

Electrolysis Applied for Iron and Zinc Removal in Acid Mine Drainage

Rut K. Fajardo-Flores¹, Gary Christiam Farfán Chilicaus², Gladys S. Licapa-Redolfo³, Rolando Licapa-Redolfo⁴

^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, N00022890@upn.pe, N00038919@upn.pe

³Universidad Privada del Norte, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

⁴Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Perú, dinner.licapa@unsch.edu.pe

Abstract – The objective of this study was to determine, by means of electrolysis, the influence of current density and time on the removal of total iron and zinc from acid mine drainage of Hualgayoc mining environmental liabilities. Electrolysis is an alternative method that can effectively remove ionic metals. The crude acid mine drainage was characterized by total metal analysis, yielding an initial total iron concentration of 1788.76 mg/l, an initial total zinc concentration of 196.51 mg/l, and a pH of 4.11. For the levels of each variable analyzed, 4 levels and 3 repetitions were determined for a total of 51 samples as well as the initial blank, obtaining the best results using a current density of 40 mA/cm² and a time of 120 minutes, resulting in a final concentration of 1.98 mg/L of total iron, 1.16 mg/L of total zinc and pH 8.5. The technology removed 99.89% of the iron and 99.41% of the zinc.

Keywords— *Electrolysis, Acid mine drainage, Metal removal.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).

DO NOT REMOVE

Electrólisis aplicada para la Remoción de Hierro y Zinc en Drenaje Ácido de Mina

Rut K. Fajardo-Flores¹, Gary Christiam Farfán Chilicaus², Gladys S. Licapa-Redolfo³, Rolando Licapa-Redolfo⁴

^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, N00022890@upn.pe, N00038919@upn.pe

³Universidad Privada del Norte, Perú, gladys.licapa@upn.edu.pe

⁴Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Perú, dinner.licapa@unsch.edu.pe

Resumen – El objetivo de este estudio fue determinar por medio de electrólisis la influencia de la densidad de corriente y el tiempo en la remoción de hierro y zinc total del drenaje ácido de mina de los pasivos ambientales mineros de Hualgayoc. La electrólisis es un método alternativo que puede eliminar eficazmente los metales iónicos. El drenaje ácido crudo de la mina se caracterizó por análisis de metales totales, arrojando una concentración inicial de hierro total de 1788,76 mg/l, una concentración inicial de zinc total de 196,51 mg/l y un pH de 4,11. Para los niveles de cada variable analizada se determinaron 4 niveles y 3 repeticiones para un total de 51 muestras así como el blanco inicial, obteniéndose los mejores resultados utilizando una densidad de corriente de 40 mA/cm² y un tiempo de 120 minutos, resultando en una concentración final de 1,98 mg/L de hierro total, 1,16 mg/l de zinc total y pH 8,5. La tecnología eliminó el 99,89% del hierro y el 99,41% del zinc.

Palabras Clave— Electrólisis, Drenaje ácido de mina, Remoción de metales.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación de las fuentes de agua del mundo es uno de los mayores problemas a nivel ambiental; uno de los principales factores que afectan a los ecosistemas acuáticos es la actividad humana, principalmente la minería y la fundición, así como otras actividades industriales y urbanas [1]. El agua es fundamental para la vida, pero también puede ser dañina para la salud humana si está contaminada con sustancias infecciosas o químicas [2]. La minería es una de las principales causas de la degradación de la calidad del agua, ya que los vertidos de residuos tienen características diferentes según el origen y transportan grandes cantidades de sólidos disueltos y en suspensión [3].

En el Perú, la industria minera juega un papel muy importante en su economía en cuanto a las variables macroeconómicas, sin embargo, la actividad minera ha causado un gran revuelo en cuanto al medio ambiente, por tratarse de una operación, su esencia está relacionada con un proceso de enorme impacto que penetra la corteza terrestre y separa los minerales entre sí [4].

La minería en Cajamarca es uno de los sectores más importantes del producto interno bruto; como una de las industrias que más aportan a la minería en el Perú, así mismo, se ha producido diversos problemas ambientales ocasionados

principalmente por esta actividad, donde se observa que existe una responsabilidad en el entorno minero [5] y [6].

El pasivo ambiental de la minería consiste en efluentes, aguas residuales, depósitos de desechos de la actividad minera que pueden estar abandonados o inactivos y se consideran un peligro y un riesgo potencialmente continuo para la salud humana y los ecosistemas. Estas aguas residuales contienen gran cantidad de metales pesados disueltos (aluminio, manganeso, zinc, cobre, plomo, mercurio, cadmio, níquel, hierro); además, se forman como resultado de la oxidación natural, que se acelera cuando aumenta la exposición del oxígeno y el agua a las piedras [7] y [8].

Cajamarca cuenta con 1.156 registros según el último censo PAM (2020), o el 15,4% del censo nacional PAM; minerales se han extraído desde el año 1772 hasta la fecha (2023); durante este largo tiempo se ha acumulado una gran cantidad de relaves y otros PAM, los cuales aún no son recuperables. Hualgayoc es el distrito que cuenta con el pasivo minero más grande del país, con minas estériles y abandonadas que han dejado a la región vulnerable debido a ecosistemas degradados e insostenibles que han sumido al distrito en la pobreza y la miseria [9] y [10].

La electrólisis o electrofloculación es un proceso que se enmarca dentro de la clasificación de tratamiento secundario de aguas residuales, donde se procesan materiales orgánicos haciendo pasar una corriente eléctrica a través de materiales conductores llamados electrodos: ánodo (carga positiva) y cátodo (carga negativa). Se utilizan muchas configuraciones, como Boron Doped Diamond (BDD), acero inoxidable, hierro, aluminio, titanio y, se deben mantener distancias significativas en diferentes tipos de aguas residuales, lo que puede afectar el rendimiento o la eficiencia del proceso. Además, la electrólisis utiliza los mismos principios de proceso que las celdas galvánicas [11] y [12].

Diversos estudios sobre el proceso de electrólisis y su mecanismo de separación de metales pesados de las aguas residuales de los pasivos ambientales han confirmado la eficacia de este innovador proceso, que no requiere altos costes de implantación y puede ser efectivo a corto plazo. Por lo tanto, es importante explorar alternativas para la remoción de metales

pesados (zinc y hierro) en pasivos ambientales utilizando tecnologías fáciles de usar y de bajo costos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación y recolección de muestras

La colección de muestras se realizó en el distrito de provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca, donde se identificaron socavones con presencia de pasivos ambientales a los 3127 m.s.n.m.; se eligió puntos claves y característicos seleccionados a una distancia de 2 metros entre sí. Se extrajo 4 litros de Drenaje ácido de minas (DAM) de cada punto representativo. Asimismo, las muestras de los pasivos ambientales fueron etiquetadas y enviadas al Laboratorio Regional del Agua para sus respectivos análisis de acuerdo a los protocolos de monitoreo de aguas superficiales vigentes según la Norma Técnica Peruana: NTP ISO5667-Parte 14:2009 y NTP ISO5667-Parte 3:2001.

B. Técnicas en la recolección de datos

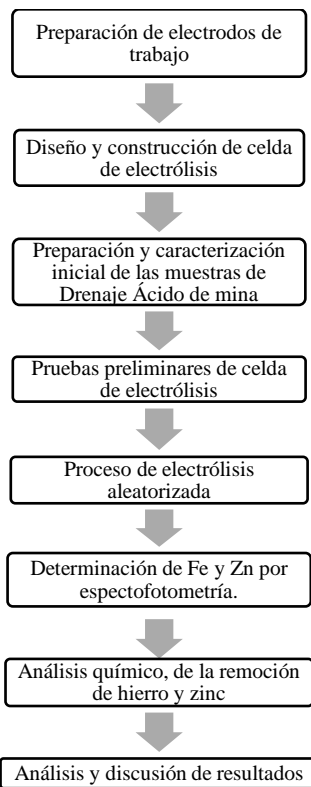


Fig. 1. Secuencia experimental a seguir para el proceso de electrólisis.

C. Preparación de electrodos de trabajo

Se utilizaron 5 electrodos fabricados en material de acero inoxidable SS-AISI 304 con una superficie de 50 mm x 50 mm x 2 mm, que es resistente al oxígeno y soporta la corrosión de la mayoría de los ácidos oxidantes. Este acero inoxidable no se corroe cuando se sumerge en agua y por lo

tanto no inhibe el proceso de electrólisis. Se usó un electrodo de referencia para medir el potencial del electrodo en una celda electroquímica, lo que nos dio información como el potencial y el pH, dado que el hierro y el zinc debe estar en una región activa para removerlo, al suministrar la corriente

eléctrica se produce las reacciones REDOX tomando así el control una vez que estamos en la zona de estabilidad del ion, comenzando el proceso de migración (fig. 1).

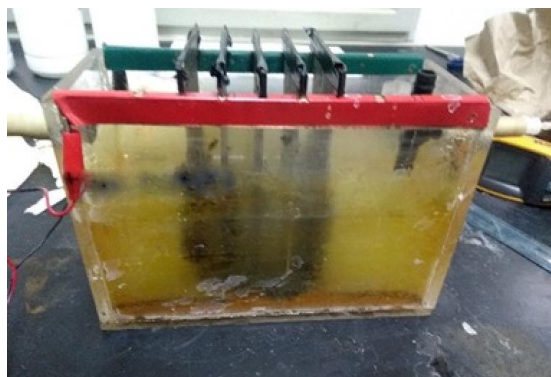


Fig. 2. Preparación de los electrodos.

D. Diseño y construcción de celda de electrólisis

Se realizaron cortes en lámina de acero inoxidable y perforaciones para los tornillos en sus extremos, se cubre con cinta de enmascarar el área de sello y se lija el área expuesta al electrolito, con el fin de garantizar hermeticidad entre las celdas, luego se retira la cinta del área de sello y se limpia con solvente desengrasante para retirar impurezas, se realiza corte de láminas de acrílico transparente, perforaciones para tornillo y excéntricas para la conexión de entrada y salida de electrolito, realizar cortes de los empaques de neopreno y cortes de material aislante, se colocan en el cuerpo de perno para evitar algún tipo de fuga se muestran en la fig. 2 y fig. 3.

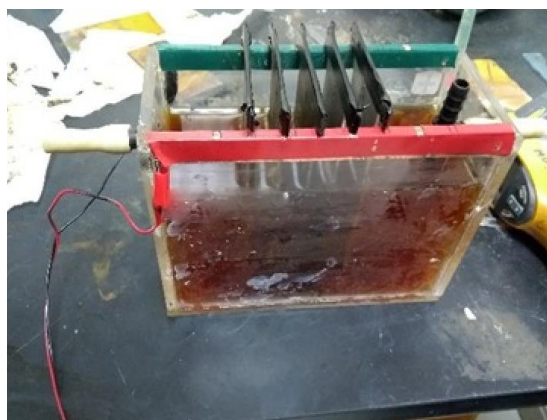


Fig. 3. Diseño y construcción de las celdas.

E. Preparación y caracterización inicial de las muestras de DAM

Se estudiaron en detalle las condiciones físicas del medio ambiente, el clima local y las características de las aguas ácidas de la mina, y se analizaron en un laboratorio cien muestras de agua y sedimentos para determinar la concentración del contenido de metales, utilizando también los parámetros originales. Ej.: pH, contenido de oxígeno, potencial redox, conductividad, temperatura, Fe, acidez/alcalinidad, turbidez, etc se muestran en la fig. 4.



Fig. 4. Preparación y caracterización de las muestras de DAM.



Fig. 5. Análisis de parámetros físicos de DAM.

F. Análisis de las pruebas preliminares de celdas de electrólisis

Se consideró analizar inicialmente las condiciones de operación llevando a cabo pruebas preliminares determinando los parámetros requeridos como el establecimiento principal para colocar la muestra, el segundo para situar el electrodo y el siguiente para medir el pH. También, debemos considerar el tiempo y densidad de corriente los cuales influyen en la remoción de Hierro y Zinc, el proceso se muestra en la fig. 5 y 6.

G. Proceso de electrólisis aleatorizada

Se realizó la aleatorización de datos para reducir la probabilidad de obtener resultados que sean influidos por algún agente que no se pueda controlar y que nos conduzcan a conclusiones incorrectas, así mismo se debe codificar los datos de tal manera que puedan ser analizados con mayor viabilidad, un error en un dato brinda una respuesta errónea en la remoción de Hierro, Zinc y valor del pH. Los datos de remoción de hierro y zinc obtenidos se analizaron utilizando el programa estadístico Minitab para calcular los posibles efectos de la densidad de corriente y los factores de tiempo en la variable de respuesta (porcentaje de remoción).

H. Determinación de Fe y Zn por medio de espectrofotometría

Se determinó la concentración de Fe y Zn en las muestras de DAM, mediante la selección de una longitud de onda y pasarla por la resolución; a través del detector la cantidad de radiación absorbida se determina a partir de la concentración de la sustancia disuelta, y este valor se coloca en la curva de calibración. Finalmente, se examinó el efecto de cada factor en la variable de respuesta mediante gráficos de interacción y gráficos de efecto principal para determinar qué factor tuvo el mayor efecto sobre la eliminación de hierro y zinc del drenaje ácido de la mina.



Fig. 6. Determinación de Fe y Zn por medio de espectrofotometría.

I. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para probar la hipótesis se utilizarán dos factores con 4 niveles para cada variable independiente y tamaño de muestra con 3 repeticiones por nivel. Para el análisis estadístico de las variables de respuesta: hierro total y separación de zinc, se utilizará las varianzas de los resultados obtenidos. De este modo, se obtendrá la suma de cuadrados, a partir de la cual calcularemos los resultados que se mostrarán en la tabla ANOVA, lo que permitirá dicho análisis para predecir el efecto de la densidad de corriente y el tiempo evaluado sobre los datos observados.

J. Cálculo de remoción de metales

Para determinar la eficiencia de remoción, se aplicó la ecuación (1), de metales por diferencia de concentraciones:

$$PR = \frac{DAM_{inicial} - DAM_{tratado}}{DAM_{inicial}} \times 100 \quad (1)$$

PR: Porcentaje de remoción. (%)

DAM inicial: Concentración inicial del metal. (mg/L)

DAM tratado: Concentración final del metal. (mg/L)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultados de concentración inicial de hierro total y zinc en el drenaje ácido de mina

TABLA 1
ANÁLISIS CUANTITATIVO DE HIERRO Y ZINC EN MUESTRAS INICIALES DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Mes	Concentración (mg/L)	
	Hierro (g)	Zinc (g)
Promedio	1778.76	196.51

B. Resultados de hierro total luego del tratamiento

Los resultados de la concentración inicial de metales se detallan en la Tabla 1, mientras que la concentración de hierro total (mg/L), posterior a los tratamientos, en la Tabla 2. En la tabla 3, se expresa los datos de remoción de hierro (%) después del tratamiento.

TABLA 2
CONCENTRACIÓN HIERRO TOTAL (mg/L) EN MUESTRAS TRATADAS POR ELECTRÓLISIS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (min)			
	30	60	90	120
10	1533.99	1008.47	951.33	651.86
	1546.80	1016.89	959.27	657.30
	1559.61	1025.31	967.21	662.74
20	1194.12	964.63	572.23	421.84
	1204.09	972.69	577.01	425.36
	1214.06	980.75	581.79	428.88
30	510.19	407.35	383.33	295.80
	514.45	410.75	386.53	298.27
	518.71	414.15	389.73	300.74
40	172.59	105.27	65.74	1.96
	174.03	106.15	66.29	1.98
	175.47	107.03	66.84	2.00

TABLA 3
REMOCIÓN DE HIERRO TOTAL (%) EN MUESTRAS TRATADAS POR ELECTRÓLISIS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (min)			
	30	60	90	120
10	14.24%	43.62%	46.82%	63.56%
	13.53%	43.15%	46.37%	63.25%
	12.81%	42.68%	45.93%	62.95%
20	33.24%	46.07%	68.01%	76.42%
	32.69%	45.62%	67.74%	76.22%
	32.13%	45.17%	67.48%	76.02%
30	71.48%	77.23%	78.57%	83.46%
	71.24%	77.04%	78.39%	83.33%
	71.00%	76.85%	78.21%	83.19%
40	90.35%	94.11%	96.32%	99.89%
	90.27%	94.07%	96.29%	99.89%
	90.19%	94.02%	96.26%	99.89%

B. Análisis de Varianza para la influencia de la densidad de corriente y el tiempo sobre la remoción de hierro total.

A partir del análisis de varianza de la Tabla 4, muestra la existencia de una alta significación estadística, lo cual indica que la remoción de hierro total, es variable en función a la densidad de corriente y el tiempo. En ambos casos el valor F (experimental) es mayor al valor P (tabulado), sin embargo, la densidad de corriente presenta mayor influencia que el tiempo sobre la remoción de hierro total al comparar sus valores F.

TABLA 4
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA REMOCIÓN DE HIERRO TOTAL

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Densidad de corriente (mA/cm ²)	3	20133.7	6711.22	59591.51	0.000
Tiempo (min)	3	5332.7	1777.56	15783.65	0.000
Densidad de corriente (mA/cm ²)*Tiempo (min)	9	2474.3	274.92	2441.11	0.000
Error	32	3.6	0.11		
Total	47	27944.2			

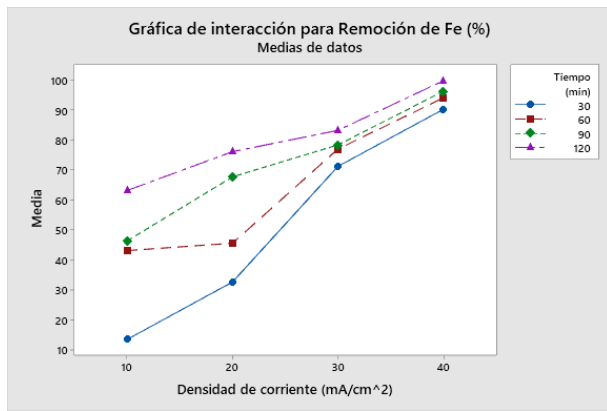


Fig. 7. Gráfica de interacción para Remoción de Fe (%) vs Densidad de corriente (mA/cm²).

En la Fig. 7. se observa que mientras aumenta la densidad de corriente (mA/cm²) aumentará la remoción de hierro total teniendo en cuenta los diferentes tiempos usados que también tienen una pendiente positiva. Para los valores de tiempo de 120 minutos y densidad de corriente 40 mA/cm², se obtiene una remoción de 99.89% de hierro total.

D. Resultados de Zinc total luego del tratamiento

Los resultados de la concentración inicial de metales se detallan en la Tabla 1, mientras que la concentración de zinc total (mg/L), posterior a los tratamientos, en la Tabla 5. En la Tabla 6, se expresa los datos de remoción de Zinc (%) después del tratamiento.

TABLA 5
CONCENTRACIÓN ZINC TOTAL (mg/L) EN MUESTRAS TRATADAS POR ELECTRÓLISIS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (min)			
	30	60	90	120
10	139.20	118.40	101.02	76.29
	152.01	129.30	110.32	83.31
	164.82	140.20	119.62	90.33
20	103.44	83.86	59.16	41.30
	112.96	91.58	64.60	45.10
	122.48	99.30	70.04	48.90
30	73.05	51.82	34.66	21.25
	79.77	56.59	37.85	23.21
	86.49	61.36	41.04	25.17
40	28.02	10.87	3.92	1.06
	30.6	11.87	4.28	1.16
	33.18	12.87	4.64	1.26

TABLA 6
REMOCIÓN DE ZINC TOTAL (%) EN MUESTRAS TRATADAS POR ELECTRÓLISIS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (min)			
	30	60	90	120
10	29.16	39.75	48.59	61.18
	22.65	34.20	43.86	57.61
	16.13	28.66	39.13	54.03
20	47.36	57.32	69.90	78.98
	42.52	53.40	67.13	77.05
	37.67	49.47	64.36	75.12
30	62.83	73.63	82.36	89.18
	59.41	71.20	80.74	88.19
	55.99	68.78	79.12	87.19
40	85.74	94.47	98.01	99.46
	84.43	93.96	97.82	99.41
	83.12	93.45	97.64	99.36

E. Análisis de Varianza para la influencia de la densidad de corriente y el tiempo sobre la remoción de hierro total.

A partir del análisis de varianza de la Tabla 7, muestra la existencia de una alta significación estadística, lo cual indica que la remoción de zinc total, es variable en función a la densidad de corriente y el tiempo. En ambos casos el valor F (experimental) es mayor al valor P (tabulado), sin embargo, la densidad de corriente presenta mayor influencia que el tiempo sobre la remoción de zinc total al comparar sus valores F.

TABLA 7
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA REMOCIÓN DE ZINC TOTAL

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Densidad de corriente (mA/cm ²)	3	19039.7	6346.57	558.17	0.000
Tiempo (min)	3	5340.5	1780.18	156.56	0.000
Densidad de corriente (mA/cm ²)*Tiempo (min)	9	508.1	56.45	4.96	0.000
Error	32	363.8	11.37		
Total	47	25252.1			

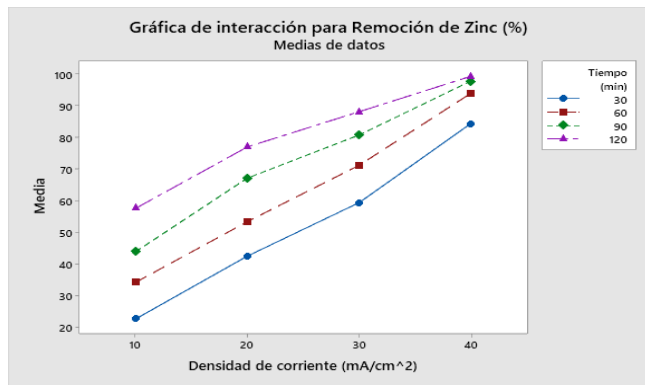


Fig. 8. Gráfica de interacción para Remoción de Zinc (%) vs Densidad de corriente (mA/cm²).

En la Fig. 8. se observa que mientras aumentamos la densidad de corriente (mA/cm²) aumentará la remoción de Zinc total teniendo en cuenta los diferentes tiempos usados que también tienen una pendiente positiva. Para los valores de tiempo de 120 minutos y densidad de corriente 40 mA/cm², se obtiene una remoción de 99.41% de hierro total.

F. Resultados de pH luego del tratamiento

El pH inicial fue 4.11, a medida que se utiliza tratamiento los resultados tienden a alcalinizar el drenaje ácido de mina según la Tabla 8.

TABLA 8
pH EN MUESTRAS TRATADAS POR ELECTRÓLISIS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Densidad de corriente (mA/cm²)	Tiempo (min)			
	30	60	90	120
10	5.08	5.84	6.10	6.84
	5.23	6.02	6.28	7.05
	5.38	6.20	6.46	7.26
20	5.65	5.92	6.69	7.07
	5.82	6.10	6.89	7.28
	5.99	6.28	7.09	7.49
30	6.06	6.39	7.57	7.76
	6.24	6.58	7.80	8.00
	6.42	6.77	8.03	8.24
40	6.47	7.32	7.91	8.25
	6.67	7.54	8.15	8.50
	6.87	7.76	8.39	8.75

TABLA 9
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL pH

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Densidad de corriente (mA/cm²)	3	17.290	5.76322	137.87	0.000
Tiempo (min)	3	20.870	6.95672	166.43	0.000
Densidad de corriente (mA/cm²)*Tiempo (min)	9	1.021	0.11342	2.71	0.018
Error	32	1.338	0.04180		
Total	47	40.518			

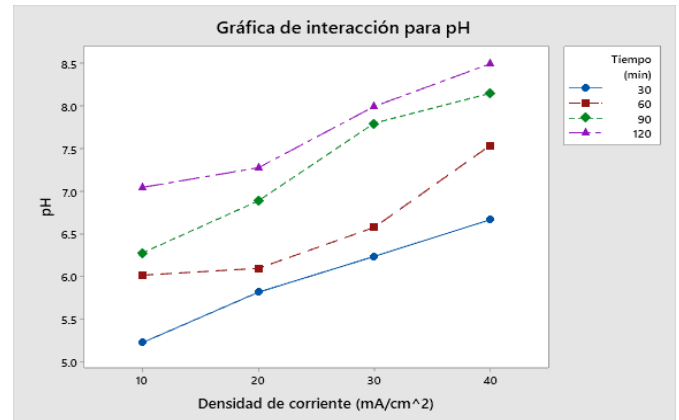


Fig. 9. Gráfica de interacción para pH vs Densidad de corriente (mA/cm²)

Se observa en la Fig. 9. que a medida que aumenta la densidad de corriente (mA/cm²), así como el tiempo presenta una alta influencia mejorando la remoción de zinc y Hierro total. Para los valores de tiempo de 120 minutos y densidad de corriente 40 mA/cm² se obtiene un pH de 8.50.

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que a través del empleo de la técnica de electrólisis se disminuye la concentración de hierro total y zinc total, considerándose de esta forma una alternativa de alta eficiencia para remoción de metales en drenajes ácidos de mina, esto se evidencia en los porcentajes eficientes de remoción para los metales en mención. De esta manera se obtuvo la máxima remoción de hierro total, alcanzando una eficiencia media de 99.89% desde una concentración inicial de 1788.76 mg/L hasta finalizar con una concentración media de 1.98 mg/L, este efecto se logró al aplicar una densidad de corriente de 40 mA/cm² y un tiempo de 120 min.

En el caso de la remoción del zinc total una eficiencia media del 99.41% desde una concentración inicial de 196.51 mg/L hasta finalizar con una concentración media de 1.16 mg/L, este efecto se logró al aplicar una densidad de corriente de 40 mA/cm² y un tiempo de 120 min.

El agua ácida del pasivo ambiental minero de Hualgayoc tiene un pH 4.11, luego del tratamiento por electrólisis dio un valor máximo promedio de 8.5 en donde los parámetros usados fueron una densidad de corriente de 40 mA/cm² y un tiempo de 120 min. En los casos de remoción de metales de

hierro y zinc total, así como el pH, según el Análisis de Varianza se concluye que tienen una fuerte influencia las variables independientes analizadas, ante ello cabe recalcar que, según el Valor F, en el caso de remoción de hierro y zinc total la densidad de corriente presenta mayor influencia en comparación con el tiempo, mientras que en el caso del pH es el tiempo quien tiene la mayor influencia.

Utilizando la electrólisis como tecnología alternativa al tratamiento de aguas ácidas, se ha culminado con éxito el cierre de la mina, contribuyendo así a minimizar y mejorar las contradicciones sociales en nuestra provincia.

REFERENCIAS

- [1] S. E. Pabón, R. Benítez, R. A. Sarria-Villa y J. A. Gallo, “Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción” Revista Entre Ciencias e Ingeniería, vol. 14, no.27, enero-junio, (2020). Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf>
- [2] Gonzales et al, (2014); “Contaminación ambiental, variabilidad y cambio climáticos: una revisión del impacto en la salud de la población peruana” Rev. perú. med. exp. salud publica vol.31 no.3 Lima jul./set. (2014). Available: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v31n3/a21v31n3.pdf>
- [3] O. Guillén, V. Córdor, M. Gonzales, and S. Iglesias “Contaminación del Río Rimac, traza de metales” vol. 1, no. 2, pp. 127–145, Dec. 1998, doi: 10.15381/iigeo.v1i2.2313
- [4] K. Espinosa Morales, A. Hernández, E. Mantilla Pinilla, “La participación de la minería y sus beneficios económicos en Colombia y Perú”, (2016). Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7883776>
- [5] K. Cabellos Abanto, “Influencia de la actividad minera en la evolución del valor agregado bruto del departamento de Cajamarca: 2007- 2015,” (2019) Available: <http://190.116.36.86/handle/20.500.14074/3560>
- [6] N. Dávila, L. Walter Villegas, “Capacidad fitorremediadora de las especies de flora herbácea silvestre con mayor valor de importancia en la zona de pasivos mineros el Sinchao, distrito de Chugur, provincia de Hualgayoc, Cajamarca – Perú 2017”. (2018). Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/13482/D%c3%a1vila%20Mego%2c%20Nancy%20Karina%3b%20Walter%20Villegas%2c%20Lorena%20Chabeli.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] Lenin Trujillo Lupo, “Evaluación ambiental de los pasivos ambientales mineros determinados en el sector comprendido entre Pacococha y Buenavista - Huancavelica”, (2018) Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6974>
- [8] E. López Pamo, O. Aduvire, and D. Baretino, “Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro,” (2002). Available: https://www.igme.es/Boletin/2002/113_1_2002/4-ARTICULO%20TRATAMIENTOS.pdf
- [9] E. Pérez León, “Los pasivos ambientales mineros y su influencia en la salud de la comunidad campesina El Tingo, Hualgayoc, Cajamarca – 2018”.(2018) Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/35349>
- [10] Castillo et al, “Pasivos ambientales mineros en el Perú: Resultados de la auditoría de desempeño sobre gobernanza para el manejo integral de los PAM”, (2021). Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2135978/Pasivos%20ambientales%20mineros%20en%20el%20Per%C3%BA.pdf.pdf?v=1629917547>
- [11] O.J. Nuta Nuñez, “Estudio de la electrólisis como alternativa en el tratamiento de aguas residuales en Colombia”, (2020) Available: http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5433/1/Nuta_2020_TG.pdf
- [12] S. Vargas N. M. Verano L. “Remoción de coliformes totales y fecales de las aguas residuales de una PTAR mediante la electrólisis de una solución de NaCl”, (2022) Available: http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5433/1/Nuta_2020_TG.pdf