

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería de Minas

REMOCIÓN DE CIANURO DE SODIO Y COBRE CON PERÓXIDO DE HIDRÓGENO, SULFATO DE COBRE Y SULFHIDRATO DE SODIO DE LOS EFLUENTES DE LIXIVIACIÓN EN EMPRESAS MINERAS PRODUCTORAS DE ORO Y PLATA.

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Bach. Garay Pablo, Josue Yonathan
Bach. Llatas Legoas, Ronald Marcos

Asesor:

Mg. Ing. Álvarez León, Víctor Eduardo

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

Esta investigación va dirigida a las personas que confiaron en mí, especialmente a mi madre que más ha influenciado en mi vida.

Josue Garay

El presente trabajo de investigación dedico especialmente a mi madre, Laura Legoas y a mi tía Maura Legoas por su apoyo en mi formación académica en la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Privada del Norte.

Ronald Llatas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por protegerme en el transcurso de mi camino, a mi familia y amigos que lograron fortalecerme, al Ing. Víctor Álvarez, asesor de tesis, por su meritoria guía y asesoramiento.

Josue Garay

Agradezco a Dios, que me dio las fuerzas para poder lograr mis objetivos propuestos en el transcurso de mi vida y poder culminar mi presente trabajo de investigación. Así mismo, Agradezco a mi Abuelo, Mama, Primos(as), Tíos(as), y Amigos(as) por los sacrificios que hicieron para que pueda terminar mi carrera profesional, al Ingeniero Víctor Álvarez León, asesor de tesis, por todos los conocimientos impactados y desarrollados en la culminación de la presente Tesis.

Ronald Llatas

INDICE

DEDICATORIA.....	1
AGRADECIMIENTO.....	2
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	6
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Realidad problemática.....	8
1.2. Formulación del problema.....	21
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1. Objetivo General.....	21
1.3.2. Objetivo Especifico.....	21
1.4. Hipótesis.....	22
1.4.1. Hipótesis General.....	22
1.4.2. Hipótesis Especifica.....	22
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	23
2.1. Tipo de investigación.....	23
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos).....	24
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	24
2.3.1. Recolección de datos.....	24
2.3.2. Análisis de datos.....	27
2.4. Procedimiento.....	28
2.4.1. Pre-tratamiento: dosificación de químicos y prueba de destrucción de cianuro.....	29
2.4.2. Recolección de datos.....	31
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	32
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	46
4.1. Discusión.....	46
4.2. Conclusiones.....	51
REFERENCIAS.....	52
ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ficha de observación.	24
Tabla 2 Ficha de caracterización química.....	24
Tabla 3 Análisis de la caracterización de la recolección de datos de los consumos de reactivos.	28
Tabla 4 Caracterización química del efluente de lixiviación.	32
Tabla 5 Análisis estadístico de la caracterización química del efluente.	33
Tabla 6 Resumen de los consumos de reactivos químicos.	34
Tabla 7 Mediciones estadísticas de los consumos de reactivos químicos.	35
Tabla 8 Ratios de reactivos químicos empleados en la remoción de cianuro de sodio y cobre.	36
Tabla 9 Ratio de los reactivos químicos en kg/m ³	40
Tabla 10 Resultados del efluente tratado comparado con los LMP.	41
Tabla 11 Eficiencia de remoción de cianuro de sodio y cobre.	42
Tabla 12 Costo de la remoción de cianuro de sodio y cobre.	45
Tabla 13 ECA y LPM de cianuro.	63
Tabla 14 Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Flow Sheet.	30
Figura 2 Ratio kg. H ₂ O ₂ /kg. NaCN.	37
Figura 3 Ratio kg. CuSO ₄ /kg. NaCN.	38
Figura 4 Ratio kg. NaSH/kg. Cu.	39
Figura 5 Eficiencia de remoción de cianuro libre.	43
Figura 6 Eficiencia de remoción de cobre cianuro libre.	43

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Disociación del complejo cianurado de cobre con peróxido de hidrógeno.....	15
Ecuación 2: Disociación del ion cianato en medio acuoso.....	15
Ecuación 3: Oxidación del Cianuro libre.....	15
Ecuación 4 Disociación del Hidrosulfuro H ₂ S.	18
Ecuación 5 Reacción química de un elemento metálico y un Hidrosulfuro.	18
Ecuación 6 Factor molecular.	56
Ecuación 7 Fuerza de Cianuro.	56
Ecuación 8 Volumen tratado.	56
Ecuación 9 Cianuro tratado (Kg).....	56
Ecuación 10 Cianuro tratado (gr).....	56
Ecuación 11 Ratio kg. H ₂ O ₂ /Kg. NaCN.....	56
Ecuación 12 Ratio kg. CuSO ₄ /Kg. NaCN.....	56
Ecuación 13 Ratio kg. NaSH/Kg. NaCN.....	56
Ecuación 14 Eficiencia (%)......	57
Ecuación 15 Promedio de medidas numéricas.....	57
Ecuación 16 Desviación estándar de medidas numéricas.....	57
Ecuación 17 Coeficiente de variación de medidas numéricas	58
Ecuación 18 Costos de tratamiento por reactivo.....	58
Ecuación 19 Costos por cada reactivo.....	58
Ecuación 20 Costo unitario.....	58
Ecuación 21 Concentración de reactivos químicos Kg/m ³	58

RESUMEN

La presente tesis de investigación tuvo como objetivo evaluar la remoción de cianuro de sodio y cobre con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre ($CuSO_4$), sulfhidrato de sodio (NaSH) de los efluentes de lixiviación en empresas mineras productoras de oro y plata. El tratamiento de estos efluentes se implementó a la salida de la poza de mayores eventos, con una capacidad de planta de tratamiento de $120\text{ m}^3/\text{hora}$, donde primero se tomaron muestras para realizar la caracterización química de los efluentes de lixiviación y después de 75.50 horas de tratamiento en 8 días de tratamiento discontinuo, se evaluaron los reactivos mencionados. Así mismo, se calculó la eficiencia de remoción de cianuro de sodio y cobre, donde los resultados obtenidos después del tratamiento, el resultado fue óptimo con un 99,99% de eficiencia en cuanto a la remoción de cianuro y 89,97% de remoción de cobre. Los resultados de costos, que generaría la mejora de la gestión de la calidad de estos efluentes de lixiviación en la poza de mayores eventos, es de 0,91 USD \$ por 1 m^3 tratado de efluente.

Palabras claves: Remoción, reactivos, eficiencia, costos.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En la actualidad, la problemática del tratamiento del cianuro de los efluentes las tiene aquellas minas que utilizan cianuro en sus plantas de tratamiento, donde buscan evitar las aguas de exceso. Así mismo deben tratarse con oxidantes químicos; sin embargo, esto tolera a que desarrollen métodos de tratamiento, para que el cianuro deba eliminarse a niveles muy bajos.

En el caso de estudio, se está realizando tratamiento de remoción de cianuro de sodio y cobre con (H_2O_2 , $CuSO_4$, $NaSH$, $NaOH$, *coagulante y floculante*) desde el año 2015, pero el problema en los efluentes es que la mineralogía del yacimiento es cambiante, así como la presencia de otros metales en los efluentes y el clima, lo que origina que se realice un estudio actualizado del tratamiento de estos efluentes.

El método de lixiviación con cianuro se realizó por primera vez en Escocia, en 1887. La aplicación de cianuro es rentable para explotar minerales con baja ley de Oro diseminado, así mismo permite una recuperación de oro a más del 97 %. Además, en 1969 la oficina de Minas de los Estados Unidos (US Bureau Of Mines) propuso el sistema de remojo con cianuro libre como principal método económico para tratar extensos volúmenes de minerales de oro de baja ley (REMA, 2014).

Según Fernández, B. (2007), el cianuro se produce industrialmente mediante la combinación de gas natural y amoníaco a temperaturas y presiones altas para producir cianuro de Hidrogeno (HCN) gaseoso. Así mismo, este compuesto se adsorbe en

solución de hidróxido de sodio (NaOH) o de potasio (KOH) para producir el cianuro correspondiente (NaCN o KCN) y agua.

El efecto del pH en cual se realiza la cianuración de los minerales debe ser alto (entre 10 y 11) para evitar la pérdida de cianuro por hidrólisis (generación de gas cianhídrico, HCN, altamente venenoso) y para neutralizar los componentes ácidos presentes en el mineral. Para ello se emplea cal (CaO) que se adiciona para mantener la concentración de CaO libre en la solución por encima 100 g/m^3 (Bernabel y Quispe, 2013).

Castillo (2018) manifiesta que en la minera Fresnillo en México, tiene una planta de proceso de Merrill Crowe, donde maneja cianuro en grandes cantidades, ya que así lo requiere todos sus procesos como para extraer o separar los metales económicamente rentables. El Cianuro (CN^-) forma parte de sus principales reactivos, lo cual es altamente peligroso. La empresa minera maneja cianuro de sodio (NaCN), el cual tiene características de ser controlable si se regula el potencial de hidrogeno (pH), se puede mantener estable y eso permite a que el cianuro se elimine. Por otro lado, la planta de Merrill Crowe maneja pH estable arriba de 11 y eso garantiza que no se forme ácido cianhídrico (HCN). Así mismo existen soluciones para evitar la formación de dicho ácido, la soda caustica o hidróxido de sodio (NaOH) sirve para aumenta el pH por si disminuye; cuando se agrega el cianuro la cal viva (CaO) sirve para mantener el pH estable arriba de 11. No obstante, cuando se obtiene un pH meno de 7 es muy peligroso, ya que el cianuro se convierte en gas cianhídrico esto sucede cuando el ambiente es cerrado, pero cuando es al aire libre el gas cianhídrico se degrada por los rayos solares.

La oxidación con peróxido de hidrogeno resulto ser confiable para la detoxificación de efluentes de proceso de cianuración, lo cual una oxidación efectiva se puede llevar a cabo en unos pocos minutos. Kitis, Akcil, Karakaya y Yigit (2004) manifiestan que: la adición de catalizador de cobre mejoró la velocidad de eliminación de cianuro, también ayudo a disminuir las dosis de peróxido de hidrogeno (es decir, <150mg/l). No obstante, aumentar el catalizador de cobre, también podría eliminar a la asociación de los metales. Por otro lado, la temperatura de suspensión fue de 10 y 30°C, lo cual no impacto a la destrucción de cianuro wad con peróxido de hidrogeno aun así haya estado presente el catalizador de cobre. Sin embargo, el pH de la suspensión sobre la destrucción de cianuro va a variar dependiendo a la dosis del catalizador de cobre. Dicha observación puede ser de gran ayuda para las minas que tratan el cianuro en lodos con variaciones de temperaturas en aguas de proceso.

Kitis et al. (2004) también afirma que: Las tasas iniciales de destrucción de cianuro aumentaron entre 1.2 y 3 pliegues con la adición de 30 mg / l de Cu. En cuanto a la dosis únicamente con peróxido de hidrogeno de 300 mg/l pudo alcanzar menos de 1 mg / l de cianuro wad después de 240 minutos de tiempo de reacción. Ahora bien, la reacción con el catalizador de 30mg/l más una dosis de peróxido de 100 mg/l, basto para la concentración de cianuro wad después de 120 minutos de reacción. Para finalizar, las dosis de peróxido de hidrogeno requeridas por cantidad de cianuro wad oxidado fueron aproximadamente 1.7 y 5 (gr H₂O₂ / gr CN_{WAD}) en presencia (30 mg / l) y ausencia de catalizador de Cu. En relación con la dosis exacta puede variar según las características del mineral.

El Peróxido de hidrógeno es un potente oxidantes, claro está. Además, no contamina el ambiente lo cual es utilizado en varias plantas metalúrgicas, en su mayoría para tratamientos de efluentes cianurados residuales la tesis realizada por (Aguilar, 2011), se requiere 1.31gr de H_2O_2 por gramo de CN oxidado, actualmente, el consumo es de 2 a 8 gr de H_2O_2 por gramo de CN oxidado. Dicho de otra manera, el consumo es para garantizar que se pueda oxidar en su totalidad el cianuro presente, sabiendo que una parte del H_2O_2 es consumido por metales presentes en la solución.

Por otro lado, en la misma investigación se realizó la eliminación del cianuro libre mediante el uso H_2O_2 (peróxido de hidrógeno) como oxidante en presencia de carbón activado impregnado de cobre, el proceso se basa en la conversión de CN^- a CNO^- utilizando H_2O_2 y el catalizador de cobre. Esto quiere decir que el carbón activado impregnado de cobre es en realidad CuO (óxido de cobre II). Así mismo, El método analiza los aspectos que puedan lograr intervenir en un mejoramiento en la eliminación de CN^- libre. En Efecto se obtiene una mejor eliminación de cianuro cuando el pH disminuye.

Es necesario mencionar el trabajo realizado por Mamani (2007), manifiesta que el proceso con sulfato ferroso acompleja al cianuro libre; sin embargo a condiciones óptimas del proceso (pH=5.5-6.5) un porcentaje de los complejos débiles disociables en ácido (CNW: cianuro wad) se disocian en cianuros libres que a su vez son acomplejados a ferrocianuros insolubles, en la práctica de pH queda determinado por el sulfato ferroso (de esta manera la cual se optimizó el proceso en esta investigación), es necesario profundizar la investigación buscando disminuir el consumo de sulfato ferroso adicionando algún ácido. También, la adición de peróxido de hidrógeno al proceso indica un incremento en la cinética del proceso evidenciándose en una

instantáneo cambio de color inmediatamente después de adicionado el peróxido, la adición de peróxido resulta de un incremento de oxígeno disuelto en la solución de 4.6 a 6.1 mg/L necesario para la formación del azul de Prusia; sin embargo, hay que tener en cuenta que una alta adición de peróxido puede oxidar al ferrocianuro a ferrocianuro y al ion Hierro divalente a formas oxidadas de hierro, reduciendo así la relación FeCN.

Arévalo (2011), concluyo lo siguiente: durante el proceso las soluciones que entran al reactor hasta el final de la reacción, permanecieron con un pH constante de 10 y 11, esto permitió a mejorar el modelo. Por otro lado, Los resultados fueron ser notorios después de media hora de reacción. El método ha ayudado a minimizar el cianuro a concentraciones menores de los 100ppm en un 75 por ciento (232.4 kg de cianuro eliminado al año), y finalmente concluye que para determinar la cantidad total de peróxido de hidrogeno a utilizar, como principal medida se tiene que caracterizar el efluente a trabajar para conocer el tipo de cianuro a degradar.

Degussa Corporation (1983) manifiesta que “se utilizó H_2O_2 y $CuSO_4$ al 70 % en concentraciones variables, donde la primera planta de detoxificación con dichos efluentes fue construida en la Mina Ok Tedi en Papua Nueva Guinea, dicha mina proceso oro y cobre”. (citado en Arévalo, 2011)

Existen dos procesos como los complejos de cianuro y el peróxido de hidrogeno para la oxidación de cianuro libre; Rupay, F. (2016). El primer proceso conocido como Proceso Kastone, fue originalmente propuesto por la Dupont, 1974 y por Mathre y Devries, 1981. Este proceso utiliza una solución de peróxido de hidrógeno al 41 % con cobre y unos pocos mg/l de formaldehido, esto es un producto químico que se utiliza

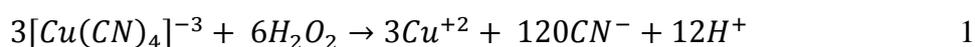
ampliamente como bactericida o conservante. Por otro lado, en su investigación utiliza el complejo de 80% de peróxido de hidrogeno y 20% sulfato de cobre; así mismo, tiene en su solución residual con una muestra promedio de CN^- a 102mg/l a un pH de 10,15. El resultado obtenido es de 1300 mg/l del complejo ($CuSO_4$ y H_2O_2), ya que reduce la concentración de cianuro libre a 0,225 mg/l a una velocidad de reacción de 160 minutos con un pH de 10,05. Por lo tanto, la reducción de CN^- llega a cero con este método y se encuentra por debajo de los límites permisibles emitidos por ministerio del ambiente (MINAM), que es de menor de 1mg/l de Cianuro y pH mayor de 5,5 y menor a 10,5. Finalmente, concluye que la aplicación del este complejo evita riesgos a la salud y al ambiente; así mismo, La reacción de oxidación es ligeramente exotérmica con el uso del complejo ($CuSO_4$ y H_2O_2).

Según Paytan (2009) para el método de destrucción del cianuro utilización la prueba de degradación de soluciones en la cual se realizan en pequeñas escalas para evaluar el comportamiento de las soluciones cianuradas frente a los diferentes parámetros operativos de operaciones, con respecto a las pruebas se tomaran 3 litros de muestra, para la operación de agitación se realizó con un balde de capacidad de 6 litros de 0 a 120 minutos con un pH de 7-8 y una velocidad de 120 rpm, en la cual esta etapa se utilizaron diferente reactivos como peróxido de hidrógeno H_2O_2 (50 %) para la oxidación del cianuro, Sulfato de Cobre $CuSO_4$ (5%) como catalizador de reacción de degradación. Los resultados experimentales obtenidos para una dosificación de 12,8 ml de sulfato de cobre y ratio experimental de 7,0 obtenemos 22,41 mg/l de cianuro total (CNT: cianuro total) en un tiempo de 90 minutos de reacción. La oxidación de esta solución alcanza en cianuro total 23,44 mg/l y 22,65/l para una ratio de 8,6 lo cual un incremento de peróxido no afectaría en la concentración de Cianuro Total. Por otro

lado, para la dosificación de 11,79 ml de $CuSO_4$, 13,20 ml $CuSO_4$ y un ratio de 7, las oxidaciones de estas soluciones alcanzan en cianuro total 35,15 y 22,19 mg/l.

Mego, E. (2016), quien en su investigación evaluó la oxidación química con peróxido de hidrógeno y osmosis inversa (tecnología de purificación de efluentes que utiliza una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas y partículas grandes) en efluentes, teniendo como objetivo evaluar la eficiencia de la remoción de cianuro y metales pesados (arsénico, cobre y mercurio). Los resultados muestran que la combinación de los dos métodos se cumple satisfactoriamente todos los parámetros exigidos por la normatividad ambiental, donde se obtiene una eficiencia de remoción de 100% en cianuro y un aproximado de 99,99% en remoción de arsénico, cobre y mercurio; así mismo, se recomienda la implementación de osmosis inversa, como método combinado.

Según Fajardo, J., Burbano, D., Burbano, E., Apraez, N., y Moreno, M. (2010) Oxidación con peróxido de hidrógeno: oxidación catalizada con Cu^{+2} , el cual se adiciona en una solución como sulfato de cobre ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) en medio alcalino, formándose un complejo con el ion cianuro (tetracianocuprato) el cual tiene mayor afinidad con el peróxido, proceso lo cual es capaz de alcanzar niveles bajo del cianuro y metales; Así mismo, es un proceso nuevo, simple, con mínimos requisitos de supervisión y bajos costos; el peróxido de hidrógeno es un compuesto no tóxico y altamente oxidante que puede romper fácilmente el compuesto de cianuro.



El segundo proceso fue desarrollado por Degussa Corporation, empleando una solución de peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre ($CuSO_4$ y H_2O_2) en varias concentraciones- El peróxido de hidrógeno en presencia de cobre oxida al cianuro libre a cianato como se ve en la ecuación:



Según Carpio (2014). menciona que los resultados obtenidos de cianuro remanente tras evaluar la variable concentración, utilizado 0.4532g $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, el valor de pH es de 9.7 y el tiempo de reacción con el experimento mediante la variable de peróxido de hidrogeno H_2O_2 tiene un porcentaje de remoción de cianuro, para el cianuro total de 20.5% y de cianuro libre de 95% con un pH de 9.0. así como también la reacción con el experimentó mediante la variable de sulfato ferroso monohidratado ($FeSO_4 \cdot H_2O$), tiene un porcentaje de remoción de cianuro, para el cianuro total 86.79% y del cianuro libre 93.42% con un pH de 4.

Los cianuros libres y simples pueden convertirse en cianato CNO^- , el cual es un producto generado durante el procesamiento de minerales, debido a la reacción entre ion cianuro libre y el ion metálico; cuando se les somete a procesos de oxidación (como ocurre con el tratamiento de efluentes (Gómez, 2012).

Según Mallma, C. & Peinado, C. (2009), menciona que la implementación de la soda caustica más conocida como hidróxido de sodio ($NaOH$), en la cual la alcalinidad en la cianuración es muy importante y funciona como regulador de pH en el procesos de lavado de proceso de recuperación del mineral, por el ello la adición de la soda caustica en contacto con el cianuro CN^- la función es que aumente el pH del agua acida para

poder evitar las posibles generación de los gases Cianhídricos, que produzcan riesgos a la salud de las personas al aumento del contacto con la solución cianurada.

Según en Saldaña, J. (2016), su investigación realizada en la planta de proceso de la Quinoa de Minera Yanacocha SRL. en el proceso se genera gas cianhídrico y los estudios realizados, en la cual la muestra queda constituida por 84 lavados ácidos, los resultados obtenidos sin la solución de neutralización en caudal (m^3/h), pH, fuerza de cianuro (ppm) de solución cianurada y generación de HCN (ppm) determinando que el caudal promedio de salida Total de Agua acida es de 189.41 (m^3/h), fuerza de cianuro es de 101.77 ppm, la generación de Gas cianhídrico tiene un promedio de 7.42 ppm en lo cual nos indica que se registran elevadas puntuaciones de generación de Gas Cianhídrico; por otro lado los resultados obtenidos con la solución de neutralización de la adición de la soda caustica o Hidróxido de Sodio (NaOH) en los procesos de lavado acido realizado a través de muestreos y pruebas de laboratorio, se realizó con una dosificación de 100 ml de solución de soda caustica, preparada al 10% , para neutralizar el agua en un rango de 7.514 a 8.987 para un m^3 de solución acida, tomada como media de antes de la adición de la neutralización de 7.4 ppm y después de la adición de 0.55 ppm; su desviación estándar en el antes 2.52 ppm y después 0.36 ppm. En esta investigación se concluye la importancia de la neutralización y su rango de Limite Max permisible de HCN ppm a exposición es de (4.7 ppm) esto ayudaría a reducir la forma altamente significativa, el gas Cianhídrico en las plantas de proceso La Quinoa. Saldaña. J también realizó una cotización de costos por kilogramo de cianuro de sodio, el cuál es de 2.37 dólares por kilogramo, para la cual el proceso de neutralización se utilizará la solución de soda caustica. Para esta prueba se utilizó una dosificación de 5 ml de solución de soda caustica a 50 ml de solución de cianuro de

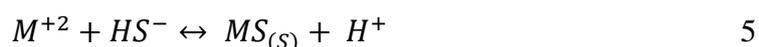
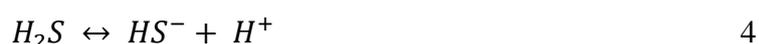
sodio es equivalente a una dosificación en Planta de 100 ml de solución caustica para 1 m³ de solución de cianuro de sodio. Para este tratamiento se cotizo por kilogramo de cianuro de sodio el precio de la soda caustica: 0.65 dólares por kilogramo, su costo de consumo de soda es de 0.0065 US \$/m³, en conclusión, estadísticamente para para un caudal promedio de agua con cianuro de sodio de 189.41 m³/hora estimándose así un costo por consumo de soda caustica por 24 días de proceso un total de 709.15 US\$

El hidrosulfuro de sodio (NaSH), su sinónimo es Sulfhidrato de sodio; también conocido como bisulfuro de sodio o mercaptano de sodio es un sólido cristalino (como la arena) de color incoloro limón de olor a huevo podrido. Se utiliza en la producción de agua pesada para los reactores nucleares, como intermediario químico y agente de palpación en la fabricación de papeles, y en la elaboración de tintes y otras sustancias químicas (Bernabel y Quispe, 2013).

Bernabel y Quispe (2013). Se plantea el problema de la detoxificación de efluentes cianurados, agente coagulante (cloruro férrico) y agente quelante (sulfhidrato de sodio) para la remoción de elementos metálicos, en la degradación oxidativa de efluente liquitos cianurados. Finalmente concluye que se logró una remoción de metales pesados agradable con un 280% de exceso estequiométrico de Hipoclorito de calcio y una dosis de Cloruro Férrico de 125ppm, además de una dosis de 30ppm de Sulfhidrato de Sodio.

Mendoza (2013). Se usa sulfhidrato de sodio (NaSH) como un agente para activas las especies alteradas en la flotación de sulfuros; así mismo, sirve para la precipitación de cobre como sulfuro y otros sulfuros para después pasar a la separación de liquido-solido de dicho metal. Sin embargo, el NaSH se fabrica a partir de hidrogeno, azufre y soda caustica o hidróxido de sodio (NaOH). Así mismo, ayuda a la precipitación de metales.

Según Molina, I. (2017.) Nos menciona que para la precipitación de metales en los tratamientos por flotación de minerales oxidados sulfurados de cobre como: calcopirita, covelina o calcosina, entre otros. El Sulfhidrato de Sodio (NaSH) se destaca por su rápida descomposición por oxidación y su sensibilidad frente a la variación de pH y potencial de óxido-reducción, ya que se demostró que puede mejorar la recuperación metalúrgica entre 2 – 4% dependiendo de la presencia y tipo de iones en la suspensión, quiere decir el un ion sulfhidrato (HS^-) en soluciones acuosas puede generar la precipitación de metales. El equilibrio termodinámico dice que la precipitación de sulfuros metálicos puede ser expresado como.



En los estudios realizados por Cusma, G. (2015), nos menciona que en el sistema de proceso SART (Sulfuración, Acidificación, Recirculación, Espesamiento) se acidifica la solución a un pH entre 4 – 4.5, para luego incorporar el sulfhidrato de sodio (NaSH), que produce la precipitación de cobre como sulfuro y de otros sulfuros metálicos, los cristales con (NaSH) con una pureza de 70% el peso real será de 2.5 gr y se diluirá en 200 ml de solución de (NaOH) de mol/L de concentración asegura una concentración de 1000 ppm de sulfuro. Los resultados obtenidos para la eficiencia de la precipitación

de cobre en relación con la cantidad de exceso ion sulfuro en el sistema, la más baja eficiencia (64%) corresponde al mes de mayo, mes que no operaba el equipo de medición, y por ello no se tiene lectura de exceso, lo cual para un sobre exceso no es beneficioso para el proceso, determinándose las mejores eficiencias, 75%, para un exceso entre 0.3 y 1.83 ppm respectivamente.

Gonzales (2008), menciona que con relación del floculante natural pueden ser orgánicos e inorgánicos, en lo cual los floculantes orgánicos pueden ser: naturales (polisacáridos) y sintéticos (polímeros) que tienen grupo activos distribuidos a lo largo de su cadena, además. Los floculantes orgánicos sintéticos, son muy utilizados en la industria química moderna; son eficaces a bajas concentraciones y pueden encontrarse como un producto no iónico o como floculantes catiónicos y aniónicos de diversos pesos.

Según Gonzales (2005), menciona que el floculante es una sustancia química que, al adicionarse a la solución, provoca la unión de las partículas pequeñas a fin de incrementar su tamaño y favorecer su remoción del agua por simple sedimentación. Ayuda a obtener un agua tratada sin contenido de solido en suspensión. El floculante Superfloc A – 110 es un reactivo que tiene granulado. Es de color blanco y tiene un aspecto parecido al azúcar.

Según López, J., & Martines, R. (2014) recopila que el floculante Superfloc A-110 HMW son floculantes aniónicos altamente efectivos de alto peso molecular. Funcionan como un catalizador de la reacción de sedimentación acondicionando con

eficacia los sólidos para las operaciones de deshidratación y ayuda en los procesos de clarificación de agua una amplia variedad de industrias.

En unas pruebas de investigación realizada en la concentración del floculante Superfloc A-110 en el proceso de separación liquido solido según Wildber, C. (2013) concluyo que se realizaron pruebas del floculante en jarras en la cual se determinó las velocidades de sedimentación para el Superfloc A110, definió que la dosificación g/Tn es de 18, la velocidad (m/h) 21.02 clarificación es de 3, compactación underflow 3, resistencia de los flóculos de 3. En la cual se obtuvieron los mejores resultados en las pruebas realizadas.

En cuanto al coagulante, es un reactivo de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen en las fuerzas que los mantiene separados adicionalmente. La coagulación esta fundamentalmente en función de las características del agua y de las partículas presentes, las mismas que definen el valor de los parámetros conocidos como pH, alcalinidad, color verdadero, turbidez, temperatura, movilidad electroforética, fuerza iónica, solidos totales disueltos, tamaño y distribución de tamaño de las partículas coloidales y suspensión. Por otro lado, la remoción de los metales estudiados, uno de los procesos de coagulación con sulfato ferroso, también se realiza el análisis del proceso de coagulación que tiene una mayor eficacia en la remoción de los metales aplicando graficas de intersección, cubos, contornos y superficie.

Por otro lado, Clemente (2014), afirma que los análisis realizados por medio del Minitab, teniendo en respuesta a la mayor remoción de los metales, primero el punto para las mejores condiciones para el tratamiento de remoción de iones metálicos, Pb^{+2}

, Cu^{+2} , Zn^{+2} , Fe^{+3} con dosificación = 4 mL; Velocidad Agitación = 10 rpm; tiempo de agitación = 6 minutos. Segundo, las respuestas de menor tiempo critico de sedimentación, se logró encontrar a los puntos de mejor condición para el tratamiento de agua de mina: Dosificación 4 ml; la velocidad de agitación es 10 rpm, el tiempo de agitación es 6 minutos. Como resumen se entiende que, para el proceso de remoción de metales óptimos, a un tiempo critico de sedimentación menor.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo se realiza el tratamiento para la remoción de cianuro de sodio y cobre de los efluentes de lixiviación en empresas mineras productoras de oro y plata?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la remoción de cianuro de sodio y cobre con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre ($CuSO_4$), sulfhidrato de sodio (NaSH) de los efluentes de lixiviación en empresas mineras productoras de oro y plata.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar químicamente el efluente de lixiviación.
- Determinar el consumo y ratios de reactivos peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre ($CuSO_4$), sulfhidrato de sodio (NaSH) e hidróxido de sodio ($NaOH$); coagulante y floculante, para la remoción de cianuro de sodio y cobre de los efluentes de lixiviación.
- Determinar la eficiencia de la remoción de cianuro y cobre de los efluentes de lixiviación, para conocer porcentaje del tratamiento del proceso.
- Determinar el costo de tratamiento para la remoción de cianuro de sodio de los efluentes de lixiviación.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

La implementación para la remoción de cianuro de sodio y cobre de los efluentes de lixiviación en empresas mineras productoras de oro y plata, reducirá de forma significativa, con la aplicación de reactivos de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre ($CuSO_4$), sulfhidrato de sodio (NaSH).

1.4.2. Hipótesis específicas

- La caracterización química de los efluentes de lixiviación; es apropiado para la remoción de cianuro y cobre de los efluentes de lixiviación
- El consumo y los ratios de reactivos de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre ($CuSO_4$), sulfhidrato de sodio (NaSH) e hidróxido de sodio ($NaOH$); coagulante y floculante es adecuada para remover el cianuro de sodio y cobre de los efluentes de lixiviación.
- La eficiencia de remoción de cianuro sodio y cobre de los efluentes de lixiviación, permitirá evaluar el tratamiento propuesto y conocer el porcentaje de eficiencia del proceso.
- Al evaluar el costo del tratamiento de la concentración óptima, se logrará precisar la eficacia del tratamiento.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

Se presenta nuestra investigación del tipo Aplicada, porque de acuerdo a Vargas (2008), este tipo de investigación es una forma de conocer las realidades con una prueba científica; requiere obligatoriamente de un marco teórico, sobre el cual se basará para generar una solución al problema específico que se quiera resolver.

Zoila Rosa Vargas Cordero (2008), docente de la maestría en Orientación de la Universidad de Costa Rica, el tipo de investigación aplicada se centra en el análisis y solución de problemas de varias índoles de la vida real, así como también se nutre de avances científicos y se caracteriza por su interés en la aplicación de los conocimientos.

También es del tipo Experimental, con diseño Cuasi experimental porque según señala Palella y Martins (2010): el diseño experimental es aquel según el cual el investigador manipula una variable experimental no comprobada, bajo condiciones estrictamente controladas. Su objetivo es describir de qué modo y porque causa se produce o puede producirse un fenómeno. Asimismo, es con diseño Cuasi experimental porque se enfoca en resolver el problema del efluente cianurado sin tratar (antes) versus los resultados del efluente tratado (después).

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

➤ Población(N)

En la población, es el caudal de los efluentes cianurados durante los meses de lluvia del año 2018.

➤ Muestra(n)

Es el caudal de 1 m³/hora de efluente cianurado que es tratado durante 8 días del mes de abril del año 2018.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1. Recolección de datos

En la observación in-situ del efluente de lixiviación se puede percibir por medio del olfato, el olor a almendras, característica de la evaporación de ácido cianhídrico en la poza de mayores eventos. Los instrumentos de recolección de datos son los siguientes:

Tabla 1

Ficha de observación

Día	Sentido de olfato	
	Olor a almendra	Normal
14 abril	SI	NO
15 abril	SI	NO
16 abril	SI	NO
17 abril	SI	NO
18 abril	SI	NO
19 abril	SI	NO
20 abril	SI	NO

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2

Ficha de caracterización química

POZA DE MAYORES EVENTOS

Fecha	pH	Au (ppm)	Ag (ppm)	Cu (ppm)	NaCN (ppm)
14 de abril					
15 de abril					
16 de abril					
17 de abril					
18 de abril					
19 de abril					
20 de abril					
21 de abril					

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 2, muestra instrumento consistente en la ficha de caracterización química, para la recolección de datos de efluente en la poza de mayores eventos, los días de monitoreo van desde el 14 de abril al 21 de abril.

Tabla 3

Análisis de la caracterización de la recolección de datos de los consumos de reactivos

CONSUMO DE REACTIVOS									
Fecha	NaCN (ppm)	Operación (h)	FCN	H2O2	CuSO4	Consumo Real (Kg)			
						NaOH	NaSH	Coag. CT-3160	Floc. CT-3160
14 de abril									
15 de abril									
16 de abril									
17 de abril									
18 de abril									
19 de abril									
20 de abril									
21 de abril									
TOTAL DE REACTIVO CONSUMIDO									

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Análisis de datos

Los datos obtenidos se tabularon utilizando la herramienta del Excel, y para una mejora interpretación se realizó gráficos estadísticos.

Para la elaboración de Flow sheet de la planta de tratamiento se utilizó el AutoCAD, en el cual nos dará a conocer en el ámbito real de cómo se genera la circulación de las aguas en planta (visualización real).

Para el análisis y resumen de datos cuantitativos, se utilizaron medidas de Tendencia Central y Variabilidad; tales como el promedio aritmético, Desviación Estándar, Coeficiente de Variación, que fueron calculadas con el Excel.

El coeficiente de variación (CV) o coeficiente de variación de Spearman es una medida aplicada en la ciencia de las estadísticas, que relaciona la desviación estándar y la media aritmética de un conjunto de datos definiendo la dispersión relativa de la muestra en estudio, es decir este indicador permite comparar la variabilidad de un conjunto de datos. Así por ejemplo CV menores al 5% indican por lo general gran homogeneidad, CV menor del 20% corresponden por lo general a una homogeneidad moderada, mientras que CV mayores al 20% indican gran heterogeneidad (Rustom, 2012).

Nivel de aceptación: $C.V. \leq 5\%$

CV es igual a la desviación estándar *100/ media aritmética.

2.4. Procedimiento

El método que vamos a utilizar es experimental, el cual nos va a medir la relación CAUSA – EFECTO a la acción de la variable que vamos a utilizar en el desarrollo de la investigación. El procedimiento consiste en aplicar dosificaciones de reactivos químicos industriales, a un caudal de efluente cianurado, que contiene metales pesados y alta concentración de cianuro de sodio.

Estos reactivos químicos actúan sobre el efluente logrando precipitar los metales pesados y destruir el cianuro de sodio, hasta alcanzar los Límites Máximos Permisibles (LMP) acorde a la Legislación Peruana.

Se ha muestreado periódicamente el efluente tratado y se analizó la muestra líquida por lo siguiente: pH, Cianuro de sodio, oro, plata y cobre inicial.

Los resultados del análisis químico sirvieron para procesar los datos y evaluar los objetivos de la investigación.

Las pruebas realizadas para la remoción de cianuro de sodio y cobre con peróxido de hidrogeno, sulfato de cobre, se realizaron con un sistema en el cual consta de tres partes:

- Tratamiento en los tanques de reacción y resistencia.
- Flow sheet
- Recolección de datos

2.4.1. Pre-tratamiento: dosificación de químicos y prueba de destrucción de cianuro

- Se instaló la estación de dosificación de reactivos químicos, la cual forma parte del pre-tratamiento de la solución de los efluentes.
- Para el acondicionamiento de la solución de los efluentes, se añadió reactivo de acuerdo al consumo de los reactivos químicos que se incluyeron a dicho efluente.

La inyección de los químicos que va a ingresar es de acuerdo a los tanques de residencia y reacción de manera que permita la remoción y/o destrucción del cianuro de sodio. Cada reactivo químico, tiene un objetivo específico, a una concentración determinada, lo cual se detallará a continuación.

- ✓ Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) – Concentración = (59%).
- ✓ Sulfato de cobre ($CuSO_4$), – Concentración = (5%).
- ✓ Hidróxido de sodio ($NaOH$) – Concentración = (99%).
- ✓ Sulfhidrato de sodio ($NaSH$) – Concentración = 70%
- ✓ Coagulante CT – 3160
- ✓ Floculante CT – 3160

“Remoción de cianuro de sodio y cobre con peróxido de hidrogeno y sulfato de cobre de los efluentes de lixiviación en empresas mineras productoras de oro y plata.”

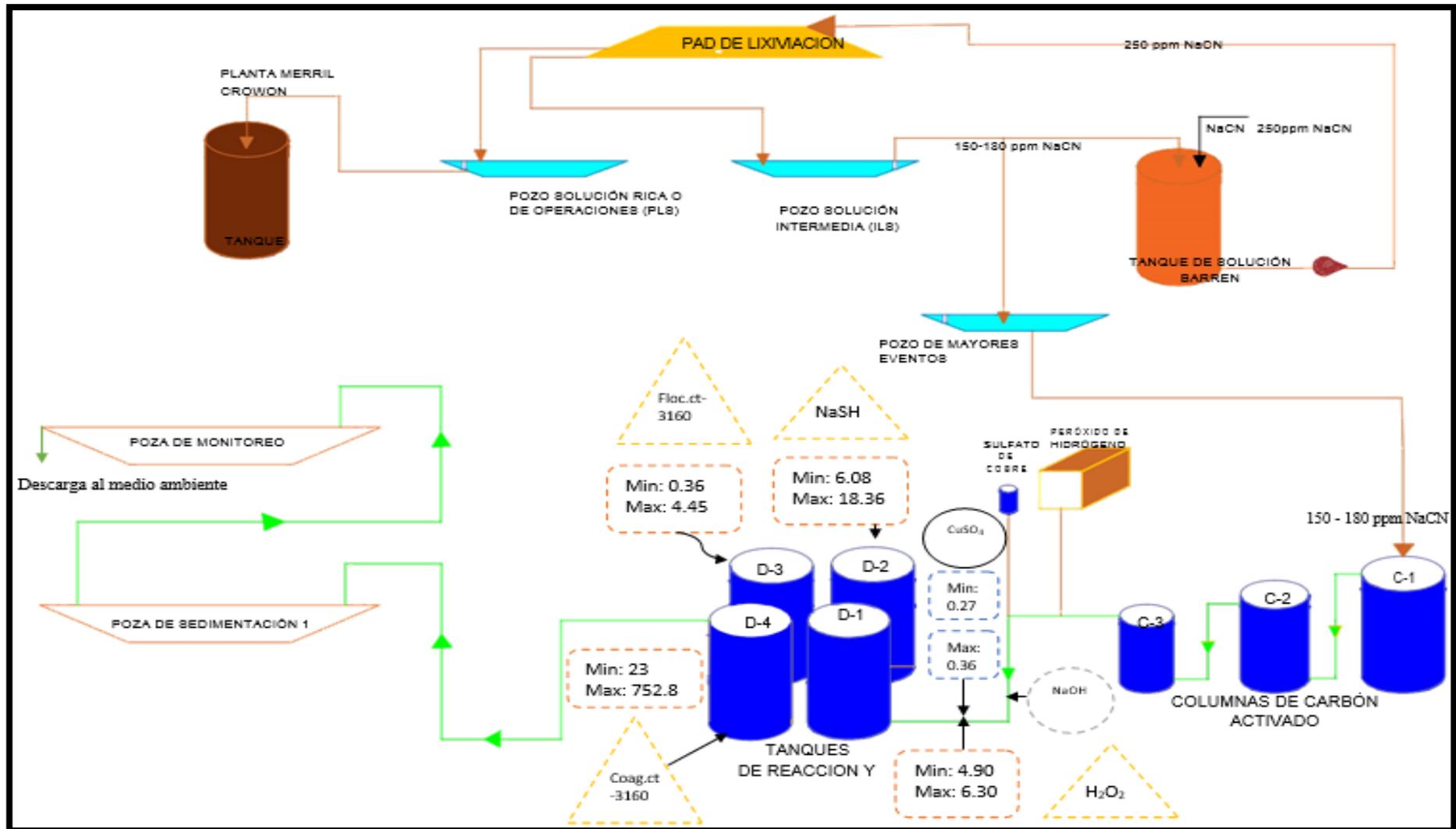


Figura 1. Flow sheet. Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Recolección de datos.

Se realizó la recolección de la información de los reportes de planta, de los flujos que circulan

en cada tanque de reacción y resistencia en el campo operativo. Estos reportes detallaron el tratamiento diario de la planta en un turno, en la cual la información consiste de Flujo, pH, Au (ppm), Ag (ppm), Cu (ppm) NaCN (ppm).

El siguiente punto es la recopilación de los reportes diarios que nos brindan los análisis de laboratorio para poder tabularlos en el Microsoft Excel.

Así como también los consumos reales de cada reactivo que se va a utilizar para la remoción del cianuro de sodio y cobre para considerar un volumen promedio de tratamiento del efluente.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de datos alcanzados en nuestra investigación. Estos resultados muestran la mejora para evaluar la remoción de cianuro de sodio y cobre de los efluentes de lixiviación con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre ($CuSO_4$), Sulfhidrato de sodio (NaSH) e Hidróxido de sodio (NaOH); coagulantes y floculantes.

Mediante la experimentación planteada en este estudio logró la remoción de cianuro y cobre, a través de la dosificación de reactivos. En la tabla 4, se puede apreciar la caracterización química del efluente de lixiviación.

Tabla 4

Caracterización química del efluente de lixiviación

POZA DE MAYORES EVENTOS					
Fecha	pH	Au (ppm)	Ag (ppm)	Cu (ppm)	NaCN (ppm)
14 de abril	10,33	0,010	0,010	7,48	150,00
15 de abril	10,35	0,011	0,010	7,47	150,00
16 de abril	10,35	0,011	0,010	7,74	150,00
17 de abril	10,32	0,010	0,010	7,74	160,00
18 de abril	10,41	0,011	0,010	6,85	180,00
19 de abril	10,26	0,015	0,010	7,11	150,00
20 de abril	10,34	0,012	0,010	6,81	140,00
21 de abril	10,40	0,012	0,010	6,82	170,00

Fuente: Datos de prueba en Planta

Si bien la Tabla 4 se puede apreciar las cantidades heterogéneas concorde a la caracterización química con respecto a los ocho días de monitoreo, en este sentido, observamos una variación de los datos de Cu y NaCN en los días de monitoreo. En la siguiente tabla 5, se observa un análisis estadístico de los resultados de la caracterización química.

Tabla 5

Análisis estadístico de la caracterización química del efluente

MEDIDAS NUMÉRICAS					
	pH	Au (ppm)	Ag (ppm)	Cu (ppm)	NaCN (ppm)
Promedio	10,35	0,01	0,01	7,25	156,25
Desv. Estándar	0,05	0,00	0,00	0,40	13,02
Coef. Variación	0,45	13,94	0,00	5,56	8,34

Fuente: Elaboración propia

Analizando las características típicas del conjunto de datos por grupos Tabla 5, los resultados muestran que los valores en cuanto a la medida de tendencia central el promedio del pH, cobre (ppm) y cianuro de sodio es 10.35, 7.25 y 156.25 respectivamente, que los caracteriza en una serie de datos cuantitativos; así mismo, en las medidas de dispersión el coeficiente de variación muestra que los datos se comportan con ligera variabilidad (Se acepta datos homogéneos con un $CV \leq 5 \%$).

Si bien los resultados anteriores se basan en la caracterización química de los efluentes, donde se desprenden ciertas tendencias y características similares. No obstante, también consideramos adecuado emplear algunos análisis estadísticos para fortalecer si los datos han ejercido ciertamente alguna influencia en la caracterización.

Tabla 6

Resumen de los consumos de reactivos químicos

CONSUMO DE REACTIVOS										
Fecha	NaCN (ppm)	Operación (h)	Factor molecular	FCN	Consumo Real (Kg)					
					H2O2	CuSO4	NaOH	NaSH	Coag. CT-3160	Floc. CT-3160
14 de abril	150,00	4,50		79,59	354,50	20,00	18,00	36,00	70,00	0,36
15 de abril	150,00	4,00		79,59	315,00	17,00	15,00	36,30	70,00	0,36
16 de abril	150,00	9,50		79,59	748,00	41,00	22,00	95,75	90,50	0,36
17 de abril	160,00	11,50		84,90	1031,00	59,00	50,00	75,00	116,00	0,36
18 de abril	180,00	6,00	0,53	95,51	680,50	39,00	25,00	25,00	23,20	0,50
19 de abril	150,00	15,00		79,59	945,00	50,00	48,50	97,00	76,32	0,72
20 de abril	140,00	5,00		74,29	274,50	15,00	18,00	50,00	132,24	0,36
21 de abril	170,00	20,00		90,20	2022,00	117,00	30,50	100,00	174,56	1,44
Promedio	156,25				796,31	44,75	28,38	64,38	94,10	0,56
TOTAL DE REACTIVO CONSUMIDO					6370,50	358,00	227,00	515,05	752,82	4,46

Fuente: Resultados de prueba de Planta

El consumo de cada reactivo químico por kilogramo presentado en la Tabla 6, donde el peróxido de hidrogeno es el principal insumo que entra en contacto con el efluente que contiene cianuro de sodio, debido a que es un potente oxidante; el sulfato de cobre juega un papel muy importante ya que, con cantidades menores en un promedio de 44,75 kg remueve 156,24 mg/L de cianuro de sodio. Con respecto al hidróxido de sodio (NaOH), este reactivo se utilizó para controlar el pH para que se mantenga en 10.35, donde también reforzó al sulfhidrato de sodio para precipitar el cobre caracterizado en la Tabla 4; sin embargo, a mayores horas de operación mayor volumen a tratar. Por otro lado, la función de coagulante y floculante fue de precipitar las partículas de metales suspendidas, después de que los otros reactivos hayan reaccionado.

Tabla 7

Mediciones estadísticas de los consumos de reactivos químicos

MEDICIONES ESTADISTICAS DE LOS CONSUMOS DE REACTIVOS						
Ítem/descripción	H ₂ O ₂	CuSO ₄	NaOH	NaSH	Coag. CT-3160	Floc. CT-3160
Valor mínimo	274,50	15,00	15,00	25,00	23,20	0,36
Valor Máximo	2022,00	117,00	50,00	100,00	174,56	1,44
Promedio	796,31	44,75	28,38	64,38	94,10	0,56
Desv Estándar	572,51	33,31	13,75	31,12	46,18	0,38
Coef Variación	71,90	74,43	48,46	48,34	49,07	67,92

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7, se puede observar que los consumos de los reactivos químicos son muy variables, en cuanto a los resultados del peróxido de hidrogeno muestra un valor mínimo de 274,50 kg y un valor máximo de 2022,00 kg lo cual es muy variable, esto se confirma con el coeficiente de variación que es de 71,90; con respecto al sulfato de cobre, muestra un valor mínimo de 15 kg y un valor máximo de 117 kg, donde el resultado es muy variable, con un coeficiente de variación de 74,43; en cuanto al hidróxido de sodio muestra un valor mínimo de 15 kg y un valor máximo de 50 kg con un coeficiente de variación de 48,46; así mismo, el sulfhidrato de sodio muestra un valor mínimo de 25 kg y un valor máximo de 100 kg, donde es muy variable ya que también se confirma con un coeficiente de variación de 48,34.

Tabla 8

Ratios de reactivos químicos empleados en la remoción de cianuro de sodio y cobre.

RATIOS DE LOS REACTIVO QUÍMICOS									
Fecha	NaCN (ppm)	Operación (h)	V. tratado prom. (m ³ /h)	V. tratado (m ³)	Cianuro tratado (kg)	Cianuro tratado (gr)	Ratio kg.H ₂ O ₂ /kg. NaCN	Ratio kg.CuSO ₄ /kg. NaCN	Ratio kg.NaSH/kg. Cu
14 de abril	150,00	4,50	100,00	450	35,82	35816,33	5,25	0,30	10,70
15 de abril	150,00	4,00	100,00	400	31,84	31836,73	5,25	0,28	12,15
16 de abril	150,00	9,50	100,00	950	75,61	75612,24	5,25	0,29	13,02
17 de abril	160,00	11,50	100,00	1150	97,63	97632,65	5,60	0,32	8,43
18 de abril	180,00	6,00	100,00	600	57,31	57306,12	6,30	0,36	6,08
19 de abril	150,00	15,00	80,00	1200	95,51	95510,20	5,25	0,28	11,37
20 de abril	140,00	5,00	80,00	400	29,71	29714,29	4,90	0,27	18,36
21 de abril	170,00	20,00	100,00	2000	180,41	180408,16	5,95	0,34	7,33
PROMEDIO	156,25			893,75	75,48	75479,59	5,47	0,30	10,93
TOTAL DE CAUDAL TRATADO (m ³)				7150					

Fuente: Elaboración propia

Después de observar el consumo significativo de los reactivos químicos, pretendemos profundizar con los cálculos donde se puede apreciar de forma general, el uso de las ecuaciones descritas en el anexo N°1 de los ratios obtenidos en la Tabla 8, manifiesta el consumo del reactivo químico en kg por 1 kg de cianuro de sodio (NaCN) y posteriormente del cobre. Sin embargo, el volumen tratado (m^3) representa el caudal (m^3/h) por las horas de operación (h). A continuación, se muestra con más detalle mediante gráficos estadísticos, la concentración de los reactivos químicos empleados en remoción de cianuro de sodio y cobre.

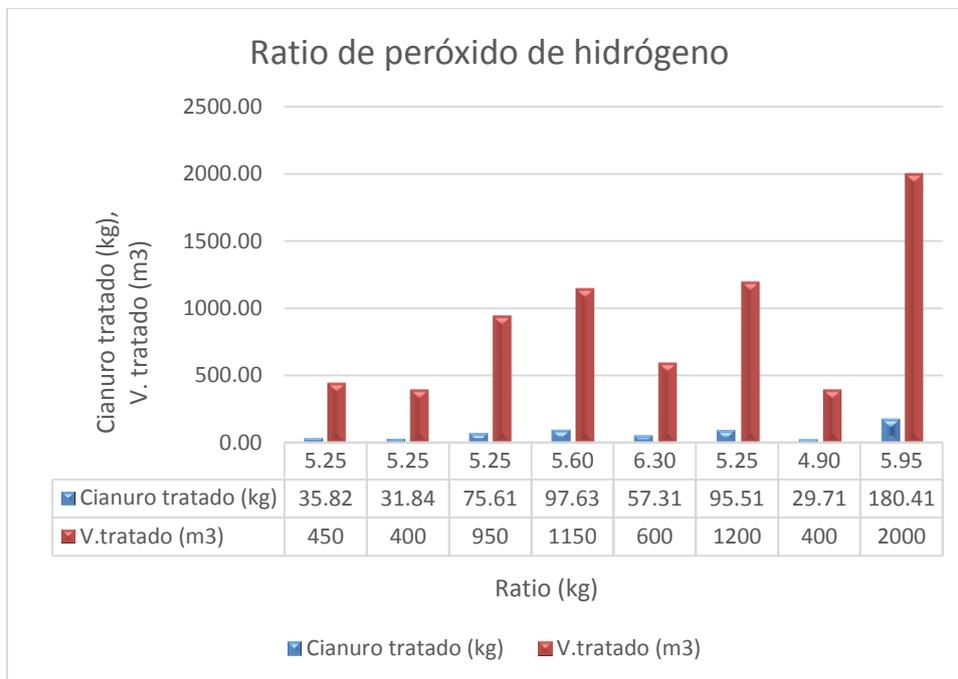


Figura 2. Ratio kg. H_2O_2 /kg. NaCN.

Fuente. Elaboración propia

Esta figura 2, presenta el ratio peróxido de hidrógeno (H_2O_2)/cianuro de sodio (NaCN), donde el 14 de abril, se trató $450 m^3$ de efluente con un ratio de 5,25 kg por 1kg de cianuro de sodio (NaCN). Después el día 21 de abril se trató el volumen mayor de $2000 m^3$ de efluente con un ratio de 5,95 kg, donde se realizó la remoción de $180,41 kg$ de CN^- .

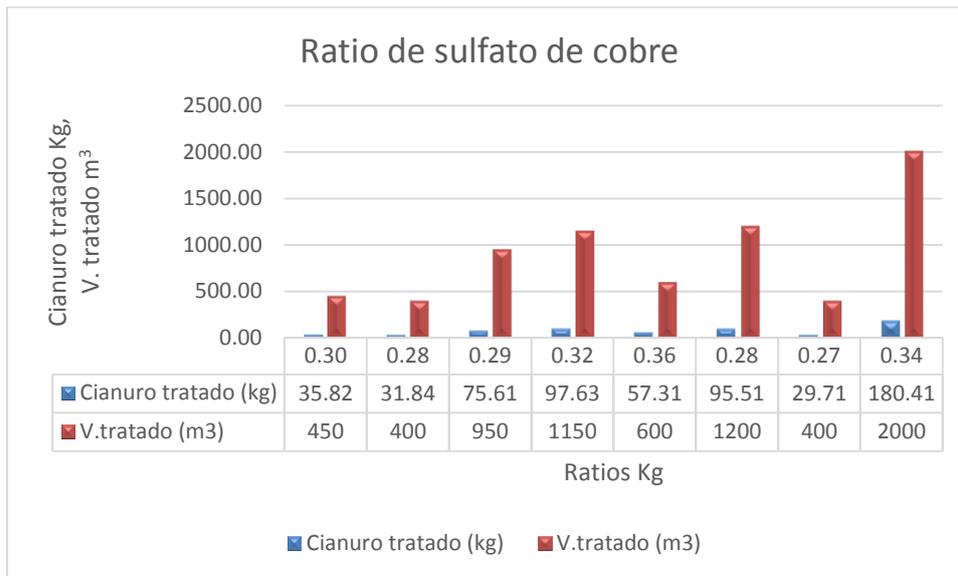


Figura 3. Ratio kg. CuSO_4 /kg. NaCN.

Fuente. Elaboración propia

Esta figura 3, representa el ratio de sulfato de cobre (CuSO_4)/cianuro de sodio (NaCN), donde se observa que los ratios son muy bajos, debido a que el sulfato de cobre aumenta la velocidad de destrucción de cianuro en pocas cantidades. El 19 de abril se trató un volumen de 1200 m^3 de efluente con un ratio de 0,28 kg, es decir se logró la remoción de 95,51 kg de CN^- . Después, el 21 de abril se trató 2000 m^3 de efluente con ratio de 0,34 kg, donde se logró la remoción de 180,41 kg CN^- el alza se debe a que en ese día la planta tuvo una operación de 20 horas.

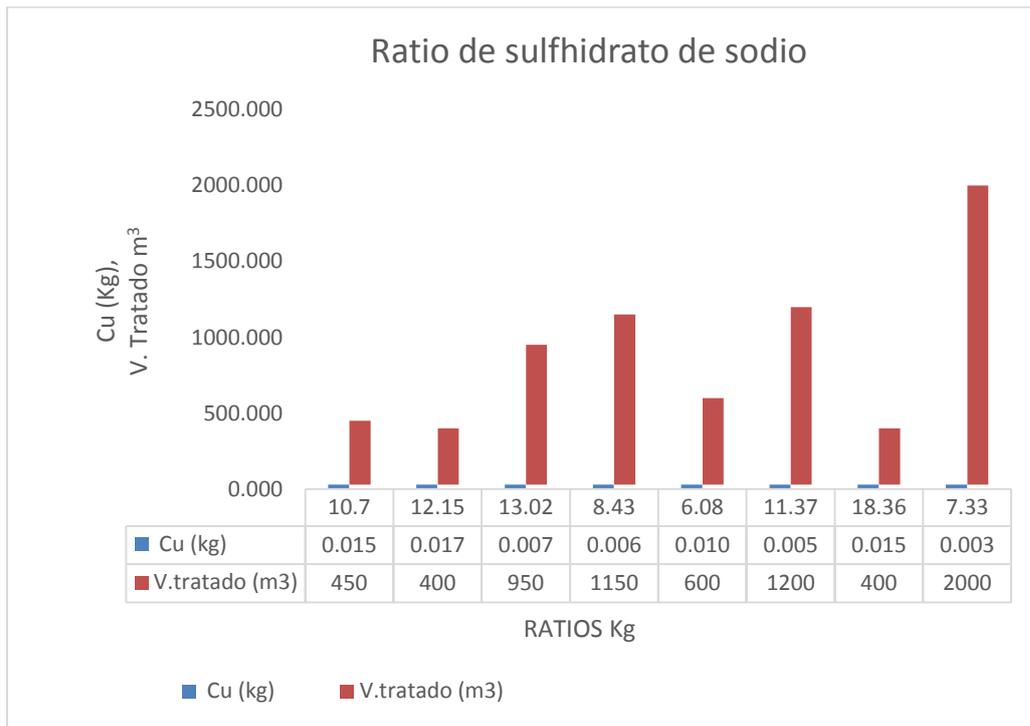


Figura 4. Ratio kg.NaSH/kg.Cu.

Fuente. Elaboración propia

El ratio con respecto al sulfhidrato de sodio (NaSH) mostrado en la Figura 4, en que hace mención a un kilogramo de Sulfhidrato de sodio (NaSH)/kilogramo de cobre (Cu), donde el 15 de abril se trató un volumen de 400 m^3 de efluente con un ratio de 12,15 kg de NaSH, ya que el consumo real por kilogramo en ese mismo día fue de 36,30 kg de NaSH; así mismo, se logró la remoción de 0.017 Kg de cobre. Días después, el 17 de abril se trató un volumen de 1150 m^3 de efluente con un ratio de 8,43 kg, el consumo real por kilogramo fue de 75,00 kg de NaSH donde se muestra en la Tabla 6, logrando una remoción 0.006 Kg de cobre.

Tabla 9

Ratio de los reactivos químicos en kg/m³

Fecha	NaCN (ppm)	V.tratado (m3)	Ratio Kg/m3					
			H ₂ O ₂	CuSO ₄	NaOH	NaSH	Coag. CT- 3160	Floc. CT-3160
14 de abril	150,00	450	0,788	0,044	0,040	0,080	0,156	0,00080
15 de abril	150,00	400	0,788	0,043	0,038	0,091	0,175	0,00090
16 de abril	150,00	950	0,787	0,043	0,023	0,101	0,095	0,00038
17 de abril	160,00	1150	0,897	0,051	0,043	0,065	0,101	0,00031
18 de abril	180,00	600	1,134	0,065	0,042	0,042	0,039	0,00083
19 de abril	150,00	1200	0,788	0,042	0,040	0,081	0,064	0,00060
20 de abril	140,00	400	0,686	0,038	0,045	0,125	0,331	0,00090
21 de abril	170,00	2000	1,011	0,059	0,015	0,050	0,087	0,00072
	Promedio		0,860	0,048	0,036	0,079	0,131	0,0007

Fuente: Elaboración propia.

Los ratios de los reactivos químicos mostrados en la Tabla 9, donde hace mención a los reactivos químicos de un kilogramo por un metro cubico de efluente. El 14 de abril se necesitó 0,788 kg de peróxido de hidrogeno (H_2O_2), 0,044 kg de $CuSO_4$, 0,04 kg de NaOH, 0,08 kg de NaSH, 0,156 kg de coagulante, 0,0008 kg de floculante, para tratar un m^3 de efluente, donde en ese día se trató un volumen total de $450 m^3$.

En la tabla 10, se muestra el resultado del efluente después que se añadió los reactivos químicos, lo cual reaccionó a una velocidad de 48 horas.

Tabla 10

Resultados del efluente tratado comparado con los LMP

TANQUE (D4)					
75,50 horas de tratamiento					
	Entrada			Salida	
Fecha	NaCN (ppm)	Cu (ppm)	Cianuro libre (ppm)	Cu (ppm)	pH
14 de abril	150,00	7,48	<0,01	0,75	9,62
15 de abril	150,00	7,47	<0,01	0,75	9,73
16 de abril	150,00	7,74	<0,01	0,78	9,71
17 de abril	160,00	7,74	<0,01	0,78	9,90
18 de abril	180,00	6,85	<0,01	0,69	9,52
19 de abril	150,00	7,11	<0,01	0,71	9,78
20 de abril	140,00	6,81	<0,01	0,68	9,45
21 de abril	170,00	6,82	<0,01	0,68	9,48
LMP			1	0,5	6-9

Fuente: Resultados de planta

En lo referente a los resultados mostrados en la Tabla 10 muestra el resultado final de la remoción de cianuro de sodio y cobre, después de 75,50 horas de tratamiento del efluente con reactivos químicos, cabe mencionar que el resultado obtenido del tratamiento fue óptimo mostrando consecuencias positivas, ya que el cianuro libre (ppm) se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles ambientales en el Perú, mostrado en la Tabla 14 que es <1 ppm . Por otro lado, la remoción de cobre se tuvo una aproximación a los LPM, debido al proceso propuesto. El cobre bajara de 0.75 mg/L hasta valores más bajos de los LMP a lo largo del trayecto de almacenamiento de la primera poza de sedimentación y tu traslado a la

segunda de poza de monitorio, correctamente mostrado en la figura 1 Flow sheet, de igual manera sucede con el potencial de hidrógeno (pH) que baja desde 9,78 hasta 9. Posteriormente el agua tratada se descarga en la última poza de monitoreo al medio ambiente. En la tabla 11 se detalla la eficiencia en porcentaje de la remoción de cianuro de sodio y cobre.

Tabla 11

Eficiencia de remoción de cianuro de sodio y cobre

EFICIENCIA DE CIANURO DE SODIO Y COBRE						
Fecha	NaCN (ppm)	Cu (ppm)	Cianuro libre (ppm)	Cu (ppm)	Eficiencia NaCN (%)	Eficiencia Cu (%)
14 de abril	150	7,48	0,01	0,75	99,99	89,97
15 de abril	150	7,47	0,01	0,75	99,99	89,97
16 de abril	150	7,74	0,01	0,78	99,99	89,97
17 de abril	160	7,74	0,01	0,78	99,99	89,97
18 de abril	180	6,85	0,01	0,69	99,99	89,97
19 de abril	150	7,11	0,01	0,71	99,99	89,97
20 de abril	140	6,81	0,01	0,68	99,99	89,97
21 de abril	170	6,82	0,01	0,68	99,99	89,97

Fuente: Elaboración propia

Los datos de la eficiencia mostrados en la Tabla 11, son resultados que muestran al cianuro libre con una eficacia del 99,99%, donde sugieren una tendencia alta. De igual forma, el grupo de cianuro libre tampoco tiene ningún resultado que obtenga un valor menor al 99,99%. Por otra parte, la eficiencia de cobre muestra una eficiencia de 89,97%, donde la tendencia va hacia una valoración media-alta del grupo de cobre. No obstante, se mostrará graficas en función al resultado de la eficiencia de cianuro libre y cobre.

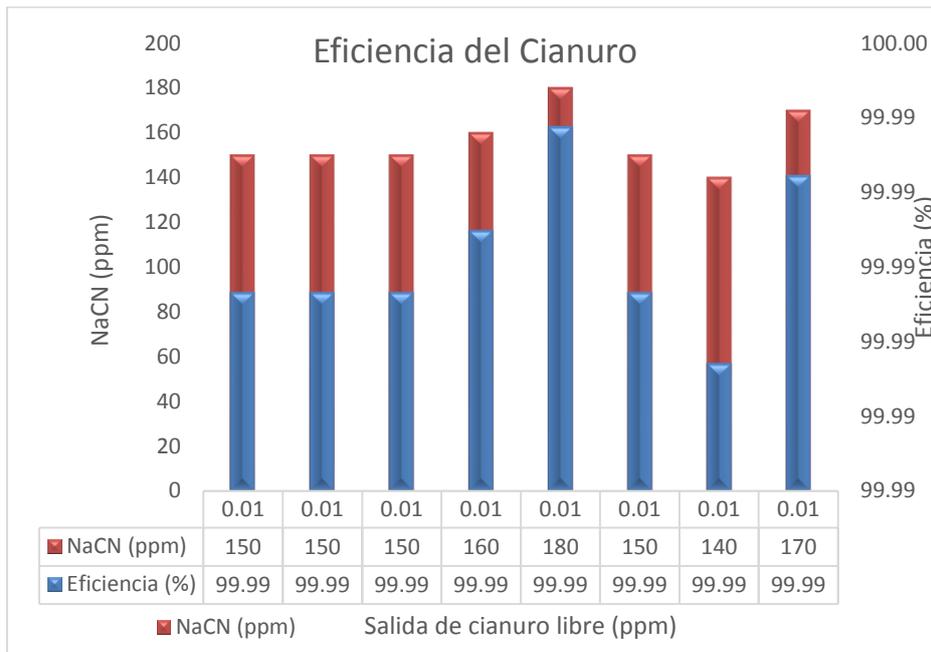
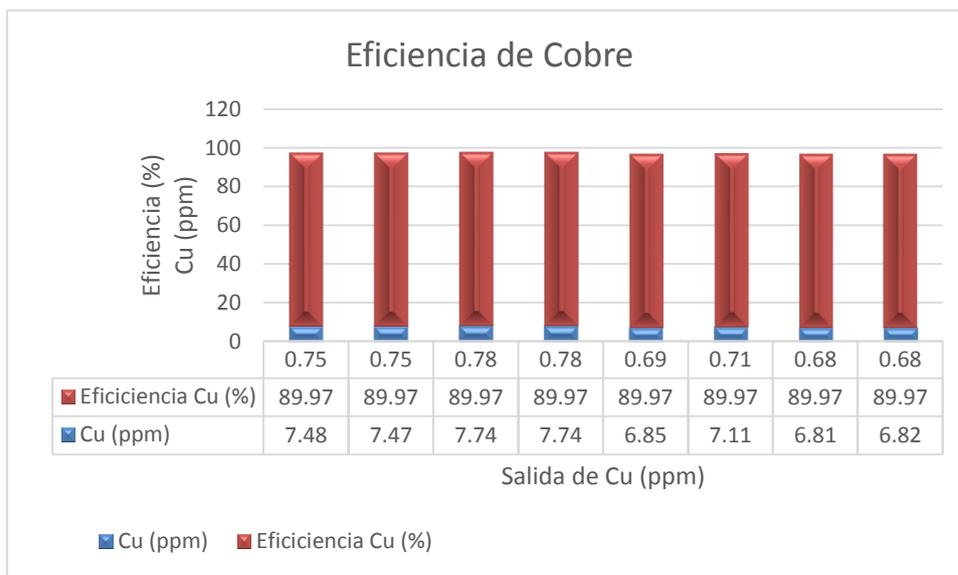


Figura 5. Eficiencia de remoción de cianuro libre

Fuente. Elaboración propia

Como puede verse, la eficiencia de cianuro libre muestra una tendencia clara en los ocho días de tratamiento, mostrando resultados constantes con los diferentes concentraciones de entrada de cabeza.

Figura 6. Eficiencia de remoción de cobre cianuro libre.



Fuente. Elaboración propia

La precipitación de cobre como sulfuro gracias al sulfhidrato de sodio (NaSH), ha generado una eficiencia de remoción en todo el proceso mostrado en la Figura 6, la eficacia de remoción el día 16 y 17 de abril asumiendo una entrada de 7,74 mg/L de Cu generando los dos días una salida promedio de 0,78 mg/L de Cu, la eficiencia es notable teniendo un promedio de 89,97% de remoción de cobre.

De nuevo, los resultados de la remoción de cianuro y cobre muestran tendencias claras y características particulares. No obstante, también consideramos apropiado aplicar algunos cálculos para confirmar aún más la eficacia de la remoción de cianuro de sodio y cobre. Para nuestro propósito hemos considerado realizar el costo de 1 m³ de efluente que es muy relevante, ya que nos ha permitido hallar con más profundidad la eficacia del tratamiento.

Tabla 12

Costo de la remoción de cianuro de sodio y cobre

COSTO DEL TRATAMIENTO					
Ítem- Descripción	Unidad	Total de reactivo consumido	Costo por unidad (USD \$/kg)	Costo total del reactivo (USD \$/kg)	Costo Unitario (USD \$/ m3)
Total de caudal tratado	7150,00 m ³				
Consumo de H ₂ O ₂	kg	6370,50	0,63	4013,42	0.56
Consumo de CuSO ₄	kg	358,00	2,20	787,60	0.11
Consumo de NaOH	kg	227,00	0,87	197,49	0.03
Consumo de NaSH	kg	515,05	0,74	381,14	0.053
Consumo de Coag. CT-3160	kg	752,82	1,50	1129,23	0.16
Consumo de Floc. CT. 3560	kg	4,46	4,50	20,07	0.003
Costo total	(USD \$/kg)			6528,94	
Costo total del caudal tratado	(USD \$/m3)			0,91	0.91

Fuente: Elaboración propia

Los costos de 0,91 USD \$/m³ consideran solo de reactivo mas no de energía, electricidad y mano de obra.

Finalmente, la remoción de cianuro de sodio y cobre establece una relación apropiada donde se muestra en la Tabla 12, donde muestra el costo total de cada reactivo químico aumenta en función a la cantidad de consumida de H₂O₂, CuSO₄, NaOH, NaSH, coagulante CT-3160 y floculante CT- 350. En definición, el costo total es de 6528,94 USD \$/kg tratando un caudal de 7150,00 m³. Sin embargo, el costo por 1 m³ tratado de efluente en los ocho días de proceso es de 0,91 USD \$/m³

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Los resultados del análisis químico del efluente, solución cianurada de la poza de mayores eventos en la tabla 5, muestran un valor promedio en los resultados del pH, cobre y cianuro de sodio de 10.35, 7.25 y 156.25 respectivamente. El resultado de la caracterización química del efluente, coincide con los de Rupay, F. (2016), quién en su investigación trabajó con una solución residual, con una muestra promedio de CN^- a 102mg/l a un pH de 10,15.

Los resultados de los consumos de los reactivos químicos de las características del efluente en la tabla 7, muestran los consumos reales en kilogramos, en cuanto a los resultados del peróxido de hidrogeno muestra un valor mínimo de 274,50 kg y un valor máximo de 2022,00 kg lo cual es muy variable, esto se confirma con el coeficiente de variación que es de 71,90; con respecto al sulfato de cobre, muestra un valor mínimo de 15 kg y un valor máximo de 117 kg, donde el resultado es muy variable, con un coeficiente de variación de 74,43; en cuanto al hidróxido de sodio muestra un valor mínimo de 15 kg y un valor máximo de 50 kg con un coeficiente de variación de 48,46; así mismo, el sulfhidrato de sodio muestra un valor mínimo de 25 kg y un valor máximo de 100 kg, donde es muy variable ya que también se confirma con un coeficiente de variación de 48,34. Los resultados no concuerdan con (Aguilar, 2011), se requiere 1.31gr de H_2O_2 por gramo de CN oxidado, actualmente, el consumo es de 2 a 8 gr de H_2O_2 por gramo de CN oxidado. Dicho de otra manera, el consumo es para garantizar que se pueda oxidar en su totalidad el cianuro presente,

Los resultados de las ratios de la tabla 8, muestran el consumo del reactivo químico en kg por 1 kg de cianuro de sodio; así mismo en la figura 2, el 14 de abril, se trató 450 m³ de efluente con un ratio de 5,25 kg de peróxido de hidrógeno por 1kg de cianuro de sodio (NaCN), en presencia de 150 ppm de cianuro de sodio. Los resultados de los ratios del consumo de reactivos discrepan con Kitis, Akcil, Karakaya y Yigit (2004), donde en su investigación trabajo con una dosis de peróxido de hidrogeno requeridas por cantidad de cianuro wad oxidado fueron aproximadamente 1.7 y 5 (gr H₂O₂/gr CN_{WAD}) en presencia de 30 mg/L. Los resultados nos coinciden con el antecede, visto que en la investigación se trató un volumen de 450 m³ esto ocasiona el aumento de consumo de peróxido de hidrógeno. El resultado de la ratio de sulfato de cobre mostrado en la figura 3, el 21 de abril se trató 2000 m³ de efluente con ratio de 0,34 kg sulfato de cobre para tratar 1 kg de cianuro de sodio, donde se logró la remoción de 180,41 kg CN⁻. El resultado no coincide con Paytan (2009), quien en su investigación trabajo con resultados experimentales obtenidos para una dosificación de 12,8 ml de sulfato de cobre y ratio experimental de 7,0 obtenemos 22,41 mg/l de cianuro total (CNT) en un tiempo de 90 minutos de reacción. Los resultados no coindicen con el antecede debido a que la planta trabajo 20 horas de operación y un volumen de 2000 m³ el 21 de abril. Por otro lado, en la investigación de Rupay (2016) utiliza el complejo de 80% de peróxido de hidrogeno y 20% sulfato de cobre; así mismo, tiene en su solución residual con una muestra promedio de CN⁻ a 102mg/l a un pH de 10,15. El resultado obtenido es de 1300 mg/l del complejo (CuSO₄ y H₂O₂), ya que reduce la concentración de cianuro libre a 0,225 mg/l a una velocidad de reacción de 160 minutos con un pH de 10,05; así mismo, la reducción de CN⁻ llega a cero con este método. Por qué no

concuerdan posiblemente por la presencia de otros metales en la solución como ferro cianuros, carbonatos.

El resultado del ratio de sulfhidrato de sodio (NaSH) mostrado en la figura 4, muestra que el 15 de abril se trató un volumen de 400 m^3 de efluente con un ratio de 12,15 kg de NaSH, ya que el consumo real por kilogramo en ese mismo día fue de 36,30 kg de NaSH; así mismo, se logró la remoción de 7,47 mg/L de cobre. El resultado obtenido no coinciden con Cusma (2015), en su investigación obtuvo un resultado mediante el sistema de SART (sulfuración, acidificación, recirculación, espesamiento) la precipitación de cobre con sulfuros, los cristales con (NaSH) con una pureza de 70% el peso real será de 2.5 gr y se diluirá en 200 ml de solución de (NaOH) de mol/L de concentración asegura una concentración de 1000 ppm de sulfuro, tiene una eficiencia de 75 % de eficiencia, logrando remover entre 0.3 y 1.83 ppm respectivamente. Los resultados no coinciden con los antecedentes, ya que varía en el volumen del efluente y en el consumo del NaSH para la remoción del cobre.

Los resultados de las ratios de la tabla 9, muestran el consumo del reactivo químico en kg por 1 m^3 de efluente, El 14 de abril se necesitó 0,788 kg de peróxido de hidrogeno (H_2O_2), 0,044 kg de CuSO_4 , 0,04 kg de NaOH, 0,08 kg de NaSH, 0,156 kg de coagulante, 0,0008 kg de floculante, para tratar un m^3 de efluente, donde en ese día se trató un volumen total de 400 m^3 . En cuanto al consumo de 0,04 kg de NaOH por 1 m^3 de efluente los resultados discrepan con Saldaña, J. (2016), quien en su investigación el proceso genera gas cianhídrico, donde tiene un agua acida de 189,41 m^3/h y existe elevadas puntuaciones de gas cianhídrico, por lo que los resultados obtenidos con soda caustican (NaOH) realizadas en laboratorio, se realizó con una

dosificación de 100 ml de solución de soda caustica, preparada al 10% , para neutralizar el agua en un rango de 7.514 a 8.987 para un m³ de solución acida, tomada como media de antes de la adición de la neutralización de 7.4 ppm y después de la adición de 0.55 ppm, su desviación estándar en el antes 2.52 ppm y después 0.36 ppm esto concluye que la importancia de la neutralización y su rango de Limite Max permisible de HCN ppm a exposición es de (4.7 ppm) esto ayudaría a reducir la forma altamente significativa, el gas Cianhídrico en las plantas de proceso La Quinoa.

Los resultados de datos de la eficiencia mostrado en la Tabla 11, son resultados que muestran al cianuro libre con una eficacia del 99,99%, donde sugieren una tendencia alta. De igual forma, el grupo de cianuro libre tampoco tiene ningún resultado que obtenga un valor menor al 99,99%. Por otra parte, la eficiencia de cobre muestra una eficiencia de 89,97%, donde la tendencia va hacia una valoración media-alta del grupo de cobre. Los resultados obtenidos discrepan con Carpio (2014), ya que en su investigación evalúa la variable concentración, utilizado 0.4532g CuSO₄.5H₂O, el valor de pH es de 9.7 y el tiempo de reacción con el experimento mediante la variable de peróxido de hidrogeno H₂O₂ tiene un porcentaje de remoción de cianuro, para el cianuro total de 20.5% y de cianuro total de 95% con un pH de 9.0. así como también la reacción con el experimentó mediante la variable de sulfato ferroso monohidratado (FeSO₄). H₂O, tiene un porcentaje de remoción de cianuro, para el cianuro total 86.79% y del cianuro libre 93.42% con un pH de 4. Por otro lado, Mego, E. (2016), quien en su investigación evaluó la oxidación química con peróxido de hidrógeno y osmosis inversa en efluentes, los resultados muestran que obtiene una eficiencia de remoción de 100% en cianuro y un aproximado de 99,99% en remoción de arsénico,

cobre y mercurio; así mismo, se recomienda la implementación de osmosis inversa, como método combinado.

Los resultados de costo total y costo unitario mostrado en la Tabla 12, muestran el costo total de cada reactivo químico aumenta en función a la cantidad de consumida de H_2O_2 , CuSO_4 , NaOH , NaSH , coagulante CT-3160 y floculante CT- 350. En definición, el costo total es de 6528,94 USD $$/kg$ tratando un caudal de 7150,00 m^3 . Sin embargo, el costo por 1 m^3 tratado de efluente en los ocho días de proceso es de 0,91 USD $$/\text{m}^3$. Considerando que los costos de 0,91 USD $$/\text{m}^3$ es solo de reactivo mas no de energía, electricidad y mano de obra. En los antecedentes no se registran costos de tratamiento con los mismos reactivos químicos, para hacer una discusión.

4.2 Conclusiones

Se evaluó la remoción de cianuro y cobre de los efluentes de lixiviación logrando una remoción de cianuro de un promedio de 156,50 ppm hasta 0,01 ppm con una eficiencia de 99,99% y la remoción de cobre de un promedio de 7,25 hasta 0,73 ppm logrando una eficiencia de 89.97%. Se concluye que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre ($CuSO_4$), sulfhidrato de sodio (NaSH) son eficientes reactivos, para efluentes cianurados.

Se caracterizó químicamente al efluente de lixiviación en el proceso Metalúrgico de la planta, durante 8 días de monitoreo, concluyéndose que sus valores promedios son de 10.35 de pH, 7.25 ppm de cobre y 156.25 ppm de cianuro de sodio.

Se determinó los consumos reales totales en de cada reactivo químico: 6370,50 kg de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), 358,00 kg de sulfato de cobre ($CuSO_4$), 227 kg de hidróxido de sodio ($NaOH$), 515,05 kg de sulfhidrato de sodio (NaSH), 752,82 kg de coagulante CT-3160 y 4,46 kg de floculante CT-3160. Con respecto a los ratios promedios obtenidos para la remoción de cianuro y cobre es de 5,47 kg. H_2O_2 /kg. NaCN, 0,30 kg. $CuSO_4$ /kg. NaCN y 10,03 kg. NaSH/kg. Cu. Se concluye que los ratios promedios obtenidos en función a kg/1m³ de efluente es de 0,86 kg. H_2O_2 /m³, 0,048 kg. $CuSO_4$ /m³, 0,036 kg. NaOH/m³, 0,079 kg. NaSH/1m³, 0,131 kg. Coag. /m³ y 0,0007 kg. Floc. /m³.

Se determinó que la eficiencia de tratamiento del efluente de la planta de procesos Metalúrgicos, mediante los consumos y ratios de los reactivos químicos, donde se incrementó en función al volumen tratado, la remoción de cianuro de sodio y cobre de los efluentes de lixiviación, dio como resultado óptimo de 99,99% de remoción de cianuro y 89,97% de remoción de cobre.

Se concluye que el costo de tratamiento con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre ($CuSO_4$) es de 0,91 USD \$ por 1 m³ tratado de efluente cianurado

REFERENCIAS

- Aguilar, F. R. (2011). *Tratamiento de aguas contaminadas con cianuro* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Arévalo, C. (2011). *Control de efluentes cianurados mediante la oxidación con Peroxido de Hidrogeno en un laboratorio de análisis de minerales* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Bernabel, H., & Quispe, M. (2013). *Efecto del pH y dosis de hipoclorito de calcio, en la degradación oxidativa de efluentes líquidos cianurados y su aplicación en la remoción d metales pesados* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Carpio, W. (2014). *Estudios de investigación para remoción de cianuro de los efluentes de minería aurífera Retamas S.A.* (tesis de pregrado). Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú.
- Castillo, L. E. (29 de agosto de 2018). *PROCEDIMIENTO CIANURO V2*. Obtenido de Archivo de video: Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=iKguseulBMY>
- Clemente Hugo (2014). *Diseño de experimentación en la remoción de metales pesados en aguas residuales de la industria minera por procesos de coagulación con sulfato ferroso* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Cusma, G. (2015). *Precipitación de cobre en soluciones acidificadas. PROCESO SART* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM. Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – Metalúrgica, Lima, Perú, 21 de agosto 2010.
- Decreto Supremo N° 024-2016-EM. Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería, Lima, Perú, 28 de julio de 2016.

Decreto Supremo N° 045-2013-EM. Ley que regula la comercialización y uso del cianuro, Lima, Perú, 19 de diciembre de 2013.

Fajardo, J., Burbano, D., Burbano, E., Apraez, N., & Moreno, M. (2010). Estudio de métodos químicos de remoción de cianuro presente en residuos de cianuración provenientes del proceso de extracción de oro de veta en el departamento de Mariño. *Luna azul*. (31). pp. 8-16.

Institución internacional para el manejo de cianuro. (2014). *Código internacional para el manejo de cianuro*. Recuperado de <https://www.cyanidecode.org/bienvenido-al-icmi>

Kitis, M., Akcil, A., Karakaya, E., y Yigit, N.O. (2004). Destruction of cyanide by hydrogen peroxide in tailings slurries from low bearing sulphidic gold ores. *Minerals Engineering*, 18, 353-362.

Ley n° 28611. Ley General del Ambiente, Lima, Perú, 27 de octubre de 2005.

López, J., & Martines, R. (2014). *Influencia del pH sobre la oxidación del ion manganeso en el tratamiento de agua acidad de la plata de neutralización y coagulación dinámica n°2 de la compañía minera Ares SAC. unidad Sipán, afiliada al grupo hochschild mining plc*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.

Gómez, P. (2012). Degradación de cianuros mediante oxidación química en efluentes industriales (tesis de maestría). Universidad de Oviedo, Oviedo.

Gonzales, M. (2005). *Planta de tratamiento de aguas excedentes* (tesis pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Gonzales, Y., & Falcon, J. (2008). Utilización de floculantes en el tratamiento de los residuales lácteos. *Tecnología Química*. 31(2), pp. 126-133.

- Mallma, C & Peinado, C. (2009). *La soda caustica en la cianuración de concentrados de oro en minera Ananea Puno* (Tesis pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Mamani, O. M. (2007). *Implementación de procesos de destrucción de cianuro con sulfato ferroso y peroxidode hidrogeno* (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Mendoza (2013, 27 de marzo). Derrame de sulfhidrato de sodio en el paso Uspallata. *No a la mina*. Recuperado de <https://noalamina.org/argentina/mendoza/item/11004-derrame-de-sulfhidrato-de-sodio-en-el-paso-uspallata>
- Mego, E. (2016). *Evaluación de la oxidación química con peróxido de hidrógeno y osmosis inversa en el tratamiento de efluentes de minera Coimolache* (Tesis de post grado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.
- Molina, A. (2017). *Estudio del efecto de la aplicación de espumantes en el proceso de flotación de mineral mixto de cobre* (Tesis magister de Ciencias de la Ingeniería). Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Paytan, R. (2009). *“Diseño del reactor para la degradación de cianuro por oxidación química en la planta de tratamiento de efluentes de la empresa minera aurífera retamas S.A”* (tesis pregrado). Universidad nacional del centro del Perú, Huancayo.
- Palella, S. & Martins, F. (2015). *Metodología de la investigación cuantitativa*, Florencia, Venezuela. Recuperado de <https://www.doccity.com/es/disenio-tipo-nivel-y-modalidad-de-palella-y-martins/2733947/>
- REMA. (2014). *Extracción de oro con cianuro contaminaría el manantial*. Colima. Red mexicana afectados por la minería. Recuperado de <http://www.remamx.org/2014/03/extraccion-de-oro-con-cianuro-contaminaria-el-manantial/>
- Rupay, F. (2016). *Remoción del cianuro con el complejo ($CuSO_4$ y H_2O_2) de los*

efluentes de cianuración de oro para evitar riesgos a la salud y al ambiente (tesis de post grado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.

Rustom, Antonio (2012). *Estadística Descriptiva, Probabilidad e Inferencia. Una Visión Conceptual y Aplicada* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago.

Saldaña, C. (2016). *Implementación de un sistema de tratamiento de agua del lavado ácido del carbón activado, para la reducción del gas cianhídrico en la planta de proceso la Quinoa – minería Yanacocha S.R.L* (Tesis pregrado). Universidad Privada Del Norte, Cajamarca.

Vargas, R. (2009). *La Investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica. Vol. (33), p.161.*

Wildber, C. (2013). *Recuperación del recurso hídrico de los relaves de plantas metalúrgicas* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

ANEXOS

ANEXO N° 1. Fórmulas de consumo, concentración, eficiencia y costos de reactivos Químicos

➤ CONSUMO DE REACTIVOS

$$\text{Factor molecular} = \frac{\Sigma \text{ peso molecular (C+N)}}{\Sigma \text{ peso molecular (C+N+Na)}} \quad 6$$

$$\text{FCN} = \text{Factor molecular} \times \text{NaCN (ppm)} \quad 7$$

➤ CONCENTRACIÓN DE LOS REACTIVOS QUÍMICOS

$$\begin{aligned} \text{Volumen tratado (m}^3\text{)} &= \text{Operación (hr)} \\ * \text{Volumen tratado promedio (} \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \text{)} & \quad 8 \end{aligned}$$

$$\text{Cianuro tratado (Kg)} = \frac{\text{FCN} \times \text{Volumen tratado (m}^3\text{)}}{1000} \quad 9$$

$$\text{Cianuro tratado (gr)} = \text{Cianuro tratado (Kg)} \times 1000 \quad 10$$

$$\text{Ratio} \frac{\text{kg.H}_2\text{O}_2}{\text{Kg.NaCN}} = \frac{\text{Consumo real H}_2\text{O}_2 \text{ (Kg)}}{\frac{(\text{NaCN}_{(\text{ppm})} \times \text{volumen tratado}_{(\text{m}^3)})}{1000}} \quad 11$$

$$\text{Ratio} \frac{\text{kg.CuSO}_4}{\text{Kg.NaCN}} = \frac{\text{Consumo real CuSO}_4 \text{ (Kg)}}{\frac{(\text{NaCN}_{(\text{ppm})} \times \text{volumen tratado}_{(\text{m}^3)})}{1000}} \quad 12$$

$$\text{Ratio} \frac{\text{kg.NaSH}}{\text{Kg.Cu}} = \frac{\text{Consumo real NaSH (Kg)}}{\frac{(\text{Cu}_{(\text{ppm})} \times \text{volumen tratado}_{(\text{m}^3)})}{1000}} \quad 13$$

➤ EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE NACN Y CU

$$\text{Eficiencia (\%)} = \left(\frac{(\text{NaCN}_{(\text{ppm})} - \text{Cianuro libre}_{(\text{ppm})})}{\text{NaCN}_{(\text{ppm})}} \right) \times 100 \quad 14$$

➤ MEDIDAS NUMÉRICAS

- Promedio 15

$$pH = \text{promedio } \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

$$Au_{ppm} = \text{promedio } \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

$$Ag_{ppm} = \text{promedio } \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

$$Cu_{ppm} = \text{promedio } \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

$$NaCN_{ppm} = \text{promedio } \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

- Desviación estándar 16

$$pH = \text{DESVEST. } M \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

$$Au_{ppm} = \text{DESVEST. } M \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

$$Ag_{ppm} = \text{DESVEST. } M \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

$$Cu_{ppm} = \text{DESVEST. } M \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

$$NaCN_{ppm} = \text{DESVEST. } M \Sigma (14 \text{ de abril} - 21 \text{ de abril})$$

- Coeficiente de variación 17

$$pH = \frac{\text{Desviación estandar} \times 100}{\text{Promedio}}$$

$$Au_{ppm} = \frac{\text{Desviación estandar} \times 100}{\text{Promedio}}$$

$$Ag_{ppm} = \frac{\text{Desviación estandar} \times 100}{\text{Promedio}}$$

$$Cu_{ppm} = \frac{\text{Desviación estandar} \times 100}{\text{Promedio}}$$

$$\text{NaCN}_{\text{ppm}} = \frac{\text{Desviación estandar} \times 100}{\text{Promedio}}$$

➤ COSTOS DEL TRATAMIENTO

$$\text{Costo total por reactivo (USD\$/Kg)} = \text{Total de Reactivo} \times C.U \left(\frac{\text{USD\$}}{\text{Kg}} \right) \quad 18$$

$$\text{Costo por cada reactivo} \left(\frac{\text{USD\$}}{\text{Kg}} \right) = \frac{\text{Costo total de reactivo} \left(\frac{\text{USD\$}}{\text{kg}} \right)}{\text{total caudal tratado (m}^3\text{)}} \quad 19$$

$$\text{Costo Unitario} \left(\text{USD} \frac{\$}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Costo total del reactivo} \left(\frac{\text{USD\$}}{\text{kg}} \right)}{\text{total caudal tratado (m}^3\text{)}} \quad 20$$

➤ CONCENTRACION DE REACTIVOS QUIMICOS (Kg/m3)

$$\frac{1\text{Kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{consumo real Kg}}{\text{Volumen Tratado m}^3} \quad 21$$

ANEXO N° 2. Institución Internacional para el manejo del cianuro

Según la Institución internacional para el manejo de cianuro (2014), donde hace mención al Código internacional para el manejo de cianuro cuyo objetivo es mejorar el manejo del cianuro utilizado en la minería del oro y ayudar en la protección de la salud humana y en la reducción de impactos ambientales. Así mismo, El programa se centra exclusivamente en el manejo seguro del cianuro, relaves de molienda de cianuración y soluciones de lixiviación. Las compañías mineras de oro, los fabricantes de cianuro y los transportistas de cianuro que se conviertan en signatarios del código deben ordenar una auditoría de sus operaciones cada tres años por parte de un tercero independiente, a fin de demostrar su cumplimiento del Código. No obstante, Las operaciones que cumplen con los requisitos del código reciben certificación. Por otro lado, el código dicta una adecuada manipulación y almacenamiento, durante las operaciones se debe manejar adecuadamente las soluciones del proceso de cianuración y los flujos de desecho para proteger a la salud humana y medio ambiente.

ANEXO N° 2. Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional

En las disposiciones generales del reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería (DS N° 024-2016-EM), tiene como objetivo prevenir la ocurrencia de incidentes peligrosos, accidentes de trabajo y enfermedades ocupacionales. Dicho decreto supremo manifiesta el uso de cianuro donde en el artículo No 338 menciona que, en el proceso de cianuración de Au y Ag, los trabajadores deberán usar los EPP adecuado, en lo siguiente se resume algunas disposiciones importantes:

- Evitar inhalar polvos o gases de cianuro.
- Evitar el contacto del cianuro con ácidos o sales acidas ya que puede generar ácido cianhídrico gaseoso que es muy venenoso.
- Agregar hidróxido de sodio (NaOH) al preparar una solución de cianuro de sodio o de potasio, para evitar la formación de ácido cianhídrico (HCN) al estado de gas venenoso.
- Llevar un estricto control de pH en las plantas de cianuración para evitar la formación de ácido cianhídrico.
- Neutralizar de inmediato los derrames de soluciones de cianuro, utilizando hipoclorito y/o peróxido hidrogeno, así como limpiarlos con solución alcalina.
- Almacenar el cianuro solo, en su embalaje bien cerrado y dentro de un almacén seco bien ventilado.

ANEXO N° 3. Decreto Supremo N° 045-2013-EM

(DS N° 045-2013-EM), mediante la ley No 29023, se aprobó la Ley que regula la Comercialización y Uso del Cianuro. Así mismo, en el artículo 9 menciona la manipulación y almacenamiento del cianuro, donde el titular de la actividad minera deberá tener en cuenta lo siguiente:

1. Colocar señalizaciones de acuerdo al código de señales y colores que se indica en el reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería.
2. Contar con extintores de polvo químico seco vigente, No se debe utilizar agua ni dióxido de carbono para extinguir incendio.
3. Llevar un control del ingreso y salida de cianuro del almacén.
4. Respecto al punto de carga y descarga en el área de almacenamiento de cianuro:
 - a. Deberán estar diseñados y contruidos para retener y recuperar cualquier escape o derrame de cianuro en estado sólido, líquido o gaseoso
 - b. Deben contar con dispositivos secundarios para evitar fugas de los tanques de almacenamiento.
5. Respecto a la infraestructura de almacenamiento de cianuro:
 - a. Debe estar ubicada en una área seca, ventilada y segura de acuerdo al instrumento de gestión ambiental aprobado.
 - b. Debe estar construida y revestida con materiales compatibles con el cianuro.
 - c. El local debe ser de uso exclusivo para el almacenamiento de cianuro.
 - d. Debe tenerse especial cuidado en mantener el cianuro separado de sustancias como acido, oxidantes, productos inflamables y agua.

6. Solo ingresaran a las instalaciones de almacenamiento de cianuro, a la vez y como mínimo, dos personas. Así mismo, el ingreso del personal a la zona de preparación de cianuro con botas mojadas o con barro está prohibido.

7. Asegurar que existan duchas de emergencias para el lavado de ojos, colocadas estratégicamente dentro de la planta donde haya mayor riesgo de contacto con soluciones de cianuro.

Además, en el artículo 10 manifiesta el manejo de cianuro, donde el titular de la actividad minera debe cumplir con los siguientes lineamientos:

- En caso se derrame de cianuro, el material debe ser limpiado de inmediato.
- El material del suelo afectado con cianuro se retirará a un lugar apropiado, que debe estar adecuado, como mínimo, con una capa impermeable, techado y cerrado verticalmente, con ventilación suficiente.
- Deberá contar con un plan de Preparación y Respuestas para Emergencia para casos de incendios y/o explosiones de cianuro.
- La solución diluida de cianuro para lixiviación deberá tener el pH mayor a 10.

ANEXO N° 4. Ley General del Ambiente – Ley N°28611

Los estándares de calidad ambiental (ECA) y los Límites máximos permisibles para cianuro en suelo, agua y efluentes líquidos. Según la ley general del ambiente (Ley n° 28611, 2005), esta ley es la norma ordenadora del marco normativo legal para la gestión ambiental en el Perú. Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país.

Tabla 13

ECA y LPM de cianuro

Ítem- Descripción	Unidad	LMP/ ECA	Tipo de cianuro	Organización	Comentario
SUELO					
0,9	mg/kg	ECA	cianuro libre	RM. N° 307-2012-MINAM	Agrícola
0,9	mg/kg	ECA	cianuro libre	RM. N° 307-2012-MINAM	Residencial
8	mg/kg	ECA	cianuro libre	RM. N° 307-2012-MINAM	Industrial o extractivo
AGUA					
0,005	mg/L	ECA	cianuro libre	DS. N° 002-2008-MINAM	A1 potabilizadas con desinfección
0,022	mg/L	ECA	cianuro libre	DS. N° 002-2008-MINAM	A2 potabilizadas con tratamiento convencional
0,022	mg/L	ECA	cianuro libre	DS. N° 002-2008-MINAM	A3 potabilizadas con tratamiento avanzado
0,022	mg/L	ECA	cianuro libre	DS. N° 002-2008-MINAM	B1 destinadas para recreación
0,08	mg/L	ECA	Cianuro wad	DS. N° 002-2008-MINAM	B1 destinadas para recreación
0,022	mg/L	ECA	cianuro libre	DS. N° 002-2008-MINAM	Lagunas y lagos
0,1	mg/L	ECA	cianuro wad	DS. N° 002-2008-MINAM	Riego de vegetales y bebidas de animales
EFLUENTES LÍQUIDOS					
1	mg/L	LMP	cianuro total	DS N° 010-2010-MINAM	Límite en cualquier momento
0,8	mg/L	LMP	cianuro total	DS N° 010-2010-MINAM	Límite para el promedio anual

ANEXO N° 4. Límites Máximos Permisibles de Actividades Minero – Metalúrgicas.

Tabla 14

Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos

Parámetro	Unidad	Límites en cualquier momento		Límites para el Promedio Anual	
		6	9	6	9
pH		6	9	6	9
Sólidos totales en Suspensión	mg/L	50		25	
Aceites y Grasas	mg/L	20		16	
Cianuro Total	mg/L	1		0.8	
Cadmio Total	mg/L	0.1		0.08	
Arsénico Total	mg/L	0.05		0.04	
Cromo Hexavalente	mg/L	0.1		0.08	
Cobre Total	mg/L	0.5		0.4	
Hierro (Disuelto)	mg/L	2		1.6	
Plomo Total	mg/L	0.2		0.16	
Mercurio Total	mg/L	0.002		0.0016	
Zinc Total	mg/L	1.5		1.2	

Fuente: DS. N° 010-2010-MINAM

Anexo N° 5. Fotos de la investigación



Foto N°1 Poza de mayores eventos de la minería en estudio



Foto N° 2: Planta de destrucción de cianuro de la empresa minera en estudio.



Foto N°3 Poza de sedimentación 1



Foto N°4 Poza de sedimentación 2