

---

# *El análisis de ciclo de vida como herramienta de sostenibilidad en los proyectos de tratamiento de aguas*

Margarita González Benítez<sup>1</sup>, Ramón Guardino Ferré<sup>2</sup>, Rubén Calderón Iglesias<sup>3</sup>, Santos Gracia Villar<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Proyectos de Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Avda. Diagonal, 647, 08028 Barcelona, España. <sup>2</sup>Grupo de Investigación de Ingeniería de Proyectos de la UPC (GIIP). <sup>3</sup>Universidad Europea del Atlántico. Santander, España. <sup>4</sup>Universidad Internacional Iberoamericana. Fundación Universitaria Iberoamericana. Barcelona, España

---

*The cycle life analysis as a tool for sustainability in water treatment projects*

*L'anàlisi de cicle de vida com a eina de sostenibilitat en els projectes de tractament d'aigües*

*Recibido: 24 de octubre de 2012; revisado: 16 de octubre de 2013; aceptado: 23 de octubre de 2013*

## RESUMEN

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta normalizada de sostenibilidad, reconocida en numerosos foros internacionales, de aplicación en los proyectos de tratamiento de aguas pero que no se aplica habitualmente en este tipo de proyectos. El ACV debería incorporarse a los mismos puesto que permite tomar decisiones estratégicas a partir del estudio de la sostenibilidad de las distintas fases de proyecto, compara tecnologías de depuración de agua y sus fases, permite optimizar procesos y determinar el impacto global del ciclo de vida de la EDAR.

**Palabras clave:** Sostenibilidad; impacto ambiental (EIA); análisis de ciclo de vida (ACV); tratamiento de agua; estación depuradora de aguas residuales (EDAR).

## ABSTRACT

The Life Cycle Assessment (LCA) is a standardised tool for sustainability, recognized in many international forums, applicable to water treatment projects, but not usually applied to this type of projects. The LCA should be included into this type of projects since it allows making strategic decisions from the study of sustainability at different stages of the project, compares water purification technologies and its phases, and allows optimizing processes and determining the overall impact of the WWTP's life cycle.

**Keywords:** Sustainability, environmental impacts, life cycle analysis, water treatment, wastewater treatment plants (WWTP).

## RESUM

L'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) és una eina normalitzada de sostenibilitat, reconeguda en nombrosos fòrums internacionals, d'aplicació en els projectes de tractament d'aigües però que no s'aplica normalment en aquest tipus de projecte. Aquests projectes haurien d'incorporar l'ACV ja que permet prendre decisions estratègiques a partir de l'estudi la sostenibilitat en les diferents fases de projecte, compara tecnologies de depuració d'aigües i les seves fases, permet optimitzar processos i determinar l'impacte global del cicle de vida de l'EDAR.

**Paraules clau:** Sostenibilitat; impacte ambiental (EIA), anàlisi de cicle de vida (ACV); tractament d'aigua; estació depuradora d'aigües residuals (EDAR).

---

\*Autores para la correspondencia: <sup>1</sup>maria.margarita.gonzalez@upc.edu; <sup>2</sup>ramon.guardino@gmail.com; <sup>3</sup>ruben.calderon@uneatlantico.es; <sup>4</sup>santos@funiber.org

## 1. INTRODUCCIÓN

De forma simplificada, el proceso de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) es un proceso industrial: Partiendo de unas materias primas, se fabrica un producto por aplicación de una serie de procesos. Éstos procesos crean subproductos no comerciales, por lo que la industria debe deshacerse de los mismos asumiendo un coste. En el caso de una EDAR la materia prima es el agua residual (sin coste), el producto final es el agua tratada, producto comercial cuya "venta" tiene que asumir todos los costes de producción (mano de obra, energía, reactivos, mantenimiento, amortización, etc.) y los subproductos son, principalmente, los residuos sólidos y fangos generados. El producto final deberá cumplir con los objetivos de calidad marcados por la legislación.

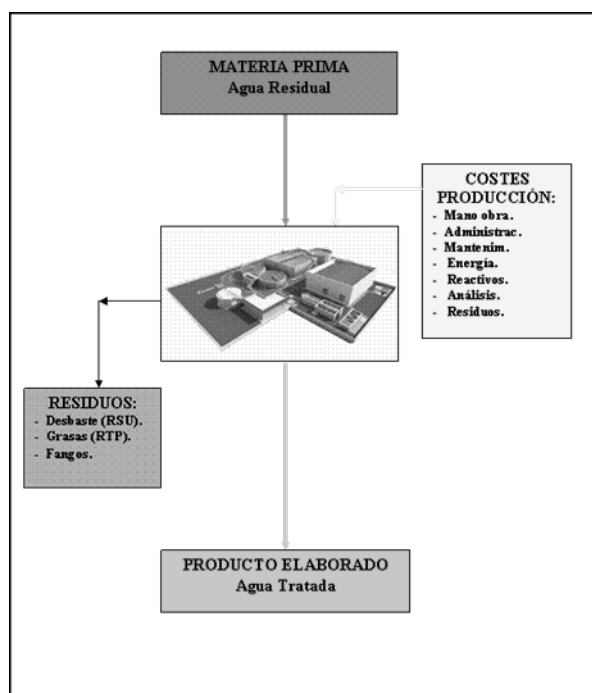


Ilustración 1: La EDAR como industria.

## 2. PROYECTO Y HERRAMIENTAS DE SOSTENIBILIDAD

Un "Proyecto", según la definición del Project Management Institute (PMI, 2008) es un esfuerzo temporal encaminado a crear un producto o servicio único.

De esta forma, parece lógico pensar que, este producto o servicio, deberá ser lo más sostenible posible y, por tanto, deberán utilizarse las herramientas de sostenibilidad disponibles en todas sus fases: proyecto, construcción, explotación y demolición.

Las principales herramientas de sostenibilidad aplicables a proyectos de EDAR para medir el impacto de estas, son los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y los Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Los EIA son una herramienta utilizada comúnmente en los proyectos de estaciones depuradoras de aguas residuales, proyectos en los que no se emplean los ACV para la toma de decisiones, ni en España ni en otros países (Kirk, B. et al.; 2005).

Si comparamos, como método de evaluación de la sostenibilidad de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), ambas herramientas, nos encontramos que las EIA contemplan los tres componentes de la sostenibilidad, medioambiente, economía y sociedad, pero lo hacen únicamente a nivel local y se aplican únicamente como pronóstico de daños/beneficios potenciales.

Los ACV, sin embargo, contemplan la componente medioambiental y, en menor cuantía, los aspectos sociales y económicos, pero pueden aplicarse tanto en el pronóstico como en el diagnóstico, y lo hacen a nivel global, aplicando el concepto "piensa globalmente y actúa localmente", de la "Carta de Valencia" (Unión Europea, 1995). Los ACV evalúa los daños al ecosistema, a los recursos y a la salud y, al igual que los EIA, necesitan de estudios de las condiciones locales: El ACV evalúa los impactos globales como el efecto invernadero, la desaparición de recursos naturales no renovables, la acidificación, la salud de la población, la contaminación del medio natural y de los ecosistemas, etc. Aunque no tiene en cuenta, de forma directa, los impactos sociales y económicos, ni los valores estéticos, la biodiversidad ni el hábitat. Tampoco evalúa las molestias que se producen con la actividad: olores, incremento del tráfico, etc.

El ACV se cita ya, como herramienta de estrategia sostenible, en el "V Programa de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Unión Europea" (Comisión Europea; 1992), y tienen su primer reconocimiento internacional como herramienta de sostenibilidad en la "Carta de las nacionalidades y de las regiones europeas para el medio ambiente" o "Carta de Valencia" (Unión Europea; 1995).

El ACV es una metodología normalizada mediante UNE EN ISO 14040:2006 (ISO; 2006a) y UNE EN ISO 14044:2006 (ISO; 2006b).

Entre los principales objetivos de los ACV (González, M.; 2003) se encuentra el proporcionar criterios para el diseño de productos y procesos, conociendo las ventajas y los puntos débiles de estos respecto al medio ambiente, en cualquier fase de su ciclo de vida y, de esta manera, poder tomar, ya en la etapa de diseño, las medidas correctoras necesarias sobre las fases de mayor impacto negativo.

No obstante, a pesar de estas ventajas estratégicas, los ACV no son utilizados como herramienta de sostenibilidad en ninguna de las fases del proyecto: diseño, construcción, operación y desmantelamiento de EDAR.

## 3. SITUACIÓN ACTUAL

La metodología del ACV tiene una serie de factores que dificultan su aplicación metodológica en los tratamientos de aguas residuales, especialmente la falta de datos y de acuerdos sobre temas como la unidad funcional a emplear, alcance, etc.

Así mismo el ACV es una metodología compleja que necesita de mucho tiempo para su realización. Esta característica dificulta su aplicación en los proyectos de EDAR. Sería conveniente la utilización de metodologías más "reducidas" como el "Streamlined LCA" (Graedel, T.E.; 1998) o el "Análisis de Ciclo de Vida Simplificado" de la UNE 150041 EX (AENOR; 1998), que identifican las áreas del ACV que pueden ser omitidas o simplificadas, sin que de manera significativa cambien los resultados generales.

#### 4. PROPUESTAS PARA UN MODELO DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA ACV

Algunos resultados publicados sobre los efectos ambientales de la depuración de agua, ponen de manifiesto la necesidad de establecer un modelo que permita la comparación entre tecnologías, sistemas, componentes, etc., desde el punto de vista de la sostenibilidad. Algunos autores (Machado, A.P. et al.; 2006) (Flores-Alsina, X. et al.; 2010), afirman que los impactos de la depuración de aguas sobre el medio ambiente global son:

- El consumo de energía es el apartado con mayor impacto ambiental global.
- La descarga del efluente tratado en la EDAR es la máxima responsable de la eutrofización (98-99%).
- La aplicación del fango en el terreno es la mayor responsable de la ecotoxicidad (98-99%) por la presencia de metales pesados y de la acidificación (56-65%) por las emisiones de  $\text{NH}_4^+$ .

En base a estas conclusiones, podría considerarse que el impacto global decrece cuando el grado de tratamiento de las aguas residuales se incrementa, debido al menor impacto sobre la acidificación y la eutrofización.

Por el contrario; al aumentar el grado de tratamiento de las aguas residuales aumenta también el impacto en las otras categorías, debido al mayor consumo de energía y reactivos químicos (Lassaux, S. et al.; 2007).

Un ejemplo de la utilización del ACV como herramienta de sostenibilidad es la comprobación del beneficio ambiental a escala global que se produce cuando se sustituye 1 m<sup>3</sup> de agua limpia por 1 m<sup>3</sup> de agua depurada (Friedrich, E. et al.; 2009).

Este resultado es muy significativo puesto que fomenta el uso del agua regenerada en sustitución de la utilización de agua limpia en actividades que no necesitan agua de tanta calidad: agricultura, riego de jardines, lavado de calles, etc.

Actualmente son prácticamente inexistentes los modelos de depuración de aguas residuales utilizables en los estudios de ACV. Para poder hacer estos modelos y que sean útiles en la toma de decisiones, es necesario sentar las bases para su diseño, es decir, concretar cuáles serán la unidad funcional, los límites del sistema, etc.

##### 4.1 Definición de objetivos y alcance.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta de sostenibilidad aplicable a los proyectos para estudiar la sostenibilidad de las fases de construcción, operación y desmantelamiento de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas, pero es igualmente útil para comparar tecnologías de depuración; fases de estas u optimizar procesos.

El alcance de esta herramienta a las fases mencionadas de la vida de una EDAR es materia de discusión debido a su complejidad:

- Aplicación en la fase de operación (Balkema, A.J. et al.; 2002) (Renou, S. et al.; 2008).
- Aplicación a la fase de construcción y operación (Foley, J. et al.; 2007) (Lundin, M. et al.; 2000).
- Aplicación a la fase de construcción, operación y desmantelamiento (Lundie, S. et al.; 2005) (Emmerston, R.H.C. et al.; 1995).

De las tres fases de un proyecto, la fase de operación de las EDAR, tiene un impacto mucho mayor que la de construcción (Lundie, S. et al.; 2004) (Renou, S. et al.; 2008),

que, a su vez, tiene similar impacto para las diferentes alternativas de construcción (Tillman, A.M. et al.; 1998); por lo que será más práctico el uso de la metodología ACV como herramienta de sostenibilidad en el caso de la fase de operación.

A esta circunstancia hay que añadir que el inventario de datos es muy difícil de obtener para las fases de construcción y desmantelamiento pero relativamente sencillo para la fase de explotación.

##### 4.2 Unidad funcional.

Una unidad funcional es la cuantificación de las salidas funcionales del sistema que se estudia. El propósito de establecer una unidad funcional es proporcionar una referencia para todas las entradas y salidas, necesaria para asegurar la representatividad de los resultados. Siempre debe definirse y debe ser medible. La definición correcta de la unidad funcional de esta fase es, por tanto, imprescindible.

Varias son las unidades funcionales propuestas para los ACV de EDAR:

- El volumen de aguas residuales tratadas en la EDAR en un año (Renou, S. et al.; 2008).
- 1 m<sup>3</sup> de agua (Rihon, A.C. et al.; 2006).
- 1 m<sup>3</sup> de agua de la calidad especificada para el proceso (Friedrich, E. et al.; 2009).
- El tratamiento del agua residual producida por un habitante-equivalente (e-h) durante un año (Tillman, A.M. et al.; 1998).
- Cantidad de fango generado en el proceso de depuración (Hospido, A. et al.; 2008).

La primera discusión es sobre la naturaleza misma de la unidad funcional: El producto final es el agua depurada, pero, de este producto final ¿qué es más representativo, el agua o la contaminación depurada?

La contaminación hace referencia a los habitantes-equivalentes o a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) depurada en el proceso de "fabricación" del agua depurada. La DBO<sub>5</sub> tiene dos particularidades:

- Es un proceso analítico con un % de error más o menos elevado.
- Como su mismo nombre indica, el análisis de DBO<sub>5</sub> necesita de un periodo de 5 días para obtener su resultado.

Por el contrario; si consideramos el volumen de caudal tratado, en contraposición con la DBO<sub>5</sub>, sus características principales son:

- Su medida mediante caudalímetro es fiable.
- Su medida mediante caudalímetro es instantánea.

De esta forma; parece claro que la unidad funcional debería ser el m<sup>3</sup> de agua residual tratada como proponen algunos autores.

Pero caben dos posibilidades en referencia al lugar donde se mide este m<sup>3</sup> de agua residual. Si se mide el agua a tratar o el agua tratada:

- En la entrada de la planta de tratamiento (agua a tratar).
- A la salida de la planta de tratamiento (agua tratada).

Si se mide el agua a la entrada de la EDAR, el caudal de agua a la entrada no es realmente el caudal influente de agua a tratar. Por lo general, para ganar cota de agua y que esta fluya por toda la EDAR por gravedad, a la entrada de la EDAR nos encontramos con una arqueta de descarga, con o sin pozo de gruesos, de la red de saneamiento y un posterior bombeo de elevación.

Pero este bombeo no sólo eleva el agua a tratar, sino que a este pozo de bombeo vierten todos los drenajes de la planta, por lo que el caudalímetro de la entrada mide la suma de ambos caudales.

El caudalímetro de la salida, en cambio, sólo mide el caudal del que se realiza el vertido. Este tampoco es el caudal influente real porque habrá que descontar pérdidas por evaporación, aerosoles, etc., pero será el caudal más real de los que puedan medirse.

De hecho, los costes variables de mantenimiento y explotación, aquellos que cobran las empresas explotadoras en función de los m<sup>3</sup> tratados en la EDAR, se cobran en función de los m<sup>3</sup> medidos en este caudalímetro de salida. Sin embargo; el m<sup>3</sup> de agua depurada no es uniforme pues varía temporalmente (de forma diaria, semanal, mensual y estacional), por lo que deberá referirse a un factor temporal.

Si este es lo suficientemente amplio, anual, por ejemplo, representará un valor medio en lo referente a la contaminación, de forma que se habrán unido los dos conceptos (caudal y carga) en uno sólo.

Por tanto; proponemos que la unidad funcional debería ser (Guardino, R.; 2011): “m<sup>3</sup> anuales de agua residual depurada medida en el caudalímetro de salida de la EDAR”.

#### 4.3 Límites del sistema.

En la fase de Definición de Objetivos, los “límites del sistema” definen los procesos y etapas del sistema que van a considerarse en el estudio.

Los “límites del sistema” se definen en la norma UNE EN ISO 14044 (ISO; 2006b) como la interfaz entre el proceso del sistema y el medio ambiente u otros productos del sistema: Son flujos de materia o energía que se han consumido o se descargan en el medio ambiente sin transformación humana anterior (o posterior). Determinan los elementos que deben considerarse en el sistema a estudiar. Un riesgo a considerar es que la posibilidad de elegir los límites del sistema entre varias alternativas tiene como resultado que las conclusiones del ACV se puedan ver afectadas. Variaciones en los límites del sistema pueden producir resultados desiguales (Lundin, M. et al.; 2000).

El primer paso deberá consistir en dejar fuera del sistema aquellos flujos de entrada y de salida que no van a cambiar de forma significativa los resultados del estudio.

Posteriormente se deberán considerar cuales son elementos mínimos a estudiar en el sistema que, en el caso del ACV de la fase operación, son los que se refieren a:

- Las emisiones atmosféricas.
- El balance de energía.
- La fabricación de reactivos y su transporte.
- La naturaleza, el transporte y destino final de los residuos.
- La naturaleza, el transporte y destino final de los fangos en exceso.

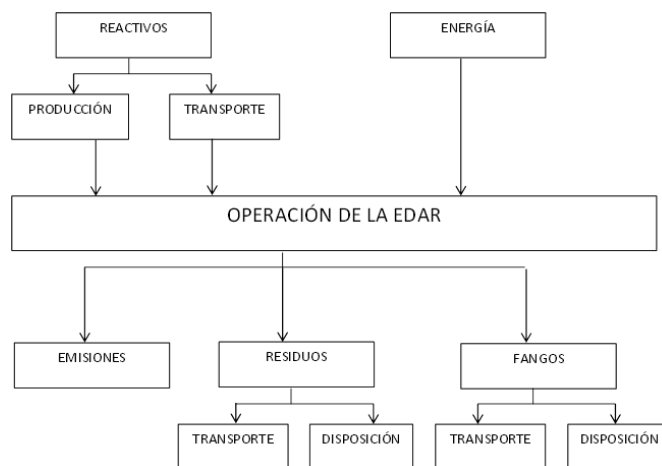


Ilustración 2: Límites del Sistema de la Fase de Operación de la EDAR.

#### 4.4 Base de datos del Análisis del Inventario.

La calidad de la “base de datos” es fundamental para el inventario. La base de datos requiere una gran cantidad de información para la realización del inventario y debe ser lo más ajustada posible a las condiciones locales.

Estos datos tienen que estar referenciados a la región o país de referencia. No son de utilidad las bases de datos “tipo” de algunos programas comerciales de ACV, ya que estos tienen una fuerte tendencia a estandarizar los datos. El impacto correspondiente a la producción de energía es el impacto más discutible en todos los ACVs. En el aspecto económico, el coste energético representa alrededor del 27% de los costes totales de explotación (Guardino, R.; 2010) y el 20% de los impactos globales (Halleux, H. et al.; 2006) de una EDAR, por lo que debe considerarse como un componente fundamental.

En el caso de la energía, no será igual el resultado que se obtendrá considerando el mix energético español con 18,61% de origen nuclear, 29,46% de gas natural y 15,67% del carbón en 2008 (González, et al; 2010), o el mix francés con el 72,9% de origen nuclear o el noruego con 99,2% de energía de origen hidroeléctrico (Ortiz, M. et al.; 2007), por lo que deben utilizarse, preferiblemente, modelos de aplicación local.

Cuando el ACV se realice únicamente del proceso de mantenimiento y explotación muchos de los datos necesarios podrán ser aportados por el operador de la planta y tendrán una alta fiabilidad.

## CONCLUSIONES

El ACV es una herramienta de sostenibilidad que no se utiliza en la actualidad en las distintas fases de proyecto de una EDAR.

Para el empleo de los ACV en los proyectos de depuración será necesario:

- Una metodología simplificada.
- Unificar la definición de la unidad funcional.
- Definir claramente los límites del sistema.
- Disponer de bases de datos locales para el inventario.

El ACV deberían ser utilizados en estos proyectos para:

- Estudiar la sostenibilidad de las distintas fases de proyecto (incluido diseño): construcción, operación y desmantelamiento de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas.

- De las fases citadas, la fase de operación es la que presenta más interés.
- Comparar tecnologías de depuración; fases de estas u optimizar procesos.
- Calcular el impacto global del ciclo de vida de la EDAR.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AENOR; 1998. UNE 150041 EX: Análisis de Ciclo de Vida Simplificado. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España.
2. Balkema, A.J. et al. (2002). Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water* 4, pp. 153-161.
3. Comisión Europea (1992). Hacia un desarrollo sostenible: V Programa Comunitario de política y actuación en materia de medio ambiente y desarrollo sostenible. COM (92)23. Bruselas, Bélgica.
4. Emmerson, R.H.C. et al. (1995). Life cycle analysis of small sewage treatment processes. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, n° 9, pp. 317-325.
5. Flores-Alsina, X. et al. (2010). Multiple-objective evaluation of wastewater treatment plant control alternatives. *Journal of Environmental Management*, Vol. n° 91, pp. 1193-1201.
6. Foley, J. et al. (2007). Life Cycle Assessment of Biological Nutrient Removal Wastewater Treatment Plants. 3rd International Conference on Life Cycle Management. Zurich, Suiza.
7. Friedrich, E. et al. (2009). Environmental life cycle assessments for water treatment processes. A South African case study of an urban water cycle. *Water SA*, Vol. n° 35, num. 1, pp. 73-84.
8. González, M. (2003). Análisis de ciclo de vida de materiales, productos y servicios: Una herramienta de gestión ambiental para el desarrollo sostenible. Departamento de Proyectos de Ingeniería. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
9. González, M., et al. (2010). Valoración del impacto de la generación de electricidad en España en 2008, mediante el Eco-indicador 99. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Barcelona, España.
10. Guardino, R. (2010). Tratamiento de aguas residuales. Master de Gestión Integrada de Prevención, Medio Ambiente y Calidad. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
11. Guardino, R. (2011). Tratamiento Sostenible de Aguas Residuales Urbanas. Tesis Doctoral. Departamento de Proyectos de Ingeniería. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
12. Graedel, T.E. (1998). Streamlined Life-Cycle Assessment. Ed. Prentice Hall. New Jersey, USA.
13. Halleux, H. et al. (2006). Comparison of life cycle assessment methods, application to a wastewater treatment plant. 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Leuven, Bélgica.
14. Hospido, A. et al. (2008). A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain). *Int. J. LCA* n° 13 (1), pp. 57-64.
15. ISO (2006a). ISO 14040: Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. International Organization for Standardization. Ginebra, Suiza.
16. ISO (2006b). ISO 14044: Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices. International Organization for Standardization. Ginebra, Suiza.
17. Kirk, B. et al. (2005). Methods for comparing wastewater treatment options. National Decentralized Water Resources Capacity Development Project, NDWRCDP n° WU-HT-03-33. Washington University, St. Louis, MO, USA.
18. Lassaux, S. et al. (2007). Life cycle assessment of water: from the pumping station to the wastewater treatment plant. *Int. J. Life Cycle Assessment*. Vol. 12, n° 2, pp. 118-126.
19. Lundie, S. et al. (2004). Life Cycle Assessment for sustainable metropolitan water systems planning. *Environ. Sci. Technol.* n° 38, pp. 3465-3473.
20. Lundie, S. et al. (2005). Methodology for Evaluating the Overall Sustainability of Urban Water Systems. Centre for Water & Waste Technology. University of New South Wales. Kensington, Gran Bretaña.
21. Lundin, M. et al. (2000). Life cycle assessment of wastewater systems: Influence of system boundaries and scale on calculated environmental loads. *Environ. Sci. Technol.* n° 34, pp. 180-186.
22. Machado, A.P. et al. (2006). Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities: Energy-saving systems versus activated sludge. 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 23-29 de septiembre de 2006. Lisboa, Portugal.
23. Ortiz, M. et al. (2007). Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town. *Desalination* n° 204, pp. 121-131.
24. PMI (2008). Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK). Project Management Institute. Newtown Square, PA, USA.
25. Renou, S. et al. (2008). Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of Cleaner Production* n° 16, pp. 1098-1105.
26. Rihon, A.C. et al. (2006). Application of the LCA methodology to water management from the pumping station to the wastewater plant". *Industrial Chemistry Department*. University of Liège. Liege, Belgium.
27. Tillman, A.M. et al. (1998). Life cycle assessment of municipal waste water systems. *Int. J. LCA* n° 3 (3), pp. 145-157.
28. Unión Europea (1995). Carta de Valencia. II Conferencia de Ministros y Responsables Políticos de las Regiones de la Unión Europea en materia de Medio Ambiente. Valencia, España.