

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE QUÍMICA



INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL

PARA OPTAR EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN QUÍMICA

**GESTIÓN DE EFLUENTES, TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS Y
PRECIPITACIÓN DE ALUMINIO Y MANGANESO EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE LA EMPRESA MINERA YANACocha**

PRESENTADO POR:

NÉSTOR DEL ÁGUILA GUADALUPE

ASESOR:

DR. ADOLFO LA ROSA TORO GÓMEZ

LIMA – PERÚ

2015

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado: A mis padres Esteban del Aguila y Belermina Guadalupe, A mi hermano Armado del Aguila (QEPD) por su inquebrantable apoyo económico y moral.

Néstor del Águila Guadalupe

Agradecimiento

Agradezco al decano de la Facultad de Ciencias. Al director de la Escuela Profesional de Química, por permitirme realizar este informe de competencia profesional para optar el título de Licenciado en Química.

Agradezco al Dr. Adolfo La Rosa Toro, por el apoyo, conducción y asesoramiento en la ejecución y presentación de este trabajo.

A las diferentes empresas: Banco Minero del Perú, Minera Poderosa, SGS del Perú, Minero Perú, Newmont Gold Company y Minera Yanacocha, a quienes debo mi experiencia profesional.

Al Ing. Edwin Yoplac Castromonte (Banco Minero del Perú), a Néstor Ledesma (Minero Perú), Marcelo Santillana (Minera Poderosa), Luz Blancas (SGS del Perú), al Dr. Miguel Cardoso Goytisolo (Newmont Gold Company) y al Ing. Carlos Santa Cruz (Minera Yanacocha SRL), Quienes me acogieron como trabajador en las respectivas empresas que lideraron.

Un agradecimiento especial al Gerente de Procesos de Yanacocha Lic. Luis Vargas Hurtado, por permitirme investigar este tema en el laboratorio de investigaciones de Minera Yanacocha.

Resumen

El presente trabajo tiene como finalidad presentar la gestión de Minera Yanacocha con respecto a los efluentes generados en las labores mineras, como:

Generación de agua ácida o drenaje ácido de mina; generada por escorrentía de agua en los tajos, aguas de infiltración de depósitos de desmonte, dewatering de los tajos (descenso del nivel freático) y por las lluvias que precipitan en suelos descubiertos. Estos efluentes son recolectados y almacenados en pozas recubiertas con geo membrana impermeabilizadas y tratadas en las plantas de tratamiento de aguas ácidas AWTP, (Acid Water Treatment Plant), que luego de su control ambiental, son descargadas al medioambiente.

Generación de sedimentos; producto de la erosión de suelos descubiertos en las labores mineras que van siendo arrastradas en suspensión por el agua. Estos son controlados mediante la minimización de las erosiones, trampas de sedimentos, disposición adecuada de alcantarillas, badenes, sangrías y sedimentadores en cada salida.

Generación de aguas de excesos; formados en los procesos productivos en las plantas de Merrill Crowe (para la precipitación de oro y plata) y plantas de adsorción de oro y plata con carbón activado, estos procesos generan aguas con contenidos metálicos y concentraciones de cianuro, por encima de los límites permisibles de descarga al medio ambiente. Por lo cual estas aguas antes de ser

descargadas al medioambiente pasan por un proceso de tratamiento en plantas de Ósmosis Reversa.

Tratamiento de aguas ácidas; Como objetivos específicos de este trabajo, hemos realizado un estudio a nivel laboratorio de la precipitación de los metales que contienen las aguas ácidas, determinando los rangos de valores de pH más adecuados para la precipitación bajo los límites permisibles de descarga al medioambiente de metales como: cobre, fierro, arsénico, zinc, entre otros. Llegando a la conclusión que estos elementos precipitan como hidróxidos a valores de pH >7 y se mantienen estables a valores mayores de pH.

Precipitación de aluminio y manganeso, Se realizó un estudio experimental a nivel laboratorio del comportamiento químico del aluminio y manganeso, llegando a conclusiones muy importantes, determinando que el hidróxido de aluminio por su comportamiento anfótero presenta los siguientes comportamientos químicos:

El hidróxido de aluminio en medio ácido se disuelve formando el ión (Al^{3+}) y que este a su vez se hidrata formando el ión $[(\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6)]^{3+}$ a valores de pH < 7.

En medio básico el aluminio forma el ión aluminato (AlO_2^-) y que este a su vez se encuentra hidratado formando los siguientes iones: $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ ó $[\text{Al}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2]^-$ y $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{3-}$, ha valores de pH entre 8 – 11.

Se ha comprobado experimentalmente que el aluminio (Al^{3+}) puede precipitar en forma de hidróxidos ($\text{Al}(\text{OH})_3\downarrow$) en medio neutro a valores de pH entre 7 -8, mediante la reacción:



Se ha comprobado que el aluminio que se encuentra en medio básico formando el ión (AlO_2^-), puede precipitar en forma de hidróxido a un exceso de pH,

ha valores de pH >12 mediante la siguiente reacción:



Se ha comprobado que el manganeso presente en las aguas ácidas de mina precipita en forma de hidróxido a pH > 10 y se mantienen constantes a valores mayores de pH, según la reacción química:



Se ha determinado que tanto el aluminio como el manganeso pueden precipitar juntos a valores de pH >12.

El trabajo es de interés para la industria minera que estudia uno de los métodos más importantes del tratamiento de agua ácida, se puede reducir un 50 % el costos de capital en el diseño y construcción de plantas de tratamiento de aguas, si es que se opta por realizar la precipitación de metales en una sola etapa y a valores de pH >12.

Queda a la evaluación de las empresas mineras evaluar costos, para la construcción de plantas de tratamiento de aguas en una etapa o en dos etapas, tal como lo plantemos en este trabajo.

ÍNDICE

Capítulo I: Introducción.....	1
1.1 Minera Yanacocha S.R.L (MYSRL).....	2
1.2 Gestión del proceso productivo de Minera Yanacocha.....	4
1.2.1 Extracción del mineral	4
1.2.2 Proceso de lixiviación	5
1.2.3 Proceso Merrill Crowe	7
1.2.4 Proceso de adsorción y desorción en columnas de carbón activado.....	8
1.2.5 Proceso Gold Mill	9
1.2.6 Fundición.....	11
1.2.7 Plantas de tratamiento de aguas de excesos (EWTP)	12
1.2.8 Plantas de tratamiento de aguas ácidas (AWTP)	14
1.2.9 Esquema de los procesos productivos de minera Yanacocha.....	16
Capítulo II: Planteamiento del problema	17
2.1 Generación de drenaje ácido de mina (DAM).....	18
2.1.1 Agua ácida por descenso del nivel freático	19
2.1.2 Generación de agua ácida por lluvias.....	20
2.2 Formación de sedimentos	21

2.3	Generación de agua de excesos	22
2.4	Planteamiento del problema en el proceso de tratamiento de agua ácida	22
2.5	Hipótesis del trabajo experimental.....	23
2.6	Pruebas experimentales a nivel laboratorio químico	24
Capítulo III Objetivos del trabajo		25
3.1	Objetivos generales	26
3.2	Objetivos específicos.....	26
Capítulo IV: Marco teórico		27
4.1	Fundamentos de formación de agua ácida en labores mineras.....	28
4.1.1	Agua ácida de mina.....	28
4.1.2	Generación de acidez	29
4.1.3	Tipos de agua acida.....	30
4.1.4	Drenaje ácido de mina (DAM)	32
4.1.5	Etapas en el desarrollo del drenaje ácido de mina(DAM)	33
4.1.6	Química del agua ácida de mina	35
4.2	Fundamentos de tratamiento de aguas ácidas.....	39
4.2.1	Sistemas pasivos	39
4.2.2	Sistemas activos.....	40
4.2.3	Química del tratamiento de agua ácida	42
Capítulo V: Gestión de los efluentes ácidos en labores mineras.....		46

5.1	Predicción de la formación de drenaje ácido de mina.....	47
5.2	Prevención de la formación de drenaje ácido de mina.....	47
5.3	Control de la formación de drenaje ácido de mina	48
5.4	Control del proceso de generación de agua ácida.....	49
5.4.1	Eliminación o aislamiento del material reactivo	50
5.4.2	Exclusión del agua	50
5.4.3	Exclusión del oxígeno.....	50
5.4.4	Control del pH	51
5.4.5	Inhibición de la actividad bacteriana	51
5.5	Tratamiento del agua ácida.....	52
Capítulo VI: Gestión de los efluentes en Minera Yanacocha		54
6.1	Efluentes generados en los procesos de Minera Yanacocha	55
6.2	Gestión de aguas ácidas.....	56
6.2.1	Encapsulamiento del material reactivo	56
6.2.2	Exclusión del agua de lluvias del agente activo (PAG)	57
6.2.3	Captación y almacenamiento de aguas ácidas.....	57
6.2.4	Captación de las aguas ácidas en la Zona Este.....	58
6.2.5	Captación de las aguas ácidas en la Zona Oeste.....	59
6.2.6	Tratamiento de agua ácida.....	60
6.3	Gestión de la generación de sedimentos.....	63

6.3.1 Control de la erosión	63
6.3.2 Construcción de sedimentadores o serpentines	66
6.4 Gestión de aguas de excesos.....	66
6.4.1 Plantas EWTP	67
6.4.2 Plantas de ósmosis reversa	69
Capítulo VII: Trabajo experimental del tratamiento de agua ácida.....	75
7.1 Política de mejora continua en Minera Yanacocha.....	76
7.2 Introducción del trabajo experimental.....	76
7.3 Pruebas experimentales a nivel Laboratorio Químico	77
7.3.1 Precipitación de metales a diferentes valores de pH.....	77
7.3.2 Precipitación de metales a pH >12.....	85
7.3.3 Discusión general de los resultados experimentales	93
7.3.4 Química del aluminio	94
7.3.5 Química del manganeso	97
7.3.6 Conclusiones del proceso experimental	98
Capítulo VIII: Tratamiento de agua ácida en Minera Yanacocha.....	100
8.2.1 Neutralización de la acidez y precipitación.....	103
8.2.2 Coagulación	104
8.2.3 Floculación	107
8.2.4 Clarificación y sedimentación	108

Capítulo IX. Discusión de resultados	110
9.1 Discusión de resultados experimentales.....	111
Capítulo X. Conclusiones.....	113
Capítulo XI. Recomendaciones	117
Referencias bibliográficas	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de solubilidades de metales como hidróxidos y sulfuros.....	68
Tabla 2. Precipitación de cobre a diferentes valores de pH	78
Tabla 3. Precipitación de fierro a diferentes valores de pH	79
Tabla 4. Precipitación de arsénico a diferentes valores de pH.....	80
Tabla 5. Precipitación de zinc a diferentes valores de pH	81
Tabla 6. Precipitación de Aluminio a diferentes valores de pH.....	82
Tabla 7. Precipitación de Manganeso a diferentes valores de pH.....	83
Tabla 8. Precipitación de Aluminio y manganeso a diferentes valores de pH.....	84
Tabla 9. Precipitación de fierro a pH >12.....	86
Tabla 10. Precipitación de cobreo a pH >12	87
Tabla 11. Precipitación de arsénico a pH >12.....	88
Tabla 12. Precipitación de Zinc a pH >12.....	89
Tabla 13. Precipitación de Aluminio a pH >12.....	90
Tabla 14. Precipitación de manganeso a pH >12	91
Tabla 15. Precipitación de Aluminio y manganeso a pH >12.....	92

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Ubicación geográfica de Minera Yanacocha.	2
<i>Figura 2.</i> Perforación y voladura de mineral, Minera Yanacocha.	4
<i>Figura 3.</i> Carguío y acarreo de mineral, Minera Yanacocha.	5
<i>Figura 4.</i> Proceso de lixiviación PAD La Quinoa, Minera Yanacocha.	5
<i>Figura 5.</i> Posas de almacenamiento de solución rica.	6
<i>Figura 6.</i> Esquema del proceso Merrill Crowe, Minera Yanacocha.	7
<i>Figura 7.</i> Proceso de adsorción de oro en columnas de carbón activado.	8
<i>Figura 8.</i> Esquema del proceso de desorción de oro del carbón activado.	9
<i>Figura 9.</i> Molino SAG (Semi autógeno).	10
<i>Figura 10.</i> Circuito de decantación a contracorriente (CCD). Minera Yanacocha. ...	10
<i>Figura 11.</i> Fundición de barras doré. Minera Yanacocha.	11
<i>Figura 12.</i> Barras doré. Minera Yanacocha.	12
<i>Figura 13.</i> Esquema de la planta de tratamiento de aguas de excesos (EWTP).	13
<i>Figura 14.</i> Esquema de la planta de tratamiento de aguas ósmosis reversa.	14
<i>Figura 15.</i> Esquema de la planta de tratamiento de aguas ácida (AWTP).	15
<i>Figura 16.</i> Esquema del proceso productivo de Minera Yanacocha.	16
<i>Figura 17.</i> Retención de agua ácida. Tajo Yanacocha Norte MYSRL.	19
<i>Figura 18.</i> Retención de agua ácida. Tajo Yanacocha Norte, MYSRL.	20
<i>Figura 19.</i> Acumulado anual de lluvias. Dpto. de Balance de Aguas, MYSRL.	21
<i>Figura 20.</i> Sedimentos generados en labores mineras.	21
<i>Figura 21.</i> Esquema del triángulo de generación de agua ácida.	28
<i>Figura 22.</i> Drenaje ácido de mina.	33

<i>Figura 23.</i> Esquema del desarrollo del DAM a través del tiempo.	35
<i>Figura 24.</i> Diagrama de Pourbaix para el Fe.	44
<i>Figura 25.</i> Esquema del manejo adecuado de efluentes en Minera Yanacocha.	56
<i>Figura 26.</i> Encapsulamiento de PAG en botaderos de desmonte.	56
<i>Figura 27.</i> Canal perimetral operaciones mineras, MYSRL.	57
<i>Figura 28.</i> Retención de agua ácida. Tajo Yanacocha Norte, MYSRL.	58
<i>Figura 29.</i> Recolección y tratamiento de agua ácida, Zona Este. MYSRL.	59
<i>Figura 30.</i> Recolección y tratamiento de aguas ácidas, Zona Oeste, MYSRL.	60
<i>Figura 31.</i> Planta AWTP La Quinoa, Zona Oeste. MYSRL.	61
<i>Figura 32.</i> Planta AWTP Pampa Larga, Zona Este. MYSRL.	61
<i>Figura 33.</i> Reservorio San José. MYSRL.	62
<i>Figura 34.</i> Descarga de agua tratada a canales comunales. MYSRL.	62
<i>Figura 35.</i> Erosión, por pérdida de protección vegetal del terreno.	63
<i>Figura 36.</i> Control de la erosión por construcción de canales y cunetas.	64
<i>Figura 37.</i> Control de la erosión por construcción de barreras de contención.	65
<i>Figura 38.</i> Control de la estabilidad de suelos.	65
<i>Figura 39.</i> Serpentín de retención de sedimentos. MYSRL.	66
<i>Figura 40.</i> Esquema de la planta de EWTP.	69
<i>Figura 41.</i> Planta de pre tratamiento de aguas MYSRL.	70
<i>Figura 42.</i> Precipitación de sulfuros metálicos en los filtros clarificadores.	71
<i>Figura 43.</i> Principio de ósmosis inversa.	72
<i>Figura 44.</i> Esquema del tratamiento de agua de excesos por ósmosis reversa.	74
<i>Figura 45.</i> Precipitación de metales en agua ácida a diferentes pH.	77

<i>Figura 46.</i> Gráfica de precipitación de Cu a diferente pH.....	78
<i>Figura 47.</i> Gráfica de precipitación de Fe a diferente pH.	79
<i>Figura 48.</i> Gráfica de precipitación de As a diferente pH.	80
<i>Figura 49.</i> Gráfica de precipitación de Zn a diferente pH.	81
<i>Figura 50.</i> Gráfica de precipitación de Al a diferente pH.	82
<i>Figura 51.</i> Gráfica de precipitación de Mn a diferente pH.	83
<i>Figura 52.</i> Gráfica de precipitación de Al y Mn a diferente pH.	84
<i>Figura 53.</i> Gráfica de precipitación de Fe a pH >12.	86
<i>Figura 54.</i> Gráfica de precipitación de Cu a pH >12.	87
<i>Figura 55.</i> Gráfica de precipitación de As a pH >12.	88
<i>Figura 56.</i> Gráfica de precipitación de Zn a pH >12.	89
<i>Figura 57.</i> Gráfica de precipitación de Al a pH >12.	90
<i>Figura 58.</i> Gráfica de precipitación de Mn a pH >12.	91
<i>Figura 59.</i> Gráfica de precipitación de Al y Mn a pH >12.	92
<i>Figura 60.</i> Gráfica de precipitación de Al a diferentes valores de pH.	96
<i>Figura 61.</i> Gráfica de precipitación de Mn a diferentes valores de pH.	98
<i>Figura 62.</i> Gráfica de precipitación de Al y Mn a diferente pH.	99
<i>Figura 63.</i> Esquema de las plantas de tratamiento de agua ácida, MYSRL.	101
<i>Figura 64.</i> Plantas AWTP en 02 etapas para precipitación de metales, MYSRL...	103
<i>Figura 65.</i> Coagulación de partículas coloidales.	105
<i>Figura 66.</i> Desestabilización de los coloides por acción del coagulante.	106
<i>Figura 67.</i> Floculación de partículas coloidales.	107
<i>Figura 68.</i> Clarificación del agua tratada, en reactor clarificador.	108

Capítulo I: Introducción

la IFC (5 %). Es actualmente la mina de mayor producción aurífera en el ámbito mundial ⁽¹¹⁾.

Minera Yanacocha inició sus operaciones en el año 1993, actualmente opera las minas de tajo abierto Carachugo, San José, Maqui Maqui, Cerro Yanacocha, La Quinoa y Chaquicocha. En su proceso productivo realiza labores mineras a tajo abierto y para la obtención de las barras doré (oro y plata) pasa por una serie de procesos como: perforación, voladura, carguío acarreo, proceso de lixiviación en pilas, proceso Gold Mill (chancado, molienda, lixiviación en tanques), adsorción y desorción en carbón activado, proceso Merrill Crowe y fundición.

El presente trabajo muestra brevemente las operaciones de Minera Yanacocha y como esta gestiona el manejo interno del agua que se generan dentro de sus operaciones antes de ser descargadas al medioambiente y los procesos de tratamiento de aguas que esta realiza antes que estas descarguen al medioambiente.

Para el agua de excesos generadas en el proceso Merrill Crowe, pasan por un sistema de tratamiento de aguas mediante las plantas EWTP (De las siglas en Inglés Excess Water Treatment Plant); y por el proceso de Ósmosis Reversa, estas aguas tratadas pasan por un estricto control mediante análisis químicos y descargadas al medioambiente con valores de los agentes contaminantes bajo los límites permisibles.

Para el agua ácida generada en el proceso de perforación y minado son tratadas en plantas convencionales AWTP (Acid Water Treatment Plant)

las cuales son descargadas al medioambiente con agentes contaminantes bajo los límites permisibles.

1.2 Gestión del proceso productivo de Minera Yanacocha

Las operaciones de MYSRL, hasta la obtención de oro y plata bajo la forma denominada Doré. Tiene los siguientes procesos:

1.2.1 Extracción del mineral

La explotación minera emplea métodos de tajo abierto para suministrar mineral oxidado tal como sale de la mina, a los procesos productivos .La extracción del mineral se realiza mediante los procesos de perforación y voladura (ver figura 2).



Figura 2. Perforación y voladura de mineral, Minera Yanacocha.

Luego el mineral extraído es cargado y acarreado directamente a las instalaciones de lixiviación para la recuperación de oro y plata por el proceso de lixiviación en pilas (ver figura 3).



Figura 3. Carguío y acarreo de mineral, Minera Yanacocha.

1.2.2 Proceso de lixiviación

Luego de la explotación del mineral de los tajos es enviado a las canchas de lixiviación, denominadas pilas o Pad (ver figura 4).



Figura 4. Proceso de lixiviación PAD La Quinua, Minera Yanacocha.

Estas pilas son amplios depósitos de mineral, diseñados con drenajes internos y cuya superficie es impermeabilizada con material fino y revestido con una membrana plástica o geo membrana impermeable que evitan cualquier tipo de filtración.

La técnica contempla el riego por goteo en la superficie de mineral con una solución de cianuro de sodio muy diluida (50 ppm) ⁽¹⁷⁾. Esta solución cianurada entra en contacto con el oro, plata y otros metales produciéndose la lixiviación, finalmente la solución rica en oro y plata va a ser depositada en pozas de almacenamiento para su posterior bombeo a la planta Merrill Crowe (ver figura 5).



Figura 5. Posas de almacenamiento de solución rica.

Se tiene un especial cuidado con el pH de estas soluciones para evitar la formación de gases con cianuro, en esta etapa de la producción es necesaria la dosificación de cal (CaO), un producto insustituible en este proceso para la regulación del pH de la solución cianurada.

Las soluciones cianuradas generadas en este proceso ricas en oro y plata son bombeadas a los procesos Merrill Crowe o a las columnas de adsorción con carbón activado, para la recuperación de los metales preciosos en forma de doré.

1.2.3 Proceso Merrill Crowe

La solución rica provenientes de las pozas de lixiviación se trata mediante el proceso Merrill Crowe (ver figura 6).

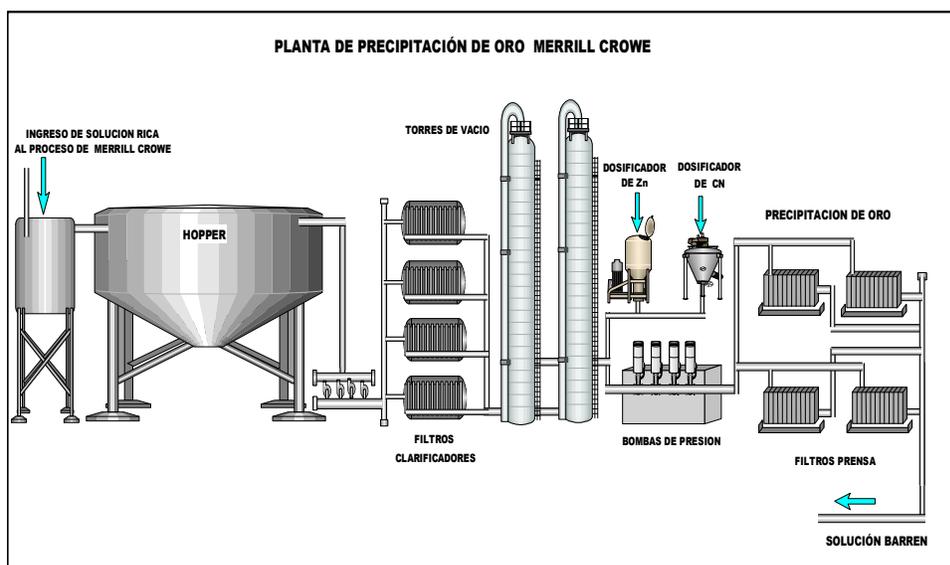


Figura 6. Esquema del proceso Merrill Crowe, Minera Yanacocha.

El proceso consiste en: filtración, desoxigenación y precipitación de metales mediante la adición de polvo de zinc (proceso oxidación- reducción).

La calidad de la solución a tratar es fundamental en la recuperación de oro y plata, el cual debe cumplir con dos factores fundamentales para que el zinc actúe con eficacia y precipite el oro y la plata disueltos en la solución. Estar libre de sólidos en suspensión y contener bajas concentraciones de

oxígeno disuelto, esto se logra pasando la solución por filtros clarificadores y desoxigenación en las torres de vacío.

El precipitado obtenido se colecta por filtración en filtros prensa y es enviado a la refinería para su fundición y la solución pobre es enriquecida con cianuro de sodio y retornada al proceso de lixiviación o son derivadas a las plantas de tratamiento de aguas de excesos ⁽¹³⁾.

1.2.4 Proceso de adsorción y desorción en columnas de carbón activado

La solución con bajas concentraciones de oro y plata es enviada a las plantas CIC (carbón en columnas). Este proceso usando carbón activado se recupera el oro y la plata mediante dos operaciones básicas:

Adsorción: Es el proceso mediante el cual los iones presentes en los fluídos se adhieren a la superficie del carbón por fuerzas químicas o físicas ⁽¹⁸⁾. En este caso el oro y plata son adsorbidos por el carbón activado a partir de la solución cianurada de bajas concentraciones de oro y plata (ver figura 7).



Figura 7. Proceso de adsorción de oro en columnas de carbón activado.

Desorción: Es el procesos por el cual se da la separación y extracción de los metales preciosos del carbón ^{(6), (18)} (ver figura 8).

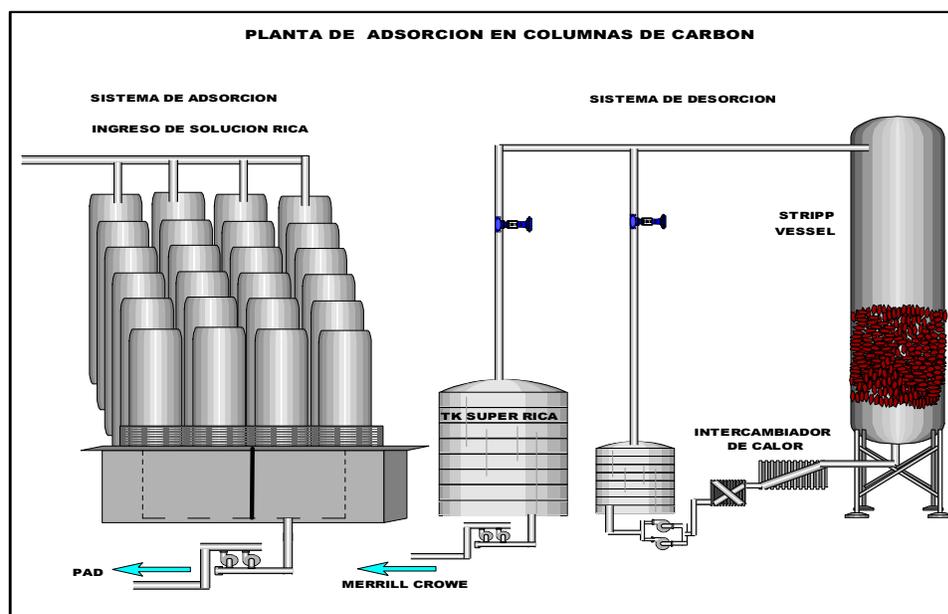


Figura 8. Esquema del proceso de desorción de oro del carbón activado.

La solución cargada de oro (solución rica) es enviada a la planta de Merrill Crowe, para su precipitación y fundición en forma de doré.

1.2.5 Proceso Gold Mill

El Proceso Gold Mill es un circuito de molienda SAG (ver figura 9), que procesa mineral chancado con altos contenidos de cobre y oro para producir solución rica para su procesamiento adicional en la planta de adsorción en carbón activado y relaves de arenas que son enviados a un depósito de arenas de molienda.



Figura 9. Molino SAG (Semi autógeno).

El mineral finamente molido pasa al proceso de lixiviación con solución diluida de cianuro de sodio en tanques en un circuito en contra corriente (ver figura10), la solución rica obtenida es enviada al proceso de adsorción en columnas de carbón activado para su proceso final.



Figura 10. Circuito de decantación a contracorriente (CCD). Minera Yanacocha.

Este proceso incluye un circuito de sulfatación, acidificación, recirculación y espesamiento (SART) ⁽²⁾. Para tratar mineral transicional con alto contenido de cobre. También se incluye un circuito de acidificación, volatilización y neutralización (AVR) para recircular el cianuro excedente de regreso al circuito de molienda.

1.2.6 Fundición

El precipitado obtenido en los filtros prensa son tratados en “refinería”. El proceso se da inicio al someter al precipitado a temperaturas de 650 ° C (en hornos de retortas) por un tiempo determinado para la extracción del mercurio y, luego se funde a 1200 ° C en horno de arco eléctrico para obtener barras denominadas “doré” constituidas por oro y plata (ver figura 11).



Figura 11. Fundición de barras doré. Minera Yanacocha.

El proceso de fundición consiste en agregar fundentes al precipitado (bórax, nitrato de potasio y flourspar) para obtener el menor punto de fusión y la mejor calidad de escoria posible (bajo contenido de oro). Los productos finales de la etapa de fundición son la escoria (que es sometida a un proceso gravimétrico para la recuperación de oro) y metal doré en barras ⁽¹³⁾ (ver figura 12).



Figura 12. Barras doré. Minera Yanacocha.

1.2.7 Plantas de tratamiento de aguas de excesos (EWTP)

La operación cuenta con dos sistemas paralelos de tratamiento de agua de exceso:

1. EWTP

De las siglas en inglés (Excess Water Treatment Plant). Tiene por objetivo tratar solución barren proveniente de la planta de Merrill-Crowe para reducir el contenido de cianuro así como los metales disueltos en la solución y clarificar el agua tratada para cumplir con los límites máximos permisibles (LMP).

El tratamiento empleado en las plantas EWTP utiliza cal (CaO) para la regulación de la acidez y se utiliza cloro gaseoso para destruir el cianuro y el bisulfuro de sodio (NaHS) para la precipitación de metales. Además se utiliza cloruro férrico (FeCl_3) para estabilizar los metales precipitados y mejorar la remoción de arsénico y selenio, en la etapa de clarificación se utiliza floculante aniónico con el fin de separar los sulfuros precipitados del agua tratada ⁽¹⁴⁾ (ver figura 13).

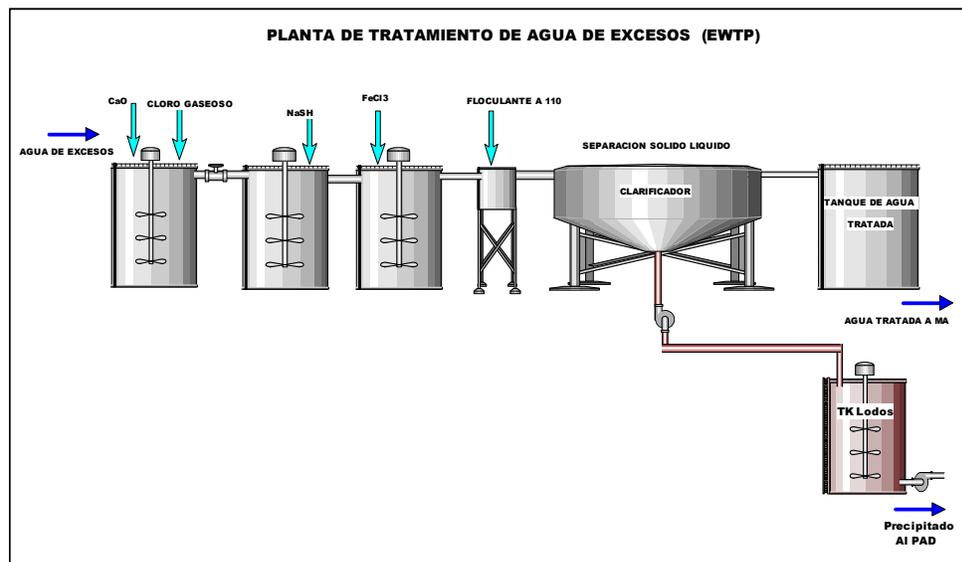


Figura 13. Esquema de la planta de tratamiento de aguas de excesos (EWTP).

2. Ósmosis reversa

Se define ósmosis reversa como una difusión pasiva, caracterizada por el paso de agua (disolvente) a través de una membrana semipermeable, desde la solución más diluida a la más concentrada. El proceso consiste en separar un soluto disuelto de su solvente, mediante fuerzas ejercidas sobre una membrana semipermeable ^{(6), (20)}.

La planta de ósmosis inversa está diseñada para tratar solución barren proveniente del área de Merrill Crowe y se obtiene una solución clarificada, denominada “permeado” y una solución que contiene todas las sales y sólidos disueltos concentrados denominado solución concentrada ⁽⁶⁾ (ver figura 14).

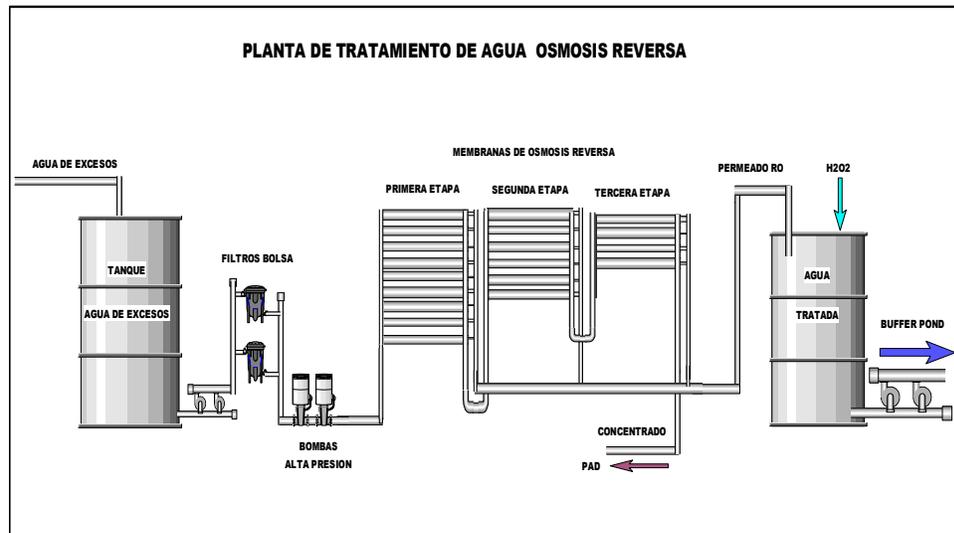


Figura 14. Esquema de la planta de tratamiento de aguas ósmosis reversa.

La decisión sobre el volumen de agua excedente a tratar se determina a través de la herramienta de “balance de agua de procesos”. Las aguas tratadas por cualquiera de estos dos procesos deben contener elementos contaminantes bajo los límites permisibles de acuerdo a lo requerido por el Ministerio de Energía y Minas.

1.2.8 Plantas de tratamiento de aguas ácidas (AWTP)

Minera Yanacocha, con la finalidad de tener dentro de sus operaciones un estricto cuidado del medioambiente, tiene dentro de sus operaciones plantas de tratamiento de agua ácida (AWTP) (ver figura 15).

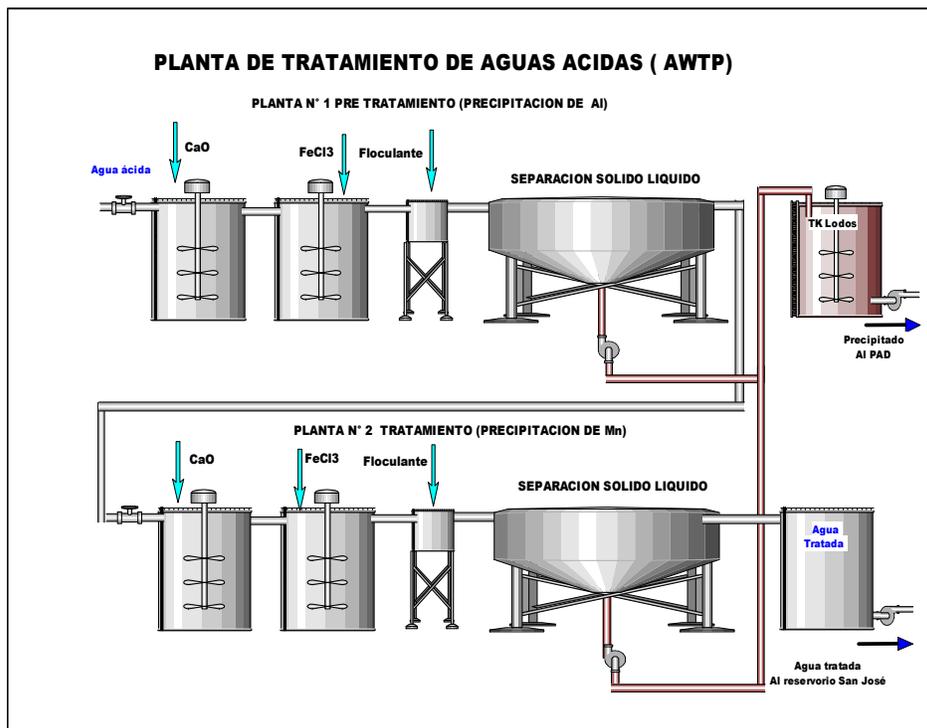


Figura 15. Esquema de la planta de tratamiento de aguas ácida (AWTP).

El agua ácida es generada como producto del movimiento de tierras y perforación de los tajos en etapa de minado.

Las aguas generadas en las labores mineras, son almacenadas en pozas de almacenamiento y luego son tratadas en las plantas AWTP mediante el proceso de neutralización de la acides, precipitación de metales, floculación y clarificación ⁽¹⁹⁾.

Las aguas después de un control por análisis químicos son descargadas al reservorio San José para su posterior descarga a medioambiente, con niveles de agentes contaminantes bajo los límites permisibles.

1.2.9 Esquema de los procesos productivos de minera Yanacocha.

En la figura 16, se muestran un esquema simplificado de los procesos productivos de Minera Yanacocha.

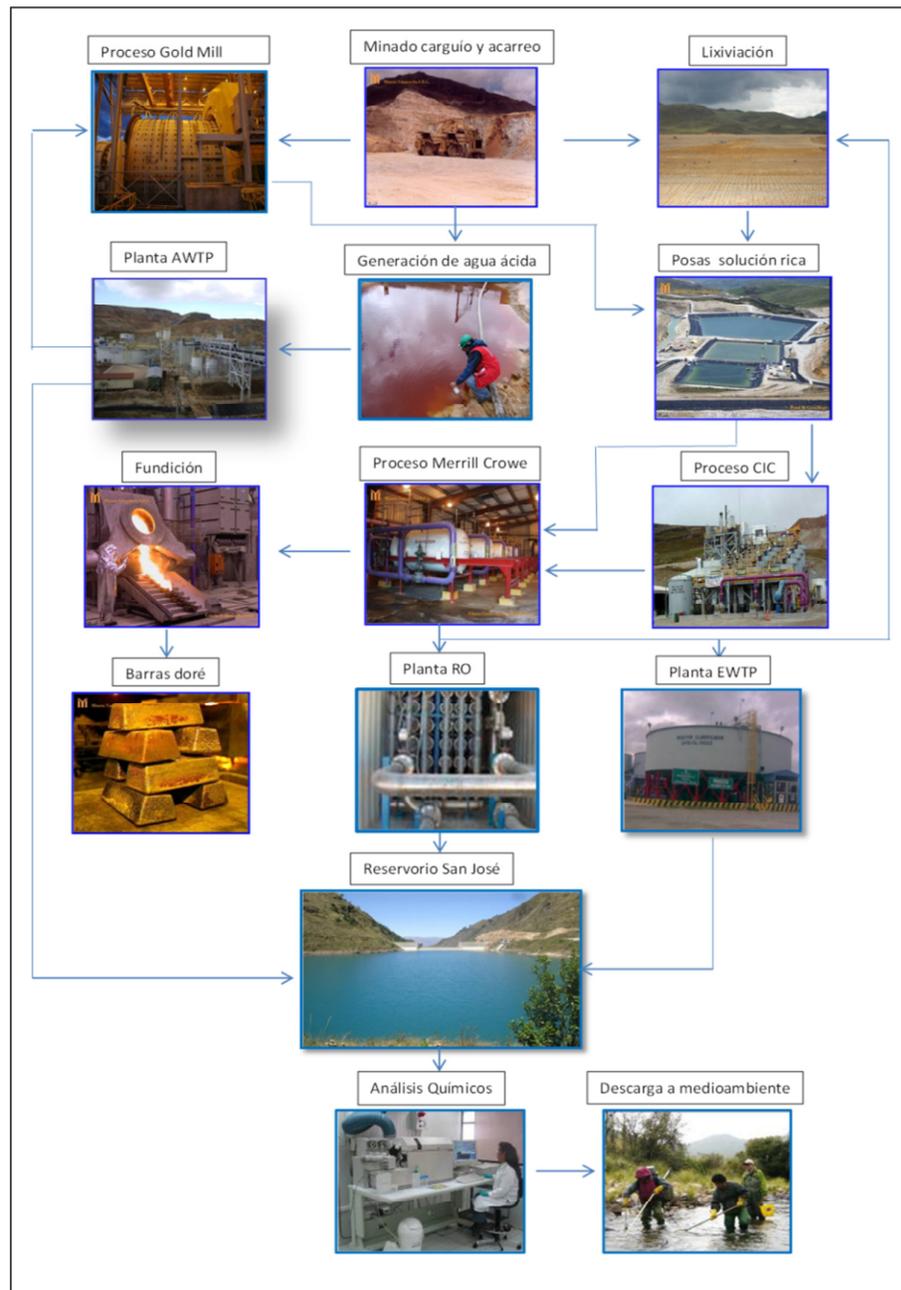


Figura 16. Esquema del proceso productivo de Minera Yanacocha.

Capítulo II: Planteamiento del problema

Minera Yanacocha S.R.L. es una empresa minera dedicada a la producción de oro y plata, es propietaria de varios yacimientos mineros como: Carachugo, Maqui Maqui, Yanacocha Norte, La Quinua, Chaquicocha, estos yacimientos son explotados a tajo abierto, que luego del carguío y acarreo de la mena (material rico en oro y plata) a las pilas de lixiviación se somete el mineral al proceso de lixiviación con solución cianurada y recuperado el oro y plata en plantas de adsorción en columnas de carbón activado y en las plantas de precipitación Merrill Crowe.

Estos procesos generan los siguientes problemas: Generación del drenaje ácido de mina, formación de sedimentos y generación de agua de excesos de los procesos de adsorción en columnas de carbón activado y del proceso de precipitación Merrill Crowe, que son efluentes con altos contenidos de cianuro y metales en solución.

2.1 Generación de drenaje ácido de mina (DAM)

Las grandes labores mineras de tajo abierto, el descenso del nivel freático y los depósitos de desmonte dejan expuestas a la acción del aire y del agua grandes volúmenes de mineral generadores de acidez, con lo que se propicia el desencadenamiento de la reacción de oxidación y llegar a generarse volúmenes muy importantes de agua ácida, con una composición química muy agresiva con altos contenidos de metales (ver figura 17).



Figura 17. Retención de agua ácida. Tajo Yanacocha Norte MYSRL.

El agua ácida generada se da por los siguientes factores:

2.1.1 Agua ácida por descenso del nivel freático

Algunos minerales se encuentran bajo el nivel freático, por lo tanto la extracción del agua subterránea se hace inminente, creando de esta manera condiciones secas antes de la explotación minera que permita un trabajo seguro en el interior del tajo ⁽¹⁾. El descenso de dicho nivel es fundamental y esto se logra mediante la instalación de pozos convencionales ubicados dentro como en los alrededores del tajo, conduciendo la descarga del bombeo hacia una poza de almacenamiento (ver figura 18).



Figura 18. Retención de agua ácida. Tajo Yanacocha Norte, MYSRL.

2.1.2 Generación de agua ácida por lluvias

Las operaciones de Minera Yanacocha se encuentran en una zona que soporta lluvias que alcanzan precipitaciones sobre los 1500 milímetros por metro cuadrado por año .Las precipitaciones son generalmente en los meses de octubre a abril, razón por la cual las operaciones de minado se ven afectados por el incremento en la cantidad de agua (ver figura 19).

El problema principal es la alta concentración de elementos metálicos tales como hierro, cobre, arsénico, selenio , aluminio, manganeso, entre otros , cuyas concentraciones sobrepasa los límites máximos permisibles de la operación, por consecuencia de ello estas aguas ácidas deben ser pasadas por las plantas de tratamiento de aguas para ser descargadas al medioambiente con concentraciones bajo los límites permisibles que estipula la ley general de aguas.

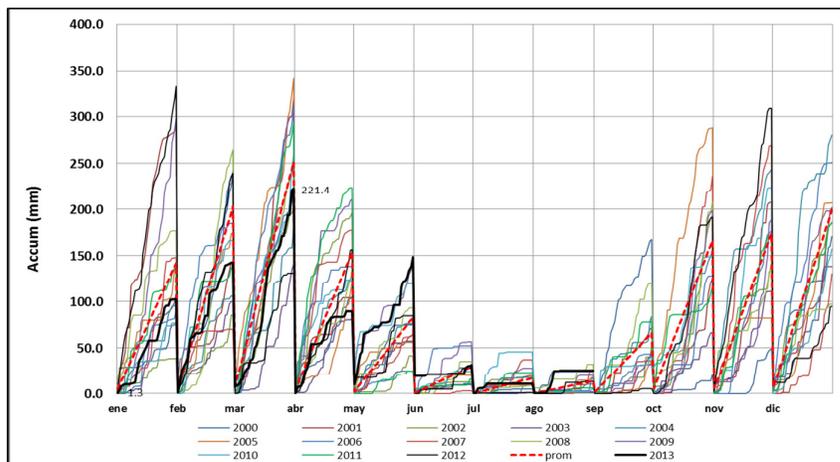


Figura 19. Acumulado anual de lluvias. Dpto. de Balance de Aguas, MYSRL.

2.2 Formación de sedimentos

Los sedimentos son formados por la erosión, que es un proceso de desgaste físico del suelo y rocas, provocado por lluvias y vientos que interactúan con la topografía del terreno produciéndose partículas en suspensión que son arrastradas por el agua hasta un punto de reposo. Si no se tiene un control adecuado estos pueden llegar a las quebradas y ríos generando impactos medioambientales (ver figura 20).



Figura 20. Sedimentos generados en labores mineras.

2.3 Generación de agua de excesos

También llamada “solución pobre”, o solución barren esta solución se genera en los procesos de adsorción en columnas de carbón activado y en el proceso de precipitación Merrill Crowe. Durante temporadas de lluvia, se origina solución barren en exceso, estas soluciones se caracterizan por contener concentraciones de cianuro y metales pesados disueltos por encima de los límites permisibles de descarga al medioambiente, por lo tanto la generación de estas aguas es un problema que tenemos que remediarlo.

2.4 Planteamiento del problema en el proceso de tratamiento de agua ácida

El agua ácida generada en las labores mineras de Minera Yanacocha contiene en su composición química elementos metálicos como: Fe, Cu, As, Se, Al, Mn, etc. Que superan largamente los límites permisibles de descarga de agua al medioambiente.

El problema principal en la precipitación de metales en la planta de tratamiento de agua ácida es la precipitación en forma de hidróxidos del aluminio y manganeso, que bajo ciertas condiciones de pH se comportan como anfóteros lo que complica la precipitación de estos, el Al precipita a valores de pH entre 7 – 8, mientras que el Mn precipita a $\text{pH} > 10$.

Según esta teoría, las plantas de tratamiento de agua ácida se diseñaron en dos etapas de tal manera que al final del proceso tengamos agua tratada con contenidos metálicos bajo los límites permisibles de descarga al medioambiente:

Primera etapa: Planta de pre tratamiento para precipitar Al en forma de hidróxido de aluminio $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ a valores de pH entre 7 - 8.

Segunda Etapa: Planta de tratamiento para precipitar Mn en forma de hidróxido de Manganeso $[\text{Mn}(\text{OH})_2]$ a $\text{pH} > 10$ y otros metales que no han podido precipitar en la primera etapa.

Como se explicó en los ítems anteriores, el diseño de las plantas de tratamiento de aguas en dos etapas para la precipitación de Al y Mn, nos trae dos problemas:

Primer problema: Alto costo operativo de la operación ya que al tener dos plantas de tratamiento de agua, el costo en reactivos químicos, energía, personal y procesos logísticos se duplica.

Segundo problema: Los altos costos de capital que la empresa tiene que financiar para la construcción de dos plantas de tratamiento de agua, en vez de una sola planta que nos permita precipitar los metales incluido el Al y Mn bajo los límites permisibles que regula la ley.

2.5 Hipótesis del trabajo experimental

Como hipótesis para mejorar el proceso de tratamiento de agua ácida y solucionar los problemas detallados en el ítem anterior estamos planteando la siguiente hipótesis: Precipitación de metales incluyendo Al y Mn aun solo valor de pH.

Esta hipótesis nos da la oportunidad de experimentar a que pH se puede precipitar todos los elementos metálicos incluyendo el aluminio y manganeso.

De ser verdadera la hipótesis planteada, nos traerán los siguientes beneficios:

1. Realizar el tratamiento de aguas ácidas para la precipitación completa de los elementos metálicos incluyendo al Al y Mn en una sola planta de tratamiento de aguas, buscando un rango de pH adecuado para la precipitación de todos los elementos metálicos en una sola etapa. De esta manera disminuir los costos operativos (Consumo de reactivos químicos, consumo de energía, gastos de personal, gastos logísticos).
2. Disminuir los costos de capital en la construcción de plantas de tratamiento de agua ácida, dos plantas en vez de una sola planta.
3. Incrementar la capacidad de las plantas existentes en el doble de capacidad, convirtiendo la planta de pre tratamiento en planta de tratamiento.
4. Mejorar la calidad del agua tratada y cumplir con la ley de descarga de aguas al medioambiente.

2.6 Pruebas experimentales a nivel laboratorio químico

Para comprobar la hipótesis planteada, se realizaron las siguientes pruebas experimentales a nivel laboratorio: Precipitación de metales a diferentes valores de pH, para determinar el pH óptimo de precipitación del aluminio y manganeso. Y precipitación de metales al pH determinado en la prueba anterior, para comprobar experimentalmente si la prueba anterior es verdadera.

Capítulo III Objetivos del trabajo

3.1 Objetivos generales

El presente trabajo tiene como objetivo general, mostrar la gestión de Minera Yanacocha con respecto a los efluentes generados en sus procesos productivos (Gestión de las aguas ácidas, sedimentos y aguas de excesos) antes de ser descargadas al medioambiente.

3.2 Objetivos específicos

1. Realizar un estudio a nivel laboratorio de la precipitación de metales en forma de hidróxidos que contienen las aguas ácidas.
2. Determinar experimentalmente los rangos adecuados de valores de pH que se debe trabajar para la precipitación bajo los límites permisibles de los metales que contienen las aguas ácidas.
3. Determinar experimentalmente el comportamiento químico del aluminio y el manganeso en la planta de tratamiento de agua ácida.

Capítulo IV: Marco teórico

4.1 Fundamentos de formación de agua ácida en labores mineras

4.1.1 Agua ácida de mina

Es el término que se utiliza para denominar el tipo de efluente que se produce como consecuencia de la oxidación natural de los minerales sulfurosos contenidos en las rocas cuando son expuestos a la acción del agua y del aire (ver figura 21).

El agua y el oxígeno reaccionan con el material generador de acidez (PAG) mediante la siguiente reacción:

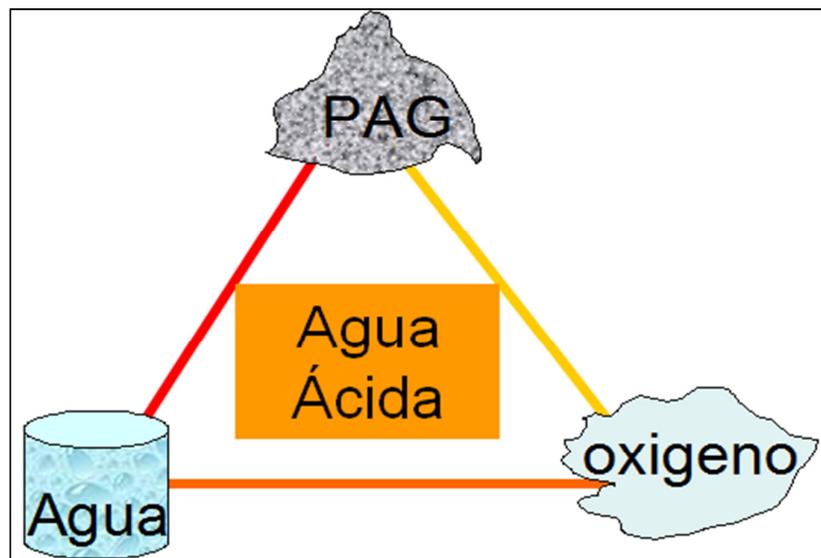


Figura 21. Esquema del triángulo de generación de agua ácida.

El agua ácida, se caracteriza por tener un pH ácido y un alto contenido en metales y sulfatos, aunque en algunas circunstancias pueden

producirse agua con un contenido muy elevado en metales disueltos pero con pH neutro e incluso básico, que también son consideradas ácidas ⁽¹⁹⁾.

El material generador de acidez (PAG) son minerales sulfurosos como: pirita, calcopirita, marcasita, arsenopirita, pirrotita, etc.

4.1.2 Generación de acidez

Las labores mineras interacciona con muchos de los aspectos del ciclo hidrológico, tales como infiltración, escorrentía, almacenamiento y retención del agua en zonas superficiales, saturados o subterráneos, así como su curso por los cauces. Las zonas de recarga pueden resultar alteradas al retirar la cobertura vegetal antes de las explotaciones, e incluso el suelo puede verse afectado. Los cambios producidos en el flujo de infiltración afectan los niveles de agua subterránea y los acuíferos superficiales que son interceptados por las labores mineras y drenados como parte de la operación, con la consiguiente afección del nivel piezométrico de la zona circundante, cuyo dominio de extensión puede llegar a varios kilómetros en ciertos casos ⁽³⁾.

Los grandes movimientos de tierras, que se realizan en labores mineras de tajo abierto y en labores subterráneas, dejan expuestas a la acción del aire y del agua enormes volúmenes de mineral sulfuroso generadores de acidez (PAG) , originalmente situadas en el subsuelo, donde están protegidas de estos agentes, con lo que se propicia el desencadenamiento de la reacción de oxidación, y pueden llegar a generarse volúmenes muy importantes de aguas ácidas, con una composición química muy agresiva con altos contenidos de metales que contaminan el medioambiente.

En la minería metálica se generan efluentes con pH inferior a 3 y contenidos en sulfatos y metales de cientos, e incluso, miles de miligramos por litro.

La generación de aguas ácidas es resultado de la interrelación de varias reacciones químicas de oxidación e hidrólisis de compuestos sulfurosos, los agentes principales que intervienen en este proceso son los sulfuros metálicos, como mineral reactivo, el agua o la humedad atmosférica y el oxígeno u otro agente oxidante, además de ellos, las bacterias juegan un importante papel como catalizadoras, acelerando la velocidad de la reacción.

La tendencia de una roca en particular de generar acidez neta es una función del balance entre los minerales (sulfurosos) productores potenciales de ácido y los minerales (alcalinos) consumidores potenciales de ácido.

El vertido de aguas ácidas de mina puede dar lugar a una degradación ecológica ya que estas aguas no pueden ser usadas para consumo humano o medio de desarrollo de animales, puesto que son altamente corrosivas y poseen elevadas concentraciones metálicas por incremento de su solubilidad.

4.1.3 Tipos de agua acida

El agua acida generada en las labores mineras son de 5 tipos:

1.Tipo 1

Contiene muy poca o nula alcalinidad y elevada acidez (pH < 4,5). Presenta alta concentración de hierro, aluminio, manganeso y otros metales, y de oxígeno disuelto.

2.Tipo 2

Contienen alto contenido en sólidos disueltos totales, en manganeso y hierro ferroso, bajo o nulo contenido en oxígeno disuelto y pH superior a 6.

Al producirse la oxidación de los metales, el pH del agua desciende drásticamente y se transforma en agua del Tipo 1.

3.Tipo 3

Contenido de alto a moderado en sólidos disueltos totales, hierro ferroso y manganeso, bajo o nulo contenido en oxígeno disuelto, pH superior a 6 y contenido en alcalinidad superior al de acidez. El ácido generado en la oxidación e hidrólisis de los metales es neutralizado por la alcalinidad contenida en el agua.

4.Tipo 4

Drenaje ácido neutralizado, con pH superior a 6 y alto contenido en sólidos en suspensión. La precipitación de los hidróxidos aún no se ha producido. Con un tiempo de residencia adecuado en una balsa de decantación, las partículas sedimentan y el agua se transforma en el Tipo 5.

5.Tipo 5

Drenaje ácido neutralizado, con pH superior a 6 y alto contenido en sólidos disueltos. Después de que la mayoría de los hidróxidos han precipitado, los principales cationes que permanecen en solución son calcio y magnesio. Los aniones sulfato y bicarbonato también permanecen en solución.

4.1.4 Drenaje ácido de mina (DAM)

Drenaje que resulta de la oxidación de minerales sulfurados y lixiviación de metales asociados, provenientes de las rocas sulfurosas cuando son expuestas al aire y al agua, el desarrollo del DAM es un proceso dependiente del tiempo e involucra procesos de oxidación química, biológica y fisicoquímicos, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento.

El proceso de oxidación de sulfuros y la formación del drenaje ácido de mina (DAM), es muy complejo e involucra a una multitud de procesos químicos y biológicos que pueden variar significativamente dependiendo de las condiciones ambientales, geológicas y climáticas ⁽¹⁵⁾.

Cuando se exponen al oxígeno atmosférico o a aguas oxigenadas debido a la minería, el procesamiento del mineral, excavación u otros procesos de movimiento de tierras, los minerales sulfurosos pueden volverse inestables y oxidarse.

La pirita es el mineral sulfuroso responsable de una gran mayoría de drenaje ácido de mina ⁽²²⁾.

El drenaje ácido de mina se caracteriza por tener el pH entre (1.5 – 7) alcalinidad decreciente y acidez creciente, concentraciones elevadas de sulfato y metales (disueltos o totales).

El DAM puede incluir: pH, acidez, alcalinidad, sulfatos, nutrientes, metales (disueltos o totales), componentes radiactivos, sólidos disueltos totales (SDT), y sólidos suspendidos totales (SST).

Este proceso no es exclusivo de las minas activas, sino que persiste en el tiempo y puede llegar a ser incluso más grave en minas clausuradas, tanto de cielo abierto (tajo) como de interior (subterránea), donde ya se ha abandonado cualquier medida de control (ver Figura 22).



Figura 22. Drenaje ácido de mina.

4.1.5 Etapas en el desarrollo del drenaje ácido de mina(DAM)

El desarrollo del drenaje ácido de mina es un proceso que depende del tiempo, en algunos casos, el drenaje ácido se detecta desde el principio de las operaciones, en otros, han pasado de 10 a 40 años antes de que se observe drenaje ácido⁽¹⁰⁾. La generación del DAM se presenta en tres etapas:

1.Etapa 1

El drenaje ácido producido en esta etapa es generado por la oxidación química por la presencia del oxígeno, las aguas son casi neutras debido a que en esta

etapa existe alcalinidad disponible por efecto de los carbonatos de calcio (CaCO_3) que neutralizan la acidez y precipitan al hierro en forma de hidróxido $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

La velocidad de oxidación química de la pirita es relativamente baja, comparada con las etapas posteriores de oxidación, ya que el hierro férrico no contribuye como oxidante. En esta etapa, el agua de drenaje se caracteriza por niveles elevados de sulfato; También se puede detectar un contenido elevado de calcio y magnesio debido a la disolución por el ácido.

2.Etapa 2

En esta etapa el pH del agua disminuye drásticamente, por agotamiento de los minerales carbonatados y la neutralización de la acidez disminuye, el pH del microambiente disminuye hasta 4,5 y se producen reacciones de oxidación químicas y biológicas.

En esta etapa el agua presenta concentraciones elevadas de calcio y magnesio como producto de los minerales neutralizantes, también presentan concentraciones elevadas de hierro ferroso, sulfato y una acidez relativamente alta, aun cuando las concentraciones de metales en la solución puedan ser bajas.

En esta etapa se puede decir que empieza la formación de acidez y el agua generada va a empezar a disolver una serie de metales presente en el mineral generador de la acidez.

3.Etapa 3

En esta última etapa predomina la oxidación biológica, de la oxidación sulfurosa, se produce hierro ferroso, que se oxida biológicamente y se convierte

en hierro férrico; este a su vez, reemplaza el oxígeno como el oxidante principal.

La velocidad de oxidación es más rápida debido a la presencia de bacterias que catalizan la reacción, el agua de drenaje es generalmente ácida, caracterizada por sulfatos y metales disueltos en concentraciones elevadas, el hierro disuelto se presenta como hierro ferroso (Fe^{2+}) y férrico (Fe^{3+}).

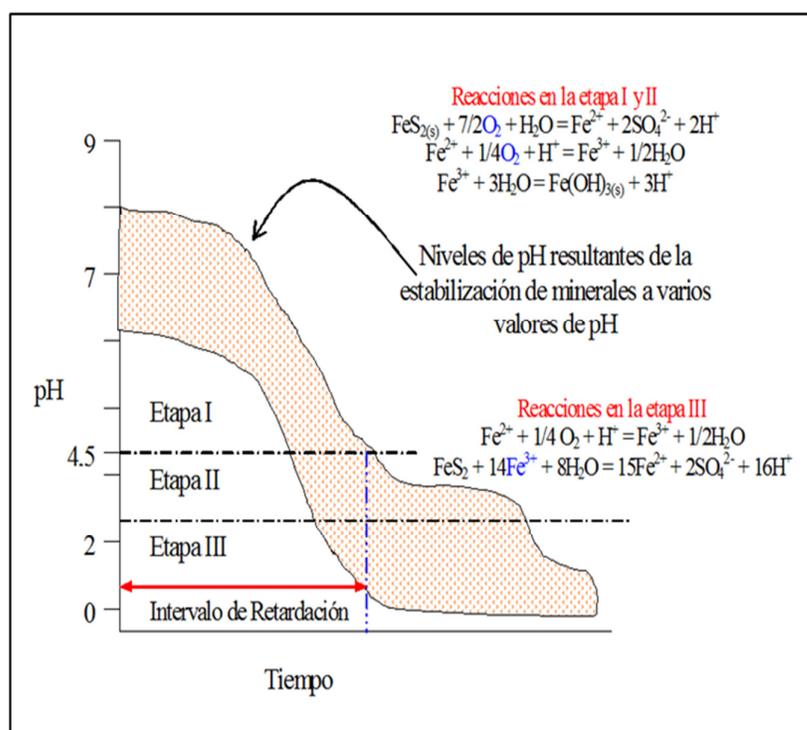


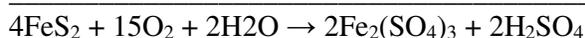
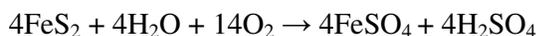
Figura 23. Esquema del desarrollo del DAM a través del tiempo.

4.1.6 Química del agua ácida de mina

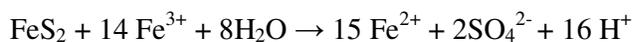
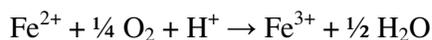
Como vimos en el ítem anterior, el drenaje ácido de mina es un proceso que depende del tiempo y las condiciones medioambientales para que estas se generen. Dadas las condiciones, el agua ácida se genera mediante las siguientes reacciones químicas:

1. Oxidación de sulfuros

La pirita, como mineral sulfuroso más común, ha sido el mineral más extensivamente estudiado en lo que se refiere a oxidación mineral bacteriana. Ésta, junto con la marcasita (que posee idéntica composición química pero diferente estructura cristalina), puede ser oxidada mediante mecanismos directos ⁽¹⁶⁾. Según las siguientes series de reacciones:



La velocidad de la reacción anterior es afectada por la presencia de: bacterias (*thiobacillus ferroxidans*), pH y temperatura ⁽²¹⁾.



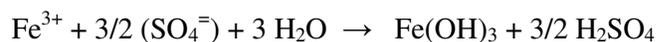
2. Oxidación del sulfato ferroso a férrico

El hierro ferroso se convierte a hierro férrico por acción del oxígeno.



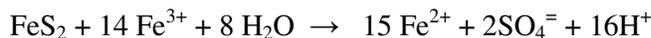
3. Hidrólisis del sulfato férrico a hidróxido férrico

A niveles de pH > 3,5 el hierro férrico se precipita como hidróxido (precipitado rojizo):



Los precipitados de hidróxido férrico son fácilmente reconocibles por su color que va del ocre amarillento al rojo intenso, forman el recubrimiento típico de los cauces y líneas de drenaje por las que circulan aguas ácidas.

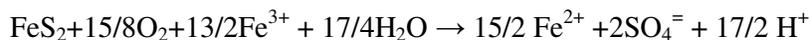
4. Oxidación adicional de la pirita por el sulfato férrico



5. Reacción global de oxidación de la pirita



6. Reacción global de oxidación de la pirita por hierro férrico



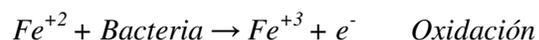
Según las relaciones estequiometrias por cada gramo de pirita se generan tres gramos de ácido sulfúrico, lo que da idea del nivel de acidificación de las aguas que puede llegar a provocar este proceso.

7. Reacciones biológicas de generación de agua ácida de mina

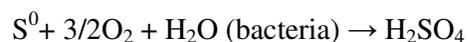
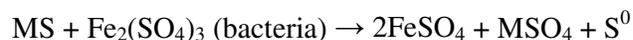
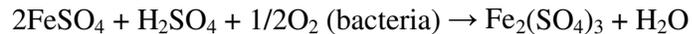
La oxidación bacteriana de minerales sulfurosos es la principal causa de generación de ácido sulfúrico en el entorno de labores mineras. Para cualquier tipo de oxidación es necesaria la presencia de un sustrato oxidable, un oxidante y un promotor de la misma; en el caso de la oxidación mineral biológica tales papeles están desempeñados respectivamente, por el mineral, el oxígeno y un sistema enzimático de microorganismos.

Con este tipo de oxidación, suelen aparecer asociados microorganismos autótrofos oxidantes de hierro, tales como *Thiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Sulfolobus brierleyii* y los *thiobacilos termofilicos*. También pueden estar implicados otros autótrofos como *Thiobacillus thiooxidans* y ciertas bacterias de tipo heterotrófico ⁽²¹⁾.

El Fe es oxidado mediante acción bacteriana, mediante la siguiente reacción:



La reacción biológica de la pirita con bacterias (biomasa) da lugar a la formación de sulfatos metálicos según las siguientes reacciones ⁽²³⁾.



4.2 Fundamentos de tratamiento de aguas ácidas

Existen dos tipos de tratamiento de agua ácida, sistemas pasivos, que tienen un carácter netamente preventivo y los tratamientos con sistemas activos, que son tratamientos continuos.

4.2.1 Sistemas pasivos

En los que la intervención humana es necesaria sólo de forma ocasional y no requieren el aporte de energía ni de productos químicos, se utilizan los procesos naturales químicos y biológicos que mejoran la calidad del agua, estos sistemas se basan en la eliminación del agente contaminante, por lo general son tratamientos lentos y requieren grandes superficies para el almacenamiento del agua.

El éxito de estos tratamientos depende de la cinética de los procesos de eliminación del agente contaminante y el tiempo de retención del agua.

Cualquiera que sea el tratamiento dado a las aguas ácidas de mina, se requiere la generación de suficiente alcalinidad para neutralizar su exceso de acidez.

Para ello se pueden considerar diferentes tipos de métodos pasivos: Humedales aerobios, humedales con sustrato orgánico, lechos de caliza aerobios, sistemas de aireación, drenes de caliza anóxicos (ALD) y sistemas sucesivamente productores de alcalinidad (SAPS).

Cada una de estas tecnologías será la más adecuada dependiendo del tipo particular de problemática del agua de mina ⁽¹⁶⁾.

4.2.2 Sistemas activos

Requieren una operación continuada y es indispensable la construcción de pozas de almacenamiento de aguas acidas , sistemas de bombeo, plantas de tratamiento de agua, uso de reactivos químicos, uso de energía , personal especializado en operación de plantas de tratamiento de aguas y análisis químicos.

Entre los sistemas activos de tratamiento de agua ácida tenemos:

1.Tratamiento químico

Es un sistema continuo que se realiza en plantas de tratamiento que consiste en la adición de sustancias alcalinas para elevar su pH hasta alcanzar las condiciones para la precipitación de los metales pesados.

El tratamiento se suele realizar en cuatro etapas:

Neutralización.- Consiste en la adición de sustancias alcalinas al agua para elevar su pH hasta alcanzar las condiciones más adecuadas para la precipitación de los metales pesados. Los productos más comúnmente utilizados para ello son: cal, cal hidratada, caliza micronizada, óxido de calcio, óxido de magnesio, carbonato sódico, hidróxido sódico y amoníaco.

Oxidación.- El objetivo es promover y acelerar los procesos de oxidación e hidrólisis, que son los que determinan la formación de compuestos insolubles, este proceso se realiza en tanques de aireación, donde el oxígeno

atmosférico se incorpora a la lechada formada por el agua ácida y los productos neutralizantes mediante turbinas de agitación o inyectores de aire.

En estas condiciones de pH alcalino y alta concentración de oxígeno, los cationes metálicos oxidan y se hidrolizan a sus respectivos hidróxidos, y los aniones, como el arseniato y el antimonio, forman compuestos insolubles con algunos de los metales pesados presentes en disolución.

Precipitación.- Es la separación y eliminación de la fase líquida de todos estos compuestos metálicos y no metálicos insolubles; para ello, en el canal de rebose de los tanques de aireación se añade un floculante primario antes de que el agua pase a los decantadores, donde las partículas en suspensión precipitan y los flóculos de precipitados coloidales se retiran con ayuda de un poli electrolito aniónico.

Clarificación y corrección del pH.- La última etapa del proceso, es la clarificación del agua tratada la cual se hace en reactores clarificadores que nos permite realizar la separación sólido/líquido mediante la dosificación de floculantes aniónicos a fin de separar los hidróxidos metálicos precipitados del agua tratada.

Antes de verter el agua tratada a los cauces naturales, se corrige el pH mediante adición de una pequeña cantidad de ácido para rebajarlo hasta valores dentro de los límites permisibles.

2. Ósmosis inversa

Se define ósmosis como una difusión pasiva, caracterizada por el paso del agua, disolvente, a través de la membrana semipermeable, desde la solución más diluida a la más concentrada.

La ósmosis inversa se logra al aplicar una presión exterior, superior a su presión osmótica natural a la solución concentrada, el agua fluye a través de las membranas permeables al agua pero no a los iones polivalentes que constituyen los contaminantes, esta solución es llamada solución permeada obteniendo soluciones de alta calidad exenta de iones contaminantes.

La solución de alimento que no logra atravesar la membrana se llama concentrado y contiene altas concentraciones de sales y metales.

Con este sistema se puede realizar procesos de tratamiento de aguas ácidas que cumplan con los límites máximos permisibles reguladas por el estado para ser descargadas al medioambiente.

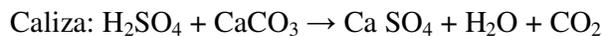
La recuperación de la calidad del agua es casi total, pero este método presenta algunos inconvenientes como son la pérdida de rendimiento por obstrucción de las membranas, elevado coste y difícil manipulación de lodos.

4.2.3 Química del tratamiento de agua ácida

En los sistemas activos de tratamiento de agua ácida se generan las siguientes reacciones químicas:

1. Química de neutralización

Las reacciones químicas más comunes de neutralización de agua ácidas son:

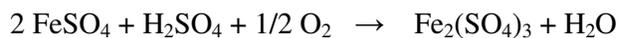


Los distintos metales que suelen encontrarse en disolución tienen un pH óptimo para su separación (nivel de neutralización) por lo que, dependiendo del tipo de metales y su concentración, es necesario elegir el método y la especie química más adecuada.

2. Química de oxidación

La reacción química más común de oxidación es:

El hierro ferroso se convierte a hierro férrico por acción del oxígeno.



3. Química de precipitación de metales

El agua ácida se caracteriza por tener un rango de pH entre 1,5–7,0 y tener concentraciones elevadas de metales disueltos. Entre los metales disueltos más comunes se encuentra: Cu, Fe, Se, As, Zn, Al, Mn, etc.

4. Química de precipitación del hierro.

La reacción más importante en esta etapa es la precipitación de los hidróxidos de hierro formados al reaccionar el sulfato férrico con los agentes alcalinos (ver figura 24).



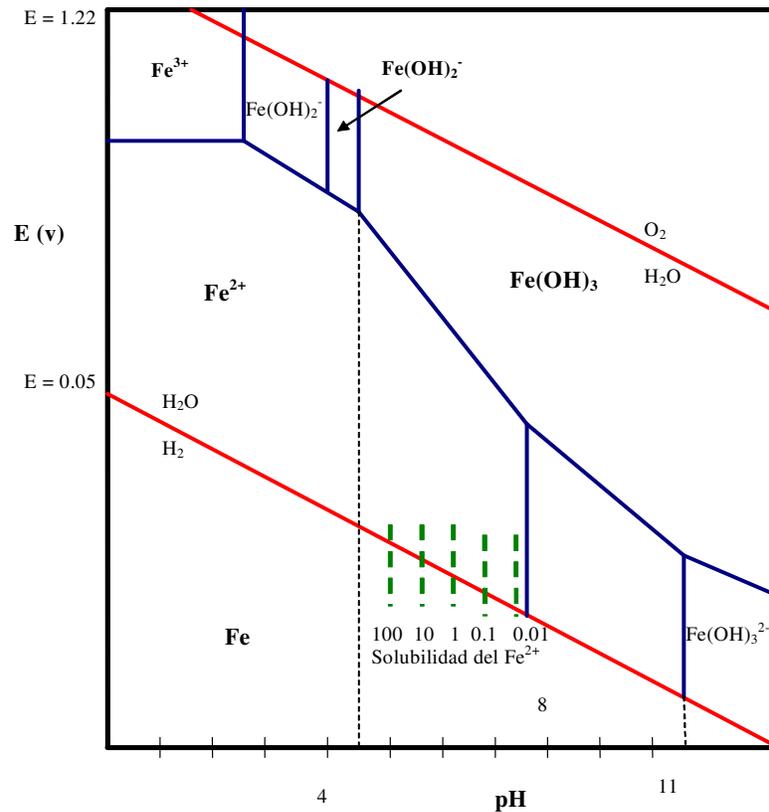
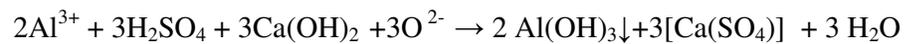


Figura 24. Diagrama de Pourbaix para el Fe.

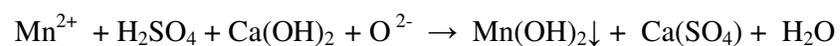
5. Química de precipitación del aluminio

La precipitación del aluminio se da en el rango de pH (7-8).



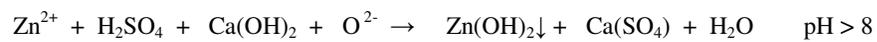
6. Química de precipitación del manganeso

La precipitación completa del manganeso se da a pH >10



7. Química de precipitación de otros metales más comunes

Las reacciones químicas de precipitación de los metales más comunes en agua ácida al dosificar hidróxido de calcio son:

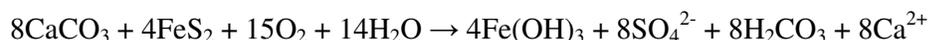


**Capítulo V: Gestión de los efluentes ácidos en
labores mineras**

5.1 Predicción de la formación de drenaje ácido de mina

La predicción de la formación de drenaje ácido de mina es una tarea muy compleja. La técnica más aplicada para la predicción si un material va a producir un exceso de acidez se llama balance ácido-base ⁽⁸⁾.

La prueba trata de cuantificar el potencial de producción de acidez (APP) de una muestra. Si se asume que es la pirita el único mineral capaz de generar acidez que está presente en la muestra, el máximo APP se tendrá cuando toda la pirita de la muestra reaccione para formar hidróxido férrico y ácido sulfúrico. Se suele expresar la acidez como la cantidad de carbonato de calcio que sería necesaria para efectuar la neutralización, de acuerdo con la siguiente reacción:



Según la anterior estequiometria, se requiere un mol de (CaCO_3) por cada mol de azufre, lo que significa que la acidez producida por 32,08 gr. de azufre es neutralizada por 100,09 gr. de (CaCO_3) y por tanto, el potencial de producción de acidez del azufre pirítico es de 3,125 gr. de acidez como (CaCO_3) por cada gramo de azufre.

Para calcular el APP es necesario determinar la cantidad de pirita presente que pueda ser activa, lo cual no siempre es tarea fácil ⁽¹⁶⁾.

5.2 Prevención de la formación de drenaje ácido de mina

Debemos concentrarnos en la actividad minera actual para prevenir que los residuos actuales originen en el futuro los mismos problemas ocasionados por los residuos antiguos hoy en día.

Para ser capaces de prevenir hay que entender la cinética de los procesos en la primera fase de la formación del drenaje ácido ⁽²⁴⁾.

Con estos conocimientos se puede intervenir en el sistema en forma adecuada, implicando modificaciones de los procesos metalúrgicos aplicados hoy en día. Para prevenir se pueden utilizar diferentes estrategias, dependiendo de la composición del material.

Esto debería comenzar ya en la mina con una caracterización del material extraído no solamente en su valor económico, sino también en el sentido de que si este material va a producir o neutralizar acidez o liberar elementos contaminantes ⁽⁸⁾.

5.3 Control de la formación de drenaje ácido de mina

El objetivo principal del control de los drenajes ácidos de mina es minimizar el efecto negativo de estos sobre el medio ambiente, utilizando para ello la técnica más efectiva.

El objetivo de los niveles de control es limitar la formación de agua ácida en la fuente mediante la inhibición del proceso de oxidación de los sulfuros metálicos, esto puede conseguirse mediante la exclusión de uno o más de los agentes primarios del proceso de generación (mineral reactivo, agua y oxígeno) o actuando sobre algunos de los factores que aceleran la velocidad de reacción (pH, temperatura y actividad bacteriana).

Los métodos de control incluyen técnicas de prevención, realizadas antes del comienzo de la actividad extractiva, y técnicas de corrección, que se llevan a cabo dónde y cuándo se comprueba que se están produciendo agua ácida.

5.4 Control del proceso de generación de agua ácida

La generación de agua ácida en las actividades mineras puede ser controlada según la etapa en que estas se encuentren, en la etapa I, puede ser factible el control de las condiciones necesarias para las reacciones de generación de ácido.

Se puede prevenir el impacto del drenaje contaminado sobre el ambiente mediante un control efectivo del proceso de oxidación, eliminando el reactante principal necesario para que se produzca la reacción (es decir, el oxígeno).

En las etapas II y III, la oxidación está bien establecida y el control del DAM requiere la eliminación del mecanismo de transporte, con el fin de evitar que el contaminante sea liberado en el ambiente (es decir, el agua).

Los métodos de control incluyen técnicas de prevención, realizadas antes del comienzo de la actividad extractiva, y técnicas de corrección, que se llevan a cabo dónde y cuándo se comprueba que se están produciendo aguas ácidas.

Si se anticipa la posibilidad de que se generen aguas ácidas, es posible adoptar medidas para evitar que esto ocurra, eliminando con ello el riesgo de que los productos contaminantes se introduzcan en el medio ambiente.

Las posibilidades técnicas de control de los drenajes ácidos, evidentemente, son mucho mayores en las minas activas, especialmente si se están iniciando las labores y es posible introducir medidas de control como parte del plan de explotación, que en las minas abandonadas, donde únicamente cabe recurrir a estrategias de tratamiento y las posibilidades de

actuación suelen estar limitadas por cuestiones económicas y por la severidad de los impactos residuales.

Entre las principales medidas de control de generación de agua ácida en las actividades mineras son:

5.4.1 Eliminación o aislamiento del material reactivo

Mediante la segregación o depósito selectivo de los materiales que contienen el mineral reactivo o mediante el micro encapsulamiento que consiste en el recubrimiento del mineral reactivo con una capa de material inerte de forma que queden aisladas del agua y el oxígeno.

5.4.2 Exclusión del agua

Se puede controlar las aguas de escorrentía superficial mediante la construcción de canales perimetrales, cunetas y diques de contención que interceptan o desvían el agua de lluvia alejándola de los depósitos de material reactivo como los botaderos en minas de tajo abierto o canchas de material de relave.

5.4.3 Exclusión del oxígeno

La exclusión del oxígeno del material reactivo es una labor bastante difícil en las actividades mineras, sin embargo se puede realizar mediante la técnica de las inundaciones subacuáticas del material reactivo. Este método consiste en inundar los materiales reactivos generadores de acidez, de esta manera se limita la generación de agua ácida por exclusión del oxígeno ya que el coeficiente de difusión de este elemento en el agua, $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{segundo}$, es unas 10 000 veces inferior al de la atmósfera. Una vez que el oxígeno disponible en el agua es

consumido, la velocidad de la reacción de oxidación decrece significativamente ya que la velocidad de reemplazo de aquel elemento es muy baja.

5.4.4 Control del pH

Se puede controlar el pH de las aguas generadas en las labores mineras mediante la neutralización con soda cáustica o cal, es una labor muy costosa y a veces incontrolable cuando los volúmenes de agua son considerables.

En este caso es más conveniente retener las aguas mediante diques de contención y posteriormente derivadas a las plantas de tratamiento de aguas ácidas.

5.4.5 Inhibición de la actividad bacteriana

Los productos de descomposición de la materia orgánica inhiben el crecimiento de las bacterias responsables de la oxidación biológica de los sulfuros.

Los constituyentes orgánicos y las bacterias reductoras del material orgánico crean una solución reductora que, indirectamente, previene la oxidación química de los sulfuros.

Esta técnica ha dado resultados como medida de control a corto plazo, retrasando la generación de aguas ácidas, la desventaja radica en que solo actúa sobre la oxidación biológica y no sobre la oxidación química; su tiempo de aplicación es limitado y los bactericidas son lavados por las aguas de escorrentía.

Entre los productos más usados en esta técnica son los surfactantes aniónicos como el sulfato de lauril, compuestos fosfatados, ácidos orgánicos y algunos conservantes alimenticios.

5.5 Tratamiento del agua ácida

El objetivo principal de los métodos de tratamiento es suprimir la acidez del agua y eliminar los metales pesados y los otros contaminantes, como sulfatos, arseniatos o antimoniatos, que lleva en disolución para devolverle un nivel de calidad adecuado antes de su vertido a los cauces naturales.

Si no se han aplicado o no han resultado efectivos ninguno de los controles anteriores, únicamente puede recurrirse a aplicar técnicas de descontaminación de las aguas ácidas; el tratamiento es la única opción de control de las aguas ácidas, cuando su generación no se ha impedido ni se han tomado las medidas oportunas para evitar sus efectos.

El método más común de tratamiento de agua ácida en plantas consiste en recepcionar el agua ácida en un tanque de tratamiento donde se le adiciona soda cáustica (NaOH) y/o lechada de cal (CaO) con una determinada dosificación la cual permite elevar el pH dentro del rango de 6,5 a 8,5, removiendo así los metales presentes, los cuales precipitan en forma de hidróxidos ⁽¹²⁾.

Posteriormente, pasa a un segundo tanque, donde se logra la separación sólido-líquido, con la ayuda de un floculante aniónico A-110. Se usa el precipitado sedimentado que se retiene para formar un lecho filtrante con floculante aniónico, a través del cual, se hace pasar la solución (de abajo hacia arriba) quedando atrapadas las partículas en suspensión que lleva consigo, obteniéndose como resultado una solución clarificada.

El agua ya clarificada es enviada a un tanque de distribución donde se procede a regular el pH de la solución con ácido sulfúrico de baja

concentración de tal manera, que al final del proceso se obtienen aguas clarificadas, exentas de metales pesados y con un pH dentro del rango permisible de descarga.

**Capítulo VI: Gestión de los efluentes en Minera
Yanacocha**

6.1 Efluentes generados en los procesos de Minera Yanacocha

Los efluentes generados en las labores mineras de Yanacocha son: Generación de aguas ácidas, producidos por escorrentía de agua en los tajos, aguas de infiltración de depósitos de desmonte, dewatering de los tajos (descenso del nivel freático) y por las lluvias que precipitan en suelos descubiertos. Estos efluentes agua ácida o drenaje ácido de mina (DAM), son recolectadas y almacenadas en pozas recubiertas con geo membrana impermeabilizadas y tratadas en las plantas de tratamiento de aguas ácidas AWTP, (Acid Water Treatment Plant), que luego de su control ambiental, son descargadas al reservorio San José y posteriormente descargado a los canales comunales para uso agrícola (ver figura 25).

Generación de sedimentos, producto de la erosión de suelos descubiertos en las labores mineras que van siendo arrastradas en suspensión por el agua. Estos son controlados mediante la minimización de las erosiones, trampas de sedimentos, disposición adecuada de alcantarillas, badenes, sangrías y sedimentadores en cada salida.

Generación de aguas de excesos de los procesos productivos, plantas de Merrill Crowe y plantas de adsorción en carbón activado. Estas aguas son reutilizadas en el proceso de lixiviación y las aguas de excesos propiamente dicha pasan por un estricto tratamiento en las plantas EWTP/RO. (Excess Water Treatment Plant/ Reverse Ósmosis).

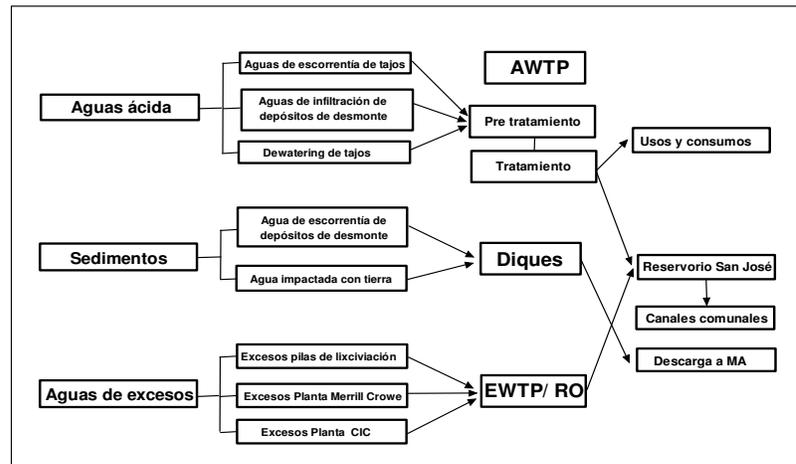


Figura 25. Esquema del manejo adecuado de efluentes en Minera Yanacocha.

6.2 Gestión de aguas ácidas

La gestión que realiza Minera Yanacocha sobre el agua ácida generada en las labores mineras son:

6.2.1 Encapsulamiento del material reactivo

Consiste en el recubrimiento del mineral reactivo con una capa de material oxidado de forma que queden aisladas del agua y el oxígeno. Esta técnica se realiza generalmente en los botaderos de material de desmonte (ver figura 26).



Figura 26. Encapsulamiento de PAG en botaderos de desmonte.

6.2.2 Exclusión del agua de lluvias del agente activo (PAG)

Control del agua de escorrentía superficial mediante la construcción de canales perimetrales, cunetas y diques de contención que interceptan o desvían el agua de lluvia alejándola de los depósitos de material reactivo (ver figura 27).



Figura 27. Canal perimetral operaciones mineras, MYSRL.

6.2.3 Captación y almacenamiento de aguas ácidas

Minera Yanacocha, como ya se explicó en el capítulo anterior, realiza sus operaciones mineras a tajo abierto generando agua ácida como: aguas subterráneas de los tajos (dewatering), aguas superficiales de los tajos, aguas superficiales de los depósitos de desmonte y aguas de infiltración de los depósitos de desmonte.

Estas son captadas mediante canales impermeables forrados con geomembrana y bombeadas para su almacenamiento en pozos, estas aguas posteriormente son enviadas mediante un sistema de bombeo a las plantas de tratamiento de aguas ácidas (ver figura 28).



Figura 28. Retención de agua ácida. Tajo Yanacocha Norte, MYSRL.

Para un mejor manejo operativo y administrativo las operaciones de Minera Yanacocha están divididas en dos grandes zonas: Operaciones Zona Este y Operaciones Zona Oeste. Ambas zonas tienen sus propias infraestructuras de captación de aguas ácidas, sistemas de bombeo y sus respectivas plantas de tratamiento.

6.2.4 Captación de las aguas ácidas en la Zona Este

Las operaciones mineras en esta zona están constituidas por el tajo Maqui Maqui, tajo Chaquicocha, tajo Yanacocha, tajo Marleny tajo San José, tajo Carachugo Alto, y los depósitos de desmonte de Maqui Maqui y Backfill Carachugo (ver figura 29).

Estas generan aguas ácidas las que son captadas, almacenadas y enviadas a las plantas de tratamiento de agua ácida (AWTP) de la Zona Este.

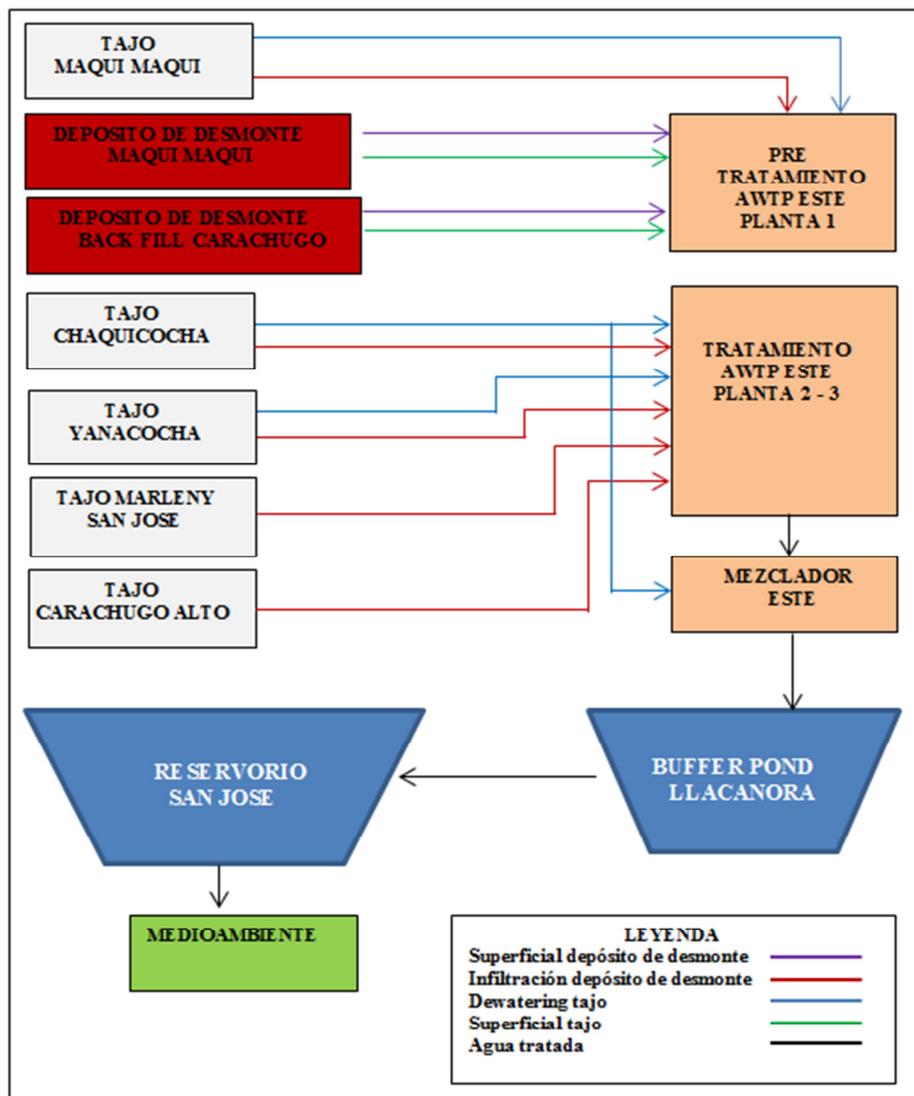


Figura 29. Recolección y tratamiento de agua ácida, Zona Este. MYSRL.

6.2.5 Captación de las aguas ácidas en la Zona Oeste

Las operaciones mineras en esta zona están constituidas por el pad Yanacocha etapas 6 y 7 que por su alto contenido de mineral transicional generan agua ácida, el tajo Cerro Negro, tajo La Quinua, tajo La Quinua Sur, tajo Tapado Oeste, los depósitos de desmonte de Cerro Negro y depósitos de desmonte La Quinua (ver figura 30).

Estas generan aguas ácidas las que son captadas, almacenadas y enviadas a las plantas de tratamiento de agua ácida (AWTP) de la Zona Oeste.

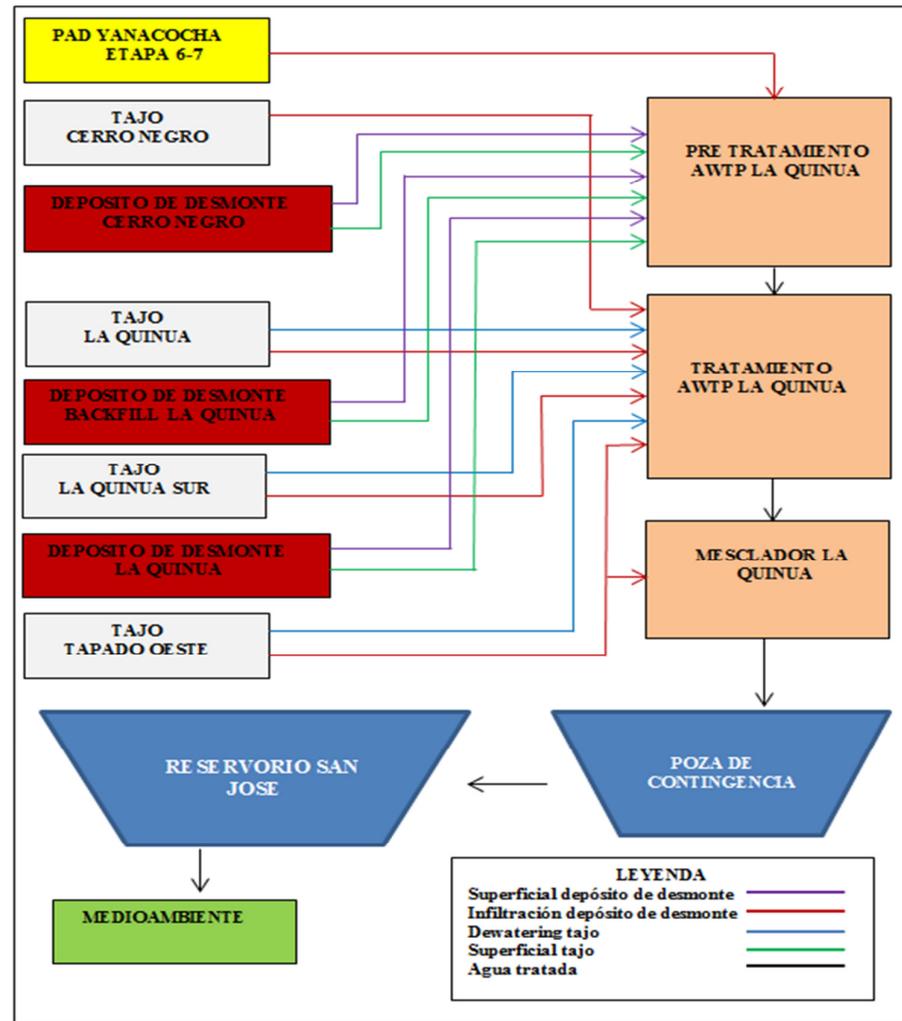


Figura 30. Recolección y tratamiento de aguas ácidas, Zona Oeste, MYSRL.

6.2.6 Tratamiento de agua ácida

Minera Yanacocha dispone de dos plantas de tratamiento de aguas ácidas llamadas AWTP (Acid Water Treatment Plant), en sus dos zonas geográficas para tratar las aguas ácidas generadas y almacenadas en las diferentes pozas de

contención. Planta AWTP la Quinoa (Zona Oeste) con capacidad de tratamiento de 3000 m³/hora (ver figura 31), y la Planta AWTP Pampa Larga con capacidad de 1500 m³/hora (ver figura 32).



Figura 31. Planta AWTP La Quinoa, Zona Oeste. MYSRL.



Figura 32. Planta AWTP Pampa Larga, Zona Este. MYSRL.

Las aguas tratadas en estas plantas, luego de un estricto control en el laboratorio químico, son descargadas al Reservorio San José de 6'000 000 de

m³ de capacidad (ver figura 33). Luego con autorización del área de medioambiente y previos análisis en el laboratorio de QA/QC, son descargadas a los diferentes canales de las comunidades para su uso en las labores agrícolas y ganaderas (ver figura 34).



Figura 33. Reservorio San José. MYSRL.



Figura 34. Descarga de agua tratada a canales comunales. MYSRL.

6.3 Gestión de la generación de sedimentos

Los sedimentos son partículas de suelo que van siendo arrastradas (en suspensión) por el agua hasta llegar a un punto de reposo. Estas partículas, dependiendo de la fuerza de las aguas, pueden ser desde rocas hasta arcillas y limos. Los sedimentos elevan la concentración de metales disueltos en el agua por lo tanto es de suma importancia su control. La gestión que realiza Minera Yanacocha sobre la generación de sedimentos son:

6.3.1 Control de la erosión

La erosión viene a ser un proceso de desgaste físico del suelo y rocas, provocado por la precipitación y viento que interactúan con la topografía, los suelos y la cobertura vegetal. La erosión se produce principalmente cuando el suelo pierde su protección natural: vegetación (ver figura 35).



Figura 35. Erosión, por pérdida de protección vegetal del terreno.

La erosión puede ser mayor o menor dependiendo de la intensidad de las lluvias, el tipo de suelo y la inclinación de los terrenos. Para controlar la erosión en las actividades minera, Minera Yanacocha tiene los siguientes controles:

1. Construcción de canales y cunetas

La erosión se controla evitando que las escorrentías provenientes de las lluvias o manantiales entren en áreas con suelo descubierto (tajos, canteras, plataformas, accesos, etc.). Mediante la construcción de canales y cunetas de coronación (ver figura 36).

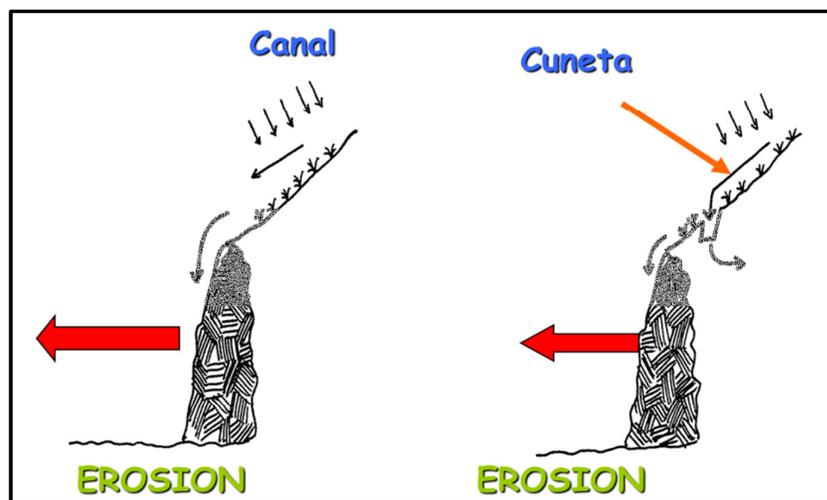


Figura 36. Control de la erosión por construcción de canales y cunetas.

2. Control de la velocidad del agua

Se disminuye la velocidad del agua que escurre por los suelos sin protección, mediante la colocación de diversos obstáculos (barreras, pozas, zanjas, etc.) al paso de agua. Al disminuir la velocidad del agua, esta pierde fuerza y por tanto, su poder de erosión disminuye (ver figura 37).



Figura 37. Control de la erosión por construcción de barreras de contención.

3. Control de la estabilidad de suelos

Los suelos inestables, generalmente formados por materiales finos como arcillas y arenas, absorben mucha agua hasta formar lodos, el cual se desliza fácilmente generando sedimentos. Para su control se encausan las aguas de tal manera que no se formen empozamientos mediante colocación de rocas.



Figura 38. Control de la estabilidad de suelos.

6.3.2 Construcción de sedimentadores o serpentines

Minera Yanacocha construye sedimentadores o serpentinas para retener los sedimentos en las labores mineras, estos vienen a ser trampas que permiten retener y bajar la velocidad de los efluentes que por su diseño zigzagueante nos permite retener los sedimentos.



Figura 39. Serpentín de retención de sedimentos. MYSRL.

Estas aguas retenidas son posteriormente bombeadas a los sistemas de tratamiento de agua que luego de un estricto control medioambiental son descargadas al medioambiente.

6.4 Gestión de aguas de excesos

Las operaciones de Minera Yanacocha generan aguas de excesos en sus procesos productivos, llamadas solución barren en las plantas de Merrill Crowe y las plantas de adsorción en columnas de carbón activado. Estas aguas tienen altas concentraciones de cianuro, mercurio y otros elementos metálicos

que para ser descargadas al medioambiente pasan por un proceso de tratamiento en plantas de tratamiento de aguas.

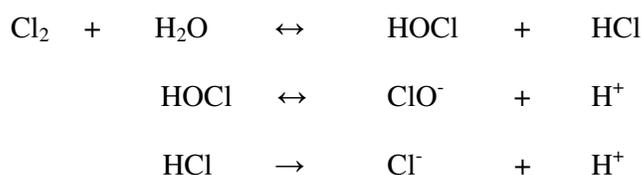
Minera Yanacocha tiene en la actualidad dos sistemas de tratamiento de aguas de excesos: Plantas EWTP (Excess Water Treatment Plant) plantas convencionales y plantas de tratamiento por ósmosis reversa.

6.4.1 Plantas EWTP

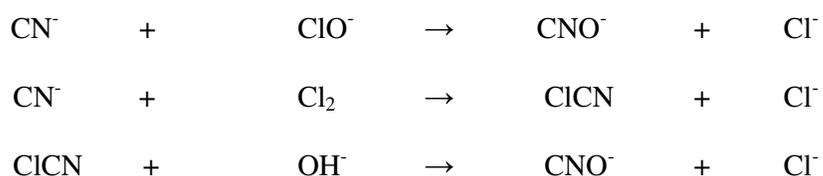
Las plantas EWTP han sido diseñados para tratar la solución Barren en tres etapas: Clorinación alcalina, precipitación de metales y clarificación.

1. Clorinación alcalina

El objetivo de la clorinación alcalina es oxidar el ión cianuro (CN⁻) altamente tóxico y convertirlo a ión cianato (CNO⁻) no tóxico. Se utiliza cloro gaseoso como agente oxidante. Cuando el gas cloro se disuelve en agua, se hidroliza según las reacciones:



El cianuro se oxida por el hipoclorito o directamente por el cloro gaseoso según la siguiente reacción:



2. Precipitación de metales

El objetivo de esta etapa es formar sulfuros insolubles de los diversos metales pesados disueltos en la solución barren, especialmente Hg.

Se utiliza bisulfuro de sodio (NaHS) como precipitador. La precipitación se basa en la baja solubilidad de los compuestos formados (ver tabla 1).

Tabla 1. Tabla de solubilidades de metales como hidróxidos y sulfuros

Metal	Como hidróxido	Como sulfuro
Cobre (Cu^{+2})	$2,2 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-18}$
Mercurio (Hg^{+2})	$3,9 \times 10^{-4}$	$9,0 \times 10^{-20}$
Zinc (Zn^{+2})	1,1	$2,3 \times 10^{-7}$

Los metales de interés en forma de sulfuros, son más insolubles que sus respectivos hidróxidos. El NaHS forma y estabiliza los precipitados.

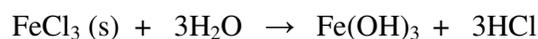
El principal sulfuro que se forma es el sulfuro de mercurio, según la reacción:



3. Clarificación

La clarificación se obtiene mediante la coagulación y floculación de las partículas formadas. Se utiliza cloruro férrico (FeCl_3) como coagulante y el polímero A-110 como floculante.

La coagulación reduce o anula las fuerzas que mantienen separadas las partículas en suspensión. El cloruro férrico también estabiliza el arsénico presente mediante las siguientes reacciones:



La separación sólido - líquido, se lleva a cabo en un clarificador, que es un tanque cilíndrico de fondo cónico invertido y equipado con una rastra de movimiento lento (ver figura 40).

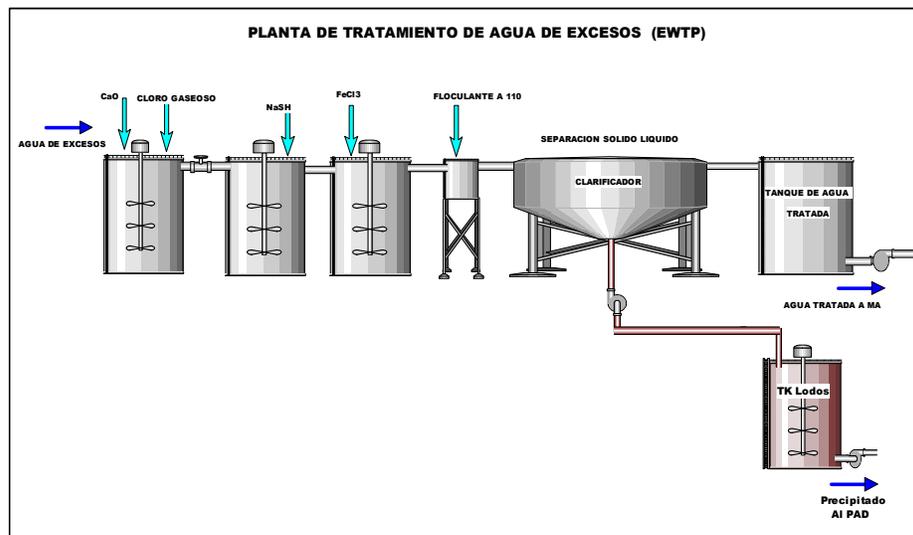


Figura 40. Esquema de la planta de EWTP.

El agua tratada por este método es descargada al medioambiente después de ser monitoreado por el departamento de Medioambiente, con valores de cianuro y metales bajo los límites permisibles.

6.4.2 Plantas de ósmosis reversa

Estas plantas modernas de tratamiento de agua de excesos, tratan las aguas de excesos generadas en los procesos de adsorción en columnas de carbón activado y de las aguas generadas en el proceso Merrill Crowe.

Si las aguas provienen de las plantas de desorción con carbón activado, estas necesitan un proceso de pretratamiento.

1. Plantas de pretratamiento

Actualmente, la recuperación de oro y plata se realiza mediante adsorción en la planta de columnas de carbón activado y la solución Barren pasa por un proceso de pre tratamiento en las instalaciones de la planta Merrill Crowe utilizando los filtros clarificadores y filtros prensa para filtrar los sulfuros metálicos al adicionar NaHS a la solución a tratar ⁽⁶⁾ (ver figura 41).

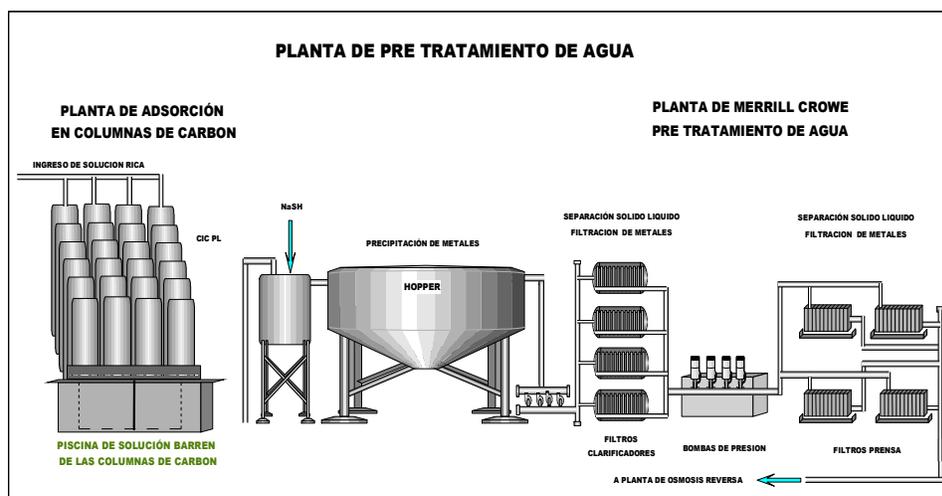
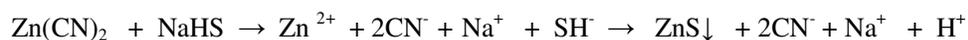
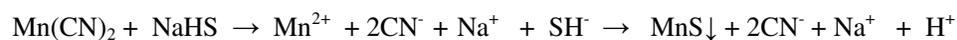
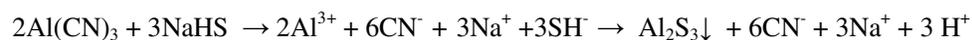
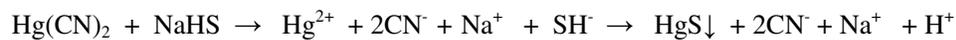


Figura 41. Planta de pre tratamiento de aguas Operaciones Pampa Larga MYSRL

La precipitación de metales se da mediante las siguientes reacciones químicas ⁽⁶⁾:



Mediante estas reacciones químicas los complejos metálicos formados en el proceso de lixiviación y los que no han sido adsorbidos en las columnas de carbón son precipitados en forma de sulfuros, estos sulfuros y demás impurezas como los finos de carbón activado son filtrados en los filtros clarificadores y filtros prensa (ver figura 41). Pasando a las plantas de ósmosis soluciones más limpias facilitando el trabajo de las membranas de ósmosis reversa ⁽⁷⁾.



Figura 42. Precipitación de sulfuros metálicos en los filtros clarificadores.

2. Plantas de ósmosis reversa

La solución pre tratada en la planta de pre tratamiento es bombeada a la planta de tratamiento propiamente dicha, planta de ósmosis reversa.

Se define ósmosis como una difusión pasiva, caracterizada por el paso del agua, disolvente, a través de la membrana semipermeable, desde la solución más diluida a la más concentrada. El proceso consiste en separar un soluto

disuelto de su solvente, mediante fuerzas ejercidas sobre una membrana semi-permeable ⁽²⁰⁾.

La solución de alimento con alto concentración de metales y cianuro ingresa a la membrana bajo presión, produciendo un flujo que atraviesa la membrana llamado permeado el cual es la solución limpia. La solución de alimento que no logra atravesar la membrana se llama concentrado y contiene un mayor número de sales.

A medida que el permeado es producido, la concentración de sales disueltas en la alimentación se incrementa. De alcanzar la saturación de alguna sal proveniente de un metal, esta se precipita en las membranas (ver figura 43).

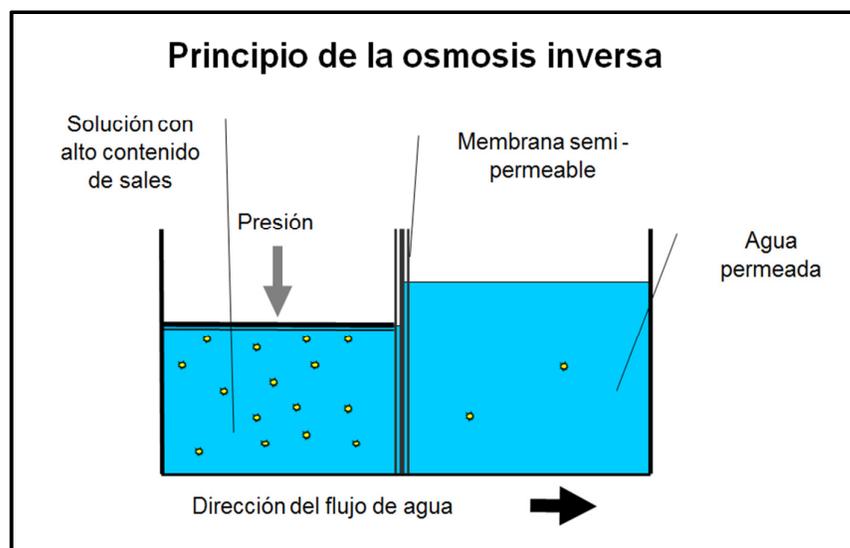


Figura 43. Principio de ósmosis inversa.

Minera Yanacocha trata las aguas de excesos mediante este proceso que es considerada como de última tecnología para tratamiento de aguas. El tratamiento tiene la siguiente secuencia:

Pre – Filtración.- Mediante filtros bolsa de un micrón de espesor que impiden el paso de sólidos en suspensión de tamaños mayores a 1 micra. A mayor contenido de sólidos en suspensión en la alimentación habrá una mayor tendencia a saturar los filtros, lo cual se aprecia en el incremento de su presión diferencial. Si esta presión diferencial alcanza los 7 PSI, se requiere reemplazar los filtros por unos nuevos.

Alta presión.- Mediante bombas centrifugas de alta presión (600 HP y 380 PSI), variador de velocidad regulable (VFD), que permite fijar y mantener el flujo de permeado a producir.

Filtración osmótica.- Mediante membranas semipermeables, las cuales son membranas de poliamida de enrollamiento en espiral, tienen como función separar los elementos metálicos, sales, nitratos, nitritos y otras especies consideradas contaminantes para la descarga de agua al medioambiente.

Dosificación de H₂O₂.- Al final del proceso se dosifica peróxido de hidrógeno para oxidar el cianuro remanente a cianato, hasta obtener los límites máximos permisibles de descarga ⁽⁷⁾. (ver figura 44).

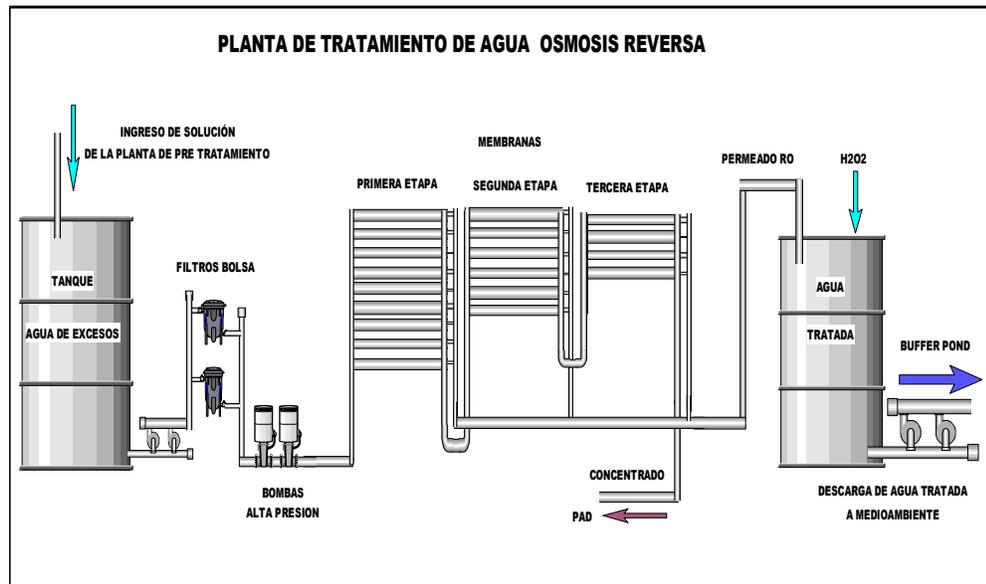


Figura 44. Esquema del tratamiento de agua de excesos por ósmosis reversa

Capítulo VII: Trabajo experimental del tratamiento de agua ácida

7.1 Política de mejora continua en Minera Yanacocha

Minera Yanacocha es una empresa que tiene como política la mejora continua en sus procesos, basándonos en este principio hemos realizado un trabajo de investigación del proceso de precipitación de metales de agua ácida a nivel laboratorio, poniendo mayor énfasis en las reacciones químicas de precipitación del aluminio y manganeso, con el objetivo de optimizar el proceso de tratamiento de aguas ácidas, y mejorar la calidad del agua descargada al medioambiente.

7.2 Introducción del trabajo experimental

El agua ácida generada en las labores mineras de Minera Yanacocha contiene en su composición química elementos metálicos comunes como: Fe, Cu, As, Se, etc. Y altos contenidos de Al y Mn que superan largamente los límites permisibles de descarga de agua al medioambiente.

Las aguas ácidas antes de ser descargadas a medioambiente son tratadas mediante neutralización de la acidez y precipitación de metales, con el fin de mejorar estos procesos, estamos realizando el siguiente trabajo experimental a nivel laboratorio químico que consta de:

1. Estudio a nivel laboratorio de la precipitación de metales en forma de hidróxidos de los elementos metálicos que contienen las aguas ácidas.
2. Determinar experimentalmente los rangos adecuados de valores de pH que se debe trabajar para la precipitación bajo los límites permisibles de los metales que contienen las aguas ácidas.
3. Determinar el comportamiento químico del aluminio y el manganeso en la precipitación de metales en forma de hidróxidos de las aguas ácidas.

7.3 Pruebas experimentales a nivel Laboratorio Químico

7.3.1 Precipitación de metales a diferentes valores de pH

Esta prueba consiste en determinar a nivel laboratorio cuales son los pH óptimos en que precipitan los diferentes metales presentes en las aguas ácidas.

1. Procedimiento

- Se tomaron 20 muestras de 2 000 mL de solución de agua ácida.
- Con la ayuda de un agitador magnético y un pH-metro se añadió lentamente solución de lechada de cal $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ hasta tener diferentes valores de pH (Se precipito a los siguientes valores de pH: (3,0. 3,5. 4,0. 4,5. 5,0. 5,5. 6, 0. 6,5. 7,0. 7,5. 8,0. 8,5. 9,0. 9,5. 10,0. 10,5. 11,0. 11,5. 12,0. 12,5).
- Una vez obtenido el pH determinado se procedió a la floculación usando floculante A-110).
- Se dejó sedimentar y se tomó la muestra para análisis químico por ICP.



Figura 45. Precipitación de metales en agua ácida a diferentes pH.

2. Resultados

Se tienen los siguientes resultados

Tabla 2. Precipitación de cobre a diferentes valores de pH

PRECIPITACIÓN DE COBRE A DIFERENTES VALORES DE pH				
	Concentración inicial	Diferentes	Concentración final	LMP
Muestra	Cu (ppm)	PH	Cu (ppm)	Cu (ppm)
M - 1	6,88	3,00	6,88	0,20
M - 2	6,59	3,50	6,73	0,20
M - 3	6,37	4,00	6,42	0,20
M - 4	6,03	4,50	6,49	0,20
M - 5	6,72	5,00	6,12	0,20
M - 6	6,11	5,50	5,87	0,20
M - 7	6,96	6,00	5,98	0,20
M - 8	6,2	6,50	5,23	0,20
M - 9	6,23	7,00	0,06	0,20
M - 10	6,69	7,50	0,053	0,20
M - 11	6,69	8,00	0,004	0,20
M - 12	6,31	8,50	0,003	0,20
M - 13	6,43	9,00	0,003	0,20
M - 14	6,57	9,50	0,003	0,20
M - 15	6,22	10,00	0,004	0,20
M - 16	6,81	10,50	0,004	0,20
M - 15	6,5	11,00	0,003	0,20
M - 18	6,82	11,50	0,003	0,20
M - 19	6,69	12,00	0,004	0,20
M - 20	6,42	12,50	0,003	0,20

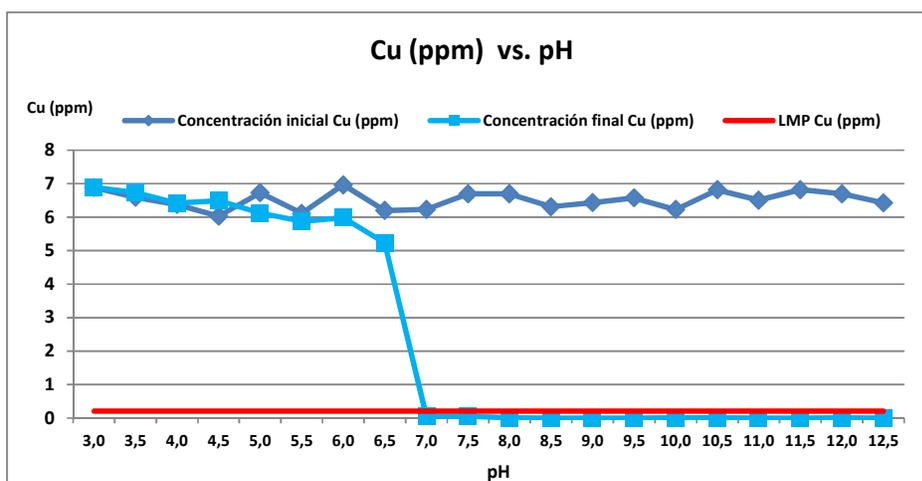


Figura 46. Gráfica de precipitación de Cu a diferente pH.

Tabla 3. Precipitación de fierro a diferentes valores de pH

PRECIPITACIÓN DE HIERRO A DIFERENTES VALORES DE pH				
	Concentración inicial	Diferentes	Concentración final	LMP
Muestra	Fe (ppm)	PH	Fe (ppm)	Fe (ppm)
M - 1	72,91	3,00	72,91	1,60
M - 2	71,76	3,50	72,67	1,60
M - 3	72,87	4,00	70,42	1,60
M - 4	73,23	4,50	70,34	1,60
M - 5	71,65	5,00	65,45	1,60
M - 6	72,61	5,50	65,21	1,60
M - 7	72,74	6,00	34,67	1,60
M - 8	72,89	6,50	17,71	1,60
M - 9	72,01	7,00	0,11	1,60
M - 10	72,42	7,50	0,05	1,60
M - 11	73,77	8,00	0,04	1,60
M - 12	73,29	8,50	0,03	1,60
M - 13	72,77	9,00	0,02	1,60
M - 14	72,79	9,50	0,02	1,60
M - 15	72,48	10,00	0,02	1,60
M - 16	72,71	10,50	0,02	1,60
M - 15	72,71	11,00	0,04	1,60
M - 18	72,87	11,50	0,03	1,60
M - 19	72,22	12,00	0,04	1,60
M - 20	72,45	12,50	0,03	1,60

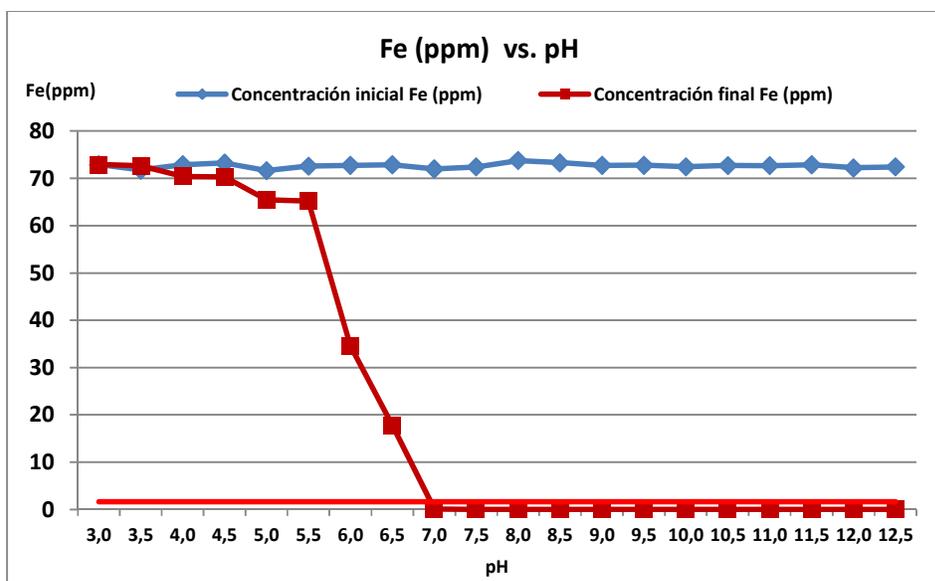
**Figura 47.** Gráfica de precipitación de Fe a diferente pH.

Tabla 4. Precipitación de arsénico a diferentes valores de pH

PRECIPITACIÓN DE ARSÉNICO A DIFERENTES VALORES DE pH				
	Concentración inicial	Diferentes	Concentración final	LMP
Muestra	As (ppm)	PH	As (ppm)	As (ppm)
M - 1	0,138	3,00	0,138	0,010
M - 2	0,134	3,50	0,135	0,010
M - 3	0,148	4,00	0,132	0,010
M - 4	0,138	4,50	0,108	0,010
M - 5	0,146	5,00	0,108	0,010
M - 6	0,142	5,50	0,104	0,010
M - 7	0,131	6,00	0,075	0,010
M - 8	0,142	6,50	0,062	0,010
M - 9	0,141	7,00	0,051	0,010
M - 10	0,141	7,50	0,001	0,010
M - 11	0,138	8,00	0,001	0,010
M - 12	0,138	8,50	0,001	0,010
M - 13	0,127	9,00	0,001	0,010
M - 14	0,137	9,50	0,001	0,010
M - 15	0,124	10,00	0,001	0,010
M - 16	0,134	10,50	0,001	0,010
M - 15	0,138	11,00	0,001	0,010
M - 18	0,132	11,50	0,001	0,010
M - 19	0,127	12,00	0,001	0,010
M - 20	0,145	12,50	0,001	0,010

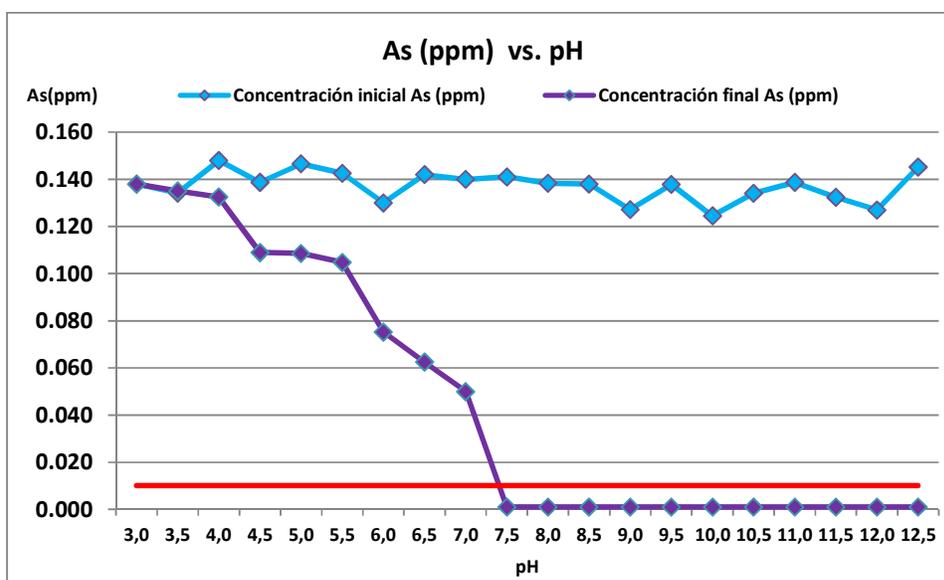
**Figura 48.** Gráfica de precipitación de As a diferente pH.

Tabla 5. Precipitación de zinc a diferentes valores de pH

PRECIPITACIÓN DE ZINC A DIFERENTES VALORES DE pH				
	Concentración inicial	Diferentes	Concentración final	LMP
Muestra	Zn (ppm)	PH	Zn (ppm)	Zn (ppm)
M - 1	5,09	3,00	5,09	0,38
M - 2	5,08	3,50	5,04	0,38
M - 3	5,16	4,00	4,89	0,38
M - 4	5,2	4,50	4,78	0,38
M - 5	5,09	5,00	4,82	0,38
M - 6	5,09	5,50	4,57	0,38
M - 7	5,03	6,00	4,51	0,38
M - 8	5,09	6,50	3,45	0,38
M - 9	5,11	7,00	0,51	0,38
M - 10	4,93	7,50	0,21	0,38
M - 11	5,16	8,00	0,001	0,38
M - 12	5,29	8,50	0,001	0,38
M - 13	5,27	9,00	0,001	0,38
M - 14	5,26	9,50	0,001	0,38
M - 15	4,97	10,00	0,001	0,38
M - 16	5,19	10,50	0,001	0,38
M - 15	5,2	11,00	0,001	0,38
M - 18	5,14	11,50	0,001	0,38
M - 19	5,33	12,00	0,001	0,38
M - 20	5,12	12,50	0,001	0,38

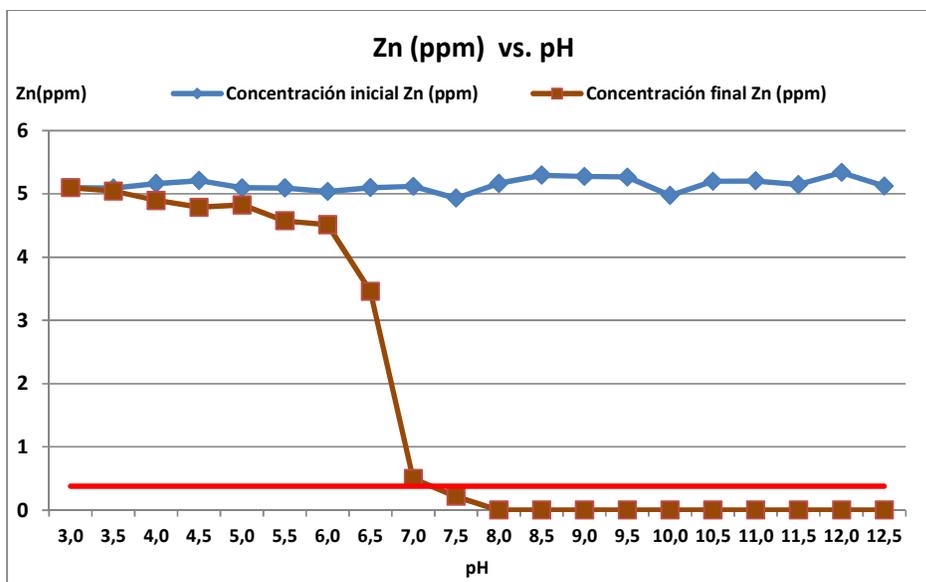
**Figura 49.** Gráfica de precipitación de Zn a diferente pH.

Tabla 6. Precipitación de Aluminio a diferentes valores de pH

PRECIPITACIÓN DE ALUMINIO A DIFERENTES VALORES DE pH				
	Concentración inicial	Diferentes	Concentración final	LMP
Muestra	Al (ppm)	PH	Al (ppm)	Al (ppm)
M - 1	39,44	3,00	39,44	5,00
M - 2	38,18	3,50	38,69	5,00
M - 3	38,81	4,00	38,45	5,00
M - 4	36,93	4,50	37,98	5,00
M - 5	35,89	5,00	37,39	5,00
M - 6	38,44	5,50	36,32	5,00
M - 7	37,06	6,00	36,15	5,00
M - 8	35,70	6,50	34,50	5,00
M - 9	38,12	7,00	0,36	5,00
M - 10	37,59	7,50	0,33	5,00
M - 11	38,29	8,00	0,34	5,00
M - 12	36,86	8,50	0,36	5,00
M - 13	37,68	9,00	3,71	5,00
M - 14	37,06	9,50	4,45	5,00
M - 15	36,67	10,00	9,89	5,00
M - 16	38,31	10,50	16,45	5,00
M - 15	37,94	11,00	14,31	5,00
M - 18	35,41	11,50	4,78	5,00
M - 19	37,90	12,00	2,01	5,00
M - 20	38,61	12,50	0,81	5,00

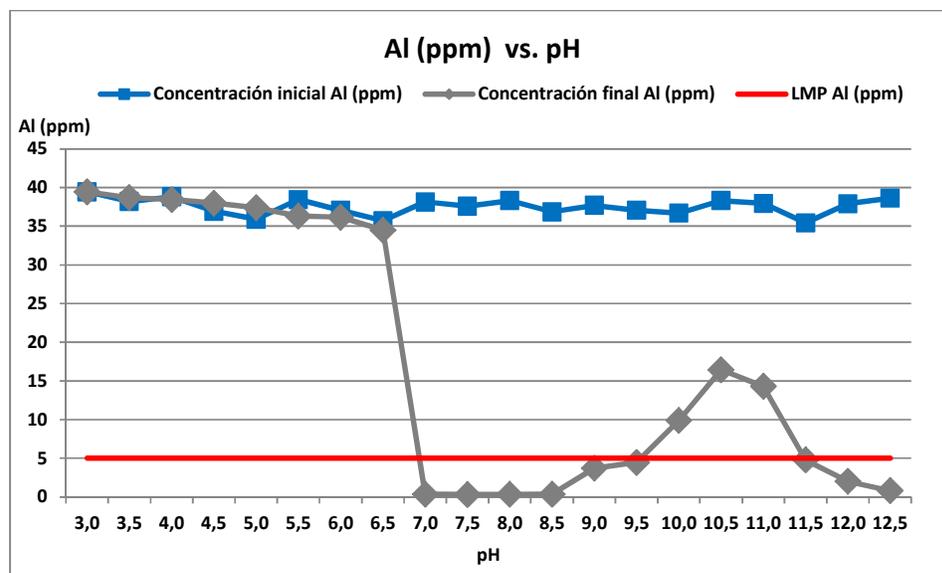
**Figura 50.** Gráfica de precipitación de Al a diferente pH.

Tabla 7. Precipitación de Manganeso a diferentes valores de pH

PRECIPITACIÓN DE MANGANESO A DIFERENTES VALORES DE pH				
	Concentración inicial	Diferentes	Concentración final	LMP
Muestra	Mn (ppm)	PH	Mn (ppm)	Mn (ppm)
M - 1	16,84	3,00	16,84	0,88
M - 2	16,11	3,50	16,43	0,88
M - 3	15,09	4,00	15,93	0,88
M - 4	15,73	4,50	15,25	0,88
M - 5	15,65	5,00	15,38	0,88
M - 6	15,43	5,50	14,23	0,88
M - 7	15,47	6,00	13,98	0,88
M - 8	15,28	6,50	13,2	0,88
M - 9	15,35	7,00	12,34	0,88
M - 10	15,03	7,50	10,23	0,88
M - 11	15,71	8,00	8,72	0,88
M - 12	15,39	8,50	8,09	0,88
M - 13	15,66	9,00	2,59	0,88
M - 14	15,91	9,50	1,39	0,88
M - 15	15,32	10,00	0,48	0,88
M - 16	15,79	10,50	0,27	0,88
M - 15	15,41	11,00	0,002	0,88
M - 18	15,73	11,50	0,002	0,88
M - 19	15,34	12,00	0,002	0,88
M - 20	15,18	12,50	0,002	0,88

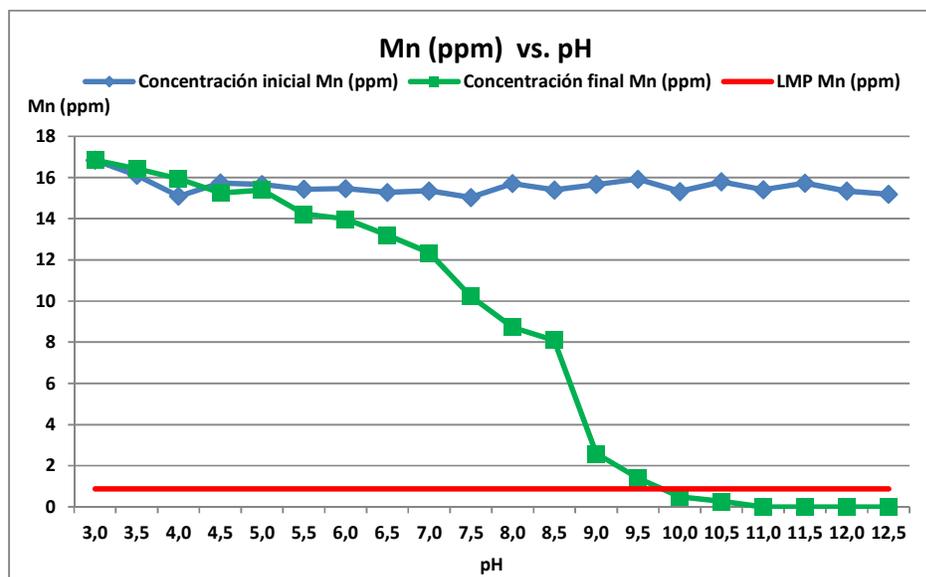
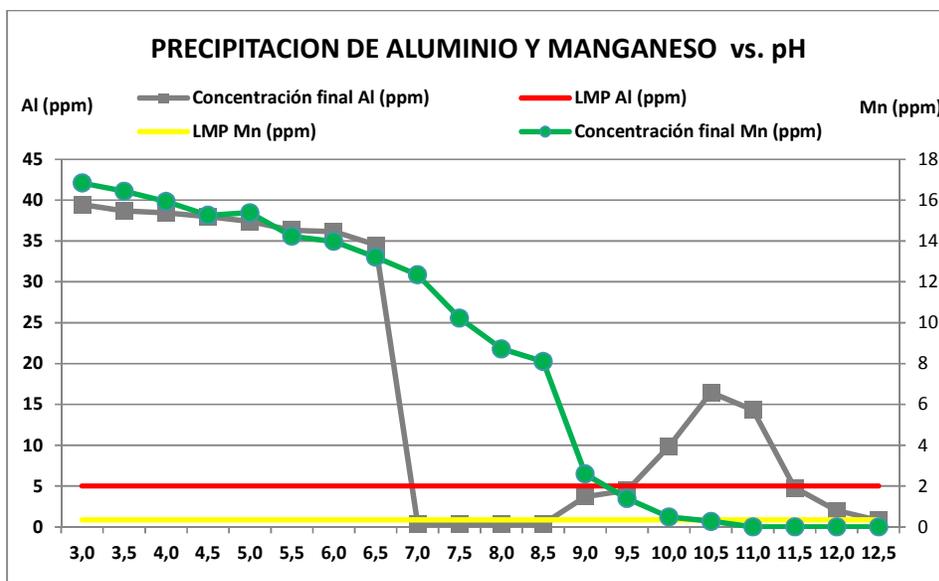
**Figura 51.** Gráfica de precipitación de Mn a diferente pH.

Tabla 8. Precipitación de Aluminio y manganeso a diferentes valores de pH

PRECIPITACIÓN DE ALUMINIO Y MANGANESO A DIFERENTES VALORES DE pH							
Muestra	Concentración inicial	Concentración final	LMP	Concentración inicial	Concentración final	LMP	Diferentes
	Al (ppm)	Al (ppm)	Al (ppm)	Mn (ppm)	Mn (ppm)	Mn (ppm)	PH
M-1	39,44	39,44	5,00	16,84	16,84	0,88	3,00
M-2	38,18	38,69	5,00	16,11	16,43	0,88	3,50
M-3	38,81	38,45	5,00	15,09	15,93	0,88	4,00
M-4	36,93	37,98	5,00	15,73	15,25	0,88	4,50
M-5	35,89	37,39	5,00	15,65	15,38	0,88	5,00
M-6	38,44	36,32	5,00	15,43	14,23	0,88	5,50
M-7	37,06	36,15	5,00	15,47	13,98	0,88	6,00
M-8	35,70	34,50	5,00	15,28	13,2	0,88	6,50
M-9	38,12	0,36	5,00	15,35	12,34	0,88	7,00
M-10	37,59	0,33	5,00	15,03	10,23	0,88	7,50
M-11	38,29	0,34	5,00	15,71	8,72	0,88	8,00
M-12	36,86	0,36	5,00	15,39	8,09	0,88	8,50
M-13	37,68	3,71	5,00	15,66	2,59	0,88	9,00
M-14	37,06	4,45	5,00	15,91	1,39	0,88	9,50
M-15	36,67	9,89	5,00	15,32	0,48	0,88	10,00
M-16	38,31	16,45	5,00	15,79	0,27	0,88	10,50
M-17	37,94	14,31	5,00	15,41	0,002	0,88	11,00
M-18	35,41	4,78	5,00	15,73	0,002	0,88	11,50
M-19	37,90	2,01	5,00	15,34	0,002	0,88	12,00
M-20	38,61	0,81	5,00	15,18	0,002	0,88	12,50

**Figura 52.** Gráfica de precipitación de Al y Mn a diferente pH.

7.3.2 Precipitación de metales a pH >12

Para comprobar los resultados obtenidos en la prueba experimental de laboratorio anterior, se realizó la precipitación de metales a pH>12.

1. Procedimiento

- Se tomaron 07 muestras de 2,000 ml de solución agua ácida) de la planta de pre tratamiento (AWTP1).
- Con la ayuda de un agitador magnético y un pH-metro se añadió lentamente solución de lechada de cal $[Ca(OH)_2]$ hasta llegar a pH 12.3
-
- Una vez obtenido el pH 12.3 se procedió a la coagulación con cloruro férrico y floculación con floculante A-110).
-
- Se sedimenta y toma muestras para análisis químico por ICP.

2. Resultados

En las siguientes tablas y gráficas tenemos resultados experimentales realizados en laboratorio químico del comportamiento de los metales a pH >12.

Tabla 9. Precipitación de fierro a pH >12

PRECIPITACIÓN DE HIERRO A pH > 12			
Muestra	Fe (ppm)	Fe (LMP)	pH
A - 1	79,23	1,00	2,9
A - 2	0,001	1,00	12,3
A - 3	0,001	1,00	12,3
A - 4	0,001	1,00	12,3
A - 5	0,001	1,00	12,3
A - 6	0,001	1,00	12,3
A - 7	0,001	1,00	12,3

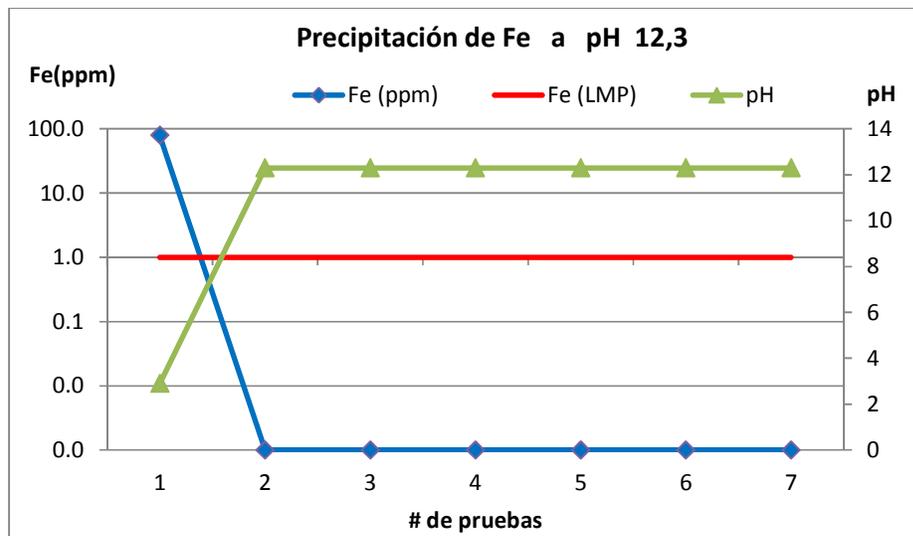
**Figura 53.** Gráfica de precipitación de Fe a pH >12.

Tabla 10. Precipitación de cobre a pH >12

PRECIPITACIÓN DE COBRE A pH > 12			
Muestra	Cu (ppm)	Cu (LMP)	pH
A - 1	5,82	0,2	2,9
A - 2	0,001	0,2	12,3
A - 3	0,001	0,2	12,3
A - 4	0,001	0,2	12,3
A - 5	0,001	0,2	12,3
A - 6	0,001	0,2	12,3
A - 7	0,001	0,2	12,3

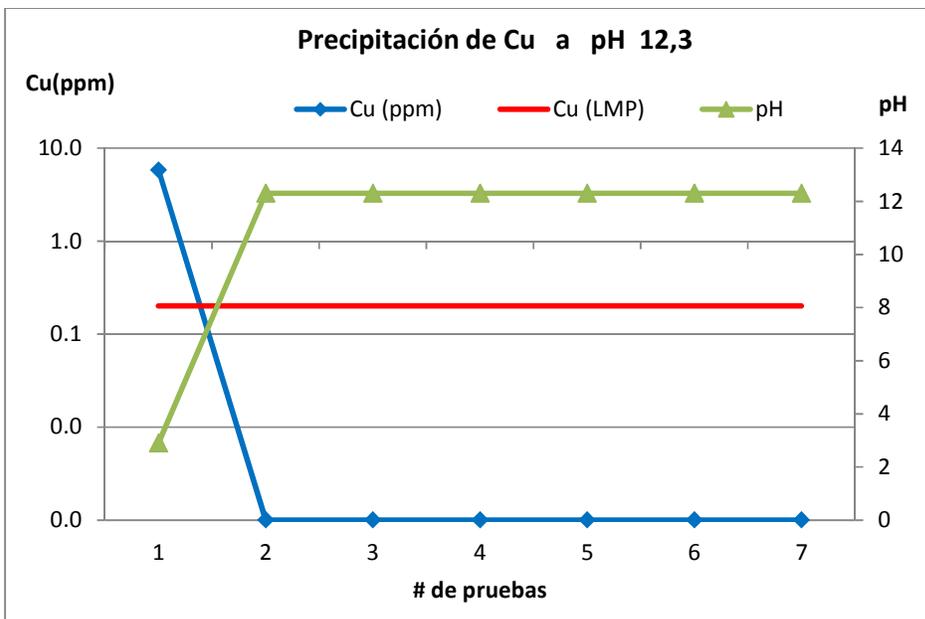
**Figura 54.** Gráfica de precipitación de Cu a pH >12.

Tabla 11. Precipitación de arsénico a pH >12

PRECIPITACIÓN DE ARSÉNICO A pH > 12			
Muestra	As (ppm)	As (LMP)	pH
A - 1	0,041	0,01	2,9
A - 2	0,001	0,01	12,3
A - 3	0,001	0,01	12,3
A - 4	0,001	0,01	12,3
A - 5	0,001	0,01	12,3
A - 6	0,001	0,01	12,3
A - 7	0,001	0,01	12,3

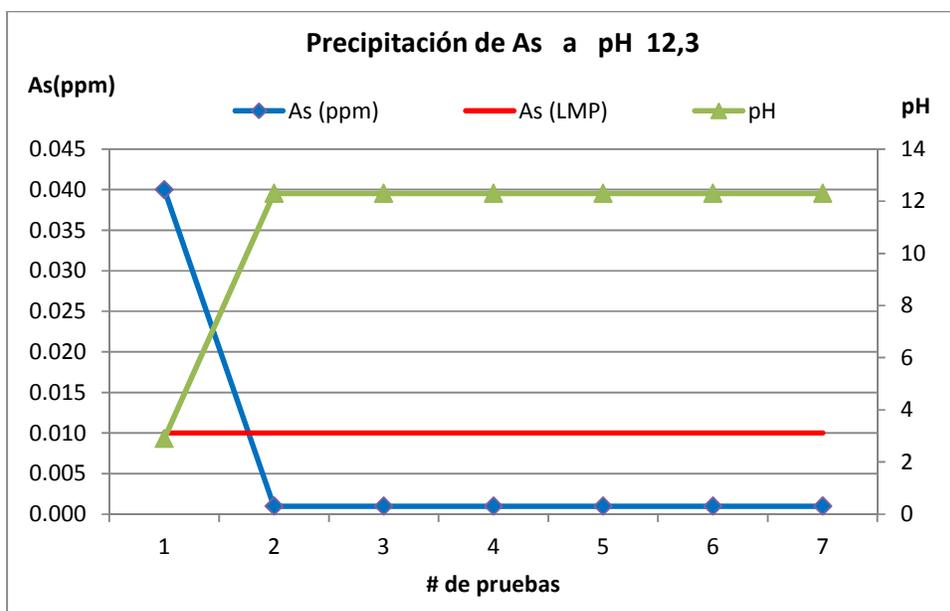
**Figura 55.** Gráfica de precipitación de As a pH >12.

Tabla 12. Precipitación de Zinc a pH >12

PRECIPITACIÓN DE ZINC A pH > 12			
Muestra	Zn (ppm)	Zn (LMP)	pH
A - 1	6,81	0,38	2,9
A - 2	0,001	0,38	12,3
A - 3	0,001	0,38	12,3
A - 4	0,001	0,38	12,3
A - 5	0,001	0,38	12,3
A - 6	0,001	0,38	12,3
A - 7	0,001	0,38	12,3

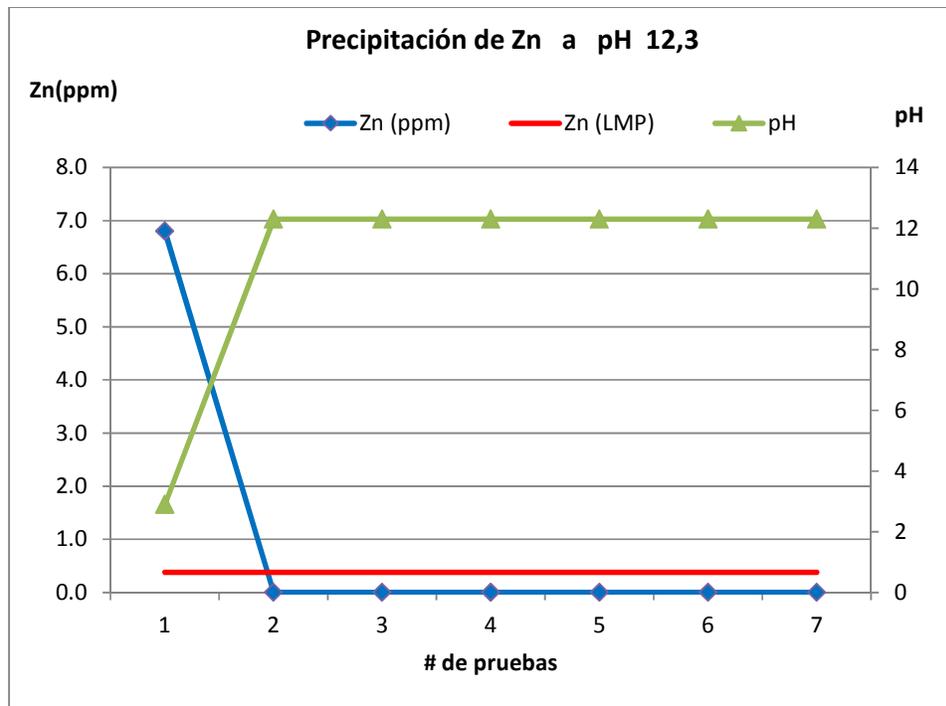
**Figura 56.** Gráfica de precipitación de Zn a pH >12.

Tabla 13. Precipitación de Aluminio a pH >12

PRECIPITACIÓN DE ALUMINIO A pH > 12			
Muestra	Al (ppm)	Al (LMP)	pH
A - 1	60,56	5,0	2,9
A - 2	1,09	5,0	12,3
A - 3	1,23	5,0	12,3
A - 4	2,82	5,0	12,3
A - 5	0,48	5,0	12,3
A - 6	1,02	5,0	12,3
A - 7	0,51	5,0	12,3

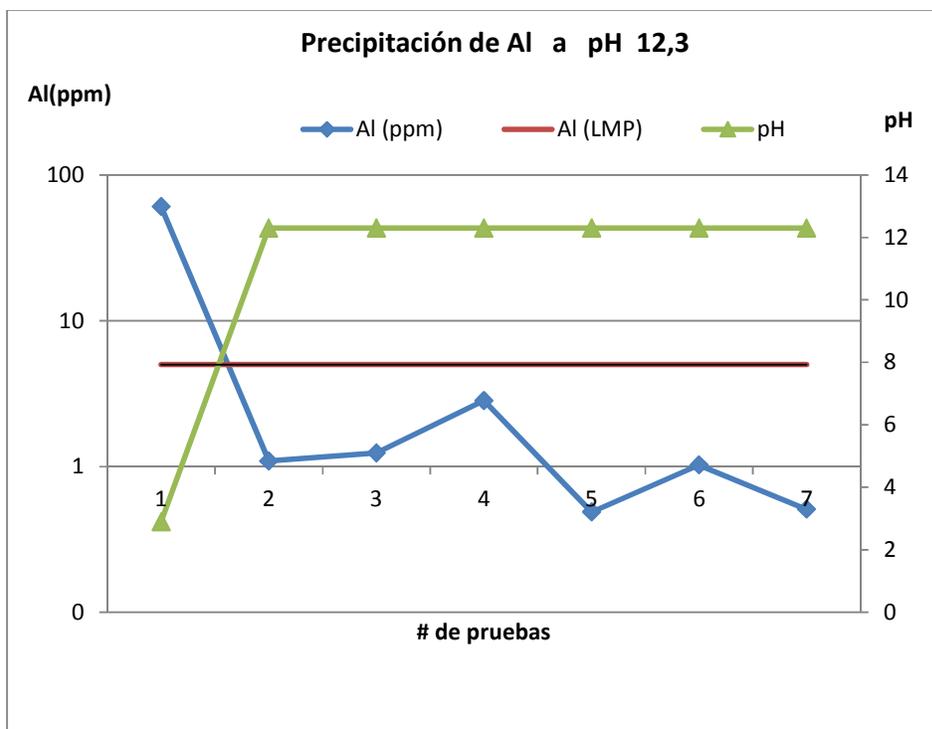
**Figura 57.** Gráfica de precipitación de Al a pH >12.

Tabla 14. Precipitación de manganeso a pH >12

PRECIPITACIÓN DE MANGANESO A pH > 12			
Muestra	Mn (ppm)	Mn (LMP)	pH
A - 1	19,57	0,88	2,9
A - 2	0,003	0,88	12,3
A - 3	0,001	0,88	12,3
A - 4	0,013	0,88	12,3
A - 5	0,001	0,88	12,3
A - 6	0,002	0,88	12,3
A - 7	0,001	0,88	12,3

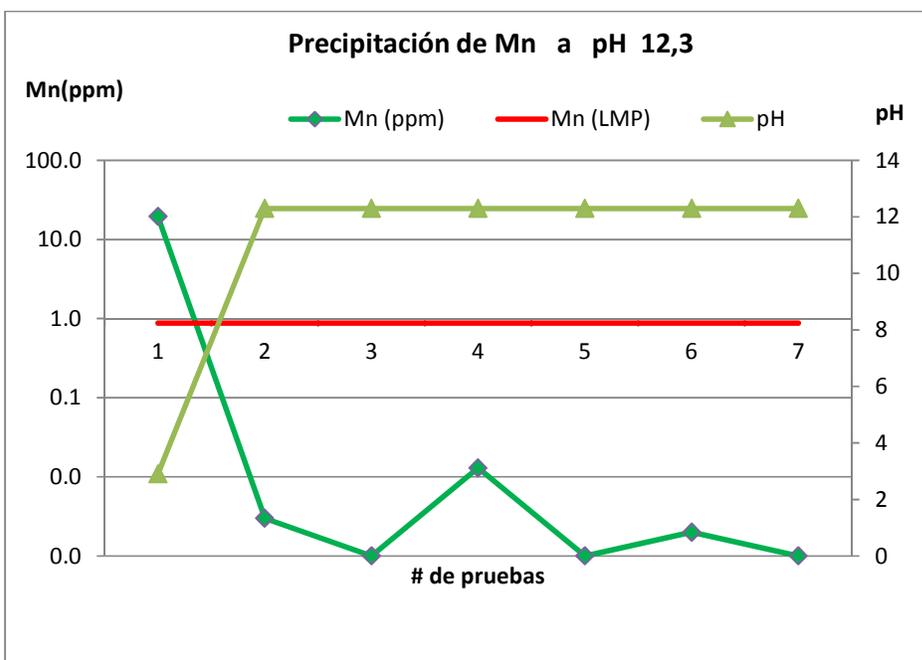
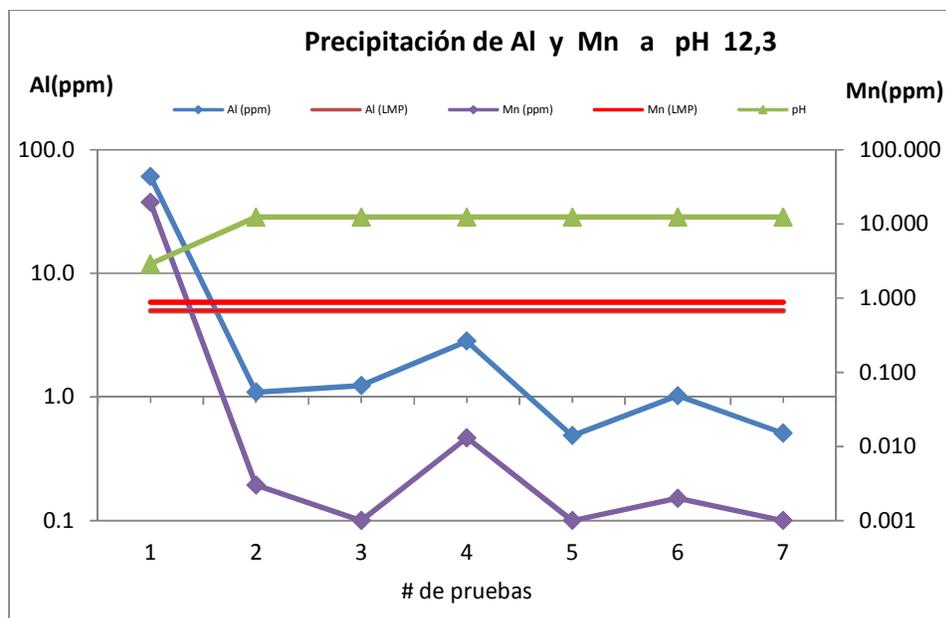
**Figura 58.** Gráfica de precipitación de Mn a pH >12.

Tabla 15. Precipitación de Aluminio y manganeso a pH >12

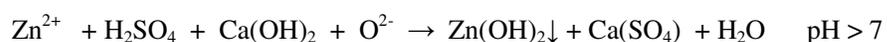
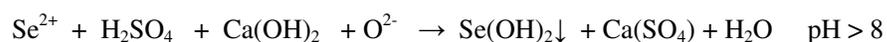
PRECIPITACIÓN DE ALUMINIO Y MANGANESO A pH > 12					
Muestra	Al (ppm)	Al (LMP)	Mn (ppm)	Mn (LMP)	pH
A - 1	60,56	5,0	19,57	0,88	2,9
A - 2	1,09	5,0	0,003	0,88	12,3
A - 3	1,23	5,0	0,001	0,88	12,3
A - 4	2,82	5,0	0,013	0,88	12,3
A - 5	0,48	5,0	0,001	0,88	12,3
A - 6	1,02	5,0	0,002	0,88	12,3
A - 7	0,51	5,0	0,001	0,88	12,3

**Figura 59.** Gráfica de precipitación de Al y Mn a pH >12.

7.3.3 Discusión general de los resultados experimentales

1. En las figuras 46 a la 49, podemos observar la precipitación del Cu, Fe, Se, As, Zn, en forma de hidróxidos, se da a $\text{pH} > 7$ lo que se mantienen estables en un alto rango de pH.

2. Las reacciones químicas de precipitación de metales son las siguientes:



3. En la figura 50 se observa que la precipitación del aluminio en forma de hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3\downarrow$ se da en el rango de pH (7 - 8). Luego se aprecia las propiedades anfóteras del aluminio al subir el $\text{pH} > 8$ empieza una redisolución del aluminio debido a que el aluminio en medio básico forma el ion aluminato $[\text{AlO}_2]^-$ y luego se transforma en una especie tetra coordinada $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, pasando los límites permisibles un rango de pH (9,5 - 11,5); para bajar posteriormente a $\text{pH} > 12$ bajo los límites permisibles, debido a la precipitación del ión $[\text{AlO}_2]^-$ en forma de hidróxido $\text{Al}(\text{OH})_3\downarrow$.

4. En la figura 51, se observa que la precipitación completa del manganeso en forma de hidróxido de manganeso $\text{Mn(OH)}_2\downarrow$ se da a $\text{pH} > 10$, el cual permanece con una alta estabilidad a pH mayores.
5. En la figura 52, podemos observar que tanto al aluminio como el manganeso precipitan bajo los LMP como hidróxidos $\text{Al(OH)}_3\downarrow$ y $\text{Mn(OH)}_2\downarrow$ a $\text{pH} > 11,5$ y se mantienen estables a pH mayores. Demostramos que el aluminio y el manganeso pueden precipitar juntos a $\text{pH} > 11,5$.
6. De las figuras 53 a la 58, se observan que las precipitaciones de Cu, Fe, As, Zn, Al, Mn a $\text{pH} > 12$ es completa y se mantienen estables.
7. Con esto demostramos que el aluminio y el manganeso precipitan juntos a $\text{pH} > 12$.

7.3.4 Química del aluminio

1. Aluminio

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre (7,5%) en peso, se encuentra en la naturaleza formando silicatos, tales como micas y feldespatos, e hidroxos óxidos como la bauxita y criolita (Na_3AlF_6)⁽⁵⁾.

El aluminio es soluble en ácidos minerales diluidos, reacciona en condiciones ordinarias con hidróxidos alcalinos, alógenos y con numerosos no metales.

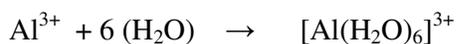
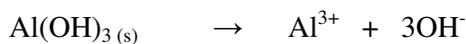
El hidróxido de aluminio $\text{Al(OH)}_3\downarrow$ es anfótero teniendo las siguientes constantes de disociación.



El hidróxido de aluminio se comporta como ácido y como base, según las reacciones químicas mostradas. El aluminio se disuelve en medio ácido formando el ión (Al^{3+}). Mientras que en medio básico forma el ión aluminato (AlO_2^-).

2. El hidróxido de aluminio como base

El hidróxido de aluminio como base al encontrarse en medio ácido produce iones (Al^{3+}), estos a su vez se hidrolizan en soluciones acuosas formando sales como el ión octaédrico $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ teniendo un comportamiento ácido. Este ión a su vez en solución acuosa presenta las siguientes reacciones químicas:

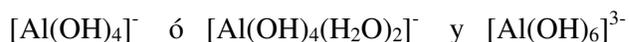


3. El hidróxido de aluminio como ácido

El hidróxido de aluminio como ácido en medio básico da origen a sales que contienen los iones AlO_2^- mediante la siguiente reacción química:



Estos iones se encuentran indudablemente hidratados en disolución y probablemente sería más correcto formularlos como:



4. Precipitación experimental del aluminio

Las reacciones químicas de precipitación del aluminio en las plantas de tratamiento de aguas al ser tratadas con hidróxido de calcio se dan mediante las siguientes reacciones químicas (ver figura 60).

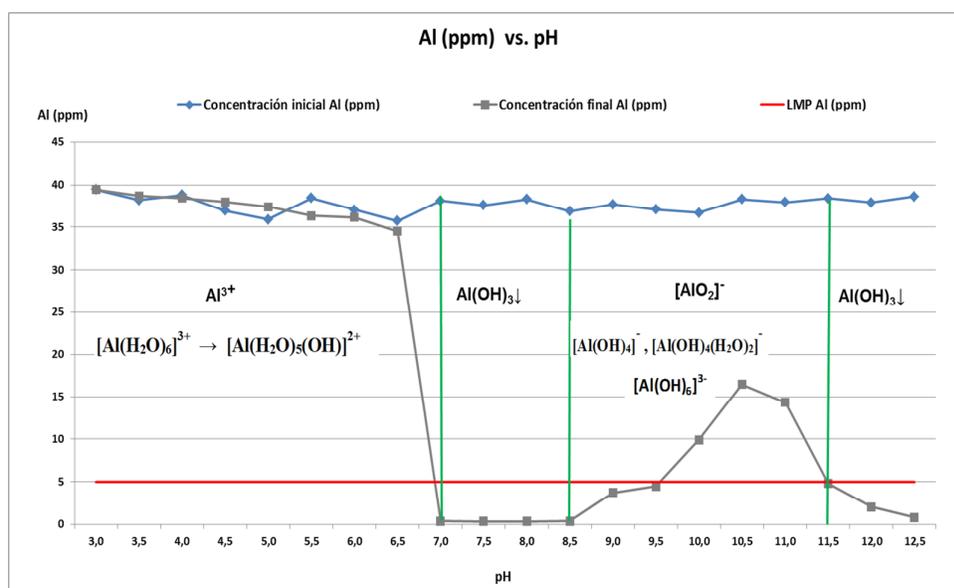


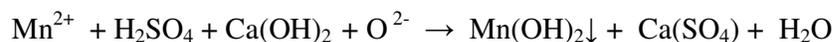
Figura 60. Gráfica de precipitación de Al a diferentes valores de pH.

7.3.5 Química del manganeso

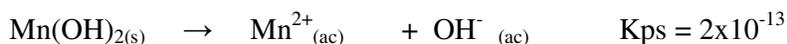
1. Manganeso

Es un elemento relativamente abundante y constituye alrededor de 0,085% de la corteza terrestre. Entre los metales pesados solo el hierro es más abundante. A pesar de hallarse muy distribuído existe depósitos importantes de minerales muy buenos, el más importante de los cuales es la pirolusita, MnO_2 . El manganeso es bastante electropositivo y se disuelve fácilmente en ácidos diluídos ⁽⁵⁾.

El manganeso presente en las aguas ácidas de mina precipita en forma de hidróxido a $pH > 10$ según la reacción química:



El hidróxido de manganeso precipita en soluciones ácidas donde se encuentra el ión Mn^{2+} mediante hidróxidos alcalinos según la siguiente reacción química:



El hidróxido de manganeso es ligeramente anfótero, presentando la siguiente reacción química:



2. Precipitación experimental del Mn

De acuerdo a las pruebas experimentales realizadas, el manganeso precipita según la siguiente reacción química (ver figura 61).

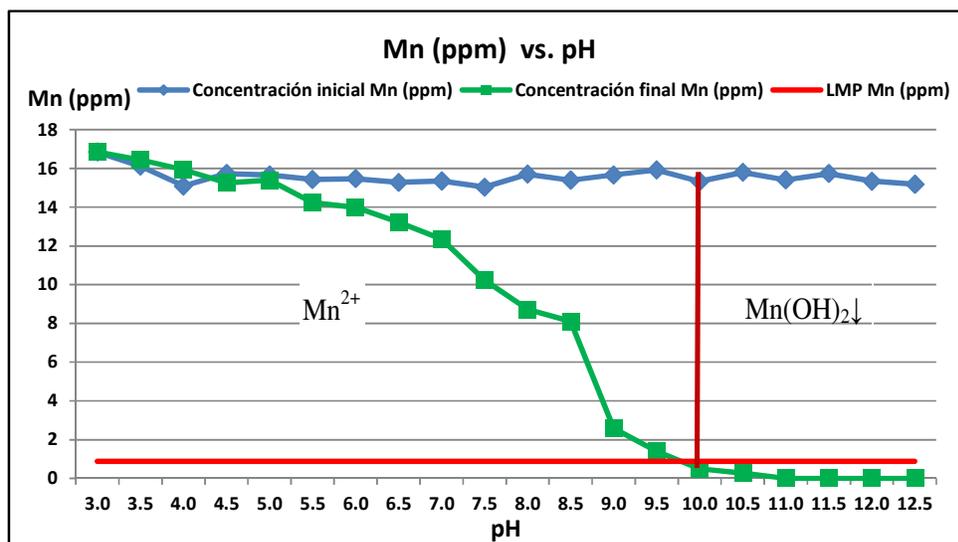


Figura 61. Gráfica de precipitación de Mn a diferentes valores de pH.

7.3.6 Conclusiones del proceso experimental

Se ha comprobado experimentalmente a nivel laboratorio químico las propiedades anfóteras del aluminio al comprobar la formación de los iones: (Al^{3+}) en medio ácido y los iones (AlO_2^-) en medio básico.

Se ha determinado experimentalmente que el aluminio (Al^{3+}) puede precipitar en medio neutro a valores de pH entre (7 - 8), mediante la reacción:



Se ha determinado que el aluminio que se encuentra en medio básico

formando el ión (AlO_2^-), puede precipitar en forma de hidróxido aun exceso de pH, ha valores de $\text{pH} > 12$.

Se ha determinado que tanto el aluminio como el manganeso pueden precipitar juntos a valores de $\text{pH} > 12$ (ver figura 62).

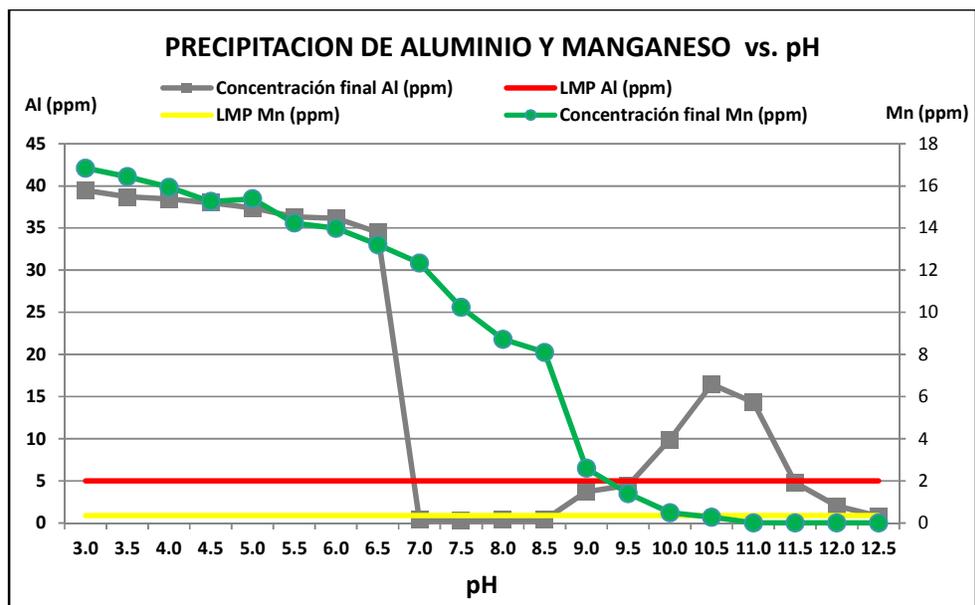


Figura 62. Gráfica de precipitación de Al y Mn a diferente pH.

**Capítulo VIII: Tratamiento de agua ácida en
Minera Yanacocha**

8.1 Plantas de tratamiento de agua ácida en Minera Yanacocha

Minera Yanacocha SRL, dispone de plantas de tratamiento de aguas ácidas llamadas AWTP (Acid Water Treatment Plant), para tratar el agua ácida que se generan en las labores mineras. Las plantas están diseñadas en dos etapas, la primera planta de pre tratamiento y la segunda planta de tratamiento (ver figura 63).

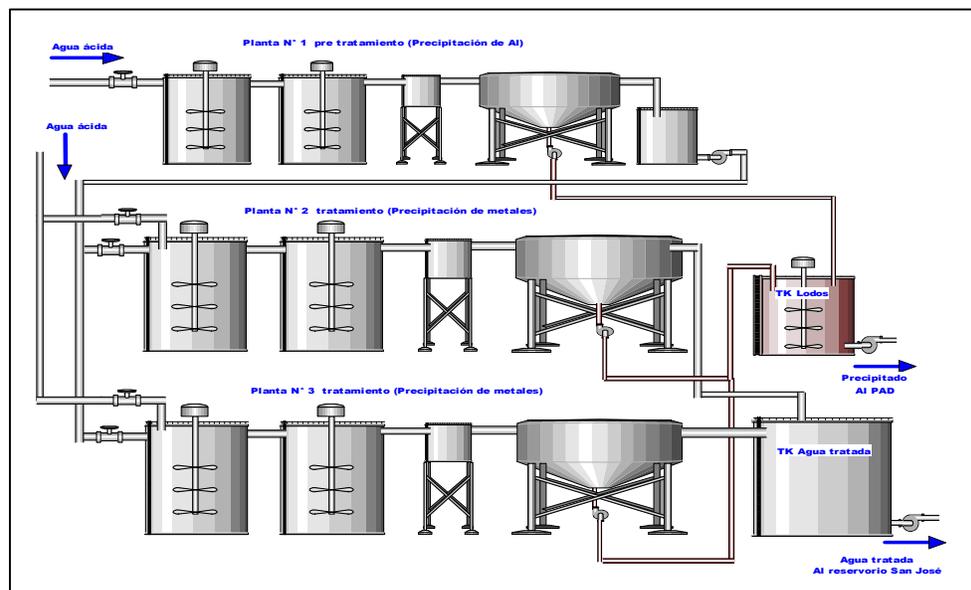


Figura 63. Esquema de las plantas de tratamiento de agua ácida, MYSRL.

El diseño obedece a que las aguas contienen concentraciones sobre los límites permisibles de elementos metálicos tales como: Cu, Fe, As, Se, etc. Estos son fáciles de precipitar en forma de hidróxidos mediante reacción química con el óxido de calcio (CaO), tal como lo demostramos experimentalmente, la mayoría de los elementos metálicos precipitan en un rango entre (7-8) valores de pH. Por contener elementos como el aluminio y manganeso y por las características anfóteras de estos dos elementos, se tiene que precipitar primero

el aluminio a un pH entre 7 – 8 y luego en una segunda etapa se precipita el manganeso a pH entre 10 -11 juntamente con los demás elementos metálicos que no han terminado de precipitar en la primera etapa.

El proceso en las dos etapas es igual con la diferencia de que en la primera etapa (pretratamiento) sirve para la precipitación de los elementos metálicos como el Cu, Fe, As, Zn, etc. El aluminio a pH entre 7 – 8, como vimos experimentalmente tiene dos rangos de pH que puede precipitar como hidróxidos.

Y en la segunda etapa (plantas de tratamiento) se trabaja a pH entre 10 -11, para la precipitación del manganeso en forma de hidróxido.

Según esta teoría, las plantas de tratamiento de agua ácida se diseñaron en dos etapas:

Primera etapa: Planta de pre tratamiento para precipitar Al en forma de hidróxido, $\text{Al}(\text{OH})_3\downarrow$ en un rango de pH 7 - 8 y otros elementos metálicos.

Segunda etapa: Planta de tratamiento para precipitar Mn en forma de hidróxido de manganeso $\text{Mn}(\text{OH})_2\downarrow$ a $\text{pH}>10$ y otros metales que no han podido precipitar en la primera etapa.

Teniendo al final de esta operación agua tratada con contenidos metálicos bajo los límites permisibles (ver figura 64).

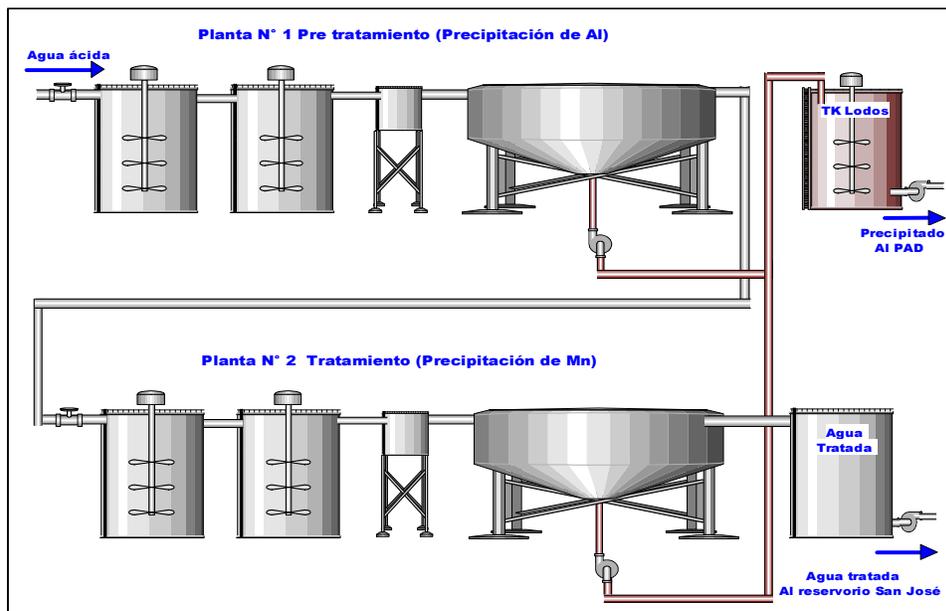


Figura 64. Plantas AWTP en 02 etapas para precipitación de metales, MYSRL.

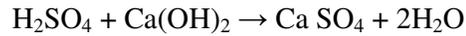
8.2 Tratamiento de agua ácida

La siguiente secuencia detalla, el proceso de tratamiento de aguas ácidas y la descarga al medio ambiente obedeciendo estándares del reglamento ambiental.

8.2.1 Neutralización de la acidez y precipitación

La neutralización de la acidez se logra con la adición de cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para incrementar el pH del agua ácida entre 7- 8 en el tanque de neutralización, para la precipitación de aluminio en la planta de pre tratamiento y un incremento del pH entre 10 – 11 para la precipitación de manganeseo en la segunda etapa.

La reacción química en el proceso de neutralización se puede explicar mediante la siguiente reacción:



La precipitación de los elementos metálicos presentes en el agua precipita en un rango alto de pH, por lo que al final del proceso tendremos precipitado la mayoría de los elementos metálicos bajo los límites máximos permisibles.

Las reacciones más importantes en esta etapa es la precipitación de los hidróxidos metálicos formados al reaccionar los sulfatos metálicos presentes en el agua con los agentes alcalinos, principalmente con el hidróxido de calcio. Las reacciones más importantes son:

1. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$
2. $\text{Cu}(\text{SO}_4) + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4$
3. $\text{Se}(\text{SO}_4) + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Se}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4$
4. $\text{As}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{As}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$
5. $\text{Zn}(\text{SO}_4) + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4$

8.2.2 Coagulación

La solución precipitada pasa a un segundo tanque (tanque estabilizador) para consolidar la consistencia de los sólidos precipitados, la estabilización del

precipitado se logra mediante la adición de cloruro férrico (FeCl_3) (ver figura 65).

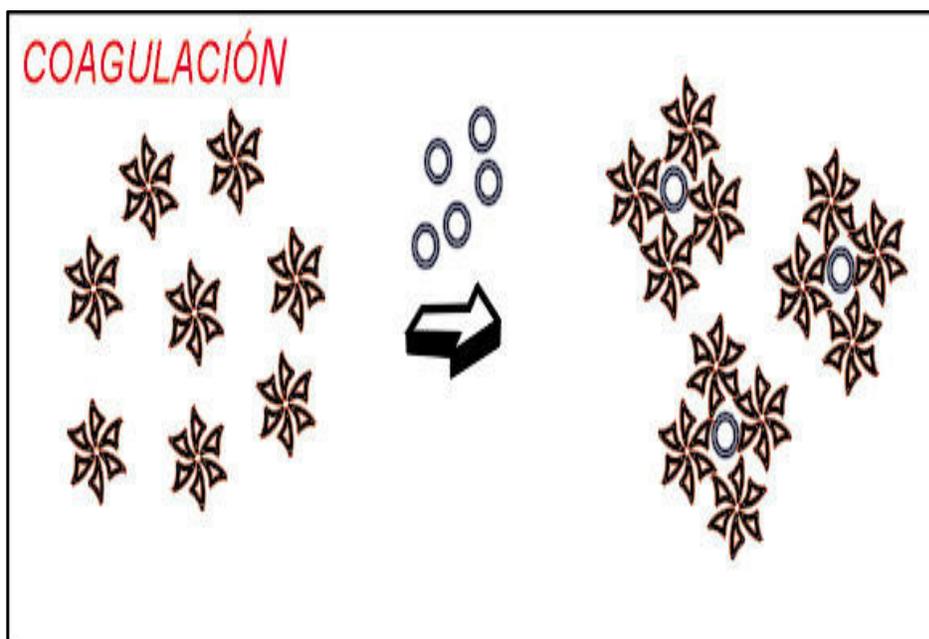


Figura 65. Coagulación de partículas coloidales.

El objetivo de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración, la coagulación no sólo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos.

En la neutralización del agua ácida con cal, el Fe^{2+} neutraliza como hidróxido, formando un flóculo grande y de fácil separación, la desestabilización de las partículas coloidales se logra, al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado (ver figura 66).

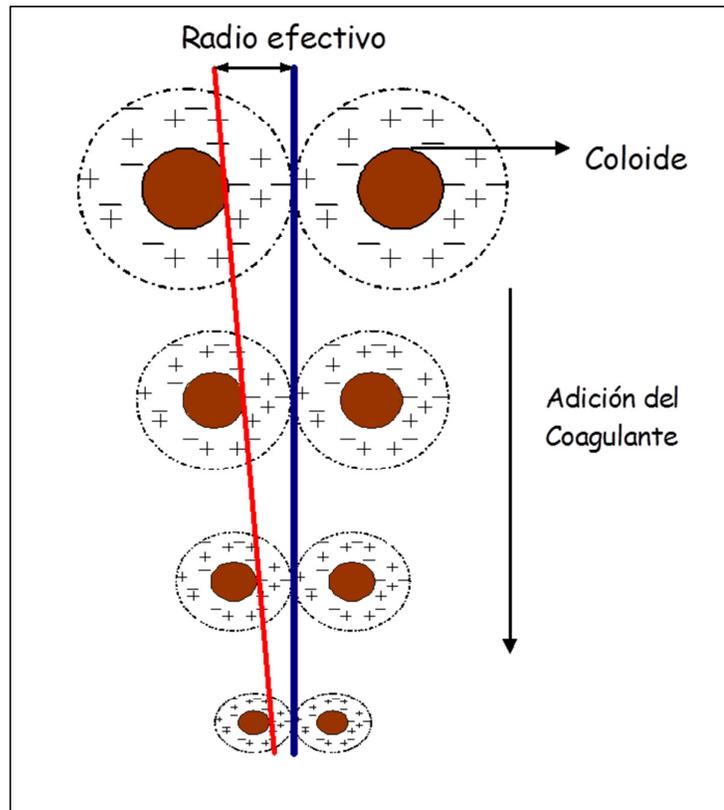
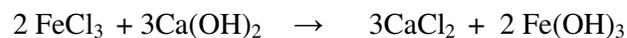


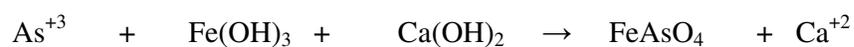
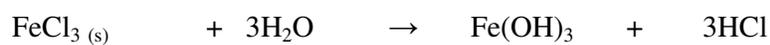
Figura 66. Desestabilización de los coloides por acción del coagulante.

El cloruro férrico actúa como desestabilizador de las partículas coloidales que puede conseguirse por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas.

El proceso de coagulación transforma las pequeñas partículas en grandes aglomerados de manera que se facilite la sedimentación.



El cloruro férrico también estabiliza el arsénico presente mediante las siguientes reacciones químicas:



8.2.3 Floculación

La solución coagulada pasa a un tercer tanque donde se realiza el proceso de floculación que viene a ser la formación de flóculos resistentes, por medio de la acción del floculante. El floculante usado es un floculante anionico (A110).

La floculación, consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad.

Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar. Suceden que los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no sean lo suficientemente grande como para sedimentar con rapidez deseada, por lo que el empleo de un floculante es necesario para reunir en forma de red, formando puentes de una superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados, tal como se está mostrando en la figura 67.

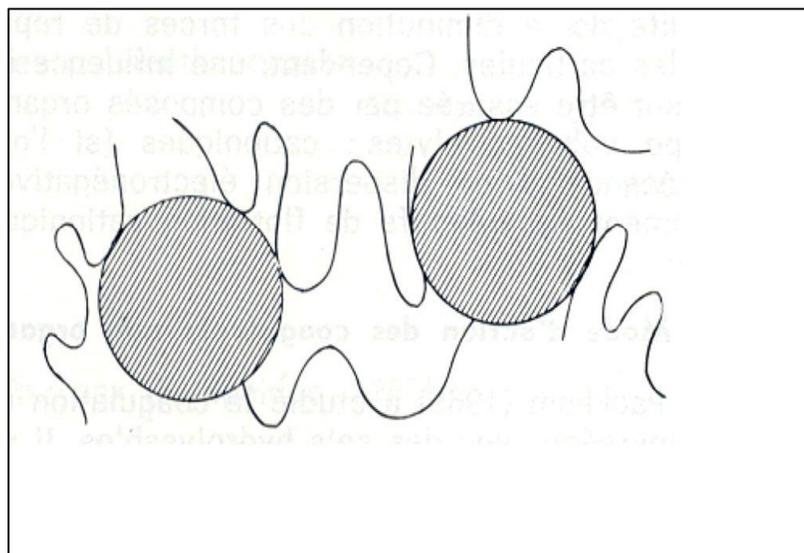


Figura 67. Floculación de partículas coloidales.

8.2.4 Clarificación y sedimentación

La clarificación es un procedimiento de separación sólido-líquido, en el cual las fuerzas diferenciales (gravedad, centrífuga, magnética o eléctrica), son aplicadas para consolidar o unir partículas sólidas suspendidas en fluidos.

Se logra la separación sólido – líquido por las diferencias de densidades, cuando, las partículas tienen un tamaño adecuado.

Las partículas coloidales son de tamaño pequeño. Para facilitar la separación de la solución, se tiene que agrupar las partículas por medio de los coagulantes y floculantes. Cuando el tamaño del floc es adecuado, su separación es fácil.

La solución floculada pasa a un reactor clarificador donde se produce el proceso de separación sólido líquido. La separación S-L, se lleva a cabo en un tanque cilíndrico de fondo cónico invertido; equipado con un rastrillo de rotación lenta, para mover los sólidos espesados al punto central de descarga (ver figura 48).



Figura 68. Clarificación del agua tratada, en reactor clarificador.

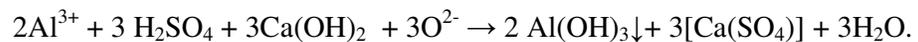
La solución después de análisis químicos por metales es descargada al reservorio San José y luego de un estricto control medioambiental con valores metálicos bajo los límites permisibles son descargadas a los canales comunales para el uso agrícola y ganadero.

Capítulo IX. Discusión de resultados

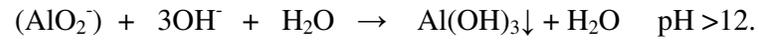
9.1 Discusión de resultados experimentales

Con respecto a las pruebas experimentales presentados podemos concluir que:

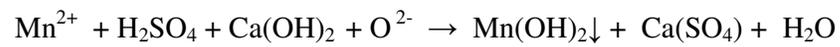
1. La mayoría de los elementos metálicos que son disueltos por la acidez de las aguas, precipitan en forma de hidróxidos metálicos en un rango de pH entre 7 -8. Los cuales son fácilmente separados mediante separación sólido líquido en los reactores clarificadores de las plantas de tratamiento de aguas ácidas.
2. El hidróxido de aluminio en medio ácido se disuelve formando el ión (Al^{3+}) y que este a su vez se hidrata formando el ión $[(\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6)]^{3+}$ a valores de $\text{pH} < 7$.
3. En medio básico el aluminio forma el ión aluminato (AlO_2^-) y que este a su vez se encuentra hidratado formando los siguientes iones: $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ o $[\text{Al}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2]^-$ y $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{3-}$, ha valores de pH entre 8 – 11.
4. Se ha comprobado experimentalmente que el aluminio (Al^{3+}) puede precipitar en forma de hidróxidos ($\text{Al}(\text{OH})_3 \downarrow$) en medio neutro a valores de pH entre 7 - 8, mediante la reacción:



5. Se ha comprobado que el aluminio que se encuentra en medio básico formando el ión (AlO_2^-), puede precipitar en forma de hidróxido a un exceso de pH, ha valores de $\text{pH} > 12$ mediante la siguiente reacción:



6. Se ha comprobado que el manganeso presente en las aguas ácidas de mina precipita en forma de hidróxido a $\text{pH} > 10$ y se mantienen constantes a valores mayores de pH , según la reacción química:



7. Se ha determinado que tanto el aluminio como el manganeso pueden precipitar juntos a valores de $\text{pH} > 12$.
8. El Al y Mn bajo ciertas condiciones de pH se comportan como anfóteros. lo que complica la precipitación de estos.

Capítulo X. Conclusiones

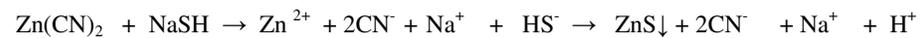
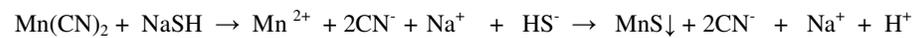
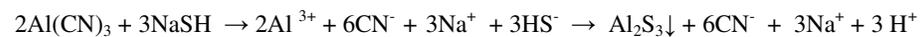
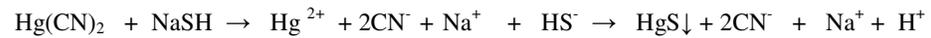
1. Minera Yanacocha es una empresa que dentro de sus actividades mineras tiene como prioridad la protección y la rehabilitación medioambiental. Cumpliendo en forma responsable las leyes medioambientales nacionales e internacionales.

2. Minera Yanacocha aplica las mejores prácticas para el control de efluentes en las operaciones para proteger la calidad de agua y cumplir con nuestra Política Ambiental:
 - Prevenir o mitigar los posibles impactos de nuestras actividades en el medio ambiente.
 - Proteger la calidad y cantidad de agua y buscar oportunidades para mejorar la disponibilidad de agua en cooperación con las autoridades y otros grupos de interés.

3. La gestión de los efluentes generados en las labores mineras de Yanacocha, tales como: sedimentos, generación de aguas de excesos y drenaje ácido de mina (DAM), de los procesos productivos, han sido un foco principal de investigación durante los últimos años en la empresa.

4. Para el control de generación de sedimentos, tenemos los siguientes controles: Control de la erosión, construcción de canales y cunetas, control de la velocidad del agua, control de la estabilidad de suelos y construcción de sedimentadores.

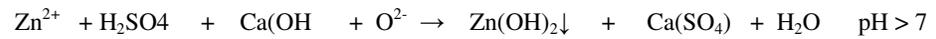
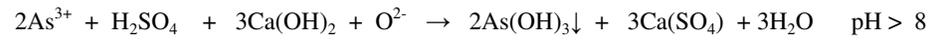
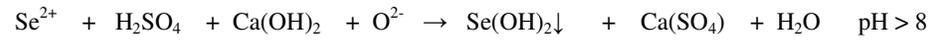
5. Para el control de agua de excesos, generadas en los procesos productivos cuenta con plantas de pre tratamiento para la precipitación en una primera etapa de elementos metálicos como el Hg , Al , Mn , Zn, con NaHS mediante las siguientes reacciones químicas:



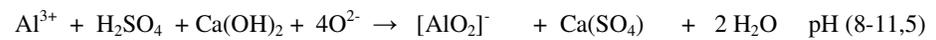
En una segunda etapa con plantas de ósmosis reversa que tienen como función separar los elementos metálicos, sales, nitratos, nitritos y otras especies consideradas contaminantes para la descarga de agua al medioambiente.

Y en una tercera etapa se dosifica peróxido de hidrógeno para neutralizar el remanente de cianuro.

6. Para el control del drenaje ácido de mina, Minera Yanacocha tiene los siguientes controles: encapsulamiento del material reactivo, exclusión del agua de lluvias del agente activo (PAG), captación y almacenamiento de aguas ácidas, tratamiento de agua ácida, mediante plantas de neutralización y precipitación de metales.
7. Para la precipitación de metales en las plantas AWTP , la precipitación se realiza mediante las siguientes reacciones químicas:



Para la precipitación de aluminio:



Para la precipitación de manganeso:



Capítulo XI. Recomendaciones

1. Las plantas de tratamiento de aguas ácidas en Minera Yanacocha , precipitan el aluminio y manganeso en 02 etapas , la primera etapa para precipitar el aluminio en forma de hidróxido $\text{Al(OH)}_3\downarrow$ a valores de pH entre 7-8 , luego de la precipitación y filtración del aluminio , pasa a una segunda etapa para la precipitación y separación de manganeso a valores de pH >10. Este proceso significa tener dos plantas consecutivas, incrementando al doble los costos de capital para la construcción de plantas de aguas ácidas. Se recomienda realizar pruebas en planta para precipitar los elementos metálicos en una sola etapa a valores de pH >12, esto nos permitirá tener una sola planta de tratamiento. En este caso los costos operativos serán mayores debido al mayor costo en llevar el pH a valores mayores de 12.
2. Se recomienda a las empresas mineras que tratan agua ácida en sus operaciones, evaluar costos, para la construcción de plantas de tratamiento de aguas en una etapa o en dos etapas, tal como lo plantemos en este trabajo.

Referencias bibliográficas

1. Benavides, J. (2002). Tratamiento, uso y descarga del agua subterránea en Minera Yanacocha-Perú. Cajamarca, Perú: Departamento de Planeamiento, Minera Yanacocha SRL-Perú.
2. Carvajal, P., Estay, H. (2012). El Proceso SART. (Arcadis, Ed.) Trujillo, Perú: 9° Congreso Nacional de Minería.
3. Clarke, L. B. (1995). "Coal mining and water quality". IEA Coal Research, IEACR/80, July 1995, 99 pp.
4. Conn, K. (1981). Cyanide Analysis in Mine Effluents. In: Cyanide and the Gold Mining Industry: A Technical Seminar. Ottawa, Ontario.
5. Cotton, F., & Wilkinson, G. (1986). Química Inorgánica Avanzada. México: Editorial LIMUSA S.A.
6. Del Aguila Guadalupe, N. (2014). Uso de las plantas Merrill Crowe en tratamiento de aguas. Lima: 3rd Annual LatAm Mine Water Conference 2014.
7. Del Aguila, N. (2013). Tratamiento de solución barren de CIC PL usando la planta Merrill Crowe como pre tratamiento y plantas ro como tratamiento final. Cajamarca: Minera Yanacocha.
8. Dold, B. (2003). Aguas ácidas: formación, predicción, control y prevención. Lausanne, Suiza: Ciencias de la tierra, University of Lausanne, Suiza.
9. Dold, B. (2010). Conceptos básicos de geoquímica ambiental sobre el manejo de desechos mineros sulfhídricos (Vol. 10). Concepción, Chile: Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA), Universidad de Concepción Chile.
10. Dueñas, C. (2010). Generación de drenaje ácido. Iquique: Fundación Chile.

11. Guerrero, J. (2001). Minera Yanacocha, Minas y Petroleo. Edición Especial 30-32.
12. Kemmer, F., McCallion, J. (1997). Minería; Manual del agua (The Nalco Water Handbook). U.S.A: McGraw-HillBook Co., Capitulo 29.
13. Mimbela, O. (1999). El Proceso Merrill Crowe en Minera Yanacocha. Lima-Perú: Curso sobre Metalúrgia de los procesos auríferos , Universidad Nacional de Ingeniería.
14. Morales, M. (2001). Sistema de Tratamiento de agua industrial en exceso(Industrial Water Treatment System). Orotecnia, Edición 2, 2-4.
15. Nordstrom, D., & Alper, C. (1999). Geochemistry of Acid Mine waters (Vol. 6A. Society of Economic Geologist. Inc.). (R. i. Geology, Ed.) Plumlee, G.S., and M.J. Logsdon.
16. Ordóñez, A. (1999). Tesis Doctoral. Sistemas de tratamiento pasivo para aguas ácidas de mina. Oviedo: Universidad de Oviedo , Departamento de explotación y Prospección de Minas.
17. Piesold, K. (2006). Ingeniería Detallada del Proceso Metalúrgico (Lixiviación y planta). Cajamarca-Perú: Minera Yanacocha.
18. Pizarro, M. (2006). Procesos Productivos en Minera Yanacocha. Cajamarca-Perú: Minera Yanacocha.
19. Romero, E. (2006). Tratamiento de aguas ácidas AWTP. Cajamarca-Perú: Entrenamiento Operaciones procesos ,Minera Yanacocha S.R.L.
20. Sanchez, W., Marquez, L., Guerra, J. (2006). Ósmosis reversa, curso de entrenamiento. Cajamarca, Perú: Minera Yanacocha.

21. Silver, M. (1990). "Biology and Chemistry of Generation, Prevention and Abatement of Acid Mine drainage", en Hammer, D.A.: *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. USA: Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc.USA.
22. Stumm, W., & Morgan, J. (1981). *Aquatic Chemistry (Second Edition ed.)*. (J. W. Sons., Ed.) New York.
23. Véliz, H. G. (2014). *Geometalurgia*. Chile: InterMet Consultores Metalúrgicos.
24. Vogt, E., Dold, B., & Spangenberg, J. (2003). Mineralogical and geochemical characterization of the active tailings impoundment Talabre, Chuquicamata. Concepción, Chile: 10° Congreso Geológico Chileno.