

ECONOMÍA CIRCULAR EN EL PROCESAMIENTO MINERAL: USO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS TRATADAS EN PROCESOS DE FLOTACIÓN DE MINERALES SULFURADOS

Dr.- Ing. Gerardo Zamora E.

*Ing. José Ariel Tórrez Ch.

Docente Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro

* Investigador Junior – Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro

Ciudad Universitaria – Zona Sud – Oruro – Bolivia

gerardozamoraechenique@yahoo.es

* ari_xdd@yahoo.com

RESUMEN

En general, en la industria minero-metalúrgica que se desarrolla en zonas semi áridas, se ha reducido el uso y consumo de agua de manera considerable a través de su recirculación en el proceso. A pesar de esto, actualmente existe en muchas zonas mineras del altiplano boliviano, una gran escasez de agua para satisfacer a las plantas de procesamiento de minerales de algunas empresas mineras, dando prioridad a su uso en el abastecimiento a las poblaciones mineras.

Por otra parte, las poblaciones mineras de dichas zonas, no cuentan con plantas de tratamiento de sus aguas residuales urbanas; por lo que, la descargas de las mismas, alteran la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

En ese contexto, y en el marco de la economía circular en el procesamiento minero-metalúrgico, se deben buscar alternativas de solución integrales que pasan por establecer la viabilidad técnica del uso de aguas residuales urbanas tratadas para su aplicación en los procesos de flotación de minerales sulfurados y el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), de manera tal que, sus descargas puedan ser utilizadas en dichos procesos de flotación.

Esta investigación se enfocó en estudiar la aplicación de las aguas residuales tratadas provenientes de una PTAR en el procesamiento de minerales sulfurados del yacimiento minero de Poopó y el diseño de una PTAR con la tecnología de lodos activados para el municipio del mismo nombre.

Las pruebas experimentales se realizaron con una muestra de mineral sulfurado del ingenio minero ubicado en el municipio de Poopó con aguas tratadas de la PTAR del municipio de Yunguyo-Perú, esta fue elegida por presentar los niveles más altos de eficiencia de tratamiento. Se determinó que con las aguas citadas es posible alcanzar concentrados de Zn de hasta 46.39%, con una recuperación de 94.28%.

Por otra parte, el diseño y dimensionamiento de la PTAR por la tecnología de lodos activados, para una población proyectada a 15 años de 11668 habitantes, permitirá una descarga de efluente cerca de 5 ppm de DBO₅ y 32 ppm de sólidos en suspensión según la siguiente propuesta de diseño: $Q_{\text{diseño}} = 80.96 \text{ l/s}$, $V_{\text{desarenador}} = 1239.30 \text{ m}^3$, $V_{\text{reactor aireado}} = 1799.59 \text{ m}^3$, y $V_{\text{reactor cloración}} = 1253.83 \text{ m}^3/\text{día}$.

En conclusión, la implementación de una PTAR en el municipio de Poopó, permitiría descargar aguas residuales tratadas que pueden ser suficientes en volumen y adecuadas para el proceso de flotación de minerales de zinc en la planta minera de Poopó.

Palabras Clave: Economía Circular en Minería – Uso de aguas residuales en flotación – Diseño y dimensionamiento de PTAR

CIRCULAR ECONOMY IN MINERAL PROCESSING: USE OF TREATED URBAN WASTEWATER IN SULFURATED MINERAL FLOTATION PROCESSES

ABSTRACT

In general, in the mining-metallurgical industry that takes place in semi-arid areas, the use and consumption of water has been reduced considerably through its recirculation in the process. Despite this, there is currently in many mining areas of the Bolivian highlands, a great shortage of water to satisfy the mineral processing plants of some mining companies, giving priority to its use in supplying the mining populations.

On the other hand, the mining towns in these areas do not have treatment plants for their urban wastewater; therefore, their discharge alters the quality of surface and groundwater.

In this context, and within the framework of the circular economy in mining-metallurgical processing, comprehensive solution alternatives must be sought that go through establishing the technical feasibility of using treated urban wastewater for its application in mineral flotation processes von sulfides and the design of wastewater treatment plants (WWTP), so that their discharges can be used in said flotation processes.

This research focused on studying the application of treated wastewater from a WWTP in the processing of sulphide minerals from the Poopó mining deposit and the design of a WWTP with activated sludge technology for the municipality of the same name.

The experimental tests were carried out with a sample of sulfurized mineral from the mining mill located in the municipality of Poopó with treated water from the WWTP of the municipality of Yunguyo-Peru, this was chosen because it presented the highest levels of treatment efficiency. It was determined that with the mentioned waters it is possible to reach Zn concentrates of up to 46.39%, with a recovery of 94.28%.

On the other hand, the design and sizing of the WWTP by activated sludge technology, for a projected population of 11668 inhabitants over 15 years, will allow an effluent discharge of about 5 ppm of BOD5 and 32 ppm of suspended solids according to the following design proposal: $Q_{design} = 80.96 \text{ l/s}$, $V_{desander} = 1239.30 \text{ m}^3$, $V_{reactor \text{ aerated}} = 1799.59 \text{ m}^3$, and $V_{reactor \text{ chlorination}} = 1253.83 \text{ m}^3 / \text{day}$.

In conclusion, the implementation of a WWTP in the municipality of Poopó would allow the discharge of treated wastewater that may be sufficient in volume and suitable for the zinc mineral flotation process at the Poopó mining plant.

Key Words: Circular Economy in Mining - Use of floating wastewater - Design and dimensioning of WWTP

1. INTRODUCCIÓN

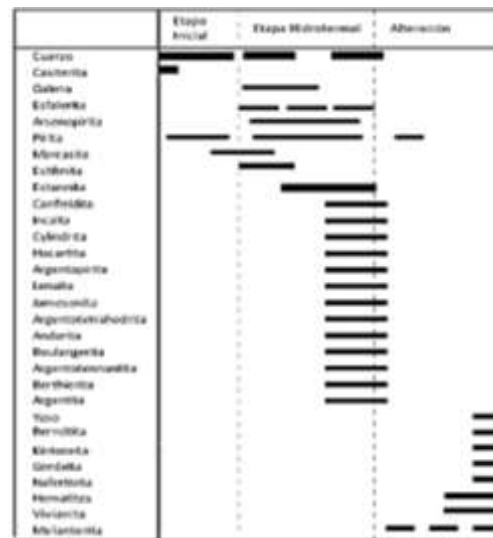
El Municipio de Poopó se encuentra al suroeste del territorio boliviano a 3,700 m de altitud. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas $18^{\circ}22'49''\text{S}$ $66^{\circ}57'57''\text{O}$. La provincia de Poopó está formada por tres municipios: Poopó, Pazña y Antequera (Figura 1).



Figura 1.- Situación geográfica del municipio de Poopó. [1]

El mineral de la mina Poopó es catalogado como uno de los minerales más complejos dentro del género de los minerales polimetálicos. A partir del estudio realizado por Payá [2], se ha deducido la secuencia paragenética general del yacimiento de Poopó, se tiene el análisis mineralógico a detalle del yacimiento de Poopó en la siguiente figura:

Figura 2.- Secuencia paragenética de los minerales de la provincia de Poopó [2].



El sector tiene una importancia excepcional, al encontrarse en la zona en cuestión vetas polimetálicas de Zn-Ag-Pb-Sn-Sb de mineralización compleja, La variedad es amplia, sulfosales, sulfoestannatos argentíferos, (cilindrita, franqueita, teallita) y de fosfatos (vivianita, bauxita, wavelita, etc.) Los yacimientos del área continúan siendo explotados, por empresas y cooperativas mineras, donde los principales minerales trabajados son los complejos de zinc, plata, plomo, y estaño.

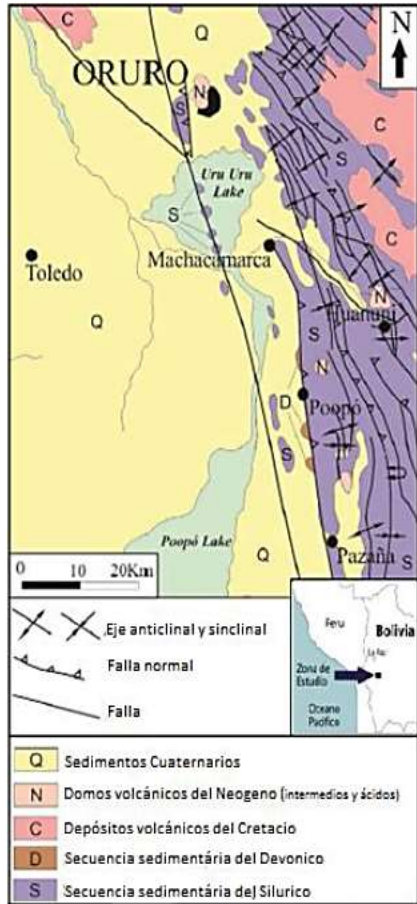


Figura 3.- Mapa geológico del área minera de Poopó, con indicación de las principales minas. [2]

La planta de procesamiento mineral por flotación, denominada Ingenio de Poopó, trata 200 toneladas por día de mineral procedente de la Mina Nazareno y se obtienen concentrados de Zn aptos para su comercialización. El flujograma de procesamiento es presentado en la figura siguiente:

La figura siguiente, muestra los mapas de Bolivia, referidos a la precipitación, evapotranspiración y amenazas de sequía, de donde se desprende que, en el altiplano boliviano, donde opera el Ingenio de Poopó, se tienen bajos índices de precipitación; altos índices de evapotranspiración; generando así una zona con alto grado de sequía.



Figura 4.- Mapas de precipitación, evapotranspiración y de sequía en Bolivia. [3]

Al extremo que, el lago Poopó, cercano a la operación minera, ha sufrido su desecación casi total el 2016, como se muestra en la figura siguiente:

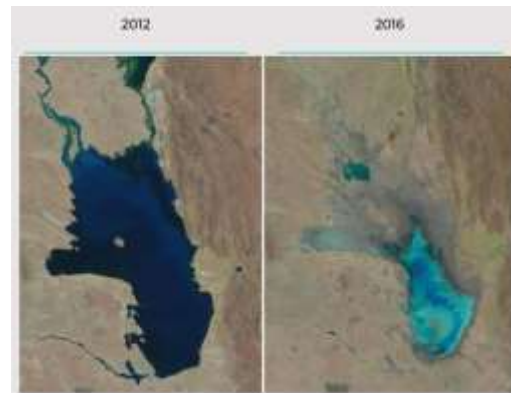


Figura 5.- Imagen de sequía del lago Poopó 2012 y 2016. [4]

En ese contexto, en la industria minero-metalúrgica que se desarrolla en éstas zonas semi áridas, se ha reducido el uso y consumo de agua de manera considerable a través de su recirculación en el proceso. A pesar de esto, actualmente existe en muchas zonas mineras del altiplano boliviano, una gran escasez de agua para satisfacer a las plantas de procesamiento de minerales de algunas empresas mineras, dando prioridad a su uso en el abastecimiento a las poblaciones mineras.

Por otra parte, las poblaciones mineras de dichas zonas, no cuentan con plantas de tratamiento de sus aguas residuales urbanas; por lo que, la descargas de las mismas, alteran la calidad de las aguas superficiales que finalmente drenan sus aguas al Lago Poopó, generando un impacto significativo en los ecosistemas acuáticos.

De acuerdo al último censo en Bolivia, realizado por el INE el 2012, la población de la zona minera de Poopó y de otras aledañas, es presentada en la tabla siguiente:

DEPARTAMENTO Y MUNICIPIO	POBLACIÓN EMPADRONADA			DENSIDAD DE PUEBLO (HABITANTES POR KILOMETRO CUADRADO)	PARTICIPACIÓN POR ÁREA		PORCENTAJE DE POBLACIÓN REGISTRADA CON CÉDULA DE IDENTIDAD	PORCENTAJE DE POBLACIÓN CON CÉDULA DE IDENTIDAD
	Total	Hombres	Mujeres		Urbana	Rural		
Total								
Poopó	7.507	3.894	3.721	1,9	85,8	90,1	95,7	95,2
Yunguyo	3.955	2.097	2.258	0,8	19,2	0,0	39,0	85,3
Interoceánico	1.364	1.076	1.386	0,2	0,0	0,0	0,0	82,2

Tabla 1.- Indicadores de población, según departamento y municipio, censo 2012 (Fuente: INE). [5]

En ese contexto, es interesante dar una solución integral al problema; es decir, por una parte estudiar si las aguas servidas previo tratamiento, pueden ser utilizadas en el proceso de flotación; y por otra, el diseño y dimensionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales que puede satisfacer la falta de agua en el procesamiento de minerales y contaminación a las aguas superficiales del sector.

Por otra parte, de acuerdo al informe de la GTZ[6] respecto a las PTARs que operan en Bolivia, se ha concluido que la planta que utiliza lodos activos, son las más eficientes. De acuerdo al informe señalado, la PTAR de Yunguyo - Desaguadero, es la más eficiente, llegando incluso a estándares internacionales, en cuanto a la concentración de contaminantes en su descarga; además, de cumplir también con la eliminación de gérmenes y patógenos; por lo que, ésta será considerada para el diseño y dimensionamiento de la PTAR para las aguas residuales de la población minera de Poopó. Dicha PTAR sido diseñada para tratar un caudal promedio de 25.5 l/s y un caudal máximo de 56 l/s con una proyección al año 2030. El agua residual urbana ingresa con valores de DBO5 de 330 mg/L y sólidos suspendidos totales (SST) de 300 mg/L, obteniéndose 4 mg/L y 2 mg/L, respectivamente. La PTAR está compuesta por dos líneas de tratamiento, línea de agua y línea de lodo. La línea de agua está compuesta por un tratamiento primario que tiene el objetivo de retener toda la materia inorgánica (sólidos, arenas, aceite y grasas), tratamiento secundario permite remover la carga orgánica esto debido a la tecnología por lodos activados y la etapa de desinfección que se realiza a través de rayos ultravioleta para la eliminación de coliformes. Finalmente, la flotación de minerales sulfurados con el uso de aguas residuales urbanas tratadas, ha sido presentada por varios autores [7, 8 y 9]. Así mismo, la flotación de minerales de Zn [10, 11, 12 y 13], que han demostrado su factibilidad técnica.

En este marco, el presente trabajo de investigación se circunscribe a estudiar a nivel laboratorio la flotación de minerales sulfurados de zinc utilizando aguas residuales urbanas tratadas procedentes de la PTAR de Desaguadero el cual opera en buenas condiciones y cuyo diseño pueda ser replicado para su implementación en el municipio de Poopó.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La muestra de mineral complejo se obtuvo de la alimentación del ingenio de Poopó, con una previa disminución de tamaño en una trituradora de mandíbulas. La trituración secundaria de la muestra de mineral de aproximadamente de 30 kg se realizó en una trituradora de doble rodillo de laboratorio en seco ajustando el setting a un tamaño aproximado de 1/4 “. Por cuarteo, se tomaron muestras representativas para realizar la caracterización física, química y mineralógica.

Por otra parte, de la PTAR de Yunguyo, se tomó una muestra de la descarga del agua residual tratada y con una adecuada refrigeración y preservación, se llevó a la ciudad de Oruro, para su respectiva caracterización físico-química. Asimismo, para esta investigación, se ha utilizado una muestra de agua de recirculación de la planta de procesamiento de minerales del municipio de Poopó.

Las pruebas de flotación a nivel laboratorio se realizaron con 1 kg de muestra con un d_{80} de -140#Ty, producto de la molienda, con diferentes tipos de aguas (agua potable, agua de recirculación y agua residual tratada). La flotación de minerales sulfurados de zinc, se llevó a cabo a partir del flujograma presentado en la Figura 5, donde se describen también las condiciones de flotación tanto en la primera (flotación rougher) como en la segunda etapa (flotación scavenger).

El Diseño y dimensionamiento de la PTAR para la comunidad minera de Poopó por la Tecnología de Lodos Activados consideró los siguientes aspectos: Proyección de la población para una dotación futura, caudal de diseño, diseños del canal con sección rectangular, el sistema de desbaste, tanque desarenador, cálculo de DBO5 y SST, diseño del reactor aireado y del tanque de sedimentación secundario, además de la desinfección con cloro.

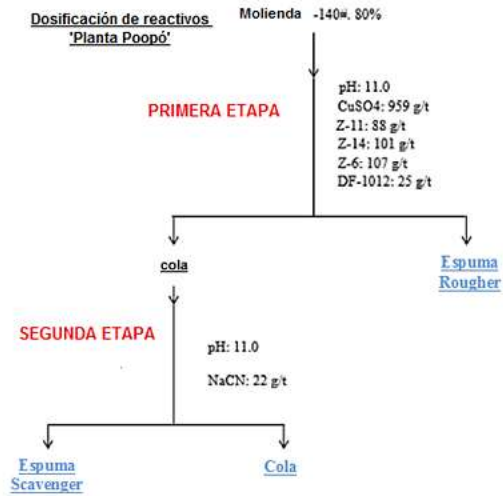


Figura 6.- Flujograma de flotación de minerales sulfurados de zinc, ingenio de Poopó.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este acápite se divide en tres secciones; por una parte, los resultados que corresponden a la caracterización tanto de la muestra de mineral,

El análisis cualitativo de las especies mineralógicas presentes en la muestra representativa se llevó a cabo por la técnica de difracción de rayos X (DRX), su resultado se muestra en la tabla 5.3.

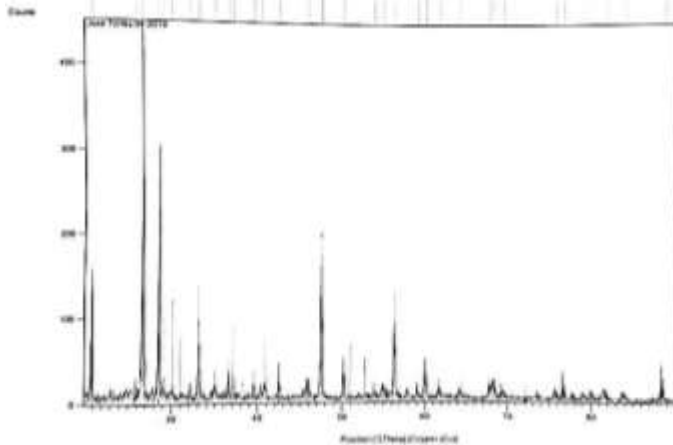


Figura 6.- Difractograma de la muestra representativa de cabeza

Los resultados de la prueba de molienda a un porcentaje de 60% sólidos a diferentes tiempos (5, 10 y 15 minutos), es presentada en la tabla siguiente:

como de las diferentes aguas usadas para las pruebas de flotación; y por otra, las pruebas de flotación de menas sulfuradas de zinc con agua potable de la ciudad de Oruro, agua de proceso del ingenio de Poopó y aguas tratadas descargas de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de Desaguadero; y finalmente, los resultados obtenidos en el diseño y dimensionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de Poopó, con la tecnología de lodos activados.

3.1 Caracterización de la muestra del mineral complejo estudiado

La muestra de mineral complejo se obtuvo de la alimentación del ingenio de Poopó, presenta un peso específico de 3.2 g/cm³. La caracterización química de los elementos presentes en la muestra representativa se muestra en la tabla 5.2.

Tabla 10.- Análisis químico de la muestra.

Zn	Pb	Ag	Fe	S
10.59%	0.07%	0.09 D.M	15.98%	22.51%

Mineral	Fórmula
Cuarzo	SiO ₂
Esfalerita	(Zn _{0.721} ,Fe _{0.279})S
Pirita	FeS ₂
Qandilita	Mg ₂ (TiO ₄)
Hidroxiapatita	Ca ₁₀ (OH) ₂ (PO ₄) ₆
Piropilita	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Wurtzita	ZnS
Brucita	Mg(OH) ₂

Tabla 11.- Especies mineralógicas principales en el mineral complejo de Pb-Ag-Zn.

Tabla 12.- Tiempo de molienda para diferentes P80

Tiempo (min)	80% pasante
5	53.9

10 71.1

Gerardo Zamora, José Ariel Tórriz

Los resultados de la distribución granulométrica del producto de molienda obtenido y su comparación con la de la alimentación, se presentan en la figura siguiente:

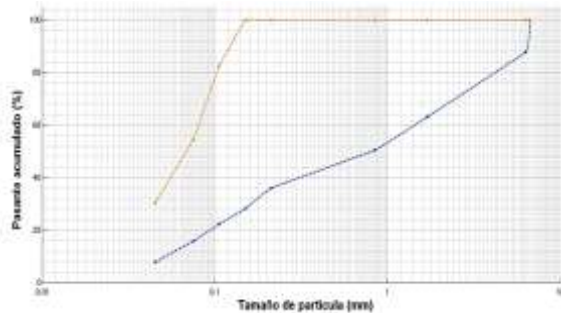


Figura 7.- Comparación de las curvas granulométricas de alimentación y descarga del molino, con el eje de las abscisas en forma logarítmica

3.1.1 Caracterización del efluente de descarga de la PTAR Desaguadero - Yunguyo

Los resultados obtenidos a través del análisis químico de la muestra de la descarga de la PTAR Yunguyo en SPECTROLAB, dieron cuenta de la calidad del agua lo que significa que las aguas tratadas pueden ser aptas para diferentes actividades por ejemplo la minería. Los valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.- Análisis químico de agua tratada de la PTAR Yunguyo.

Parámetros	Resultados	Unidad
DBO5	5	mg/L
Sólidos Suspendedos Totales	32	mg/L

3.1.2 Caracterización del agua de recirculación de la planta del municipio de Poopó

Para esta investigación se ha utilizado una muestra de agua de recirculación de la planta de procesamiento de minerales del municipio de Poopó. La tabla siguiente, presenta el análisis químico de la muestra de agua de recirculación.

Tabla 6.- Análisis químico de la muestra de agua de recirculación de la planta de procesamiento de minerales del municipio de Poopó en unidades de ppm.

Ca	Fe	Ag	Pb	Zn	Cu
855.69	98.59	0.07	0.45	140.41	0.39

3.2 Resultados de la flotación de minerales sulfurados de zinc con diferentes tipos de aguas

Se llevó a cabo tres pruebas de flotación con diferentes tipos de aguas bajo las mismas condiciones de operación, grado de molienda y consumo de reactivos. En la siguiente tabla se presenta el procesamiento de minerales para la muestra del municipio de Poopó.

Tabla 7.- Flotación Rougher con 1) agua potable, 2) agua de recirculación y 3) agua tratada

Prueba	Grado de molienda		pH	Flotación Rougher					
				Consumo de Reactivos					
	-140# Ty %	d ₈₀ um		Cal g	CuSO4 g/t	Z-11 g/t	Z-14 g/t	Z-6 g/t	D.F 1012 g/t
1	80	103.2	11	8.5	959	88	101	107	25
2	80	103.2	11	11.5	959	88	101	107	25
3	80	103.2	11	16.5	959	88	101	107	25

Se encontró a través de las pruebas de flotación con diferentes tipos de aguas los siguientes resultados. Consecuentemente la comparación es presentada en la siguiente tabla:

Tabla 8.- Comparación de resultados de las pruebas de flotación con diferentes tipos de aguas

Flotación con agua potable			
PRODUCTO	%PESO	LEY %Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	20.40	44.46	85.65
CONCENTRADO	2.80	37.31	9.86
COLA	76.80	0.62	4.49
CAB. CALCULADA	100.00	10.59	100.00
Flotación con agua de recirculación			
PRODUCTO	%PESO	LEY %Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	21.25	44.41	93.94
CONCENTRADO	2.53	7.64	1.88
COLA	76.22	0.59	4.19
CAB. CALCULADA	100	10.59	100.00
Flotación con agua residual urbana tratada			
PRODUCTO	%PESO	LEY %Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	20.20	46.39	88.49
CONCENTRADO	2.40	27.44	6.22
COLA	77.40	0.72	5.29
CAB. CALCULADA	100.00	10.59	100.00

3.3 Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales por el proceso de lodos activados [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20]

a) Cálculo de la población futura

Para el diseño de la planta de tratamiento, y con los datos del censo del 2012 del INE - Bolivia, considerando además que el municipio de Poopó presenta una tasa anual de crecimiento poblacional de 1.9%, se determinó una población futura (P_f) para el 2035 de 11668 habitantes. La ecuación de cálculo usada es la siguiente:

$$P_f = P_o * e^{\left(\frac{i*t}{100}\right)} \quad (1)$$

En base a la siguiente ecuación, se ha estimado el caudal de dotación futura para el 2035 de $D_f = 53.88$ [l/hab-día]:

$$D_f = D_o * \left(1 + \frac{d}{100}\right)^t \quad (2)$$

b) Caudal de diseño

El caudal de diseño debe ser estimado para el dimensionamiento de los diferentes componentes

de la planta de tratamiento de aguas residuales. Se deben considerar los caudales medio diario, máximo diario y máximo horario

Es el consumo medio diario de una población, obtenido en un año de registro. Se determina con base en la población del proyecto y dotación, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q_m = \frac{P_f * D_f}{86400} * C \quad (3)$$

Es la demanda máxima que se presenta en un día del año; representa el día de mayor consumo del año. Se determina multiplicando el caudal medio diario por el coeficiente K_1 que varía, según las características de la población.

$$Q_{\max-d} = K_1 * Q_m \quad (4)$$

Es la demanda máxima que se presenta en una hora durante un año completo. Se determina multiplicando el caudal máximo diario por el coeficiente K_2 que varía, según el número de habitantes de 1.5 a 2.2 tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$Q_{\max-h} = K_2 * Q_{\max-d} = K_1 * K_2 * Q_m \quad (5)$$

En resumen, y con los datos concernientes al municipio de Poopó, se han obtenido los datos siguientes: Caudal medio: $Q_m = 5.82$ [l/s]; caudal mínimo: $Q_{\min} = 2.91$ [l/s]; caudal máximo diario: $Q_{\max-d} = 8.73$ [l/s]; y finalmente, caudal máximo horario: $Q_{\max-h} = 20.24$ [l/s]

Finalmente, el caudal de diseño que corresponde a la carga líquida que llega al punto de vertimiento municipal, de acuerdo con la proyección de la población al año 2035, será de 80.96 l/s.

c) Diseño del canal abierto

Se propone un canal a cielo abierto y con sección rectangular que transportará el efluente líquido. Los datos obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9.- Valores propuestos para el diseño del canal rectangular.

Parámetros	Valor	Unidad	Parámetros	Ecuación
bordo libre	0.15	m	$BL = \frac{1}{3} * y$	6
Área del canal	0.09	m ²	$A = y * b$	7
Velocidad del flujo en el canal	0.92	m/s	$V_m = \frac{V_m}{\sqrt{g * \frac{A}{T}}}$	8
Número de Froude	0.44		$N^{\circ}F = \frac{V_m}{\sqrt{g * \frac{A}{T}}}$	9
Ancho total del canal	0.5	m	$B_t = 2 * e + b$	10
Altura total del canal	0.89	m	$H_t = BL + y + e'$	11

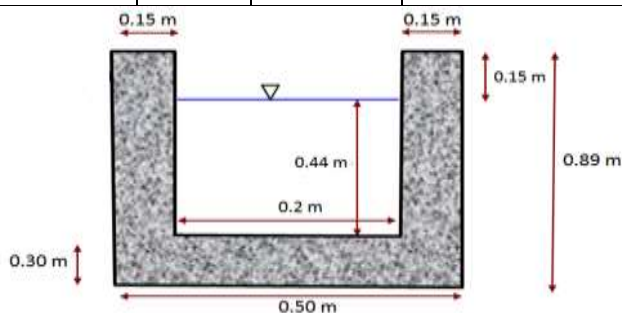


Figura 8.- Dimensiones propuestas del canal

d) Dimensionamiento del canal parshall

El canal Parshall responde a las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 10.- Valores propuestos para el diseño del canal parshall.

Parámetros	Valor	Unidad
Altura de agua en la sección de medición	0.375	m
Ancho de la sección de medición	0.319	m
Velocidad en la sección de medición	0.677	m/seg
Caudal específico	0.533	m ³ /seg
Carga hidráulica disponible	0.512	m
Tirante crítico	0.308	m
Velocidad antes del resalto	2.37	m/seg
Altura de agua antes del resalto	0.225	m
Número de Froude	1.6	
Altura de salida después del resalto	0.409	m
Velocidad en el resalto	1.303	m/seg
Altura en la sección de salida del canal	0.371	m
Velocidad en sección de salida	0.554	m/seg
Pérdida de carga en el resalto	0.08	m
Verificación del caudal	0.077	m ³ /seg

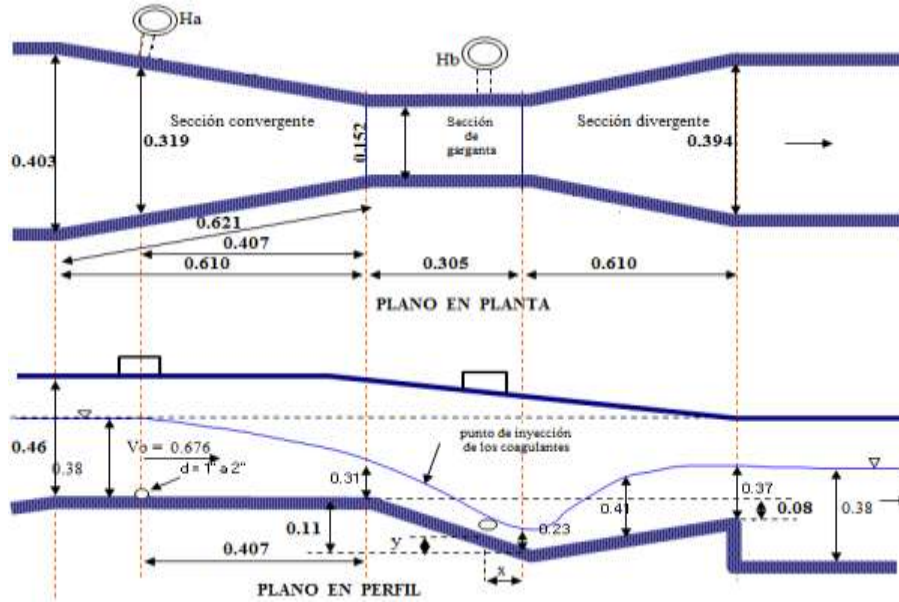


Figura 9.- Dimensionamiento del canal Parshall

Tabla 10.- Dimensiones del canal Parshall

W	A	B	C	D	E	F	G	K	N	
pulg	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	
6''	15.2	62.1	61	39.4	40.3	45.7	30.5	61	7.6	11.4

e) Dimensiones propuestas para el diseño del canal de desbaste.

El canal de desbaste responde a las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 11.- Valores propuestos para el diseño del canal de desbaste.

Parámetros	valor	Unidad	Fórmula	Ecuación
Longitud de transición	0.25	m	$L_{trans} = \frac{b''}{\tan \alpha}$	
Altura total del canal mojado de desbaste	0.59	m	$h = y + BL$	
Longitud del canal de rejillas o desbaste	2	m	$L' = L_t - 2 * L_{trans}$	
Longitud de la reja inclinada	0.83	m	$Lb = \frac{h}{\text{Sen } \theta}$	
Longitud de la reja horizontal	0.59	m	$L'' = \sqrt{Lb^2 + h^2}$	
Distancia de la plataforma	0.91	m	$Blm = L' - L''$	
Eficiencia de la rejilla	72.46	%	$E = \frac{s}{s + e_r} * 100$	
Número de barras	9	barras	$N^{\circ}b = \frac{b'}{e_r + s}$	
Verificación del error relativo	0.6	%	$E_r = \frac{ b' - b'' }{b'} * 100$	
Cálculo de la pérdida de carga (KIRSCHMER)	0.004	m	$\Delta h = \beta * \left(\frac{e_r}{s}\right)^{\frac{4}{3}} * \frac{v_m^2}{2 * g} * \text{sen } \theta$	

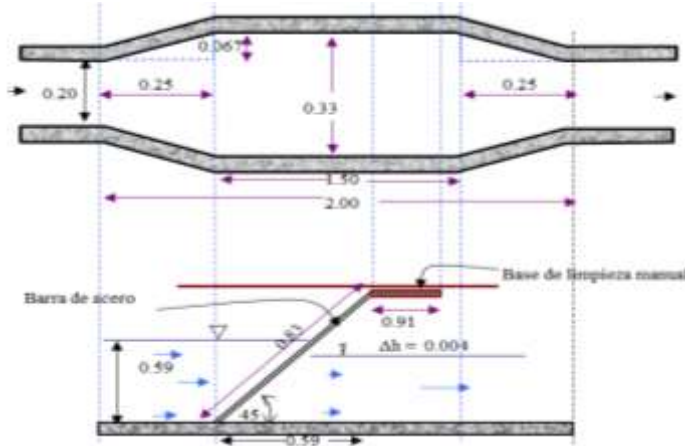


Figura 10.- Dimensiones propuestas del canal de desbaste

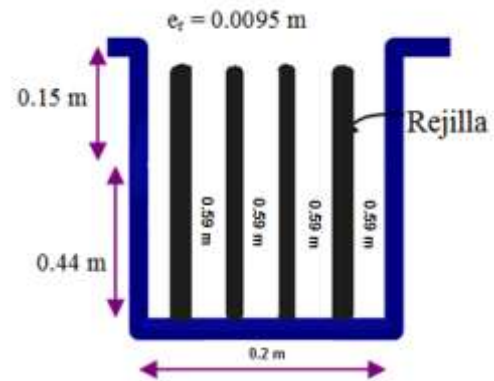


Figura 11.- Dimensiones de la rejilla de desbaste

f) Dimensionamiento del desarenador

Cabe mencionar que, para el desarenador se tiene dos tanques separados mediante un muro longitudinal con las mismas características, con el fin de dar más tiempo al desarenador para que las sustancias que tengan peso específico menor que el agua puedan separarse mientras las aguas residuales contenidas en el tanque paralelo alimentará al reactor aireado. El dimensionamiento del tanque desarenador se describe de la siguiente manera:

Tabla 12.- Resultados obtenidos para el diseño del tanque desarenador

Parámetros	Valor	Unidad
Relación Ancho - Profundidad	4.9 : 1	
Volumen del tanque desarenador	1239.30	m ³
Ancho del tanque desarenador	17.15	m
Largo del tanque desarenador	20.65	m
Altura del tanque desarenador	3.50	m

h) Parámetros de dimensionamiento del reactor aireado.

El dimensionamiento del reactor aireado responde a las especificaciones técnicas siguientes:

Tabla 14.- Resultados obtenidos para el diseño del reactor aireado

Parámetros	Valor	Unidad	Fórmula	Ecuación
Volumen del reactor aireado	1239.30	m ³	$V_r = \frac{\theta_c * Q_{dis} * Y * (S_o - S)}{X * (1 + K_d * \theta_c)}$	28
Factor	0.385	adimensional	$Y_{obs} = \frac{Y_c}{1 + K_d * \theta_c}$	29
Producción de fango	457.59	Kg/día	$P_x = Y_{obs} * Q * (S_o - S)$	30
Producción total de fango	571.98	Kg/día	$P_{x(ss)} = \frac{P_x}{0.8}$	31
Caudal de fango a purgar	32.70	m ³ /día	$Q_w = \frac{M_{purgar}}{IVF}$	32
Tiempo de retención hidráulica	4.32	Horas	$t_r = \frac{V_r}{Q_o}$	33

g) Cálculo del DBO5 y SST

Los datos típicos que se encontraron en las aguas servidas para el municipio de Poopó se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 13.- Resultados obtenidos de la carga contaminante a tratar en la PTAR

Parámetro	Valor	Unidad	Fórmula	Ecuación
Pc	11435	[Hab]	$P_o * (\frac{\%C}{100})$	25
DBO5	180	[mg/l]	$(\frac{SS * P_c}{Q_{dño}})$	26
SS	212.5	[mg/l]	$(\frac{SS * P_c}{Q_{dño}})$	27

Relación alimento / microorganismo	0.33	Días	$\frac{F}{M} = \frac{S_o}{t_r * X_r}$	34
Carga volumétrica	1016.47	g/m ³ *día	$C_v = \frac{S_o * Q}{V_r}$	35
Caudal de recirculación	2999.31	m ³ /día	$Q_r = \frac{Q_{dis} * X}{IVF - X}$	36
Demanda de oxígeno	1099.83	Kg O ₂ /día	$\frac{Kg O_2}{día} = masa DBO_L - (1.42 * P_x)$	37
Cantidad de aire real necesario	75.14	m ³ aire/min		

i) Parámetros de dimensionamiento del tanque de sedimentación secundario.
El tanque de sedimentación secundario, presenta las siguientes características técnicas:

Tabla 15.- Resultados obtenidos para el tanque de sedimentación secundario

Parámetros	Valor	Unidad	Fórmula	Ecuación
Caudal total	9997.71	m ³ /día	$Q_t = Q_{dis} + Q_r$	38
Volumen del tanque de sedimentación	1799.59	m ³	$V_c = Q_c * \theta$	39
Altura del tanque de sedimentación	9.65	m	$h_{tanq.sec.} = \sqrt[3]{\frac{V_{tanq.sec.}}{2}}$	40
Largo del tanque de sedimentación	19.30	m	$l_{tanq.sec.} = 2 * h_{tanq.sec.}$	41
Ancho del tanque de sedimentación	9.65	m	$P_{tanq.sec.} = h_{tanq.sec.}$	42

j) Tratamiento y desinfección de agua por medio de cloro.
El proceso de desinfección con cloro, presenta las siguientes características técnicas:

Tabla 16.- Resultados obtenidos para la desinfección con cloro

Parámetros	Valor	Unidad	Fórmula	Ecuación
Caudal total	6965.7	m ³ /día	$Q_c = Q_t - Q_r - Q_w$	43
Volumen del tanque de cloración	1253.83	m ³	$V_c = Q_c * \theta$	44
Altura del tanque de cloración	8.56	m	$h_{tanq.cl.} = \sqrt[3]{\frac{V_{tanq.cl.}}{2}}$	45
Largo del tanque de cloración	17.12	m	$l_{tanq.cl.} = 2 * h_{tanq.cl.}$	46
Ancho del tanque de cloración	8.56	m	$P_{tanq.cl.} = h_{tanq.cl.}$	47

4. CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación, han permitido establecer las siguientes conclusiones:

La muestra de la descarga de las aguas residuales de la PTAR de Yunguyo - Desaguadero, presenta: 5 ppm de DBO₅ y 32 ppm de sólidos suspendidos.

La muestra de mineral estudiada presenta un contenido de 10.59 % de Zn, 0.07 % de Pb y 0.09 DM de Ag; además, como especies mineralógicas de interés presentes en la muestra se puede citar a la esfalerita y la wurtzita.

La prueba de molienda con dicha muestra se llevó a cabo a diferentes tiempos de 5, 10, 15 minutos con el fin de conseguir un producto del 80% de partículas que debe pasar el tamiz de -140# Tyler,

consecuentemente el tiempo que se acercó a este tamaño de partícula es de 15 minutos.

Las aguas de recirculación de la planta de procesamiento de minerales del municipio de Poopó, presentan en ppm: 855.69 Ca, 98.59 Fe, 0.07 Ag, 0.45 Pb, 140.41 Zn y 0.39 Cu.

A través de las pruebas de flotación a nivel laboratorio con diferentes tipos de aguas (potable, de recirculación del circuito y residual tratada), se alcanzaron recuperaciones de: 85.65%, 88.58%, 94.28% y un grado de contenidos de Zn en los concentrados de 44.46%, 46.39% y 44.41%, respectivamente.

De los resultados metalúrgicos obtenidos se muestra un comportamiento típico que a mayor recuperación, menor ley. Por otra parte se determinó que la mayor recuperación de mineral sulfurado de zinc es de 94.28%, obteniéndose una ley de 44.41%, en la flotación con aguas residuales tratadas; por lo que, es técnicamente viable el uso de aguas residuales tratadas en la flotación de complejos sulfurados de Zn, con un efecto un efecto positivo en la recuperación por la presencia de componentes orgánicos disueltos, generando además espumas de menor diámetro, más voluminosas, de alta consistencia y durabilidad en comparación al uso de aguas de recirculación y de agua potable.

El diseño y dimensionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de Poopó, proyectada para una población al año 2035 es de 11668 habitantes y cuyas características permitirán una descarga de efluente con cerca de 5 ppm de DBO₅ y 32 ppm de sólidos en suspensión, deberá tener como base de cálculo los datos siguientes:

Caudal medio: $Q_m = 5.82$ [l/s]

Caudal mínimo: $Q_{\min} = 2.91$ [l/s]

Caudal máximo diario: $Q_{\max-d} = 8.73$ [l/s]

Caudal máximo horario: $Q_{\max-h} = 20.24$ [l/s]

Caudal de diseño: $Q_{\text{año}} = 80.96$ [l/s]

Las dimensiones calculadas para la planta de tratamiento de las aguas residuales domésticas de la población serán:

- Canal de ingreso de 0.5 m de ancho y una altura de 0.89 m.
- Garganta del canal de Parshall de 6 pulgadas/pie
- El canal de desbaste de cuatro rejillas de acero inoxidable con un ángulo de 45° medirá

0.83m, por otra parte, la eficiencia de la rejilla es del 72.46%.

- El tanque desarenador permitirá tratar 1239.30 m³ (Altura 3.5 m, ancho 17.15 m y largo de 20.65 m)
- El reactor aireado es de 1239.30 m³, que producirá una cantidad de fango de 571.98 kg/día, considerando un tiempo retención hidráulica de 4.32 horas.
- La cantidad de aire necesario es de 75.14 m³ de aire/min.
- El tanque de sedimentación secundario, presenta un volumen de 1799.59 m³ (Altura, ancho de 9.65 m y largo 19.30 m).
- El proceso de desinfección con cloro, permitirá tratar 6965.70 m³/día de agua presenta un volumen de 1253.83 m³ (Altura, ancho 8.56 m y largo de 17.12 m).

En el contexto arriba descrito, el trabajo de investigación arribo a la siguiente conclusión, que la implementación de una PTAR en el municipio de Poopó, permitiría descargar aguas residuales tratadas que pueden ser adecuadas para el proceso de flotación de minerales de zinc en el ingenio minero de Poopó.

BIBLIOGRAFÍA

1. Google, «Google Maps,» 20 febrero 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com.ec/maps/place/Poop%C3%B3/@-18.3053205,-66.990077,9z/data=!4m5!3m4!1s0x93fd16cfe8f7ab07:0x72f3c0c0632f3995!8m2!3d-18.5186911!4d-66.9332733>.
2. A. Payá, «Estudio mineralógico del yacimiento de Poopó como una herramienta para la optimización de su aprovechamiento,» Universitat politècnica de Catalunya, pp. 4-95, 2017.
3. Agenda 2030 y minería: Eficiencia energética y de agua en procesos mineros. Sinchi Wayra S.A. (2017)
4. <https://ejatlas.org/conflict/desertificacion-de-lago-poopo-en-oruro-bolivia>.
5. I.N.E, «Institución Nacional de Estadísticas,» 12 Febreo 2020. [En línea]. Available: <https://www.ine.gob.bo/index.php/prensa/publicaciones/121-publicaciones/libros->

- publicaciones-y-estudios/316-oruro-censo-2012.
6. Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales. Ministerio de Medio Ambiente. GIZ. (2013)
 7. S. Rao y J. Finch, «A review of water re-use in flotation» ScienceDirect, vol. II, pp. 65-85, 1989.
 8. W. Fisher y S. Rudy, «Utilization of Municipal Waste Water for Froth Flotation of Copper and Molybdenum Sulfides» Mineral Technology Branch, pp. 1-16, 1976.
 9. M. Sinche, D. Fornasiero y M. Zanin, «Flotation of Chalcopyrite and Molybdenite in the Presence of Organics in Water» Minerals, pp. 1-13, 2016.
 10. S. Fosu, W. Skinner y M. Zanin, «Detachment of coarse composite sphalerite particles from bubbles in flotation: Influence of xanthate collector type and concentration» Minerals Engineering, pp. 73-84, 2015.
 11. G. Bulut, I. Kavak y S. Atak, «Flotation properties of a particular type of sphalerite» de Mineral Processing on the Verge of the 21st Century: Proceedings of the 8th, Turkey, Stanbul Technical University, 2017, pp. 90-150.
 12. M. Fuerstenau, K. Clifford y M. Kuhn, «THE ROLE OF ZINC-XANTHATE PRECIPITATION IN SPHALERITE FLOTATION» International Journal of Mineral Processing, pp. 307-318, 1974.
 13. S. Popov, D. Vucinic y J. Kacanik, «Floatability and Adsorption of Ethyl Xanthate on Sphalerite in an Alkaline Medium in the Presence of Dissolved Lead Ions». International Journal of Mineral Processing, pp. 205-219, 1989.
 14. Metcalf y Eddy, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización, tercera ed., vol. 1, Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 1995.
 15. G. Howard y J. Bartram, Domestic Water Quantity, Ginebra: World Health Organization, 2003.
 16. J. Oliveras, «iagua,» Canal Parshall, el aforador con casi un siglo de historia, 12 7 2016. [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/jordi-oliveras/canal-parshall-aforador-casi-siglo-historia>.
 17. T. Krause, Design of municipal wastewater treatment plants, Quinta ed., Virginia: McGrawHill, 2010.
 18. V. Chow, Hidráulica de Canales Abiertos, 1a Ed. ed., Santafé de Bogotá: McGraw Hill, 1994.
 19. P. Rodríguez, Hidráulica de canales, 1a Ed. ed., Ciudad de México: McGraw Hill, 2008.
 20. J. Delgado, L. Rennola y S. Lugo, «Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales por lodos activados y su puesta en marcha para tratar vinazas de una destilería.» Revista Ciencia e Ingeniería, vol. 27, nº 3, pp. 145-151, 2006.

Artículo recibido en: 11.10.2021

Manejado por: Elvis Trujillo.

Artículo aceptado: 15.11.2021