

Ensayo científico

Manejo integrado de aguas residuales dentro y fuera la cuenca del Lago Atitlán

Stewart M. Oakley

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Estatal de California

Dirección para recibir correspondencia: SOakley@csuchico.edu

Pedro Saravia

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS-USAC

Resumen

El lago Atitlán recibe aguas residuales que deterioran su calidad y amenazan la salud pública, 100,000 personas utilizan el lago como fuente de agua, sin potabilización-. Las floraciones de cianobacterias en 2009 y 2015 muestran la degradación y la gravedad. Existen 19 plantas de tratamiento de aguas residuales no diseñadas para remover patógenos y nutrientes. Para mejorar la gestión de las aguas residuales existen tres opciones: (1) tratamiento de aguas residuales: lodos activados y procesos de remoción de patógenos, nitrógeno y fósforo a niveles requeridos; (2) manejo integrado de aguas residuales, con reuso en agricultura, como las dos plantas en Sololá operadas por más de 20 años; y (3) trasvase de las aguas residuales fuera de la cuenca con colector subacuático, generación de hidroelectricidad, tratamiento y reuso en agricultura. La sostenibilidad se comparó mediante análisis de costos de inversión, operación y mantenimiento; valorización para hidroelectricidad, fertilizantes y disminución de la huella de carbono. Resultados: la opción (1) no es posible, las tecnologías requeridas no existen en Latinoamérica; la opción (2) es más costosa y difícil que la opción (3) de trasvase. Para la opción (3) existe experiencia en diseño, construcción, y operación y mantenimiento, y se puede producir 5 MW de electricidad y el reuso en agricultura con 788,000 kg/año de N y P. El trasvase ha funcionado en varios países y en Guatemala ha sido implementado desde hace 50 años para proteger el lago de Amatitlán, pero el proceso no fue completado y hoy el lago está contaminado.

Palabras clave: Tratamiento de aguas, gestión de aguas, trasvase, valorización de efluentes

Abstract

Lake Atitlán receives wastewater discharges that threaten water quality and public health: 100,000 people use the lake as a drinking water source without purification. Cyanobacterial blooms in 2009 and 2015 demonstrated the degradation and severity of the situation. There are 19 wastewater treatment plants in the basin and none were designed to remove pathogens and nutrients. To improve wastewater management, there are three options: (1) wastewater treatment through the use of activated sludge and tertiary processes to remove pathogens, nitrogen and phosphorus to low levels for discharge to surface water; (2) integrated wastewater management, with reuse in agriculture, modeling two plants in Sololá that have operated for more than 20 years; and (3) export the wastewater out of the basin with an underwater pipeline, pumping, hydroelectricity generation, treatment and reuse in agriculture. Sustainability was compared through life cycle analysis, investment costs, operation and maintenance; and valorization for hydroelectricity, fertilizers, and reduction of the carbon footprint. Results, option (1) is not possible, the required technologies do not exist in Latin America, option (2) is more difficult and expensive than option (3) wastewater export, where additionally there is experience in design, construction, and operation and maintenance, with hydroelectric potential of 5 MW, and reuse in agriculture with 788,000 kg/year of N and P produced in 2045. Wastewater export has worked in several countries, and was implemented 50 years ago by the Municipality of Guatemala to protect Lake Amatitlán, but the export of wastewater was not completed and today it is a polluted lake.

Key Words: wastewater treatment, water management, wastewater export, valorization of effluent

Introducción

La mayoría de las aguas residuales domésticas generadas en los municipios cercanos a la orilla se vierte directamente al lago, y la gran parte de las aguas residuales de los municipios alejados llega al lago a través de descargas a los ríos y arroyos que aumenta constantemente las concentraciones de patógenos y nutrientes, lo que ha alterado drásticamente el ecosistema acuático y ha puesto en peligro la salud pública (Chandra et al., 2013; Unidos por el Lago Atitlán, 2014). El lago ha experimentado una eutrofización notable en los últimos años como resultado de la entrada de aguas residuales poco tratadas o no. Los florecimientos de algas y cianobacterias en 2009 y 2015 han atraído la atención mundial sobre la gravedad de la situación (Rejmankova, et al., 2011).

A pesar de que los episodios de florecimientos de algas y cianobacterias son serios y han recibido mucha atención, el problema más serio es la salud pública relacionada a los patógenos que entran a la fuente de consumo humano de los municipios de San Pedro Laguna, Santiago Atitlán, y San Lucas Tolimán. El agua cruda del lago se bombea directamente al abastecimiento de agua en forma artesanal con, o a veces sin, aplicación de cloro—lo que no es desinfección con los valores de *C-t* en mg-min/L calculado con la dosis y el tiempo de retención medida en una cámara de contacto de desinfección. Además, el cloro no inactiva los (oo)quistes de protozoarios.

Se han registrado altas concentraciones de coliformes fecales en los dos ríos principales que ingresan al lago (San Francisco y Quiscab), y cerca de las estaciones de bombeo de agua potable en el lago (DICA/AMSCLAE, 2019; Padilla Cámara, et al., 2010). Las altas concentraciones de coliformes fecales observadas en el lago se reflejan en las estadísticas de morbilidad en la cuenca:

1. En Santiago Atitlán, de los casos reportados en varones y mujeres, el 22% y 19% respectivamente, están relacionados con las excretas humanas según el Ministerio de Salud (Nagata et al., 2011);
2. En Tzununá, más del 50% de los casos están relacionados con enfermedades transmitidas por el agua (Allam et al., 2010);

3. En San Andrés Palopó y Santa Catarina Palopó, 34% de prevalencia de criptosporidiosis en niños de 2 a 13 años con las altas tasas de infección asociadas con su exposición al suministro de agua contaminada del lago (Laubach, et al., 2004);
4. En Santiago Atitlán, 38% de prevalencia de giardiasis en niños en edad escolar (Chandra et al., 2013).

La Tabla 1 muestra resultados de *E. coli* monitoreado por AMSCLAE durante 2019.

Tabla 1. Concentraciones de *Escherichia coli* (UFC/100mL) en las tomas de agua del lago para el agua potable (DICA/AMSCLAE, 2019a)

Municipio	Toma	Época seca marzo/2019	Época lluviosa septiembre/2019
Santiago Atitlán	Xechivoy	180	10
San Lucas Tolimán	San Chipó	20	100
San Pedro La Laguna	San Pedro	50	10

Además de los riesgos de patógenos, la cianobacteria origina cianotoxinas y los géneros *Microcystis* y *Aphanizomenon* han sido detectados en el lago (Chandra et al., 2013) y producen las cianotoxinas microcistin-LR y cilindroespermopsin, que pueden causar efectos en el hígado (USEPA, 2014). Las cianotoxinas pueden ser removidas en plantas de tratamiento de agua potable utilizando procesos de oxidación.

Las normas de ingeniería sanitaria y salud pública de hace más de 100 años dictan:

- 1) Las aguas residuales no deben descargarse a fuentes de agua potable. Ejemplo en la historia de ingeniería sanitaria y salud pública es el caso de Chicago y el cambio de dirección del flujo del río Chicago. En 1892 se construyó el canal de drenaje para trasvasar las aguas residuales de la ciudad a la cuenca del Río Mississippi. El propósito fue proteger el lago Michigan, fuente de agua potable de la ciudad (ASCE, sin fecha). El trasvase sigue funcionando hasta la fecha.

Por su lado la ciudad de Milwaukee, 140 km al norte de Chicago todavía descarga sus aguas residuales al lago Michigan, que es su única fuente de agua potable. Se había asumido el factor de dilución grande en el lago y las plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales eliminarían el riesgo. En 1993 ocurrió la epidemia relacionada con agua potable más grande en la historia de los EE. UU, por criptosporidiosis, *Cryptosporidium parvum*, que entró en el sistema de agua potable (Fox y Lytle, 1996). Los resultados de las investigaciones mostraron lo siguiente (Eisenberg, et al., 2005; Fox y Lytle, 1996): 403,000 infectados con ~100 muertos, por fallar el sistema de coagulación/filtración por el uso nuevo de un coagulante, la planta estaba desinfectando con cloro que no afecta a los quistes de *Cryptosporidium* procedentes de las aguas residuales tratadas por la Jones Island PTAR. El patógeno pasó por todos los procesos incluyendo desinfección con cloro.

Después de la epidemia se modificó la planta de agua potable, se desinfectó con ozono, filtración con 0.60 m de carbón antracita encima de 0.30 m de arena fina, y desinfección final con cloro (City of Milwaukee, sin fecha).

- 2) Los municipios que utilizan el lago como su única fuente de agua, deberían tener plantas de tratamiento de agua potable con procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración, y desinfección con ozono o UV (que inactivan quistes de protozoarios) y cloro para protección residual, y pre-oxidación en el caso de concentraciones significativas de cianotoxinas.

El mayor interés, en la cuenca del lago, se enfoca en el tratamiento de aguas residuales, cuando el problema más serio es el uso del lago como fuente de agua para consumo humano. El agua potable y la generación de aguas residuales están interrelacionadas y deberían ser solucionados conjuntamente, mediante un plan de gestión sostenible de abastecimiento de agua potable y manejo de aguas residuales que evite patógenos y

nutrientes en el lago, que garanticen la salud humana de la población y la conservación del lago es imperante.

Consideraciones sobre el tratamiento de aguas residuales municipales en la cuenca

Se cuenta con al menos 18 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) construidas, diez de ellas en operación y ocho no operaban en 2019. La Tabla 2 presenta un resumen de la información. Hasta la fecha se han invertido US\$9,407,689 en construcción de plantas y los diseños de todas las plantas de tratamiento en el lago Atitlán siguen el paradigma histórico, desarrollado en Europa y los EE. UU., cuyo propósito es estabilizar la materia orgánica antes de descargar a los ríos, lagos o mar:

- 11 procesos unitarios diferentes utilizados en 10 trenes de tratamiento diferentes
- El tren de tratamiento más común es lodos activados con siete instalaciones. Tecnología más complicada de tratamiento y más costosa en inversión y operación y mantenimiento. Seis de los siete sistemas, no tiene capacidad de remover patógenos ni nutrientes. Una instalación de reactor secuencial, una forma de lodos activados tiene una cámara de cloro y puede remover una fracción de nitrógeno y fósforo como parte del proceso de remoción de materia orgánica, pero no estuvo en operación, la cual se visitó en 2019. La planta de Panajachel está diseñada para remover fósforo, pero su operación está limitada por el alto precio de los químicos necesarios, falta de laboratorio y personal calificado.
- El segundo tren de tratamiento más común es de RAFA/filtro percolador (cinco instalaciones); no tienen capacidad de remover patógenos ni nutrientes; una instalación cuenta con desinfección con cloro, pero no es efectivo en desactivar quistes de protozoarios y huevos de helmintos.
- 16 sistemas están diseñados para descargar su efluente directamente al agua superficial.
- Dos están diseñadas para descargar al subsuelo, con vía directa al lago por infiltración.

- Dos están diseñadas para reusar parte su efluente en la época seca y descargar todos sus efluentes al agua superficial en la época lluviosa (seis meses del año).
- Dos plantas están diseñadas con el proceso unitario de desinfección con cloro. El cloro no desactiva los quistes de protozoarios ni huevos de helmintos, los parásitos más comunes, con prevalencias más de 30%, en las poblaciones de Guatemala (Chandra, et al., 2013; Laubach, et al., 2004).
- Ninguna planta tiene un plan adecuado para el manejo y su disposición final de lodos producidos, para proteger la salud pública y ambiente.
- Los costos per cápita para la inversión de una planta varían entre US\$22—US\$200; algunas plantas más sencillas que lodos activados, con costos más elevados que lodos activados.

Con estas deficiencias en el diseño, operación y mantenimiento de las PTARs, no es sorprendente que la mayoría de las plantas no puedan cumplir con

ninguno de los límites máximos permitidos de NT, PT, y coliformes fecales (DICA/AMSCLAE, 2019b). Se aplica también el paradigma lineal, Figura 1, para selección de tecnología que involucra varios intereses, sin una visión global de los problemas y no existe una autoridad interdisciplinaria de ingeniería sanitaria, salud pública, y limnología, para establecer normas de diseño de PTARs con límites máximos permisibles relevantes para patógenos y nutrientes y con monitoreo continuo.

El paradigma lineal todavía es predominante en los EE. UU: En 2010, 94.4% de todas las aguas residuales tratadas, 114,834,240 m³/d, fueron descargadas a las aguas superficiales, con buen tratamiento para cumplir los límites máximos permisibles de descarga. Desde los años ochenta en los EE. UU. y la UE se cuenta con normas más estrictas para descargas a lagos y los límites máximos permitidos para la descarga de aguas residuales en la cuenca del Lago Atitlán son menos estrictos y a pesar de ello no se logran cumplir, Tabla 3.

Tabla 2. Costos de inversión, operación y mantenimiento para los PTARs construidas en la cuenca del Lago Atitlán (Datos de AMSCLAE, Municipalidades, y Sistema Nacional de Inversiones Públicas)

Nº	Municipio	Tecnología	Caudal de diseño (L/s)	Población de diseño estimada ¹	Inversión infraestructura ²	Inversión infraestructura per cápita	Costo O y M/año estimado ³	Año de construcción
En operación 2020								
1	Santa Lucía Utatlán	Tratamiento Primario/Lagunas	1.9	1,077	\$182,967	\$169.87	\$807	2003
2	San Marcos La Laguna	Reactores secuenciales	17.6	10,115	\$422,585	\$41.78	\$50,312	2017
3	Panajachel	Lodos Activados	17.2	11,500	\$2,011,219	\$174.89	\$57,203	2011
4	Sololá	RAFA/Filtro percolador	24.0	13,824	\$302,154	\$21.86	\$18,906	1998
5		RAFA/Filtro percolador	10.5	6,048	\$151,059	\$24.98	\$8,272	1995
6		RAFA/Filtro percolador	3.9	2,241	\$116,443	\$51.97	\$3,064	2011
7	Santiago Atitlán	Filtros Percoladores/Lagunas	18.9	10,869	\$1,780,769	\$163.84	\$16,407	2011
8	San José Chacayá	RAFA/Filtro percolador	4.3	2,448	\$361,501	\$147.67	\$3,348	2016
9	San Andrés Semetabaj	Lodos Activados (2 plantas)	11.2	9,677	\$649,853	\$67.16	\$48,134	2007/2018
10	Santa Catarina Palopá	Lodos Activados	2.9	1,670	\$130,719	\$78.26	\$8,309	2012

Nº	Municipio	Tecnología	Caudal de diseño (L/s)	Población de diseño estimada ¹	Inversión infraestructura ²	Inversión infraestructura per cápita	Costo O y M/año estimado ³	Año de construcción
	Sub-Total		132.0	69,469	\$6,109,268		\$214,762	
	Sin operación 2020							
11	Santa Lucía Utatlán	RAFA/filtro percolador /cloración	4.2	3,646	\$212,101	\$58.17	\$4,986.54	2018
12	San Juan la Laguna	Filtro anaerobio/humedales artificiales	12.9	11,197	\$391,503	\$34.97	\$16,902.22	2008
13	San Pablo La Laguna	RAFA prefabricado domiciliario	13.2	11,439	\$514,510	\$44.98	\$17,267.45	2017
14	Panajachel	Lodos Activados	15.0	12,960	\$509,882	\$39.34	\$64,465.36	2018
15	Santa Cruz la Laguna	Tanque Imhoff/filtro percolador	6.0	5,169	\$1,036,018	\$200.43	\$7,069.80	2009
16	San Lucas Tolimán	Lodos activados/humedal	0.7	631	\$78,431	\$124.30	\$3,137.25	2015
17	Santa Catarina Palopó	Lodos activados	6.0	5,184	\$285,608	\$55.09	\$25,786.14	2019
18	Concepción	Tanque Imhoff/filtro percolador	7.4	6,411	\$270,367	\$42.17	\$8,767.84	2017
	Sub-Total		65.6	56,637	\$3,298,421		\$148,383	
	Total		197.6	126,106	\$9,407,689		\$363,145	

¹Asumiendo 150 L/cap-d con la excepción de Panajachel donde la población de diseño es reportada.

²Los costos son del año de construcción y no están ajustados para inflación

³Estimados de los datos de Wagner (2010) corregidos para el año 2020

Figura 1. El paradigma lineal aplicado en la cuenca del Lago Atitlán



Tabla 3. Límites máximos permitidos para descarga de aguas residuales en la cuenca del Lago Atitlán comparado con otras aguas superficiales en los EE. UU. (MARN, 2011; ASCE, sin fecha; Chandra, et al., 2013; USEPA, 2008)

Parámetro	LMP para descargas						
	Cuenca del Lago Atitlán		Aguas superficiales los EE. UU.				
	Lago Atitlán	Ríos y subsuelo	Lago Michigan* descarga de Chicago	Lago Tahoe*	Lago Bajo de Madison*	Lago Washington*	Ríos, bahías, estuarios**
Nitrógeno total (NT) mg/L	5	10	0	0	0	0	3—10
Fósforo total (PT) mg/L	3	5	0	0	0	0	0.1—2
Coliformes fecales NMP/100mL	500	10,000	0	0	0	0	---
<i>E. Coli</i> UFC/100mL			0	0	0	0	< 200

*Las aguas residuales son trasvasadas a otra cuenca estando prohibido su descarga al lago.

**Las exigencias de cumplimiento de LMP dependen de las características del cuerpo receptor y puedan ser más estrictas todavía por límites promulgados por autoridades estatales o locales.

El tratamiento de aguas residuales siempre ha tenido baja prioridad, en 2017 solo 37.0% de la población que contaba con alcantarillado tenía conexión a una PTAR (UN, 2018). Esto no implica que el agua residual esté bien tratada para resolver los problemas de salud y medio ambiente relacionado con las aguas residuales, exactamente la situación en la cuenca.

Gestión de las aguas residuales en la cuenca

Para la gestión de aguas residuales en la cuenca existen tres opciones:

Opción 1 Tratamiento de aguas residuales municipales con remoción de patógenos y nutrientes dentro de la cuenca con descarga de efluentes al agua superficial. Normas estrictas a) patógenos para descargas de efluentes a una fuente de agua potable (Lago Atitlán), *E. coli*: sin detección, quistes de protozoarios: sin detección con tecnología de ozono o UV más micro o ultrafiltración y huevos de helmintos: sin detección con micro o ultrafiltración, b) nutrientes en descargas de efluentes basado en estudios limnológicos: Nitrógeno total (NT): < 3.0 mg/L o más estricto y Fósforo total (PT): ≤ 0.1 mg/L (el

límite de tecnología) y c) tratamiento y manejo de lodos dentro de la cuenca y su disposición final fuera de la cuenca.

Opción 2 Tratamiento de aguas residuales municipales con remoción de patógenos dentro de la cuenca con reuso en agricultura sin descargas al lago.

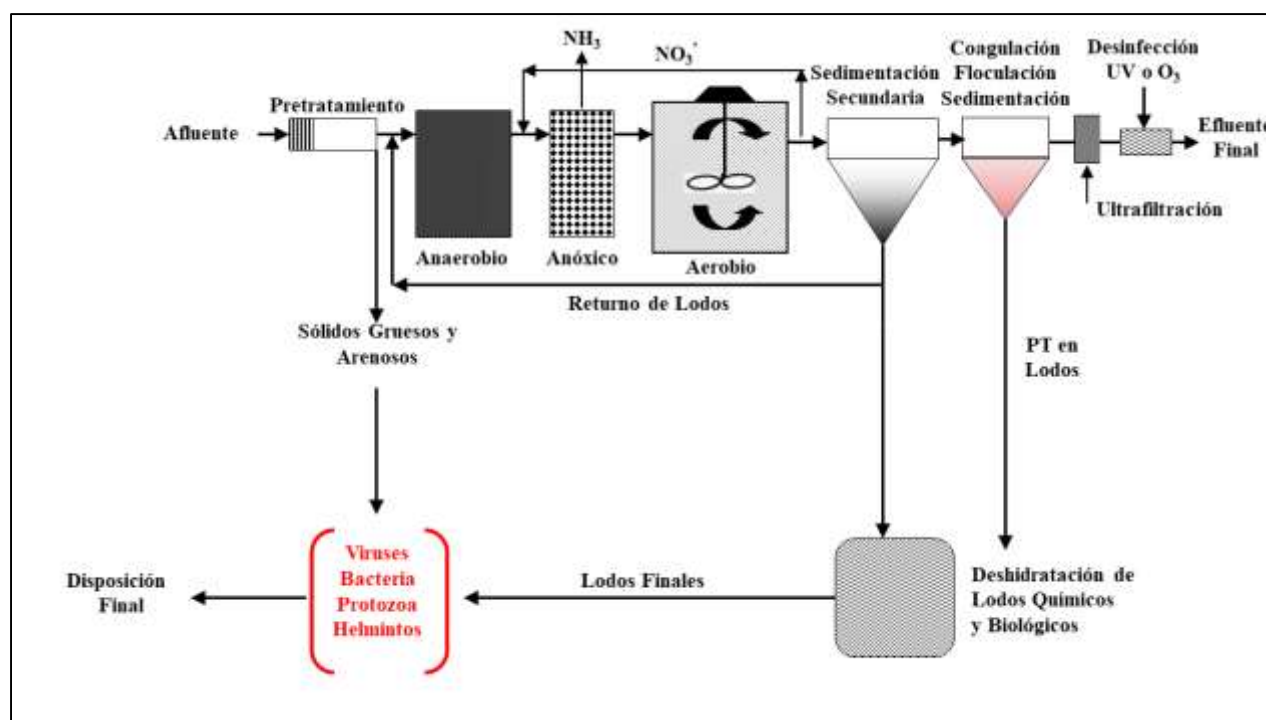
Opción 3 Colección y trasvase de las aguas residuales crudas fuera de la cuenca, a través de tuberías de presión baja, con generación de energía eléctrica, tratamiento en lagunas de estabilización, y reuso en agricultura.

Evaluación y comparación de la factibilidad y sostenibilidad de las opciones, mediante un análisis de costos y ciclo de vida; y la sostenibilidad técnica y ambiental, revisión de estudios de caso de preservación de lagos y ejemplos relevantes de tratamiento y valorización de aguas residuales de América Latina y en otros lugares. Es importante indicar, en algunos casos por razones de presentación, las cifras de las tablas contienen dos números enteros redondeados y no los seis que se utilizaron para hacer cálculos, por lo que los resultados pueden no coincidir.

Análisis de la opción 1. La tecnología para descargar hacia aguas superficiales para proteger la salud pública y el ambiente debería contar con un sistema de lodos activados, remoción de NT con nitrificación-desnitrificación, precipitación de PT con coagulantes como sulfato de aluminio o cloruro férrico, con

remoción biológica, micro- o ultrafiltración, y desinfección con UV u ozono, Figura 2. En Latinoamérica no existe en ninguna planta de este tipo y requeriría un equipo de operadores y laboratorio especializado que tampoco existe en Latinoamérica.

Figura 2. Planta de tratamiento de lodos activados con remoción de nitrógeno y fósforo, ultrafiltración, y desinfección con UV u ozono



El estimado de costo de inversión para la población futura de 2045, 467,682 habitantes, se asumió una tasa de crecimiento de 3.0% con un censo de 2018,052 habitantes en 2018 y los datos de la PTAR de Panajachel, Los Cebollales, que fue diseñada para remover PT por coagulación/floculación y sedimentación. En 2011 la PTAR fue construida para US\$2,011,219 o US\$175/cápita, número 3 en Tabla 2. Utilizando los datos del Índice de Precios al Consumidor (IPC) del Banco Mundial para Guatemala, se puede extrapolar el costo para construir una planta igual en 2019 (los últimos datos disponibles).

$IPC_{2011} = 106.214$; $IPC_{2019} = 142.921$ y

$$\text{Factor de Inflación, } FI_{2011-2019} = \frac{IPC_{2019}}{IPC_{2011}} = \frac{142.921}{106.214} = 1.35$$

$$\text{Costo de inversión/cápita en 2019} = (FI_{2011-2019})(\$175/\text{cápita}) = (1.35)(\$175) = \text{US\$235/cápita}$$

Se puede estimar el costo de remoción de NT utilizando los datos de la EPA (USEPA, 2008).

$$\text{Remoción de NT per cápita en 2008} = \text{US\$51/cápita}$$

$$IPC_{2008} = 94.527; IPC_{2019} = 142.921$$

$$\text{Factor de Inflación, } FI_{2008-2019} = \frac{IPC_{2019}}{IPC_{2008}} = \frac{142.921}{94.527} = 1.51$$

$$\text{Costo de inversión per cápita para remoción de NT} = (1.51)(\$51/\text{cápita}) = \text{US\$77/cápita}$$

La planta Los Cebollales no fue diseñada con desinfección y se puede estimar el costo con los datos de Wagner (2010) en Bolivia, que reportó un costo de US\$1.00/cápita para desinfección con cloro para el año 2008. La PTAR necesitaría desinfectar con ozono o UV, pero no hay datos, y se puede estimar que sería mayor que el costo de cloro. Usando el mismo factor de NT de 1.51:

Costo de inversión per cápita para desinfección > (1.51)(\$1.00/cápita) > US\$1.51/cápita

Finalmente, el costo de terreno tiene que estar incluido y se estima en US\$100/m² en la cuenca. La PTAR de Panajachel ocupa aproximadamente 0.25 m²/cápita y se asume un valor de 0.30 m²/cápita para esta PTAR con más procesos. El área mínima requerido sería:

Área de PTAR = (0.3 m²/cápita)(467,682) = 140,305 m² = 14.0 ha

Costo de terreno = (140,305 m²)(US\$100/m²) = US\$14,030,460

La Tabla 4 presenta los resultados de costos estimados de inversión, que no incluye los costos de tubería y estaciones de bombeo para bombear las aguas residuales crudas de los municipios a PTAR (o PTARs) centralizada.

Se presenta los costos estimados de operación y mantenimiento en la Tabla 5. Los costos de los procesos unitarios de 2008 son de Wagner (2008) para Bolivia y son válidos para estimar costos en Guatemala. Los valores de 2008 fueron convertidos a 2019 con el FI de 1.51. Los costos no incluyen remoción de PT, NT, desinfección con UV o O₃, o mico- o ultrafiltración, y el costo podría ser mucho más pero no hay datos de Latinoamérica para estos procesos.

La producción de lodos, Tabla 6, En 2045 podría llegar a 2,548,065 kg/año con volumen deshidratado de 5,096 m³/año, dispuesto fuera de la cuenca. La disposición requiere: 728 viajes por año de camiones de 7 m³, 2 viajes por día y la disposición en un relleno sanitario seguro.

Tabla 4. Inversión: Lodos activados con remoción de nutrientes, filtración, desinfección

Parámetro	Costo USD/cápita 2019	Población 2045	Total (USD)
Lodos activados con remoción de P ¹	\$231	467,682	\$108,034,542
Proceso de remoción de N ²	\$77		\$36,011,514
Desinfección con cloro ³ (No hay datos para UV/O ₃)	> \$1.51		> \$706,200
Micro o ultrafiltración	No hay datos		
Tubería de municipio a PTAR centralizada	No hay datos		
Bombas para bombear de municipio a PTAR centralizada	No hay datos		
	Costo		
	USD/m² 2019	Área, m²	
Terreno ⁴	\$100.00	140,305	\$14,030,460
TOTAL			> \$158,782,756
Costo/cápita-año			> \$340

¹Extrapolación de \$175 en 2011 hasta 2019, usando FI de Guatemala de 1.35

²Extrapolación de \$51 en 2008 hasta 2019, usando FI de Guatemala de 1.51

³Extrapolación de \$1 en 2008 hasta 2019, usando FI de Guatemala de 1.51; el costo de UV o O₃ > cloro

⁴ Terreno – 0.30 m² per cápita (PTAR Los Cebollales)

Tabla 5. Operación y mantenimiento: Lodos activados convencional

Parámetro	Costos ¹ USD/cápita Año 2019	Costo/año USD 2019 Año 2025 P = 256,669	Costo/añoUSD 2019 Año 2045 P = 467,682
Personal	\$0.53	\$135,805.64	\$247,454.33
Análisis	\$0.05	\$11,640.48	\$21,210.37
Materiales	\$0.23	\$58,202.42	\$106,051.85
Cloro (No hay datos para UV o O ₃)	>\$0.23	>\$58,202.42	>\$106,051.85
Mantenimiento	\$1.06	\$271,611.29	\$494,908.66
Administración	\$0.62	\$159,086.61	\$289,875.07
Energía Eléctrica (PTAR convencional)	\$3.63	\$931,238.70	\$1,696,829.68
Secado de lodos	\$0.42	\$108,644.51	\$197,963.46
Remoción de N y P	No hay datos		
Micro- o ultrafiltración	No hay datos		
Bombeo a PTAR centralizada	No hay datos		
Transporte de lodos y disposición final	No hay datos		
Total		> \$1,734,432	> \$3,160,345
Costo/cápita-año		> \$6.76	> \$6.76

¹Extrapolación de costos/cápita en 2008 (Wagner, 2010) hasta 2019, usando FI de Guatemala de 1.51

Tabla 6. Producción de lodos de las plantas de lodos activados (Población = 467,682)

Tipo Lodos	Masa producida kg/d	Volumen producido m ³ /d	Masa lodos digeridos		Volumen lodos digeridos		Volumen deshidratados m ³ /año
			kg/d	kg/año	m/d	m ³ /año	
Primarios	9,000	297					
Secundarios	2,635	211					
Total	11,635	508	6,981	2,548,065	276	100,913	5,096

Otro asunto significativo es que la carga de nutrientes en kg/año, que entran y quedan en el lago, y en 20 años la población urbana doblará e igual la masa de nutrientes que entran.

Análisis de la opción 2: Tratamiento de aguas residuales dentro de la cuenca con reuso sin descargas al agua superficial. El paradigma del manejo integrado de aguas residuales con valorización aprecia el agua residual como un recurso hídrico que es demasiado valioso para perder en descargas a las aguas superficiales. El enfoque principal es: a) Incorporar

los ciclos de agua, carbono, nitrógeno y fósforo en el diseño, b) Tratamiento con sistemas naturales para remoción de patógenos, c) Valorización de nutrientes: reuso en agricultura y acuicultura, d) Valorización de características energéticas, con producción de metano como fuente de energía renovable con procesos anaerobios cuando sea factible o aprovechamiento de potencia hidráulica a través de turbinas cuando las circunstancias de carga hidráulica permiten y e) Protección de aguas superficiales a través de reuso en agricultura sin descargas a aguas superficiales.

Los mejores ejemplos en la cuenca están en los sistemas localizados en los barrios San Antonio y San Bartolo de Sololá. Los sistemas RAFA/filtro percolador/reuso en agricultura, fueron construidos en 1995 y 1998 (Sánchez de León, 2001), todavía están en operación (enero 2021). Estos sistemas son probablemente, los mejores ejemplos de sostenibilidad en Guatemala. Como se los describió en el informe de CEPIS de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: “*El proyecto beneficia directamente a más de 100 usuarios agricultores, a quienes les brinda la oportunidad de irrigar sus cultivos con aguas residuales. Esto incide en un ahorro en fertilizantes y por lo tanto en una disminución en los costos de producción. De otro lado, toda el agua residual tratada no se lanza a ríos y zanjones y, consecuentemente, no llega al lago de Atitlán, lo cual incide en una protección importante para el medio ambiente.*” (Sánchez de León, 2001). En la actualidad los dos sistemas están regando menos de 20 ha sin reservorio durante 6 meses del año, con descargas a las aguas superficiales todo el año, se podría regar hasta 163.5 ha, con un reservorio requerido de 548,504 m³, basado en la población de diseño de 19,000 y caudal de 2,280 m³/d (Sánchez de León, 2001),

empleando los datos meteorológicos de la estación Santiago Atitlán y el método de Asano, et al. (2006), pero por la topografía sería imposible ampliar el área de riego actual, sin bombeo de larga distancia.

Se muestra la opción 2 para el año 2045, con población estimada de 467,682 y caudal medio de 60,000 m³/d, en Tabla 7. Se calcula un área de riego de 3,292 ha, con un reservorio de 11,040,000 m³ (equivalente a un área de 110 ha con profundidad de 10 m). Por las pendientes predominantes > 30% en la cuenca, se estima que solo 5.7% del área, 3,100 ha, es apta para agricultura con prácticas moderadas de conservación de suelos (Sánchez de León, 2001), menor que los 3,292 ha requeridas para reusar todas las aguas residuales. La ubicación de un gran reservorio, o varios, con un volumen total de 11,040,000 m³, con redes de tubería de presión y estaciones de bombeo en una topografía escarpada, que necesitarían derecho de paso y sumado al manejo y disposición final de lodos, sería un proyecto de ingeniería más difícil que la construcción de plantas de la opción 1. Al conocimiento a los autores, no existe ningún proyecto en una cuenca de un lago de esta magnitud en Latinoamérica ni en los EE. UU.

Tabla 7. El área máxima de riego y el volumen de reservorio requerido para reusar los efluentes de la población urbana de la cuenca en 2045. Caudal = 60,000 m³/d; Población = 467,682; Área de riego máxima = 3,292 ha; volumen de reservorio requerido = 11,040,000 m³ (111 ha con profundidad de 10 m). Se utilizó para los cálculos una eficiencia de riego de 75% y un factor de lixiviación de 0.15.

Mes	P mm	ET _o mm	ET _o -P mm	L _{AR} mm	Volumen para riego V _{AR} , m ³	Área riego A _R , m ²	Volumen riego V _R , m ³	Cambio almacenaje ΔA, m ³	Acumulación almacenaje ΣΔA, m ³
E	5.1	97.7	93	142.0	1,860,000		4,673,750	-2,813,750	4,360,807
F	12.7	94.5	82	125.4	1,680,000		4,128,647	-2,448,647	1,912,159
M	32.9	107	74	113.6	1,860,000		3,740,009	-1,880,009	32,150
A	62.7	99.0	36	55.7	1,800,000		1,832,150	-32,150	0
M	168.9	86.0	-83		1,860,000		0	1,860,000	1,860,000
J	283.2	83.3	-200		1,800,000		0	1,800,000	3,660,000
J	152.2	100.0	-52		1,860,000		0	1,860,000	5,520,000

Mes	P mm	ET ₀ mm	ET ₀ -P mm	L _{AR} mm	Volumen para riego V _{AR} , m ³	Área riego A _R , m ²	Volumen riego V _R , m ³	Cambio almacenaje ΔA, m ³	Acumulación almacenaje ΣΔA, m ³
A	152. 8	93	-60		1,860,000		0	1,860,000	7,380,000
S	243	76.5	-167		1,800,000		0	1,800,000	9,180,000
O	170. 1	88.4	-82		1,860,000		0	1,860,000	11,040,000
N	41.4	126. 0	85	129. 7	1,800,000		4,269,970	-2,469,970	8,570,030
D	26.2	90.7	65	98.9	1,860,000		3,255,474	-1,395,474	7,174,556
	1351 .2	1,14 2	434	665	21,900,000	32,916,821			
						3,292 ha			

Análisis de la opción 3: Tratamiento de aguas residuales fuera de la cuenca con trasvase y producción de energía hidroeléctrica y reuso en agricultura. Existen varios proyectos exitosos aprovechando un trasvase para proteger un lago y valorizar el efluente, que puedan servir como modelos para solucionar la situación en la cuenca del Lago Atitlán, que se citan a continuación:

- 1) Proteger el lago de patógenos y nutrientes:
 - a. Lagos Bajo de Madison, Lago Tahoe, y Lago Washington (Chandra, et al., 2013; King County, 2016; USEPA, 2008).
 - b. Lago Amatitlán: Unos trasvases de aguas residuales de la cuenca de Lago Amatitlán en los años 60—70, se construyó parcialmente.
- 2) Proteger el lago de patógenos para utilizarlo como fuente de agua potable:
 - a. Lago Amatitlán en los años 60—70 (Municipalidad de Guatemala, 1972)
 - b. Lago Michigan (descarga de Chicago) (APWA, 2001).
- 3) Valorizar el reuso de efluente en agricultura fuera de la cuenca: Lago Tahoe (USEPA, 2008).

Adicionalmente, al sur de la cuenca del Lago Atitlán (~1,000 m), se puede aprovechar las aguas residuales para hidroelectricidad. Un ejemplo de la producción

de energía eléctrica con agua residuales en Guatemala en la planta hidroeléctrica Río Las Vacas, que conduce el 60% de las aguas residuales crudas de la ciudad de Guatemala (siendo tal vez el río más contaminado de Guatemala), con capacidad instalada de 45 MW, que ha estado en operación desde 2002 (CNEE, sin fecha).

Se debe mencionar que el trasvase no fue un concepto extraño a los ingenieros guatemaltecos quienes intentaron de salvar el lago Amatitlán en los años 60 a 70 (Municipalidad de Guatemala, 1972). La Municipalidad de Guatemala estaba preocupada de la contaminación de la cuenca del lago, especialmente cuando el 32% del agua potable de la ciudad de Guatemala, provenía de manantiales surgentes de la cuenca de Amatitlán (Municipalidad de Guatemala, 1972). Como resultado, la municipalidad adoptó el procedimiento de captar aguas residuales, hasta donde fuera posible, por medio de colectores profundos de áreas de la cuenca del Pacífico inmediatas a la divisoria continental y llevándolas hacia la cuenca del Atlántico y en 1987 fue formulado el proyecto de saneamiento metropolitano, por el ing. Arturo Pazos, para EMPAGUA, el cual planificaba una serie de colectores, entre estos los de la cuenca del lago de Amatitlán, evitando descargar las aguas residuales al lago y tratándolas fuera de la misma, los proyectos no fueron desarrollados y la población de la cuenca de Amatitlán se conectó a drenajes que descargan al río Villalobos y al lago. En los años 60 el Lago Amatitlán tenía una calidad de agua muy parecido a Lago Atitlán (Weiss, 1971), pero hoy en día está hipereutrófico, con

altas concentraciones de coliformes fecales > 24,000 NMP/100ml y conocido como uno de los lagos más contaminados en Centroamérica (Rodas-Pernillo y Vásquez-Moscoso, 2020).

Esta opción aprovecha el concepto y las lecciones de Lago Amatitlán con un trasvase de las aguas residuales crudas hacia el sur de la cuenca, adicionando producción de energía hidroeléctrica neta en el proceso, tratamiento y valorización de los nutrientes en el efluente final para reuso en agricultura. Se propone lo siguiente (AALA, 2020):

- 1) Colectar todas las aguas residuales en la cuenca por gravedad hasta estaciones de bombeo con pretratamiento (rejillas y desarenadores) en la orilla del lago.
- 2) Aprovechar la carga hidráulica (~420 m) de Sololá hasta el nivel del lago para generar energía hidroeléctrica (~0.9 MW con el caudal de diseño en 2045).
- 3) Bombear las aguas a través de una tubería subacuática de presión baja, puesta con anclajes, que atraviesa el lago hasta San Lucas Tolimán, para evitar el conflicto de derechos de paso.
- 4) La tubería del colector llega a una caja de transición en San Lucas Tolimán, donde se bombea por un túnel horizontal para salir de la cuenca; aguas abajo el efluente pasa por la por tres estaciones hidroeléctricas, con una caída hidráulica total de 1,000 m, que rendiría una potencia de 5.5 MW con el caudal de diseño en 2045, Figura 3.
- 5) La potencia eléctrica para bombear fuera de la cuenca está calculada de 1.4 MW con el caudal de diseño en 2045, produciendo una potencia neta de 5.0 MW ($0.9 + 5.5 - 1.4$) para el uso de la población en la cuenca.
- 6) Después de las turbinas las aguas residuales están tratadas por un sistema de lagunas de estabilización de 200 ha, con énfasis en la remoción de patógenos, con 100% remoción de huevos de helmintos y $\geq 3.0 \log_{10}$ reducción de *E. coli*, para cumplir las recomendaciones de la OMS para reuso restringido en agricultura (WHO, 2006). Como parte del sistema se propone, dependiendo en el análisis detallado del mercado de pescado o de harina de pescado 30 ha de lagunas de acuicultura; el efluente de las lagunas de acuicultura debería cumplir las recomendaciones de la OMS de riego no restringido.
- 7) La Figura 4 muestra las lagunas, 200 ha y área de riego, 3,692 ha, para el caudal de diseño en 2045. En esta zona los cultivos podrían ser pasto, caña, café, aguacate, banano, mango, mandarina y limón. Los sistemas de riego para la producción agrícola no existen en la zona alrededor Patulul y los agricultores esperan la época de lluvia para realizar la siembra, lo que repercute en que se obtenga una cosecha al año (Deguate, sin fecha). El riego con aguas residuales tratadas permitiría la irrigación durante los 6 meses de la época seca, beneficiando la economía de la región.

Figura 3. Perfil de la tubería forzada con las estaciones hidroeléctricas



Figura 4. Áreas de riego y de las lagunas de estabilización proyectadas para 2045 (Referencia relativa ya que los lugares específicos no han sido seleccionados)



La Tabla 8 presenta los costos estimados de inversión del pretratamiento, colector subacuático, turbinas, generadores, y el sistema de lagunas de estabilización incluyendo las lagunas de acuicultura. La inversión del alcantarillado en las zonas urbanas no está incluida porque las tres alternativas requieren sistemas de colección. El costo estimado de inversión de \$101,847,926 Tabla 8. Inversión: Sistema de pretratamiento con estaciones de bombeo, colector subacuático, turbinas, generadores, y lagunas de estabilización

Colector subacuático/turbinas/motores		Total (US\$)
Pretratamiento	Calculado en el resumen técnico del proyecto*	\$11,880,395
Colector subacuático	Calculado en el resumen técnico del proyecto*	\$46,580,645

Turbinas/motores	(\$2,500,000/MW)(5.5 MW) =		\$13,750,000
Subtotal			\$72,211,040
Lagunas de Estabilización			
Tratamiento	Costo (US\$/m²)	Área (m²)	
Facultativa	\$12.09	480,000	\$5,805,072
Maduración	\$12.09	720,000	\$8,707,607
Acuicultura	\$12.09	300,000	\$3,628,170
Terreno			
Espejo de agua	\$5.00	1,500,000	\$7,500,000
20% adicional	\$5.00	375,000	\$1,875,000
	Costo (US\$/cápita)	Población	
Infraestructura	\$4.54	467,682	\$2,121,037
Subtotal			\$29,636,886
Costo total de inversión			\$101,847,926
Costo per cápita			\$217.77

* AALA, 2020.

La Tabla 9 presenta los costos de operación y mantenimiento de las estaciones de bombeo (pretratamiento) y de las turbinas, y el sistema de lagunas de estabilización, usando los datos de Wagner (2010) de 2008 extrapolados al año 2019 con un factor de inflación de 1.51. Los costos de operación y mantenimiento de las estaciones de bombeo (pretratamiento) y de las turbinas están estimados utilizando los valores para personal de lodos activados (Tabla 5) por falta de datos confiables de Guatemala. El costo estimado de \$976,511 por año, o \$2.09/cápita, es solo 31% del costo de operación y mantenimiento de lodos activados (\$3,160,345).

La Tabla 10 muestra la valorización, del sistema en 2025, el valor de los 337,260 kg de nitrógeno y 67,452 kg de fósforo, en vez de ser descargados, sería \$576,715 y \$103,202 respectivamente, si fueran comprados como fertilizantes. Se podrían producir una potencia neta de 2.87 MW inmediata con el arranque del sistema, con un valor a \$0.10 \$/kWh de \$2,515,618/año y en 2045, con los mismos precios por kg y por kWh, los valores doblan aproximadamente.

Tabla 9. Costos de operación y mantenimiento de las estaciones de bombeo y turbinas, y el sistema de lagunas de estabilización

Parámetro	Costo ¹ USD/cápi ta 2019	Costo/año USD 2019 Año 2045 P = 467,682
Personal	\$0.23	\$106,052
Energía	\$0.06	\$28,280
Análisis	\$0.05	\$21,210
Lodo	\$0.15	\$70,701
Insumos	\$0.23	\$106,052
Mantenimien to	\$0.23	\$106,052
Administraci ón	\$0.09	\$42,421
Estaciones de bombeo	\$0.53	\$247,871
Estaciones de turbinas	\$0.53	\$247,871
Total		\$976,511
Costo/persona/año		\$2.09

¹Extrapolación de costos/cápita en 2008 (Wagner, 2010) hasta 2019, usando FI de Guatemala de 1.51

Tabla 10. Valorización de efluente, nutrientes, e hidroelectricidad en dólares constantes, años 2025 y 2045

Efluente final	US\$/m ³	m ³ /año	US\$/año
Año 2025			
Agua para riego	\$0.04	11,242,000	\$449,680
	US\$/kg*	kg/año	
Nitrógeno (30 mg/L)	\$1.71	337,260	\$576,715
Fósforo (6 mg/L)	\$1.51	67,452	\$103,202
Hidroeléctricas (2025)	US\$/kWh	kWh/año	
2.87 MW neta	\$0.10	25,156,181	\$2,515,618
Total			\$3,645,215
Año 2045			
Agua para riego	\$0.04	21,900,000	\$876,000
	US\$/kg*	kg/año	
Nitrógeno (30 mg/L)	\$1.71	657,000	\$1,123,470

Efluente final	US\$/m ³	m ³ /año	US\$/año
Fósforo (6 mg/L)	\$1.51	131,400	\$201,042
Hidroeléctricas (2045)	US\$/kWh	kWh/año	
5.0 MW neta	\$0.10	43,921,378	\$4,392,138
Total			\$6,592,650
			\$14/cápita

*Precios de www.indexmundi.com/commodities para 2020.

El reuso de aguas residuales por su valor como fertilizante puede recibir créditos por emisiones evitadas en la producción de amonio-nitrato por el proceso Haber-Bosch, y en la minería y transporte de piedra de fosfato. La Tabla 11 muestra que en 2025 las emisiones evitadas podrían llegar a 1,487,452 kg CO₂ equiv/año en 2025 hasta 2,897,633 en 2045. Así el agua residual tiene valor no solamente como agua para riego, fertilizante, y potencia hidroeléctrica, sino también para su papel en cambio climático.

Tabla 11. Emisiones evitadas en la producción de fertilizantes en reusar las aguas residuales en agricultura

Nutriente	Factor de emisión*	Emisiones evitadas kg CO ₂ equiv/año	
		2025	2045
Nitrógeno (30 mg/L)	kg CO ₂ equiv/kg N		
	4.316	1,455,614	2,835,612
Fósforo (6 mg/L)	kg CO ₂ equiv/kg P		
	0.472	31,837	62,021
Total		1,487,452	2,897,633

*Factores de Wood y Cowie, 2004.

Otro aspecto importante es el análisis el balance hídrico de la cuenca. No hay estudios completos, pero con los datos disponibles es posible estimar magnitud de las entradas y salidas de agua en la cuenca y comparar con el trasvase de aguas residuales (López Choc, 2018).

La ecuación de balance: Salida = Precipitación - Evapotranspiración - Evaporación de la superficie

Tabla 12. Balance hídrico de la cuenca del Lago Atitlán¹

Parámetro	m ³ /año
Precipitación	696,253,000
Evaporación de superficie del lago	-288,449,000
Evapotranspiración de suelo/vegetación	-142,242,000
Salida subacuática del lago	265,561,000

¹Datos de López Choc (2018)

En base a los datos de la Tabla 12, se estima que la salida subacuática del lago es del orden de 265,561,000 m³/año. Con el trasvase aguas residuales a 60,000 m³/d = 21,900,000 m³/año en 2045, se calcula que el volumen trasvasado sería aproximadamente 8.2% de la salida subacuática del lago.

Los componentes de la opción de trasvase ya existen en Guatemala y se presentan algunas experiencias en la Tabla 13.

Tabla 13 Ejemplos de experiencias en Guatemala

Proyecto	Ubicación	Descripción
Reuso de aguas residuales, directas o diluidas, en agricultura, aplicadas por bombeo o gravedad	Todo el país	Una práctica común en el sector informal que contribuye a la prevalencia elevada de enfermedades relacionadas a las excretas humanas Los agricultores saben que el agua residual tiene valor
Lagunas de estabilización	Guastatoya San Benito Santiago Atitlán (Chuk Muk)	Sistemas funcionando por más de nueve años, con operación y mantenimiento mínimo
Estaciones de bombeo de aguas residuales	Todo el país	Hay cientos de estaciones de bombeo de aguas residuales en las ciudades de Guatemala que operan 24 h de rutina con mantenimiento continuo
Tubería subacuática de baja presión de HPDE¹	Flores, Guatemala	Las aguas residuales de Flores son bombeadas por una tubería subacuática con una longitud de 0.5 km al alcantarillado de San Benito
Proyecto hidroeléctrico con 6,000m de tubería de presión de HPDE²	Choloma, del grupo Secacao, Guatemala	Construido en 2010—2011 y en operación desde 2011. Tecnología de HPDE conocida en Guatemala
Hidroeléctricas	Todo el país	Hay mucha experiencia en Guatemala en hidroeléctricas y algunas utilizan aguas residuales como las de Río Las Vacas

¹Datos de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado Flores-San Benito, 2017

²Kreller, et al., 2014.

Los ingenieros que intentaron salvar el Lago Amatitlán no deberían ser olvidados. Ellos tenían razón en su concepto de trasvase, pero el desarrollo parcial en la cuenca determinó el resultado final. Hay que esperar que este no sea el caso de Lago Atitlán.

Conclusiones

Los esfuerzos para mejorar la gestión de las aguas residuales dentro de la cuenca han llevado al desarrollo tres opciones: **Opción 1** Tratamiento por

lodos activados, con procesos unitarios específicos para la remoción de patógenos, nitrógeno y fósforo a los niveles de calidad para descargar al lago, **Opción 2** Manejo integrado de aguas residuales con tratamiento, valorización y reuso en agricultura dentro de la cuenca sin descargar al agua superficial; **Opción 3** Trasvase de todas las aguas residuales fuera de la cuenca por medio de un colector subacuático, bombeo por San Lucas Tolimán, generación de

hidroelectricidad y tratamiento con reuso en agricultura.

La sostenibilidad económica de las opciones indica que:

- La opción 2 no es posible técnica ni socialmente a la escala de la cuenca.
- Los costos estimados de construcción, y especialmente de operación y mantenimiento, de la opción 1 serían mayor que la opción 3. La opción 1 requiere de tecnologías y personal especializado que no existen en Guatemala, ni en Latinoamérica. Además, el problema social de los derechos de paso, para tuberías que trasladen aguas residuales a plantas de tratamiento dentro de la cuenca, dificulta esta opción, incluso si la tecnología y la pericia técnica existieran.
- La opción 3 ofrece la ventaja de las tecnologías requeridas del trasvase—alcantarillados de gravedad hasta la orilla, estaciones de bombeo, tubería subacuática de HPDE, estaciones de generación hidroeléctrica, lagunas de estabilización que ya existen en Guatemala con años de experiencia en su diseño, construcción, y operación y mantenimiento. La valorización de las aguas residuales 2025, si fuera construida, podría producir 2.87 MW de hidroelectricidad neta, con un valor de \$2,515,618, y un valor del N y P aplicado en reuso de \$706,917 si fueron comprados como fertilizantes en el mercado. En el año 2045 los valores doblarían con el aumento de la población urbana y se calcula que el volumen trasvasado sería aproximadamente 8.2% de la salida subacuática del lago. El trasvase es la única alternativa que tiene la posibilidad de solucionar el problema con todos los recursos existentes en Guatemala

Referencias

- AALA (Asociación Amigos del Lago Atitlán), 2020. Resumen Técnico del Proyecto: Manejo Integral de Agua Potable y Aguas Residuales de la Cuenca del Lago Atitlán. 44pp.
- Allam, M.M., Hashimi, H., Elizabeth, S., Houle, S.A. 2010. A culture-centric and sustainable systems engineering approach: Water filtration in Guatemala's Tzununá. Proceedings of the 2010 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium. University of Virginia. Charlottesville.
- AMSCLAE, 2018. Priorización de Microcuencas. Subdirección Técnica, Panajachel, Guatemala.
- ASCE (American Society of Civil Engineers), sin fecha. Recuperado de <https://www.asce.org/project/reversal-of-the-chicago-river/>
- Atwood, W.W. 1933. Lake Atitlán. Geological Society of America Bulletin, 44(3), 661-668
- Bellows, K. 2008. Sacred Places of a Lifetime: 500 of the World's Most Peaceful and Powerful Destinations. National Geographic Books.
- Censo de Guatemala, 2018. <https://www.censopoblacion.gt/>
- Chandra, S., Dix, M., Rejmánková, E., Mosquera, V., Giron, G., Heyvaert, A. 2013. Current ecological state of the Lake Atitlán and the impact of sewage inflow: A recommendation to export sewage out of the basin to restore the Lake. A Unidos por el Lago Atitlán report. Recuperado de: <http://unidosporlagoatitlan.org/index.php/en/documents-/Documents/Reports--and--Publications/Current-ecological-state-of-Lake-Atitlan/>
- City of Milwaukee, sin fecha. Water treatment process. Recuperado de: <https://city.milwaukee.gov/water/customer/FAQs/qualityandhealth/Water-treatment-process.htm>
- CNEE (Comisión Nacional de Energía Eléctrica), sin fecha. Hidroeléctrica Río Las Vacas. CNEE, Guatemala. Recuperado de: http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=660
- Deguate, sin fecha. Economía en el municipio de Patulul. Recuperado de www.deguate.com/municipios/pages/suchitepequez/patulul/economia.php
- DICA/AMSCLAE, 2019a. Informe Monitoreo de la Salubridad de Fuentes de Agua para Consumo Humano.

- DICA/AMSCLAE, 2019b. Informe de Muestreo de las Plantas de Aguas Residuales de la Cuenca del Lago Atitlán, 2019.
- Eisenberg, J. N. S., Lei, X., Hubbard, A. H., Brookhart, M. A., Colford, Jr., J. M., 2005. The role of disease transmission and conferred immunity in outbreaks: Analysis of the 1993 *Cryptosporidium* outbreak in Milwaukee, Wisconsin. American Journal of Epidemiology, Vol. 161 (1), 62-72.
- Fox, K, R., Lytle, D. A., 1996. Milwaukee's crypto outbreak: Investigation and recommendations. Journal American Water Works Association. Vol. 88 (9), 87-94.
- Geólogos del Mundo, 2013. Estudio hidrogeológico y de recarga en la cuenca del lago de Atitlán (Guatemala), Proyecto Gestión Ambiental y de Riesgos en la Cuenca del Lago Atitlán, Fase III (GARICLA III).
- Huxley, A. 1935. Beyond the Mexique Bay, Chatto & Windus, London.
- King County, 2016. The Lake Washington Story. King County, Washington. Recuperado de <https://www.kingcounty.gov/services/environment/water-and-land/lakes/lakes-of-king-county/lake-washington/lake-washington-story.aspx?print=1>
- Kreller, J., Jacobs, R., Tormo, R., 2014. Big efforts for small hydro at Choloma project, Renewable Energy World, Recuperado de <https://www.renewableenergyworld.com/storage/big-efforts-for-small-hydro-at-choloma-project/#gref>
- Laubach, H. C., Bentley, C. Z., Ginter, E.L., Spalter, J. S., Jenson, L. A., 2004. A Study of Risk Factors Associated with the Prevalence of *Cryptosporidium* in Villages Around Lake Atitlan, Guatemala, The Brazilian Journal of Infectious Diseases, 8 (4), 319-323.
- López Choc, F, 2018. Balance del lago Atitlán. Informe de consultoría, Ciudad de Guatemala.
- Metcalf & Eddy/AECOM, 2014. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, Fifth Ed., McGraw-Hill Education, New York.
- Metcalf & Eddy/AECOM, 2007. Water Reuse, McGraw-Hill, New York
- MARN, 2011. Reglamento de descargas de aguas residuales en la cuenca del lago de Atitlán, Acuerdo Gubernativo No. 12-2011, Ciudad de Guatemala.
- Municipalidad de Guatemala, 1972. Plan de Desarrollo Metropolitano: Esquema Director de Ordenamiento Metropolitano – EDOM – 1972-2000, Dirección de Planificación, Ciudad de Guatemala.
- Nagata, J.M., Vallengia, C.R., Smith, N.W., Barg, F.K., Guidera, M., Bream, K.D. 2011. Criticisms of chlorination: social determinants of drinking water beliefs and practices among the Tz'utujil Maya. Revista Panamericana de Salud Pública, 29(1), 9–16.
- Padilla Cámara, T.A., Nancy García Álvarez, N., Pérez Duarte, W. 2010. Caracterización físico-química y bacteriológica, en dos épocas del año, de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 19 (3), 43-46.
- Rejmánková, E., Komarek, J., Dix, M., Komarkova, J., Giron, N., 2011. Cyanobacterial blooms in Lake Atitlan, Guatemala. Limnologica 41 (4), 296-302.
- Rodas-Pernillo, E. y Vasquez-Moscoso, C. A., 2020. Evaluación anual del fitoplancton y su respuesta a la calidad de agua en el lago de Amatitlán, Guatemala, Ciencia, Tecnología y Salud, Vol. 7 Núm. 2, 170-188.
- Sánchez de León, 2001. Estudio General de Caso: Sololá, Guatemala. Proyecto Regional, Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial. IDRC-OPS/HEP/CEPIS.
- Unidos por el Lago Atitlán, 2014. State of the Lake: Atitlán. University of Nevada, Reno.
- UN (United Nations), 2018. Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation. New York. 195pp.
- USEPA, 2014. Cyanobacteria and Cyanotoxins: Information for Drinking Water Systems. Office of Water, EPA-810F11001, 11 pp.
- USEPA, 2008. Municipal Nutrient Removal Technologies Reference Document, Vol. 1, Technical Report. Office of Wastewater Management, Municipal Support Division,

- Municipal Technology Branch, EPA 832-R-08-006.
- Wagner, W., 2010. Recomendaciones para la Elección de Plantas de Tratamiento de Agua Residual Aptas para Bolivia. ANESAPA. PROAPAC. La Paz, Bolivia.
- Weiss, C., 1971. Water Quality Investigations, Guatemala. Lake Amatitlán, 1968-1970. ESE Pub. No. 274, Department of Environmental Sciences and Engineering, School of Public Health, University of North Carolina at Chapel Hill.
- WHO (World Health Organization), 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, Volume 2, Wastewater use in agriculture, Geneva. 182pp.
- Wood, S., Cowie, A. 2004. A Review of Greenhouse Gas Emission Factors for Fertiliser Production. IEA Bioenergy Task 38, Research and Development Division, State Forests of New South Wales, Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting, 20pp.