

Análisis de la generación energética a partir del biogás obtenido en la planta de tratamiento de agua residual El Salitre (Bogotá)

Analysis of the generation of energy from the biogas obtained in the El Salitre wastewater treatment plant (Bogotá)

Lina María Rodríguez Cortés¹

¹ Ingeniera Ambiental. Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética de la Universidad de Barcelona. Profesora Asociada Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Carrera 5 Este # 15 - 82) Bogotá, Colombia. lmrodriguez@udistrital.edu.co

Recibido: 15/ago/2023 – Revisado: 30/sep/2023

Aceptado: 30/oct/2023 – Publicado: 01/dic/2023

Resumen La Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) El Salitre trata 7m³/s de agua residual de aproximadamente la mitad de la población de la ciudad de Bogotá. El biogás procedente de la digestión anaerobia de este proceso se compone principalmente de CH₄ y CO₂. Este trabajo se basa en la recolección y análisis de información de la planta, considerando los datos técnicos de la PTAR, las inversiones, el gasto energético actual y el potencial de ahorro de energía. En este caso se busca evaluar el autoabastecimiento de la planta con la energía disponible de sus subproductos a través de cogeneración. Analizando el escenario actual y los potenciales, se obtienen importantes mejoras en el aprovechamiento energético y la posibilidad de mejorar el proceso con energía térmica que no se aprovecha actualmente. A nivel económico se deben realizar elevadas inversiones que requieren mayor financiación y posiblemente incentivos gubernamentales que resultan rentables considerando la vida útil del sistema propuesto.

Palabras clave: autoabastecimiento; biogás; cogeneración; PTAR Salitre.

Abstract The El Salitre WWTP treats 7m³/s of wastewater from approximately half of the population of Bogotá city. The biogas from the anaerobic digestion of this process is mainly composed of CH₄ and CO₂ in smaller proportions. This paper analyzes the technical data of the WWTP, investments, current energy expenditure and potential for energy savings. In this case, the aim is to evaluate the self-sufficiency of the plant with the available energy of its by-products through cogeneration. Analyzing the current scenario and potentials, important improvements are obtained in energy use and the possibility of improving the process with thermal energy that is not currently used. At the economic level, high investments must be made that require more financing and possibly government incentives that are profitable considering the useful life of the proposed system.

Keywords: biogas; Cogeneration; Salitre WWTP; self-sufficiency.

1 Introducción

Los ríos suponen un 2 % de la superficie total de agua dulce en el planeta y son uno de los recursos naturales fundamentales para la vida (Duarte, et al., 2006).

Muchas poblaciones se asentaron cerca de un río, del que se abastecen. Entre los muchos beneficios que aportan estas fuentes hídricas se destacan como fuente de agua potable, uso para riego en la agricultura y medio para el transporte y comercio (Torre, 2017). Sin embargo, estos ríos también se han convertido en lugares donde va a dar toda la contaminación y los residuos sólidos de actividades domésticas e industriales, a tal punto que algunos de estos se consideran cuerpos muertos. El río Salween en China, considerado el más contaminado del mundo, el río de la Plata en Sudamérica, el río Ganges en India y el Nilo en África, son casos conocidos de contaminación hídrica y de cómo ésta afecta a la salud pública de sus poblaciones, extinguiendo especies de agua dulce, proliferando vectores y convirtiéndose en lugares de malos olores. (Gordillo, 2015).

La mitad de los tramos de los ríos de Asia, el 25 % de los ríos de América Latina y entre el 10 % y el 25 % de los ríos de África, están afectados por algún tipo de contaminación (Rojas, 2016). Pese a que el “Agua limpia y saneamiento” es uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), y Naciones Unidas sigue trabajando por garantizar el acceso universal al agua potable, cerca de 1000 niños mueren debido a enfermedades prevenibles relacionadas con el agua y el saneamiento. Según este organismo internacional, el 80 % de las aguas residuales se vierten sin tratamiento alguno.

Los procesos de eutrofización, el aumento desproporcionado de nutrientes como el fósforo producido por fertilizantes, pesticidas o heces de animales, cambian la estructura de los ríos y de sus ecosistemas y afectan a la biota que vive en su interior. Esta es sólo una de las causas del problema de contaminación, que ahoga estas importantes fuentes hídricas (Acciona, 2019).

Para el río Bogotá, los indicadores de calidad del agua muestran que éste se encuentra en buen estado en su nacimiento, pero que a medida que aparecen los asentamientos humanos y las actividades productivas se va degradando. La degradación en la calidad del agua de la cuenca alta se debe principalmente a la contaminación orgánica y bacteriológica procedente de vertimientos de aguas residuales domésticas y de las curtiembres. En cuanto a valores de demanda biológica de oxígeno, a la entrada de la PTAR, se registran un valor promedio en el afluente de 199,03 mg O₂/l (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2023).

La contaminación bacteriológica presenta índices elevados a lo largo del río. Con respecto a la contaminación por carga orgánica, el Distrito Capital aporta más de 200,000 ton/año, equivalentes al 85 % del total en la cuenca (Ramírez, 2013). En cuanto a los vertimientos de tipo industrial, sus aportes son grasas, aceites y contenidos de metales pesados como Cadmio, Cromo, Cobre, Plomo, Níquel y otros residuos peligrosos (García & Díaz, 2020).

Teniendo en cuenta la importancia de descontaminar los ríos y de integrar a las ciudades dentro de paisajes hídricos que mejoren no solo la calidad del agua sino la calidad de vida de los habitantes y las actividades productivas, está en marcha desde hace varias décadas el plan de saneamiento del río Bogotá. Adicionalmente, el Consejo de Estado, uno de los máximos tribunales del país, emitió la Sentencia sobre la descontaminación del río Bogotá el 28 de marzo del 2014 (Consejo de Estado, 2014). El Consejo ordenó el diseño y la implementación de medidas para descontaminar esta fuente y evitar la contaminación a futuro.

Dentro de estas medidas está la puesta en marcha de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), dentro de las cuales ya está construida y en fase operativa la PTAR El Salitre, que cuenta con tratamiento secundario de las aguas en el norte de la capital antes de devolverlas al cauce del río

(Secretaria Distrital de Ambiente, 2020). El principal producto de la planta es el agua tratada. Sin embargo, además existen otros subproductos del proceso, tales como sólidos gruesos, sólidos finos, grasas y arenas.

A nivel mundial, las PTAR se construyen con el objetivo de dar cumplimiento con los parámetros contenidos en el marco regulatorio. Por tanto, la definición del sistema de tratamiento depende de la eficiencia de este para la remoción de agentes contaminantes (O. Ashrafi et al, 2015).

Adicionalmente, al realizar el tratamiento de aguas residuales, se parte de unos objetivos inherentes a la protección del ambiente, los cuales van desde la protección y/o restauración de un cuerpo receptor de dichas aguas, hasta la salud de quienes habitan en las zonas aledañas a este cuerpo receptor, incluyendo la reutilización del agua con fines agrícolas y urbanísticos entre otros (Rivas, L. E. A., & Pimiento, N. N., 2019).

Sin embargo, la construcción y operación de las PTAR tiene asociados impactos como remoción de coberturas vegetales, generación de olores, ruidos, vibraciones y generación de residuos. En la actualidad, las PTAR de Colombia generan más de 300 toneladas de biosólidos al día. El 97 % de esta producción es generada por tres plantas: El Salitre (Bogotá), Cañaveralejo (Cali) y San Fernando (Medellín) (Rivas, L. E. A., & Pimiento, N. N., 2019).

Uno de los impactos más significativos de los sistemas existentes para el tratamiento de aguas residuales es a generación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), como consecuencia de los procesos de remoción y biodegradación de la materia orgánica presente en el agua objeto de tratamiento (Cristancho Montenegro, 2019). Cabe destacar que las plantas a gran escala, las plantas con biorreactores o los procesos anaeróbico-anóxico-óxicos, y las plantas sin tratamiento terciario tienden a ser más eficientes, lo que muestra la ventaja en co-beneficio de los contaminantes del agua y el control de GEI. 74 ciudades en China han tenido problemas ambientales debido a este fenómeno, siendo alguno de ellos causados por la presencia de plantas de tratamiento de agua residual ubicadas en el río Yangtsé (Nie, 2019).

En otros casos, a nivel mundial, se ha evidenciado que la producción de energía en las plantas de tratamiento puede cubrir la demanda de la propia planta, que es muy alto. Así, por ejemplo, en Brasil se puede obtener 23,6 GWh al año sólo con los lodos del estado de Minas Gerais, teniendo una eficiencia entre el 35% y el 46% dependiendo de las características del lodo (Aline Tathyana Alves, 2018).

Considerando un alcance local, según un análisis de la hoja de ruta para la reducción de emisiones de GEI en Cundinamarca, producto del tratamiento y eliminación de aguas residuales industriales, se generan 497 ktCO₂e que representa el 4 % de las emisiones del departamento en la categoría de descomposición aerobia de vertimientos o tratamiento de aguas residuales industriales. En dicha ruta, esta categoría se encuentra priorizada para focalizar los esfuerzos y evitar la dispersión de acciones en fuentes que no generarán un impacto significativo en las emisiones departamentales.

Particularmente, el biogás y los biosólidos, como subproductos del proceso, son muy importantes en cuanto a su posibilidad de aprovechamiento, por lo que cobran gran importancia dentro de un esquema de sostenibilidad, donde es posible que estos sean transformados en productos aprovechables que se reintegren al ciclo productivo de manera limpia, disminuyendo el impacto sobre el medio ambiente.

Los biosólidos generados, debido a la procedencia del agua que se trata en la planta, contienen un alto porcentaje de nitratos y fosfatos, pero no excede de los niveles permitidos por la norma para metales pesados, por lo que son potencialmente aptos como fertilizantes orgánicos para agricultura y como enmienda de suelos para recuperación de terrenos. Actualmente son aprovechados en un proceso autorizado por la autoridad ambiental para su recuperación al sur de la ciudad.

El biogás, por su parte, puede ser aprovechado para la generación de energía, que es utilizada en la misma PTAR, reduciendo a su vez los gases de efecto invernadero generados por el proceso de depuración de aguas; potencial uso alineado con el objetivo de desarrollo sostenible sobre energía accesible y no contaminante. Considerando lo anterior, este trabajo

está concentrado en la evaluación desde el punto de vista técnico y económico del aprovechamiento actual y potencial del biogás generado en la producción de energía.

2 Descripción planta de tratamiento El Salitre

El Distrito Capital de Colombia contempló en un inicio el esquema de saneamiento del río Bogotá, bajo la operación de tres plantas de tratamiento proyectadas inicialmente para cada una de las cuencas (El Salitre, Fucha y Tunjuelo).

Esta planificación, considerando los costos de operación y los tiempos de implementación, se redujo a dos PTARs: la primera para el tratamiento de las aguas residuales generadas en la cuenca El Salitre y la segunda -PTAR Canoas- para las cuencas del Fucha, Tunjuelo y Soacha (Barreto, 2009). El primer proyecto que se implementó fue la PTAR El Salitre, eje

de este análisis, y actualmente está en fase de diseño la PTAR Canoas.

Actualmente la planta funciona bajo la administración de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EEAB, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2012). La PTAR El Salitre está localizada en el Distrito Capital, en el barrio El Dorado, en la Localidad de Engativá, y se ubica en la margen izquierda del río Juan Amarillo o Salitre, antes de su confluencia con el río Bogotá.

El tratamiento que se lleva a cabo actualmente en la PTAR El Salitre corresponde a, básicamente, tres fases: una de pretratamiento y tratamiento primario químicamente asistido, logrando remociones del 40 por ciento de materia orgánica y un 60 por ciento de sólidos suspendidos totales (SST); y una fase de Tratamiento Secundario (Lodos Activados) que logra remociones hasta de un 90 % de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y SST que entró en operación recientemente. En la siguiente figura se puede ver de manera esquemática cómo opera la planta.

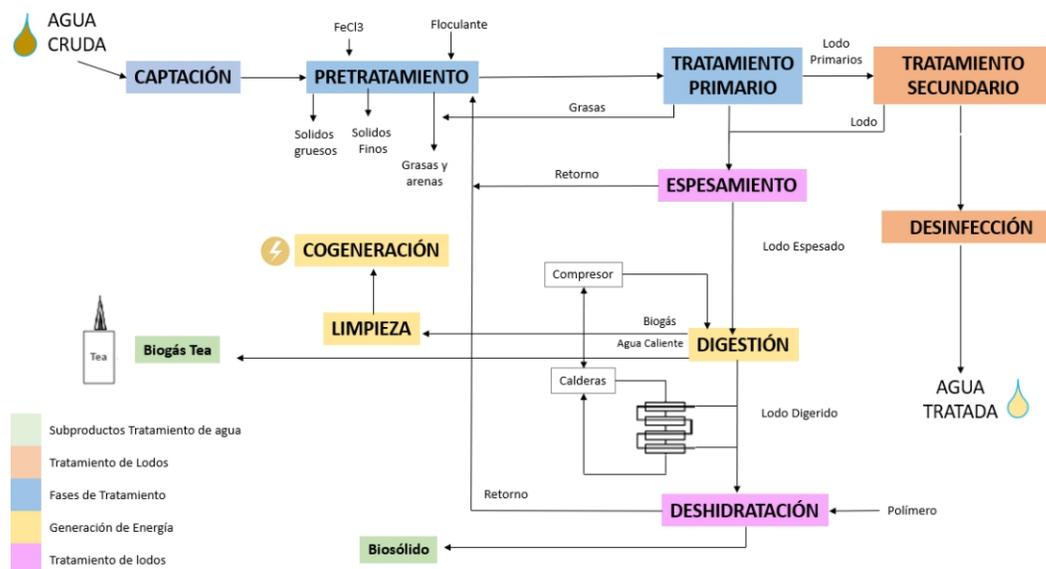


Figura 1. Funcionamiento PTAR Salitre

3 Metodología

El estudio tiene un enfoque técnico-económico. La parte técnica se basa en la generación de energía bajo

la relación existente entre potencia, capacidad calorífica y caudal de gas generado.

La potencia se obtiene de las fichas técnicas de los motogeneradores adquiridos para la PTAR Salitre, la

cual varía de acuerdo con el combustible a emplear, sea biogás o gas natural. La capacidad calorífica se obtiene de datos proporcionados en campo por las pruebas realizadas en la planta de tratamiento y de la del gas natural que es un dato conocido. Con esta generación de energía se obtienen varios datos teniendo en cuenta los volúmenes de biogás generados y los equipos de cogeneración disponibles.

La información del gasto energético promedio de la PTAR se obtuvo de los informes mensuales de la operación de la planta, los cuales se publican en la página web del acueducto de manera periódica para poder comparar los máximos de operación con los mínimos (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2023). Estos consumos energéticos se analizaron versus la generación de energía eléctrica a través de cogeneración, para establecer que tanto se puede autoabastecer la PTAR a partir de sus subproductos.

La información económica se obtuvo a través de un estudio de la Universidad de Navarra, una rendición de cuentas de la CAR al banco mundial y se constató con la información en la PTAR, en la cual se muestra la financiación de la puesta en marcha del sistema de tratamiento de aguas residuales y cuánto cuesta la iniciativa de cogeneración. Esto analizado en conjunto con el ahorro energético en la factura de cada escenario, muestra la viabilidad económica del proyecto y en cuanto tiempo se obtiene un retorno de la inversión y del préstamo realizado, empleando métodos sencillos como el *payback* y el valor presente neto.

4 Resultados

4.1 Análisis del biogás obtenido para generación energética

Según información de la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, en condiciones normales, se producirán alrededor de 33000 m³ de biogás al día, el cual se almacena en gasómetros y se utiliza de acuerdo con las necesidades de calentamiento y mezcla en los digestores (EEAB, 2018), además de la

generación de electricidad y calor mediante cogeneración.

En la siguiente tabla se relacionan las características del biogás generado a partir de la digestión anaerobia de la materia orgánica, producto del tratamiento primario y secundario del agua del río Bogotá.

Tabla 1 Características del biogás PTAR El Salitre

Parámetro	Valor
Metano (% vol)	69,03
Dióxido de carbono (CO ₂) (% vol)	30,97
Nitrógeno (N ₂) (% vol)	0,754
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S) (% vol)	0,0009
Poder calorífico teórico (KJ / m ³)	22400
Gravedad específica (aire: 1.00)	0,8255

Fuente Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018.

4.1.1 Uso actual

Actualmente, la PTAR El Salitre cuenta con 8 digestores anaerobios de 11000 m³, dentro de los cuales se estabiliza el lodo generado en el tratamiento del agua residual. Este proceso se realiza gracias a la acción de una serie de procesos microbiológicos encadenados, los cuales son requeridos para descomponer la materia orgánica y transformarla en agua y biogás. El biogás se produce en la última fase de la digestión anaerobia, siendo un biocombustible rico en metano que posee un alto poder calorífico, como se ve en las características de la Tabla 1.

Desde la implementación de la primera fase de la PTAR, se utiliza entre el 30 % y el 35 % de la producción de biogás para calentar los lodos espesados, debido a las características mesofílicas (aproximadamente 35 °C) de las bacterias encargadas de remover la carga orgánica del agua residual. El mantenimiento de la temperatura adecuada en los digestores anaerobios se consigue mediante la recirculación de una fracción del lodo digerido, el cual es calentado externamente antes de ingresar nuevamente al digestor. El calentamiento del lodo se realiza mediante un intercambiador de calor, el cual funciona gracias al poder calorífico del biogás.

Otra de las funciones del biogás empleado en la PTAR, es propiciar una mezcla adecuada entre el lodo digerido recirculado y el lodo crudo, con el fin de mantener una temperatura homogénea en todo el volumen del reactor. Esta mezcla se consigue mediante la inyección de una fracción del biogás en el centro de cada reactor, asegurando un contacto íntimo entre el lodo digerido y el lodo crudo. Esta energía utilizada en el proceso de digestión de la planta permite reducir costos de tratamiento. (A.M. Delgado Castellano, 2006).

En la implementación de la segunda fase de la planta que entró en operación recientemente, del 25 al 35 % del biogás generado en el proceso es usado en cogeneración, junto con gas natural, para generar calor y electricidad dentro de la PTAR, para su uso durante el tratamiento secundario y la línea de lodo. Finalmente, el 35 % restante es quemado de forma controlada en una tea.

El eje del sistema de cogeneración consiste en un motogenerador que convierte la energía química del combustible en energía eléctrica y calor. Se tienen 5 generadores dentro de la PTAR. El modelo usado es el CG 170, el cual está rateado para una potencia de 1564 kW para uso con biogás, aunque puede acercarse a los 2MW con gas natural exclusivamente.

El sistema implementado tiene las siguientes características:

(a) Combustible dual: funciona tanto con gas natural como con biogás, incluyendo un sistema de mezclas de ambos combustibles. Se aprovecha el biogás generado en la PTAR, pero a la vez se emplea también como combustible el gas natural, dado que este tiene un mayor poder calorífico y es mejor para la vida útil media de los equipos. Cabe destacar que a medida que se usa más biogás, se debe usar más aceite en el motogenerador.

(b) Paralelismo con la red: se refiere a que se puede comprar o adquirir energía cuando la planta de cogeneración es deficitaria y pudiendo aportar / vender a la red los sobrantes, en caso de existir.

(c) Recuperación de calor: se realiza con el agua de camisas y en la zona de gases de escape. Hay tres fuentes de generación de calor, de las cuales se recuperan 2 y una, la correspondiente al

aerogenerador de baja temperatura, se disipa al ambiente.

Como se mencionó anteriormente, se realiza una mezcla entre biogás y gas natural. En promedio se viene utilizando un 35 % biogás y 65 % gas natural. Bajo estas condiciones, actualmente la planta funciona con 3 generadores y, según datos observados en los informes de avance y seguimiento de la PTAR, actualmente alternan el funcionamiento, por lo que la generación media mensual con cogeneración, corresponde a 49,20 MWh al día. Adicionalmente, hay un uso de biogás en el sistema de digestión, correspondiente a un 30 % de su producción y equivalente a 9900 m³ al día. Lo que significa que se quema en la Tea un 35 % en promedio del biogás generado, como se resume en la Tabla 2.

Tabla 2 Uso actual del biogás en PTAR El Salitre

Proceso	Porcentaje	Q de biogás estimado m ³ /día
Reincorporación en el sistema de biodigestión	30 %	9900
Cogeneración	35 %	11550
Quema en Tea	35 %	11550
Total	100 %	33000

De esta forma, frente a la generación actual de biogás, se tienen 5 motogeneradores, los cuales están subutilizando, ya que hay más de 10000 m³ al día de biogás que se están quemando en una tea, y que podrían aprovecharse en generación de energía.

4.1.2 Uso potencial

Frente al uso actual se tiene entonces una potencia de generación de energía del biogás de 7820 kW - Asumiendo que solo se está empleando biogás y obteniendo la potencia de las especificaciones técnicas del equipo de generación de energía-. Es decir, se podría emplear 30240 m³ al día de biogás si la cogeneración funcionara a partir únicamente de este biocombustible, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$(1) Q = \frac{P \frac{kJ}{s}}{C \frac{kJ}{m^3}}$$

$$Q = \frac{7.820 \frac{kJ}{s}}{22.400 \frac{kJ}{m^3}} = 0,35 \frac{m^3}{s} = 30.240 \frac{m^3}{día}$$

Donde Q: Caudal
C: Poder calorífico
P: Potencia

Bajo este escenario, y teniendo en cuenta que aún se necesita el biogás para el sistema de lodos en reinyección y calentamiento de los biodigestores, con un volumen de 10500 m³, aún se disponen de 22500 m³ de gas que podría aprovecharse por completo en 4 de los motogeneradores, mientras que en el último se emplearía sólo gas natural, o bien se puede emplear en los 5 y se aprovecha el sistema de mezclas.

Cabe destacar que se está desperdiciando una fuente de calor en la cogeneración, que podría emplearse en la digestión anaerobia y así reducir el porcentaje de biogás recirculado en la línea de lodos. Aunque esto implica modificaciones en el diseño de la primera fase de planta, se aprovecha mejor la energía de los motogeneradores y se optimiza el uso del biogás.

Bajo este escenario se generarían 80,70 MWh al día, con el funcionamiento a pleno rendimiento de biogás en los 5 generadores, optimizando fuente de calor en digestión de lodos, cubriendo en promedio el 55 % de la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la planta; o 64,56 MWh al día empleando 4 generadores con uso de biogás y con el sistema como se tiene implementado actualmente.

Sin embargo, ya que el biogás cuenta con trazas de otros gases, se podría mejorar su porcentaje de metano mediante la eliminación del CO₂; este proceso se mejora se conoce como *upgrading*. Después de la transformación, el producto final se denomina 'biometano' y normalmente contiene entre un 95 % y un 97 % de CH₄ y entre un 1 % y un 3 % de CO₂. El biometano se puede utilizar como alternativa al gas natural. Actualmente en Europa el 13 % del biometano proviene de lodos de depuradoras (European Biogas Association, 2020). Si se consigue que el porcentaje de metano equivalga al 95 % se consigue un

combustible similar al gas natural, donde el volumen de biogás a emplear sería:

$$(2) Q = \frac{10.000 \frac{kJ}{s}}{38.988 \frac{kJ}{m^3}} = 0,256 \frac{m^3}{s} = 22.118 \frac{m^3}{día}$$

*En este cálculo de caudal volumétrico de biogás al día se consideró el poder calorífico del gas natural, ya que este se compone de 95 % de metano, y se contempló la potencia de los generadores a 2MW según las especificaciones técnicas del motogenerador.

Como es de esperar, la generación energética incrementaría en más del 15 % la producción de energía, empleando menos volumen de biogás y aprovechando los 5 motogeneradores que proporcionan 103,2 MWh al día, que, usando los mismos equipos, pero sin mejorar las condiciones del biogás. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, los escenarios en generación de energía se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Energía generada por cogeneración y cobertura de energía requerida por la planta

Escenarios	MWh por mes	% Demanda de Energía abastecida
Uso actual	1476,12	33,88 %
Uso del 100 % del biogás a generar en 5 generadores	2421	55,57 %
Usos del biogás en 4 motogeneradores y recirculación en tratamiento de lodos	1936,85	44,46 %
Cogeneración con biometano	3096	71,07 %
Energía demandada por mes: 4.356 MWh mes		

*En este cálculo de energía por cogeneración, se consideraron los valores del datasheet las condiciones actuales de operación y los escenarios propuestos. Para la energía requerida por la planta se realizó proyección en condiciones de máxima operación, es decir, tratando caudal de 7m³/s.

De esta manera la primera alternativa es cogenerar solo con biogás y la segunda es mejorar las características de este. En el biogás “enriquecido” la proporción de metano aumenta generalmente por encima del 96 %, para cumplir con los estándares de calidad del gas natural para uso en transporte y para inyección en la red eléctrica.

Haciendo un análisis únicamente con el mayor potencial energético de la cogeneración, que es mejorando el biogás, con porcentajes de metano cercano al 95 %, puede llegar a generar hasta un 70 % de la energía necesaria para la operación de la PTAR. Para este análisis se tendrán en cuenta 2 métodos que, según la investigación realizada, podrían ser los más desarrollados técnicamente y viables económicamente para su implementación, la remoción por lavado y la adsorción por oscilación de presión, aunque existen otros pasando por tecnologías que incluyen criogénesis, tecnologías biológicas, o la conversión catalítica de gases de efecto invernadero (CH₄ & CO₂) en gas de síntesis.

4.1.2.1 Water scrubbing (remoción por lavado)

La eliminación de CO₂ mediante *water scrubbing* como absorbente selectivo es una operación unitaria basada en la mayor solubilidad acuosa del CO₂ en comparación con la del CH₄ (26 veces mayor a 25 °C) (Sinnot R, 2005). Esta es hoy en día una tecnología madura, que representa aproximadamente el 41 % del mercado global de enriquecimiento del biogás, siendo considerado el método menos sensible a las impurezas de este biocombustible. La disponibilidad de un suministro de agua de suficiente calidad a bajo costo, a menudo determina la configuración del proceso implementado. Por ejemplo, la eliminación de CO₂ del biogás producido en las plantas de tratamiento de aguas residuales se ha realizado en lavadores de un solo paso, utilizando agua tratada a presión (6 - 10 bar), que después de la absorción se envía de vuelta a la línea principal de tratamiento de agua (Tynell Å, 2007).

4.1.2.2 Adsorción por oscilación de presión

La adsorción por oscilación de presión o PSA por sus siglas en inglés (Pressure Swing Adsorption), se basa en la adsorción selectiva de CO₂ sobre CH₄ en adsorbentes porosos con un área de superficie específica alta, como carbón activado, gel de sílice, alúmina activada, zeolita y adsorbentes poliméricos (Ryckebosch E, 2011). La exclusión por tamaño molecular y la afinidad de adsorción constituyen los mecanismos de separación de esta tecnología.

Tabla 4. Comparación tecnologías upgrading de Biogás

Parámetro	PSA	Remoción por lavado (PMS)
Demanda de electricidad (kWh/Nm ³ BG) ²	0,16-0,3	0,2 – 0,3
Demanda de calor (kWh/Nm ³ BG)	No	No
Pérdidas de CH ₄ %	1-2	~1
Presión de operación, bar	1-10	4-10
Temperatura operación °C	-	-
Separación de N ₂ y O ₂	Parcialmente	No
Necesidad de H ₂ O	No	Si
Separación de H ₂ S	Externo	Si

Fuente biogasupgrading.es, 2022; (Muñoz, 2015)

En la anterior tabla se comparan las tecnologías de upgrading que se presentan en este trabajo. De acuerdo con esta comparación, resulta mejor hacer el mejoramiento a través de lavado con agua, ya que tiene menos fuga de metano y presenta mejor eficiencia en remoción de agentes corrosivos y contaminantes como el H₂S, con una demanda de electricidad similar a la del PSA.

Además del uso en el mantenimiento de la temperatura de la fase de lodos, la inyección de biogás en los digestores y la generación de energía eléctrica que es usada en la fase secundaria del tratamiento de aguas residuales, el potencial incremento de la energía obtenida a través de la cogeneración con

biogás, puede emplearse en procesos como la mejora con hidrólisis térmica o el mismo biometano como combustible, por ejemplo, para los vehículos utilizados en el transporte de lodos.

La hidrólisis térmica consiste en calentar la superficie del lodo por encima de su punto de ebullición a presión, por inyección de vapor saturado, el cual es eficiente para disminuir la demanda química de oxígeno (DBO) y remoción de materia orgánica y lograr una mejor digestión anaerobia, y la producción de biogás. Esto funciona como pretratamiento para una producción de biogás, ya que controla y ayuda a remover sustancias limitantes para la digestión anaerobia. En China se han realizado estudios para la mejora de la eficiencia del proceso, añadiendo aditivos como cloruro de aluminio polimérico (PACI) y cloruro de hierro (III) (FeCl_3) (LanfengLia, 2020). Estos aditivos mejoran la remoción de sustancias que puedan llegar a afectar la digestión anaerobia, disminuyendo también la DBO, lo cual da como resultado que los lodos sean menos tóxicos. En España se han realizado proyectos piloto de tratamiento de lodos en siete plantas, mostrando cómo la hidrólisis térmica en lodos funciona como pretratamiento debido a su capacidad de remoción de sólidos, material orgánico y nitrógeno, teniendo eficiencia de una remoción del 50 % y, en el caso de una doble hidrólisis térmica una eficiencia del 80 %; generando un biosólido menos tóxico y más eficiente para un tratamiento final (Israel Diaz, 2020).

4.2 Análisis económico

El ciclo integral del agua (ciclo antrópico) incluye etapas como la captación, potabilización, transporte y distribución, consumo, vertido, depuración y reutilización. En la Tabla 5 se relacionan los datos relativos a los consumos de energía de dichas etapas.

Según los datos de la Tabla 5, si se desprecia la poca contribución de la desalinización, considerando que en países como Colombia estos métodos no son muy difundidos aún, la etapa que consume más energía es el proceso de depuración. El consumo medio de una depuradora es de 0,440 kWh/m³, casi el

doble de la distribución. Por tanto, la puesta en marcha de un plan de eficiencia y ahorro energético, requiere enfoque en esta etapa, ya sea en estrategias de ahorro o de buscar mecanismos de autogeneración, usando los subproductos del proceso.

Tabla 5 Ciclo integral del agua - antropológico. Gasto de energía

Etapa	Ratio kWh/m ³	GWh/año
Captación y transporte	0,230	184
Potabilización	0,070	53
Desalinización	3,300	40
Distribución	0,240	151
Depuración	0,440	294
Reutilización	0,100	3
Totales	1153	724

Fuente Agencia Catalana del Agua, Datos 2016-2018

El valor del promedio de caudal tratado al mes referenciado desde el año 2004 es de 10477752,65 m³, este valor con la ampliación de la planta a capacidad de 7 m³/s ascenderá a 18144000 m³ (EEAB, 2021). Teniendo en cuenta que según datos de operación desde 2018, para la PTAR El Salitre el ratio de consumo de electricidad es de 0,25KWh/m³, teniendo en cuenta la operación no sólo de la planta, si no de las instalaciones de oficina y que en paradas de la planta donde ha habido una disminución de tratamiento hasta del 95 % de la capacidad, el consumo eléctrico mínimo ha sido de 100000 a 150000 kWh al mes, el consumo mensual energético en condiciones de full operación será de aproximadamente 4356 – 4400 MWh al mes.

4.2.1 Análisis alternativa actual

Frente a la alterativa actual, la financiación del proyecto se realizó al 42 % con recursos propios de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y 58 % con un préstamo solicitado al BIRF - Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento. El préstamo dispone de un vencimiento a 14 años, vista tras la firma del contrato. En cuanto a los intereses que la Administración Pública pagará por este capital serán de un margen fijo sobre la tasa media de los últimos

ocho años del London Interbank Offered Rate (en adelante, LIBOR) (Jordi Salvador, 2019).

En la Tabla 6 se relacionan los costos en los que se incurrieron para la puesta en marcha de la planta de tratamiento. Para hacer el análisis económico se realizó mediante criterios estáticos de análisis muy sencillos, como tiempo de recuperación de la inversión (pay back) y criterios dinámicos, aplicando el Valor Anual Neto. Se tuvo en cuenta únicamente el costo de la estabilización de lodos y la recuperación de energía e infraestructura para operación y mantenimiento versus la energía ahorrada, contemplando una tasa de cambio de 1 Euro = 4100 pesos colombianos.

Tabla 6 Descripción y cuantía correspondiente a los lotes de control del proyecto PTAR Salitre Fase 2

Ítem	Descripción	Euros €
1	Adecuación del predio	1.773.971 €
2	Obras de aducción, tratamiento preliminar y primario	8.750.475 €
3	Tratamiento secundario y desinfección	10.379.540 €
4	Espesamiento y deshidratación de lodo	7.497.192 €
5	Estabilización de lodos y recuperación de energía	10.742.469€
6	Infraestructura para operación y mantenimiento	665.239 €
7	Sistemas auxiliares	4.351.006 €
Total		44.159.892 €

Fuente: (Jordi Salvador, 2019)

Para las ganancias o ingresos de esta implementación se tuvo en cuenta los ahorros en 3 escenarios definidos, basados en el precio por kWh de 2022 y considerando un incremento en el precio de la energía con la tendencia de los últimos 3 años. Los resultados se resumen en la Tabla 7.

4.2.2 Evaluación de alternativas

Para las alternativas propuestas de *upgrade* del biogás, al valor invertido en la cogeneración se le sumaron los sistemas de Water Scrubbing y PSA de acuerdo con las siguientes consideraciones:

Tabla 7 Ahorros en factura de energía por cogeneración y recuperación de lodos en 3 escenarios de aprovechamiento de Biogás

Escenarios	kWh por año	Costo en energía ahorrada al año (2022) en EUR
Uso actual	17713440	2874329,67
Uso del 100 % del biogás a en 5 generadores	29052000	4714218,44
Usos del biogás en 4 motogeneradores y recirculación en tratamiento de lodos	23242200	3771472,11

4.2.2.1 Water scrubbing

Los costes de inversión en lavadores de agua disminuyen linealmente de 5500 a 2500 € (Nm³/h) cuando la capacidad de tratamiento de diseño aumenta de 100 a 500 Nm³/h, y se mantienen relativamente constantes en 1800 – 2000 € (Nm³/h) para capacidades de planta superiores a 1000 Nm³/h (Bauer F, Persson T, Hulteberg C, Tamm D, 2013). Por otro lado, los costes de explotación oscilan entre 0,11 y 0,15 €/ Nm (200 – 300 m³/h), que pueden atribuirse tanto al consumo de energía (disminuyendo de 0,3 kWh/Nm a 500 Nm³/h a 0,2 kWh/ Nm a 2000 Nm³/h) y los costes de mantenimiento anual (2–3 % de los costes de inversión), ya que los costes de los consumibles suelen ser insignificantes. En este contexto, los principales procesos que demandan energía son la compresión de gas (0,10 – 0,15 kWh/Nm en instalaciones modernas de 6 – 8 bar), la compresión de agua (0,05 – 0,1 kWh /Nm) y la refrigeración por agua (0,01 – 0,05 kWh/m). La necesidad de una unidad de tratamiento de gases de escape, como incineradores, filtros de carbón activado o biofiltros para reducir el H₂S y el CH₄ extraídos del tanque de desorción, implican costos adicionales no considerados en la discusión anterior (Muñoz, 2015).

4.2.2.2 Adsorción por oscilación de presión. PSA

Los costos de capital en PSA disminuyen linealmente de 2700 € (Nm³/h) a caudales de diseño de 600 Nm³/h a 1500 € (Nm³/h) para plantas con una capacidad de 2000 Nm³/h (Bauer et al., 2013). Los requisitos de electricidad para la compresión de gas y la deshumidificación del biogás en el rango de 0,24 a 0,6 kWh /Nm generalmente se informan en la literatura, aunque una encuesta reciente de costos limita las necesidades de electricidad a 0,25 – 0,3 kWh/Nm (incluidos los oxidantes catalíticos de la reducción de las emisiones de gases de escape de CH₄) (Muñoz, 2015). El PSA no conlleva costes adicionales derivados de la adición de agua de reposición o calor para la regeneración del adsorbente.

De igual forma, para la estimación de ingresos o ganancias de esta implementación (valor de energía ahorrada) se tendrán en cuenta los ahorros definidos basados en el precio por kWh de 2022 y considerando un incremento en el precio de la energía con la tendencia de los últimos 3 años.

Tabla 8 Ahorros en factura de energía por cogeneración y recuperación de lodos en escenarios de aprovechamiento de Biometano

Escenario 2	kWh por año	Costo en energía ahorrada al año (2022) en EUR
Obtención de Biometano	37152000	6028591,61

Teniendo en cuenta el análisis económico realizado y los ahorros contemplados en la Tabla 8, se encuentra que lo más viable es emplear el 100 % del biogás, sin realizar enriquecimiento, ya que eso permite obtener un valor anual neto positivo y un tiempo de retorno de la inversión ya realizada con la retribución de energía ahorrada de 4 años. En todos los casos es posible recuperar la inversión en un tiempo inferior al de la deuda inicial de los mejoramientos de la planta de tratamiento de agua residual fase 2.

Sin embargo, es importante destacar que los costos de operación (OPEX) son mucho más elevados en los casos de enriquecimiento del biogás a través de wáter scrubbing y PSA por tratamiento al año, lo que significaría un incremento en el LCOE por la operación en el periodo analizado. Sin embargo, los impactos en reducción de emisiones constituyen un atractivo suficientemente alto ya que empiezan a cumplir el compromiso de captura de CO₂, acercando a la infraestructura al escenario de emisiones cero, mostrando resultados en corto plazo contemplando las metas a 2030.

Bajo estos escenarios económicos de igual manera conviene más invertir en lavado de CO₂ en términos tecnológicos y de gasto de energía, aunque se debe contemplar el gasto de agua que requiere esta solución, ya que puede incrementar la huella hídrica, así como el coste por el consumo de agua que al ser variable podría afectar el tiempo de retorno de la inversión con mejoras que varían de 9 a 12 años.

Finalmente se deben buscar más maneras de incentivar las instalaciones que incluyan energías renovables para hacer estas inversiones más atractivas e impulsar el cumplimiento de las metas nacionales bajo las cuales se ratificó el acuerdo de Paris. En este sentido, a través de la ley 1715 de 2014 se establecieron incentivos tributarios y arancelarios para aquellas empresas y maquinaria que favorezcan la eficiencia energética.

5 Conclusiones

El uso de los lodos para la generación de energía eléctrica, en el ciclo productivo del tratamiento de aguas residuales tiene impactos positivos. Uno de estos hace referencia a la reducción en la producción de energía eléctrica a nivel local, disminuyendo la demanda de energía frente a la red de distribución nacional, al reemplazar esta fuente de suministro energético por una fuente de energía derivada del consumo de biogás, ya que el consumo eléctrico de una PTAR es en promedio 294 GWh al año.

En el caso de la PTAR El Salitre, el uso del biogás para satisfacer necesidades de energía eléctrica

dentro de la instalación puede significar ahorros desde el 33 % que se implementa actualmente, subutilizando los motogeneradores; hasta de un 70 % obteniendo biometano bajo procesos de purificación o mejora del biogás.

El análisis de uso potencial justifica que en el diseño de la PTAR El Salitre, se haya considerado usar 5 motogeneradores ya que, si se usan al 100 % sólo con biogás, se está aprovechando en promedio el 90 % de lo generado diariamente.

Si se aprovecharan las 3 fuentes de calor de los generadores, efectivamente se necesitaría solo inyectar biogás para una mezcla adecuada entre el lodo digerido recirculado y el lodo crudo, cubriendo el uso de calor que se tuvo contemplado en la primera fase, que es para mantener la temperatura de los digestores; razón por la cual se necesitaría emplear menos biogás en la fase de tratamiento de lodos, aprovechando más biocombustible en la cogeneración y reduciendo las emisiones que realiza la planta actualmente.

Dentro de los usos actuales se emplea energía térmica, implementado desde la primera fase, para mantener la temperatura en la digestión anaerobia, así como la inyección de biogás dentro de este proceso. Este uso ha sido ampliado en la segunda fase empleando en total cerca del 50 % del biogás generado en usos de energía eléctrica, en tratamiento secundario y calor. Sin embargo, al estar desaprovechando una fuente de calor dentro de la cogeneración y bajo la propuesta de aprovechar más el biogás a través del *upgrade* para obtención de biometano, se puede generar más electricidad y también emplear el calor generado en el mejoramiento de proceso como la hidrólisis térmica.

Las inversiones resultan de manera general poco atractivas teniendo en cuenta modelos de evaluación de proyectos con criterios dinámicos, considerando las altas tasas de impuestos que se manejan en Colombia y los intereses. Favorecer estos dos criterios, así como el impulso de la investigación, promoverá los proyectos de energías renovables.

Al respecto ya existe legislación que apoya este tipo de iniciativas, aunque no es muy difundido sus casos de implementación. En todo caso el *pay back* de

las opciones planteadas, es favorable ya que se da antes de terminar el pago de la deuda inicial de operación de la fase 2 de la planta de tratamiento de agua residual y es acorde con la vida útil de los sistemas de cogeneración, que por lo general es de 15 años.

Cabe destacar, que la vida útil de los motogeneradores depende de su mantenimiento y la inversión inicial resulta la más costosa, así que estos factores también influirán en la rentabilidad de las inversiones realizadas y de las que se proponen. En general mejorar el biocombustible también resulta en menos gasto de aceite lubricante y que los equipos duren más, al emplearse un gas con mayor pureza de metano.

Referencias

- A.M. Delgado Castellano, J. S. (2006). Modelamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales Salitre mediante el software WEST®. *Repositorio Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes*, 24.
- Acciona. (2019). *Sostenibilidad para todos*. Obtenido de Agua. RANKING DE LOS RÍOS MÁS CONTAMINADOS DEL MUNDO: https://www.sostenibilidad.com/agua/ranking-rios-mas-contaminados-del-mundo/?_adin=0872133180#carousel-gallery
- Aline Thyana Alves, R. M. (August de 2018). Analysis of biogas produced by the anaerobic digestion of sludge generated at wastewater treatment plants in the South of Minas Gerais, Brazil as a potential energy source. *Sustainable Cities and Society*, 41, 139-153. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.035>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol Adv.*, 452-466.
- Aqualia. (2021). *Bogotá - El Salitre*. Recuperado el 14 de abril de 2022, de <https://www.aqualia.com.co/es/ptar-salitre>
- Barreto, B. L. (2009). *Historia de la PTAR Salitre Rio Bogota*. Obtenido de [scribd: https://es.scribd.com/document/508037270/Historia-de-la-PTAR-Salitre-RIO-BOGOTA](https://es.scribd.com/document/508037270/Historia-de-la-PTAR-Salitre-RIO-BOGOTA)
- Bauer F, Persson T, Hulteberg C, Tamm D. (2013). Biogas upgrading—technology overview, comparison and

- perspectives for the future. *Biofuels Bioprod Bioref*, 7, 499–511. doi:10.1002/bbb.1423
- CA, Grande. (2011). Biogas upgrading by pressure swing adsorption. *Biofuel Eng Process Technol*. doi:10.5772/18428
- Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia Departamento Nacional de Planeación. (2004). *Estrategia para el manejo ambiental del río Bogotá*. Bogotá: Documento CONPES 3320 de 2004.
- Contraloría General de la República. (2005). *Estado de los Recursos Naturales*. Bogota.
- Cristancho Montenegro, D. L. (2019). Estimación de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del río Bogotá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*(18(34)), 25-44.
- Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo Buendía, M., . . . Simó, R. (2006). *Cambio Global. Impacto de la Actividad Humana sobre el Sistema Tierra*. CSIC. Consejo superior de investigaciones científicas. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10016/8520>
- Ecoforest. (2018). *Elaboración del diagnostico prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogota*. Bogotá.
- EEAB. (2018). *Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*. Recuperado el 13 de 04 de 2022, de PTAR Salitre > Productos de la PTAR Salitre > Biogás: https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/saneamiento/rio-bogota/ptar-salitre/productos-de-la-ptar-salitre/biogas!/ut/p/z0/f/y9CslwFEZfJUvmpBWL_a_EPFJSCQpul3NRQomlum9yKj290c3E85zt8QolaKA9P2wNZ9OASN6poi2ots5XMT_ttuZFVubscr1m1yM9LcRDqf5Ae7H2
- EEAB. (2021). *PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EL SALITRE. Informe de Actividades*. Bogota: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogota.
- EEAB, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogota. (2012). *GUÍA CONCEPTUAL SOBRE LA PTAR SALITRE*. Obtenido de https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/guia_concPTARSalitre.pdf
- European Biogas Association. (2020). *Informe Estadístico EBA*. Recuperado el 17 de 05 de 2022, de <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2020/>
- García, L., & Díaz, C. (2020). Contaminación por metales pesados (Pb, Hg y Cd) en el agua para riego de hortalizas proveniente del río Bogotá. *Contaminación por Mercurio en Bogotá y su Conurbano*, 37-61.
- Gordillo, O. L. (2015). *Parque lineal del río Bogotá, una herramienta de desarrollo urbano sostenible*. Obtenido de el presente trabajo de grado, plantea un parque lineal para el río Bogotá sentando las bases en cada una de las escala: <http://hdl.handle.net/10554/18171>
- Hardach, S. (2 de Diciembre de 2015). Londres: cómo el río Támesis fue rescatado de la muerte. *BBC Londres*, s.p. Recuperado el 17 de 04 de 2022, de https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/12/151120_vert_earth_rio_tamesis_yv
- Israel Díaz, A. D. (2020). Traceability of organic contaminants in the sludge line of wastewater treatment plants: a comparison study among schemes incorporating thermal hydrolysis treatment and the conventional anaerobic digestion. *Bioresource Technology*.
- Jordi Salvador, M. R. (2019). *CASO DE ESTUDIO PPP FOR CITIES PTAR El Salitre, Bogotá (Colombia)*. Universidad de Navarra. Navarra: IESE. doi: <https://dx.doi.org/10.15581/018.ST-493>
- LanfengLia. (2020). Relationship between the physicochemical properties of sludge-based carbons and the adsorption capacity of dissolved organic matter in advanced wastewater treatment: Effects of chemical conditioning. *Chemosphere*, 243.
- Muñoz, R. M. (26 de Septiembre de 2015). A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Rev Environ Sci Biotechnol*(14), 727–759. doi:<https://doi.org/10.1007/s11157-015-9379-1>
- Nie, E. Z. (1 de abril de 2019). Emission characteristics of VOCs and potential ozone formation from a full-scale sewage sludge composting plant. *Science of The Total Environment*, 659, pp 664-672. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.404>
- O. Ashrafi et al. (2015). Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. *Journal of Environmental Management*, 158, pp.146-157.
- Petersson A, W. A. (2009). Biogas upgrading technologies—developments and innovations. *IEA Bioenergy*, 37. Obtenido de http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/upgrading_rz_low_final.pdf
- Portal de noticias VetMarket. (21 de Nov de 2021). *Támesis, La maravillosa recuperación ecológica del río*.

- Obtenido de <https://vetmarketportal.com.ar/nota/2097/la-maravillosa-recuperacion-ecologica-del-rio-tamesis/>
- Ramírez, N. C. (2013). Umbral Río Bogotá – Proyecto de integración urbana multiescalar. *Pontificia Universidad Javeriana*, 46.
- Rivas, L. E. A., & Pimiento, N. N. (2019). Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 3-11.
- Rojas, A. G. (2 de Septiembre de 2016). La contaminación aumenta en la mayoría de los ríos de América Latina, África y Asia. *Diario El Pais*.
- Ryckebosch E, D. M. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass Bioenerg*, 35, 1633–1645. doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.033
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2004). *Programa de Descontaminación del Río Bogotá*. Recuperado el 09 de 05 de 2022, de Observatorio Ambiental de Bogotá: https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlim_download&p=4238
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2020). *INFORME DE AVANCE DEL CUMPLIMIENTO DE LAS ÓRDENES DE LA SENTENCIA*. Bogotá.
- Sinnot R. (2005). *Chemical engineering design*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Torre, F. B. (2017). Los recursos hídricos en el mundo: cuantificación y distribución. *Cuadernos de estrategia*, 21-70.
- Tynell Á, B. G. (2007). Microbial growth on pall rings: a problem when upgrading biogas with the water-wash absorption technique. *Appl Biochem Biotechnol*, 299-320.