

## Influencia de la concentración de peróxido de hidrógeno en la detoxificación de relaves mineros cianurados

Influence of hydrogen peroxide concentration on the detoxification of cyanide mine tailings

Gustavo Raul Fernandez Essenwanger\* ; Walter Moreno Eustaquio 

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.  
[wmoreno@unitru.edu.pe](mailto:wmoreno@unitru.edu.pe)

\* Autor correspondiente: [gfernandez@unitru.edu.pe](mailto:gfernandez@unitru.edu.pe) (G. Fernandez)

DOI: [10.17268/rev.cyt.2023.02.02](https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2023.02.02)

### RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo comparar dos tratamientos de detoxificación de relaves mineros cianurados mediante el uso de peróxido de hidrógeno, el primero tuvo una concentración al 50% y el segundo al 70%. Se utilizó la herramienta estadística ANOVA, conjuntamente con el método tukey, para determinar las diferencias y similitudes de ambos tratamientos. El estudio se realizó en dos trenes compuestos de cinco tanques cada uno, el tratamiento fue al azar (DCA) durante un periodo de 21 horas, obteniéndose cada hora una muestra de cianuro de cada tanque. Los resultados mostraron que el tratamiento con peróxido al 70% proporciona mayor remoción de cianuro (<0,05 ppm), menor consumo de solvente (975 kg) y menor ratio de consumo (0,58 kg/m<sup>3</sup>), asimismo, se obtuvo un ahorro de solvente de 36%; el análisis ANOVA permitió evidenciar la influencia significativa entre la concentración de peróxido y la eliminación de cianuro, y también, que no existe relación alguna entre el tiempo de detoxificación y la concentración final de cianuro para ambos tratamientos. En suma, el tratamiento con peróxido al 70% permite una remoción eficaz de cianuro cumpliendo con los límites máximos permisibles para su vertimiento, en concordancia con la legislación peruana vigente.

**Palabras clave:** ANOVA; tratamiento de efluentes; industria minera; tratamiento químico; cianuro

### ABSTRACT

This research aims to compare two treatments for detoxification of cyanide mine tailings using hydrogen peroxide, the first one with a concentration of 50% and the second one with a concentration of 70%. The statistical tool ANOVA was used, together with the tukey method, to determine the differences and similarities of both treatments. The study was carried out in two trains composed of five tanks each, the treatment was randomized (DCA) for a period of 21 hours, obtaining a cyanide sample from each tank every hour. The results showed that the 70% peroxide treatment provides higher cyanide removal (<0.05 ppm), lower solvent consumption (975 kg) and lower consumption ratio (0.58 kg/m<sup>3</sup>), also, a solvent saving of 36% was obtained; the ANOVA analysis showed a significant influence between the peroxide concentration and cyanide removal, and also, that there is no relationship between the detoxification time and the final cyanide concentration for both treatments. In sum, the 70% peroxide treatment allows an effective cyanide removal, complying with the maximum permissible limits for its discharge, in accordance with the Peruvian legislation in force.

**Keywords:** ANOVA; effluent treatment; mining industry; chemical treatment; cyanide

### 1. INTRODUCCIÓN

A nivel industrial, la producción de oro genera grandes volúmenes de residuos y desechos, los cuales se vierten en el medio ambiente (Anning et al., 2019). Los relaves mineros son una de las principales fuentes de desechos de las plantas mineras procesadoras de oro. Estos efluentes tóxicos presentan una composición fisicoquímica que depende del mineral trabajado, el tipo de reactivo utilizado, las técnicas de procesamiento empleadas y el tamaño de los compuestos molidos; lo cual, en su mayoría, está compuesto de metales pesados, cianuro, metaloides, minerales sulfurados y metales radiactivos (Roche et al., 2017; Uppal et al., 2017).

Posterior a la generación de relaves mineros, se espera que los componentes químicos disueltos, se atenúen naturalmente. Sin embargo, el cianuro tiende a formar complejos con varios metales, tales como: cianuros de



hierro ( $[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3^-$ ,  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]_4^-$ ), cianuros de oro ( $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ ) y cianuros de cobalto ( $[\text{Co}(\text{CN})_6]_4^-$ ), entre otros, lo cual puede perjudicar a los cuerpos de agua debido a su periodo de prolongamiento (Aranguri Llerena & Reyes López, 2019). De manera genérica los elementos químicos que forman con el cianuro y que se encuentran presentes en las colas de las plantas donde ocurre la lixiviación del mineral oro son los de Fe, Cu, Ni, Co, Zn y Cd, mientras que el cianuro aparece en forma enlazada como  $\text{CN}^-$  y HCN debido a su enorme poder de hidrólisis, siendo tóxicos para los animales, plantas y para el hombre (Dong et al., 2021; Krylova et al., 2021).

La literatura reporta muchos casos de muerte de animales y pobladores por el consumo de agua cianurada, algunos ejemplos documentados fueron: (1) envenenamiento de elefantes-África (Muboko et al., 2014), (2) caso de envenenamiento a poblador-Francia (Labat et al., 2004), (3) 52 casos de envenenamiento por cianuro-Irán (Akhgari et al., 2015).

Ulterior al lixiviado, aguas abajo, el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) se utiliza comúnmente para la eliminación de cianuro de aguas residuales o efluentes cianurados, conocido como Detoxificación. Asimismo, el peróxido de hidrógeno es el compuesto químico preferido para la detoxificación de compuestos, relaves, efluentes cianurados de la industria minera. Sin embargo, también son frecuentemente utilizados para el tratamiento de efluentes provenientes de las industrias metalúrgicas, plantas de coque, talleres de chapado, etc. (Evonik leading beyond chemistry, 2020; Baharun et al., 2020).

La principal ventaja del peróxido de hidrógeno respecto al tratamiento de aguas residuales es el ser un producto químico “limpio”, ya que no produce ni libera sustancias tóxicas que contaminen los efluentes (Griffiths et al., 1987; Kitis et al., 2005).

Adicionalmente, el tratamiento mediante peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) fue introducido por la compañía Degussa Corporation. Algunas de las patentes generadas en base al proceso de detoxificación de cianuro mediante peróxido de hidrógeno pertenecen a Degussa Group: “*Process for the treatment of effluents containing cyanide and/or other oxidizable substances*” (Andrew Griffiths et al., 1992) y “*Process for the removal of cyanide from wastewaters*” (Ahsan et al., 1990).

En Perú, las plantas mineras realizan un tratamiento a sus efluentes mediante detoxificación, donde utilizan como agente oxidante al agua oxigenada (nombre comercial del peróxido de hidrógeno) ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) o al sulfato de cobre pentahidratado como catalizador ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) donde transforma a la molécula oxidándola de cianuro a cianato ( $\text{OCN}^-$ ), para luego remover los complejos no solubles por medio de la técnica de sedimentación empleando un floculante para su avance. El reactivo usado desde 2011 en la minera Coimolache – Cajamarca para la detoxificación del cianuro libre es el peróxido al 50%, teniendo como catalizador el cobre proveniente de las propias soluciones. El uso de este método garantiza que el cianuro se oxide y éste se encuentre en valores por debajo de los LMP de acuerdo a la legislación peruana.

Como se muestra el diagrama genérico en la Figura 1, donde la disolución cianurada recircula de manera continua hacia el PAD de lixiviación su caudal varía de 850 a 910  $\text{m}^3/\text{h}$  pudiendo ser un caudal más pequeño para la cantidad de oro que se requería. Conforme va transcurriendo el proceso la fuerza del cianuro de dicha disolución se va incrementando en el área de Merrill Crowe con la finalidad de asegurar una precipitación del metal precioso, logrando que la concentración del agente lixivante se eleve de 100 a 120  $\text{mg}/\text{L}$ , el último valor mencionado se ha fijado con la finalidad de asegurar una mayor cantidad de extracción de plata y 100  $\text{mg}/\text{L}$  para la precipitación adecuada de oro.

Según el desbalance de carácter hídrico que fue provocado por las lluvias en la zona, se vio la necesidad de tratar algunos excesos de disoluciones que contienen grandes cantidades de cianuro, para poder reducir y controlar los niveles en los mayores eventos que pueda ocurrir, la cual puede llegar a contaminar las aguas libre dentro y fuera de la minería, es por ello que se recurre al método de la detoxificación del cianuro con la solución barren o pobre que se envía directo al PAD en un período como máximo de tres meses, dependiendo de la cantidad de lluvia generadas en la zona, provocando la destrucción de dicho agente de manera diaria.

Desde el 2011 empezó a funcionar la planta para detoxificar el cianuro donde utilizó el método de oxidación con  $\text{H}_2\text{O}_2$  y como catalizador al  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , se reguló el pH con la lechada de cal donde se debe mantener los valores por encima de 10; se llegó a tratar un caudal de 180  $\text{m}^3/\text{h}$  costando un aproximado de \$ 3,4 por  $\text{m}^3$ .

Hoy en día dicha planta cuenta con 5 tanques de los cuales dos actúan como reactores mientras que los restantes se emplean para aumentar el tiempo de residencia y mantener los valores de CN libre por debajo de los 0,2  $\text{mg}/\text{L}$ , el agente oxidante en este tipo de sistema trabaja a un caudal máximo de 200  $\text{m}^3/\text{h}$  costando a \$ 1,71 por cada  $\text{m}^3$  donde ya se encuentra optimizado los parámetros bajo una operación continua.

Con esta investigación, se pretende comparar dos tratamientos de detoxificación de relaves mineros cianurados mediante dos tratamientos con peróxido de hidrógeno, cuyo propósito es reducir los niveles de cianuro presente

en el relave de acuerdo a los valores estipulados conocidos como límites máximos permisibles con las siglas (LMP) que fueron impuestas por el ministerio de energía y minas cuyas siglas son (MEM), el cual debe ser menor a 1 mg/L.

De este modo se busca hacer de conocimiento que, a ciertas concentraciones de peróxido, la reacción es más rápida eso constituirá un ahorro de tiempo y dinero para las empresas mineras.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo tuvo como objetivo comparar el mismo tratamiento a dos condiciones diferentes, 50% de  $H_2O_2$  y 70% de  $H_2O_2$ , con la finalidad de obtener concentraciones de cianuro libre menores de 1 ppm, de acuerdo a la resolución ministerial nacional N11-96-EM/VMM.

El tratamiento de la solución cianurada siguió las siguientes etapas:

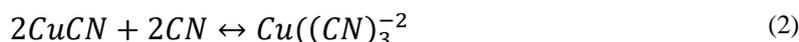
### Etapa 1: Catalización

La reacción de peróxido de hidrógeno se puede catalizar con activador de CN o con iones de cobre. En la industria minera, en el tratamiento de sus efluentes, se suele utilizar compuestos hidratados de cobre como catalizador (Sanyaolu et al., 2021).

En el presente estudio, se adicionó al ingreso del primer tanque una solución al 5% de cobre ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ), el cual cumplió la función de catalizador. Recordemos que el cobre presenta dos estados de valencia, el primero como ion cuproso y cúprico donde este último es inestable cuando se trata con cianuro, gran parte de dicho ion se reducirá para luego precipitar como el otro ion. (Fernández, 2007).



Por otra parte, si existe exceso de cianuro en la solución, el ion cuproso no logrará precipitar, estabilizándose como complejo triciano cuprito.



Además, en presencia de un catalizador de cobre, el cianuro es oxidado por el peróxido y los complejos del metal cianuro. La reacción del complejo  $Cu((CN)_3)^{-2}$  con peróxido está dada por la ecuación (3):



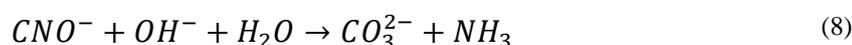
### Etapa 2: Oxidación

La reacción química entre el peróxido de hidrógeno y el cianuro es de solo un paso, es decir, no presenta formación de intermedios tóxicos. Se procede con la oxidación de los cianuros libres y disociados en ácidos débiles por acción del agente oxidante ( $H_2O_2$ ) y el catalizador más adecuado que es el sulfato de cobre pentahidratado ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ). La adición del peróxido de hidrógeno al 50% está en relacionada de 2,25 kg  $H_2O_2$ /kg de CN a un pH de 11,0 a 11,2. Si la reacción no se halla con las condiciones reales de pH esta debe acondicionarse con una solución básica de cal o hidróxido de sodio.



### Etapa 3: Hidrólisis

Posteriormente, el cianato ( $CNO^{-}$ ), se hidroliza gradualmente para generar iones de amonio y carbonato, ecuación (7) y (8).



Cabe considerar que la probabilidad de cada reacción depende del pH del medio.

Por otro lado, la presencia de amoníaco ( $NH_3$ ) es considerado tóxico para la vida marina cuando la concentración de esta sustancia es superior a 1 ppm; sin embargo, su presencia es casi siempre en su forma de amonio ( $NH_4^+$ ), el cual es mucho menos tóxico al pH de los cuerpos de agua (Griffiths et al., 1987).

Además, el exceso del agente oxidante presente en la disolución hace que se descomponga de manera eficaz en oxígeno y agua, por lo que no se considera un peligro ambiental.



La planta consta de dos tanques de reacción y tres tanques de residencia conformando un grupo de 5 tanques en serie (Figura. 1). El primero consta de una capacidad operativa de 4,8 m<sup>3</sup> y los cuatro restantes de 46,9 m<sup>3</sup>. El agente oxidante en dicho sistema permite trabajar a un caudal máximo de 200 m<sup>3</sup>/h con un costo aproximado de \$ 1,71 por m<sup>3</sup> con todos los parámetros ya optimizados y operación continua.

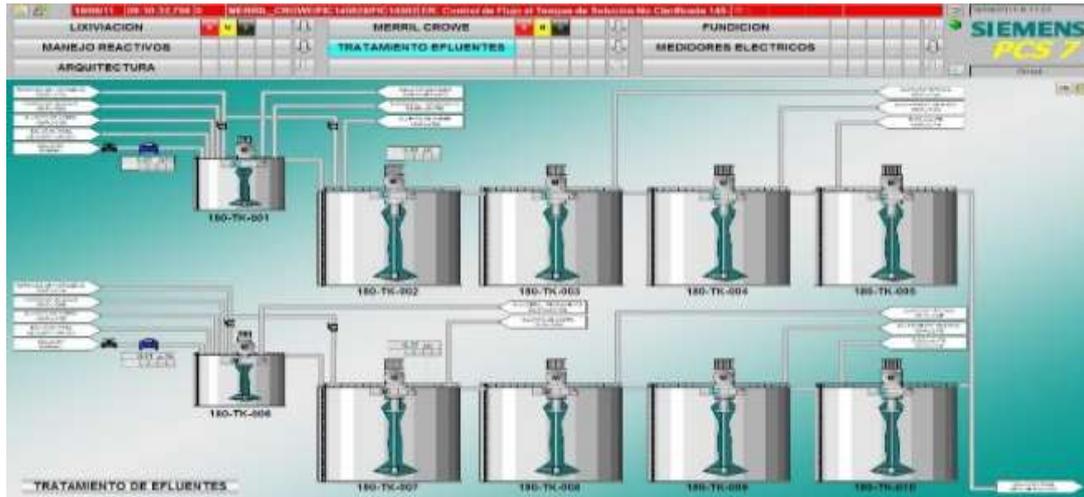


Figura. 1 Panel de control para el tratamiento de efluentes de la minería Coimolache – Cajamarca.

La planta de tratamiento de efluentes está formada por dos circuitos actuando en paralelo con un caudal de 100 m<sup>3</sup> por cada tanque. La fuente de investigación se ajusta a un tipo de estudio prospectivo, longitudinal, comparativo y experimental, se utilizó el diseño completamente al azar (DCA).

En el tren N°1 se mantuvo una dosis promedio de 600 mL/min de peróxido al 70%, equivalente a 0,77 kg/min. De esta manera se logró una ratio de 0,58 kg de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 70% /m<sup>3</sup> de solución tratada. Por otro lado, en el tren N°2 se mantuvo una dosis de 1000 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> equivalente a 1,21 kg/min. Este resultado fue una ratio 0,91kg de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%/ m<sup>3</sup> de solución tratada.

El esquema representativo del proceso de detoxificación de cianuro se presenta en la Fig. 2.

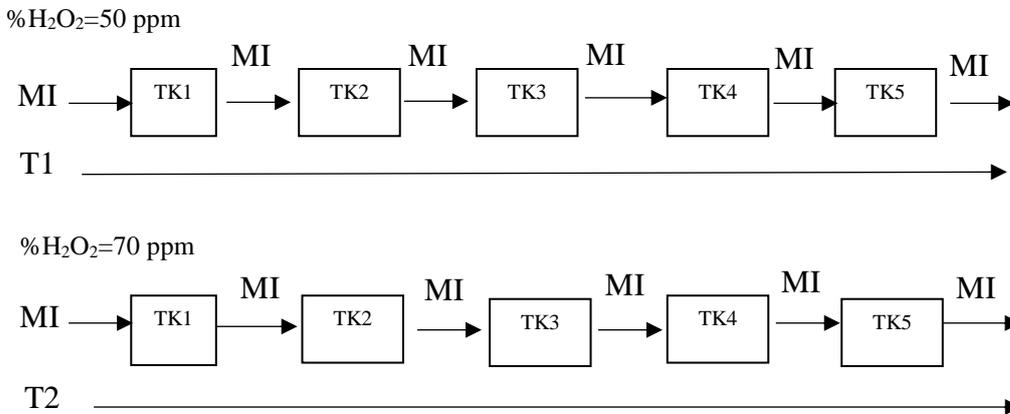


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de detoxificación de cianuro

donde:

$X_i$  = Concentración de Peróxido

MI = Concentración de cianuro libre en cada tanque

$T_i$  = Tiempo de detoxificación

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los tiempos de reacción y residencia, la concentración de cianuro en la entrada y salida de cada tanque para los tratamientos a 50% y 70% de  $H_2O_2$ , son presentados en la Tabla 1 y 2

**Tabla 1.** Resultados del tratamiento de detoxificación de cianuro con  $H_2O_2$  al 50%

		Planta de Tratamiento ( $H_2O_2$ al 50%)																	
Fecha	Hora (Hrs)	TK-1				TK-2				TK-3				TK-4				TK-5	
		pH	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>		
17/05/2019	16:00	10,3	29,3	3,56	27,2	27,2	34,43	20,2	20,2	34,65	12,58	12,58	34,46	5,84	5,84	34,45	0,58		
	17:00	10,33	27,4	3,43	27,1	27,1	34,47	20,3	20,3	34,48	12,23	12,23	34,47	5,64	5,64	34,48	0,46		
	18:00	10,35	28,4	3,45	27,2	27,2	34,48	20,4	20,4	34,62	12,92	12,92	34,51	6,14	6,14	34,47	0,36		
	19:00	10,38	26,9	3,28	26,1	26,1	34,45	21,3	21,3	34,54	13,43	13,43	34,45	7,14	7,14	34,45	0,60		
	20:00	10,34	27,6	3,40	26,8	26,8	34,48	20,2	20,2	34,53	12,45	12,45	34,48	5,80	5,80	34,42	0,48		
	21:00	10,31	29,7	3,48	28,4	28,4	34,42	23,2	23,2	34,44	15,76	15,76	34,46	6,90	6,90	34,41	0,40		
	22:00	10,34	24,4	3,40	23,2	23,2	34,43	17,3	17,3	34,42	11,50	11,50	34,44	5,60	5,60	34,48	0,30		
	23:00	10,36	26,9	3,43	25,2	25,2	34,49	19,1	19,1	34,56	11,34	11,34	34,46	5,90	5,90	34,46	0,40		
18/05/2019	01:00	10,34	28,1	3,40	27,1	27,1	34,53	20,6	20,6	34,49	12,35	12,35	34,41	5,78	5,78	34,45	0,30		
	02:00	10,31	29,3	3,55	28,3	28,3	34,42	21,4	21,4	34,53	13,42	13,42	34,44	6,98	6,98	34,41	0,40		
	03:00	10,37	28,0	3,44	27,13	27,13	34,44	21,5	21,5	34,48	13,54	13,54	34,48	6,85	6,85	34,46	0,50		
	04:00	10,30	29,0	3,48	28,1	28,1	34,41	21,6	21,6	34,43	13,58	13,58	34,46	6,94	6,94	34,48	0,40		
	05:00	10,38	28,4	3,47	27,1	27,1	34,43	21,1	21,1	34,52	13,28	13,28	34,43	6,72	6,72	34,42	0,50		
	06:00	10,31	29,3	3,41	28,2	28,2	34,48	21,7	21,7	34,47	13,01	13,01	34,45	6,53	6,53	34,44	0,60		
	07:00	10,32	28,4	3,43	27,3	27,3	34,42	20,9	20,9	34,42	12,23	12,23	34,49	6,68	6,68	34,47	0,58		
	08:00	10,30	26,2	3,44	25,15	25,15	34,46	19,7	19,7	34,41	12,17	12,17	34,41	6,48	6,48	34,48	0,40		
	09:00	10,34	24,4	3,58	23,1	23,1	34,45	17,6	17,6	34,43	11,87	11,87	34,48	6,12	6,12	34,43	0,40		
	10:00	10,33	31,8	3,42	29,92	29,92	34,44	22,9	22,9	34,42	15,67	15,67	34,46	7,10	7,10	34,45	0,59		
	11:00	10,30	29,7	3,52	28,4	28,4	34,52	21,7	21,7	34,45	14,95	14,95	34,44	7,00	7,00	34,41	0,52		
12:00	10,31	29,9	3,44	28,3	28,3	34,49	22,0	22,0	34,49	15,89	15,89	34,45	7,20	7,20	34,48	0,60			

**Tabla 2.** Resultados del tratamiento de detoxificación de cianuro con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 70%

		Planta de Tratamiento (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50%)																	
Fecha	Hora (Hrs)	TK-1				TK-2				TK-3				TK-4		TK-5			
		pH	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>	CN <sub>in</sub>	t (min.)	CN <sub>out</sub>		
17/05/2019	16:00	10,30	29,3	3,51	26,2	26,2	34,47	17,60	17,60	34,43	8,94	8,94	34,45	0,60	0,60	34,48	0,08		
	17:00	10,33	27,4	3,44	26,1	26,1	34,45	17,59	17,59	34,44	8,93	8,93	34,51	0,40	0,40	34,46	0,06		
	18:00	10,35	28,4	3,48	26,2	26,2	34,48	17,71	17,71	34,45	9,05	9,05	34,43	0,80	0,80	34,42	0,04		
	19:00	10,38	26,9	3,33	25,8	25,8	34,42	16,80	16,80	34,48	8,14	8,14	34,48	0,30	0,30	34,43	0,04		
	20:00	10,50	27,6	3,42	26,8	26,8	34,44	17,98	17,98	34,43	9,32	9,32	34,49	0,70	0,70	34,45	0,04		
	21:00	10,51	29,7	3,49	26,4	26,4	34,43	18,10	18,10	34,49	9,44	9,44	34,47	0,86	0,86	34,44	0,04		
	22:00	10,43	24,4	3,51	21,2	21,2	34,44	12,80	12,80	34,51	4,14	4,14	34,43	0,20	0,20	34,44	0,04		
	23:00	10,56	26,9	3,54	23,2	23,2	34,45	14,64	14,64	34,43	5,98	5,98	34,44	0,30	0,30	34,47	0,02		
	01:00	10,54	28,1	3,48	25,1	25,1	34,42	16,59	16,59	34,44	7,93	7,93	34,47	0,20	0,20	34,46	0,02		
	02:00	10,49	29,3	3,56	26,3	26,3	34,48	14,87	14,87	34,43	6,21	6,21	34,48	0,30	0,30	34,45	0,02		
18/05/2019	03:00	10,53	28,0	3,50	25,0	25,0	34,49	16,86	16,86	34,45	8,20	8,20	34,42	0,20	0,20	34,46	0,02		
	04:00	10,50	29,0	3,54	26,1	26,1	34,44	17,56	17,56	34,44	8,90	8,90	34,48	0,20	0,20	34,43	0,02		
	05:00	10,58	28,4	3,47	25,0	25,0	34,42	16,78	16,78	34,45	8,12	8,12	34,49	0,20	0,20	34,45	0,02		
	06:00	10,60	29,3	3,45	26,2	26,2	34,45	18,30	18,30	34,44	9,64	9,64	34,51	0,30	0,30	34,44	0,02		
	07:00	10,32	28,4	3,44	25,3	25,3	34,48	17,10	17,10	34,48	8,44	8,44	34,44	0,30	0,30	34,46	0,02		
	08:00	10,30	26,2	3,49	23,0	23,0	34,44	14,69	14,69	34,45	6,03	6,03	34,46	0,10	0,10	34,48	0,02		
	09:00	10,34	24,4	3,61	21,1	21,1	34,43	13,95	13,95	34,49	5,29	5,29	34,47	0,10	0,10	34,42	0,02		
	10:00	10,33	31,8	3,48	27,1	27,1	34,44	18,44	18,44	34,42	9,28	9,28	34,45	0,30	0,30	34,41	0,08		
	11:00	10,30	29,7	3,51	26,4	26,4	34,43	17,90	17,90	34,50	9,24	9,24	34,48	0,40	0,40	34,46	0,08		
	12:00	10,31	29,9	3,48	26,3	26,3	34,48	17,80	17,80	34,45	9,14	9,14	34,42	0,54	0,54	34,48	0,08		

Las tablas 1 y 2 presentan los tratamientos realizados para la eliminación de cianuro. Se tomó una muestra de cianuro, cada hora, de cada tanque. La tabla 3 resume los resultados obtenidos.

**Tabla 3.** Resultados de los tratamientos de detoxificación

Concentración de Peróxido (%)	pH	Tiempo de detoxificación (min.)	Concentración final de cianuro libre (ppm)
50	10,425	141,31	0,4685
70	10,425	141,30	0,0390

Con los datos obtenidos en las tablas 1 y 2, se procedió a realizar los análisis estadísticos para determinar influencias de los diferentes tratamientos respecto a los niveles de cianuro presentes en los efluentes, asimismo, se evaluó la existencia de alguna correlación entre el tiempo de detoxificación y el tratamiento realizado, para determinar la influencia de alguna covariable en el estudio.

Se procedió a realizar análisis de varianzas (ANOVA) a dos variables de respuesta: (1) niveles de cianuro, y (2) tiempo de detoxificación. El fin del estudio fue determinar si existe diferencia estadística significativa entre ambos tratamientos (Tyagi et al., 2018), la magnitud de estas diferencias y resultados de estadísticos descriptivos.

Además, es importante señalar que se realizó test de normalidad para los datos de respuesta obtenidos de cada análisis (niveles de cianuro y tiempo de detoxificación) y demostraron linealidad con un nivel de confianza de 95% (Tabla 4).

**Tabla 4.** Análisis de normalidad

Variable de respuesta	Factor (%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	P valor
Niveles de cianuro	50	0,055
	70	> 0,100 (Shapiro Wilk) (Razali, & Wah, 2011)
Tiempo de detoxificación	50	0,203
	70	0,214

Los resultados de la Tabla 4 demuestran una variación normal de los datos, lo cual cumple con uno los requisitos para el análisis ANOVA; asimismo, se cumple con los requisitos de homocedasticidad e independencia de tratamientos.

#### Análisis ANOVA (variable de respuesta: niveles de cianuro)

**Tabla 5.** Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Factor	1	1,8447	1,84470	343,90	0,000
Error	38	0,2038			
Total	39	2,0485			

Los resultados presentes en la Tabla 5 manifiestan que el valor P es inferior a 0,05, es decir, se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) y los tratamientos son estadísticamente significantes, por lo tanto, existe una diferencia significativa de ambos tratamientos en la reducción de concentración de cianuro en el efluente.

**Tabla 6.** Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,0732399	90,05%	89,79%	88,97%

La tabla de regresión muestra que la efectividad de explicar la variable dependiente (niveles de cianuro) a través de la variable independiente (concentración de peróxido) alcanza un valor de 89,79%, lo cual estima una buena efectividad predictiva.

**Tabla 7.** Estadística descriptiva de las medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
50%	20	0,4685	0,1008	(0,4353; 0,5017)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
70%	20	0,03900	0,02382	(0,00585; 0,07215)

La tabla 7 muestra la inferencia estadística de los resultados de concentración de cianuro con un nivel de confianza de 95%. Asimismo, los resultados de la media y desviación estándar manifiestan, en primera instancia, que el tratamiento a 70% de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> muestra mejores resultados, respecto a los niveles de cianuro obtenidos a la salida del tratamiento, que el tratamiento a 50% de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Posteriormente, se utilizó un método de comparación de Tukey para comparar los tratamientos de acuerdo a la variable de respuesta (Rai et al., 2021).

**Tabla 8.** Comparación en parejas de Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
50%	20	0,4685	A
70%	20	0,03900	B

Como se puede observar en la Tabla 8, la prueba de comparación de Tukey demuestra que el tratamiento a 50% de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es significativamente diferente al tratamiento a 70% de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; además, indica que la media de concentración de cianuro para los tratamientos es de 0,4685 ppm y 0,03900 ppm, respectivamente.

#### Análisis ANOVA (variable de respuesta: tiempo de detoxificación)

**Tabla 9.** Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Factor	1	0,000002	0,000002	0,00	0,986
Error	38	0,291675	0,007676		
Total	39	0,291678			

Los resultados presentes en la Tabla 9 manifiestan que el valor P es superior a 0,05, por ende, se acepta la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) y los tratamientos no son estadísticamente significantes, es decir, no existe una diferencia significativa de ambos tratamientos en el tiempo de detoxificación del cianuro en el efluente.

El objetivo de la investigación fue determinar la influencia que presenta la concentración de peróxido en la eliminación de cianuro de aguas residuales. En base a ello, se proporcionaron 2 tratamientos a 50% y 70% de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, asimismo, se estudió la independencia de la variable tratamiento respecto a la variable “tiempo de detoxificación” para determinar la presencia de una variable concomitante; finalmente, se presenta un estudio estadístico para proporcionar rigurosidad de los resultados y certeza respecto a los resultados de cada tratamiento.

Las corrientes de efluentes cianurados no requieren ningún tratamiento previo a la detoxificación con peróxido, además que se puede realizar el proceso a altas temperaturas, acelerando la reacción (Dong et al., 2021). Además, el tratamiento con peróxido a pH básico (pH=10) refuerza la eficacia de remoción del cianuro, a medida que aumenta la basicidad del medio, el % de remoción del contaminante aumentará (Tu et al., 2019; Hou et al., 2020).

Los resultados obtenidos en la tabla 10, el análisis ANOVA y el estudio de Tukey demuestran que el tratamiento con peróxido a 70% presenta mejores resultados respecto a su eficacia, cantidad requerida y ratio de remoción, respecto al tratamiento a 50%, asimismo, se obtuvo un ahorro de materia prima de 36% (Tabla 10).

**Tabla 10.** Consumo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Tratamiento	Caudal (m/h)	Dosis H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL/min.)	Duración (h)	Caudal tratado (m <sup>3</sup> )	Consumo de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Kg)	Tiempo de tratamiento	Ratio de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )
50% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	80	1000	21	1680	1525	141,31	0,91
70% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	80	600	21	1680	975	141,30	0,58
						Ahorro de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	36%

Respecto a la eficacia de remoción de utilizar peróxido de hidrógeno, los hallazgos demuestran reducción de concentración de cianuro hasta inferiores a 0,05 ppm, estando en concordancia con LMP impuestos por el MEM; trabajos previos respaldan la utilización de peróxido como agente para la detoxificación de cianuro en relaves, mencionando que la concentración de cianuro para concentraciones de 60-400 ppm se puede

reducir a concentraciones inferiores a 0,5 ppm elevando el parámetro pH de la solución de 8 a 11 (Sjahrul et al., 2016, Hou et al., 2020; Estrada-Montoya et al., 2020).

Además, el tratamiento de los efluentes cianurados con peróxido de hidrogeno demuestran un tiempo de reacción y residencia total a 141,31 min. (2 horas y 20 min), cual es ventajoso para el tratamiento de grandes flujos máxicos de efluente (Amaouche et al., 2019). Asimismo, se observa en las tablas 1 y 2, que los tanques de residencia (TK-3, TK-4 y TK-5) son los eliminan mayor cantidad de cianuro, mientras que los tanques de reacción (TK-1 y TK-2) permiten la mezcla e interacción entre el solvente y soluto. La planta Coimolache-Cajamarca produjo una cantidad de 1680 m<sup>3</sup> de efluentes tratados en alrededor de 21 horas.

El análisis ANOVA de los tiempos de detoxificación para cada tratamiento, presentados en la tabla 9, demuestran que no existe dependencia (valor  $p > 0,05$ ) entre la variable factor (concentración de peróxido) y la variable continua (tiempo de detoxificación). En consecuencia, los resultados obtenidos no se han visto sesgados o errados debido a la presencia de covariables.

#### 4. CONCLUSIONES

El uso de peróxido de hidrógeno para el tratamiento de aguas residuales cianuradas permite la reducción de la concentración de esta sustancia hasta niveles aptos para su vertimiento en cuerpos de agua sin generar perjuicios al medio ambiente, de acuerdo con la legislación peruana vigente N11-96-EM/VMM. Asimismo, la utilización de peróxido como agente de remoción proporciona ventajas respecto a los subproductos del proceso, ya que, no genera ninguna liberación de sustancias tóxicas que puedan contaminar las aguas, su descomposición permite la formación de agua y oxígeno molecular.

La utilización de peróxido en una concentración de 70% proporciona mayor remoción de cianuro (<0,05 ppm), menor consumo de solvente (975 kg) y menor consumo de solvente (0,58 kg/m<sup>3</sup>), que el tratamiento a 50% de peróxido. Asimismo, se obtuvo un ahorro de 36% en el consumo de solvente, lo que es provechoso económicamente, ya que reduce los gastos en materia prima.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahsan, Q., Griffiths, A., Haug, E., y Norcross, R. (1990). Process for the removal of cyanide from wastewaters (Patent Núm. 4966715). En US Patent (Núm. 4966715).  
<https://patents.google.com/patent/US4966715A/en>
- Akhgari, M., Baghdadi, F., y Kadkhodaei, A. (2016). Cyanide poisoning related deaths, a four-year experience and review of the literature. *The Australian Journal of Forensic Sciences*, 48(2), 186–194.  
<https://doi.org/10.1080/00450618.2015.1045552>
- Amaouche, H., Chergui, S., Halet, F., Yeddou, A. R., Chergui, A., Nadjemi, B., y Ould-Dris, A. (2019). Removal of cyanide in aqueous solution by oxidation with hydrogen peroxide catalyzed by copper oxide. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 80(1), 126–133. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.254>
- Anning, C., Wang, J., Chen, P., Batmunkh, I., y Lyu, X. (2019). Determination and detoxification of cyanide in gold mine tailings: A review. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 37(11), 1117–1126.  
<https://doi.org/10.1177/0734242X19876691>
- Aranguri LLerena, G., y Reyes López, I. A. (2018). Cyanide degradation from mining effluent using two reagents: Sodium metabisulphite and the metabisulphite mixture with hydrogen peroxide. *TECCIENCIA*, 13(25), 1–9. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2018.25.1>
- Baharun, N., Ling, O. P., Rezaei Ardani, M., Ariffin, K. S., Yaraghi, A., Abdullah, N. S., Putra, T. A. R., y Ismail, S. (2020). Effect of hydrogen peroxide and lead(II) nitrate on gold cyanide leaching of Malaysian mesothermal deposit gold ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56(5), 905–918. <https://doi.org/10.37190/ppmp/126629>
- Dong, K., Xie, F., Wang, W., Chang, Y., Lu, D., Gu, X., y Chen, C. (2021). The detoxification and utilization of cyanide tailings: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 302(126946), 126946. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126946>
- Estrada-Montoya, C. C., Restrepo Franco, G. M., y Galeano Vanegas, N. F. (2020). Evaluation of cyanide and heavy metals removal in liquid effluents from small mining's gold benefit, by adsorption with activated carbon and hydrogen peroxide in Segovia, Antioquia. *Dyna*, 87(212), 9–17.  
<https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.79716>

- Griffiths, A. D., Dr. Ahsan, Q. M., Norcross, R., Knorre, H. D., y Merz, F. W. (1992). Process for the treatment of effluents containing cyanide and/or other oxidizable substances (Patent Núm. 0355417:B1). En European Patent (0355417:B1).
- Griffiths, A., Knorre, H., Gos, S. y Higgins, R. (1987). The detoxification of gold-mill tailings with hydrogen peroxide. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 87(9), 279-283. [https://journals.co.za/doi/10.10520/AJA0038223X\\_1773](https://journals.co.za/doi/10.10520/AJA0038223X_1773)
- Hou, D., Liu, L., Yang, Q., Zhang, B., Qiu, H., Ruan, S., Chen, Y., y Li, H. (2020). Decomposition of cyanide from gold leaching tailings by using sodium metabisulphite and hydrogen peroxide. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2020/5640963>
- Hydrogen peroxide for mining. (2022, diciembre 6). Evonik.com. <https://active-oxygens.evonik.com/en/markets/mining>
- Kitis, M., Akcil, A., Karakaya, E., y Yigit, N. O. (2005). Destruction of cyanide by hydrogen peroxide in tailings slurries from low bearing sulphidic gold ores. *Minerals Engineering*, 18(3), 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.003>
- Krylova, L. N., Seliverstov, A. F., y Ryabtsev, D. A. (2021). Cleaning of industrial waters containing cyanides by using a combination of ozone and hydrogen peroxide. *Metallurgist (USSR)*, 64(11–12), 1331–1339. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01123-y>
- Labat, L., Dumestre-Toulet, V., Goullé, J. P., y Lhermitte, M. (2004). A fatal case of mercuric cyanide poisoning. *Forensic Science International*, 143(2–3), 215–217. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.02.039>
- Muboko, N., Muposhi, V., Tarakini, T., Gandiwa, E., Vengasayi, S., y Makuwe, E. (2014). Cyanide poisoning and African elephant mortality in Hwange National Park, Zimbabwe: A preliminary assessment. *Pachyderm*, 55, 92–94. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/483862>
- Ngulube, M. (2016). Elimination cyanide with hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and calcium hypochlorite (Ca(OCl)<sub>2</sub>) on Gold Mine waste from north luwu, south Sulawesi. *American Journal of Environmental Protection*, 5(4), 97. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20160504.14>
- Pérez, B. F. (2007). Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina. Universidad de Oviedo.
- Rai, A., Chakrabarty, J., y Dutta, S. (2021). Phycoremediation of pollutants from coke-oven wastewater using *Tetraspora* sp. NITD 18 and estimation of macromolecules from spent biomass. *Journal of Water Process Engineering*, 39(101746), 101746. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101746>
- Rapid Response Assessment, A. (s/f). Mine tailings storage: Safety is no accident. Amazonaws.com. Recuperado el 4 de febrero de 2023, de [https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s\\_document/371/original/RRA\\_MineTailings\\_lores.pdf?1510660693](https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/371/original/RRA_MineTailings_lores.pdf?1510660693)
- Razali, N. M., y Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. <https://www.semanticscholar.org/paper/dcdc0a0be7d65257c4e6a9117f69e246fb227423>
- Sanyaolu, N. O., Ibikunle, A. A., Kareem, F. A., Ogunmoye, A. O., Ogundare, S. A., Atewolara-Odule, O. C., Hashim, A. M., Akinwunmi, F., Adewuyi, S., Shittu, T., Eromosele, C. O., y Torto, N. (2021). Catalytic detoxification of aqueous cyanide using copper crown electrospun chitosan nanofiber. *Journal of Chemical Society of Nigeria*, 46(2). <https://doi.org/10.46602/jcsn.v46i2.615>
- Tu, Y., Han, P., Wei, L., Zhang, X., Yu, B., Qian, P., y Ye, S. (2019). Removal of cyanide adsorbed on pyrite by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation under alkaline conditions. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 78, 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.013>
- Tyagi, M., Rana, A., Kumari, S., y Jagadevan, S. (2018). Adsorptive removal of cyanide from coke oven wastewater onto zero-valent iron: Optimization through response surface methodology, isotherm and kinetic studies. *Journal of Cleaner Production*, 178, 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.016>
- Uppal, H., Tripathy, S. S., Chawla, S., Sharma, B., Dalai, M. K., Singh, S. P., Singh, S., y Singh, N. (2017). Study of cyanide removal from contaminated water using zinc peroxide nanomaterial. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 55, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.07.011>