan el término eco-atributos de los materiales y consideran éste como un factor más en la ingeniería de diseño junto al perfil técnico y los atributos estéticos (Ashby y Johnson 2003). En la edición más reciente del libro *“Materials Selection in Mechanical Design”* Ashby se refiere al perfil ambiental de los mate-

riales como “eco-propiedades” (Ashby 2005). Pero es sin duda en otro libro de este mismo autor, *“Materials and the Environment”* donde se presenta de forma más nítida y práctica el concepto de propiedades ambientales de los materiales (Ashby 2013). En él se aporta información relativa a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y energía primaria incorporada (EP) de los materiales en las etapas de fabricación, procesado y fin de vida. En esta publicación, los valores de emisiones GEI y EP se obtienen bajo un enfoque de ACV en su versión simplificada. Estos indicadores se combinan conjuntamente con los índices de materiales ya desarrollados por el autor (Ashby 2005) para generar nuevos indicadores del comportamiento ambiental de los materiales. Con el objeto de asistir a diseñadores en la toma de decisiones, se presentan cartas de materiales en las que se cotejan propiedades técnicas (resistencia a tracción, módulo de Young, etc.) frente a las cargas ambientales (emisiones GEI y EP) de numerosos materiales.

Las bondades del ACV son reconocidas a nivel internacional pero la aplicación de la metodología no está exenta de obstáculos. Los materiales interactúan con el medio ambiente de manera directa e indirecta por lo que se complica cualquier modelización que de ellos se haga. El ACV basa su aplicación precisamente en la creación de un modelo más o menos sofisticado para describir estas interacciones por lo que la metodología se enfrenta en muchas ocasiones a importantes dificultades. Las asignaciones de las cargas ambientales cuando un proceso genera más de una salida con interés tecnológico; las reglas de corte por las que justificar la exclusión de determinadas emisiones o de ciertas etapas del ciclo de vida; o el mismo planteamiento de hipótesis en el desarrollo del modelo, son tan sólo ejemplos de dichos obstáculos. De cómo se determinen estos y otros aspectos del ACV depende fuertemente el resultado final del trabajo.

Se hace necesaria la creación de un marco consensuado que permita desarrollar los estudios de ACV con un grado suficiente de rigor, credibilidad y transparencia. En la figura 3 se muestra el horizonte al que ha de dirigirse la generación de información ambiental de los materiales si se desea cumplir con estos objetivos.

La figura 3 muestra en su área central los pasos que debe seguir un fabricante de un material cuando desea evaluar una propiedad de interés con el objeto de incor-

porarla a la descripción técnica de su producto. En el lado izquierdo de la figura se muestran, a modo de ejemplo, estas fases para el caso de un material aislante para uso en construcción.

Una vez determinada la propiedad o característica de interés técnico en cuestión, es necesario definir el ensayo o prueba que permita cuantificarla así como la normativa aplicable. Posteriormente se ha de recurrir a una entidad (acreditada por tercera parte independiente) que desarrolle dichos ensayos con respecto a la norma de aplicación. De esta forma se garantiza que puedan ser comparables la resistencia térmica de aislantes realizados por diferentes fabricantes o los realizados por otras entidades igualmente acreditadas.

De forma paralela, las propiedades ambientales de los materiales (lado derecho en figura 3) han de ser evaluadas en un marco armonizado que permita igualmente aportar información verificada y comparable. El “ensayo o test” que mejor permite cuantificar el desempeño ambiental es el ACV. En el momento actual, el papel de la normativa lo cumplen las reglas de categoría de producto (RCP) consistentes en el conjunto de reglas específicas, requisitos y guías para el desarrollo del ACV que nutre a las declaraciones ambientales de producto (DAP) de un material o producto. En este sentido, ya hay sistemas DAP con reconocimiento internacional en los que se publican RCP consensuadas entre las partes interesadas de los sectores involucrados. Este es el caso, aunque no el único, del sistema sueco EPD® (Environdec 2014) que ofrece un

marco objetivo, creíble y neutral (permitiendo la comparación entre materiales, productos y servicios) para el desarrollo de DAP. El administrador del sistema bajo el que se publican las DAP es el garante de la veracidad de los procedimientos seguidos tanto en la elaboración del informe de ACV como en la de la propia DAP.

Aunque se ha recorrido un largo camino en el alineamiento y armonización internacional de las RCP de diferentes sistemas DAP, la robustez, transparencia y veracidad sólo se alcanzará cuando éstas se conviertan en normativa de aceptación internacional (Subramanian et al. 2012).

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

El papel del ACV dentro del mundo de la ciencia e ingeniería de materiales no se limita a la evaluación de aquellos ya existentes y de su aplicación en la ingeniería de diseño sino que también aporta valiosa información sobre nuevas tecnologías de producción, especialmente en el caso en que éstas se postulan como solución de determinados problemas ambientales.

Tal es el caso de las nanotecnologías y, en concreto, los nanomateriales. Las propiedades únicas de estos materiales han generado expectativas muy positivas en áreas como la eficiencia energética y material, la reducción del cambio climático, la remediación de suelos y aguas, la reducción de residuos y el desarrollo sostenible (Fleischer y Grunwald 2008; Bauer et al 2008). Como reclamo, se afirma que la nanotecnología ofrecerá una producción más limpia ya que con la síntesis y procesamiento de materiales a escala nanométrica se reduce el consumo de materias primas y recursos naturales como el agua y la energía. Sin embargo, hay evidencias de que estas afirmaciones no proporcionan un cuadro completo, trivializando o ignorando los riesgos y costes ambientales (Illuminato y Miller 2010).

La fabricación de nanomateriales lleva asociada en muchos casos (Sengul et al. 2008):

- El uso intensivo de energía y agua
- Requisitos de pureza más estrictos de las materias primas de partida y menor tolerancia a la contaminación
- Menores rendimientos en los procesos de obtención
- Procesados repetitivos, pre-procesado y post-procesado de un mismo material o lote

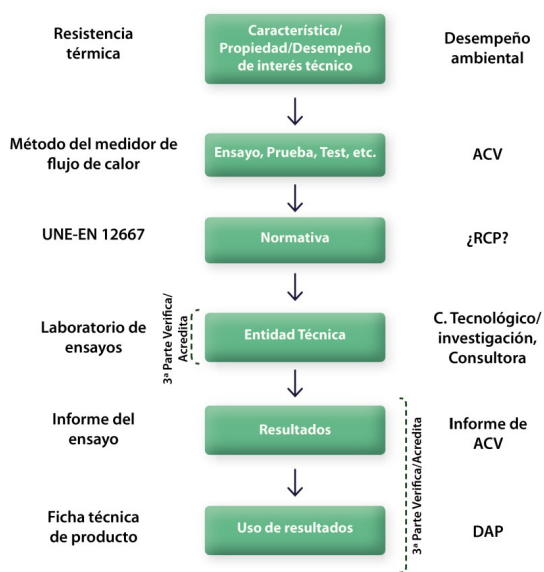


Figura 3: Determinación de propiedades/características de materiales (elaboración propia).

- Necesidad de moderado-alto vacío y entornos de producción altamente especializados
- El uso de sustancias químicas tóxicas, ácidas o básicas y disolventes orgánicos
- Generación indirecta, o incluso el uso directo, de gases de efecto invernadero

Por otro lado, las propiedades de los nanomateriales que los hacen únicos con respecto a sus homólogos convencionales también se traducen en un comportamiento singular en sus efectos dañinos en la salud humana y en la de los ecosistemas (Gavankar *et al.* 2012). El tamaño nanométrico de los constituyentes de estos materiales, su forma, porosidad, estado de agregación, área y carga superficial, reactividad química, etc. modifican los mecanismos habituales de transporte, exposición y respuesta toxicológica (Tuominen y Schultz 2010).

Se pone de relieve que las afirmaciones a priori de que los nanomateriales contribuirán al desarrollo sostenible requieren de un escrutinio cuidadoso bajo una perspectiva sistémica. A nivel europeo, hay un llamamiento para estudiar las nanotecnologías desde una perspectiva de ciclo de vida y a través de distintas comunicaciones de la Comisión Europea (Comisión Europea 2005, 2009a y 2009b) se invita a la aplicación, desarrollo y validación de métodos en las áreas de evaluación de riesgos, caracterización de la exposición y ACV de estas tecnologías.

En concreto, en el área temática "Nanociencias, nanotecnologías, materiales y nuevas tecnologías de producción" del Séptimo Programa Marco (Comisión Europea 2011) se hacen continuas referencias a la conveniencia de incorporar en los proyectos tareas relacionadas con la evaluación ambiental bajo la perspectiva de ciclo de vida. También bajo este programa se han acogido proyectos dedicados por entero a esta temática como son Nanosustain, Nanopolytox, Nanovalid, Nanomicex y Nano Impat Net.

En la actualidad, las bases de datos de las que se nutren los estudios de ACV permiten evaluar impactos ambientales asociados a los nanomateriales como el calentamiento global, acidificación, eutrofización, agotamiento de recursos, agotamiento de capa de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos o energía primaria pero no están adaptadas para la evaluación de los impactos sobre la salud humana y los ecosistemas (Hischier y Walser 2012).

El modelo USEtox (Rosenbaum *et al.* 2008) por el que se calculan estos impactos deberá adaptarse a los factores específicos concernientes a los nanomateriales (Gavankar *et al.* 2012). A su vez, los estudios de ACV de nanotecnologías deben complementarse con herramientas como la evaluación de riesgos de ambientales (Grieger *et al.* 2012) especialmente cuando sea necesario llevar a cabo un análisis en el se encuentre acotada la localización de las actividades.

CONCLUSIONES

Los problemas ambientales derivados de la intensa actividad humana sitúan al hombre ante uno de los retos más importantes de su historia. Para hacer frente a este desafío, la ciencia e ingeniería de materiales puede y debe jugar un papel de peso en la reducción de impactos y en la consecución de un entorno más respetuoso con el ser humano. Con el objetivo de aportar información útil y objetiva que asista a la toma de decisiones informadas, la variable ambiental ha de incorporarse a la mesa de trabajo de los diseñadores y profesionales que prescriben los materiales para sus productos y en la de los investigadores que los desarrollan. El desempeño ambiental se convertirá en una característica o propiedad técnica más de los materiales a semejanza de sus propiedades físicas, químicas o funcionales.

Para ello se hace necesario el uso de una metodología con perspectiva de ciclo de vida que objetive los estados inicial y final de los procesos de mejora ambiental y de las opciones planteadas.

A pesar del camino aún por recorrer en la aplicación robusta, fiable y comparable del ACV, ésta se postula como la herramienta más idónea en la evaluación de materiales y productos ya existentes así como de nuevas tecnologías de obtención. Para la producción de materiales a escala nanométrica, el ACV puede emplearse, junto a herramientas como la evaluación de riesgos ambientales, adaptando sus metodologías a los aspectos específicos de éstos.

BIBLIOGRAFÍA

- Asbhy, M. & Johnson, K., 2003. The art of materials selection. *Materials Today* December: 24-35.
- Ashby, M., 2005. *Materials selection in mechanical design*. 3ª edición. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M., 2008. *Materials - A brief history*. Philosoph-

ical Magazine Letters 88(9-10): 749-755.

Ashby, M., 2013. Materials and the environment: eco-informed material choice. 2ª edición. Butterworth-Heinemann.

Bauer, C., Buchgeister, J., Hischier, R., Poganietz, W.R., Schebek, L. & Warsen, J., 2008. Towards a framework for life cycle thinking in the assessment of nanotechnology. *Journal of Cleaner Production* 16(8): 910-926.

Comisión Europea 2005. Nanosciences and nanotechnologies: An action plan for Europe 2005-2009.

Comisión Europea 2009a. Nanosciences and Nanotechnologies: An action plan for Europe 2005-2009. Second Implementation Report 2007-2009.

Comisión Europea 2009b. Accompanying document to the Nanosciences and Nanotechnologies: An action plan for Europe 2005-2009. Second Implementation Report 2007-2009.

Comisión Europea 2011. Nanosciences, nanotechnologies, materials and new production technologies - FP7 NMP, Work Programme 2012.

Environdec, 2014. International EPD System. <http://www.environdec.com/>

Fleischer, T. & Grunwald, A., 2008. Making nanotechnology developments sustainable. A role for technology assessment? *Journal of Cleaner Production* 16(8): 889-898.

Gavankar, S., Suh, S. & Keller, A.F., 2012. Life cycle assessment at nanoscale: review and recommendations. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17: 295-303.

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): 1-23.

Hischier, R. and Walser, T., 2012. Life cycle assessment of engineered nanomaterials: State of the art and strategies to overcome existing gaps. *Science of The Total Environment* 425: 271-282.

IHOBE 2009. Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono: Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto.

Illuminato, I. and Miller, G., 2010. Nanotechnology, climate and energy: over-heated promises and hot air? *Friends of Earth*.

ISO 2006a. Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006).

ISO 2006b. Environmental Management - Life cycle assessment - Principles and Framework (ISO 14040:2006).

Mangonon, P., 1999. The principles of material selection for engineering design. New Jersey. Prentice-Hall.

Nano Impact Net: <http://www.nanoimpactnet.eu/> Acceso marzo 2014.

Nanomicex: <http://nanomicex.eu/> Acceso marzo 2014.

Nanopolytox: <http://www.nanopolytox.eu/> Acceso marzo 2014.

Nanosustain: <http://www.nanosustain.eu/> Acceso marzo 2014.

Nanowalid: <http://www.nanowalid.eu/> Acceso marzo 2014.

Rosenbaum, R., Bachmann, T., Huijbregts, L., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A. et al., 2008. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13(7): 532-546.

Sengul, H., Theis, T.L. & Ghosh, S., 2008. Toward sustainable nanoproducts: An overview of nanomanufacturing methods. *Journal of Industrial Ecology*, 12, 329-359.

Subramanian, V., Ingwersen, W., Hensler, C. & Collie, H., 2012. Comparing product category rules from different programs: learned outcomes towards global alignment. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17(7): 892-903.

Tuominen, M. & Schultz, E., 2010. Environmental aspects related to nanomaterials. The Finnish Environment Institute.

Yagi, K. & Halada, K., 2001. Ecomaterials. European white book on fundamental research in materials science. Max Planck Institut für Metallforschung, Stuttgart.

Diego Ruíz Amador

Cyclus Vitae Solutions

Cátedra UNESCO de Análisis de Ciclo de Vida y

Cambio Climático