



# **UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“Influencia del ozono y cobre en la degradación del cianuro de los  
efluentes mineros”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTADO POR:**

**Bach.: Serquén Esquén, Yajaira**

**ASESORA:**

**Dra. Romero Guzmán Blanca Margarita**

**LAMBAYEQUE**

**2020**



# **UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

### **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

#### **TESIS**

**“Influencia del ozono y cobre en la degradación del cianuro de los efluentes mineros”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERA QUÍMICA**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

---

**Dra. Cabrera Salazar Tarcila Amelia  
Presidente**

---

**M.Sc. Díaz Visitación Juan Carlos  
Secretario**

---

**Dr. Huangal Scheineder Sebastián  
Vocal**

---

**Dra. Romero Guzmán Blanca Margarita  
Asesora**

**LAMBAYEQUE  
2020**

## **DEDICATORIA:**

Esta tesis está dedicada a mis queridos padres, Tania y Eulogio, a quienes debo lo que soy. Gracias por dedicar sus vidas a educarme, apoyarme y darme su profundo amor.

En memoria de mis abuelos. Alejos y Raquel, por su incondicional amor, confianza y apoyo en el transcurso de mi vida.

A mis hermanas; Cinthia, Angela y Yuli, a quienes admiro, gracias por su gran amor y apoyo desde siempre cuando las fuerzas declinaban y que sin su ayuda este desafío no habría dado sus frutos.

A mi tío el Ing. Amarildo Fernández Estela, quien siempre me aconsejaba que solo estudiando y esforzándome podré lograr mis metas. Siempre será mi ejemplo a seguir.

## **AGRADECIMIENTO:**

Mi agradecimiento, primero que todo, al Dios Todopoderoso por generar el camino que ha permitido dar término a un gran desafío personal.

Al laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, así mismo al laboratorio químico metalúrgico de la Unidad Minera Cerro Lindo Milpo Chinchá

De una manera muy especial me refiero, A la Dra. Blanca Margarita Romero Guzmán, por sembrar en mí el aprecio y el amor a esta ciencia, y por enseñarme cualidades para ser una mejor profesional. Gracias por aceptar ser mi asesora de la tesis en mención, mi agradecimiento es infinito que no basta con simples palabras, solo me queda decirle,” No la defraudaré”

Al técnico del laboratorio Físico Química, Sr. Floriano Saucedo , mi especial agradecimiento por su apoyo y paciencia en la parte experimental.

Al Ing. Julio Galvez Marrufo por darme la oportunidad de ingresar a la unidad Minera Cerro Lindo, y a la vez motivándome a no rendirme nunca frente los obstáculos en el rubro minero.

Finalmente, a todo el personal de la FIQIA, profesores y empleados, por el cálido acogimiento y colaboración brindado a mi persona.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	ix
ABSTRACT .....	x
I. INTRODUCCION .....	1
II. MARCO TEORICO.....	3
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....	3
2.2. BASE TEÓRICA .....	5
2.2.1. EFLUENTE LÍQUIDO DE ACTIVIDADES MINERA- METALÚRGICA.....	5
2.2.2. METODOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL MINERAL.....	5
2.2.3. CIANURO.....	8
2.2.4. CIANURO DE SODIO .....	8
2.2.5. TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES GENERADOS EN EL PROCESO DE CIANURACION .....	12
2.2.6. OZONO .....	19
2.2.7. VARIABLES QUE AFECTAN LA DEGRADACIÓN DE CIANURO CON OZONO .....	20
2.2.8. SULFATO DE COBRE .....	22
2.2.9. MARCO LEGAL .....	23
2.2.10. GLOSARIO DE TÉRMINOS EMPLEADOS .....	25
III. MATERIALES Y METODOS .....	26
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN: .....	26
3.2. VARIABLES.....	26
3.3. DISEÑO DE CONTRASTACIÓN .....	26
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	27
3.4.1. POBLACIÓN .....	27
3.4.2. MUESTRA.....	27
3.5. EQUIPOS Y MATERIALES DE LABORATORIO .....	27
3.5.1. MATERIALES.....	27
3.5.2. EQUIPOS .....	28
3.5.3. REACTIVOS.....	28
3.6. MÉTODOS.....	29
3.6.1. REACTOR DE OZONIZACIÓN .....	29
3.6.2. OBTENCION DE LA MUESTRA .....	29
3.6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DEL EFLUENTE DEL PROCESO MACARTHUR- FORREST. ....	30

3.6.4. DOSIFICACIÓN DEL COBRE Y OZONO.....	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSION .....	33
4.1. RESULTADOS .....	33
4.1.1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE MINERO DEL PROCESO MACARTHUR-FORREST .....	33
4.1.2. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE $CN^-$ TOTAL DESPUÉS DEL TRATAMIENTO $O_3$ y $Cu^{+2}$ .....	33
4.1.3. PROCESO DE DEGRADACIÓN DEL CIANURO ( $CN^-$ ) DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON $O_3$ Y $CU^{+2}$ .....	34
4.2. DISCUSIÓN.....	37
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	39
5.1. CONCLUSIONES.....	39
5.2. RECOMENDACIONES .....	39
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS: .....	40
ANEXOS.....	43

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de los procesos de lixiviación, adsorción y elusión. ....	7
Figura 2. Ubicación geográfica-Unidad Minera Cerro lindo-Nexa .....	27
Figura 3. Reactor Tubular. Elaboracion propia .....	29
Figura 4. Flujograma de la dosificación de $O_3$ y $Cu^{+2}$ . Elaboracion propia .....	31
Figura 5. Concentración de $CN^-$ en el efluente con $Cu^{+2}$ (0 mg/L) y ozono .Elaboración propia .....	35
Figura 6. Concentración de $CN^-$ en el efluente con $Cu^{+2}$ (200 mg/L) y ozono .Elaboración propia .....	35
Figura 7. Concentración de $CN^-$ en el efluente con $Cu^{+2}$ (400 mg/L) y ozono .Elaboración propia .....	36
Figura 8. (a) Depósito tipo cilíndrico vertical acrílico, en donde se llevará a cabo la reacción, (b) Conexión de la alimentación de ozono con difusor de piedra porosa. Elaboración propia	43
Figura 9. Generador de ozono, modelo CH-KTA-3G. Elaboracion propia .....	43
Figura 10. Toma de muestra de la desembocadura del efluente de la Unidad minera. Elaboracion propia. ....	43
Figura 11 (a). Punto 2 de la toma de muestra de la desembocadura del efluente de la Unidad minera Cerro Lindo.(b) . Una muestra final del efluente de la unidad cerro lindo (5 lt). Elaboracion propia .....	44
Figura 12.(a) Sulfato de cobre disuelto en muestra. (b) Reactor con adición de ozono. Elaboracion propia .....	44
Figura 13. (a) Muestra 10ml para el espectrómetro. (b) Reactivo de cianuro HI 39714B. Elaboracion propia .....	45
Figura 14. Lectura del fotómetro. Elaboración propia .....	45
Figura 15. Planta de Procesamiento de Minerales- Cerro lindo. Adaptado de: (Nexa,2007) ..	50

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas.....	24
Tabla 2 Diseño factorial 3x3.....	26
Tabla 3 Caracterización del efluente del Proceso MacArthur-Forrest de la unidad Minera Cerro Lindo- Nexa. ....	33
Tabla 4 Eficiencia de remoción de $\text{CN}^-$ total .....	33
Tabla 5 Concentración de $\text{CN}^-$ total después del tratamiento, promedio y desviación estándar .....	34
Tabla 6 Promedios de la concentración de $\text{CN}^-$ total después del tratamiento.....	34
Tabla 7 Análisis Anova de 2 factores del efecto de las concentraciones de ozono y $\text{Cu}^{+2}$ sobre la degradación de $\text{CN}^-$ presente en el efluente minero.....	36
Tabla 8 $\text{CN}^-$ obtenidos de las lecturas del fotómetro Hanna C200 .....	48
Tabla 9 Concentración de $\text{CN}^-$ total después del tratamiento con ozono y $\text{Cu}^{+2}$ del efluente del Proceso MacArthur-Forrest de la mina Cerro Lindo Nexa. ....	48
Tabla 10 Promedio de las concentraciones de $\text{CN}^-$ total después del tratamiento con ozono y $\text{Cu}^{+2}$ del efluente del Proceso MacArthur-Forrest de la mina Cerro Lindo –Nexa .....	49
Tabla 11 Eficiencia de remoción de $\text{CN}^-$ total después del tratamiento con Ozono y $\text{Cu}^{+2}$ .....	49



## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar la influencia que ejerce el ozono y el cobre en la degradación del cianuro de efluentes mineros. Se tomó muestras del proceso McArthur – Forrest de la Unidad Minera Cerro Lindo-.Nexa, localizado en la provincia de Chincha, Ica , y se caracterizó mediante el método de ASTM. Se construyó un reactor tipo tubular de 2,1 litros de capacidad, con conexión de alimentación de ozono en concentraciones de 1,5; 2,0 y 2,5 g ; al cual se adiciono 1,9 litros de efluente y  $\text{Cu}^{+2}$  ( $\text{SO}_4 \text{Cu}.5\text{H}_2\text{O}$ ) como catalizador a 0; 200 y 400 mg/l con tres repeticiones haciendo un total de 27 ensayos, determinándose la cuantificación del  $\text{CN}^-$  por el método ASTM D2036-91 mediante el fotómetro Hanna C200. Se concluye que la adición de  $\text{O}_3$  y  $\text{Cu}^{+2}$  al efluente, en diferentes concentraciones influyen en la degradación del cianuro, con eficiencias de 83,26– 98,98% ; una dosificación de 2,5 g de  $\text{O}_3$  y 400 mg/L  $\text{Cu}^{+2}$  logra una reducción de la concentración de  $\text{CN}^-$  de 235, 44 mg/L a 0,17 mg/L de cianuro ( $\text{CN}^-$ ) considerado óptimo según lo establecido en el D.S N° 010 -2010 MINAM

**Palabras claves:** Degradación, efluentes, dosificación.

## ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the influence of ozone and copper on the degradation of cyanide from mining effluents. Samples were taken from the McArthur Forrest process of the Cerro Lindo Nexa Mining Unit Located in the province of Chincha, Ica, and characterized by the ASTM method A 2,1-litre tubular reactor was built, with ozone feed connection at concentrations of 1,5; 2,0 and 2,5 g To which 1,9 liters of effluent was added and  $\text{Cu}^{+2}$  ( $\text{SO}_4 \text{ Cu } 5\text{HO}$ ) as a catalyst to 0; 200 and 400 mg/l with three repetitions doing a total of 27 trials the quantification of the  $\text{CN}^-$  by the ASTM D2036-91 method using the Hanna C200 photometer. It is concluded that the addition of  $\text{O}_3$  and  $\text{Cu}^{+2}$  to the effluent, at different concentrations influence the degradation of cyanide With efficiencies of 83,26–98,98%, a 2,5 g  $\text{O}_3$  and 400 mg/L  $\text{Cu}^{+2}$  dosage achieves a reduction in  $\text{CN}^-$  concentration of 235 mg/L a 0,17 mg/L of cyanide ( $\text{CN}^-$ ) considered to be optimal as set out in D.S. No. 010 -2010 MINAM

**Keywords:** Degradation, effluents, dosage.

## I. INTRODUCCION

En la industria minera, el problema ambiental nace por el tratamiento de los minerales auríferos, donde se utiliza cianuro y que sus efluentes contienen esta sustancia que es tóxica y que puede ocasionar daños irreparables tanto a la salud humana como al medio ambiente.

➤ Al respecto, Parga, Shukla & Carrillo, (2003) utilizan dióxido de cloro, ozono, gel de titanio, para la destrucción de soluciones de residuos de cianuro, obteniendo una eficiencia de 99,65% en 60 minutos y que la oxidación de cianuro aumenta con la velocidad de adición de ozono.

➤ Nava, Elorza, Uribe y Barriga, (2013) Investigan sobre la eliminación de cianuro en soluciones por oxidación con ozono, concluyendo que la oxidación completa ocurre a pH alcalino ( $> 9,3$ ). Si la solución tiene un pH menor, el ozono no se oxidará completamente, o tomará tiempos demasiado largos, debido a que el cianuro se hidroliza a ácido cianhídrico, el cual no es oxidado por el ozono y la velocidad de oxidación no se ve afectada por la temperatura en un rango de 15 a 40°C.

La formulación del problema se enuncio en los siguientes términos ¿Cuál es la influencia del ozono y cobre en la degradación de los efluentes mineros?

Con la hipótesis: La adición ozono y cobre en los efluentes permite degradar el cianuro con eficiencia mayor al 80%.

Se plantea desarrollar la presente investigación con los siguientes objetivos tanto generales como específicos:

General:

Determinar la influencia que ejerce el ozono y el cobre en la degradación del cianuro de los efluentes mineros para contribuir a la sostenibilidad ambiental.

Específicos:

- Caracterizar el efluente del proceso de lixiviación de la unidad Minera cerro lindo-Nexa
- Construir un reactor tipo tubular a nivel laboratorio para realizar el proceso de ozonificación.
- Adicionar el ozono y cobre en diferentes concentraciones al efluente que contiene cianuro.

La presente investigación se justifica por la necesidad primordial de disminuir la cantidad de cianuro presentes en los efluentes mineros, a través de una tecnología limpia como es el empleo de ozono. La oxidación de cianuro con ozono es muy rápida y produce productos que son inocuos en comparación con otros procesos. Además, su aplicación requiere bajo mantenimiento, no se necesita transporte, almacenamiento o manejo de reactivos químicos. Estas ventajas no solo son económicas, sino que también trae efectos de menos impacto ambiental por posible derrame de productos químicos.

## II. MARCO TEORICO

### 2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Sobre la degradación del cianuro existe una amplia información, pero muy poca sobre la presencia de cobre cuando se emplea ozono. A continuación se hace una revisión de las principales investigaciones sobre la degradación del cianuro.

➤ Carrillo, (2000). Investiga sobre la oxidación de cianuro con ozono en relaves de cianuración, concluyendo que la destrucción total del cianuro, se realiza en condiciones alcalinas (pH de 9,0 a 11,79), con porcentaje de degradación de 99,22 %  $\text{CN}^-$ . A medida que el pH se vuelve más ácido la velocidad de oxidación disminuye haciéndose nula a pH cercanos a 2,0. Esto indica que el ácido hidrocianico formado por la hidrólisis del cianuro a valor de pH menores de 9,0 no es oxidado por el ozono.

➤ Gaviria & Meza, (2006), Investigan la degradación del cianuro en efluentes de cianuración del Municipio de Segovia, Colombia, usando la ozonificación y peróxido de hidrogeno, concluyendo que se requieren 5 g  $\text{O}_3$ / gramo de  $\text{CN}^-$  en un tiempo de 40 minutos para degradar 96,90% de  $\text{CN}^-$  mientras que con peróxido de hidrógeno se necesitan 3,5 g  $\text{H}_2\text{O}_2$ /g  $\text{CN}^-$  en un tiempo de 2,5 h para degradar 95,15% de  $\text{CN}^-$ .

➤ Orcés y Pincay, (2009) Investigan sobre el tratamiento de aguas contaminadas de Cianuro (muestras 1,2, 3 y 4) en un reactor químico, utilizando ozono, concluyendo que para la muestra 1, las concentraciones iniciales de cianuro de sodio son de 61, 22 y 39 mol gramo/litro y que en los primeros 20 minutos disminuye a 44,89; 19,39 y 20,37 mol g/litro, alcanzando un porcentaje promedio de remoción de 70 al 77%. En el caso de la muestra 2, la mayor cantidad del cianuro de sodio destruido en los primeros 20 minutos es el 67,24%, cuando la concentración inicial es 2,32 mol gramo/litro a 55 °C.

Para esta muestra, el valor máximo de remoción es 92,96% a 20 °C, seguido del 89,4% a 27 °C. El estudio de la muestra 3 indica que la remoción máxima, en los primeros veinte minutos es del 60,38% a temperatura de 20 °C. El resultado final logrado es destruir el 96,63 y 94,0% del cianuro de sodio a 20 y 27 °C, respectivamente y para la muestra 4, se logró la eliminación mayor del cianuro en un 15,83% luego de 20 minutos de ozonización a 45 °C. Las mayores remociones alcanzadas son 65,54% a 55 °C y 57% a 20 °C.

## **2.2. BASE TEÓRICA**

### **2.2.1. EFLUENTE LÍQUIDO DE ACTIVIDADES MINERA- METALÚRGICA**

#### **2.2.1.1. Definición según D.S.010-2010- MINAM**

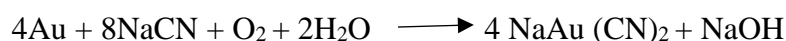
Es cualquier flujo natural o estacional de sustancia líquida descargada a los cuerpos receptores que proviene de:

- Cualquier planta de procesamiento de minerales, incluyendo el proceso de trituración, molienda, flotación, separación gravimétrica, separación magnética, amalgamación, reducción, lixiviación, extracción por solventes.
- Cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales asociados con actividades mineras o conexas, incluyendo planta de tratamiento de efluentes mineros, efluentes industriales, efluentes domésticos.
- Cualquier depósito de residuos mineros, incluyendo depósitos de relaves, desmontes, escorias y otros.

### **2.2.2. METODOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL MINERAL**

#### **2.2.2.1. Extracción minera de oro por lixiviación con cianuro (proceso MacArthur-Forrest)**

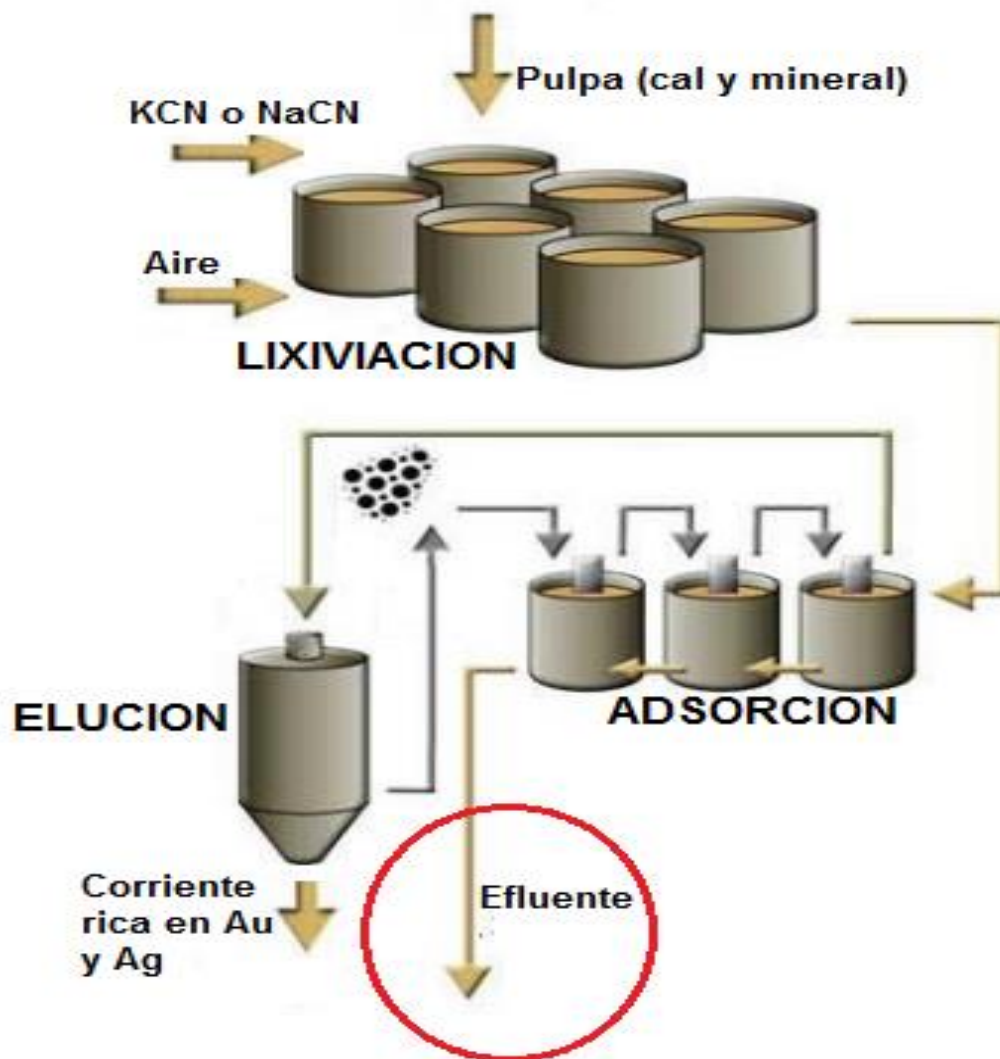
La lixiviación con cianuro es el proceso más efectivo y utilizado para la extracción minera de oro. El método desarrollado por MacArthur y los hermanos Forrest, se basa en la capacidad del oro para formar una sal soluble en agua, al combinarse con cianuro de potasio en presencia de oxígeno. El proceso consiste en introducir la fuente mineral (finamente molido) en un tanque de lixiviación y agitarlo en una disolución diluida de cianuro de sodio. La concentración típica del cianuro del sodio está en el rango de 0,01% a 0,10%, es decir entre 100 a 1000 mg/ L. La reacción química que describe la extracción del oro del mineral mediante el uso del cianuro es la siguiente:



Para optimizar el proceso de lixiviación se debe de maximizar la superficie de contacto mediante una molienda fina. Adicionalmente, al agregar la solución de cianuro es necesaria la agitación mecánica y la inyección de aire, ya que la ecuación química indica que la reacción se encuentra en función del oxígeno disuelto, por lo que también se requiere optimizar el contacto de oxígeno en la solución.

Para la recuperación del oro, se utiliza principalmente polvo de zinc, conocido como proceso “Merril-Crowe”. Se añade ácido concentrado en un digestor para disolver el zinc, liberando el oro. Se agrega cal o soda cáustica para mantener un pH elevado, para evitar la formación de ácido cianhídrico, como medida de seguridad. Adicionalmente también contribuye a sedimentar las partículas del mineral en la solución de lixiviación al concluir la reacción. Después de esta etapa de adsorción, pasa a una etapa de elusión donde se recuperan un concentrado de oro y plata que va a otras etapas de afinación. De la adsorción se obtiene un líquido agotado de oro y plata pero con alto contenido de cianuro, este es el efluente de esta etapa del proceso adsorción.





*Figura 1.* Representación esquemática de los procesos de lixiviación, adsorción y elución.  
Recuperado de Álvarez, 2005.

### ➤ **Lixiviación Bacteriana (Biolixiviación)**

La lixiviación bacteriana consiste básicamente en el uso de bacterias para la generación del sulfato férrico, que se constituye en el disolvente del sulfuro de cobre. El principio se basa en la utilización de bacterias que oxidan el hierro y bacterias que oxidan el azufre. Estas bacterias utilizan el oxígeno y el carbono de la atmósfera para que mediante su metabolismo generen la oxidación del hierro y el azufre.

➤ **Gravimetria**

El método gravimétrico separa los minerales por su peso al colocarlos sobre tres mesas, previamente molidos, que al moverlas sueltan la arena u otro elemento adherido al oro.

➤ **Amalgamación**

El mercurio se usa para separar y extraer el oro de las rocas o piedras en las que se encuentra. El mercurio se adhiere al oro, formando una amalgama que facilita su separación de la roca, arena u otro material. Luego se calienta la amalgama para que se evapore el mercurio y quede el oro. Se usan varias técnicas diferentes que liberan distintas cantidades de mercurio.

### **2.2.3. CIANURO**

El Cianuro es una sustancia química que contienen carbono y nitrógeno. Su fórmula química es  $CN$  y es muy tóxico para los seres vivos. En la naturaleza se encuentra como cianuro de hidrógeno y de esa base se fabrica el cianuro de potasio y cianuro de sodio, compuestos muy usados en la industria y minería. El cianuro puede ser un gas incoloro como el cianuro de hidrógeno ( $HCN$ ), o el cloruro de cianógeno ( $ClCN$ ), o estar en forma de cristales como el cianuro de sodio ( $NaCN$ ) o el cianuro de potasio ( $KCN$ ) (Corral et al., 2012).

### **2.2.4. CIANURO DE SODIO**

El cianuro de sodio o cianuro sódico ( $NaCN$ ) es la sal sódica del ácido cianhídrico ( $HCN$ ), es un compuesto químico altamente tóxico, también conocido como sal del sodio de ácido cianhídrico.

#### **2.2.4.1. Características**

Se trata de un compuesto sólido e incoloro que hidroliza fácilmente en presencia de agua y óxido de carbono (IV) para dar carbonato de sodio y ácido cianhídrico. Tiene un olor como almendras amargas, pero no cada uno puede olerlo debido a un rasgo genético.

- **Nombre químico:** Cianuro de sodio
- **Fórmula:** NaCN
- **Sinónimos:** Sal sódica del ácido cianhídrico, cianuro blanco, prusiato de soda.
- **Otros nombres:** Cianuro sódico.
- **Compuestos relacionados:** Cianuro de hidrógeno.

#### **2.2.4.2. Aplicaciones**

El cianuro de sodio se utiliza en la minería y la industria metalúrgica en:

- Se usa como sólido o en solución para extraer minerales metálicos como es el caso del oro, plata y otros metales. Este proceso se llama lixiviación.
- En la galvanoplastia.
- Para baños de limpieza de metales.
- En el endurecimiento de metales.

#### **2.2.4.3. Estabilidad y reactividad**

- **Estabilidad:** Estable en condiciones normales.
- **Incompatibilidad:** Ocurre reacciones químicas cuando entran en contacto con ácidos fuertes o bases fuertes. El cianuro de sodio es altamente corrosivo a muchos metales. Reacciona violentamente con agentes oxidantes que liberarán gases tóxicos.

- **Descomposición:** Puede formar gases tóxicos como HCN y óxidos de nitrógeno (Smith y Mudder, 1991)

#### **2.2.4.4. Toxicidad del cianuro de sodio**

Una intoxicación por cianuro de sodio causa en la piel un cambio de color de normal a rojo. Sin embargo, si se trata de un daño físico o falta de oxígeno, el color de la piel puede ser azulado. El enrojecimiento de los ojos y la dilatación de la pupila son claros síntomas de la intoxicación por este veneno. La Cianosis (coloración azulada de la piel) tiende a estar asociada con las intoxicaciones graves por cianuro de sodio.

- **Inhalación:** Producto corrosivo para las vías respiratorias. La sustancia inhibe la respiración celular y puede provocar cambios en la sangre, sistema nervioso central y en la tiroides. Puede causar dolor de cabeza, debilidad, mareos, náuseas y vómitos, dificultad para respirar, que puede ser seguido por latido del corazón débil e irregular, pérdida de conocimiento, convulsiones, coma y muerte.

- **Ingestión:** Altamente tóxico, Corrosivo para el tracto gastro-intestinal con ardor en la boca y el esófago, y dolor abdominal. Dosis más elevadas pueden producir pérdida repentina de la conciencia, paro del sistema respiratorio y muerte. Dosis más pequeñas pero letales puede prolongar los síntomas de una a más horas. Olor a almendras amargas puede ser notado en el aliento o el vómito.

- **Contacto con la piel:** Corrosivo, puede causar dolor severo y quemaduras en la piel. Las soluciones son corrosivas para la piel y los ojos, y puede provocar úlceras profundas que tardan en sanar. Puede ser absorbido por la piel, con síntomas similares a los observados para la inhalación.

- **Contacto con los ojos:** Corrosivo, los síntomas pueden incluir enrojecimiento, dolor, visión borrosa, y daño permanente a los ojos. La exposición crónica: La exposición

prolongada o repetida con la piel puede causar sarpullido y lesiones nasales. (Material Safety Data Sheet, MSDS)

#### **2.2.4.5. Manejo y almacenamiento del cianuro de sodio.**

Por ser un potente veneno siempre se debe mantener en recipientes cerrados herméticamente, almacenar en unos lugares frescos, secos y ventilados. Proteger estos envases contra daños físicos. Se deben almacenar separado de materiales incompatibles. Los trabajadores que interactúen con cianuro de sodio deben seguir cuidadosamente las buenas prácticas de manejo:

- No comer, beber o fumar en el lugar de trabajo
- Usar equipos de protección personal
- Los trabajadores que manipulan cianuro de sodio requieren un pre-examen y pruebas médicas periódicas.
- A los trabajadores se les debe dar formación y capacitación especial en el uso de cianuro.

Los contenedores de cianuro de sodio pueden ser peligrosos cuando están vacíos ya que suelen retener residuos del producto (polvo, sólidos); respetar todas las advertencias y precauciones indicadas para el producto. No almacenar cerca de materiales combustibles o inflamables.

#### **2.2.4.6. Compuestos de Cianuro**

##### **➤ Cianuro total**

Se denomina así a todo los compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa. Este es un término que se emplea en los procedimientos analíticos. El cianuro total incluye el cianuro libre, los cianuros simples y todos los cianuros complejos, que

incluyen los cianuros fácilmente disociables en ácido débil (cianuros WAD, en sus siglas en inglés). (Smith y Mudder, 1991).

#### ➤ **Cianuro Libre**

Es el término utilizado para describir tanto al ion cianuro ( $\text{CN}^-$ ) que se disuelve en el agua del proceso como cualquier cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma en la solución. Por ejemplo, el cianuro de sodio se disuelven en el agua para formar el ion sodio y el anión cianuro; éste último se combina luego con el ion hidrógeno para formar el HCN donde la concentración del ion hidrógeno en el agua del proceso dependerá del pH existente en la solución. Las soluciones ácidas favorecen la presencia de HCN y a valores de pH menores a 7 casi todo el cianuro libre está presente como HCN. A un pH de 9,24, las concentraciones de HCN y  $\text{CN}^-$  son iguales. (Smith y Mudder, 1991).

#### **2.2.4.7. Usos del cianuro**

En el sector industrial, el cianuro se utiliza para producir papel, textiles y plásticos. Las sales de cianuro son utilizadas en la metalurgia para galvanización, limpieza de metales y la recuperación del oro del resto de material removido. El gas de cianuro se utiliza para exterminar plagas e insectos en barcos y edificios (Parga, 2003).

#### **2.2.5. TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES GENERADOS EN EL PROCESO DE CIANURACION**

Los procesos de destrucción del cianuro, son los más utilizados actualmente por su nivel de eficacia.

Una vez extraído el oro de la solución, los residuos del proceso presentan cianuro residual en proporciones que pueden variar entre 400 y 600 mg/L de cianuro disociable en ácido

débil, y que es necesario descontaminar, ya que el límite máximo permitido en caso de un hipotético vertido es de 1 mg/L de cianuro total.

Existen varios tratamientos químicos para la descontaminación de este cianuro, todos basados en la oxidación del cianuro a cianato, diez mil veces menos tóxico y posteriormente disociable en dióxido de carbono y nitrógeno. (Domic, 2011). Así tenemos:

- Dilución
- Degradación natural
- Formación por complejos de hierro
- Oxidación química
- Precipitación
- Biodegradación

#### **2.2.5.1.     *Dilución***

Consiste en diluir las soluciones contaminadas hasta niveles permitidos según Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM (descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgica). No es un método aceptado legalmente, pues la contaminación, aunque diluida, se acumula en el medioambiente. De todos modos, existen indicios de que sigue siendo una práctica habitual en países subdesarrollados. (Quispe, 2011).

#### **2.2.5.2.         *Degradación natural***

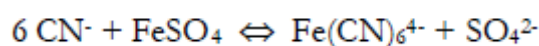
Los procesos de degradación natural reducen la toxicidad de los compuestos cianurados a lo largo del tiempo, tiene lugar principalmente en las presas de colas o relaves, en las pilas de lixiviación, en las pozas de lixiviación, y en los sistemas de adsorción con carbón activado. A pesar de que todos estos procesos son efectivos, presentan el inconveniente de tener una cinética demasiado lenta como para poder ser considerados útiles a nivel industrial. (Guerrero, 2006).

Los mecanismos más importantes de la degradación natural son:

- **Volatilización de las fases gaseosas:** depende de una disminución del pH y aumento de temperatura, mayor aireación, aumento de área de exposición y la presencia de catalizadores.
- **Oxidación natural:** el oxígeno disuelto que pueda contener una determinada solución oxida el ion cianuro a cianato, aunque lentamente en ausencia de catalizadores.
- **Adsorción por diversas fases minerales:** se ha demostrado que minerales como la bauxita, la ilmenita y la hematites poseen cierta tendencia a la adsorción de compuestos cianurados.
- **Degradación fotolítica:** la fotólisis es un proceso capaz de promover reacciones de oxidación/reducción proporcionando energía a partir de una radiación electromagnética que activa los procesos de transferencia de electrones.
- **Otros mecanismos naturales:** incluyen la oxidación biológica y las reacciones de hidrólisis, que pueden llegar a tener una importancia considerable en la detoxificación, dependiendo de las condiciones específicas de la solución.

#### **2.2.5.3. Formación de complejos de hierro**

El ion cianuro puede ser convertido a cianuro de hierro (II) o ferricianuro que es una forma sólida, estable (en presencia de luz ultravioleta) y no toxica mediante la adición de un exceso de una sal de  $\text{Fe}^{+2}$  (generalmente sulfato heptahidratado) en un rango de pH entre 7,5 y 10,5. La reacción que resume el proceso es la siguiente:



Los complejos de cianuro disociables en ácidos débiles son en estas condiciones (exceso de hierro) parcialmente disociados, en este sistema no es posible bajar la



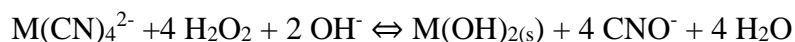
concentración de cianuro libre en la solución por debajo de 2,5 mg/L, el consumo de reactivo para una posible aplicación industrial es de entre 15 y 20 moles de sulfato de hierro (II) para neutralizar un mol de ion cianuro. (Alvares, 2005).

#### **2.2.5.4. Oxidación Química**

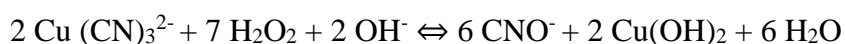
Los principales procesos de oxidación química para el tratamiento del cianuro incluyen el proceso de tratamiento con peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), el proceso de tratamiento con Ozono ( $\text{O}_3$ ), el proceso de cloración alcalina y el proceso con  $\text{SO}_2$ /Aire (desarrollado por la compañía minera canadiense INCO). También se han desarrollado dos métodos recientes para el tratamiento del cianuro cuyo uso nos es muy  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Gómez, 2012).

#### ➤ **Tratamiento con $\text{H}_2\text{O}_2$**

El peróxido de hidrógeno es un potente oxidante no contaminante, cuyo uso se ha extendido a lo largo de los años, siendo utilizado en numerosas instalaciones metalúrgicas de todo el mundo (sobre todo para tratamientos de efluentes cianurados residuales). y no requiere control de dicho parámetro, puesto que el  $\text{H}_2\text{O}_2$  sólo presenta un suave carácter ácido. Las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



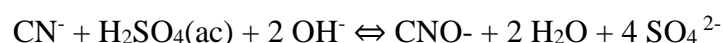
Complejos cianurados de metales como el Cu y Zn son oxidados, permitiendo la precipitación espontánea de los hidróxidos correspondientes en el rango de pH 9:



Todo el proceso se realiza en tanques abiertos. Aunque la reacción es homogénea (la cinética no se ve afectada por la agitación), la agitación es necesaria para realizar una buena mezcla del oxidante con el efluente, y evitar además la acumulación de precipitados en los tanques de reacción. Se requieren 1,31 gramos de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por gramo de CN oxidado, aunque actualmente, el consumo es de 2-8 gramos de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por gramo de CN oxidado. (Napier, 1991).

### ➤ **Tratamiento con “Acido de Caro”**

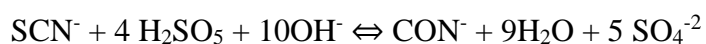
El ácido de Caro es una solución de H<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (ácido peroximonosulfúrico.) producido mezclando altas concentraciones de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (mínimo del 95 %) con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (concentración del 50-60 %). La reacción es casi instantánea y muy exotérmica obteniéndose a la salida una solución caliente (110-120 °C) .A pesar de ser un ácido, requiere la presencia de una base como el NaOH o Ca(OH)<sub>2</sub> , que tiene que ser añadida al efluente al mismo tiempo, para así poder mantener el pH de operación deseado (9-9,5). El proceso de oxidación es el siguiente:



Comparado con otros oxidantes (incluido el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), el ácido de Caro tiene una elevada velocidad de oxidación, no requiere adicción de catalizadores y es muy eficaz, tanto en soluciones claras como en fangos. (Napier, 1991).



El ácido de Caro, al contrario que H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es capaz de oxidar al tiocianato según la reacción.



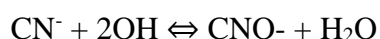
Esto constituye una ventaja particularmente importante para el reciclado de efluentes tratados que van a ser reenviados a lechos biológicos para tratamiento de menas de matriz sulfúrica. Mejora, además la precipitación de metales pesados al eliminar los complejos de  $\text{SCN}^-$  (Guerrero, 2006)

#### ➤ **Tratamiento con UV- $\text{H}_2\text{O}_2$**

En los últimos años, se ha prestado una especial atención en la literatura técnica al uso del  $\text{H}_2\text{O}_2$  fotoactivado para el tratamiento de efluentes industriales, sobre todo para la destrucción directa de disolventes orgánicos y cianuros. La irradiación de soluciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  con luz ultravioleta en frecuencias del rango de 254 nm causa la rotura de la molécula formando radicales libres OH:



Estos radicales tienen una vida corta, son muy reactivos y poseen un elevado potencial de oxidación ( $E^\circ = 2,8\text{v}$ ). Disponen, además, de una elevada movilidad en medio acuoso (similar a la de los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ ), reaccionando con los cianuros de acuerdo a la ecuación:



Son capaces de oxidar todos los compuestos de cianuro, incluidos los más estables de Fe.

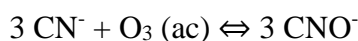
Aunque el proceso está aún en desarrollo, sus grandes ventajas le adjudican un elevado potencial. Es un proceso muy lento, pero de una gran efectividad, limpio y que sólo necesita añadir  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Uno de sus mayores inconvenientes radica en el hecho de que al necesitar el uso de fotoactivadores, se reduce su empleo a soluciones claras, puesto que la presencia de partículas en suspensión provocaría la absorción de la radiación y, por tanto, la reducción de la intensidad. (Napier, 1991).

### ➤ **Tratamiento con O<sub>3</sub>**

El ozono constituye una nueva alternativa para el tratamiento de los compuestos de cianuro. Sus mayores ventajas radican en que es un proceso muy rápido que consigue la completa descomposición de cianuros, cianatos y tiocianatos. Se une a lo anterior el hecho de requerir un bajo mantenimiento y la ausencia de transporte, almacenamiento o manejo de reactivos químicos, así como de producción de residuos químicos tóxicos. En este caso el reactivo a emplear es una mezcla de ozono y oxígeno (3 % en volumen) que es capaz de provocar fuertes condiciones oxidantes cuando es inyectado en forma de burbujas en una solución acuosa. El costo del uso de este método ha ido decreciendo de una manera constante gracias al aumento de su uso (Orcés y Pincay, 2009).

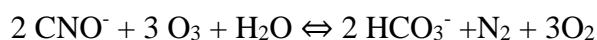
Debido a la baja solubilidad del O<sub>3</sub> en agua, y la baja concentración de O<sub>3</sub> disponible normalmente, la adecuada transferencia de masa a la solución para ser tratada requiere un contacto muy eficiente. Se hace necesario el estudio del efecto del pH, temperatura, velocidad de agitación y rango de flujo descendente en los coeficientes de transferencia de masa (Pinto, 2013).

Una revisión de la literatura sobre ozonización de soluciones acuosas de cianuro muestra que, la oxidación de 1 mol de cianuro es rápida y consume 1 mol de O<sub>3</sub> y produce 1 mol de cianato:



La primera reacción, denominada “ozonación simple”, libera oxígeno molecular que puede continuar el proceso de oxidación del cianuro. La segunda, denominada “ozonación catalítica”, es de alta eficiencia oxidante.

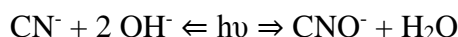
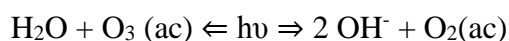
Posteriormente el cianato es oxidado lentamente por el ozono aún disponible según la reacción:



El consumo teórico de  $\text{O}_3$  para la completa oxidación del cianuro es de 1,85 gramos de  $\text{O}_3$  por gramo de  $\text{CN}^-$ . Los valores actuales están en el rango de 3-6 gramos de  $\text{O}_3$  por gramo de  $\text{CN}^-$ . Es necesario mantener un riguroso control del pH durante todo el proceso, ya que los iones hidronio pueden descomponer al ozono, siendo la oxidación menos efectiva a valores de pH mayores de 11. (Gomez, 2011).

Antes de que tenga lugar la oxidación, es necesaria la transferencia del  $\text{O}_3$  gaseoso a la solución.

La tendencia actual de la investigación es hacia una integración de la oxidación con ozono y la fotólisis asistida. Las reacciones debido a la formación de grupos  $\text{OH}^-$  y su consiguiente reacción con el ión cianuro, quedan como sigue:



. La “ozonación fotolítica” del cianuro consume 1 mol de ozono por mol de cianuro, incrementándose esa tasa a 5:1 cuando se producen los iones nitrito y nitrato. (Nava et al, 1993).

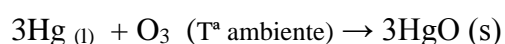
## **2.2.6. OZONO**

### **2.2.6.1. Definición**

El ozono ( $\text{O}_3$ ), es una molécula alotrópica, que está compuestas por tres átomos de oxígeno, formada al disociarse los 2 átomos que componen el gas de oxígeno. Cada átomo de oxígeno liberado se une a otra molécula de oxígeno ( $\text{O}_2$ ), formando moléculas de Ozono ( $\text{O}_3$ ). (Fajardo et al, 2003).

#### **2.2.6.2. Características del ozono**

- Es un gas de un color azulado
- Posee un olor picante y es algo tóxico
- Es un componente importante en el smog- fotoquímico
- Es altamente reactivo, por lo que sólo se genera cuando se necesita
- Es un agente oxidante bastante potente, un ejemplo de ello, es que puede oxidar al mercurio y de hecho una reacción para reconocer el ozono es:



#### **2.2.6.3. Usos y ventajas del ozono**

- Se utiliza como sustitúyete del Cl (g), en la purificación y tratamiento del agua, ya que el ozono no reacciona con hidrocarburos para dar compuestos clorados como el cloroformo, que son cancerígenos.
- Evita el olor desagradable y el característico sabor del Cl<sub>2</sub>, en el agua de consumo.
- Se usa como conservante.

#### **2.2.7. VARIABLES QUE AFECTAN LA DEGRADACIÓN DE CIANURO CON OZONO**

Las variables que afectan la degradación de cianuro presentes en efluentes de la industria de recuperación de oro y plata son: flujo de ozono, pH, temperatura, adición de cobre. Últimamente se están ampliando a otros variables como la adición de bentonita como agente catalítico, la presencia de rayos UV, y otros.

#### ***2.2.7.1. Efecto de la velocidad de adición de ozono***

Se ha establecido que una concentración de ozono en el aire burbujeado debe ser mínimo 3% en volumen. Se ha establecido que si la velocidad de adición de ozono permanece constante, la concentración inicial de ozono afecta la velocidad de oxidación del cianuro; solo afecta el tiempo necesario para la oxidación completa del cianuro. Esto corresponde a una cinética de orden cero con respecto a la concentración inicial de cianuro (Carrillo, 2000).

#### ***2.2.7.2. Efecto del pH***

Se ha demostrado que la destrucción total del cianuro se realiza en condiciones alcalinas, con pH mayor que 9,0. En el rango de pH de 9,0 a 11,7 la velocidad de oxidación de cianuro se mantiene similar. Conforme el pH se vuelve más ácido la velocidad de oxidación disminuye, haciéndose nula a pH cercanos a 2,0. Esto sugiere que el ácido hidrocianico formado por la hidrólisis del cianuro a valor de pH menores que 9,0 no es oxidado por el ozono (Carrillo, 2000).

#### ***2.2.7.3. Efecto de la temperatura***

Se conoce muy bien que la temperatura mejora la cinética de la reacción; sin embargo, la solubilidad del ozono disminuye cuando se incrementa la temperatura, y el efecto global es despreciables. Se debe considerar también que la máxima cantidad de ozono que se puede administrar depende de las características del generador de ozono.

#### ***2.2.7.4. Efecto de la presencia de cobre***

Es de particular importancia la presencia de cobre disuelto, el cual puede modificar completamente el comportamiento químico del cianuro. Se ha reportado que la presencia de cobre cataliza la oxidación del cianuro, disminuyendo el consumo de

ozono y el tiempo de reacción. El cobre se puede adicionar como sulfato cúprico y concentraciones menores que 80 mg de Cu/L afecta muy poco la cinética de la oxidación de cianuro (Lara, 1999).

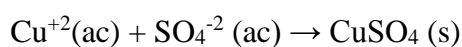
## **2.2.8. SULFATO DE COBRE**

### **2.2.8.1. Definición**

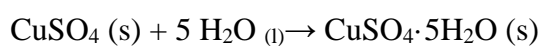
El Sulfato de Cobre o sulfato cúprico es un compuesto químico de fórmula  $\text{Cu}_2 \text{SO}_4$ . Se puede presentar en 2 formas principalmente: como sulfato de cobre (II) pentahidratado y como sulfato de cobre (I), (también llamado sulfato cuproso o sulfato de dicobre), según el estado de oxidación del átomo de cobre.

- Sulfato de cobre (I), también es conocido como sulfato cuproso o sulfato de dicobre es una sal insoluble blanca, el ión cobre se encuentra en estado de oxidación +1 y tiene la fórmula  $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ . Dado que el estado de oxidación +1 es muy inestable.
- Sulfato de cobre pentahidratado (II) es color azul y cambia rápidamente de temperatura al agregarle más agua. Su fórmula química ;  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; se obtiene de la siguiente manera.

Precipitación:



Hidratación:





#### **2.2.8.2. Características**

- Este compuesto se caracteriza por su color azul brillante, bien sea en forma de polvo o en forma de cristales, ya que puede ser comercializado en diferentes formas
- Tiene un sabor metálico nauseabundo y cuando se deshidrata se torna de color blanco. A medida que se calienta, comienza a descomponerse, teniendo un punto de fusión de 110°F con descomposición.
- Es posible encontrarlo de forma natural, y en ese caso recibe el nombre del mineral calcantita.
- Es una sal inorgánica que no presenta olor y tiene una estructura de vitriolo azul.
- A medida que se le agrega agua a este compuesto, comienza a presentar varios cambios de temperatura, una de las características más notables de este químico.
- No obstante, es un compuesto que no es combustible, pero cuando se calienta hasta comenzar la descomposición puede emitir vapores o humos que son tóxicos para el ser humano.

#### **2.2.9. MARCO LEGAL**

- **LEY GENERAL DEL AMBIENTE - LEY N° 28611**

### **CAPÍTULO 3: CALIDAD AMBIENTAL**

#### **Artículo 113. De la Calidad Ambiental**

**113.2** Son objetivos de la gestión ambiental en materia de calidad ambiental: a. Preservar, conservar, mejorar y restaurar, según corresponda, la calidad del aire, el agua y los suelos y demás componentes del ambiente, identificando y controlando los factores de riesgo que la afecten.

## **Artículo 120.- De la protección de la calidad de las aguas**

**120.1** El Estado, a través de las entidades señaladas en la Ley, está a cargo de la protección de la calidad del recurso hídrico del país.

Tabla 1

*Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite en cualquier momento</b>	<b>Límite para el Promedio anual</b>
p H		6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
<b>Cianuro Total</b>	<b>mg/L</b>	<b>1,0</b>	<b>0,8</b>
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio 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	2,0	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

*Nota.* Recuperado de : (DS N°010-2010-MINAM- ANEXO 1).

➤ **DS-010-2010-MINAM-QUE APRUEBAN LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LIQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO METALÚRGICAS.**

## **Artículo 5.- Prohibición de dilución o mezcla de efluentes.**

No está permitido diluir el efluente líquido con agua fresca antes de su descarga a los cuerpos receptores con la finalidad de cumplir con los LMP establecidos en el artículo 1 del presente Decreto supremo

## 2.2.10. GLOSARIO DE TÉRMINOS EMPLEADOS

- **Efluente Minero:** Vertido solido o liquido producido sobre una masa de agua, constituido por sustancias o productos perjudiciales para el medio ambiente.
- **Ion Cianuro:** este término se refiere únicamente al anión libre  $\text{CN}^-$  en solución.
- **Iones de cianuro:** Ion monovalente que contiene el grupo cianuro; el cual consiste de un átomo de carbono con un enlace triple con un átomo de nitrógeno.
- **Proceso MacArthur-Forrest:** Técnica de extracción de oro, convirtiendo el oro en iones metálicos complejos solubles en agua.
- **Compuestos simples de cianuro:** Compuestos iónicos que se disocian directamente en el agua liberando un catión y un ion cianuro. Proviene de sales obtenidas en reacciones acido-base.
- **Compuestos complejos de cianuro:** Compuestos que se disocian en el agua liberando un catión y un anión que contiene ion cianuro. El anión, denominado complejo, puede seguir disociándose produciendo en última instancia un catión y varios iones cianuro (por ejemplo, el  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$  o triciano cuprito).
- **Organocianuros:** Compuestos orgánicos que contienen el grupo  $-\text{C}\equiv\text{N}$ ; se los denomina también nitrilos o cianuros.
- **Cianuro disociable con ácido débil o cianuro WAD:** Término analítico utilizado para designar a los compuestos de cianuro que se disocian bajo reflujo con un ácido débil (normalmente a pH 4,5).
- **Cianuro disociable con ácido fuerte o cianuro SAD:** Término analítico utilizado para designar a compuestos cianurados que resisten el ataque de un ácido débil, pero que se disocian en presencia de un ácido fuerte a bajo pH (en torno a 2,0 )

- **HCN molécula:** Es una molécula neutra a la que se denomina ácido cianhídrico o cianuro de hidrógeno. Es un líquido o gas incoloro con un punto de ebullición de 25.7°C. Se trata de un ácido débil altamente soluble en agua.

### III. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN:

Experimental

#### 3.2. VARIABLES

**INDEPENDIENTE:** Concentración de  $\text{Cu}^{+2}$  y Cantidad de ozono

**DEPENDIENTE:** Degradación del Cianuro (%)

#### 3.3. DISEÑO DE CONTRASTACIÓN

Tabla 2  
*Diseño factorial 3x3*

Factor A Cantidad de ozono (g)	Factor B Concentración de Cobre		
	0 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
1,5	A1-B1	A1-B2	A1-B3
2,0	A2-B1	A2-B2	A2-B3
2,5	A3-B1	A3-B2	A3-B3

*Nota.* Elaboración propia

Diseño tipo factorial 3x3, con 3 repeticiones = 27 ensayos. .

### 3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.4.1. POBLACIÓN

200 litros del efluente del proceso de lixiviación MacArthur- Forrest de la unidad Minera Cerro Lindo provincia de Chinchá, Departamento Ica.



Figura 2. Ubicación geográfica-Unidad Minera Cerro Lindo-Nexa

#### 3.4.2. MUESTRA

1,9 lt de efluente,/ensayo ,de los cuales se tomó 10 ml para los diferentes análisis.

### 3.5. EQUIPOS Y MATERIALES DE LABORATORIO

#### 3.5.1. MATERIALES

- **Tamiz de malla fina:** Marca Cotest, 300 aberturas por pulgada cuadrada.
- **Probetas:** Marca Simax, de 500 y 1000 ml
- **Vaso de precipitación:** Marca Pirex, de 10 ml y 1000 ml, y bagueta de mezclado
- **Pipeta:** Marca Iva, de 1 ml

### 3.5.2. EQUIPOS

- **Balanza:** Marca BH-300 Excell, con capacidad de 0 a 1 g. Precisión 0,001 g
- **Reactor de ozonización tubular:** Provisto de compresora inyectora de aire de 100 L/hora. Reactor tipo cilíndrico de 7,62 cm de diámetro y 46,05 cm de alto. Volumen de trabajo 1,9 litros y volumen total 2,1 litros.
- **pH-metro:** Marca SD-50 pH-Lovibond, rango 0,00 a 14,00, resolución 0,01
- **Generador de ozono:** modelo CH-KTA-3G. Flujo 1.00 pie<sup>3</sup>/min; regulación con tres concentraciones de ozono: 3, 9 y 15 mg de ozono/litro.
- **Fotómetro multiparamétrico de sobremesa:** Modelo C 200, Hanna, Rango 0,000 a 0,200 mg/L, resolución 0,001 mg/L, precisión  $\pm 0,005$  mg/L, desviación  $\pm 0,001$  mg/L. Diodo emisor de luz a 610 nm.
- **Fotómetro Hanna C200**

### 3.5.3. REACTIVOS

- Reactivo A de Cianuro ( código: HI 93714A-0)
- Reactivo B de Cianuro ( código: HI 93714B-0)
- Reactivo C de Cianuro ( código: HI 93714C-0)
- NaOH,0,1N
- SO<sub>4</sub>Cu.5H<sub>2</sub>O
- Ozono

### **3.6. MÉTODOS**

#### **3.6.1. REACTOR DE OZONIZACIÓN**

Se construyó un reactor de ozonización de 2,1 litros de capacidad total , al cual se adiciono 1,9 litros de efluente . El reactor fue tipo cilindro vertical con 7,62 cm de diámetro y 49,05 cm de alto. En la parte inferior se adaptó la alimentación de ozono con un difusor de 2,5 cm de piedra porosa. Al reactor cilíndrico se colocó una tapa superior con una salida de 0,3 cm de diámetro. Se adaptó un tomamuestra a una altura de 40 cm desde la entrada del difusor.



*Figura 3. Reactor Tubular. Elaboracion propia*

#### **3.6.2. OBTENCION DE LA MUESTRA**

Se tomó muestras diarias de 40 litros/ 5 días por un tiempo de 8h del efluente del Proceso MacArthur-Forrest de la Unidad Minera Cerro Lindo, Chincha. Cada bidón con 40 litros de muestra se guardó regulando el pH a mínimo 11,5 para su conservación, además de mantenerlo bajo refrigeración. Se hizo la mezcla de todo lo recolectado

(40x5= 200 litros) y se filtró hasta obtener una muestra final combinada de 55 litros que fueron transportados para hacer los ensayos en laboratorio químico metalúrgico de la unidad minera Cerro Lindo, Chíncha y 5 litros de muestra al laboratorio fisicoquímico de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque.

### **3.6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DEL EFLUENTE DEL PROCESO MACARTHUR- FORREST.**

Se realizó el análisis del efluente para determinar la cantidad de cianuro total, utilizando el método de ASTM.

### **3.6.4. DOSIFICACIÓN DEL COBRE Y OZONO.**

Se realizó cálculos para dosificar la cantidad de  $\text{Cu}^{+2}$  como sulfato de cobre pentahidratado a tres niveles: 0; 200 y 400 mg/L. El ajuste del generador de ozono se regulo para el volumen utilizado en cada ensayo (1,9 litros), a tres concentraciones (3, 9 y 15 mg/L) y se alimentó durante 18, 8 y 6 minutos respectivamente, dando una dosificación total de 1,5; 2,0 y 2,5 g  $\text{O}_3$ / min. . (Ver cálculos en el Apéndice).

El proceso se describe en la figura 4.



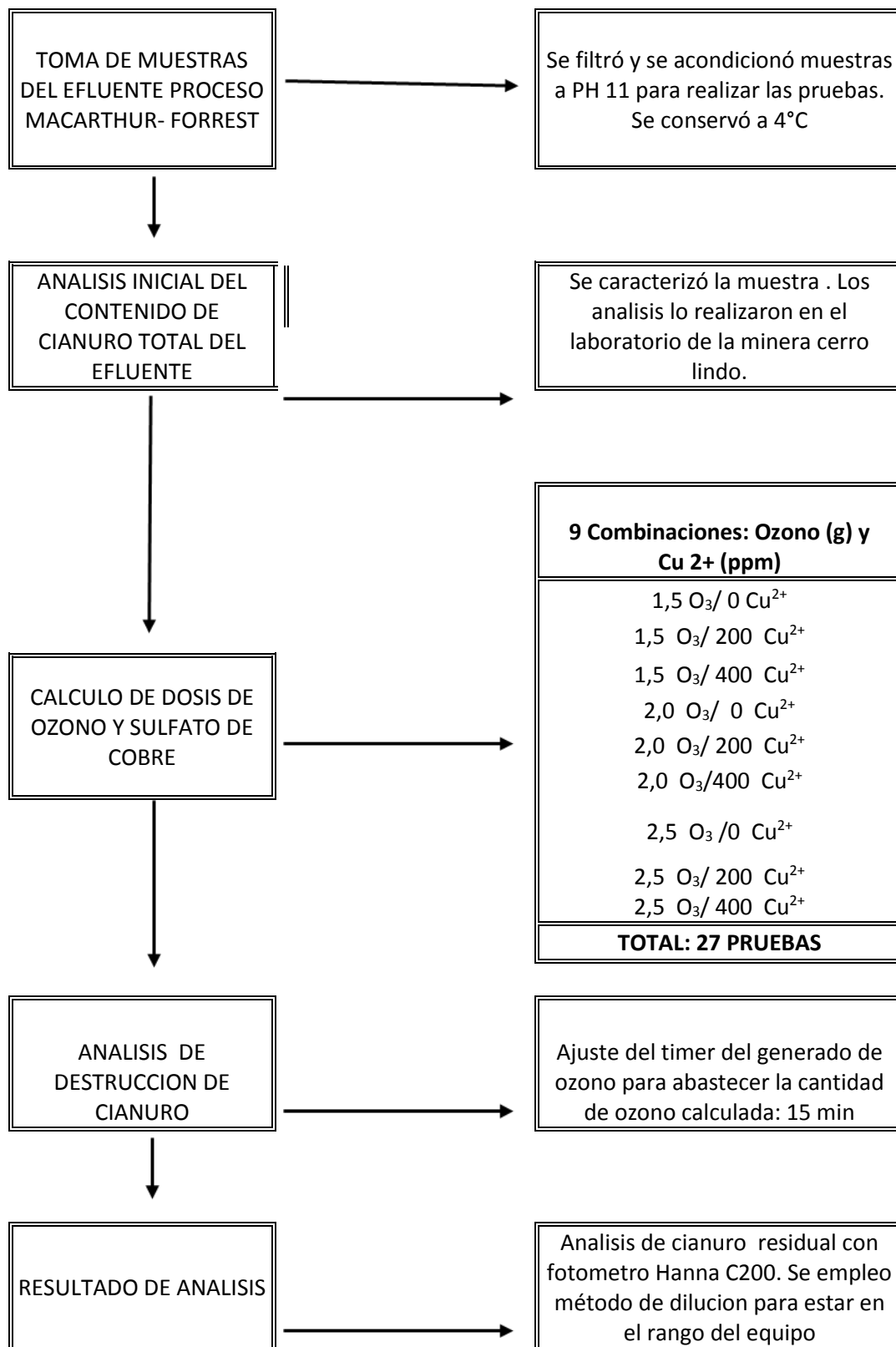


Figura 4. Flujograma de la dosificación de O<sub>3</sub> y Cu<sup>2+</sup>. Elaboracion propia

Terminada las pruebas de las nueve combinaciones, con tres repeticiones cada una, se procedió al análisis de líquido residual. En razón que el fotómetro Hanna C200 tiene un rango de lectura de 0,000 a 0,200 mg/L, para algunas lecturas se tuvo que emplear el método de dilución. (Ver Apéndice).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1. RESULTADOS

#### 4.1.1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE MINERO DEL PROCESO MACARTHUR-FORREST

Correspondiente a muestras de 10 ml

Tabla 3

*Caracterización del efluente del Proceso MacArthur-Forrest de la unidad Minera Cerro Pinto*

Parámetro	Valores	Método de Análisis	DS N° 010-2010-MINAM
<b>Flujo</b> (m³/h)	150,00		
<b>pH</b>	10,30	ASTM D1293- 84(1990)	6 - 9
<b>CN<sup>-</sup> total</b> (mg/l)	<b>235,44</b>	ASTM D2036-91	1,00
<b>Conductividad</b> (µS/cm)	5800.00	ASTM D1125-95	
<b>Cu<sup>+2</sup></b> (mg/l)	25,00	Método 8506 de bicinconinato	0,50
<b>Hierro</b> (mg/l)	15,00	Método 8008, FerroVer	2,00

*Nota.* Reporte de laboratorio Minero Metalúrgico UMCP MET

#### 4.1.2. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CN<sup>-</sup> TOTAL DESPUÉS DEL TRATAMIENTO O<sub>3</sub> y Cu<sup>+2</sup>

Ver cálculos en anexo.

Tabla 4

*Eficiencia de remoción de CN<sup>-</sup> total*

Concentración Cu <sup>+2</sup>			
Concentración O <sub>3</sub> (g)	0 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Eficiencia (%) del CN <sup>-</sup> ****			
* 1,5	83,26	93,39	97,57
**2,0	95,85	98,87	99,27
***2,5	98,98	99,88	99,93

*Nota.* \* regularizado 3mg/L , \*\* regularizado 9mg/L, \*\*\* regularizado 15 mg/L.  
Elaboración Propia.

$Eficiencia \% = \frac{(CNi - CNf)}{CNi} \times 100$
--

#### 4.1.3. PROCESO DE DEGRADACIÓN DEL CIANURO (CN<sup>-</sup>) DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON O<sub>3</sub> Y CU<sup>+2</sup>

Tabla 5

*Concentración de CN<sup>-</sup> total después del tratamiento, promedio y desviación estándar*

		Concentración Cu <sup>+2</sup>		
Concentración O <sub>3</sub> (g)		0 mg/L	200 mg/L	400mg/L
		CN <sup>-</sup> (mg/L)		
* 1,5		38,60	15,45	5,70
		37,40	16,50	5,25
		42,20	14,70	6,15
	X	39,40	15,55	5,70
	σ	2,50	0,90	0,45
** 2,0		9,75	2,70	1,35
		9,45	2,85	2,10
		10,05	2,40	1,65
	X	9,75	2,65	1,70
	σ	0,30	0,23	0,38
***2,5		1,80	0,24	0,19
		2,40	0,28	0,14
		3,00	0,23	0,17
	X	2,40	0,25	0,17
	σ	0,60	0,03	0,03

Nota. \* Regularizado 3mg/L; \*\* regularizado 9mg/L; \*\*\* regularizado 15 mg/L

Tabla 6

*Promedios de la concentración de CN<sup>-</sup> total después del tratamiento*

		Concentración Cu <sup>+2</sup>		
Concentración O <sub>3</sub> (g)		0 mg/L	200 mg/L	400mg/L
		CN <sup>-</sup> (mg/L)		
* 1,5		39,40	15,55	5,70
** 2,0		9,75	2,65	1,70
***2,5		2,40	0,25	0,17

Nota. \* Regularizado 3mg/L; \*\* regularizado 9mg/L; \*\*\* regularizado 15 mg/L.  
Elaboración propia

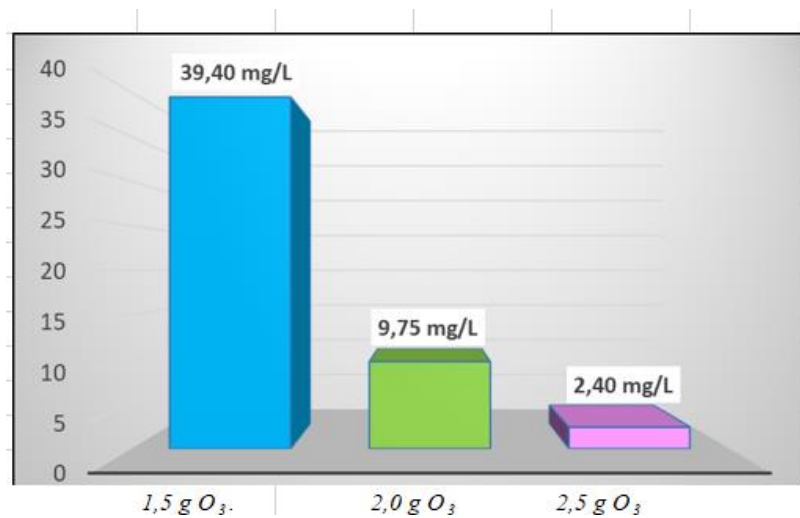


Figura 5. Concentración de  $CN^-$  en el efluente con  $Cu^{+2}$  (0 mg/L) y ozono .Elaboración propia

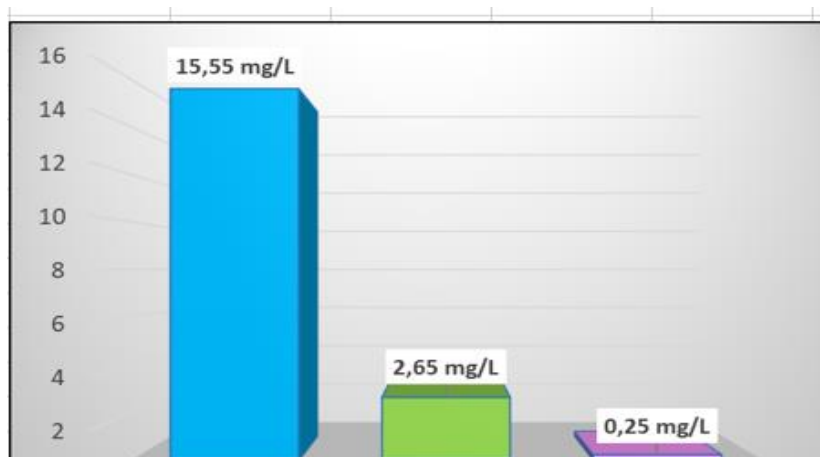


Figura 6. Concentración de  $CN^-$  en el efluente con  $Cu^{+2}$  (200 mg/L) y ozono .Elaboración propia

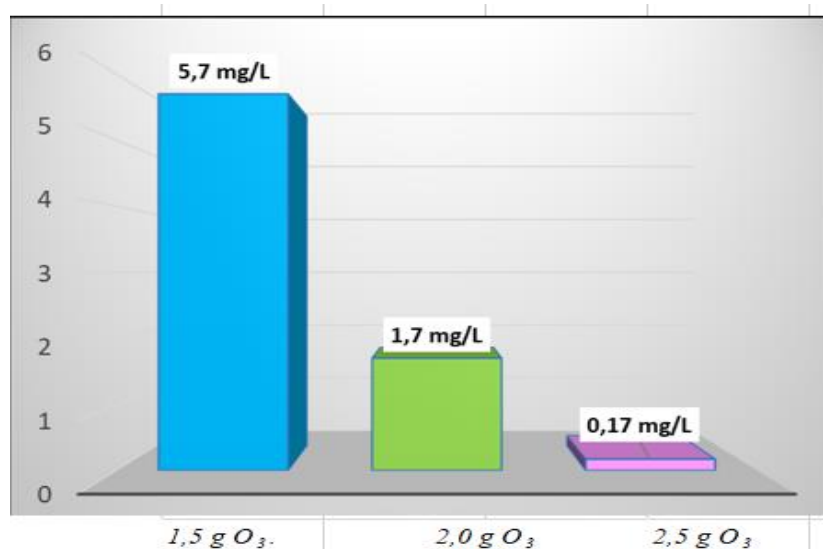


Figura 7. Concentración de CN<sup>-</sup> en el efluente con Cu<sup>+2</sup> (400 mg/L) y ozono  
.Elaboración propia

Tabla 7

*Análisis Anova de 2 factores del efecto de las concentraciones de ozono y Cu<sup>+2</sup> sobre la degradación de CN<sup>-</sup> presente en el efluente minero*

Origen	Tipo III de suma de				
	cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1221,913 <sup>a</sup>	4	305,478	6,329	,051
Intersección	1092,743	1	1092,743	22,640	,009
Ozono	398,446	2	199,223	4,128	,107
Cu <sup>+2</sup>	823,467	2	411,733	8,531	,036
Error	193,063	4	48,266		
Total	2507,719	9			
Total corregido	1414,976	8			

Nota. R<sup>2</sup> = 0,864 (R<sup>2</sup> ajustada = 0,727). Elaboración propia

## 4.2. DISCUSIÓN

- La tabla 3, muestra la caracterización del efluente de la Mina Cerro Lindo con  $\text{CN}^-$  total (235,44 mg/l),  $\text{Cu}^{+2}$  (25mg/l), Hierro (15mg/l), y un pH (10), que excedieron el límite máximo permisible para descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero Metalúrgicas según el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM.
- En la tabla 4, la eficiencia de remoción del  $\text{CN}^-$  después del tratamiento con  $\text{O}_3$  y  $\text{Cu}^{+2}$  tiene una eficiencia del 83,26 - 99,92% valores cercanos a Carrillo (2000) que reporta 99,22% ; Parga, Shukla & Carrillo(2003) 99.65% y Gaviria y Meza, (2006) 96,90%
- la Tabla 5 y 6 muestra la concentración del  $\text{CN}^-$  total en el efluente después del tratamiento de  $\text{O}_3$  y  $\text{Cu}^{+2}$  , alcanza estar por debajo del LMP del DS N° 010-2010-MINAM con 2,5 gramos de  $\text{O}_3$  con 400 mg/L  $\text{Cu}^{+2}$  , un promedio 0,17 mg/L y presenta una desviación estándar de 0,03 siendo la menor variabilidad en comparación de 39.40 que presenta una desviación estándar de 2,50 , valores que difieren de Gaviria & Meza, (2006 ) que utiliza 5g  $\text{O}_3$  .
- Tal como se observa en la figura 5 el efluente con cianuro y con adición de ozono y sin la presencia de iones de  $\text{Cu}^{+2}$  (0 mg/L), el promedio de las muestras sobrepasaron el LMP (límite máximo permisible) (DS. 010-2010-MINAM).Al incrementar la cantidad de ozono , la concentración del cianuro va disminuyendo de una concentración inicial de 235,44 mg/l a 2,40 mg/L . Nava, Elorza, Uribe y Barriga, (2013) utilizan una solución sintética alcalina(pH 10,7) de 240 mg/L de cianuro tratada con 5,19 L/min oxígeno conteniendo 10,5 g  $\text{O}_3/\text{Nm}^3$  (velocidad de adición de ozono 0,04 g  $\text{O}_3/\text{min}$ ) la cual oxida completamente el cianuro en un tiempo de 20 minutos. Orcés y Pincay, (2009) tratan con ozono aguas contaminadas

con cianuro en un reactor químico, reportando que las concentraciones iniciales de cianuro de 61; 22 y 39 milimol/litro; se redujeron a 44,89; 19,39 y 20,37 milimol/litro respectivamente en los primeros 20 minutos.

- En la figura 6 el efluente con cianuro, con adición de ozono y con 200 mg/L  $\text{Cu}^{+2}$  como catalizador, la degradación del cianuro fue de 235,44 mg/L a 15,55; 2,65 y 0,25 mg/L -, en el cual el  $\text{Cu}^{+2}$  actúa en tiempos de 18, 8 y 6 min respectivamente. Se demostró que con 2,5 g  $\text{O}_3$  y 200 mg/L de  $\text{Cu}^{+2}$  se alcanza valores de  $\text{CN}^-$  por debajo del LMP (DS. 010-2010-MINAM). Nava, Elorza, Uribe y Barriga, (2013), reportan que con concentraciones de  $\text{Cu}^{+2}$  mayores de 80 mg/L, la velocidad de oxidación de cianuro se incrementa.
- En la figura 7 el efluente con cianuro, con adición de ozono y con 400 mg/L  $\text{Cu}^{+2}$  como catalizador, la degradación fue de 235,44 mg/L  $\text{CN}^-$  a 5,70; 1,70 y 0,17 mg/L  $\text{CN}^-$ . Se demostró que con 2,5 g  $\text{O}_3$  y 400 mg/L de  $\text{Cu}^{+2}$ , se alcanza valores de  $\text{CN}^-$  por debajo del LMP (DS. 010-2010-MINAM). Gaviria & Meza, (2006), reportan que 5 g de  $\text{O}_3$  degradan el  $\text{CN}^-$  en un tiempo de 40 minutos con 96,90% de eficiencia
- De tabla 7, la prueba Anova de 2 factores ha permitido evidenciar que no hay diferencia de medias ni tampoco interacción entre los factores fijos, ozono y  $\text{Cu}^{+2}$ . Se confirma la hipótesis que el ozono por sí solo puede degradar al cianuro si se incrementa su concentración,



## **V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

El efluente de la unidad Minera Cerro Lindo tuvo un pH (10,30),  $\text{CN}^-$  total (235,44 mg/L),  $\text{Cu}^{+2}$  (25mg/L) , Hierro (15mg/L), que exceden el límite máximo permisible para descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero Metalúrgicas según el D. S N° 010-2010-MINAM

Se construyó un reactor tubular 2,1 litros de capacidad total con un volumen trabajo de 1,9 litros, en el cual se realizó el proceso de ozonificación a diferentes concentraciones.

La adición de ozono y  $\text{Cu}^{+2}$  como catalizador al efluente consiguen degradar al (CN). con eficiencias de 83,26– 99,93 % y una concentración de 2,5 g de  $\text{O}_3$  y 400 mg/l  $\text{Cu}^+$  logra un valor de 0,17 mg/L de cianuro ( $\text{CN}^-$ ) , menor al límite máximo permisible (1mg/L)según DS N° 010 -2010 MINAM.

### **5.2. RECOMENDACIONES**

- Estudiar otros posibles catalizadores para una mejor eficiencia de la aplicación de ozono como agente oxidante de cianuro: luz UV, sales de hierro y bentonitas.
- Se recomienda aplicar el proceso de degradación del cianuro con ozono y  $\text{Cu}^{+2}$ , por ser óptimo y aplicar tecnologías limpias, y así evitar efectos negativos nocivos al medio ambiente.
- Implementar un sistema de gestión ambiental para el manejo adecuado del cianuro, tanto en su almacenamiento, proceso y descarga.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Álvarez, R., Ordóñez, A. & Loredó, J. (2004). Proceedings of the 1st International Conference “*Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology*”. Recuperado de <http://www.balajimotors.in/25124/procesos-para-la-separacion-del-oro-y-la-plata.html>.
- Carrillo, P. (2000). Estudio cinético de la oxidación de cianuro y tiocianato con ozono. *Waste Management*, 23, 183-191
- Domic, M. (2011). Fundamentos, procesos y aplicaciones, Perú *Revista, Hidrometalurgia*, 2(3), 15-26.
- Fajardo, J., Burbano, D., Burbano, E., Apraez, N. y Moreano, 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 Nariño. *Revista Luina Azul ISSN*, (2)31, 8-16.
- Gómez, L. (2012). Degradación de Cianuros mediante Oxidación Química en Efluentes Industriales. (Tesis de Pregrado). Universidad de Oviedo, España
- Orcey, E y Pincay, G. (2009). Desarrollo de un reactor químico para tratar aguas contaminadas de cianuro con ozono. (Tesis de Maestría). Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- Nava, F., Elorza, E. y Barriga, F. (2013). Eliminación de Cianuro por Oxidación con Ozono, *Revista, El Ingeniero de Minas*, 15(28), 12-20.
- Guerrero, J. (2006). Cianuro, Toxicidad y Destrucción Biológica, Perú, *Revista, El Ingeniero de Minas*, 10(35), 23-25.
- Huiatt, J. (2003). Workshop, Cyanide from Mineral Processing, Utah Mining and Mineral Resources Institute, Salt Lake City, UT. Logsdon, M., Hagelstein, K., y Mudder, T. (2011). El manejo del cianuro en la extracción de oro. *International Council on Metals and the Environment*, 1(24), 12-19.
- Marsden, J. & House, I. (2002). The Chemistry of Gold Extraction, *Ellis Horwood, New York*, 4(39), 27-35.
- Nava, F., Uribe, A., & Perez, R. (2013). Use of ozone in the treatment of cyanide containing effluents. *The European journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 3(3), 316-323.
- Parga, J., Shukla, S. & Carrillo, F. (2003). Destruction of cyanide waste solutions

- using chlorine dioxide, ozone and titania sol. *Waste Management*, 23, 183-191.
- Pinto, V. 2013. Estudio sobre la cinética de reacción del gas ozono (O<sub>3</sub>) con iones de cianato (CNO<sup>-</sup>) en aguas residuales del proceso Macarthur-Forrest. (Tesis de Pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Smith, A. y Mudder, T. (1991). Tratamiento de residuos de cianuración, *Revista, Mining Journal Boocks Limited*, 3(5) ,42-50.
- Young, C. (2011). Remediation technologies for the management of aqueous cyanide species. UK, *Revista, Industrial and Economic Aspect. TMS. Warrendale*, 20(35), 175-194.
- Gómez, V. (2011). Metalurgia del Oro. (Tesis de Maestría). Universidad de Oviedo de España.
- Gaviria & Meza. (2006), Cyanide degradation in cyanuration effluents. (Tesis de Pregrado). Universidad de los Andes, Colombia.
- Quispe, L. (2011). Eliminación de cianuro mediante sistema combinado UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>, *Revista boliviana de química*, 28(2), 11-25.
- Hussein, M., Amer, A., & Sawsan, I. (2008). Natural Degradation of Cyanides in Gold Milling Effluents, 82, 205 – 211.
- Kauppi, S. (2011). *Introducción a la Teoría de los Reactores Químicos*, (Tesis de pregrado). Universidad de Oviedo.
- Lim, T y Huang, X. (2007). Cinética de los Procesos de la Metalurgia Extractiva, *Revista, EL Minero*, 3(10). 955- 963.
- Martinez, C., Rodríguez, I., Esperanza, G., y Leiva, J. (2013). Caracterización y evaluación del cianuro, 71 (565), pp. 57 - 62.
- D.S.010-2010-MINAM. Limites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgica. Recuperado del Diario el peruano (21 de Agosto del 2010) <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/37789>.
- D.S.004-2017-MINAM. Estándares de calidad (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. Recuperado del diario el peruano (07 de Junio del 2017). <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Ley N° 28611. Ley General del Ambiente Recuperado del Diario El Peruano (15 de Octubre del 2005). <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf>

Mohammed, R., Ibrahim, A., Taha, H., & McKay, G. (2013). The Removal of Cyanide from aqueous solution by the use of Ferrous Sulphate, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 3(220), 343-351.

## ANEXOS

### ANEXO I

**A.1.** Materiales usados en la construcción del reactor de ozonificación para llevar a cabo el proceso de influencia del ozono y cobre.



(a)



(b)

*Figura 8.* (a) Depósito tipo cilíndrico vertical acrílico, en donde se llevará a cabo la reacción, (b) Conexión de la alimentación de ozono con difusor de piedra porosa. Elaboración propia



*Figura 9.* Generador de ozono, modelo CH-KTA-3G. Elaboración propia



*Figura 10.* Toma de muestra de la desembocadura del efluente de la Unidad minera. Elaboración propia.

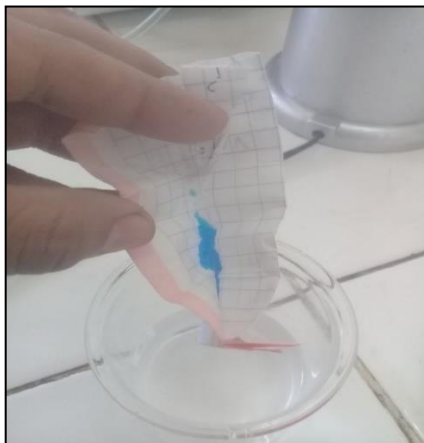


(a)



(b)

*Figura 11 (a).* Punto 2 de la toma de muestra de la desembocadura del efluente de la Unidad minera Cerro Lindo. *(b).* Una muestra final del efluente de la unidad Cerro Lindo (5 lt). Elaboracion propia



(a)



(b)

*Figura 12.* *(a)* Sulfato de cobre disuelto en muestra. *(b)* Reactor con adición de ozono. Elaboracion propia



(a)



(b)

Figura 13. (a) Muestra 10ml para el espectrómetro. (b) Reactivo de cianuro HI 93714B. Elaboración propia



Figura 14. Lectura del fotómetro. Elaboración propia

## A.2. CALCULOS

### A.2.1. Cálculo de la dosificación de sulfato de cobre

a)  $200 \text{ ppm Cu}^{+2} = 200 \text{ mg/L}$

Volumen de trabajo: 1,9 litros

Peso de  $\text{Cu}^{+2}$ :  $200 \times 1,9 = 380 \text{ mg}$

Peso de sulfato de cobre pentahidratado:  $249,68 \text{ g/mol}$

Peso del cobre:  $63,546 \text{ g/mol}$

Porcentaje de cobre en el sulfato de cobre pentahidratado:

$$(63,546/249,68) \times 100 = 25,451\%$$

Peso de Sulfato de cobre pentahidratado para el ensayo:

$$380/0,25451 = 1493 \text{ mg} = 1,493 \text{ gramos}$$

b)  $400 \text{ ppm Cu}^{+2} = 400 \text{ mg/litro}$

$$\text{Peso de Cu}^{+2} = 400 \times 1,9 = 760 \text{ mg}$$

Peso de Sulfato de cobre pentahidratado para el ensayo:

$$760/0,25451 = 2986 \text{ mg} = 2,986 \text{ gramos}$$

## A.2.2 Dosificación de ozono

Según catálogo de fabricante:

### Overview

#### Quick Details

Power Source: Electrical generator	Type: Ozone Generator, Household ozone
Installation: Portable	Certification: CE, RoHS
Capacity (CFM): 1.00	Power (W): 60
Voltage (V): 220	Place of Origin: Guangdong, China (Mainland)
Brand Name: QLOZONE	Model Number: CH-KTA-3G
Housing: high grade stainless Steel	Warranty: 12 months from date of purchase
Ozone concentration: 3-9-15 mg/L	Application: air purifier, water treatment
Timer: 0-120 Minutes	Size: 330*160*210mm
Net weight: 3.2kg	Advantage: factory after-sale technology support
Accessories: 3meters high grade 5*9mm silicon tube, 1 air stone	

$$\text{Flujo: } 100 \text{ CFM: } 1 \text{ pies}^3/\text{min} = 28,317 \text{ litros/min}$$

(a) Según la concentración: 3 mg/L

$$\text{Flujo de ozono: } 3 \times 28,317 = 84,951 \text{ mg/min}$$

Tiempo de adición: 18 minutos

$$\text{Total de ozono agregado: } 18 \times 84,951 = 1529,118 \text{ mg} = 1,529 \text{ gramos}$$

SE CONSIDERA: 1,5 gramos



Ozono requerido:

Teórico: 1,85 gramos de ozono por gramo de  $\text{CN}^-$

Práctico: 3 – 6 gramos de ozono por gramo de  $\text{CN}^-$

Ozono teórico:  $(235,44 \times 1,9 \times 1,85) / 1000 = 0,827$  gramos

Ozono intermedio recomendable:

$$(235,44 \times 1,9 \times 3) / 1000 = 1,342 \text{ gramos}$$

Ozono máximo recomendable:

$$(235,44 \times 1,9 \times 6) / 1000 = 2,684 \text{ gramos}$$

(b) Según la concentración: 9 mg/L

Flujo de ozono:  $9 \times 28,317 = 254,853$  mg/min

Tiempo de adición: 8 minutos

Total de ozono agregado:  $8 \times 254,853 = 2038,824$  mg = 2,038 g

SE CONSIDERA: 2 gramos

(c) Según concentración: 15 mg/L

Flujo de ozono:  $15 \times 28,317 = 424,755$  mg/min

Tiempo de adición: 6 minutos

Total de ozono agregado:  $6 \times 424,755 = 2548,53$  mg = 2,548 g

SE CONSIDERA: 2,5 gramos

### A.2.3. DATOS OBTENIDOS DE LAS LECTURAS DEL FOTÓMETRO

Tabla 8

*CN<sup>-</sup> obtenidos de las lecturas del fotómetro Hanna C200*

Concentración de Cu <sup>+2</sup>			
Concentracion O <sub>3</sub> (g)	0 mg/l	200 mg/l	400 mg/l
Concentración de CN <sup>-</sup>			
<b>*1.5</b>	0,193*	0,103	0,038
	0,187*	0,110	0,035
	0,211*	0,098	0,041
<b>**2.0</b>	0,065	0,018	0,009
	0,063	0,019	0,014
	0,067	0,016	0,011
<b>***2.5</b>	0,012	0,024**	0,019**
	0,016	0,028**	0,014**
	0,02	0,023**	0,017**

*Nota.\** Dilución 1/200; El resto de valores con dilución 1/150; *\*\**Dilución 1/10. Elaboración propia

Tabla 9

*Concentración de CN<sup>-</sup> total después del tratamiento con ozono y Cu<sup>+2</sup> del efluente del Proceso MacArthur-Forrest de la mina Cerro Lindo.*

Concentración Cu <sup>+2</sup>			
Concentracion O <sub>3</sub> (g)	0 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Concentración CN <sup>-</sup> (mg/l)			
<b>*1,5</b>	38,60	15,45	5,70
	37,40	16,50	5,25
	42,20	14,70	6,15
<b>**2,0</b>	9,75	2,70	1,35
	9,45	2,85	2,10
	10,05	2,40	1,65
<b>***2,5</b>	1,80	0,24	0,19
	2,40	0,28	0,14
	3,00	0,23	0,17

*Nota.\** Dilución 1/200; El resto de valores con dilución 1/150; *\*\**Dilución 1/10. Elaboracion propia

Tabla 10

*Promedio de las concentraciones de CN<sup>-</sup> total después del tratamiento con ozono y Cu<sup>+2</sup> del efluente del Proceso MacArthur-Forrest de la mina Cerro Lindo*

Concentracion Cu <sup>+2</sup>			
Concentracion O <sub>3</sub> (g)	0 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Concentración CN <sup>-</sup>			
* 1,5	39,40	15,55	5,70
** 2,0	9,75	2,65	1,70
***2,5	2,40	0,25	0,17

Nota. \* regularizado 3mg/L; \*\* regularizado 9mg/L; \*\*\* regularizado 15 mg/L. Elaboración propia

La eficiencia de remoción del CN<sup>-</sup> total después del tratamiento combinado de ozono y Cu<sup>+2</sup> se obtuvo con la fórmula:

$$\frac{CNi - CNf}{CNi} * 100$$

Donde:

CNi: valor inicial del contenido de CN<sup>-</sup> total,mg/L

Vf: valor final del contenido de CN<sup>-</sup> total, mg/L

El valor inicial de la concentración de CN<sup>-</sup> total fue en promedio 235.44 mg/L.

Tabla 11

*Eficiencia de remoción de CN- total después del tratamiento con Ozono y Cu<sup>+2</sup>*

Concentración Cu <sup>+2</sup>			
Concentracion O <sub>3</sub> (g)	0 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Eficiencia (%) del CN <sup>-</sup> ****			
*1,5	83,26538	93,39534	97,57900
**2,0	95,85882	98,87445	99,27795
***2,5	98,98063	99,88957	99,92779

Nota. \* regularizado 3mg/L , \*\* regularizado 9mg/L, \*\*\* regularizado 15 mg/L. Elaboración propia

## **ANEXO II**

### **➤ LEY 29023, LEY QUE REGULA LA COMERCIALIZACION Y USO DEL CIANURO (DS. N° 045 -2013-EM) .**

El cianuro se utiliza en la actividad minera de acuerdo a lo establecido en la presente norma. En el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en minería, aprobado por decreto supremo N° 024-2016 –EM y en las recomendaciones de los instrumentos de gestión ambiental que sustenta proceso metalúrgico.

**Artículo 11.** De la disposición final de los residuos del cianuro.

a) La eliminación y/o disposición final de los residuos generados como consecuencia del usos del cianuro en el proceso metalúrgico se realizara a través de una EPS-RS, registrada por la DIGESA y que cuente con la autorización correspondiente.

Los efluentes del lavado de los envases deben ir directamente a la poza de solución pobre (barren) y de allí al circuito de Cianuración.

**Artículo 12. De la Neutralización del cianuro.**

La neutralización y estabilización química del cianuro se logra mediante la aplicación de solución alcalina de un pH mayor a 10 cal, degradación natural, cloruración alcalina, oxidación con peróxido de hidrogeno, destrucción biológica o compuestos químicos específicos certificados y fabricados para tal fin, que eviten principalmente la formación de gas cianhídrico o gas de cianuro de hidrogeno.

La solución pobre del proceso de Cianuración (solución Barren) deberá ser recirculada al proceso.

➤ **REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE MINERIA – DS.024-2016-EM.**

**Artículo 338.-** En el proceso de cianuración de oro, plata y otros elementos metálicos, los trabajadores deberán usar el EPP adecuado, teniendo en cuenta las siguientes disposiciones, sin que ello signifique exceder los Límites de Exposición Ocupacional para Agentes Químicos establecidos en el ANEXO N° 15.

- a) Evitar inhalar polvos o gases de cianuro.
- b) Efectuar el manipuleo de soluciones de cianuro en áreas bien ventiladas, usando guantes de látex y gafas protectoras.
- c) No ingerir alimentos ni fumar cuando se trabaja con cianuro.
- d) No transportar ni almacenar cianuro junto con alimentos o bebidas.
- e) Evitar el contacto del cianuro con ácidos o sales ácidas ya que puede generar ácido cianhídrico gaseoso que es muy venenoso.
- f) Agregar hidróxido de sodio (soda cáustica) u otro compuesto alcalino al agua al preparar una solución de cianuro de sodio o potasio, para evitar la formación de ácido cianhídrico (HCN) al estado de gas venenoso.
- g) Llevar un estricto control del PH en las plantas de cianuración para evitar la formación de ácido cianhídrico (HCN).
- h) Cercar los pozos de solución de cianuro y los pozos de soluciones residuales para el reciclaje, con la finalidad de evitar el acceso de personas o animales.
- i) Neutralizar de inmediato los derrames de soluciones de cianuro, utilizando hipoclorito y/o peróxido de hidrógeno, así como limpiarlos con solución alcalina.
- j) Depositar los residuos del proceso de cianuración en áreas impermeabilizadas con geosintéticos para evitar la contaminación de los acuíferos, hasta su degradación natural.

k) Para el abandono de residuos de cianuración se debe proceder a su encapsulado y recubrimiento posterior con desmontes o material estéril, los mismos que deberán quedar cubiertos con tierra y su subsiguiente reforestación.

l) Para casos de envenenamiento con cianuro o para los primeros auxilios de la intoxicación, el tratamiento antidoto será lo dispuesto por el médico de salud ocupacional, además se dispondrá de un equipo para vías aéreas que cuente con balón de oxígeno que permita un flujo de oxígeno de diez (10) a quince (15) litros por minuto, bolsa de resucitación y mascarilla de oxígeno con bolsa reservorio.

m) Almacenar el cianuro solo, en su embalaje bien cerrado y dentro de un almacén seco y bien ventilado.

n) Trabajar acompañado y disponer de un equipo de comunicación. Nunca trabajar solo en áreas donde se manipula cianuro.

o) Prohibir el ingreso al personal no autorizado en áreas donde se manipula cianuro.

**Artículo 339.-** La comercialización, almacenamiento y uso del cianuro estarán sujetos a la Ley N° 29023, Ley que regula la Comercialización y Uso del Cianuro, a las Normas Reglamentarias para la actividad minera de la Ley N° 29023, Ley que regula la Comercialización y Uso del Cianuro, aprobadas por Decreto Supremo N° 045-2013-EM, y sus modificatorias o las normas que los sustituyan.

## ANEXO III

### Ubicación de la Planta

**Distrito:** Chavín

**Provincia:** Chincha

**Departamento:** Ica

**Altitud:** 1820 m.s.n.m

**Inicio de operaciones:** 20/07/2007

**Productos:** Concentración de Zn, Cu, Pb

**Productos en exploración:** Concentración de Au, Ag



*Figura 15.* Planta de Procesamiento de Minerales- Cerro Lindo . Adaptado de: (Minería Peru,2007)