

## Artículo Científico

**Análisis del ciclo de vida ambiental de tipo “gate to gate” (de puerta a puerta) de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

Autor: Alejandro Rojas Rodríguez  
Ingeniero Civil, M.Sc. Ingeniero Sanitario, ERIS-USAC, Guatemala  
Dirección para recibir correspondencia: alerojas916@gmail.com

Coautor: Adán Pocasangre Collazos  
Coordinador y Catedrático de la Maestría en Ingeniería Sanitaria ERIS-USAC, Guatemala  
Dirección para recibir correspondencia: adan.pocasangre@crs.org  
Recibido 20 de febrero de 2017 Aceptado 19 de Junio de 2017

**Resumen**

El presente artículo busca contribuir a la aplicabilidad del concepto del análisis de ciclo de vida (ACV) de tipo “gate to gate” (de puerta a puerta, es decir, se analiza el impacto ambiental desde la entrada de las aguas residuales en la planta de tratamiento hasta su salida) en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, compuesta por la tecnología de filtros percoladores. La metodología del ACV aplicada tuvo como objetivo identificar y cuantificar los impactos ambientales de cuatro categorías; dando como resultado una generación de 0 MJ/m<sup>3</sup> para la categoría de agotamiento de los recursos abióticos, 0,0336 kg eq PO<sub>4</sub><sup>-</sup>/m<sup>3</sup> para la eutrofización, 0,2563 Kg eq CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> para el cambio climático y un índice de carga contaminante (ICC) de 56,21 para la categoría de contaminación de cargas contaminantes a un cuerpo receptor.

Finalmente se plantea realizar un aprovechamiento de los subproductos, biogás, agua y lodo tratado, de manera que se puedan minimizar los impactos ambientales generados producto del tratamiento de las aguas residuales de la ciudad universitaria.

**Palabras claves:** Impacto ambiental, carga ambiental, eutrofización, cambio climático, agotamiento de los recursos abióticos.

**Abstract**

This article aims to contribute to the applicability of the “Gate to Gate” Life Cycle Analysis (LCA) concept (that is to say, it analyzes the environmental impact from the moment the waste water enters the treatment plant until it exits) in the wastewater treatment plant of the University of San Carlos of Guatemala, which has percolator filter technology. The applied ACV methodology aimed to identify and quantify the environmental impacts of four categories. Resulting in a generation of 0 MJ / m<sup>3</sup> for the abiotic resources depletion category, 0,0336 kg eq PO<sub>4</sub><sup>-</sup> / m<sup>3</sup> for eutrophication, 0,2563 kg eq CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup> for climate change and a pollutant load index (ICC) of 56,21 for the pollution of pollutant loads to a receiving body category.

Finally, it is proposed to make use of biogas and treated water and sludge sub-products in order to minimize the environmental impact generated by the waste water treatment of the university city.

**Key words:** Environmental impact, environmental load, eutrophication, climate change, exhaustion of abiotic resources.

**Introducción**

El ACV es una metodología que se inició en Missouri, Estados Unidos, (1969), que permite identificar la distribución de las cargas ambientales a lo largo de la vida útil de un producto o proceso, identificando y cuantificando el uso de materia, energía y las emisiones al entorno para determinar el impacto que el uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y así evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. Se entiende por una carga ambiental, la cantidad de contaminante que

llega al medio o la cantidad de recursos extraídos del mismo.

En este artículo se efectúa un análisis de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En ella recaen todas las aguas residuales generadas en la ciudad universitaria. Lo cual influye posteriormente en un impacto al ambiente.

Para ello, se realiza un estudio integral del proceso de tratamiento de la planta de aguas residuales, según

las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua tratada y los impactos al ambiente asociados. Lo anterior se realiza basándose en el análisis del ciclo de vida (ACV) de la planta como tal y de los elementos que actúan en cada unidad. Para esto se utilizan datos, cálculos y conversiones necesarias para determinar los impactos ambientales que se pueden crear. De esta forma se aborda de manera integral el aspecto ambiental.

Finalmente, se presenta los resultados extraídos del estudio realizado y las alternativas de mejora.

## Antecedentes

Los estudios de ACV inicialmente fueron desarrollados para analizar productos o materiales. El desarrollo del primer método de cálculo de impacto ambiental con base en una metodología tipo ACV fue realizado en 1969, por Harry E. Teasley Jr., director de la División de Envases de "The Coca-Cola Company". Encargó un estudio al Midwest Research Institute, (MRI) con el objeto de determinar las cantidades de energía, materiales e impactos ambientales asociados a lo largo del ciclo de vida de los envases, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. A este trabajo se le denominó "Análisis del perfil ambiental y de recursos" (Hunt y Franklin, 1996); sin embargo, con el tiempo estos estudios han evolucionado hasta evaluar los impactos ambientales de procesos, como por ejemplo, el tratamiento de aguas residuales.

La primera referencia encontrada sobre estudios de ACV aplicados al tratamiento de aguas residuales, fue en 1997 cuando Roelevel et al. (1997) utilizó esta metodología para evaluar la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales en Holanda. Una de las conclusiones principales de este estudio fue, que esta clase de estudios deben aplicarse a nivel regional y no nacional, dadas las diferencias sustanciales del tipo de aguas a tratar.

La mayoría de los estudios que se han realizado están centrados en la evaluación de la operación de las PTAR desde un punto de vista integral y comparativo; sin embargo, es necesario analizar los estudios de manera separada según la capacidad de las instalaciones, dado que las etapas que forma el tratamiento pueden ser muy diferentes.

Por otro lado el Dr. Santiago Gassó de la UPC en España, (2012) puntualizó sobre ciertas consideraciones relevantes del ACV en las PTAR's:

- La etapa de construcción es responsable de 25% al 35% del potencial de calentamiento global en una PTAR.
- El funcionamiento de la PTAR se considera mucho más relevante que el resto de las fases (construcción, puesta en marcha y demolición/desmantelamiento).
- El impacto de la etapa demolición/desmantelamiento es prácticamente insignificante.

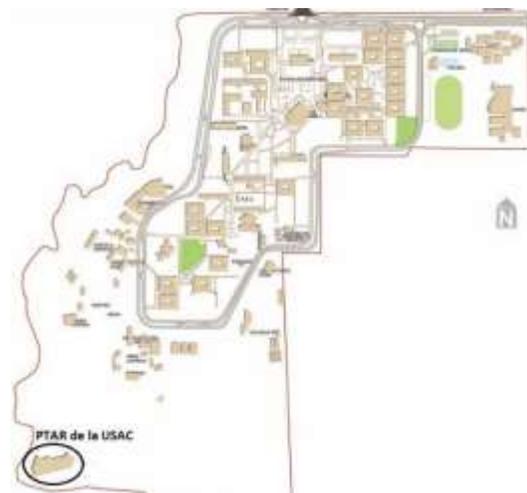
Algunos autores afirman que los impactos del tratamiento de aguas residuales sobre el medio ambiente global se basan en los siguientes aspectos:

- El consumo de energía es el apartado con mayor impacto ambiental global.
- La descarga del efluente tratado en las PTAR es la máxima responsable de la eutrofización.
- La aplicación del lodo en el terreno es la mayor responsable de la ecotoxicidad y la acidificación por las emisiones de amonio.

## Ubicación del proyecto

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala se encuentra ubicada dentro de la ciudad universitaria, en la zona 12 de la ciudad de Guatemala, figura 1. Esta colinda al norte, sur y este con los terrenos de la granja experimental de la ciudad universitaria y al oeste, con la colonia Monte María y una quebrada al medio donde se descargan las aguas tratadas de la planta.

Figura 1. Mapa de ubicación de la PTAR



Fuente: USAC, modificado por Alejandro Rojas R, 2017.

## Metodología

El análisis del ciclo de vida es una herramienta de sostenibilidad en la gestión integral de las aguas residuales, y se basa en la norma ISO 14040 e ISO 14044 2006; este análisis está basado en cuatro fases: la definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación de impactos y la interpretación de los resultados, (ver figura 2).

Figura 2. Diagrama de las fases de un ACV



Fuente: ISO 14040, 2006.

### Definición de objetivo y alcance

Medir el impacto ambiental generado en el tratamiento de las aguas residuales de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de acuerdo a las entradas y salidas del proceso, de manera que se pueda determinar estrategias para la reducción de los mismos.

La evaluación del proceso toma en cuenta únicamente las entradas/salidas del proceso de tratamiento, es por esto que se le denomina de tipo "gate to gate" (de puerta a puerta), es decir, se analiza el impacto ambiental desde la entrada de las aguas residuales en la planta de tratamiento hasta su salida.

### Unidad funcional

Para este estudio la unidad funcional por elección es el metro cubico aforado en el afluente.

### Sistemas y subsistemas

La PTAR de la Universidad de San Carlos de Guatemala se compone de un sistema de tratamiento bajo la tecnología de filtros percoladores como su proceso biológico principal. Este sistema ha sido dividido en varios subsistemas para su análisis; pretratamiento y tratamiento primario (subsistema 1),

tratamiento secundario (subsistema 2), tratamiento de lodos (subsistema 3), y transporte y uso de subproductos si lo haya (subsistema 4).

### Límites del sistema

El ACV realizado toma en cuenta únicamente las entradas/salidas (afluente/efluente) del proceso de tratamiento, excluyendo el impacto asociado a insumos e infraestructura de la PTAR; es decir, se identifican y cuantifican los impactos desde que el agua entra a la planta hasta que sale.

### Parámetros tecnológicos y de evaluación

El sistema de tratamiento analizado consta de la tecnología de filtros percoladores, se caracteriza por ser un proceso físico y biológico, bajo un proceso aerobio que se enfoca en la remoción de materia orgánica, DBO<sub>5</sub>, de un caudal determinado.

Las categorías de impacto seleccionadas y los indicadores (*la representación cuantificable de una categoría de impacto del ACV*) de categorías para reflejar los impactos ambientales relacionados con el sistema tecnológico bajo estudio se presentan a continuación:

- Agotamiento de los recursos abióticos
  - Energía
- Cambio climático
  - Metano, (CH<sub>4</sub>).
- Eutrofización
  - Nitratos, (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).
  - Fosfatos, (PO<sub>4</sub><sup>-</sup>).
  - Demanda química de oxígeno, (DQO).
- Contaminación de carga contaminante
  - Demanda bioquímica de oxígeno, (DBO<sub>5</sub>).
  - Sólidos suspendidos totales
  - Temperatura
  - Potencial de hidrogeno, (pH).
  - Oxígeno disuelto
  - Coliformes fecales

### Análisis del Inventario

En esta fase se cuantifican las entradas y salidas del sistema, lo cual requiere la realización de los correspondientes balances de masa y energía de los subsistemas considerados en el ciclo de vida del proceso de tratamiento. En esta fase generalmente se consume y se invierte el mayor tiempo y la mayor cantidad de recursos.

En esta fase la metodología propone establecer los diagramas de flujo de los subsistemas definidos, (ver figuras 2, 3, 4 y 5), el plan de recolección de datos de entradas/salidas y la recolección de datos.

Diagramas de flujo de los subsistemas

Figura 2. Subsistema 1 de la PTAR USAC

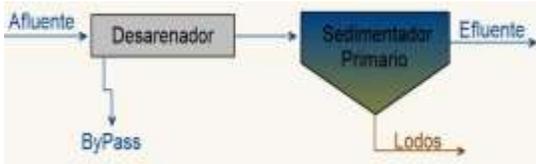


Figura 3. Subsistema 2 de la PTAR USAC

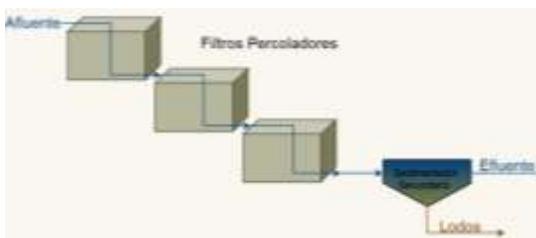


Figura 4. Subsistema 3 de la PTAR USAC



Figura 5. Subsistema 4 de la PTAR USAC



Plan de recolección de datos

El plan de recolección de datos se conforma por la definición de los lugares donde se tomaron las muestras, la determinación del número de muestras recolectadas (9 en cada punto, para un total de 27), y la frecuencia y método de laboratorio a utilizar.

La toma de muestras se realizó en tres puntos; Entrada de aguas residuales a la PTAR (subsistema 1), salida tratamiento primario (subsistema 1) y descarga de agua tratada (subsistema 2). Adicional a esto se estimó teóricamente las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) (subsistema 3).

La determinación del número de muestras a recolectar en cada punto se determinó con la ayuda del software "Epidat 3.1"; dando como resultado nueve muestras en cada punto.

A los datos recolectados se les realizó una prueba de normalidad bajo el método de Shapiro-Wilk con el objetivo de conocer qué valor entre la media y mediana utilizar para los datos recolectados y posterior evaluación de impacto.

La frecuencia con la que se desarrolló el muestreo y los ensayos de laboratorio fue semanal en los meses de octubre 2016 y febrero-marzo 2017, bajo los métodos definidos en el "Standard Methods".

Recolección de datos

Una vez establecido el plan de recolección de datos, se procede a hacer la recolección de los mismos. Los datos de inventario recolectados en la PTAR de la Universidad de San Carlos de Guatemala, incluyen las entradas y salidas del agua, y el consumo de electricidad, tablas 1 y 2.

Evaluación de Impactos

Para la evaluación de los impactos de ciclo de vida de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala se utilizó la metodología "CML 2001" (Instituto de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Leiden) elaborada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los Países Bajos y modificada para la investigación, así como también, el ICC (índice de carga contaminante), desarrollado en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala por un panel de expertos nacionales e internacionales en el tema, basándose en el índice de calidad de aguas (ICA) de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) de los Estados Unidos.

Metodología Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden (CML 2001)

• **Clasificación**

Se asignaron los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado (ver tabla 3). Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de tratamiento de las aguas residuales. Estas categorías representan los impactos ambientales de interés a los cuales se quieren asignar los resultados del inventario del ciclo de vida; es decir,

los impactos ambientales de los cuales se desean obtener resultados.

- **Caracterización de parámetros**

Una vez que cada parámetro del ICV (inventario de ciclo de vida) se ha asignado a una o más categorías de impacto ambiental a través de la clasificación, se compara su valor con respecto al parámetro de referencia de dicha categoría. Esto se lleva a cabo a través de los factores de caracterización de cada parámetro, y representan la contribución de un parámetro a una determinada categoría de impacto en relación al parámetro de referencia en dicha categoría. Cada parámetro es multiplicado por su correspondiente factor de caracterización, que se obtiene de acuerdo a la metodología de EICV que se haya determinado emplear en el análisis (para este caso, CML 2001). De este modo se pueden obtener valores con unidades equivalentes, los cuales pueden ser sumados para medir la contribución de los parámetros a esa categoría de impacto.

En la tabla 4 se muestra el resultado de la caracterización del proceso de 1 m3 del afluente tratado por la PTAR de la USAC.

- **Normalización de categorías**

Esta etapa permite la adimensionalización de las categorías y la comparación entre las mismas.

De una manera más simple, es la conversión de los resultados de la caracterización a unidades globales neutras, multiplicando cada uno por un factor de normalización, tabla 4. A través de estos factores se representa el grado de contribución de cada categoría de impacto sobre el problema medioambiental. Para esto también se toma en cuenta el método del CML 2001.

**Metodología índice de carga contaminante (ICC)**

Las curvas de clasificación o curvas de funciones (gráficas definidas por el INSF) determinan el subíndice para cada parámetro. Posteriormente éste es multiplicado por el factor de ponderación que indica la importancia que las variables tienen para la calidad de agua. El resultado de su aplicación, debe ser un número entre 0 y 100, donde 0 representa la calidad de agua fuertemente contaminada y 100 representa la calidad de agua aceptable, tabla 5. El resultado final es interpretado de acuerdo a una escala de clasificación, en la que el fondo representa el color correspondiente a cada rango, tabla 6.

## Resultados

### Metodología CML 2001

En las tablas 1 y 2 se muestran los valores obtenidos del afluente y efluente de la PTAR.

Tabla 1. Datos del afluente de la PTAR de la USAC

Parámetros	PTAR USAC – Filtros percoladores	
<b>ENTRADAS</b>		
<b>AFLUENTE</b>		
DQO	kg/m3	0,483
DBO5	kg/m3	0,173
SST	kg/m3	0,246
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	kg/m3	0,001
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	kg/m3	0,028
Temperatura	°C	23
pH	unid pH	8
Coliformes fecales	kg/m3	10 462,000
OD	kg/m3	0,009
<b>DATOS DE BACKGROUND</b>		
Energía (total)	MJ/m3	0,000

Tabla 2. Datos del efluente de la PTAR de la USAC

<b>SALIDAS</b>		
<b>DESCARGA AL AGUA – EFLUENTE</b>		
DQO	kg/m3	0,027
Remoción DQO	%	94,390
DBO5	kg/m3	0,005
Remoción DBO <sub>5</sub>	%	97,130
SST	kg/m3	0,006
Remoción SST	%	97,500
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	kg/m3	0,080
Remoción NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	%	0,000
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	kg/m3	0,025
Remoción PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	%	10,710
Temperatura	°C	19,700
Variación Temperatura	°C	3,200
pH	unid pH	5,75
Variación pH	unid pH	2,17
Coliformes fecales	kg/m3	95,602
Remoción Coliformes Fecales	%	99,090
OD	kg/m3	0,006
Variación OD	kg/m3	0,005
<b>EMISIONES AL AIRE</b>		
CH <sub>4</sub>	Kg/m3	0,009

En la tabla 3 se muestra el resultado de la clasificación de los indicadores según su categoría de impacto, escala, factor de caracterización y unidad de referencia

Tabla 3. Clasificación de los indicadores según su categoría de impacto, factor de caracterización y unidad de referencia

Categoría de impacto	Escala	Clasificación	Posible factor de caracterización	Unidad de referencia
<b>Agotamiento de los recursos abióticos</b>	Regional	Energía	Cantidad consumida	MJ
<b>Cambio Climático</b>	Global	CH <sub>4</sub>	Potencial de calentamiento global (PCG)	Kg. Eq CO <sub>2</sub>
<b>Eutrofización</b>	Local	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> DQO	Potencial de Eutrofización	Kg. Eq PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
<b>Contaminación de cargas contaminantes</b>	Local	DBO5 SST Coliformes fecales OD pH Temperatura	Potencial de Contaminación de cargas contaminantes	ICC

En la tabla número 4 se muestra los resultados de la caracterización y normalización de la fase de evaluación de impactos del ciclo de vida.

Tras la caracterización y normalización, se puede determinar que las categorías dentro del sistema o proceso de tratamiento, qué categoría genera un mayor impacto ambiental.

Tabla 4. Caracterización y Normalización de la fase de evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV).

ICV	Agotamiento recursos abióticos (MJ)	Cambio Climático (Kg eq CO2)	Eutrofización (Kg eq PO4)
0 MJ	x 1 = 0	-	-
0,009 kg CH <sub>4</sub>	-	x 28 = 0,2563	-
0,080 kg NO <sub>3</sub>	-	-	x 0,1 = 0,0080
0,025 kg PO <sub>4</sub>	-	-	x 1 = 0,0250
0,027 kg DQO	-	-	x 0,022 = 0,0006
<b>Caracterización (CML 2001)</b>	<b>0 MJ</b>	<b>0,2563 kg eq CO2</b>	<b>0,0336 Kg eq PO4</b>
<i>Factor de Normalización</i>	<i>x 6,32E-12</i>	<i>x 2,27E-14</i>	<i>x 7,53E-12</i>
<b>Normalización (CML 2001)</b>	<b>0</b>	<b>5,819E-15</b>	<b>2,531E-13</b>

\*Potencial del Calentamiento Global (GWP) a 100 años de los principales gases de efecto invernadero según, metodologías IPCC 2013 y CML 2001

**Metodología índice de carga contaminante (ICC)**

Con respecto a la metodología del ICC, el agua tratada obtuvo un valor de 56,21, catalogada dentro de la escala como un agua contaminada con un código de color "amarillo". La tabla 5 muestra la aplicación y el resultado obtenido en la categoría de

impacto denominada "contaminación de carga contaminante"; mientras que la tabla 6 muestra la escala de clasificación, el rango y color correspondiente al resultado del índice de carga contaminante obtenido.

Tabla 5. Aplicación del ICC para la PTAR de la USAC

Datos ICC					
Parámetro	Unidades	PTAR USAC	Factor de Ponderación	Subíndices	Subtotal PTAR USAC
SST	mg/L	6,14	0,16	97	15,52
DBO5	mg/L	4,96	0,23	55	12,65
pH	Unid pH	5,75	0,13	49	6,37
Oxígeno Disuelto	% sat	57,58	0,19	53	10,07
Temperatura	°C	0,64	0,12	91	10,92
Coliformes fecales	NMP/100ml	95 602,22	0,17	4	0,68
<b>Valor total y código de color del Índice de carga contaminante</b>					<b>56,21</b>

Tabla 6. Código de color del ICC

ICC			
Descriptor	Rango		Color
Fuertemente contaminada	0	33	Rojo
Contaminada	34	66	Amarillo
Aceptable	67	100	Verde

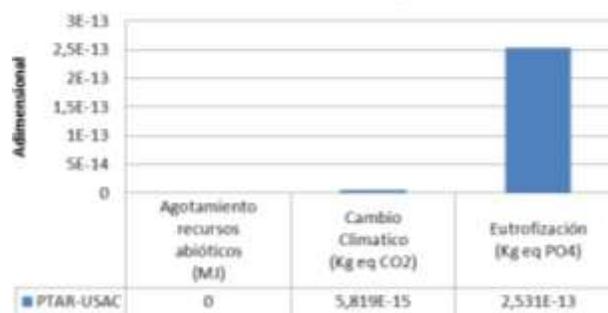
En síntesis, la tabla 7 muestra el resultado global del análisis del ciclo de vida (ACV) de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.

Tabla 7. Síntesis global del ACV de la PTAR de la USAC

ACV	Ambiental
<b>CML 2001</b>	
<b>Agotamiento recursos abióticos</b>	0 MJ/ m <sup>3</sup> 0*
<b>Cambio Climático</b>	(0,2563 Kg eq CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) 5,819E-15*
<b>Eutrofización</b>	(0,0336 kg eq PO <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> ) 2,531E-13*
<b>ICC</b>	
<b>Índice de carga contaminante</b>	Contaminada (56,21)
*Valores adimensionales	

Los resultados de la evaluación de impactos ambientales de la PTAR de la Universidad de San Carlos, bajo la metodología CML 2001 se muestran en la figura 6.

Figura 6. Impactos generados en la PTAR producto del proceso de tratamiento del agua, metodología CML 2001.



### Interpretación de resultados

De acuerdo a los impactos ambientales evaluados en la PTAR de la ciudad universitaria, la eutrofización es el que tiene un mayor peso, esto debido que el sistema de tratamiento se compone de un proceso aerobio que ayuda a la nitrificación del agua durante el recorrido de la misma por las diferentes unidades de tratamiento de la planta. En relación a esto, se propicia el incremento de algunos otros impactos como la ecotoxicidad acuática.

Con respecto a la disminución de los recursos abióticos, la categoría de agotamiento de recursos abióticos no tuvo impactos, ya que en la PTAR no

llega el servicio eléctrico ni se utiliza energía para ningún proceso de operación. Esta categoría se evaluó usando el método de línea de base descrito por CML (2013), tomando como referencia las reservas finales y las tasas de extracción. Los resultados se expresan como combustibles fósiles consumidos y se indican en equivalentes de MJ por  $1\text{m}^3$ .

En cuanto al calentamiento global, los resultados con un horizonte de 100 años, muestran que la PTAR genera  $0,256\text{ kg de CO}_2\text{ eq. por m}^3$ , que corresponden a aproximadamente  $31\,445,12\text{ Kg de CO}_2\text{ eq. al año}$ . Esto hace la tercera categoría de mayor impacto. Este impacto está asociado principalmente a la producción de  $\text{CH}_4$  (metano) en el subsistema 3, debido al biogás producido en la digestión anaerobia por el manejo de biosólidos y la inexistencia de un programa de recuperación del mismo para la generación de electricidad.

De acuerdo al análisis realizado, el subsistema 3 (digestor y secado de lodos) es el que más contribuye a los efectos del calentamiento global, seguido por el subsistema 1 (pretratamiento y tratamiento primario).

Es importante mencionar que las emisiones de gases de efecto invernadero están principalmente relacionadas con el consumo de energía; por lo que, este sistema y tecnología de tratamiento que no contempla energía para su operación, reduce el impacto ambiental en la categoría de cambio climático, más aún, si se compara con tecnologías como lodos activados o cualquier otra dependiente de energía para su buen funcionamiento.

Por otro lado, el resultado de la evaluación de impactos de la PTAR de la Universidad de San Carlos, bajo la metodología ICC muestra que el efluente de la planta es un agua contaminada, donde los coliformes fecales y los valores de potencial de hidrógeno son los más influyentes en este resultado.

## Conclusiones

La PTAR de la Universidad de San Carlos de Guatemala tiene un sistema y tecnología de tratamiento favorable a los diversos impactos. Obteniendo un impacto equilibrado entre las diferentes categorías.

La evaluación ambiental dio como resultado que el índice de carga contaminante con un valor de  $56,21$  y catalogando al agua como contaminada es el impacto más relevante que genera la planta de tratamiento, seguido de los aportes a la eutrofización ( $0,036\text{ kg eq PO}_4/\text{m}^3$ ) y al cambio climático ( $0,2563\text{ Kg eq CO}_2/\text{m}^3$ ),

mientras que la categoría de agotamiento de los recursos abióticos tiene un impacto nulo, ya que la planta no utiliza energía para ninguna actividad operacional.

El afluente de la PTAR obtuvo un índice de carga contaminante con un valor de  $56,21$ , dando como resultado un agua contaminada. Con este resultado el agua cumple con la normativa nacional para el vertimiento de aguas residuales a un cuerpo receptor, sin embargo, podría mejorar la operación y mantenimiento en el aspecto técnico, así como implementar algún tratamiento terciario que permita obtener un agua con un valor aceptable, y por ende una mayor diversidad de alternativas para la reutilización del recurso.

Por otro lado, es crucial iniciar un plan de aprovechamiento de los subproductos (biogás, agua y lodo tratado) que permita mitigar los impactos ambientales que la PTAR genera. Si bien es cierto son menores que los generados por otras tecnologías, no es un motivo para omitir implementar una economía circular con el agua residual, que conserve su valor a través del reúso y la reasignación.

Todo el aprovechamiento de estos tres subproductos (biogás, agua y lodo tratado) viene a reducir los impactos al ambiente con la reducción de la eutrofización, el cambio climático y la contaminación de carga contaminante al cuerpo receptor, como también a reducir los costos en el ámbito económico.

El ACV representa un paso importante en el camino hacia un crecimiento sostenible en la infraestructura y la gestión como tal de las aguas residuales. Es una metodología capaz de integrar el aspecto ambiental con otros como el social, económico y técnico, y de esta forma sopesar todos los impactos y aspecto influenciados para la toma de decisiones, desarrollo innovador y sostenible.

## Referencias

- BiskaiLab. (2012). Metodología para el análisis de ciclo de vida de depuradoras de aguas residuales. Universidad de Deusto .
- Blanco, D., Collado, S., Díaz, M., Suárez, M., Pérez, J., & Sánchez, J. (Marzo-Abril de 2014). Análisis de la huella de carbono en una planta de tratamiento de agua tipo carrusel. *artículotécnicos*, 52-57.
- Centre, I. D. (s.f.). Tratamiento de aguas residuales en el contexto de cambio climático: Gases de efecto invernadero y análisis de ciclo de vida., (págs. 1-3).

- EC-JRC, 2011. General guide on LCA - Detailed guidance. Publications Office of the European Union. doi:10.2788/38479
- García, J., Herrera, I., & Rodríguez, A. (2011). análisis de ciclo de vida de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Caso: PTARM de Yautepec (Morelos, México). España: CIEMAT.
- González Benítez, M., Guardino Ferré, R., Calderón Igleasias, R., & Gracias Villar, S. (Enero-Marzo de 2014). El análisis de ciclo de vida como herramienta de sostenibilidad en los proyectos de tratamiento de aguas. AFINIDAD LXXI, 38-42.
- Hunt R., Franklin W. 1996. LCA -How it came about. Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. Int. J. LCA 1(1): 4-7.
- INHOBE. (2009). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Eusko Jaurlaritza Gobierno Vasco, Bilbao.
- ISO 14040, 2006. Environmental management life cycle assessment e principles and framework: International Standard 14040. International Standards Organisation. Genova.
- ISO 14044, 2006. Environmental Management Life Cycle Assessment e Requirements and Guidelines. International Standard 14044. International Standards Organisation. Geneve.
- Muñoz Ortiz, I., Molina Díaz, A., Fernández Alba, A., & Rodríguez A, R. (s.f.). www.consolider-tragua.com/. Recuperado el 19 de Julio de 2016, de [http://www.consolider-tragua.com/eventos/ADECAGUA/COMUNICACIONES/T\\_MU%C3%91%91%91\\_ORTIZ\\_et\\_al.pdf](http://www.consolider-tragua.com/eventos/ADECAGUA/COMUNICACIONES/T_MU%C3%91%91%91_ORTIZ_et_al.pdf)
- Noyola , A., Morgan Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Instituto de Ingeniería-UNAM, Ciudad de México.
- Noyola Robles, A., Güereca Hernández, L.P., Morgan Sagastume, J. M., Hernández Padilla, F., Padilla Rivera, A., Carius, C., y otros. (2013). Water and sanitation: LAC cities adapting to climate change by making better use of their available bioenergy resources. Instituto de Ingeniería-UNAM, Ciudad de México.
- Poch Barrera, A. (2013). Comparación medioambiental de dos plantas de producción de agua potable basada en el método ACV. Barcelona, España.
- Rintelen Fransitorra, Y. (Noviembre de 2013). upcommons.upc.edu. Recuperado el 19 de Julio de 2016, de <https://upcommons.upc.edu/browse?value=Rintelen%20Fransitorra,%20Yannick&type=aut hor>.
- Rojas Rodríguez, A. (2017). Análisis del ciclo de vida de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, Guatemala.
- United Nations Environment Programme. (2009). Guidelines for social life cycle assessment of products.
- Vega Rodríguez, J. (Noviembre de 2010). Análisis de ciclo de vida de sistemas de tratamiento de aguas residuales: influencia de los materiales utilizados. 96. Barcelona, España.
- Zambrano , D., Villarreal , C., Galvis, A., & Silva, J. (Marzo de 2009). Análisis de ciclo de vida en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Virtual Pro, 1-10.

## Información del autor

Ingeniero Civil, Alejandro Rojas Rodríguez, graduado de la Universidad Latina de Costa Rica en el año 2014. Con experiencia en el área de planificación, ejecución y supervisión, de obras civiles.

**MSc en Ingeniería Sanitaria, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS de la Universidad de San Carlos de Guatemala.**