

Copper extraction by bacterial leaching from sulphide tailings - bornite and chalcopyrite

Gary Christiam Farfán Chilicaus, Ms.^{1*}, Iván Alberto Reyes López, Dr.¹, Aldo Roger Castillo Chung, Ms.¹
Juan Carlos Rodríguez Soto, Dr.², Juan Antonio Vega González, Dr.¹

¹Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, * gfarcanc@unitru.edu.pe,
ireyes@unitru.edu.pe, alrocas@unitru.edu.pe, jvega@unitru.edu.pe,

²Laboratorio de Citometría, Facultad de Ciencias Biológicas Perú, jrodriguez@unitru.edu.pe

Abstract – *The extraction of copper from minerals bornite and chalcopyrite present in the tailings of the Taulis - Calquis - San Miguel de Pallaques - Cajamarca area was evaluated, through the cultivation of microorganisms from acidic waters of environmental liabilities of the Province of Hualgayoc-Cajamarca.*

The microorganisms from acidic waters were isolated from the environmental liabilities in the Province of Hualgayoc, in parallel the cultivation and reactivation of the Acidithiobacillus Ferroxidans ATCC 23270 strain was carried out, the cultures were adapted to the minerals obtained from the tailings facility, with the consortium Mixed bacterial obtained, the percentage of effectiveness in copper extraction from bornite and chalcopyrite minerals was evaluated. 19 treatments were carried out, 03 treatments with bornite mineral and bacterial cultures derived from the Thiobacillus ferrooxidans strain ATCC 23270, 03 treatments with bornite mineral and isolated microbial cultures of the same mineral, 03 treatments with bornite mineral and acidic water microbial cultures. 03 treatments with chalcopyrite mineral with mixed bacterial consortium of all cultures, 02 treatments with tailings and mixed bacterial consortium, 02 treatments with pyrite and bornite minerals with mixed bacterial consortium and 03 treatments were control without adding the bacterial culture to the tailings with bornite. The parameters analyzed during the adaptation and bacterial growth phases were pH, Eh, temperature and bacterial population (cells / ml), the percentage of copper extraction was analyzed. In 29 days of treatment, 5.88% copper extraction was obtained from the tailings with the bornite mineral and with a microbial consortium isolated from the same mineral, and 9.53% from the tailings with chalcopyrite mineral using a mixed microbial consortium.

Keywords: *Tailings, bornite and chalcopyrite ore, bacterial leaching, sulphide ore.*

I. INTRODUCCIÓN

El beneficio metalúrgico de sulfuros complejos, difíciles de aprovechar y la gran cantidad de reservas existentes en muchos implica una gran investigación de cómo recuperar los metales valiosos a un bajo costo y a un mayor porcentaje de recuperación, la biolixiviación sulfurados que poseen propiedades físicas y químicas difíciles de recuperar [1].

Aproximadamente 90% del cobre producido en el mundo se obtiene de sulfuros minerales [2]. En el tratamiento metalúrgico de sus minerales, los procesos pirometalúrgicos se emplean en un 80%, mientras que el uso de los hidrometalúrgicos es del 20% [3]. Estos datos nos indican que las empresas que producen cobre explotan yacimientos tipo

sulfuros, los cuales están constituidos por azufre y elementos metálicos y para la recuperación del metal las empresas emplean pirometalurgia en el cual se emplean altas temperaturas para la obtención de cobre, pero ese tratamiento no es apto para minerales con bajas leyes de cobre [4].

Uno de los problemas activos más críticos de la minería es la contaminación y aunque las formas para mitigar estos daños al medio ambiente siempre cumplirán con los estándares propuestos por el gobierno siempre existirán secuelas irreparables [5], el uso de las tecnologías limpias es una de las grandes propuestas innovadoras para poder resolver los problemas sociales respecto a la minería. Las licencias sociales son parte fundamental para poder desarrollar un proyecto minero [6], ya que sin esta el proyecto simplemente no irá. La tecnología limpia es una buena forma de desarrollar proyectos a gran escala [7].

La lixiviación bacteriana en los últimos 30 años se presenta como una alternativa para los minerales sulfurados de baja ley de cobre y enfocado al retratamiento de relaves mineros. [8].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Recolección y análisis físicoquímico del mineral

Las muestras de material fueron obtenidas de la relavera de Taulis - Calquis - San Miguel de Pallaques – Cajamarca, donde se procesó la extracción de oro por cianuración. Se hizo el análisis mineralógico estableciendo que los sólidos obtenidos pertenecen al grupo de los sulfuros, mediante reconocimiento organoléptico, se determinó la presencia de bornita y calcopirita. En la Tabla I, se presenta el análisis químico mediante AAS (Espectrofotometría de Absorción Atómica).

TABLA I
ANÁLISIS QUÍMICO DE RELAVE

Elemento	Unidades	Resultados
Oro	g/TM	0.34
Cobre	%	8.3
Hierro	%	4.7
Azufre	%	1.2

Por los datos obtenidos se pudo observar que se trata de una mena de cobre con presencia de bornita, calcopirita, pirita y sílice.

B. Preparación de relave a malla 200 (0.074 mm)

El relave fue reducido su granulometría mediante molienda en forma progresiva hasta obtener un 80% menor a tamaño de partícula de 0.074 mm.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2021.1.1.38>
ISSN: 2414-6390 ISBN: 978-958-52071-9-6

C. Aislamiento, monitoreo de parámetros del aislamiento, conteo de microorganismos y adaptación de microorganismos de Bornita, Calcopirita, Agua ácida y A. Ferrooxidans

El aislamiento de los organismos se realizó del drenaje ácido de la zona impactada por minería en la provincia de Hualgayoc. En todo el proceso se monitoreó los datos de pH, T° y cel/ml, en el proceso de incrementó de la biomasa hasta obtener un consorcio mixto de organismos biolixivantes.

Para el desarrollo de los microorganismos se realizó con el medio 9k a temperatura ambiente. El cultivo se hizo al 10% para el caso del relave y agua ácida, es decir que se agregó: 10 g de mineral sin esterilizar en 100 ml de 9k a pH ácido menor a 2 para el caso del mineral y 10 ml de agua ácida sin esterilizar en 100 ml de 9k a pH ácido menor a 2 para el caso del agua ácida.

También se realizó el cultivo de una cepa de Acidithiobacillus ferrooxidans ATCC 23270 obtenida de la Universidad de Antofagasta para mejorar el desempeño de los microorganismos en la biolixiviación, se obtuvo un consorcio bacteriano mixto de los cultivos de mineral, agua ácida y la Acidithiobacillus ferrooxidans ATCC 23270. Estas pruebas fueron realizadas en calcopirita, relave y bornita.

D. Preparación del medio líquido 9k y aislamiento de microorganismos

TABLA II
SOLUCIÓN A

NOMBRE	CANTIDAD
K_2HPO_4 (Fosfato Dipotásico)	0.04 g
$MgSO_4$ (Sulfato de Magnesio)	0.4 g
NH_4SO_4 (Sulfato de Amonio)	0.1 g
Agua Destilada	900 ml

TABLA III
SOLUCIÓN B

NOMBRE	CANTIDAD
Agua Destilada	100 ml
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (Sulfato De Hierro)	33.3 gr
H_2SO_4 (Ácido sulfúrico)	Cantidad necesaria para llegar a pH 1.5
Filtro milipore	0.2 μm

E. Siembra

Una vez molida las muestras se pesó 10 g de mineral y 100 ml de agua ácida en recipientes estériles independientes con 120 ml de medio 9k se homogenizó y se mantuvo un control negativo. Luego de haber realizado el proceso para hacer el medio 9k se monitoreó el pH para mantener la acidez de los aislamientos hasta su máximo exponente de crecimiento bacteriano.

F. Conteo de Bacterias

El procedimiento consistió en obtener 1 ml de muestra y poner a centrifugar en un tubo eppendorf de más de 1ml de capacidad durante 10 minutos a 800 rpm, luego el

sobrenadante se transportó a otro tubo eppendorf de más de 1 ml de capacidad y se volvió a centrifugar a 600 rpm por 20 minutos.

Seguidamente se descartó el sobrenadante y se suspendió el pellet obtenido en el tubo eppendorf. Se homogenizó y se colocó con ayuda de una jeringa estéril en el espacio de los espejos de la cámara Neubauer y se vertió hasta que por capilaridad se llene el espacio para el conteo.

Se agregó aceite de inmersión encima de los cubre objetos y se visualizó en un aumento de 100x para el conteo de microorganismos, método de conteo de 5 cuadrantes.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Monitoreo de parámetros de aislamiento

El estudio se realizó con rotación no menor a 100 rpm y a temperatura promedio ambiente de 20°C. Los datos obtenidos de las pruebas se presentan en las siguientes tablas:

TABLA IV
PARÁMETROS MONITOREADOS EN EL PROCESO DE AISLAMIENTO

Aislamiento Bacteriano y Cultivo de A. Ferroox.				
Semana 1				
	pH	T°	Cel/ml	Conteo
Cepa.A-ferrooxidans	2.16	20.6	6.40E+06	
Bornita	2.40	23.1	3.35E+06	
Agua Ácida	2.25	22.8	2.70E+06	
Control	1.17	21.1	2.50E+05	
Semana 2				
	pH	T°	Cel/ml	Conteo
Cepa.A-ferrooxidans	2.38	21.5	9.88E+06	
Bornita	2.06	22.6	5.35E+06	
Agua Ácida	1.98	22.5	3.15E+06	
Control	1.17	22.6	5.00E+05	
Semana 3				
	pH	T°	Cel/ml	Conteo
Cepa.A-ferrooxidans	2.12	21.2	1.02E+07	
Bornita	2.19	21.5	1.83E+07	
Agua Ácida	1.95	21.6	4.25E+06	
Control	1.17	21.5	5.00E+05	
Semana 4				
	pH	T°	Cel/ml	Conteo
Cepa.A-ferrooxidans	2.25	17.3	1.75E+07	
Bornita	1.88	17.2	2.03E+07	
Agua Ácida	1.88	17.3	1.50E+07	
Control	1.18	17.2	5.00E+05	
Semana 5				
	pH	T°	Cel/ml	Conteo
Cepa.A-ferrooxidans	2.24	17.3	2.05E+07	

Bornita	2.04	17.1	1.48E+08
Agua Ácida	1.96	17.1	2.05E+07
Control	1.18	17.2	5.00E+05
Semana 6			
	pH	T°	Cel/ml Conteo
Cepa.A-ferrooxidans	2.2	18.4	1.13E+08
Bornita	2.11	18.5	1.65E+08
Agua Ácida	1.98	18.4	7.05E+07
Control	1.19	18.4	5.00E+05

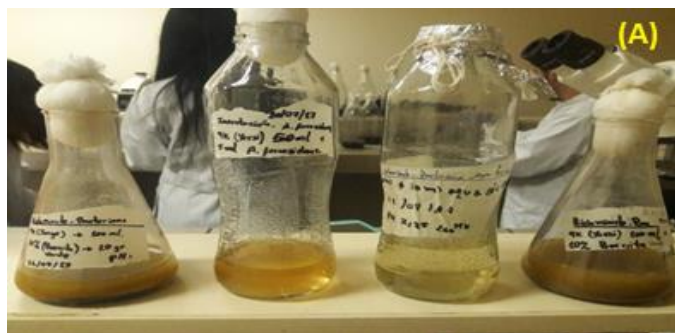


Fig. 2 – Cultivo de microorganismos de Bornita, Calcopirita. A. Ferrooxidans y Agua Ácida en semana 1.



Fig. 3 – Cultivo de microorganismos de Bornita, Calcopirita. A. Ferrooxidans y Agua Ácida en semana 2.



Fig. 4 – Cultivo de microorganismos de Bornita, Calcopirita. A. Ferrooxidans y Agua Ácida en semana 3.

La población bacteriana fue creciendo hasta llegar a un máximo de $101E+08$ cel/ml en promedio. Luego se realizaron las inoculaciones de 10 ml de solución de biomasa y se transfirió a nuevos medios para purificar la cepa, el procedimiento se realizó 3 veces hasta obtener una cepa pura.

B. El pH

Se monitoreó a lo largo del proceso de aislamiento considerando como máximo un valor de pH 2 y un mínimo de pH 1.5, solo estando en la posibilidad de ajustar el pH en caso del valor 2.

TABLA V

DATOS REGISTRADOS DEL pH EN EL PROCESO DE AISLAMIENTO.

pH	Días	Cepa.A-ferrooxidans	Bornita	Agua Ácida	Control
2.16	0	2.16	2.4	2.25	1.17
2.38	8	2.38	2.06	1.98	1.17
2.12	15	2.12	2.19	1.95	1.17
2.25	22	2.25	1.88	1.88	1.18
2.24	26	2.24	2.04	1.96	1.18
2.2	45	2.2	2.11	1.98	1.19

En el cultivo de la cepa acidithiobacillus ferrooxidans ATCC 23270 y los aislamientos de mineral y agua ácida se obtuvo incrementos de pH hasta en dos mediciones y se procedió a bajar el pH con ácido sulfúrico para mantener en el rango de 2.

En las Fig. 5 a la 9 se presenta los monitores del crecimiento de las cepas Ac. Ferrooxidans en distintos medios de adaptación, El crecimiento de la cepa fue óptimo en agua ácida.

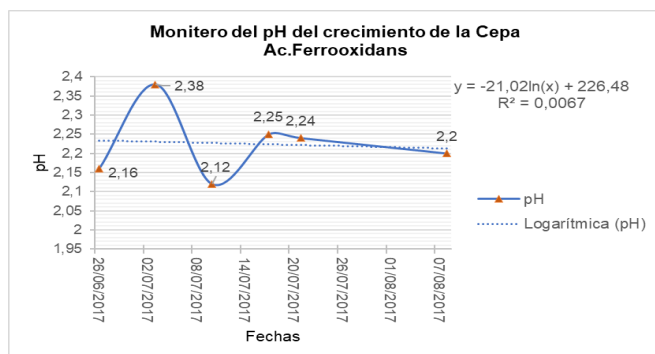


Fig. 5 Monitoreo del pH del crecimiento de la Cepa A. Ferrooxidans

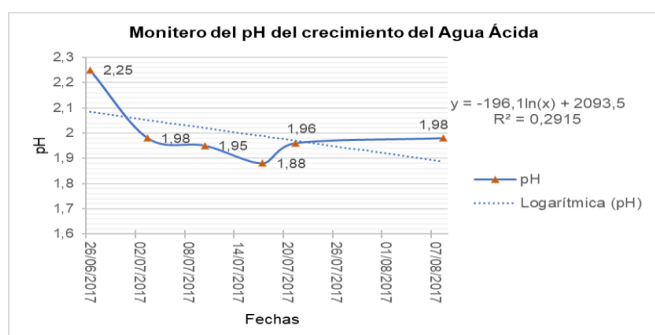


Fig. 6 Monitoreo del pH del crecimiento del Agua Ácida

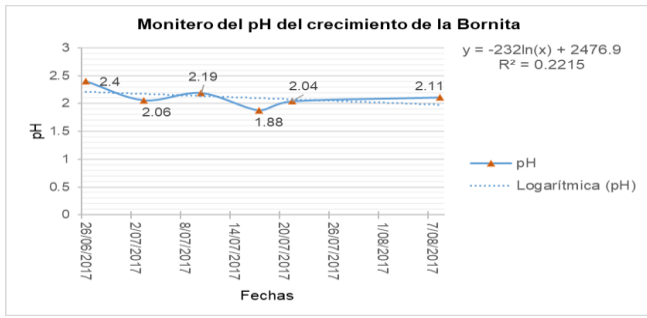


Fig. 7 Monitoreo del pH del crecimiento de la Bornita.

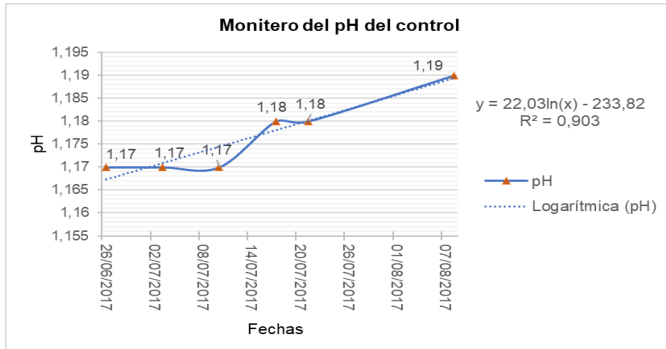


Fig. 8 Monitoreo del pH del control

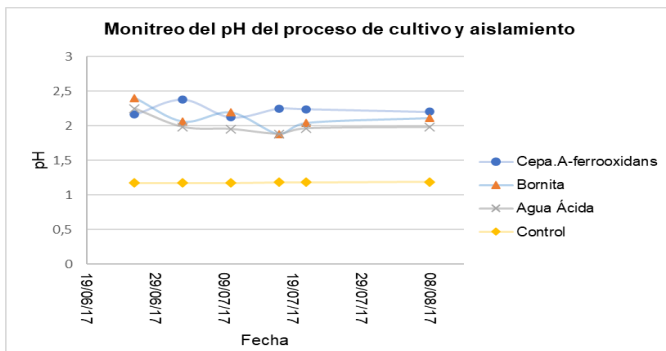


Fig. 9 Monitoreo del pH del cultivo y aislamientos

C. Crecimiento Bacteriano

El crecimiento bacteriano está muy relacionado a los parámetros de pH y T⁰ y su monitoreo se cuantifica en cel/ml después de realizar un conteo por cámara de Neubauer:

TABLA VI
CRECIMIENTO BACTERIANO

Crecimiento-Cepa				
	Cepa.A-ferrooxidans	Bornita	Agua Ácida	Control
Fecha	cel/ml	cel/ml	cel/ml	cel/ml
Semana 1	6.40E+06	3.35E+06	2.70E+06	2.50E+05
Semana 2	9.88E+06	5.35E+06	3.15E+06	5.00E+05
Semana 3	1.02E+07	1.83E+07	4.25E+06	5.00E+05

Semana 4	1.75E+07	2.03E+07	1.50E+07	5.00E+05
Semana 5	2.05E+07	1.48E+08	2.05E+07	5.00E+05
Semana 6	1.13E+08	1.65E+08	7.05E+07	5.00E+05

Las curvas de crecimiento bacteriano se muestran en la Fig. 10 a la Fig. 13.

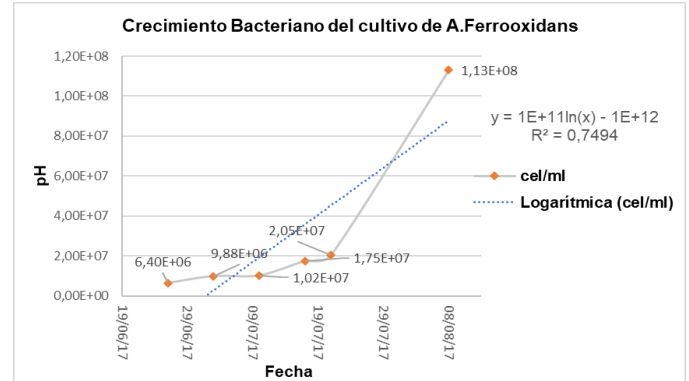


Fig. 10-Monitoreo de cel/ml del crecimiento de la Cepa A. Ferrooxidans

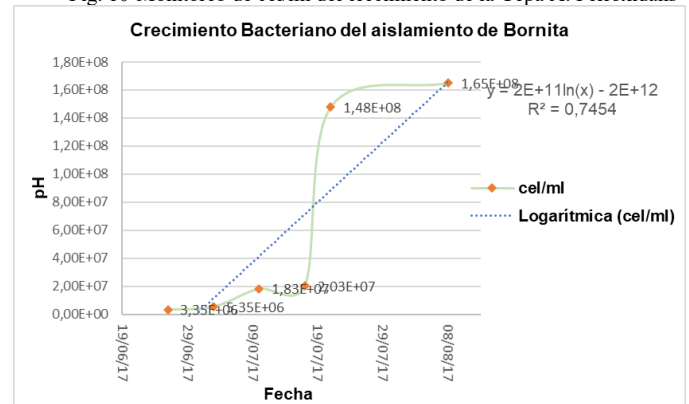


Fig. 11-Monitoreo de cel/ml del aislamiento de bornita

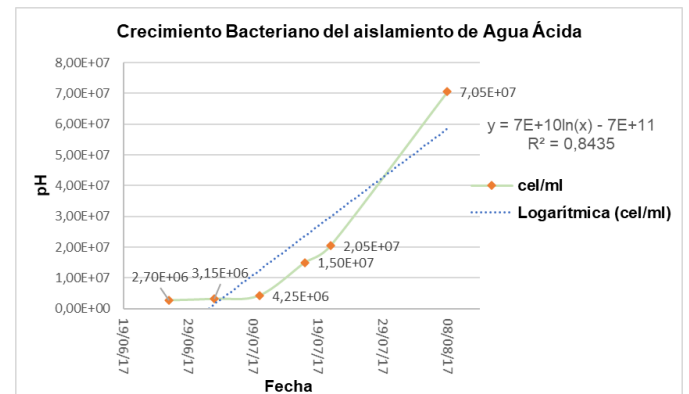


Fig. 12-Monitoreo de cel/ml del aislamiento de Agua Ácida

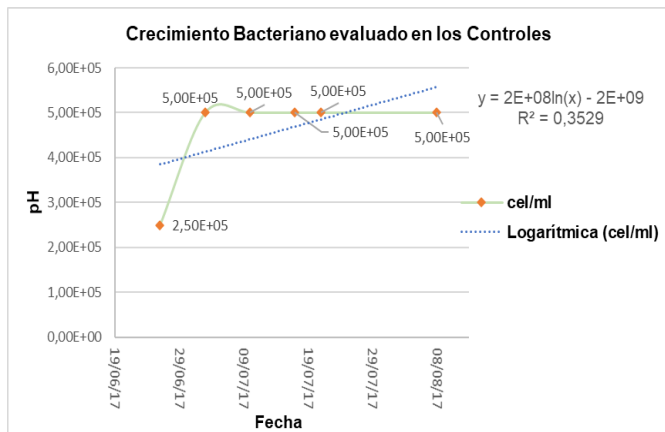


Fig. 13-Crecimiento Bacteriano en los controles Control

Se logró obtener un máximo de crecimiento poblacional promedio de $1.0E+08$ cel/ml, y con este dato se realiza la adaptación de los microorganismos aislados de calcopirita, bornita, agua ácida y el cultivo de *A. Ferroxidans*

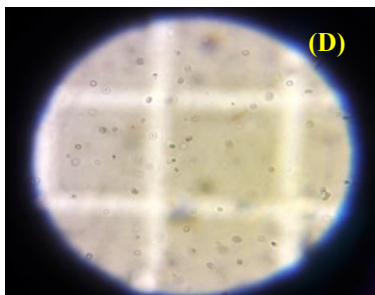


Fig. 14 vista a 100X de microorganismos de la última adaptación.

D. Adaptación de Microorganismos reduciendo el sulfato ferroso del medio 9k

Para poder obtener un mayor rendimiento de los organismos aislados provenientes del mineral, agua ácida y cepa cultivada se realizó una adaptación, esta consistió en inocular 10% progresivamente de cultivo con el máximo crecimiento bacteriano a las nuevas adaptaciones que consecutivamente se disminuirá el sulfato de hierro del medio 9K y se aumentará en gramos de mineral para compensar este balance de Fe.

Los gramos a disminuir en el medio y aumentar en el mineral se calculó a través de la siguiente tabla:

TABLA VII
ADAPTACIÓN DE LA POBLACIÓN BACTERIANA

	Sulfato de Hierro gr (9k)	% Reducción Sulfato de Fe	Mineral (gr)	% Aumento Mineral	Aumento de Fe en Mineral
1ra Adaptación	3.33	100%	10	0%	0.47
2da Adaptación	2.49	75%	12.5	25%	0.588
3ra	1.66	50%	15	50%	0.706

Adaptación					
4ta Adaptación	0.83	25%	17.5	75%	0.824
5ta Adaptación	0	0%	20	100%	0.942

Según teoría se utiliza 33.3 g de sulfato de hierro para 1 L de 9K, en nuestra investigación se realizó las adaptaciones en 100 ml por lo que solo se usó inicialmente 3.33 g de sulfato de hierro.

Para este paso el mineral se tuvo que esterilizar en una estufa a 120 °C por un lapso de 30 minutos



Fig. 15 Esterilización de mineral en estufa a 120°C por 30 minutos

E. Tratamiento de Extracción de cobre

El mineral agregado fue esterilizado como en el proceso de adaptación en una estufa a 120 °C por 30 minutos, posteriormente se preparó 250 ml de solución 9K con 0 g de sulfato ferroso, se pesó el mineral 10 g y se agregó 10% de inóculo 25 ml. En total fueron 19 muestras, estructuradas de la siguiente manera [11]:

TABLA VIII
DISTRIBUCION DE MUESTRAS Y TRATAMIENTOS

Muestra	Solución 9K (ml)	Sustrato	Mineral (g)	Inóculo 10%	Aislamiento
M1	250	Bornita	10	25 ml	Cepa
M2	250	Bornita	10	25 ml	Cepa
M3	250	Bornita	10	25 ml	Cepa
M4	250	Bornita	10	25 ml	Bornita
M5	250	Bornita	10	25 ml	Bornita
M6	250	Bornita	10	25 ml	Bornita
M7	250	Bornita	10	25 ml	Agua Ácida
M8	250	Bornita	10	25 ml	Agua Ácida
M9	250	Bornita	10	25 ml	Agua Ácida
M10	250	Calcopirita	10	25 ml	Consortio
M11	250	Calcopirita	10	25 ml	Consortio
M12	250	Calcopirita	10	25 ml	Consortio
M13	250	Relave	10	25 ml	Consortio
M14	250	Relave	10	25 ml	Consortio
M15	250	Bornita+Pirita	10	25 ml	Consortio
M16	250	Bornita+Pirita	10	25 ml	Consortio
M17	250	Control	10	0 ml	-
M18	250	Control	10	0 ml	-
M19	250	Control	10	0 ml	-

Todos los tratamientos excepto los controles se mantuvieron en rotación constante y con temperatura promedio $\geq 20^{\circ}\text{C}$. A partir de la muestra 10 se obtuvo el inóculo a partir de los concentrados provenientes de la bornita, calcopirita, agua ácida y la cepa A. Ferroxidans

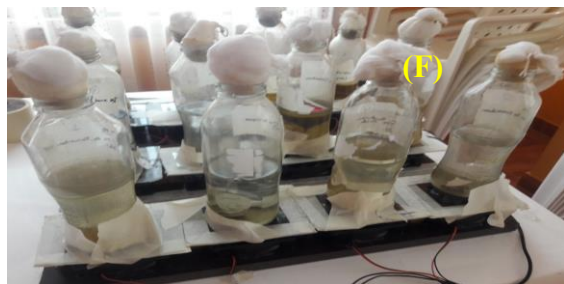


Fig. 16: Tratamiento en rotación constante

Se monitoreó el pH, Eh y T° en todo el proceso de recuperación para esto se estableció 29 días de monitoreo.

F. Comportamiento del pH en el proceso de recuperación de Cu

El comportamiento del pH fue analizado con los promedios de los distintos tratamientos separados según la característica del inóculo.

TABLA IX
MONITOREO DEL PH EN EL PROCESO DE RECUPERACION DE Cu

Fecha	M1- M2- M3	M4- M5- M6	M7- M8- M9	M10- M11- M12	M13- M14	M15- M16	M17- M18- M19
Semana 1	1.58	1.4	1.26	1.29	1.25	1.16	1.12
Semana 2	1.59	1.43	1.34	1.34	1.41	1.32	1.35
Semana 3	2	1.85	1.79	1.82	1.59	1.64	1.73
Semana 4	1.79	1.77	1.74	1.62	1.59	1.6	1.74
Semana 5	1.25	1.21	1.18	1.2	2.59	1.9	1.28
Semana 6	1.18	1.17	1.17	1.17	1.65	1.47	1.4
Semana 7	1.65	1.68	1.72	1.75	1.73	1.7	1.48
Semana 8	1.67	1.7	1.72	1.7	1.68	1.71	1.72



Fig. 17 Monitoreo del pH en el proceso de recuperación de cobre.

Se puede observar que a lo largo del proceso de recuperación el pH promedio general se mantuvo en 1.54, manteniendo una solución ácida y óptima para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos.

G. Comportamiento del Eh en el proceso de recuperación de Cu.

El potencial es un factor muy importante en el proceso de recuperación de Cu, en el proyecto de investigación se tuvo que aumentar los niveles de Fe^{3+} para poder desarrollar los procesos de biolixiviación con potenciales elevados y así poder obtener Cu en solución [10].

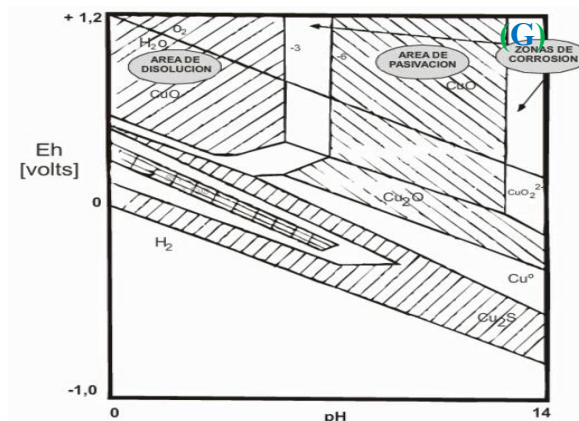


Fig. 18 Tratamientos en rotación constante

TABLA X
COMPORTAMIENTO DEL Eh EN EL PROCESO DE
RECUPERACION DE Cu

Eh	Días	M1- M2- M3	M4- M5- M6	M7- M8- M9	M10- M11- M12	M13- M14	M15- M16	M17- M18- M19
Semana 1	0	310	319	327	326	328	333	335
Semana 2	2	306	315	320	320	316	321	320
Semana 3	7	306	313	317	316	331	328	323
Semana 4	14	326	322	321	326	331	338	323
Semana 5	18	339	341	341	342	331	339	325
Semana 6	21	369	371	378	378	373	372	326
Semana 7	25	380	381	382	384	384	384	330
Semana 8	28	385	392	391	391	392	391	330

En el proceso de recuperación el potencial promedio fue de 343, llegando a máximos de 392 volts, en las últimas etapas.

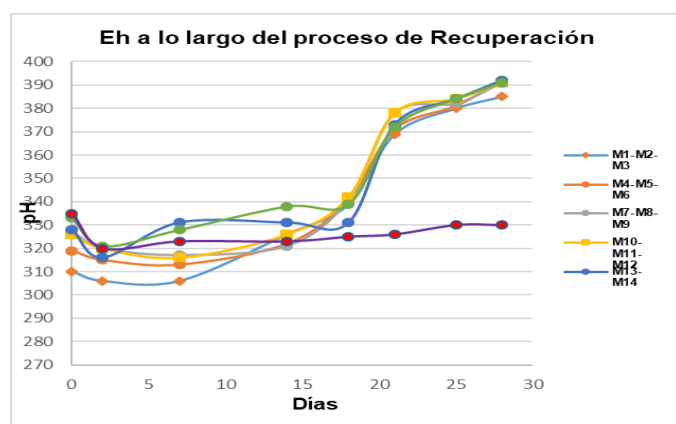


Fig. 19 Monitoreo del Eh en el proceso de recuperación

H. Comportamiento de la temperatura en °C del proceso de extracción de cobre

La temperatura es un factor muy importante para proceso de selección ya que ayuda a aumentar la bioxidación del ion Fe²⁺. Se puede determinar que la mayoría de bacterias obtenidas de los procesos de aislamientos fueron Mesófilas un promedio de 20°C. Los datos obtenidos del monitoreo fueron:

TABLA XI
DATOS DEL MONITOREO DE TEMPERATURA DEL PROCESO
DE RECUPERACION DEL Cu

Temp.	Días	M1- M2- M3	M4- M5- M6	M7- M8- M9	M10- M11- M12	M13- M14	M15- M16	M17-M18- M19
Semana 1	0	18.1	18.1	18.2	18.2	18.1	18.3	18.1
Semana 2	2	17.9	18	18.4	18.5	18.6	18.6	18.8
Semana 3	7	16.3	16.9	17.4	16.9	17.9	16.8	19
Semana 4	14	19.2	19.1	19.1	19.1	19.2	19.1	19.1
Semana 5	18	19.7	19.8	20.1	20.2	20	20	19.9
Semana 6	21	20.2	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.3
Semana 7	25	19.3	19.3	19.2	19.2	19.3	19.3	19.3
Semana 8	28	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.8

En el proceso de recuperación los valores máximos alcanzados fueron de mayores a 20 °C y 19.8 °C por la temperatura promedio del proceso. Determinando que en un porcentaje los organismos se adaptaron a las temperaturas bajas ya que si existió una recuperación de Cu.

I. Recuperación de Cu

Los datos obtenidos fueron registrados a través de absorción atómica en solución ácida y lo que registró fue obtenido en ppm (mg/L), con la fórmula de recuperación se obtuvo [11]:

$$\%Cu = \frac{\text{Lectura} * \text{fd} * 1000^{-1}}{\text{Peso}} * 100$$

TABLA XII
DATOS DE % EXTRACCIÓN DE COBRE

Fecha	23/10/17	25/10/17	30/10/17	06/11/17	10/11/17	13/11/17	17/11/17	20/11/17
Muestra	% Recuperación	% Recuperación	% Recuperación	% Recuperación	% Recuperación	% Recuperación	% Recuperación	% Recuperación
M1	0.66	1.122	1.244	2.07	0.782	0.163	3.31	3.849
M2	0.75	1	1.159	1.96	0.831	0.326	3.16	3.789
M3	0.72	1.088	1.215	1.97	0.762	0.342	3.35	3.804
M4	0.63	1.101	1.139	1.96	1.261	2.328	4.01	5.425
M5	0.58	1.128	2.031	2.45	0.929	0.352	5.45	7.58
M6	0.65	1.101	1.077	1.87	1.32	0.909	4.48	4.633
M7	0.58	3.032	3.262	3.63	0.658	1.586	4.01	5.929
M8	0.55	1.048	1.082	2.13	0.551	1.039	3.40	4.416
M9	0.53	1.271	1.025	1.69	0.605	1.192	3.14	3.742
M10	5.05	12.08	24.397	11.65	2.099	0.379	10.62	12.965
M11	7.90	12.039	15.551	2.11	1.928	3.554	6.86	7.476
M12	4.32	11.562	23.767	11.67	1.965	4.091	6.99	8.137
M13	1.57	3.344	5.131	2.66	1.685	4.075	7.26	7.786
M14	1.55	3.37	7.883	5.69	1.41	3.052	5.49	6.32
M15	0.98	1.519	3.572	5.65	1.194	2.815	5.87	7.11
M16	0.86	1.309	3.663	3.47	2.158	2.693	5.60	6.773
M17	0.20	0.752	0.91	1.03	0.968	0.968	1.07	1.144
M18	0.17	0.773	0.904	1.01	0.911	0.911	0.97	1.055
M19	0.14	0.642	0.946	2.05	0.988	0.988	0.02	1.294

Para una mejor distribución de datos se agrupó los datos según el tipo de inóculo con los que se realizó el tratamiento.

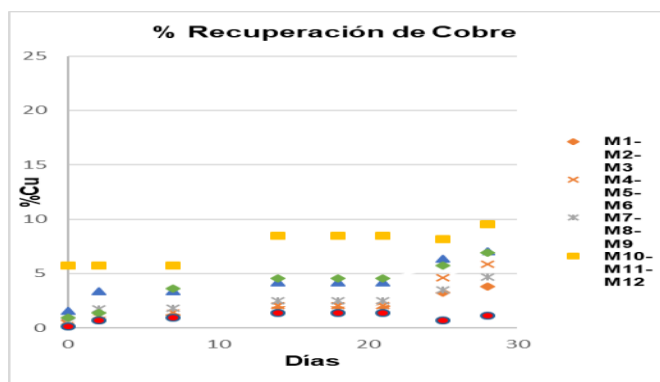


Fig. 20 Recuperación promedio según tipo de inóculo usado.

J. Variación de Hierro

El comportamiento del hierro es tan importante en la lixiviación con soluciones ácidas, porque por un lado es determinante del Eh de la solución, a medida que exista más agente lixivante Fe^{3+} existirá un mayor potencial y la reacción se encontrará en la zona de disolución de sulfuros.[12]

TABLA XIII
DATOS PPM (mg/L) DE LA VARIACION DE Fe

Semana	S.1	S. 2	S. 3	S.4	S.5	S.6	S.7	S.8
Muestra Fe	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
M1	859.9	2433.9	3033.7	3676.80	2173.3	2884.1	2974.00	2674.8
M2	333	4000	4000	3832.50	2211	3052.8	2900.30	2971.4
M3	310.7	2242.3	2811	4083.80	2496.3	2482.1	3399.00	3325.6
M4	553	2001	701.5	3705.20	2542.5	3134	2691.20	2874.8
M5	497.7	3509.6	2280.4	4092.20	2686.3	2804	3040.00	3516.3
M6	65.6	4000	4000	3967.40	2525.1	2701.7	3563.70	3257.4
M7	172.2	334.3	4000	4000.00	2493.4	3982.7	3152.90	4000
M8	130.2	4000	2471.5	3870.00	2534.3	3194	3221.90	4000
M9	266.4	2240.4	3282.8	4054.10	2746	3244.6	3841.60	4000
M10	655.7	1894.7	4000	4000.00	2898.9	3535.8	6154.20	4000
M11	278	2053.4	4000	4000.00	4000	7761.7	5350.90	4000
M12	177.5	2285.9	480.9	4000.00	4000	6261.9	5327.10	4000
M13	637.5	2911.1	4000	4000.00	4000	6821.9	6018.40	4000
M14	653.6	4000	3111.6	4000.00	4000	7674.4	5851.10	4000
M15	1366.2	4000	1723.8	4000.00	4000	7276.5	4482.00	4000
M16	1704.5	2336.5	4000	4000.00	4000	4858.4	3239.40	4000
M17	1079.2	1098.9	4000	4000.00	2486.6	2193.5	3248.10	4000
M18	996.7	435.6	3587.3	4000.00	3242.4	2566.9	3211.20	4000
M19	762.6	904.9	3892.9	4000.00	3274.4	2870.5	3211.20	4000

Para una mejor distribución de datos se agrupó los datos según el tipo de inóculo con los que se realizó el tratamiento.

TABLA XIV
PROMEDIO DE PPM DE VARIACION SEGÚN EL INOCULO USADO

Fecha	23/10/17	25/10/17	30/10/17	06/11/17	10/11/17	13/11/17	17/11/17	20/11/17
M1-M2-M3	501.20	2892.07	3281.57	3864.37	2293.53	2806.33	3091.10	2990.60
M4-M5-M6	372.10	3170.20	2327.30	3921.60	2584.63	2879.90	3098.30	3216.17
M7-M8-M9	189.60	2191.57	3251.43	3974.70	2591.23	3473.77	3405.47	4000.00
M10-M11-M12	370.40	2078.00	2826.97	4000.00	3632.97	5853.13	5610.73	4000.00
M13-M14	645.55	3455.55	3555.80	4000.00	4000.00	7248.15	5934.75	4000.00
M15-M16	1535.35	3168.25	2861.90	4000.00	4000.00	6067.45	3860.70	4000.00
M17-M18-M19	946.17	813.13	3826.73	4000.00	3001.13	2543.63	3223.50	4000.00

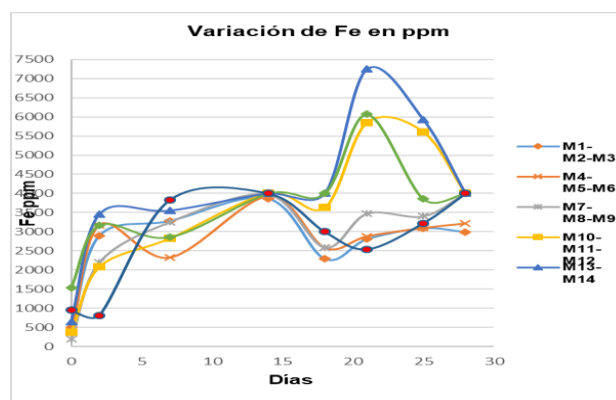


Fig. 21 Variación del Fe a lo largo del proceso.

IV. CONCLUSIONES

Se aislaron microorganismos provenientes de Bornita, Calcopirita y agua ácida para realizar los tratamientos de extracción de cobre, al mismo tiempo de aislamiento también se cultivó una cepa de *A. Ferrooxidans* hasta llegar a un máximo exponente de crecimiento bacteriano para realizar la adaptación de estos microorganismos. Obteniendo un valor de $1.65E+08$ cel /ml de bornita, $7.05E+07$ cel/ml agua ácida y $1.13E+08$ cel/ml del cultivo de la cepa Cepa.A-ferrooxidans y para las adaptaciones se logró $3.22E+08$ cel/ml de bornita, $3.21E+08$ cel/ml de agua ácida y $4.34E+08$ de la cepa Cepa.A-ferrooxidans.

El tratamiento para la extracción de cobre se realizó en 19 muestras divididas según el inóculo utilizado, teniendo como mayor extracción en caso de la calcopirita usando el consorcio bacteriano concentrado alcanzado un valor de 9.53% de Cu en solución.

Se obtuvo una recuperación del relave proporcionado de la zona de Tantahuatay con un valor promedio de 7.05%, un valor determinante ya que es relave, pero no se descarta la posibilidad de haber disuelto partículas de Cu por la presencia de solución ácida, los sulfuros no fueron comprobados al 100%.

Entre los tratamientos de bornita el valor que no dio resultados favorables fue el del inóculo de la Cepa de A. Ferrooxidans, ya que la condición para el tratamiento exige temperaturas mayores 30 °C y el sistema proporcionado solo brindó temperaturas cercanas a los 20°. En todos los monitoreos de temperatura correspondió a una temperatura promedio de 20°C permitiéndonos conocer que estábamos tratando con organismos mesófilos

El pH promedio fue de 2.23 en el caso del cultivo de A. Ferrooxidans, 2.28 para el aislamiento de microorganismos de Calcopirita, 2.11 para el aislamiento de microorganismos de Bornita, 2 para el aislamiento de microorganismos de agua ácida y el control sin ningún tipo de fuente de microorganismos se mantuvo en 1.18, asegurando así un medio ácido para el desarrollo de la población bacteriana y su reproducción con el paso de los días del aislamiento. Además de, garantizar una solución acidulante y garantizar las reacciones del proceso, ya que al no tener este pH podría precipitar el Hierro y detener la reacción.

Se logró aumentar el Eh hasta 392 volts para poder tener los tratamientos en zona de disolución según los diagramas de Pourbaix.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a la dirección de la Universidad Nacional de Trujillo por facilitar la gestión y ejecución del desarrollo de esta investigación. Proyecto financiado con recursos de CANON minero PIC8-2013, cód. 180313208 (RCU N°402-2013-/UNT), Proyecto Consorcios microbianos nativos para la biooxidación de minerales auríferos y tratamiento de efluentes cianurados La Libertad.

REFERENCES

- [1] V. Zepeda *Biolixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley*, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid. 2018.
- [2] C. Quenaya, “Estudio de investigación para la lixiviación de minerales de baja ley en la planta Concentradora Tintaya-Antapaccay”, tesis de pregrado, UNAS.
- [3] Cochilco, Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades. Registro Propiedad Intelectual N° 283439, Gobierno de Chile. 2017
- [4] R. Soto, “Lixiviación de sulfuros de cobre de baja ley pretratados con NaCl – H₂SO₄ junto con NaNO₃ o Fe (NO₃)₃, en medio sulfato-cloruro” Proyecto de titulación, Universidad Técnica Federico Santa María, 2018
- [5] Á. La Rotta, and M. Torres, “*Mining and its health and environmental impacts*”. The case of Potosí in Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Artículo. 2017
- [6] A. Rodríguez, “Recomendaciones para la regulación de la licencia social en el ámbito minero para la solución de conflictos sociales”. Universidad Católica San Pablo, Arequipa. Tesis para bachiller. 2018
- [7] S. Chilón, “Análisis de la implementación de tecnologías limpias en el sector minero del Perú”. Trabajo para bachiller. UPN. 2019

- [8] J. Montecinos, “Lixiviación por agitación de concentrado de cobre proveniente de la compañía minera San Geronimo en ambientes ácidos”. Universidad Andrés Bello. Tesis pregrado. 2018
- [9] O. Bastidas, *Celeromics*. Obtenido de <http://www.celeromics.com/es/resources/docs/Articles/Formularia-Camara-Neubauer-Concentracion.pdf>
- [10] Y. Shenghua et al., Copper Bioleaching in China: Review and Outlook. *Minerals*. Vol. 8 (2) 32, 2018.
- [11] Y. Sheng-hua et al., “Research advances in the improvement of the bioleaching of copper sulphides under the intervention of microbial communities”. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. Vol. 26. Pp. 1337-1350. 2019
- [12] Y. Zhang, et al., “The catalytic effect of copper ion in the bioleaching of arsenopyrite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in 9K culture medium”. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 256. 2020