

**EVALUACIÓN DEL COSTO ANUAL EQUIVALENTE DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LOS MUNICIPIOS DE CLIZA Y TOLATA****EVALUATION OF ANNUAL EQUIVALENT COSTS OF THE WASTEWATER TREATMENT PLANTS OF THE MUNICIPALITIES OF CLIZA AND TOLATA****Gustavo Heredia<sup>1</sup>, Becerra Orellana<sup>1</sup>, Oliver Saavedra<sup>2</sup>, Ivette Echeverría<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Fundación Aguaturya, Cochabamba, Bolivia<sup>2</sup>Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA),

Universidad Privada Boliviana

oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 07 de noviembre 2019, aceptado para publicación el 07 de diciembre 2019)

**RESUMEN**

El objetivo de este estudio es analizar todos los costos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de los Municipios de Cliza y Tolata, en la región del Valle Alto de Cochabamba. El estudio utiliza la metodología denominada Costo Anual Equivalente (CAE) con la intención de determinar no solamente los costos de inversión de la planta, sino también todos los costos relacionados con la operación y mantenimiento de la planta en el tiempo. Las PTAR de Cliza y Tolata tienen 10.000 y 3.200 beneficiarios respectivamente. El costo total de inversión de la PTAR Cliza es de 533.950 USD. El costo anual equivalente de esta PTAR utilizando una tasa de descuento del 5% es de 60.591 USD/año. De este monto, el 68% (41.179 USD/año) corresponde al CAPEX y el 32% (19.412 USD/año) corresponde al OPEX. El costo total per cápita es de 6,06 USD/cápita por año y el costo total por m<sup>3</sup> de agua tratada es de 0,29 USD/m<sup>3</sup>. El costo total de inversión de la PTAR de Tolata es de 254.524 USD. El costo anual equivalente de esta PTAR utilizando una tasa de descuento del 5% es de 51.541 USD/año. De este monto, un 66 % (34.048 USD/año) y un 34 % (17.493 USD/año) corresponden al CAPEX y OPEX respectivamente. El costo total per cápita es de 16,11 USD/cápita por año y el costo total por m<sup>3</sup> de agua tratada es de 0,40 USD/m<sup>3</sup>. Es evidente que los costos de Operación y Mantenimiento (O&M) son significativos y esto confirma la importancia de contar con una estrategia que garantice la sostenibilidad financiera del servicio en el tiempo. En particular la tecnología UASB de las PTARs Cliza y Tolata tiene bajo consumo de energía por tanto sus OPEX son más bajos que otras tecnologías convencionales. Recomendamos estimar el costo anual equivalente y registrar todos los costos anuales involucrados en la operación de las PTAR. La estimación de los costos utilizando los métodos descritos en este estudio ayudará a hacer comparaciones apropiadas entre las tecnologías y, finalmente, a tomar mejores decisiones en la planificación e implementación de futuros sistemas de tratamiento.

**Palabras Clave:** Costo Anual Equivalente, OPEX, CAPEX, Cliza, Tolata, PTAR.**ABSTRACT**

The main objective of this study is to analyze all the costs involved when implementing a domestic Wastewater Treatment Plant (WWTP) in the municipalities of Cliza and Tolata, in the region of the Valle Alto in Cochabamba - Bolivia. This study uses the methodology known as Annual Equivalent Cost of sanitation systems in order to determine not only initial investment costs, but also all recurring costs related to operation and maintenance. The WWTP of Cliza and Tolata serve 10000 and 3200 inhabitants respectively. The total investment cost of WWTP of Cliza is 533,950 USD. The Annual Equivalent Cost of this plant using a 5% discount rate is 60,591 USD/year. Out of this amount, 68% (41,179 USD/year) corresponds to the Capital Expenditure (CAPEX) and 32 % (19,412 USD) to the Operational Expenditure (OPEX). The total cost per capita is 6,06 USD per year and the cost per cubic meter of treated water is 0,29 USD. The total cost of the WWTP at Tolata is 254,524 USD. The Annual Equivalent cost of this plant using 5% discount rate is 51,541 USD/year. Out of this amount, 66% (34,048 USD/year) corresponds to CAPEX and 34 % (17,493 USD) to OPEX respectively. The total cost per capita is 16.11 USD/year USD and the cost per cubic meter of treated water is 0.40 USD. It is clear that Operation and Maintenance (O&M) costs are significant, and this confirms the relevance to develop financial strategies to guarantee the sustainability of the service provision in the long run. Particularly, the Upflow Anaerobic Sludge Bed reactor (UASB) technology of these plants has low energy consumption and the OPEX costs are lower than other conventional technologies. We do recommend using the Annual Equivalent Cost described in this study in order to make fair comparisons between the technologies and, ultimately, to make better decisions in the planning and implementation of future treatment systems.

**Keywords:** Annual Equivalent Cost, OPEX, CAPEX, Cliza, Tolata, WWTP.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existen grandes beneficios económicos y sociales para aquellas sociedades que cuentan con infraestructura en saneamiento básico operando eficientemente. La falta de servicios en saneamiento básico apropiados tiene un efecto económico negativo. Por ejemplo, un estudio reciente ha estimado que el costo de no contar con buenos sistemas de saneamiento alcanza los 223 billones de USD [1]. En algunos países esto representa hasta el 2,5% del Producto Interno Bruto.

La relación costo-beneficio (BCR de su sigla en inglés) ha sido propuesto para demostrar el retorno económico global; al invertir un dólar americano USD en servicios de saneamiento básico, se espera obtener un ahorro en inversiones en el sector salud. Esta relación BCR se ha estimado en 5,50 USD para un promedio mundial. Para el caso de Latinoamérica y el Caribe se ha estimado en 7,30 USD [2]. Es decir que, en nuestra región, cada dólar invertido en saneamiento genera 7,30 dólares en beneficios.

Una manera de mejorar el saneamiento básico incluye varias opciones desde letrinas, redes de alcantarillado sanitario, plantas de tratamiento y tanques sépticos entre otras alternativas. En Bolivia solo el 60% de la población cuenta con acceso a saneamiento básico, según indicadores de desarrollo del banco mundial (<https://datos.bancomundial.org/indicador>). Debido a su importancia, los tomadores de decisiones como también los actores clave del saneamiento básico requieren datos e información sobre los costos para implementar soluciones al tratamiento de aguas residuales domésticas y así incrementar el acceso a agua tratada a la población. Esta evaluación de costos es especialmente necesaria para el tratamiento de aguas residuales domésticas puesto que la literatura especializada cita solamente costos de inversión [3] y hay muy poca información disponible y publicada que incluya costos de operación y funcionamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en el contexto latinoamericano.

Este estudio analiza tanto los costos de inversión como los costos de operación y mantenimiento de dos plantas de tratamiento en Bolivia y se obtiene un costo total anual expresado en USD/cápita por año y en USD/m<sup>3</sup> de agua tratada. De esta manera se contará con un parámetro estándar que permita valorar y comparar las PTAR estudiadas desde la perspectiva financiera frente a otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales o con PTAR de distinto tamaño.

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se realiza una breve descripción del contexto en que se implementaron las plantas de tratamiento estudiadas.

### 2.1.1 La PTAR municipal de Cliza

La PTAR de Cliza está ubicada en la región del Valle alto de Cochabamba a una altura de 2718 m.s.n.m. El municipio de Cliza tiene un clima frío y árido que se caracteriza por un invierno seco con precipitaciones de entre 2-20 mm por mes (abril a octubre) y un verano cálido y lluvioso con precipitaciones entre 20-130 mm por mes (noviembre a marzo). La temperatura media anual en Cliza es de 16.6°C y presenta una precipitación anual de 494 mm. El Municipio tiene una vocación agrícola especializada en la producción de maíz. Debido a esta producción y a la baja precipitación pluvial existe una gran demanda de agua para riego y por lo tanto el reúso de las aguas residuales tratadas se convierte en un recurso altamente valorado.

La PTAR de Cliza está compuesta por un cárcamo de bombeo desde donde se eleva el agua residual que llega a la planta. Este cárcamo tiene una profundidad de 7 metros por debajo de la superficie. Un equipo de pre-tratamiento mecanizado se encarga de remover todos los sólidos mayores a 6 mm de diámetro y separar las arenas. Posteriormente el agua pasa por un tanque de homogenización y luego es distribuida en 5 módulos de tratamiento en paralelo donde cada módulo cuenta con dos reactores anaerobios de flujo ascendente tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed reactor) y dos biofiltros de grava sin plantas (humedales artificiales) horizontales de flujo horizontal sub-superficial. También cuenta con 5 cámaras desgrasadoras, además de un área para el secado de lodos [4]. Esta planta es propiedad del Gobierno Autónomo Municipal de Cliza, opera desde el año 2014 y atiende a una población aproximada de 10.000 habitantes.

### 2.1.2 La PTAR municipal de Tolata

La PTAR de Tolata está ubicada en la región del Valle Alto de Cochabamba, al sudoeste del municipio y en la parte más baja de la comunidad. Esta localización favorece el flujo de aguas del sistema de alcantarillado por gravedad, y, por tanto, reduce los costos de operación y mantenimiento [5]. La PTAR de Tolata está compuesta por un cárcamo de bombeo dotado de un cesto de rejillas previo al pozo de bombeo para la separación de sólidos gruesos, un tamiz rotativo para la separación de sólidos finos de tamaño comprendido entre 0,5 y 3 mm, una desgrasadora para la separación del material graso en suspensión de la fase líquida por medio de flotación natural, 2 bioreactores anaeróbicos compartimentados (BAC-H) que operan en paralelo, 2 biofiltros de grava de flujo horizontal, 2 biofiltros de grava de flujo vertical, una cámara de contacto con cloro para la desinfección que al momento no se encuentra en operación y 1 lecho para el secado de los lodos que son retirados periódicamente de los BAC-H [6]. La PTAR de Tolata es propiedad del Gobierno Autónomo Municipal de Tolata, empezó su operación en el año 2018. La PTAR ha sido proyectada para atender a una población de 3.200 habitantes y actualmente sirve a una población de 2.705 habitantes.

### 2.2 Modelo de gestión

El modelo de gestión apropiado al contexto local y a los requerimientos de los Municipios de Cliza y Tolata se determinó con el concurso de autoridades municipales de los gobiernos municipales. El modelo de gestión elegido entre varias alternativas es el que se presenta a continuación en la Figura 1.



**Figura 1:** Modelo de gestión.

En septiembre del 2014 el GAM Cliza (Propietario de la infraestructura) suscribió un convenio específico para la operación, mantenimiento y monitoreo de la PTAR Cliza con la fundación Aguatuya por un periodo de 5 años. Se contrató a Aguatuya con la finalidad de que esta PTAR sea manejada inicialmente por una entidad especializada, hasta que el GAM cuente con los recursos humanos y técnicos necesarios y/o decida operar la PTAR por cuenta propia. Una situación similar se presentó en 2018 entre el GAM de Tolata y Aguatuya.

## 3.- METODOLOGÍA

El estudio utiliza la metodología denominada Costo Anual Equivalente (CAE). De acuerdo al International Water and Sanitation Centre (IRC), los costos de CAE incluyen tanto los costos de construcción como de mantenimiento tanto en el corto como en el largo plazo. Toma en cuenta las necesidades tanto de “hardware” como de “software”, operación y mantenimiento (O&M), mantenimiento de capital, costo de capital, protección de fuentes y las necesidades de soporte tanto directo como indirecto [7]. Dado que el propósito principal del presente estudio es determinar el costo de la tecnología de tratamiento de aguas residuales, el trabajo se enfoca principalmente en los costos de inversión y de O&M de la planta. Los costos de soporte directo e indirecto como ser campañas educativas, capacitaciones y fortalecimiento institucional han sido excluidos del análisis.

### 3.1 Determinación del CAPEX

Los gastos de capital o *Capital Expenditure* (CAPEX por sus siglas en inglés) son la agrupación de costos de inversión de la infraestructura (obras civiles), conexiones hidráulicas, equipos eléctricos y mecanizados. La suma del costo de inversión total en la PTAR se determina sumando los costos de inversión de todos los componentes de la PTAR.

Para determinar el costo anualizado de la PTAR, es decir el CAPEX, se deben tomar en cuenta el tiempo de vida de cada componente (en años) y una tasa de descuento utilizando la fórmula de la ecuación (1):

$$CAPEX = \frac{P0*i*(1+i)^n}{(1+i)^n-1} \quad (1)$$

donde *CAPEX* es Valor anualizado de mantenimiento de capital por componente [USD/año], *P0* es el Costo de inversión de cada componente [USD], *i* la Tasa de descuento [%] y *n* Vida útil del componente (en años) [años].

Para el cálculo del CAPEX anualizados se ha asumido una tasa de descuento (interés real) del 5%. La vida útil en años de cada componente ha sido determinada en base la vida útil de diseño de cada componente.

### 3.2 Determinación del OPEX

Los gastos de operación u *Operational Expenditure* (OPEX por sus siglas en inglés) son la agrupación de los costos de Operación y Mantenimiento que incluye costos de energía, mano de obra, mantenimiento rutinario, insumos y análisis de laboratorios.

## 4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de las estimaciones de CAPEX y OPEX para ambas plantas de tratamiento.

### 4.1 Determinación del CAPEX

#### 4.1.1 PTAR de Cliza

A continuación, se presenta en la Tabla 1 el detalle del CAPEX para la PTAR de Cliza. En el análisis no se ha tomado en cuenta el costo del terreno porque el mismo fue cedido sin costo por una comunidad agrícola. La superficie aproximada del terreno es de 8.000 m<sup>2</sup>.

**TABLA 1 - DETALLE DEL CAPEX PTAR DE CLIZA**

| Item | Descripción  | Total Costo [USD] | Vida útil [años] | Costo [USD/año] |
|------|--|-------------------|------------------|-----------------|
| 1    | Cárcamo de bombeo  | 16.503            | 20               | 1.324           |
| 2    | Sistema de bombeo  | 3.340             | 10               | 433             |
| 3    | Equipo de pretratamiento mecanizado  | 29.741            | 20               | 2.387           |
| 4    | Desgrasadora/Tanque Homogeneizador (HoAo)  | 22.770            | 20               | 1.827           |
| 5    | Tratamiento primario (biorreactor de ferrocemento)                                   | 260.012           | 20               | 20.864          |
| 6    | Tratamiento secundario con biofiltros de grava con revestimiento de geomembrana HDPE | 132.729           | 30               | 8.634           |
| 7    | Área de secado de lodos (revestimiento con HDPE)                                     | 9.232             | 30               | 601             |
| 8    | Instalaciones Hidráulicas  | 12.300            | 20               | 987             |
| 9    | Oficinas/laboratorio   | 7.506             | 30               | 488             |
| 10   | Cerco perimetral (malla FG)  | 15.197            | 20               | 1.219           |
| 11   | Áreas de difusión/áreas de circulación   | 6.576             | 20               | 528             |
| 12   | Canalización de desagüe (concreto)   | 10.000            | 20               | 802             |
| 13   | Caudalímetro digital   | 7.615             | 10               | 986             |
| 14   | Señalética (metálico)  | 429               | 5                | 99              |
|      | <b>Total</b>   | <b>533.950</b>    |                  | <b>41.179</b>   |

Fuente: Elaboración propia en base a datos de AGUATUYA.

Como se aprecia en la Tabla 1, se determinó que la inversión total realizada en la PTAR es de 533.950 USD. Aplicando la fórmula anteriormente descrita a cada uno de los principales componentes de la PTAR, se determina un CAPEX anualizado de 41.179 USD/año.

#### 4.1.2 PTAR de Tolata

En la Tabla 2 se presenta el detalle del CAPEX para la PTAR de Tolata.

**TABLA 2 - DETALLE DEL CAPEX PARA LA PTAR DE TOLATA**

| Ítem | Descripción  | Total costo (USD) | Vida útil (Años) | Costo (USD/año) |
|------|--|-------------------|------------------|-----------------|
| 1    | Trabajos preliminares/terraplenado                               | 4.439             | 20               | 356             |
| 2    | Cárcamo de bombeo obra civil                                     | 24.601            | 20               | 1.974           |
| 3    | Equipo de pretratamiento mecanizado                              | 14.368            | 20               | 1.153           |
| 4    | Desgrasadora   | 2.859             | 20               | 229             |
| 5    | Tratamiento primario (biorreactor PRFV)                          | 77.299            | 20               | 6.203           |
| 6    | Tratamiento secundario con biofiltros H y V (revestimiento HDPE) | 62.193            | 5                | 14.365          |
| 7    | Área de secado de lodos (revestimiento HDPE)                     | 4.196             | 30               | 273             |
| 8    | Instalaciones hidráulicas  | 7.309             | 10               | 947             |
| 9    | Desinfección (Cloración/Reso)                                    | 10.740            | 5                | 2.481           |
| 10   | Sistema de bombeo y sistema de aireación                         | 7.399             | 3                | 2.717           |
| 11   | Cerco perimetral (malla)   | 12.471            | 20               | 1.001           |
| 12   | Áreas de circulación   | 4.631             | 20               | 372             |
| 13   | Señalética (metálico)  | 877               | 5                | 203             |
| 14   | Caudalímetro digital   | 7.615             | 10               | 986             |
| 15   | Edificio administrativo  | 9.217             | 40               | 537             |
| 16   | Parque vehículos   | 4.310             | 40               | 251             |
|      | <b>Total</b>   | <b>254.524</b>    |                  | <b>34.048</b>   |

Fuente: Elaboración propia en base a datos de AGUATUYA.

Como se aprecia en la Tabla 2, se determinó que la inversión total realizada en la PTAR es de 254.524 USD. Aplicando la ecuación 1 anteriormente descrita a cada uno de los principales componentes de la PTAR, se determina un CAPEX anualizado de 34.048 USD/año.

#### 4.2 Determinación del OPEX

##### 4.2.1 Cálculo del OPEX PTAR de Cliza

Para este caso se tomaron en cuenta los ítems que se detallan en la Tabla 3.

**TABLA 3 - DETALLE DE OPEX DE PTAR CLIZA**

| Ítem | Descripción                         | Costo (USD/periodo) | No. Periodos/año | Costo (USD/año) |
|------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| 1    | Personal especialista               | 162,85              | 12               | 1.954,2         |
| 2    | Personal técnico (seguimiento)      | 228,57              | 12               | 2.742,84        |
| 3    | Operador técnico                    | 342,86              | 12               | 4.114,32        |
| 4    | Mantenimiento de equipos eléctricos | 350,00              | 3                | 1.050,00        |
| 5    | Limpieza de lodos                   | 857,14              | 4                | 3.428,56        |
| 6    | Elaboración de informe (gabinete)   | 171,43              | 4                | 685,72          |
| 7    | Herramientas menores (seguridad)    | 214,28              | 2                | 428,56          |
| 8    | Insumos de limpieza                 | 57,14               | 4                | 228,56          |
| 9    | Gasolina                            | 71,42               | 12               | 857,04          |
| 10   | Consumo de agua                     | 7,14                | 12               | 85,68           |
| 11   | Consumo de energía                  | 201,15              | 12               | 2.413,80        |
| 12   | Monitoreo                           | 355,60              | 4                | 1.422,41        |
|      | <b>Total</b>                        |                     |                  | <b>19.412</b>   |

Fuente: Elaboración propia en base a datos de AGUATUYA

Como se puede apreciar en la Tabla 3, se obtuvo un OPEX de 19.412 USD/año.

#### 4.2.2 Cálculo de OPEX de PTAR Tolata

En la Tabla 4 se presenta el detalle de los costos de OPEX de la PTAR de Tolata.

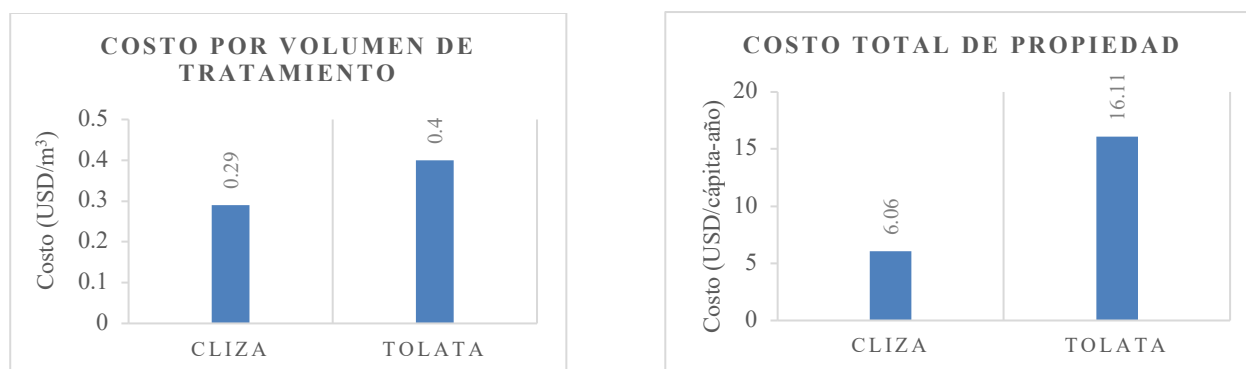
**TABLA 4 - DETALLE DEL OPEX DE LA PTAR DE TOLATA**

| Ítem | Descripción                               | Total costo (USD/periodo) | Nº periodos/año | Costo (USD/año) |
|------|---|---------------------------|-----------------|-----------------|
| 1    | Personal especialista (Supervisión)       | 206,00                    | 12              | 2.472           |
| 2    | Chofer y recaudadora                      | 172,45                    | 12              | 2.069,40        |
| 3    | Operador técnico                          | 479,07                    | 12              | 5748,84         |
| 4    | Mantenimiento de equipos eléctricos       | 350,00                    | 2               | 700,00          |
| 5    | Limpieza de lodos                         | 89,82                     | 4               | 359,28          |
| 6    | Gastos telefonía e internet para oficinas | 31,67                     | 12              | 380,04          |
| 7    | Mantenimiento de vehículos                | 86,21                     | 4               | 344,84          |
| 8    | Insumos de limpieza                       | 14,37                     | 12              | 172,44          |
| 9    | Gasolina                                  | 28,74                     | 12              | 344,88          |
| 10   | Consumo de agua PTAR                      | 7,18                      | 12              | 86,16           |
| 11   | Consumo de energía PTAR                   | 249,32                    | 12              | 2.991,84        |
| 12   | Monitoreo                                 | 355,60                    | 2               | 711,20          |
| 13   | Pastillas de cloro                        | 51,72                     | 12              | 620,64          |
| 14   | Prendas de vestir                         | 491,38                    | 1               | 491,38          |
|      | <b>Total</b>                              |                           |                 | <b>17.493</b>   |

Fuente: Elaboración propia en base a datos de AGUATUYA.

Se obtuvo un OPEX para PTAR de Cliza de 17.493 USD/año, ver Tabla 3. De esta manera el costo total anualizado de la PTAR de Cliza (Costo Anual Equivalente), tomando en cuenta tanto el CAPEX como el OPEX es de:  $41.179 + 19.412 = 60.591$  USD/año. Considerando que la capacidad de tratamiento de la PTAR de Cliza es de  $207.320 \text{ m}^3/\text{año}$ , el estudio determina un costo total para el tratamiento de las aguas residuales de  $0.29 \text{ USD}/\text{m}^3$ . Además, considerando que la capacidad de tratamiento de la PTAR es de aproximadamente 10.000 habitantes, se determina un Costo Anual Equivalente de  $6,06 \text{ USD}/\text{cápita}\cdot\text{año}$ . En el caso de la PTAR de Tolata, el costo total anualizado tomando en cuenta al CAPEX y OPEX es de:  $34.048 + 17.493 = 51.541$  USD/año. La capacidad de tratamiento de la PTAR de Tolata es de  $128.261 \text{ m}^3/\text{año}$  por lo que el costo total del tratamiento de las aguas residuales es de  $0,40 \text{ USD}/\text{m}^3$ . Considerando además que la capacidad de tratamiento de la PTAR es de aproximadamente 3.200 habitantes, el costo total de propiedad asciende a  $16,11 \text{ USD}/\text{cápita}\cdot\text{año}$ .

En la Figura 2 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos para el costo de tratamiento de las PTAR de Cliza y Tolata. Se puede apreciar que los costos de PTAR Tolata son más elevados que los de Cliza, puede deberse a que en esta el volumen de aguas tratadas es menor.

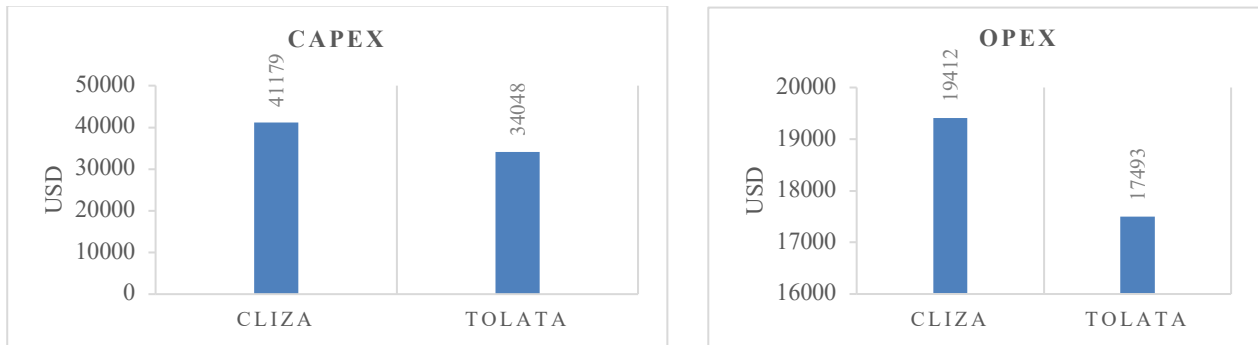


**Figura 2:** Comparación de costos PTAR Cliza y Tolata.

Moral *et al.* (2019) [8] reportaron el costo promedio de tratamiento del agua de 18 municipalidades pertenecientes a la provincia de Jaén del sur de Europa como  $0,34 \text{ USD}/\text{m}^3$ , que varían entre  $0,19$  y  $0,59 \text{ USD}/\text{m}^3$ , este monto fue calculado para PTARs que abarcan distintas tecnologías, 10 de las unidades estudiadas aplican tratamiento secundario con aireación prolongada y las 8 restantes aplican procesos de lodos activados. Su capacidad de tratamiento en la mayoría es de 10.000 a 20.000 hab equivalente.

Por otro lado, Salas et. al (2007) [9] reportaron el costo de inversión por habitante para distintas PTARs en Colombia. Entre éstos se reportaron que el costo de los UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed reactor) asciende entre 20 a 40 USD/habitante y el costo de las plantas de lodos activados entre 40 y 120 USD/habitante. Como es de suponer, los tratamientos avanzados de oxidación suponen un mayor costo que los tratamientos anaeróbicos. En este mismo estudio, Salas et. al (2007) [9] encontraron una carencia en la información existente acerca de los costos de inversión y operación de las diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales que no permiten una aproximación real a los costos asociados a un sistema de tratamiento que sirva para la planeación de la implementación de nuevos sistemas.

En la Figura 3 se presenta una comparación entre el CAPEX y el OPEX de las PTAR de Cliza y Tolata.



**Figura 3:** Comparación CAPEX y OPEX de las PTAR de Cliza y Tolata.

El CAPEX de Cliza es solamente 21% mayor que el CAPEX de Tolata aun cuando la población a la que atiende Cliza es 3 veces mayor que la población de Tolata y la capacidad de tratamiento en m<sup>3</sup>/año es 1,6 veces mayor. Un factor que incrementa el CAPEX de Tolata es que dicha PTAR cuenta con una unidad de desinfección además de contar con un sistema de biofiltros horizontales y verticales que alcanzan un nivel de tratamiento más alto que la PTAR de Cliza. Patiño (2012) [10] reportó que la inclusión de un sistema de desinfección en un sistema de tratamiento podría incrementar hasta 3 veces los costos de inversión. Respecto al OPEX de las PTAR de Cliza y Tolata la diferencia es de apenas el 11%. Patiño (2012) [10] en el mismo estudio reportó que la inclusión de un sistema de desinfección no ocasionaba grandes incrementos en los costos de operación y mantenimiento pudiendo alcanzar estos hasta un 20%.

## 5.- CONCLUSIONES

En base a información histórica primaria respecto a inversiones y gastos anuales de operación y mantenimiento es factible calcular el Costo Anual Equivalente de una planta de tratamiento de aguas residuales y obtener un valor anualizado per cápita o a un costo de tratamiento por m<sup>3</sup> de agua. Es evidente la pertinencia de esta metodología para realizar comparaciones de costos entre distintas tecnologías de tratamiento que incluyan no solo los costos de inversión (como normalmente se encuentra en la literatura) sino también los costos de operación y mantenimiento.

El costo total de inversión de la PTAR Cliza es de 533.950 USD. El costo anual equivalente de esta PTAR utilizando una tasa de descuento del 5% es de 60.591 USD/año. De este monto, el 68% (41.179 USD/año) corresponde al CAPEX y el 32% (19.412 USD/año) corresponde al OPEX. El costo total per cápita es de 6,06 USD/cápita\*año y el costo total por m<sup>3</sup> de agua tratada es de 0,29 USD/m<sup>3</sup>.

El costo total de inversión de la PTAR de Tolata es de 254.524 USD. El costo anual equivalente de esta PTAR utilizando una tasa de descuento del 5% es de 51.541 USD/año. De este monto, un 66 % (34.048 USD/año) y un 34% (17.493 USD/año) corresponden al CAPEX y OPEX respectivamente. El costo total per cápita es de 16,11 USD/cápita\*año y el costo total por m<sup>3</sup> de agua tratada es de 0,40 USD/m<sup>3</sup>.

Al tratarse de PTAR basadas en procesos naturales (especialmente debido al tratamiento anaerobio en su primera fase), los costos de energía son mínimos y los costos de O&M están en el orden de los 32 y 34% muy reducidos en relación con otras tecnologías. De todas maneras, es evidente que los costos de O&M no son despreciables. Si bien es muy importante contar con los recursos necesarios para la inversión inicial de una PTAR, también se debe contar con una estrategia financiera sólida que asegure la operación eficiente de las PTAR durante su vida útil. Se recomienda calcular el Costo Anual Equivalente usando esta metodología y registrar de manera apropiada todos los costos anualizados de PTAR existentes y nuevas. Este método ayudará a realizar mejores comparaciones entre opciones tecnológicas y a tomar las mejores decisiones por parte de Municipios, otros niveles del estado y las agencias de cooperación para el desarrollo.

## 6. REFERENCIAS

- [1] LIXIL & Oxford Economics, “The True Cost of Poor Sanitation, in collaboration with WaterAid”, Lixil Group Corporation, Tokyo, Japan, 2016.
- [2] G. Hutton, “Global Costs and Benefits of Drinking-Water Supply and Sanitation Interventions to Reach the MDG Target and Universal Coverage”, *World Health Organization*, Geneva, Switzerland, 2012
- [3] L. Daudey, “Review Paper The cost of urban sanitation solutions: A literature review”, *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 08(2), 176–195. <https://doi.org/10.2166/washdev.2017.058>, 2017.
- [4] Aguatuya, “Ficha técnica: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales”, Centro Urbano Cliza, 2013.
- [5] Aguatuya, “Sistematización y puesta en marcha del servicio de saneamiento en Tolata”, Cochabamba-Bolivia, 2018.
- [6] Aguatuya, Ficha técnica PTAR Tolata (pp. 1–14). Cochabamba-Bolivia, 2017
- [7] C. Fonseca, A. Dub and J. Verhaegen, “Cost-based Decision Support Tools for Water and Sanitation”, IRC International Water and Sanitation Centre, The Hague, The Netherlands, 2011.
- [8] E. Moral, L. Gallego and I. M. Román, “Cost of Urban Wastewater Treatment and Ecotaxes: Evidence from Municipalities in Southern Europe”, *Water*, 11(423), 1–13. <https://doi.org/10.3390/w11030423>, 2019.
- [9] D. Salas, M. A. Zapata y J. Guerrero, “Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la región”, *Scientia et Technica*, Universidad Tecnológica de Pereira, XIII (37), 591–596, 2007.
- [10] J. M. Patiño, “Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de tratamientos naturales de aguas residuales para pequeñas comunidades en Colombia”, Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, 2012.