

# **ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**“PROPUESTA DE RECIRCULACIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS  
MINEROS Y/O DOMÉSTICOS DENTRO DE LA  
EXTRACCIÓN/PROCESAMIENTO DE ORO: EMPRESA MINERA  
EXPAUSA”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**VILAÑA GUAÑA JESSICA ESTEFANÍA**

jessica.vilana@epn.edu.ec

**DIRECTOR: PHD. CRISTINA ALEJANDRA VILLAMAR AYALA**

cristina.villamar@usach.cl

**CODIRECTOR : PHD. ANA LUCÍA BALAREZO**

ana.balarezo@epn.edu.ec

Quito, 2023

## DECLARACIÓN

Yo, **Vilaña Guaña Jessica Estefanía**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

**Jessica Estefanía Vilaña Guaña**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Vilaña Guaña Jessica Estefanía, bajo mi supervisión.



-----  
**PhD. Cristina Alejandra Villamar Ayala**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**



-----  
**PhD. Ana Lucia Balarezo Aguilar**  
**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por darme fortaleza para culminar esta grandiosa etapa de mi vida.

Agradezco principalmente a mis padres por ser la fuerza, motivación y pilar de mi vida. Su amor y apoyo incondicional me ha permitido lograr superarme y cumplir mis sueños y metas. De igual forma a mi hermano y familia por su amor incondicional y por siempre creer en mí.

Mi más sincera gratitud y admiración hacia la Dra. Cristina Villamar, por su apoyo, colaboración y conocimiento para la realización de este proyecto.

A la Dra. Ana Balarezo, por su colaboración y apoyo en la coordinación del proyecto.

Mi entera gratitud y reconocimiento al Grupo Minero Bonaza, por la facilitación de los medios logísticos y económicos para la realización del proyecto, en especial a la Ing. Katherine Salazar e Ing. Wilson Dávila, por su entera disposición y confianza.

## DEDICATORIA

Con mucho cariño y amor dedico mi tesis a mis padres, gracias por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, mis mayores logros se los debo a ustedes, principalmente este. Sus palabras de aliento no me dejaron caer y me permitieron seguir adelante y cumplir mis metas.

Gracias infinitas, madre y padre.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORIA .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
ABREVIATURAS .....	XV
RESUMEN .....	XVI
ABSTRACT .....	XVII
PRESENTACIÓN.....	XVIII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 GENERALIDADES.....	5
2.1.1 MINERÍA DEL ORO .....	5
2.1.1.1 Azuay y la minería.....	5
2.1.1.2 Mina y campamento.....	6
2.1.2 PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL ORO.....	6
2.1.2.1 Explotación.....	7

2.1.2.2 Trituración o molienda .....	7
2.1.2.3 Concentración .....	8
2.1.2.4 Lixiviación por cianuración .....	8
2.1.2.5 Refinación.....	9
2.2 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA MINERÍA DEL ORO.....	9
2.2.1 USO DEL AGUA.....	9
2.2.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS.....	11
2.2.2.1 Residuos líquidos .....	11
2.2.2.2 Residuos sólidos .....	12
2.2.3 TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS MINEROS .....	12
2.2.3.1 Etapa de pretratamiento .....	13
2.2.3.2 Etapa primaria .....	14
2.2.3.3 Etapa terciaria .....	14
2.3 HUELLA HÍDRICA.....	15
2.3.1 HUELLA HÍDRICA AZUL .....	17
2.3.2 HUELLA HÍDRICA VERDE .....	18
2.3.3 HUELLA HÍDRICA GRIS .....	18
2.4 ESTRATEGIAS DE RECIRCULACIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS MINEROS	19
2.4.1. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL.....	19
2.4.1.1 Balance de masa .....	20
2.4.1.2 Balance hídrico.....	20
2.4.2 MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS.....	21
2.4.3 METODOLOGÍA WATER PINCH.....	22
2.4.3.1 Transferencia de masa en operaciones .....	23
2.4.3.2 Balance de contaminantes transferidos en agua .....	24
2.4.3.3 Curva Compuesta de Concentraciones .....	28
2.4.3.4 Diseño de la red de corrientes líquidas .....	29
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....	31
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	31
3.1.1 USO DE AGUA EN MINAS Y CAMPAMENTOS.....	32

3.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO DE ORO .....	32
3.1.3. PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE CIANURACIÓN.....	33
3.2 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	35
3.2.1 INFORMACIÓN DE CAMPO.....	35
3.2.2 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL.....	35
3.2.2.1 Identificación de puntos de muestreo .....	36
3.2.2.2 Muestreo.....	38
3.2.2.3 Identificación de las corrientes líquidas .....	39
3.2.2.4 Caracterización de las corrientes líquidas .....	40
3.2.2.5 Evaluación de la Planta de Tratamiento de Residuos Líquidos Industriales.....	42
3.2.2.6 Balance hídrico.....	42
3.2.2.7 Balance de materia .....	44
3.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	45
3.3.1 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA .....	45
3.3.1.1 Cálculo de la Huella Hídrica Azul .....	46
3.3.1.2 Cálculo de la Huella Hídrica Gris .....	47
3.3.2 METODOLOGÍA WATER PINCH.....	47
3.3.2.1 Curva Compuesta de Concentraciones de Contaminantes .....	47
3.3.2.2 Múltiples contaminantes .....	50
3.3.2.3 Configuración de la red de corrientes líquidas .....	51
3.4 ESCENARIOS PARA EL DISEÑO DE LA POSIBLE NUEVA RED DE CORRIENTE LÍQUIDAS .....	52
3.4.1 ESCENARIOS PLANTEADOS.....	52
3.4.1.1 Escenario I – Flujo mínimo de agua para un solo contaminante .....	52
3.4.1.2 Escenario II – Flujo mínimo .....	53
3.4.1.3 Escenario III – Flujo mínimo .....	53
3.4.2 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS PLANTEADOS .....	53
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	54



4.1 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL.....	54
4.1.1 BALANCE DE MASA POR ETAPAS .....	54
4.1.1.1 Molienda .....	54
4.1.1.2 Beneficio .....	55
4.1.1.3 Recuperación del oro.....	57
4.1.2 BALANCE DE MASA GLOBAL .....	58
4.1.2.1 Consumo de agua.....	59
4.1.2.2 Consumo de agua fresca y agua reciclada .....	60
4.1.2.3 Consumo de productos químicos.....	62
4.1.2.4 Generación de residuos líquidos.....	63
4.1.3 DETERMINACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DEL PROCESO MINERO ...	64
4.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES LÍQUIDAS .....	65
4.1.4.1 Caracterización fisicoquímica de las corrientes líquidas .....	65
4.1.4.2 Monitoreo de caudales .....	67
4.2 HUELLA HÍDRICA.....	68
4.2.1 BALANCE HÍDRICO .....	68
4.2.2 HUELLA HÍDRICA AZUL .....	71
4.2.3 HUELLA HÍDRICA GRIS .....	72
4.2.4 HUELLA HÍDRICA.....	73
4.3 ESTRATEGIAS DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS .....	74
4.3.1 METODOLOGÍA WATER PINCH CON ENFOQUE DE UNICO CONTAMINANTE.....	74
4.3.1.1 Flujo mínimo de agua fresca sin reuso de residuos líquidos .....	75
4.3.1.2 Flujo mínimo de agua fresca con reuso de residuos líquidos y Curva Compuesta de Concentraciones .....	77
4.3.1.2 Configuración de la red de corrientes líquidas para un contaminante único.....	86
4.3.2 METODOLOGÍA WATER PINCH CON ENFOQUE DE MULTIPLES CONTAMINANTES.....	91
4.3.2.1 Configuración de la red de corrientes líquidas para múltiples contaminantes .....	92

4.4 EVALUACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUO LÍQUIDOS INDUSTRIALES. ....	94
4.5 ESCENARIO PLANTEADO DE LA CONFIGURACIÓN DE LA RED DE AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA.....	97
4.5.1 ANÁLISIS DE ESCENARIOS .....	97
4.5.1.1 Escenario actual de la red de corrientes líquidas .....	97
4.5.1.2 Escenario I: Flujo mínimo de agua con enfoque único contaminante, regeneración/reúso.....	97
4.5.1.3 Escenario II: Flujo mínimo de agua con enfoque único contaminante, reúso, regeneración/reciclaje.....	98
4.5.1.4 Escenario III: Flujo mínimo de agua con enfoque de doble contaminante: regeneración/reúso. ....	98
4.5.2 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL ESCENARIO ÓPTIMO.....	103
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
5.1 CONCLUSIONES.....	105
5.2 RECOMENDACIONES.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	108
ANEXOS .....	115

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b>	Uso del agua en la obtención de minerales .....	10
<b>Tabla 2.2</b>	Etapas involucradas en el tratamiento de residuos líquidos .....	13
<b>Tabla 3.1</b>	Recopilación de la información .....	35
<b>Tabla 3.2</b>	Síntesis de la caracterización ambiental .....	36
<b>Tabla 3.3</b>	Síntesis programa de muestreo .....	39
<b>Tabla 3.4</b>	Identificación de las corrientes líquidas .....	40
<b>Tabla 3.5</b>	Parámetros fisicoquímicos analizados .....	41
<b>Tabla 3.6</b>	Identificación de los flujos de agua en cada proceso .....	44
<b>Tabla 3.7</b>	Balance de entradas y salidas de agua .....	46
<b>Tabla 4.1</b>	Consumo de agua por etapa en $m^3/t_{sólidos}$ .....	60
<b>Tabla 4.2</b>	Consumo de agua fresca y reciclada por etapa en $m^3/t_{sólidos}$ .....	61
<b>Tabla 4.3</b>	Consumo de productos químicos por etapa en $kg/t_{sólidos}$ .....	62
<b>Tabla 4.4</b>	Generación de residuos líquidos por etapa en $m^3/t_{sólidos}$ .....	63
<b>Tabla 4.5</b>	Caracterización fisicoquímica de corrientes líquidas de uso doméstico ...	66
<b>Tabla 4.6</b>	Caracterización fisicoquímica de las corrientes líquidas del proceso de obtención de oro .....	64
<b>Tabla 4.7</b>	Caudales corrientes líquidas domésticas .....	67
<b>Tabla 4.8</b>	Caudales corrientes líquidas mineras .....	68
<b>Tabla 4.9</b>	Descripción de las corrientes para el balance hídrico .....	71
<b>Tabla 4.10</b>	Estimación de la Huella Hídrica Azul .....	72
<b>Tabla 4.11</b>	Estimación de la Huella Hídrica Gris .....	73
<b>Tabla 4.12</b>	Estimación de la Huella Hídrica .....	74
<b>Tabla 4.13</b>	Valores límites del proceso minero .....	76
<b>Tabla 4.14</b>	Flujo mínimo de agua total sin reúso de residuos líquidos .....	76
<b>Tabla 4.15</b>	Diagrama de intervalos de concentraciones para DQO.....	78
<b>Tabla 4.16</b>	Diagrama de intervalos de concentraciones para ST .....	79
<b>Tabla 4.17</b>	Diagrama de intervalos de concentraciones para Fe .....	80
<b>Tabla 4.18</b>	Diagrama de intervalos de concentraciones para DQO.....	81

<b>Tabla 4.19</b>	Diagrama de intervalos de concentraciones para ST .....	83
<b>Tabla 4.20</b>	Diagrama de intervalos de concentraciones para Fe .....	84
<b>Tabla 4.21</b>	Diagrama de intervalos de concentraciones para Cu .....	85
<b>Tabla 4.22</b>	Parámetros evaluados en la PT-RLIes del proceso minero .....	96
<b>Tabla 4.23</b>	Comparación de escenarios .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Etapas para la recuperación del oro .....	7
<b>Figura 2.2</b> Esquema simplificado del proceso de obtención de oro .....	11
<b>Figura 2.3</b> Procesos de tratamiento de residuos líquidos mineros .....	15
<b>Figura 2.4</b> Balance hídrico para la determinación de la Huella Hídrica de un proceso que consumo agua .....	21
<b>Figura 2.5</b> Transferencia de masa .....	24
<b>Figura 2.6</b> Modelo estructural de cualquier operación con reúso de agua .....	24
<b>Figura 2.7</b> Modelo estructural del proceso de reciclaje-regeneración del agua .....	27
<b>Figura 2.8</b> Curva Compuesta con línea de suministro de agua .....	28
<b>Figura 2.9</b> Cuadrícula de diseño .....	30
<b>Figura 3.1</b> Mapa de ubicación de la zona de estudio .....	31
<b>Figura 3.2</b> Esquema simplificado del proceso de obtención de oro .....	33
<b>Figura 3.3</b> Diagrama de flujo PT-RLles .....	34
<b>Figura 3.4</b> Puntos de muestreo de las corrientes líquidas domésticas .....	37
<b>Figura 3.5</b> Puntos de muestreo de las corrientes líquidas mineras .....	38
<b>Figura 3.6</b> Diagrama de flujo que representa todos los procesos que utilizan agua .	43
<b>Figura 4.1</b> Flujo de materia en el proceso de molienda .....	55
<b>Figura 4.2</b> Flujo de materia en los procesos de cianuración y cribado .....	57
<b>Figura 4.3</b> Flujo de materia en los procesos de elusión y lavado de carbón .....	58
<b>Figura 4.4</b> Flujo de materia proceso minero del oro .....	59
<b>Figura 4.5</b> Consumo de agua por etapa en % .....	60
<b>Figura 4.6</b> Consumo de agua fresca y recirculada por etapa en % .....	61
<b>Figura 4.7</b> Consumo de productos químicos por etapa en % .....	62
<b>Figura 4.8</b> Generación de residuos líquidos por etapa, %. .....	63
<b>Figura 4.9</b> Distribución del consumo de agua fresca, productos químicos y generación de residuos líquidos. ....	64
<b>Figura 4.10</b> Balance Hídrico del proceso minero .....	70
<b>Figura 4.11</b> Diagrama de flujo de la red de agua en la minería del Oro. ....	75

<b>Figura 4.12</b> Curva Compuesta de Concentraciones en términos de DQO .....	78
<b>Figura 4.13</b> Curva Compuesta de Concentraciones en términos de ST .....	79
<b>Figura 4.14</b> Curva Compuesta de Concentraciones en términos de Fe .....	80
<b>Figura 4.15</b> Curva Compuesta de Concentraciones en términos de DQO .....	82
<b>Figura 4.16</b> Curva Compuesta de Concentraciones en términos de ST .....	83
<b>Figura 4.17</b> Curva Compuesta de Concentraciones en términos de Fe .....	84
<b>Figura 4.18</b> Curva Compuesta de Concentraciones en términos de Cu .....	85
<b>Figura 4.19</b> Cuadrícula de diseño para Bonanza en términos de Fe .....	87
<b>Figura 4.20</b> Configuración de la red de residuos líquidos en términos de Fe para Bonanza .....	88
<b>Figura 4.21</b> Cuadrícula de diseño para Rumicuri en términos de Cu .....	89
<b>Figura 4.22</b> Configuración de la red de residuos líquidos en términos de Cu para Rumicuri .....	89
<b>Figura 4.23</b> Cuadrícula de diseño con enfoque de regeneración para Rumicuri en términos de Cu .....	90
<b>Figura 4.24</b> Configuración de la red de residuos líquidos con regeneración en términos de Cu para Rumicuri .....	91
<b>Figura 4.25</b> Perfil límite de agua en función de Cu y Fe .....	92
<b>Figura 4.26</b> Cuadrícula de diseño en términos de Cu y Fe. ....	93
<b>Figura 4.27</b> Configuración de la red de corrientes líquidas en términos de Fe y Cu .	94
<b>Figura 4.28</b> Escenario actual de la red de corrientes líquidas .....	99
<b>Figura 4.29</b> Escenario I: Flujo mínimo de agua con enfoque de un solo contaminante: regeneración/reúso .....	100
<b>Figura 4.30</b> Escenario II: Flujo mínimo de agua con enfoque de un solo contaminante: reúso, regeneración/reciclaje .....	101
<b>Figura 4.31</b> Escenario III: Flujo mínimo de agua con enfoque doble contaminante	102
<b>Figura 4.32</b> Comparación de escenarios. ....	104

## ABREVIATURAS

<b>PIB</b>	Producto Interno Bruto
<b>HH</b>	Huella Hídrica
<b>HHA</b>	Huella Hídrica Azul
<b>HHG</b>	Huella Hídrica Gris
<b>HHV</b>	Huella Hídrica Verde
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>ST</b>	Sólidos Totales
<b>CE</b>	Conductividad Eléctrica
<b>HCN</b>	Ácido Cianhídrico
<b>NaCN</b>	Cianuro de Sodio
<b>CNt</b>	Cianuro Total
<b>CN<sup>-</sup></b>	Cianuro Libre
<b>Fe</b>	Hierro
<b>Cu</b>	Cobre
<b>HCl</b>	Ácido Clorhídrico
<b>DIC</b>	Diagrama de Intervalos de Concentraciones
<b>PT-RLies</b>	Planta de Tratamiento de Residuos Líquidos Industriales

## RESUMEN

La minería, es una de las actividades que se caracteriza por su alto consumo de materias primas, productos químicos y principalmente agua. Por lo tanto, el presente trabajo tuvo por objetivo establecer una propuesta metodológica de recirculación de residuos líquidos mineros y/o domésticos dentro de los procesos de extracción y procesamiento de oro, mediante el diagnóstico y evaluación de la segregación/reciclaje de fuentes alternativas, con el fin de dar un enfoque de cierre de ciclo del agua a la actividad minera.

Para este propósito, se desarrollaron modelos matemáticos para conocer el uso de agua en cada etapa del proceso y poder establecer estrategias de optimización de corrientes. Se inició con una caracterización ambiental de cada una de las etapas involucradas en el procesamiento del oro y de la PT-RLIes. Para conocer el uso del agua en todo el proceso productivo se desarrolló la metodología de la Huella Hídrica. Adicionalmente, el volumen mínimo de agua fresca que requiere el proceso se determinó mediante el método gráfico *Water Pinch*, considerando 5 etapas y 4 contaminantes (DQO, ST, Fe y Cu). Por último, se proponen tres escenarios posibles para la configuración de red de corrientes líquidas.

Los resultados indicaron que se necesitan alrededor de 141,6 m<sup>3</sup> de agua para producir 1 kg de oro. Además, se evidenció que el consumo de agua fresca se da principalmente en las etapas de molienda y cianuración (4,6 m<sup>3</sup>/tsólidos), correspondiente al 83% de la demanda total de agua. El flujo mínimo de agua fresca para el campamento minero Bonanza fue de 13,5 m<sup>3</sup>/h (Fe contaminante único) y para la planta de beneficio Rumicuri fue de 10,5 m<sup>3</sup>/h (Cu contaminante único). El escenario óptimo se obtuvo con una propuesta de reúso, reciclaje y regeneración de corrientes, el cual permitió una optimización del 25% de agua fresca y un 67% en la generación de residuos líquidos mineros.

**Palabras clave:** Cianuración, molienda, Huella Hídrica, reúso, regeneración, *Water Pinch*.



## ABSTRACT

Mining is one of the activities that is characterized by its high consumption of raw materials, chemical products and mainly water. Therefore, the objective of this work was to establish a methodological proposal for the recirculation of mining and/or domestic liquid waste in gold processing, through the diagnosis and evaluation of the segregation/recycling of alternative sources, to give a zero-waste approach to mining activity.

For this purpose, mathematical models were developed, to know the use of water in each stage of the process and to be able to establish flow optimization strategies. The procedure began with an environmental characterization of each of the stages involved in gold processing and in the WWTP. To know the use of water throughout the production process, the Water Footprint methodology was developed. Additionally, the minimum volume of fresh water required by the process was determined using the Water Pinch graphic method, considering 5 stages and 4 contaminants (COD, TS, Fe and Cu). Finally, three possible scenarios are proposed for the configuration of the liquid current network.

Results showed that around 141.6 m<sup>3</sup> of water are needed to produce 1kg of gold. In addition, it was evidenced that the consumption of fresh water occurs mainly in the grinding and cyanidation stages (4.6 m<sup>3</sup>/t<sub>solids</sub>), corresponding to 83% of the total water demand. The minimum flow of fresh water for the Bonanza mining camp was 13.5 m<sup>3</sup>/h (single contaminating Fe) and for Rumicuri was 10.5 m<sup>3</sup>/h (single contaminating Cu). The most optimal scenario focuses on the reuse, recycling and regeneration of streams, which allowed an optimization of 25% of fresh water and 67% in the generation of mining liquid waste.

**Keywords:** Cyanidation, grinding process, Water Footprint, reuse, regeneration, *Water Pinch*.

## PRESENTACIÓN

Este estudio constituye una propuesta de recirculación de residuos líquidos mineros y/o domésticos, mediante un diagnóstico de huella hídrica y un enfoque de regeneración y reciclaje de corrientes residuales para el procesamiento y extracción de oro de la empresa minera EXPAUSA. El estudio se dividió en 5 capítulos descritos a continuación:

El **Capítulo 1** expone brevemente la introducción al tema, integrando los antecedentes, alcance y objetivos del presente estudio.

El **Capítulo 2** desarrolla el marco teórico perteneciente al proyecto, para lo cual se abordan temas referentes al procesamiento y extracción del oro, impactos ambientales, tratamiento de residuos líquidos mineros y sus operaciones unitarias. Así como también generalidades de los métodos a desarrollar con respecto a la Huella Hídrica y *Water Pinch*.

El **Capítulo 3** presenta la metodología utilizada para la caracterización ambiental, estimación de la huella hídrica y para la recirculación de corrientes. Además, abarca los criterios metodológicos para la aplicación de la Huella Hídrica y *Water Pinch*.

El **Capítulo 4** expone los resultados obtenidos y propone distintos escenarios para el diseño de una nueva red de corrientes líquidas considerando reciclaje, reúso y regeneración en la planta evaluada.

Finalmente, el **Capítulo 5** presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo de este estudio.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

La minería, es una actividad económica que abarca procesos de extracción, procesamiento y aprovechamiento de los minerales, disponibles en la litósfera y que poseen valor económico (BCE, 2017). Según datos del Banco Central del Ecuador (2020), la actividad minera durante el año 2018 representó el 0,48% del PIB del país. En Ecuador, los recursos naturales mayormente afectados y contaminados han sido el agua y el suelo, el primero porque el agua se usa en procesos como la molienda y cianuración; y el segundo por las descargas de aguas contaminadas. Además, dentro de los procesos hidrometalúrgicos de recuperación de minerales, se emplean productos químicos nocivos, como es el caso del mercurio y cianuro, éste último se utiliza en la recuperación del oro fino de la mena y es una de las sustancias más tóxicas para el ser humano (Acosta & Martínez, 2010). Los principales impactos ambientales se reflejan en la contaminación del recurso hídrico, en especial porque el sector minero consume una vasta cantidad de agua, investigaciones redactan que para recuperar cobre se necesitan más de 10 m<sup>3</sup> de agua (Kuhn, 2011). Dentro de los procesos de la industria minera, Montes (2018), ha identificado y clasificado cinco fases de consumo de agua. La primera fase corresponde al uso del agua dentro de la mina, la planta procesadora, hidrometalurgia, refinamiento y campamento (uso doméstico); cada fase posee un consumo de agua del 5%, 60%, 13%, 4% y 18% respectivamente (Montes & Cantallopts, 2019; Vera, 2015).

Las extracciones excesivas de agua pueden dar lugar a impactos, tales como: alteración de los regímenes del caudal de los ríos o la reducción de los niveles de acuíferos, de igual forma pueden contribuir a la escasez regional de agua, privar a otros usuarios del acceso a ésta y reducir los flujos de agua necesarios para mantener las funciones del ecosistema (Northey et al., 2016). En consecuencia, las alternativas ante esta problemática, radican en la optimización de la demanda del agua, mediante

la implementación de procesos y tecnologías limpias (MINMINAS, 2015). Según el artículo 79 de la ley minera (Registro Oficial N° 517, 2011) es obligación de las concesionarias implementar sistemas de tratamiento, recirculación y reutilización del agua. Chile es el país latinoamericano con mayor experiencia minera en la región, donde esta actividad se ha caracterizado por ser el motor de la economía en décadas y a su vez por ser una de las actividades que consume más agua (Mason de la Fuente, 2017). Por lo tanto, las empresas mineras se han visto obligadas a buscar iniciativas para gestionar de forma segura el recurso acuático (Mason de la Fuente, 2017). La gestión segura del agua ha implicado el desarrollo de estrategias de reúso y recirculación de corrientes residuales mineras y municipales transportadas desde Santiago (Mason de la Fuente, 2017; Rodríguez Mur, 2017). En definitiva, integrar residuos líquidos domésticos tratados al proceso minero implica prescindir de fuentes de agua fresca y potenciar el reúso de fuentes alternativas (Mason de la Fuente, 2017).

La huella hídrica es una herramienta útil para comprender sobre el consumo de agua que está asociada a cualquier actividad; cuantifica los impactos ambientales que se relacionan directamente con el uso del agua (ISO, 2014). La información obtenida a través de los datos de la huella hídrica brinda un conocimiento global, sobre cómo el agua va a impactar en la industria, comunidades y ecosistemas (Northey et al., 2016). Por otro lado, la metodología *Water Pinch*, es un modelo de optimización algebraico que permite encontrar el volumen mínimo necesario de agua fresca para un proceso, y por consiguiente los residuos líquidos generados se minimizarían (Nemati et al., 2019). En general, el cálculo de la huella hídrica en conjunto al análisis *Pinch*, permitirán conocer el potencial para reducir la huella hídrica de la industria minera (Skouteris et al., 2018).

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Desde siempre la minería ha estado relacionada a una imagen ambientalmente negativa, puesto que esta actividad es sumamente contaminante y afecta potencialmente al recurso hídrico (Baquero Muñoz, 2017). La minería requiere enormes cantidades de agua para su funcionamiento, para extraer 1 tonelada de oro

se demanda en promedio hasta 200 mil m<sup>3</sup> de agua y luego de ser utilizado en la minería, el recurso hídrico queda contaminado; es decir inutilizable para el consumo humano y demás actividades (González & Echavarría, 2016). Cabe considerar, que en Ecuador la minería a gran escala es mínima, pero la de pequeña y mediana envergadura ha ido creciendo sobre todo en la provincia de Azuay. Evidencia de esto, es la contaminación por metales pesados que reporta el Golfo de Guayaquil, hacia donde llegan afluentes que son alimentados con descargas de residuos líquidos mineros procedentes del cantón Camilo Ponce Enríquez (Toalongo, 2012)

Países como China, Australia, Rusia, Estados Unidos e incluso Chile son pioneros en extracción de oro y a su vez acreedores de una huella hídrica considerablemente alta (Baquero Muñoz, 2017; Rodríguez Mur, 2017). Empresas mineras del mundo como Vale S.A, Barrick Gold, entre otras, han implementado alternativas de reducción de consumo de agua mediante reúso de residuos líquidos mineros, servidas o desalinizadas (Rodríguez Mur, 2017). Estos procesos de recirculación de agua en la actividad minera, pueden alcanzar hasta un 77% de ahorro en consumo de agua fresca (SONAMI, 2018). Prácticamente, los efluentes generados en cada operación unitaria pueden ser aprovechados parcial o totalmente en otra operación (Mohammadnejad et al., 2012). Considerando que los límites máximos permisibles de los contaminantes que rigen en cada operación no se sobrepasen (Mariano Romero et al., 2005)

### **1.3 ALCANCE**

El alcance del presente trabajo de investigación, está enfocado en la aplicación de las siguientes estrategias. La primera, será para determinar la cantidad real de agua que se usa en el proceso de explotación y refinación del oro (huella hídrica), y la segunda la aplicación de una estrategia de segregación de corrientes (*Water Pinch*). Para lo cual, fue necesario el levantamiento de información ya existente, mediante una caracterización ambiental (muestreos *in situ*) y análisis de laboratorio. Por lo tanto, la información presente en este trabajo representa a datos reales. El alcance que posee

este trabajo hacia la zona de estudio es de directo beneficio e incluso la metodología empleada tiene aplicación hacia otras actividades que usen agua.

#### **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Establecer una propuesta metodológica de recirculación de residuos líquidos mineros y/o domésticos dentro de los procesos de extracción y procesamiento de oro, mediante el diagnóstico (huella hídrica) y evaluación de la segregación/reciclaje (*Water Pinch*) de fuentes alternativas, con el fin de dar un enfoque de cierre de ciclo del agua a la actividad minera.

#### **1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer la cantidad y fuentes de agua utilizadas por el proceso de extracción y procesamiento de oro, mediante la determinación de la huella hídrica dentro de la empresa, con el fin de determinar los puntos críticos de consumo de agua existentes.
- Evaluar las características fisicoquímicas de las corrientes residuales líquidas mineras y domésticas procedentes del proceso de extracción/procesamiento de oro y del campamento minero, respectivamente, mediante muestreo y monitoreo de dichas fuentes, con el fin de identificar que uso potencial de recirculación tienen estas corrientes de agua.
- Proponer alternativas de recirculación de residuos líquidos mineros y domésticos, utilizando los resultados de los modelos matemáticos de segregación (*Water Pinch*) aplicados, con el fin de optimizar el consumo de agua fresca por parte de la actividad minera.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 GENERALIDADES**

##### **2.1.1 MINERÍA DEL ORO**

La actividad minera es económicamente importante, dado que representa riqueza en especial cuando se trata de oro, plata y cobre (Arias Lafargue et al., 2017). En el Ecuador la minería es una actividad mucho más antigua que la actividad petrolera. Sin embargo, su aporte a la economía ha sido menor; en efecto, según datos del Banco Central del Ecuador (2020), la minería durante el año 2018 representó el 0,48% del PIB del país. Actualmente se vive un auge minero nunca visto, las cantidades extraídas a nivel mundial de minerales principalmente de oro han crecido exponencialmente. Es así que, en países altamente industrializados como China, Australia, EEUU, Rusia y Perú el oro se ha convertido en un símbolo de riqueza y de desarrollo industrial (Concha, 2017).

El oro representa el producto de una actividad compleja y de carácter conflictivo que ha dejado huella en el ambiente debido a la explotación de recursos naturales. La extracción del oro, implica perforar la tierra hasta encontrar un yacimiento, extraer el mineral del subsuelo, trasladarlo y procesarlo; en consecuencia, este proceso genera cientos de residuos sólidos (Kuhn, 2011). De este modo, los residuos generados en el procesamiento del oro puede ser de hasta 28000 kg/oz<sub>oro</sub> obtenido con tecnología punta (Acosta & Martínez, 2010)

##### **2.1.1.1 Azuay y la minería**

Fue a inicios de los años ochenta cuando la minería metálica empezaba con el descubrimiento de yacimientos de oro en varias provincias del Ecuador: Zamora Chinchipe (Nambija), El Oro (Cerro Pelado), Azuay (Camilo Ponce Enríquez). El auge minero empezó de manera artesanal e informal y se ha ido transformando hasta lo que

es hoy en día: minería de pequeña escala (Acosta & Martínez, 2010). A lo largo del tiempo, el uso de recursos y sustancias químicas en la minería ha provocado serios problemas de contaminación en el agua y suelo (Acosta & Martínez, 2010).

En el Ecuador la provincia del Azuay es considerada como zona potencialmente minera, en especial el cantón Camilo Ponce Enríquez, donde se realiza la mayor explotación minera de la provincia (Bermeo & Vicuña, 2019). Además, es el lugar donde se encuentran operando una serie de minas dirigidas por EXPAUSA S.A. (Bermeo & Vicuña, 2019; Toalongo, 2012). En este sentido, el cantón Camilo Ponce, sería la zona donde el recurso hídrico podría estar potencialmente afectado por la actividad minera (Gallardo & Dávila, 2020).

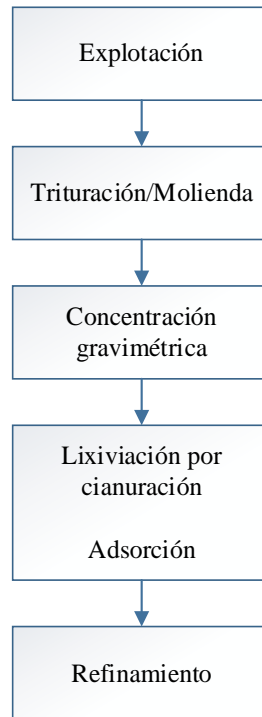
#### **2.1.1.2 Mina y campamento**

La Empresa Exportadora Aurífera S.A (EXPAUSA), es una empresa minera que se dedica a la explotación, procesamiento, refinamiento y exportación de oro. EXPAUSA opera una serie de minas dentro de la provincia del Azuay, entre ellas “Bonanza”. El material explotado por esta mina, pasa a la planta de beneficio “Rumicuri”, ambas ubicadas en la Parroquia Camilo Ponce Enríquez, Cantón Ponce Enríquez, Provincia del Azuay (Rodríguez, 2019). La empresa se dedica a la explotación, recuperación y exportación de minerales metálicos, principalmente oro y plata (Dávila, 2020).

#### **2.1.2 PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL ORO**

La Figura 2.1 describe las etapas de recuperación del oro:





**Figura 2.1** Etapas para la recuperación del oro

FUENTE: (Smith & Mudder, 1996)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### 2.1.2.1 Explotación

Los minerales que conforman la corteza terrestre no están distribuidos uniformemente, lo que genera que estén más o menos fijos en distintos puntos (Cárcamo, 2003). La obtención del oro empieza con el descubrimiento de estas zonas: yacimientos, en donde el mineral se encuentra a concentraciones considerablemente altas (3,8 y 23,5 g<sub>oro</sub>/t) (MAE, 2020; Ros, 2017). Por medio de explosivos u operaciones mecánicas, se procede a la obtención de fragmentos de rocas voluminosas conocidas como mena, la cual contiene al mineral de interés (ej., oro), y a otras especies sin valor denominadas ganga (Ros, 2017).

### 2.1.2.2 Trituración o molienda

El objeto de la etapa de trituración es la liberación, la cual consiste en separar el mineral valioso de la ganga o de reducir la materia a una dimensión deseada que facilite la liberación del oro en los procesos subsiguientes (Ros, 2017). Un buen

proceso de trituración se da cuando se libera al mineral en su forma de partícula más gruesa, ya que implica un ahorro energético y económico (Cárcamo, 2003).

### 2.1.2.3 Concentración

La concentración gravimétrica se basa en la separación de los minerales en función de la diferencia de densidades relativas que existe entre ellos (Ros, 2017). El mineral con mayor densidad (oro) se hundirá mientras que el de menor densidad (ganga) se suspenderá en el fluido (Kongolo & Mwema, 1998). Aquí se aprovecha la alta densidad relativa del oro (19,3 g/cm<sup>3</sup>) con respecto a la ganga (2,6 g/cm<sup>3</sup>), generando que los minerales se mantengan separados en capas ligeras y densas (Rodríguez, 2019).

### 2.1.2.4 Lixiviación por cianuración

La lixiviación, es el proceso en el cual se busca separar el mineral de interés de la parte no valiosa, mediante la aplicación de un reactivo que sea capaz de disolver al mineral y de no mezclarse con la ganga, para luego ser adsorbido por carbón activado (Ros, 2017). La lixiviación por cianuración, es el tratamiento más utilizado para la refinación del oro, debido a que el cianuro crea fácilmente enlaces con la mayoría de los metales; entre ellos el oro y forma complejos meta cianurados (Arias Lafargue et al., 2017)

En la lixiviación se utiliza el cianuro en forma de cianuro sódico (NaCN), el cual se utiliza en soluciones bastante diluidas que van comúnmente desde las 100 a 500 partes por millón, debido al fuerte complejo que forman el cianuro y el oro (Arias Lafargue et al., 2017; Smith & Mudder, 1996). La cianuración es un proceso que además de ser de bajo costo es también relativamente fácil y se representa mediante la siguiente ecuación química, donde necesariamente el oxígeno juega el papel de agente oxidante (Frías et al., 2015):



Generalmente, el proceso de cianuración del oro tarda entre 8 a 24 horas y se realiza en tanques de gran tamaño, potenciando el proceso mediante la inyección de aire de manera mecánica, lo cual provee oxígeno y mantiene a los sólidos suspendidos en la

pulpa del mineral (Kongolo & Mwema, 1998). Por último, para extraer el oro de la disolución cianurada se puede emplear dos métodos: cementación o adsorción por carbón activado (Ros, 2017). Siendo la adsorción el método más aceptado en los últimos años por las mineras debido a su alta eficiencia (>90%) en recuperación de oro (Smith & Mudder, 1996).

#### **2.1.2.5 Refinación**

Finalmente, el producto obtenido de la etapa de lixiviación/adsorción pasa a la etapa de refinación, en donde principalmente se eliminan todas las impurezas que acompañan al oro, para obtener su máxima pureza (Kongolo & Mwema, 1998). Esta etapa consiste en eliminar los metales que acompañan al oro a excepción de la plata, posteriormente se separa al oro mediante procesos físicos, químicos y térmicos, para obtener la mayor pureza del oro (99,9%) (Ros, 2017).

## **2.2 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA MINERÍA DEL ORO**

### **2.2.1 USO DEL AGUA**

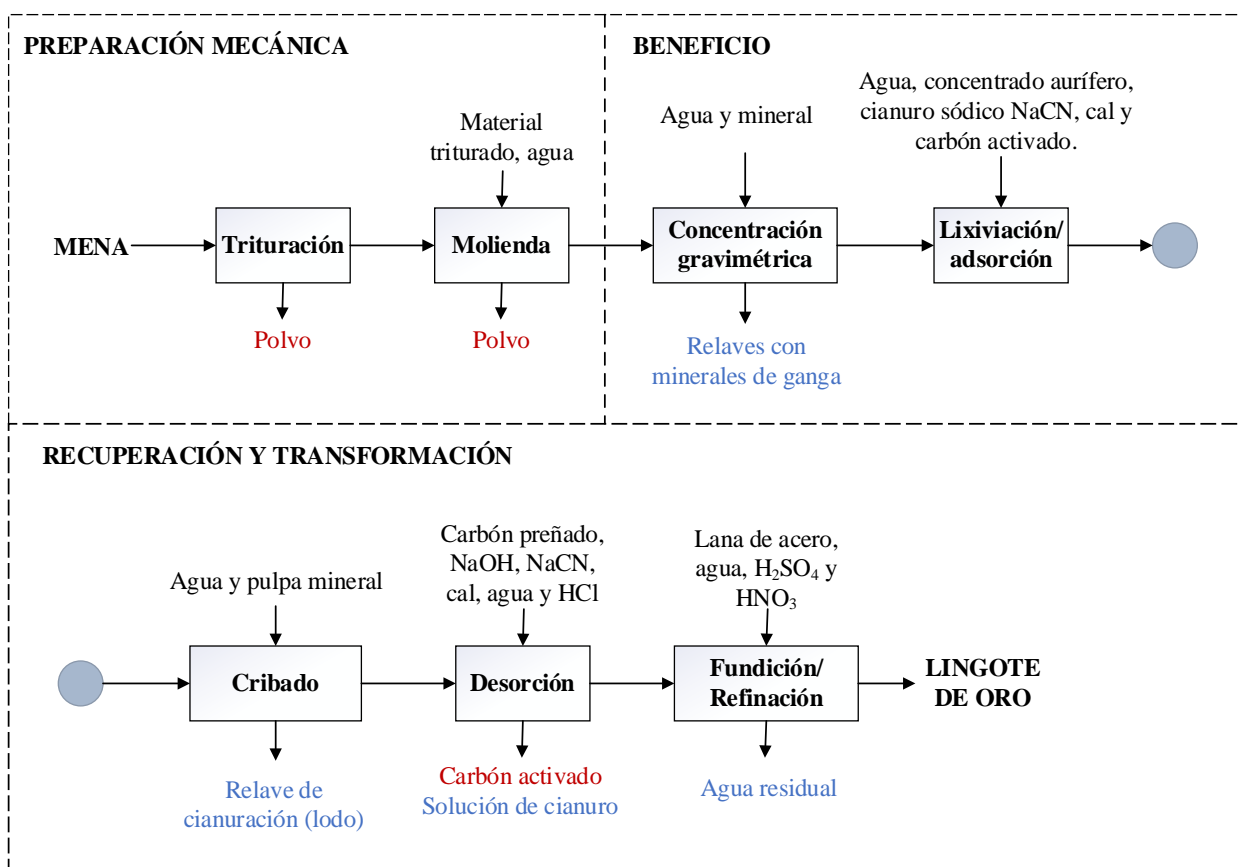
El agua es un elemento indispensable en la industria minera y se han podido identificar cinco fases en donde el agua juega un rol importante para la recuperación de minerales, las cuales se describen en la Tabla 2.1 (Montes & Cantallopts, 2019):

**Tabla 2.1***Uso del agua en la obtención de minerales*

<b>Fase</b>	<b>Uso de agua</b>
Explotación	El uso del agua es destinada principalmente para la reducción de material particulado en suspensión, cuando se realiza la perforación y extracción de la mena (Vera, 2015) con un consumo del 5% del total (Montes & Cantallopts, 2019).
Molienda / Concentración gravimétrica	El material ya triturado pasa a un proceso de concentración en medio húmedo el cual se da dentro de la planta concentradora, en donde se da el mayor consumo de agua, alcanzando un 60% del total (Montes & Cantallopts, 2019; Vera, 2015).
Lixiviación por cianuración	La tercera etapa corresponde a la parte hidrometalúrgica que es netamente el proceso de lixiviación por cianuración, dónde el consumo de agua es del 13% del total, y se utiliza para preparar las soluciones cianuradas y disolver el oro y plata del mineral (Montes & Cantallopts, 2019; Vera, 2015).
Refinación	En la cuarta fase de fundición y refinación, el consumo de agua es del 4% del total y sirve de refrigerante durante las operaciones de los hornos de fundición (Vera, 2015).
Campamento	Finalmente, las actividades que constituyen la última fase son las relacionadas al uso y consumo del agua en los campamentos mineros, lo que representa el 18% del total (Montes & Cantallopts, 2019).

ELABORACIÓN: Vilaña J.

En Ecuador, la minería ha provocado serios problemas de contaminación al ambiente y en especial al agua, en especial porque el sector minero es uno de sus principales consumidores (Kuhn, 2011). En efecto, para recuperar oro, aproximadamente se necesitan 200 mil m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O/t de oro extraído (González & Echavarría, 2016). Estas extracciones excesivas de agua pueden dar lugar a impactos, tales como alteración en los regímenes del caudal de los ríos o la reducción de los niveles de acuíferos (Acosta & Martínez, 2010). De igual forma pueden contribuir a la escasez regional de agua, privar a otros usuarios del acceso a ésta y reducir los flujos de agua necesarios para mantener las funciones del ecosistema (Northey et al., 2016).



**Figura 2.2** Esquema simplificado del proceso de obtención de oro

Nota: ◦ residuos sólidos y ° residuos líquidos

FUENTE: (Vera, 2015)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

## 2.2.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS

### 2.2.2.1 Residuos líquidos

Las operaciones para la extracción del oro generan una gran variedad de productos residuales líquidos. Como ya se mencionó, uno de los impactos más significativos de la minería del oro recae en la etapa de lixiviación, en donde además de adicionar carbón activado, se adiciona un compuesto cianurado (NaCN) (Montes & Cantallopts, 2019). Esta etapa por ende da lugar a la generación de una descarga residual líquida con niveles altos de contaminantes (Kuhn, 2011). Al ser un efluente con altos niveles de cianuro en su composición, se vuelve en una descarga difícil de tratar que, sin una

detoxificación previa a su descarga, podría implicar un riesgo para la salud del ecosistema (García & Rodríguez, 2006).

El efluente de la cianuración, está conformado por una corriente de carbón activado preñado (oro) y una corriente de arenas en forma de pulpa, de las cuales la primera es llevada a desorción y la segunda hacia piscinas de captación de relaves (Bermeo & Vicuña, 2019). Los valores de pH en los residuos líquidos de mina se caracterizan por ser alcalinos ( $\text{pH} > 10$ ) (Smith & Mudder, 1996). Además, han mostrado tener una alta concentración de cianuro, DQO y sólidos totales y de contar con la presencia de sulfatos, hierro y cobre, entre los principales (Dávila, 2020).

#### **2.2.2.2 Residuos sólidos**

Como ya se mencionó, por cada onza de oro obtenida se generan alrededor de 28000 kg de residuos (Kuhn, 2011). En términos de volumen, se podría decir que los residuos mayormente generados son los estériles y desechos (Bermeo & Vicuña, 2019). Los estériles se refieren al material extraído pero que no posee un valor económico y los desechos pueden ser cualquier residuo proveniente de los procesos (Kuhn, 2011; Sánchez, 2005). Los desechos a pesar de estar en vía húmeda se presentan en forma de pulpa, la cual posee una parte sólida (Sánchez, 2005). Y por último también se incluyen como residuos sólidos a cualquier tipo de vegetación producto de remoción, desechos comunes, lodos de sistemas de tratamiento, entre otros (Silva et al., 2016).

#### **2.2.3 TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS MINEROS**

Las características del residuo líquido reflejan la naturaleza y la concentración de sustancias presentes en ella (Kuhn, 2011). El tratamiento de los residuos líquidos corresponde a la aplicación de procesos básicos y operaciones unitarias basados en las características del agua a tratar (Smith & Mudder, 1996). Generalmente los procesos para tratar los residuos líquidos pueden clasificarse como se muestra en la Tabla 2.2:

**Tabla 2.2***Etapas involucradas en el tratamiento de residuos líquidos*

<b>Etapa de tratamiento</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Tipo de proceso</b>	<b>Operación unitaria</b>	<b>Eficiencia de remoción (%)</b>
<b>Pretratamiento</b>	Eliminar objetos gruesos, arenas y gravas.	Físico	Homogenización	SS (50 - 65)
			Desarenado	SS (0 - 10)
			Tamizado	SG (80 - 95)
<b>Tratamiento primario</b>	Elimina material suspendido y sedimentable	Fisicoquímico	Sedimentación	SS (50 - 65)
			Flotación	SS (70 - 95)
			Precipitación química	SS (70 - 90)
			Coagulación	SS (50 - 80)
<b>Tratamiento secundario</b>	Eliminar componentes orgánicos	Biológicos	Filtros biológicos	DQO (60 - 80), DBO (65 - 80), SS (60 - 85)
<b>Tratamiento terciario</b>	Eliminar componentes en particular como exceso de nutrientes, patógenos.	Físico Químico Biológico	Filtración	SS (95 - 98)
			Adsorción	M (> 90)
			Desinfección	Bacterias (90 - 95)

Nota: SS, Sólidos Suspendidos; SG, Sólidos Gruesos; DBO, Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO, Demanda Química de Oxígeno; M, Metales

FUENTE: (Bonilla, 2017; Romero, 2008)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

A continuación, se detallan los procesos unitarios destinados al tratamiento de residuos líquidos mineros (Figura 2,3).

### **2.2.3.1 Etapa de pretratamiento**

- **Homogenización:** La homogenización tiene como objetivo la mezcla de varias corrientes residuales (ácidas, alcalinas) en un tanque de homogenización en el cual se intenta conseguir una corriente con un caudal constante y aminorar las variaciones de DQO (Ramalho, 1996).

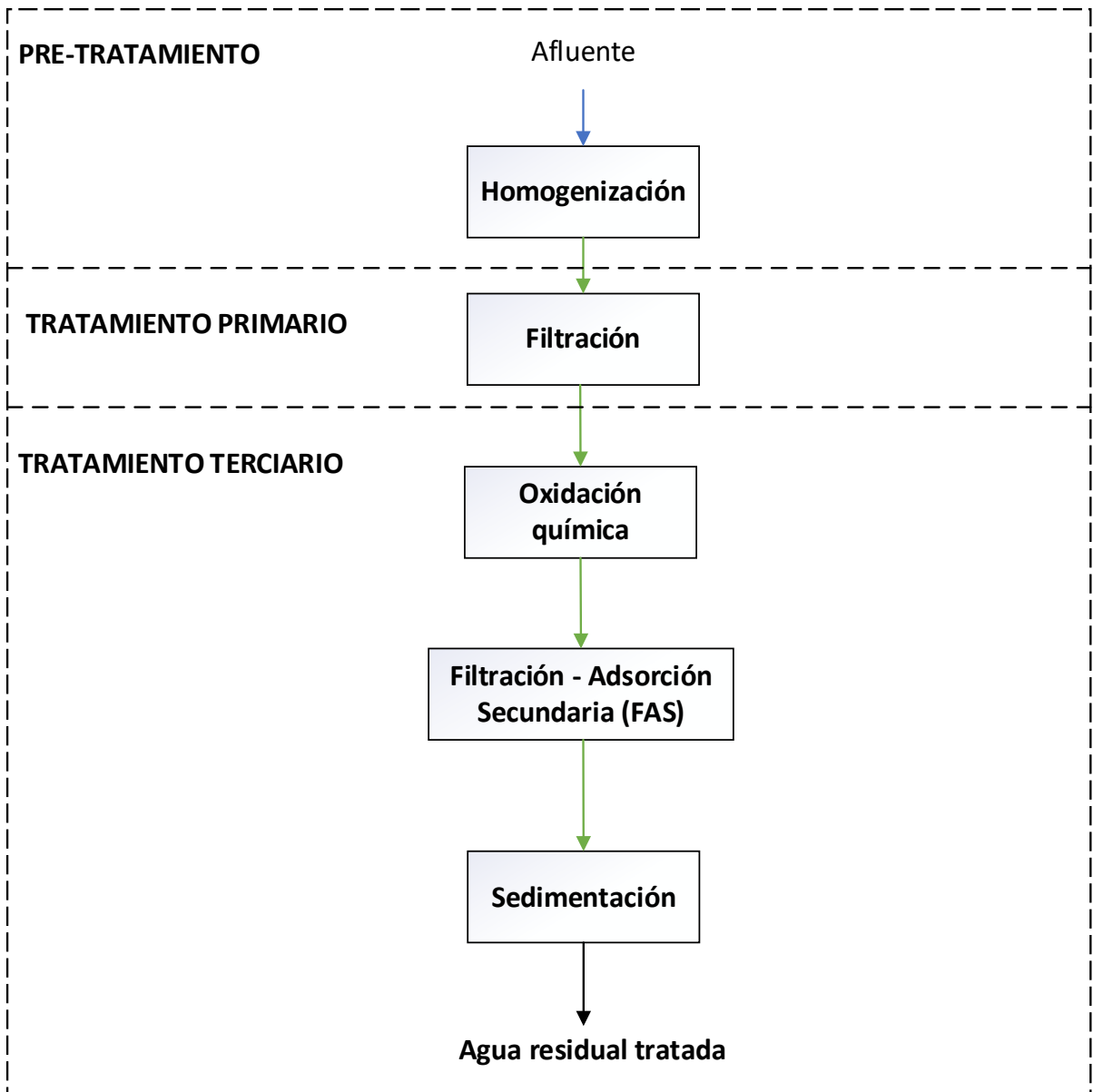
### 2.2.3.2 Etapa primaria

- Filtración: Es el proceso mediante el cual se separan partículas en suspensión de un medio acuoso mediante una membrana porosa (Ramalho, 1996). En el caso de la planta de estudio se tiene filtros de grava y arenas, los cuales, llegan a ser un sistema muy económico y eficiente. La filtración puede reducir el contenido de cianuros en el residuo líquido (Smith & Mudder, 1996).
- Intercambio iónico: proceso en el cual los iones se mantienen unidos por medios de fuerzas electroestáticas a una superficie de un sólido (Ramalho, 1996). En varios casos la zeolita (mineral poroso) suele ser empleada como medio que permite la separación de cationes (Dávila, 2020).
- Adsorción por carbón activado: en la actualidad, las plantas de tratamiento de residuos líquidos consideran al carbón activado como un gran aliado, ya que su principal función es eliminar olores y sabores que producen los contaminantes (Bonilla, 2017). Su función es adsorber contaminantes de un medio acuoso, los cuales se van acumulando en la superficie del carbón por desequilibrio de fuerzas (Ramalho, 1996). En aguas mineras, el carbón activado adsorbe con gran eficiencia al cianuro, por lo que este tratamiento es muy viable en plantas de detoxificación (Smith & Mudder, 1996).

### 2.2.3.3 Etapa terciaria

- Oxidación química: proceso simple y rápido que usa como agente oxidante al ácido peroximonosulfúrico que tiene como objetivo convertir al cianuro en un compuesto menos tóxico (Ramalho, 1996). Además, la reacción química entre el agente oxidante y el cianuro libera ácido cianhídrico por lo que llega a ser un proceso peligroso (Dávila, 2020).





**Figura 2.3** Procesos de tratamiento de residuos líquidos mineros

FUENTE: (Dávila, 2020)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

## 2.3 HUELLA HÍDRICA

Como ya se mencionó, el agua se ha convertido en el mejor aliado fabril y se podría decir que no existe objeto manufacturado que no necesite de agua para su producción (Acosta & Martínez, 2010). Cabe recalcar que no todas las industrias utilizan la misma

cantidad de agua, es decir, para producir un ladrillo no se necesita de la misma cantidad de agua que para producir una tonelada de oro (Concha, 2017). Debido al crecimiento de la industria minera, ha aumentado la cantidad de agua consumida para satisfacer la demanda de producción de oro frente al consumo de agua de las distintas industrias (Northey et al., 2016). La minería está por encima de muchas industrias; solo para fabricar 1 ladrillo se necesita aproximadamente 2 L de agua fresca (Skouteris et al., 2018). De acuerdo a varios estudios se ha determinado que para producir 1 tonelada de etanol se consume entre 15 a 30 toneladas de agua y a su vez los residuos líquidos que se descargan oscilan entre 12 a 15 L/L<sub>Etanol</sub>, los cuales están cargados de contaminantes (Liu et al., 2019). Por último, dentro de la industria minera, una mina de plomo, zinc o plata consume de 8 a 11 m<sup>3</sup> agua/t mineral extraído y son alrededor de 28 a 48 m<sup>3</sup> de agua necesarios para extraer una tonelada de oro (Mudd, 2008).

Hoekstra y Chapagain (2011) desarrollaron un concepto para definir el consumo de agua para la manufacturación de un producto. La Huella Hídrica (HH) se define como el volumen de agua fresca total utilizada en toda la cadena de producción (Hoekstra et al., 2011). La minería está estrechamente relacionada con la huella hídrica (HH) por su alto consumo de agua, además posee un impacto significativo con las reservas de agua superficiales y subterráneas (Mudd, 2008). Es así que, para cuantificar la Huella Hídrica se divide en tres tipos de agua:

- a) Huella hídrica azul: Se refiere al volumen de agua dulce superficial o subterránea que fue extraída para ser utilizada dentro de un proceso o un producto (Baquero Muñoz, 2017).
- b) Huella hídrica verde: Se refiere al volumen de agua lluvia que queda en el suelo y no se evapora (Hoekstra et al., 2011).
- c) Huella hídrica gris: Se refiere al volumen de agua dulce necesario para asimilar o diluir un contaminante (Cruz González, 2012).

La sumatoria de los tres tipos de huellas hídricas es igual a la huella hídrica total de un proceso:

$$HH_{TOTAL-P} = HH_{AZUL-P} + HH_{VERDE-P} + HH_{GRIS-P} \quad [ 2.2]$$

Donde:

$HH_{TOTAL-P}$ : Huella hídrica total de un proceso (volumen/tiempo)

Y, la huella hídrica de un producto es igual:

$$HH = \frac{\sum HH_{TOTAL-P}}{P} \quad [ 2.3]$$

Donde:

HH: Huella hídrica de un producto (volumen/masa)

P: Cantidad de producción del producto (masa/tiempo)

La huella hídrica otorga una amplia visión de como un consumidor puede incidir sobre las fuentes hídricas, mostrando un escenario real del volumen de agua consumida y contaminada y se mide en términos de agua consumida por unidad de tiempo (Cruz González, 2012).

### 2.3.1 HUELLA HÍDRICA AZUL

La pérdida de un volumen de agua dulce que estuvo disponible en algún lugar de captación hace referencia al “consumo” (Chen et al., 2021). La huella hídrica azul se encarga de medir este consumo de agua dulce (superficial o subterránea) que fue extraído para su uso dentro de la cadena de suministro de un producto (Hoekstra et al., 2011). La huella hídrica azul de un proceso puede ser calculada de dos formas:

$$HH_A = (Affl) - (Effl) \quad [ 2.4]$$

Donde:

$HH_A$ : Huella hídrica azul (volumen/tiempo)

Affl: Caudal de entrada (volumen/tiempo)

Eff: Caudal de salida (volumen/tiempo)

$$HH_A = \text{Agua evaporada} + \text{Agua incorporada} - \text{Pérdidas de flujo} \quad [2.5]$$

Donde:

HH<sub>A</sub>: Huella hídrica azul (volumen/tiempo)

### 2.3.2 HUELLA HÍDRICA VERDE

La huella hídrica verde se refiere al agua que se almacena en el suelo y es consumida por la vegetación, además, por la radiación solar y a la actividad de las plantas cierta cantidad de agua se evapotranspira (Baquero Muñoz, 2017). La huella hídrica verde de un proceso es:

$$HH_V = \text{Agua verde evaporada} - \text{Agua verde incorporada} \quad [2.6]$$

Donde:

HH<sub>V</sub>: Huella hídrica verde (volumen/tiempo)

### 2.3.3 HUELLA HÍDRICA GRIS

La huella hídrica gris se define como el volumen de agua que se requiere para diluir o asimilar un contaminante, de acuerdo con las concentraciones naturales del recurso hídrico y a la legislación ambiental aplicable (Hoekstra et al., 2011). Este indicador muestra la realidad de contaminación que un cuerpo de agua podría tener, es decir, si la capacidad de asimilación del cuerpo receptor es consumida en su totalidad (Baquero Muñoz, 2017). La huella hídrica gris de un proceso es:

$$HH_G = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} = \frac{Effl \times C_{effl} - Affl \times C_{affl}}{C_{max} - C_{nat}} \quad [2.7]$$

Donde:

HH<sub>G</sub>: Huella hídrica gris (volumen/tiempo)

L: Carga contaminante (masa/tiempo)

C<sub>max</sub>: Concentración máxima aceptable (masa/volumen)

C<sub>nat</sub>: Concentración natural en el cuerpo de agua (masa/volumen)

Effl: Caudal de salida (volumen/tiempo).

C<sub>effl</sub>: Concentración del contaminante en el efluente (masa/volumen).

Affl: Caudal del afluente o de la entrada (volumen/tiempo).

C<sub>affl</sub>: Concentración del contaminante en el afluente (masa/volumen).

La concentración natural en el cuerpo de agua ( $H_{nat}$ ), asume que no existe alteraciones humanas en la cuenca, su no se conoce con precisión la concentración natural se asume que  $H_{nat}$  es cero y se tiene una huella gris subestimada (Baquero Muñoz, 2017). En el caso de que el caudal de salida sea igual al caudal de entrada la HH<sub>G</sub> es igual a:

$$HH_G = \frac{C_{effl} - C_{affl}}{C_{max} - C_{nat}} \times Effl \quad [ 2.8]$$

Donde:

HH<sub>G</sub>: Huella hídrica gris (volumen/tiempo)

Effl: Factor de dilución (volumen/tiempo).

C<sub>max</sub>: Concentración máxima aceptable (masa/volumen)

C<sub>nat</sub>: Concentración natural en el cuerpo de agua (masa/volumen)

C<sub>effl</sub>: Concentración del contaminante en el efluente (masa/volumen).

C<sub>affl</sub>: Concentración del contaminante en el afluente (masa/volumen).

Siendo Effl (factor de dilución) el número de veces para el cual el efluente debe ser diluido para llegar a un límite máximo de concentraciones asimilables del recurso hídrico (Hoekstra et al., 2011).

## **2.4 ESTRATEGIAS DE RECIRCULACIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS MINEROS**

### **2.4.1. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL**

La caracterización ambiental consiste en una evaluación detallada de un proceso respecto a sus flujos de entrada y salida (Rivela et al., 2004). La evaluación consiste

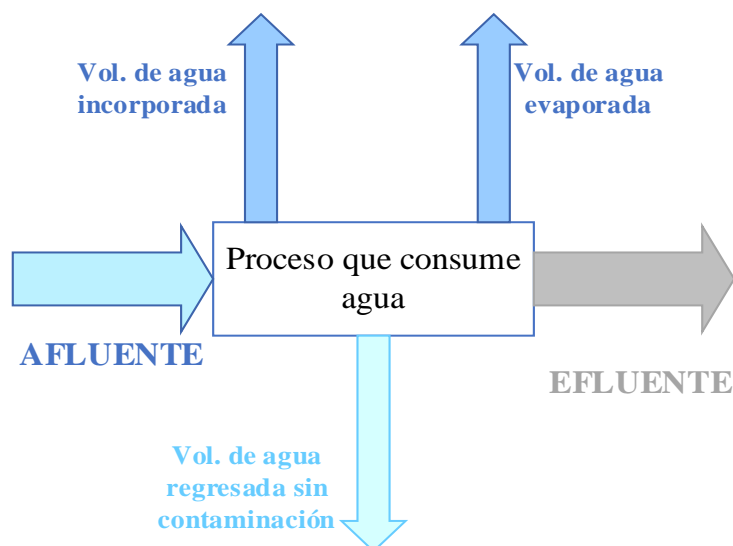
en la caracterización de todas las corrientes residuales sean líquidas, sólidas o gaseosas (Smith & Mudder, 1996). A partir dicho balance (cuantitativo y cualitativo), para cada etapa productiva se pueden estimar índices de generación de residuos líquidos y consumo de materias primas (Mendez et al., 2007).

#### **2.4.1.1 Balance de masa**

Es la cuantificación de los flujos de entrada y salida dentro de un proceso, la cual muestra la distribución de los insumos y residuos en el mismo (Rivela et al., 2004). Además, dicho balance permite determinar los puntos críticos de cualquier proceso en los cuales se genera mayor cantidad de residuos (Smith & Mudder, 1996).

#### **2.4.1.2 Balance hídrico**

El principio del balance hídrico se fundamenta en la ley de la física de la conservación de masas que establece que el ingreso de una masa de agua en un intervalo de tiempo es igual a la salida de dicha masa considerando sus variaciones (Sanchez et al., 2010). Matemáticamente la cantidad de agua entra en un sistema es igual a la que sale. Como entradas se considera a la precipitación (lluvia o nieve) y a las aguas subterráneas y superficiales, mientras que la salida considera a la evaporación y las salidas de agua subterránea o superficial (Baquero Muñoz, 2017).



**Figura 2.4** Balance hídrico para la determinación de la Huella Hídrica de un proceso que consume agua  
 FUENTE: NWF, 2002  
 ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 2.4.2 MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS

En la actualidad las grandes industrias requieren de cantidades exorbitantes de agua dulce, por consiguiente, producen cantidades considerables de residuos líquidos (Pacheco & Durán, 2007). De ahí la importancia de implementar estrategias de minimización tanto para el consumo de agua dulce como para la generación de residuos (Guelli Ulson et al., 2011). La minimización de aguas puede lograrse a través de la reutilización directa del agua y de la regeneración de residuos líquidos para su posterior reutilización o reciclaje (Wang & Smith, 1994). En el ámbito de la minimización de aguas existen tres enfoques de reducción, de los cuales, es importante distinguir entre ellos y las posibilidades que cada enfoque ofrece (Mariano Romero et al., 2005). En ciertos casos, el reciclaje de corrientes entre operaciones puede ser válido y en otros no, debido al tipo de tratamiento regenerativo de la corriente y la cantidad de contaminantes que no se limpiaron en el proceso (Balla et al., 2018; Wang & Smith, 1994). Los distintos enfoques se detallan a continuación:

- Reúso, este enfoque implica la reutilización de una corriente residual en otra unidad, siempre que el nivel de contaminación no interfiera en el nuevo proceso o

unidad (Balla et al., 2018; Wang & Smith, 1994). El reúso implica que la corriente a reusarse no vuelva a la misma unidad y este puede extenderse cuando la corriente se mezcla con otros tipos de agua como fresca, tratada o residual (Mariano Romero et al., 2005)

- Regeneración – reúso, de la misma manera que el primer enfoque, la corriente residual se reúsa en una operación o unidad distinta pero previo al reúso la corriente pasa por un proceso de regeneración parcial (Wang & Smith, 1994). Una vez más, este enfoque puede requerir de la mezcla con otros tipos de agua para satisfacer los requerimientos de entrada a las nuevas operaciones (Guelli Ulson et al., 2011).
- Regeneración – reciclaje, las corrientes residuales provenientes de la regeneración pueden reutilizarse o reciclarse en cualquier proceso o unidad incluyendo los procesos en donde el agua ya ha sido utilizada, debido a que en la regeneración se eliminan los contaminantes de las corrientes residuales (Hu et al., 2011; Wang & Smith, 1994). Este enfoque puede maximizar la reutilización del agua permitiendo obtener un menor consumo de agua fresca y menor generación de residuos líquidos a diferencia si solo se considera el enfoque de reúso (Wang & Smith, 1994).

#### **2.4.3 METODOLOGÍA WATER PINCH**

El análisis *Pinch* ofrece una metodología simple con resultados beneficiosos cuando de técnicas de minimización de residuos líquidos se trata, aplicado a industrias que usan agua (Thevendiraraj et al., 2003). Es así, que el concepto básico de minimización de aguas es dado por la maximización en la recirculación de agua y la identificación de puntos de regeneración (Wang & Smith, 1994). Wang y Smith desarrollaron un método mediante el cual se determina el requerimiento mínimo de consumo de agua usando una curva compuesta limitante a través de tres directrices: identificación de consumo mínimo de agua y generación de efluentes, diseño de una red a aprovechamiento de agua que se fundamente en la minimización y modificación de la red de agua existente (Guelli et al., 2011).



La metodología *Pinch*, puede ser considerada como un integrador de masas entre las etapas que usan agua, dando un enfoque general de los flujos de agua de todo el proceso (Thevendiraraj et al., 2003). El intercambio másico de contaminantes ocurre desde una corriente rica (corriente con mayor presencia de un compuesto) hacia una pobre (corriente con menor presencia de un compuesto de la corriente rica) (Molar Vázquez, 2014). Considerando que, para resolver el problema como único contaminante, el intercambio de masa debe basarse en la transferencia de masa de un solo contaminante (Mohammadnejad et al., 2012). Pero, si incluye transferencia de masa de dos o más contaminantes clave, se resolverá como contaminación múltiple (Mohammadnejad et al., 2012; Priya & Bandyopadhyay, 2017). De tal forma, este análisis considera el potencial de adsorción que tienen las corrientes de agua limpia o recicladas para absorber los contaminantes en las diferentes etapas de un proceso (Balla et al., 2018).

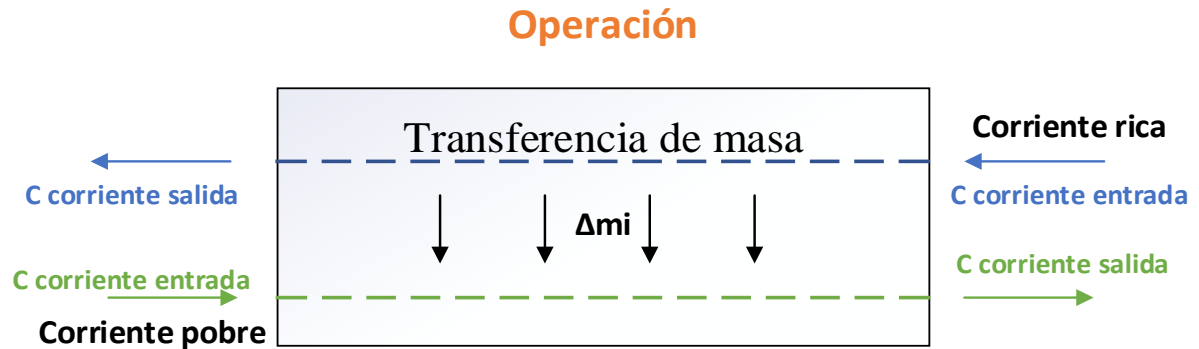
En definitiva, el análisis *Pinch* maximiza la reutilización y reciclaje del agua, además minimiza el consumo de agua dulce y la generación de residuos líquidos (Nemati et al., 2019). De esta forma se establece que, reutilizar es usar el efluente dentro de una unidad distinta de la que procede, mientras que reciclar es reutilizar el efluente en una unidad donde ya se ha utilizado (Balla et al., 2018).

#### **2.4.3.1 Transferencia de masa en operaciones**

Un sistema de transferencia de masa, es una operación que usa un elemento de segregación de masa o una fase pobre para remover contaminantes de una fase rica (Molar Vázquez, 2014). En este contexto el intercambio másico puede realizarse a través de procesos de absorción, desorción, intercambio iónico (Mohammadnejad et al., 2012). Con el objeto de hallar el flujo mínimo de corriente pobre necesaria para retirar cierta cantidad de masa de la corriente rica, disminuyendo así la concentración del compuesto presente en dicha corriente (Molar Vázquez, 2014).

En la Figura 2.5 se detalla la transferencia de masa entre dos o más corrientes. Las corrientes se caracterizan por poseer al menos un contaminante en común y lo que se busca es disminuir la concentración de un contaminante de la corriente rica

(Mohammadnejad et al., 2012). A diferencia de la corriente pobre, se desea aumentar la concentración del contaminante, de tal forma que cada corriente (rica y pobre) alcance una concentración deseada a su salida (Molar Vázquez, 2014). Se considera como corriente pobre al flujo de agua y como rica al flujo de un proceso que tiene una cantidad de contaminante mayor (Figura 2.5).



**Figura 2.5** Transferencia de masa

Nota: C: concentración y  $\Delta m$ : Transferencia de masa

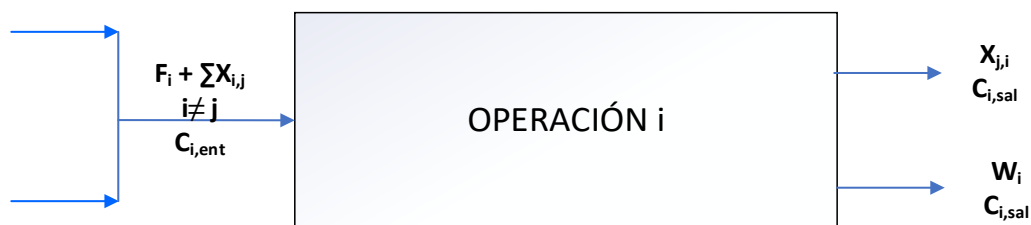
FUENTE: (Molar Vázquez, 2014)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 2.4.3.2 Balance de contaminantes transferidos en agua

- **Contaminante único – agua reusada**

En la Figura 2.6 se muestra un modelo estructural de cualquier operación que incluya reúso de agua.



**Figura 2.6** Modelo estructural de cualquier operación con reúso de agua

FUENTE: (Prakotpol & Srinophakun, 2004)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

La función objetivo que es el caudal mínimo de agua puede ser expresado como:

$$F = \sum_i F_i \quad [2.9]$$

Donde:

$F_i$ : caudal de agua fresca que ingresa a la operación  $i$ ,  $m^3/h$

$i$ : número de operaciones unitarias

Respecto a la Figura 2.7, se formulan las restricciones del balance de masa y la concentración máxima de entrada. El balance de masa de agua alrededor de cada operación unitaria  $i$  se define por:

$$F_i + \sum_{j \neq i} X_{i,j} - W_i - \sum_{j \neq i} X_{j,i} = 0 \quad [2.10]$$

Donde:

$X_{i,j}$ : caudal de residuo líquido de la operación  $j$  reusado en la operación  $i$ ,  $m^3/h$

$W_i$ : caudal de residuo líquido de desecho de la operación  $i$ ,  $m^3/h$

$X_{j,i}$ : caudal de residuo líquido de la operación  $i$  reusado en la operación  $j$ ,  $m^3/h$

En cuanto al balance de masa de contaminantes alrededor de cada operación se puede formular de la siguiente manera:

$$\sum_{j \neq i} C_{j,sal} X_{i,j} + \Delta m_i - C_{i,sal} \left( W_i + \sum_{j \neq i} X_{j,i} \right) = 0 \quad [2.11]$$

Donde:

$C_{j,sal}$ : concentración a la salida de la operación  $j$ , en  $mg/L$ .

$C_{i,sal}$ : concentración a la salida del agua posterior a la operación  $i$ , en  $mg/L$ .

$\Delta m_i$ : carga másica total de contaminante transferido desde la operación  $i$ , en  $kg/h$ .

Debido a que la concentración promedio de entrada a la operación debe ser menor o igual que la concentración máxima permitida en la entrada, la restricción se presenta de esta forma:

$$C_{i,ent} = \frac{\sum_{j \neq i} X_{i,j} C_{j,sal}^i}{\sum_{j \neq i} X_{i,j} + Fi} \leq C_{i,ent}^{max} \quad [ 2.12]$$

Donde:

$C_{i,ent}$ : concentración promedio a la entrada de la operación i, en mg/L.

$C_{i,ent}^{max}$ : concentración máxima de entrada de la operación i, en mg/L.

Por lo tanto, la concentración de salida representa a la suma entre la concentración de entrada y el cambio de concentración debido a la carga de masa del contaminante transferido como se muestra en la ecuación 2.13. Además, para maximizar la reutilización de agua, la concentración de salida se ve en obligación de alcanzar la concentración de salida límite y se expresa en la ecuación (Prakotpol & Srinophakun, 2004).

$$\sum_{j \neq i} C_{j,sal}^{max} X_{i,j} + \Delta m_i - C_{i,sal}^j \left( W_i + \sum_{j \neq i} X_{j,i} \right) = 0 \quad [ 2.13]$$

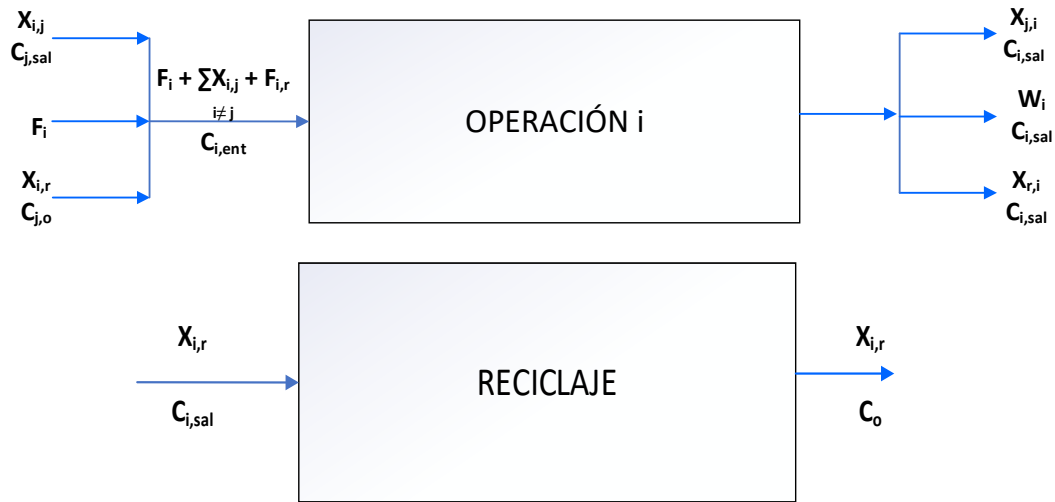
Donde:

$C_{j,sal}^{max}$ : concentración máxima de salida de la operación i, en mg/L

$$\frac{\sum_{j \neq i} X_{i,j} C_{j,sal}^i}{\sum_{j \neq i} X_{i,j} + Fi} \leq C_{i,ent}^{max} \quad [ 2.14]$$

- Contaminante único – reciclaje de agua

El modelo estructural con el proceso de reciclaje de agua se muestra en la Figura 2.7:



**Figura 2.7** Modelo estructural del proceso de reciclaje-regeneración del agua

FUENTE: (Prakotpol & Srinophakun, 2004)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

De acuerdo con la Figura 2.7 el balance hídrico alrededor del proceso de reciclaje del agua se basa en las siguientes ecuaciones (Prakotpol & Srinophakun, 2004):

$$F_i + \sum_{j \neq i} X_{i,j} + X_{i,r} - W_i - \sum_{j \neq i} X_{j,i} - X_{r,i} = 0 \quad [2.15]$$

Donde:

$X_{r,i}$ : caudal de agua de la operación  $i$  conducido hacia la reciclaje,  $m^3/h$ .

$X_{i,r}$ : caudal de agua de la operación  $i$  procedente de la reciclaje,  $m^3/h$ .

$$\sum_{j \neq i} C_{j,sal}^{max} X_{i,j} + C_o X_{i,r} + \Delta m_i - C_{i,sal}^{max} \left( W_i + \sum_{j \neq i} X_{j,i} + X_{r,i} \right) = 0 \quad [2.16]$$

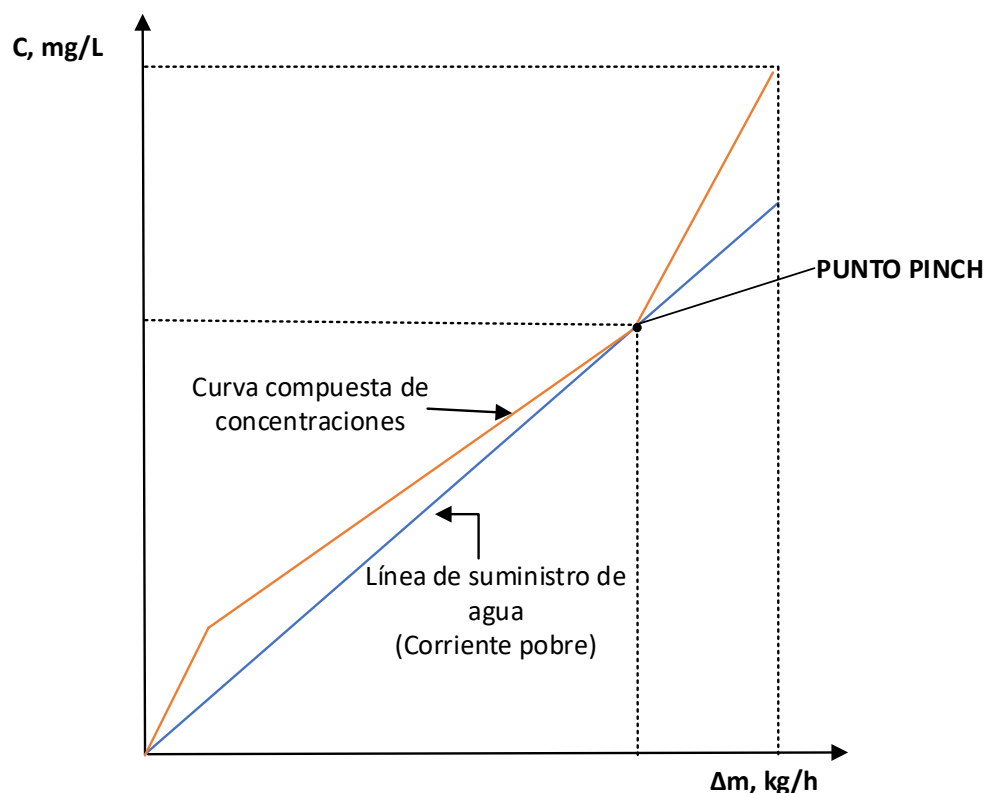
Donde:

$C_o$ : concentración de salida del proceso de reciclaje,  $mg/L$

$$\frac{\sum_{j \neq i} X_{i,j} C_{j,sal}^{max} + C_o X_{i,r}}{\sum_{j \neq i} X_{i,j} + F_i + X_{i,r}} \leq C_{i,ent}^{max} \quad [2.17]$$

### 2.4.3.3 Curva Compuesta de Concentraciones

La Curva Compuesta de Concentraciones fue desarrollada por Wang y Smith (1994) y se basa en maximizar el potencial que tendría una corriente de agua al ser reusada o reciclada. Para esto, previo a la reutilización o reciclaje de las corrientes, se analiza la posibilidad de efectuar un tratamiento parcial (Alva et al., 2007; Mohammadnejad et al., 2012). La curva representa la relación entre la carga másica acumulada en kg/h (eje x), con respecto a la concentración del contaminante en mg/L (eje y) (Prakash & Shenoy, 2005). Por lo cual, a través de la Curva Compuesta se puede determinar el flujo de agua mínima requerido para reducir la concentración del contaminante de las corrientes del proceso a niveles aceptables (Molar Vázquez, 2014).



**Figura 2.8** Curva Compuesta con línea de suministro de agua

FUENTE: (Molar Vázquez, 2014)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

Este método gráfico (Curva Compuesta de Concentración) se usa para determinar el punto *Pinch*, tal como se muestra en la Figura 2.8, para lo cual, es necesario calcular el caudal mínimo de agua requerido sin reutilización para cada proceso (Mohammadnejad et al., 2012). El gráfico de la Curva Compuesta representa la masa intercambiada total de todas las corrientes (Wang & Smith, 1994). A la curva se adiciona una línea de suministro de agua que tenga una concentración de contaminante igual a cero (agua fresca) y el punto donde chocan estas dos líneas se le conoce como punto *Pinch* (Molar Vázquez, 2014).

El punto *Pinch* representa a la concentración máxima de contaminante que se transfiere desde la corriente rica en dicho contaminante a la corriente pobre (agua) (Mariano Romero et al., 2005). Además, asegura que la transferencia de masa utilice lo mínimo de agua fresca, siendo el inverso de la pendiente del punto *Pinch* la tasa de flujo de agua mínima requerido para proceso productivo (Molar Vázquez, 2014; Nemati et al., 2019)

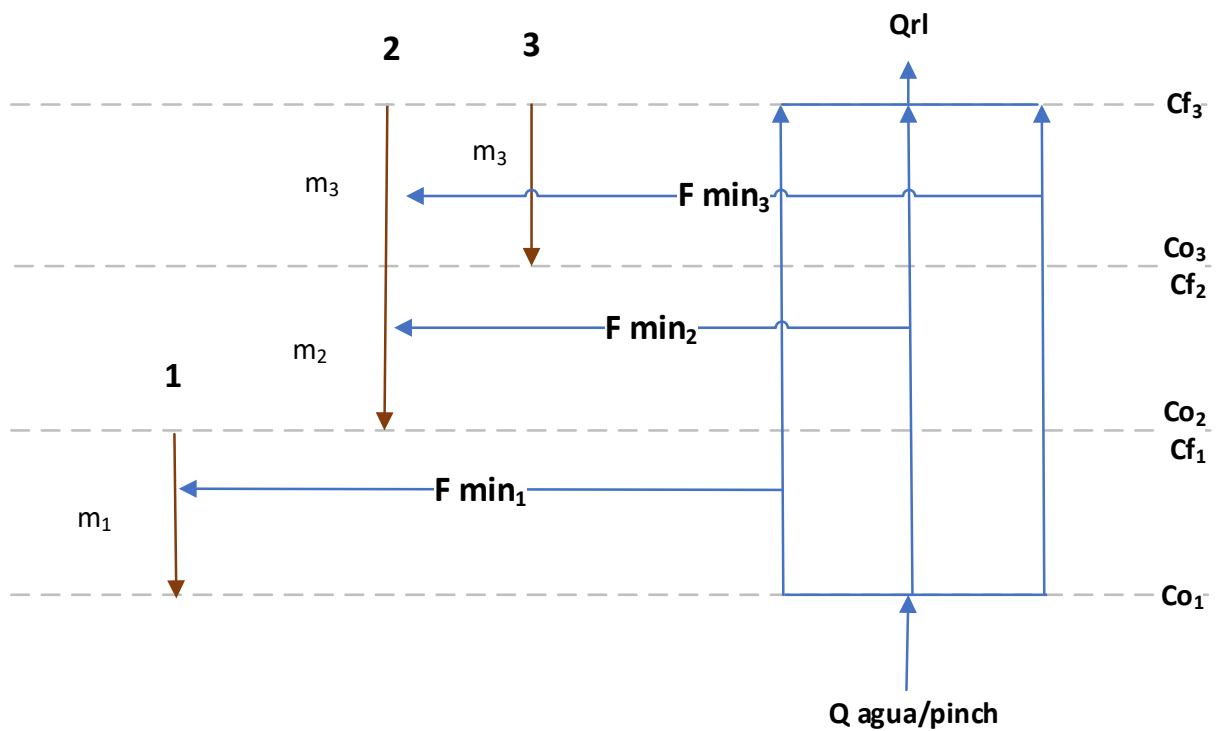
El punto *Pinch* muestra dos regiones: por encima del punto y por debajo; por encima de la concentración del punto *Pinch* no es necesario el uso de agua fresca en el proceso, mientras que por debajo sí (Nemati et al., 2019). Otro factor importante dentro del análisis *Pinch*, es la elección de los contaminantes, los cuales selectivamente deben ser los más inhibidores del proceso, porque entre más efecto tienen, más relevantes son (Rolén, 2015).

#### **2.4.3.4 Diseño de la red de corrientes líquidas**

Después de determinar los flujos mínimos de agua, es necesario diseñar una nueva red de corrientes líquidas, que refleje el objeto de optimización. El diseño de la red se fundamenta en los datos de la Curva Compuesta, para determinar los flujos mínimos de agua dulce y por ende de residuos líquidos (Guelli Ulson et al., 2011).

Un diseño de red, se lleva a cabo usando un diagrama de cuadrícula, el cual consiste en graficar los límites de intervalos de concentración, flujos de agua de cada proceso y su carga de masa contaminante (Khezri et al., 2010). En la Figura 2.9, las líneas

discontinuas horizontales muestran los límites de concentración de cada intervalo y las líneas verticales de la izquierda representan el flujo de agua de cada proceso (Khezri et al., 2010). Una vez configurado la cuadrícula de diseño, incluyendo los caudales y concentraciones de cada operación, se deben conectar las operaciones a la red hídrica para satisfacer los requerimientos de cada operación. Por último, una vez establecido los flujos mínimos de agua (a partir de las concentraciones) se procede a eliminar la cuadrícula intermedia, dando como resultado una red de agua muchos más simple y favorecedora al sistema (Kuo & Smith, 1998; Rašković, 2010).



**Figura 2.9** Cuadrícula de diseño

Nota: (F) flujo mínimo de agua fresca, (Co) concentración inicial de un contaminante, (Cf) concentración final de un contaminante, (Q) caudal, (Qrl) caudal de residuos líquidos, (Qpinch) caudal mínimo de agua para el proceso.

FUENTE: (Kuo & Smith, 1998)

ELABORACIÓN: Vilaña J.



## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Empresa Exportadora Aurífera S.A (EXPAUSA), es una empresa minera que se dedica a la explotación, procesamiento, refinamiento y exportación de oro. EXPAUSA opera una serie de minas dentro de la provincia del Azuay, entre ellas “Bonanza” ( $3^{\circ}4'51,1''S$ ;  $79^{\circ}42'42,1''O$ ) cuyo material explotado pasa a la planta de beneficio “Rumicuri” ( $3^{\circ}5'43,9''S$ ;  $79^{\circ}43'8,1''O$ ), ambas ubicadas en la Parroquia Camilo Ponce Enríquez en la Provincia del Azuay (Figura 3.1)



**Figura 3.1** Mapa de ubicación de la zona de estudio

ELABORACIÓN: Vilaña J

### **3.1.1 USO DE AGUA EN MINAS Y CAMPAMENTOS**

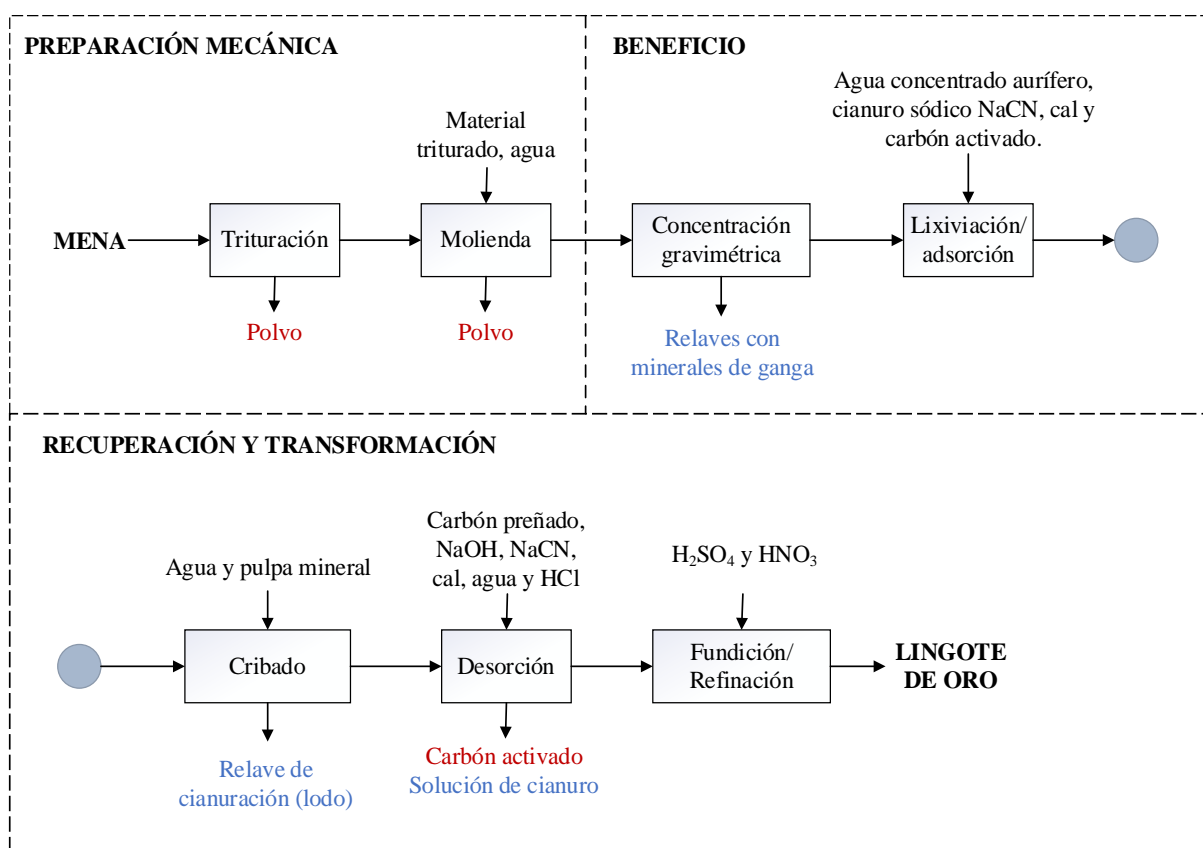
Las fuentes de agua dulce que alimentan la red de agua tanto para el campamento minero Bonanza como para la planta de beneficio Rumicuri, provienen de fuente subterránea (acueducto) y de una superficial (río) respectivamente. Dentro del campamento Bonanza se puede diferenciar dos tipos de uso que se da al agua dulce, el primero es uso doméstico y el segundo es uso industrial. El agua dulce es almacenada en un tanque/piscina de almacenamiento donde se distribuyen los diferentes volúmenes para las diferentes actividades que necesitan agua, de las cuales el proceso de molienda es el que mayor cantidad de agua consume. Con respecto a la planta de beneficio Rumicuri, el agua proveniente de la fuente superficial río arriba, es de igual manera almacenada en tanques/piscinas y distribuido a las distintas fases que requieren de agua, en este caso cianuración es la etapa más demandante de agua dulce.

### **3.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO DE ORO**

En la mina Bonanza se efectúa la etapa de preparación mecánica del mineral, mediante operaciones de trituración y molienda. La trituradoras reciben material con dimensión de hasta 6 pulgadas que posterior a la trituración este se reduce a 2 pulgadas. La molienda se realiza en 5 molinos con un motor eléctrico de 30 hp, tanto las trituradoras como los molinos poseen una capacidad de 1 t/día. En cuanto a la etapa de beneficio, esta se desarrolla por las operaciones de concentración gravimétrica y lixiviación en cianuración. La primera se realiza en Bonanza en canalones de 6 m de longitud que dan un concentrado (no finos) rico en oro y los finos se almacenan en piscinas para ser transportados a Rumicuri. En la planta de beneficio Rumicuri, la lixiviación por cianuración se realiza en agitadores de pulpa mineral cuyo objetivo es poner al oro metálico en una solución de cianuro áurico, a su vez, se añade carbón activado para el proceso de adsorción del oro.

Finalmente, la etapa de recuperación conformada por los procesos de cribado, desorción y refinamiento tiene por objetivo recuperar el oro en su máxima pureza. La

pulpa mineral resultado del proceso de cianuración pasa a un cribado (lavado de carbón), donde se separa al carbón preñado de la solución cianurada; el primero es llevado a desorción para la recuperación del oro y su posterior refinamiento; y la corriente residual cianurada se lleva a la planta de detoxificación. La Figura 3.2, muestra un diagrama de flujo del proceso de obtención de oro, así como las posibles corrientes residuales generadas.



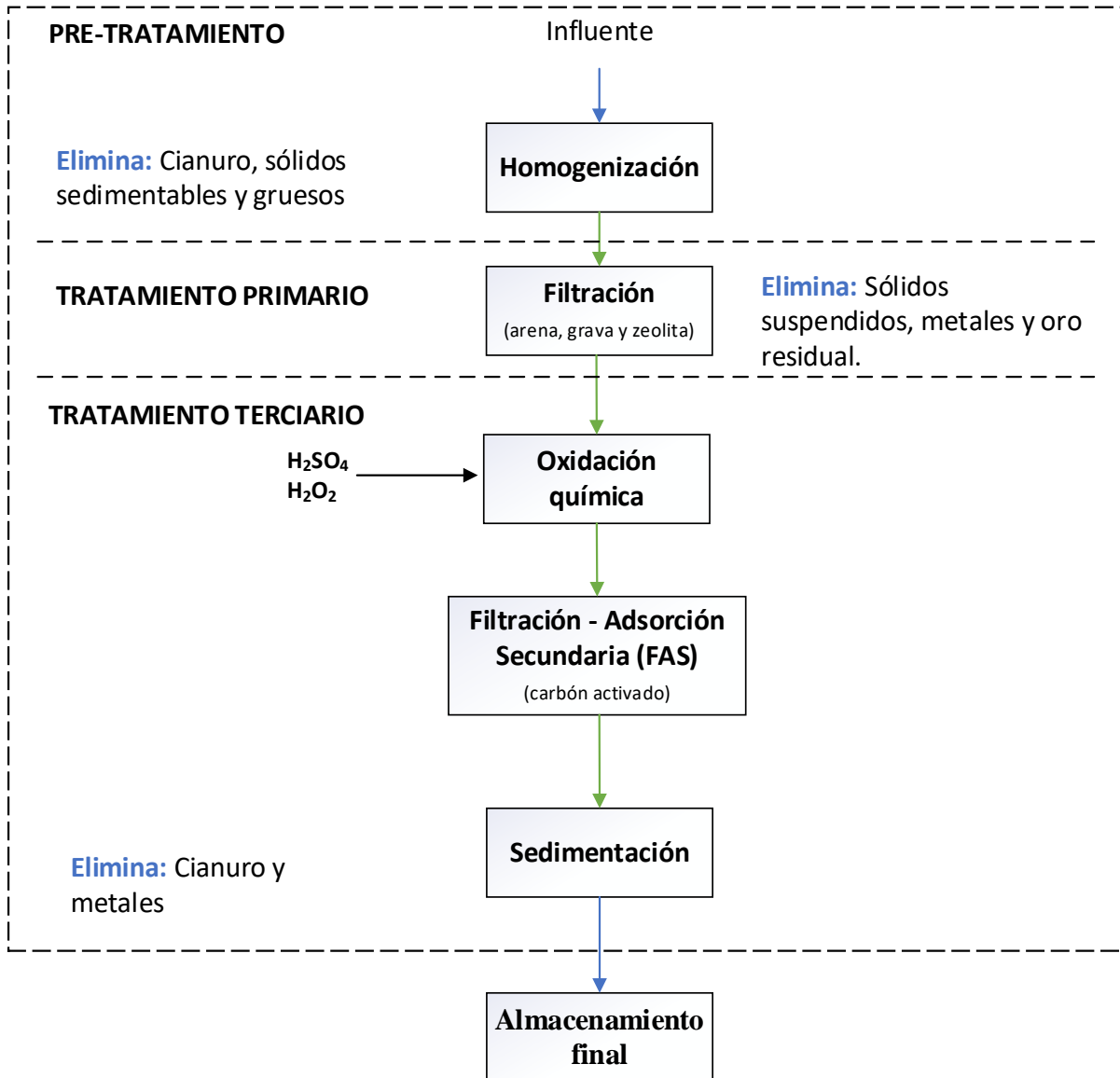
**Figura 3.2** Esquema simplificado del proceso de obtención de oro

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### 3.1.3. PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE CIANURACIÓN

La Planta de Tratamiento de Residuos Líquidos Industriales (PT-RLIes) de la empresa ubicada en Rumicuri, es la encargada de tratar todos los residuos líquidos procedentes de la etapa de beneficio del oro. La corriente residual que fue enviada a relaveras decanta, los sólidos se sedimentan y el residuo líquido restante pasa a la planta de

detoxificación. En la Figura 3.3 se esquematiza el tratamiento efectuado en la planta, el cual consta de las etapas: pretratamiento, primario y terciario.



**Figura 3.3** Diagrama de flujo PT-RLles

FUENTE: Dávila, 2020

ELABORACIÓN: Vilaña J.

## 3.2 FUENTES DE INFORMACIÓN

### 3.2.1 INFORMACIÓN DE CAMPO

La recopilación de la información se fundamenta en las operaciones del campamento minero Bonanza y de la planta de beneficio Rumicuri. La empresa facilitó datos de funcionamiento de las operaciones tanto de la mina como de la planta, registros de insumos y muestreos anteriores, además a partir de visitas coordinadas a campo se obtuvo información por parte de los encargados del funcionamiento de la planta, tal como se ve en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1**  
*Recopilación de la información*

Información	Fuentes Primarias	Fuentes Secundarias
Funcionamiento de las operaciones en el campamento Bonanza y planta de beneficio Rumicuri.	- Observación directa - Entrevistas - Muestreos - Fotografías	- Biblioteca (libros, revistas) - Documentos (expedientes, datos estadísticos, informes)
Funcionamiento de la PT-RLles.		

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### 3.2.2 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

La información requerida para la caracterización ambiental, se realizó mediante el monitoreo a la planta de estudio, tal como se ve en la Tabla 3.2. La visita de campo se dividió en varias jornadas, tentativamente con una temporalidad de 15 días. La primera jornada se focalizó en el reconocimiento e identificación de puntos de muestreos tanto para el campamento minero Bonanza como para la planta de beneficio Rumicuri. Las visitas posteriores fueron destinadas al plan de toma de muestras y análisis en laboratorio. Principalmente, las fuentes para el levantamiento de información vinieron desde la observación *in situ*, entrevistas con los encargados

de los respectivos campamentos, revisión de documentación, medición de caudales y análisis de muestras.

**Tabla 3.2**

*Síntesis de la caracterización ambiental*

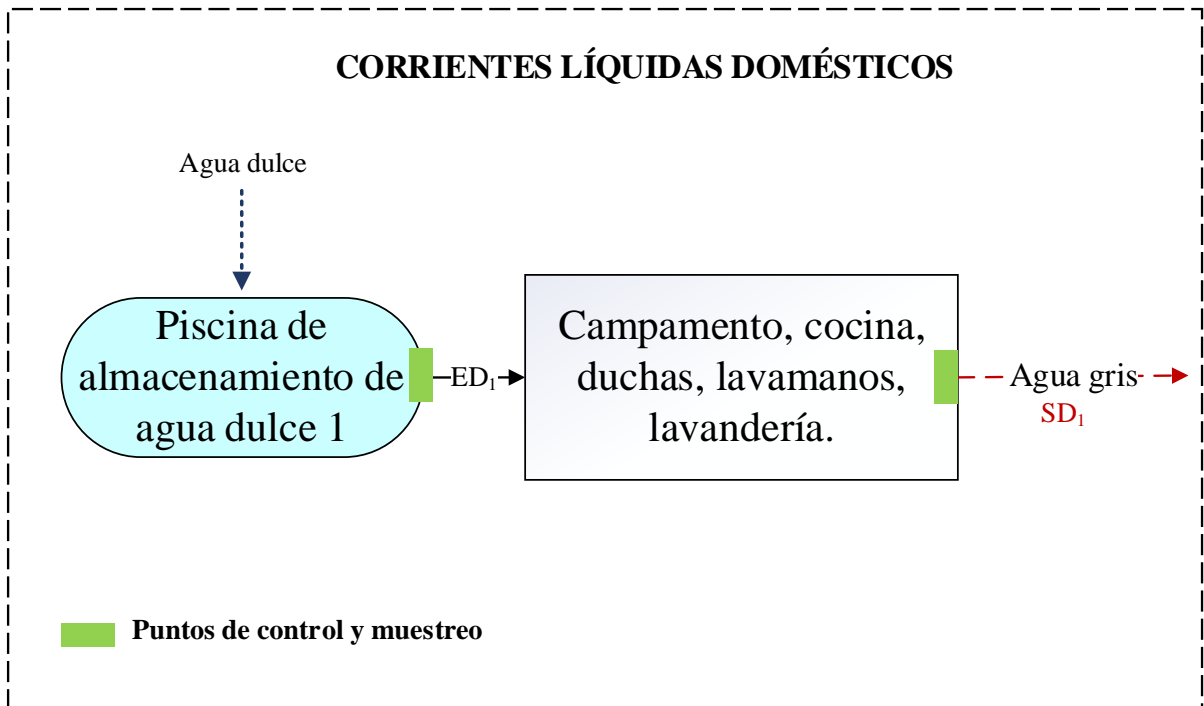
<b>Información</b>	<b>Fuente de información</b>	<b>Temporalidad</b>
Reconocimiento de la zona de estudio e identificación de puntos de muestreo.	Observación, entrevistas.	Jornada de: 3 días
Toma y análisis de muestras en mina Bonanza.	Muestreos, fotografías.	Jornada de: 15 días
Toma y análisis de muestras en planta de Beneficio Rumicuri.	Muestreos, fotografía.	Jornada de: 15 días

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### **3.2.2.1 Identificación de puntos de muestreo**

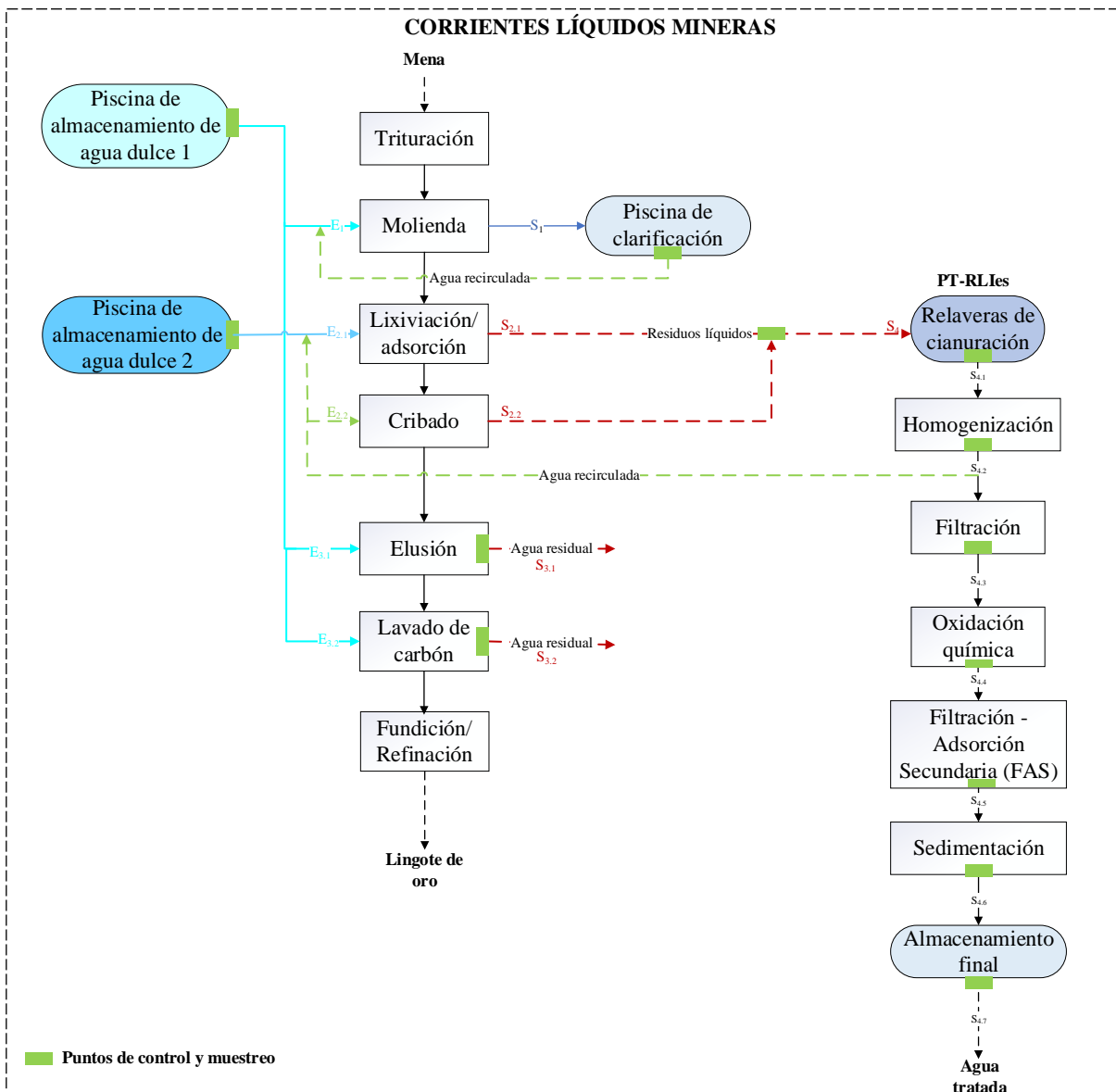
Los puntos de muestreos de las corrientes líquidas seleccionadas se establecieron de acuerdo con las normas técnicas INEN 2169 y 2226. La ubicación de los puntos de muestreo se determinó en base a lugares que mejor representen las condiciones reales de las corrientes a muestrear. Es así, que los puntos se ubicaron en zonas donde el flujo se encuentre homogenizado y sean de fácil acceso, donde se podían introducir envases para la recolección de muestras. Las corrientes líquidas para muestrear fueron clasificadas según su tipo: corrientes líquidas domésticas (Figura 3.4) y corrientes líquidas mineras (Figura 3.5), esto debido a su caracterización Anexo 1 – TULSMA (MAE, 2015).

En total se establecieron 14 puntos de muestreo, localizados tanto en operaciones del proceso como en la PT-RLles.



**Figura 3.4** Puntos de muestreo de las corrientes líquidas domésticas

ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 3.5** Puntos de muestreo de las corrientes líquidas mineras

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### 3.2.2.2 Muestreo

En la primera visita de campo se identificaron los puntos de muestreos de las corrientes líquidas dentro del campamento minero Bonanza y la planta de beneficio Rumicuri. El protocolo de muestreo establece los criterios necesarios para las tomas de muestras, conservación y medición de caudales. Un resumen de los criterios establecidos para



el muestreo se muestra en la Tabla 3.3 y en el Anexo N°2 se muestra detalladamente el procedimiento usado.

**Tabla 3.3**  
*Síntesis programa de muestreo*

<b>Muestreo</b>	<b>Criterios</b>
Residuos Líquidos	<p>a. Tipo de muestreo: manual</p> <p>b. Medición de caudales: método volumétrico</p> <p>La medición de caudal mediante este método se realiza de forma manual y requiere de un cronómetro y un recipiente graduado</p> <p>c. Tipo de muestra: compuesta</p> <p>La muestra compuesta se formará por alícuotas de muestras puntuales, tomando pequeñas porciones de agua (500 ml) a distintos tiempos (cada 2 h) y luego se mezclan de forma proporcional al caudal.</p> <p>d. Preservación de muestras: refrigeración y conservación de las muestras a 4°C</p>

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### 3.2.2.3 Identificación de las corrientes líquidas

La Tabla 3.4, describe todas las corrientes líquidas del proceso, entre ellas: corrientes de agua fresca/recirculada (alimentación) y corrientes de residuos líquidos (vertidos). La nomenclatura designada para las corrientes fueron: E (alimentación de agua fresca o recirculada), S (corrientes de vertidos), ED (alimentación de agua para uso doméstico) y SD (vertido de uso doméstico).

**Tabla 3.4**  
*Identificación de las corrientes líquidas*

Proceso	Fase	Identificación	
		E	S
1. Molienda	Molinos	E <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>
2. Lixiviación/Adsorción	Cianuración	E <sub>2,1</sub>	S <sub>2,1</sub>
	Cribado	E <sub>2,2</sub>	S <sub>2,2</sub>
3. Elusión	Elusión	E <sub>3,1</sub>	S <sub>3,1</sub>
	Lavado de carbón	E <sub>3,2</sub>	S <sub>3,2</sub>
4. Tratamiento	Relavera	-	S <sub>4,1</sub>
	Piscina de homogenización	-	S <sub>4,2</sub>
	Torres de filtración	-	S <sub>4,3</sub>
	Tratamiento químico	-	S <sub>4,4</sub>
	Filtración/adsorción	-	S <sub>4,5</sub>
	Piscina de sedimentación	-	S <sub>4,6</sub>
	Piscina de almacenamiento 2	-	S <sub>4,7</sub>
5. Uso doméstico	Uso doméstico	ED <sub>1</sub>	SD <sub>1</sub>

Nota. (S<sub>4,1</sub>) representa al punto donde se juntan los residuos líquidos S<sub>2,1</sub> y S<sub>2,2</sub>.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### 3.2.2.4 Caracterización de las corrientes líquidas

La Tabla 3.5, muestra la selección de parámetros para la cuantificación de las cargas contaminantes en las corrientes líquidas muestreadas. Los análisis fisicoquímicos de las distintas muestras, se desarrollaron conforme la metodología Standard Methods (APHA-AWWA-WEF, 2005).

**Tabla 3.5**  
*Parámetros fisicoquímicos analizados*

N°	Parámetro	Unidad	Método	Instrumentos
1	pH	-	Potenciométrico APHA 4500	pH-metro
2	Temperatura	°C	Medición directa	Termómetro
3	Conductividad	µcm	Conductimetría APHA 2510 B	Conductímetro
4	Sólidos totales	mg/l	APHA 2540 G	Crisol Estufa Balanza analítica
5	Sulfatos	mg/l	Método 8051/ APHA 3111	Espectrofotómetro Celdas
6	Hierro Total	mg/l	Método 8008/ APHA 3111	Espectrofotómetro Celdas
7	Cobre	mg/l	Método 8506/ APHA 3111	Espectrofotómetro Celdas Bureta
8	Cianuro Total	mg/l	APHA 4500-CN- D	Soporte universal Probeta Vaso de precipitado Digestor de DQO
9	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	APHA 5220 D	Espectrofotómetro Viales Pipetas

FUENTE: APHA-AWWA-WPCF (2005)

ELABORACIÓN: Vilaña J.

La caracterización físico-química se realizó en el laboratorio LEGEMESA ubicado en la ciudad de Guayaquil. Los parámetros de pH, conductividad y temperatura se determinaron de manera directa en las jornadas de muestreo mediante un equipo multiparámetro de marca HACH (HQ11D).

Con respecto al monitoreo de caudales, se desarrolló a través del método volumétrico en base a la normativa NTE INEN 8316, el cual consiste en la recolección de un volumen de muestra en un recipiente graduado en un tiempo conocido. El caudal se

determina como la diferencia entre estos dos datos recolectados y así lo indica la Ecuación 3.1.

$$\text{Caudal } (Q) = V/T \quad [ 3.1]$$

Dónde:

V= volumen del recipiente (L)

T= tiempo (s)

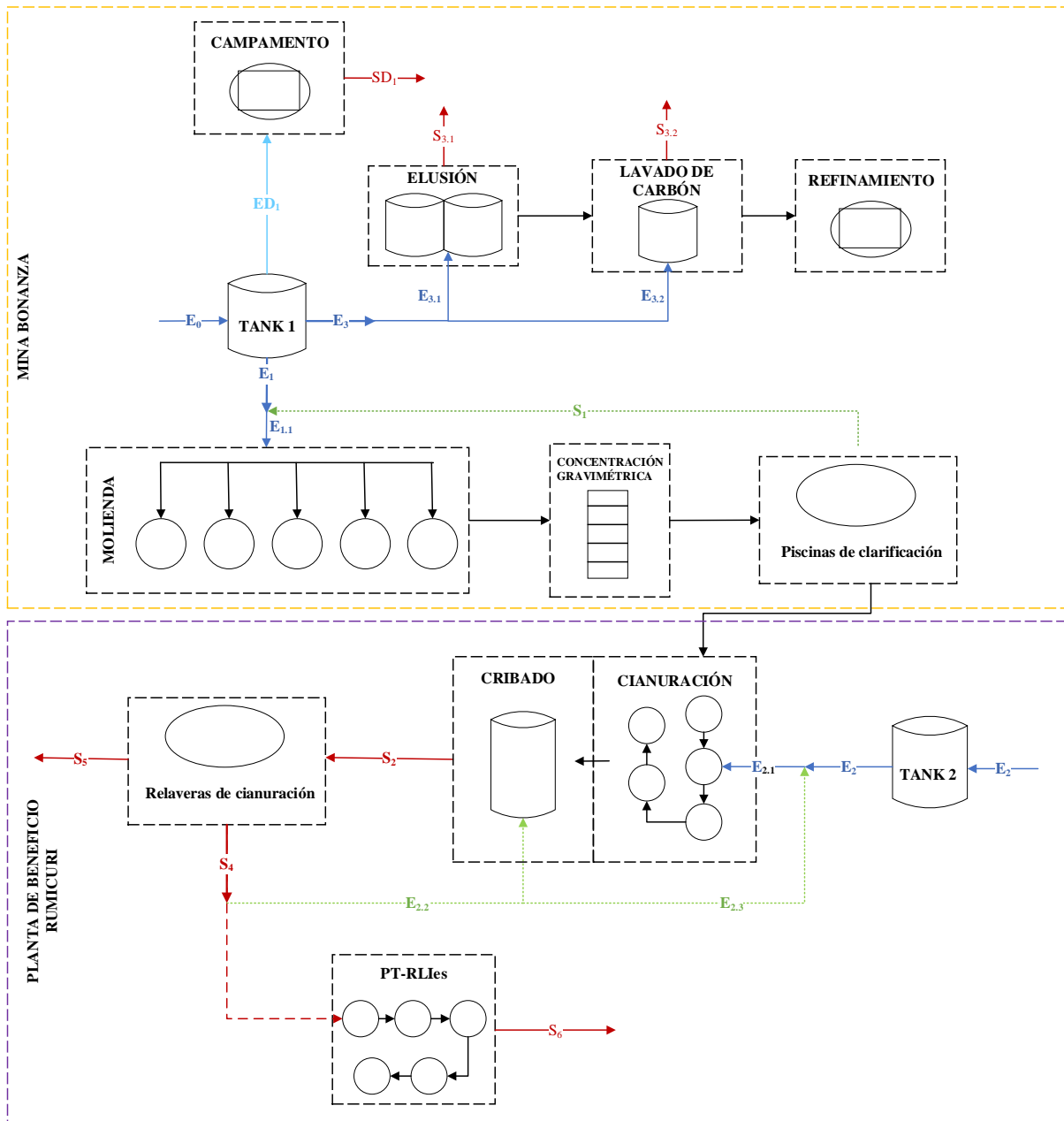
En cada punto de control se realizaron mediciones por duplicado a lo largo de una jornada de trabajo de aproximadamente 8 horas por 5 días consecutivos.

#### **3.2.2.5 Evaluación de la Planta de Tratamiento de Residuos Líquidos Industriales**

La PT-RLIes fue monitoreada durante la generación de residuos líquidos mineros en cada uno de sus procesos unitarios que conforman el tratamiento de detoxificación. Se establecieron 7 puntos de control como se muestra en la Figura 3.6. Los parámetros físicos-químicos analizados en la planta fueron respecto a DQO (Demanda Química de Oxígeno), ST (Sólidos Totales),  $SO_4^{2-}$  (Sulfatos), Fe (Hierro), Cu (Cobre),  $CN^-$  (Cianuro Libre),  $CN_t$  (Cianuro Total), CE (Conductividad eléctrica), pH y temperatura.

#### **3.2.2.6 Balance hídrico**

Para la determinación de la Huella Hídrica, el balance hídrico podría considerarse como el paso clave. Es necesaria la identificación de todos los procesos que consumen agua y de los que generan vertidos (Tabla 3.6), así como la cuantificación del flujo de agua dulce utilizado en cada etapa, tanto para las actividades directamente relacionadas al proceso de obtención del oro, como el flujo de agua utilizado indirectamente en las actividades (uso doméstico). El balance hídrico se determina por unidad de operación y posteriormente se obtiene un balance hídrico total, como se ve en la Figura 3.6.



**Figura 3.6** Diagrama de flujo que representa todos los procesos que utilizan agua

ELABORACIÓN: Vilaña J.

**Tabla 3.6**  
*Identificación de los flujos de agua en cada proceso*

<b>ID corrientes</b>	<b>Descripción</b>	<b>Flujo de agua m<sup>3</sup>/d</b>
E <sub>0</sub>	Primera entrada de agua dulce al tanque de almacenamiento	186,2
ED <sub>1</sub>	Agua usada por el personal	14,4
SD <sub>1</sub>	Descarga producida por el personal	14,2
E <sub>1</sub>	Salida de agua fresca hacia el proceso de molienda	166,6
E <sub>1.1</sub>	Agua utilizada en el proceso de molienda	354,7
S <sub>1</sub>	Agua recirculada al proceso de molienda	188,1
E <sub>2</sub>	Entrada de agua dulce al tanque de almacenamiento	34,28
E <sub>2.1</sub>	Agua utilizada en el proceso de cianuración	189,4
E <sub>2.2</sub>	Agua recirculada al proceso de cribado	100,6
E <sub>2.3</sub>	Agua recirculada al proceso de cianuración	155,15
S <sub>2</sub>	Residuo líquido generado en los procesos de cianuración y cribado	290,0
E <sub>3</sub>	Salida de agua dulce hacia el proceso de elusión y lavado de carbón	5,3
E <sub>3.1</sub>	Agua utilizada en el proceso de elusión	2,8
E <sub>3.2</sub>	Agua utilizada en el proceso de lavado de carbón	2,4
S <sub>3.1</sub>	Descarga de residuos líquidos del proceso de elusión	2,8
S <sub>3.2</sub>	Descarga de residuos líquidos del proceso de lavado de carbón	2,4
S <sub>4</sub>	Residuo líquido de las relaveras	286,0
S <sub>5</sub>	Descarga de residuos líquidos del proceso de cianuración y cribado sin tratamiento	4,0
S <sub>6</sub>	Descarga de agua tratada	30,3

Elaboración: Vilaña J.

### 3.2.2.7 Balance de materia

Los datos utilizados para el balance de materia del proceso general de obtención de oro, fueron recolectados de los reportes diarios del funcionamiento de la planta. Los reportes indican el consumo de insumos y la generación de residuos durante el año 2022. El seguimiento dado a la planta durante el desarrollo de la investigación, consistió en registrar los datos de consumo de agua dulce y de productos químicos a cada proceso, de los cuales se obtuvieron valores promedio para su posterior análisis.

Cuantificadas todas las corrientes de entradas y salida del proceso de obtención de oro, fue posible realizar el balance de materia. La Ley de Conservación de Masa rige

estrictamente al balance de masa; es decir, que la materia no se pierde solo se transforma. Por este motivo, los productos químicos añadidos a cada fase de producción por transferencia de carga contaminante al agua generarán un residuo líquido y/o un residuo sólido o semisólido (dependiendo la fase productiva).

Con el objetivo de mostrar la cantidad de insumo/materia prima consumida y residuo generado respecto a la cantidad de oro procesado, se adoptó una base de cálculo de una tonelada de sólidos procesados (1 t). El consumo de agua total dentro del proceso de obtención de oro se expresó en L/tsólidos, mientras que los productos químicos fueron expresados como kg/tsólidos.

### 3.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

#### 3.3.1 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA

La investigación se basa en la metodología de Hoekstra y Chapagain (2011), cuyo cálculo para la determinación de la Huella Hídrica tiene como componente básico el proceso de producción. Es decir, para obtener la Huella Hídrica del producto final en este caso el oro, es necesario analizar cada etapa que conforma al proceso minero.

El cálculo de la HH se describe en base a la Ecuación 2.2, en la cual se considera como la sumatoria de todas las huellas hídricas del proceso. Para esta investigación la Huella Hídrica Verde no se consideró, dado que este tipo de huella es relevante para productos agrícolas y forestales ya que refleja el volumen de agua lluvia consumida por la vegetación y almacenada en el suelo (Hoekstra et al., 2011). La HH total del producto se determinó a través de la Ecuación 3.2 y el resultado se expresa en volumen de agua por cantidad del oro producido ( $m^3/kg_{oro}$ ), considerando una producción de 988,7  $kg_{oro}/año$ .

$$HH_p = \frac{\sum HH_{proceso}}{P} \quad [ 3.2]$$

Donde:

HH P: Huella Hídrica de un producto

HH<sub>proceso</sub>: Huella total del proceso, m<sup>3</sup>/año

P: Cantidad de producción del producto, kg/año

### 3.3.1.1 Cálculo de la Huella Hídrica Azul

Para el cálculo de la HHA se reconocieron dos tipos de huellas, como se muestra en la Tabla 3.7: HHA directa y HHA indirecta. La primera hace referencia al agua utilizada netamente dentro del proceso de obtención de oro, mientras que la segunda se relaciona con el agua de uso indirecto que se da dentro de la mina, como por ejemplo el agua dulce asociado a actividades domésticas.

**Tabla 3.7**  
*Balance de entradas y salidas de agua*

HHA, L/s	EA	SA
Huella Hídrica Azul Directa	$E_0 + E_2 - ED_1$	$S_{3.1} + S_{3.2} + S_5 + S_6$
Huella Hídrica Azul Indirecta	$ED_1$	$SD_1$
Huella Hídrica Azul	$E_0 + E_2$	$S_{3.1} + S_{3.2} + S_5 + S_6 + SD_1$

Nota: (EA) entrada de agua; (SA) vertimiento de residuos líquidos; ( $E_0$ ) primera entrada de agua dulce; ( $E_2$ ) entrada de agua al tanque de almacenamiento; ( $ED_1$ ) agua usada en el campamento; ( $SD_1$ ) descarga residuos líquidos domésticos; ( $S_{3.1}$ ) descarga proceso de elusión; ( $S_{3.2}$ ) descarga proceso lavado de carbón; ( $S_5$ ) descarga proceso cianuración y cribado, ( $S_6$ ) agua tratada.

ELABORACIÓN: Vilaña J

Para estimar la HHA se propone un balance de entradas y salidas de agua en cada etapa del proceso minero, como se observó en la Figura 3.6. En la Tabla 3.7 se identificó la entrada total de agua al proceso minero y el vertimiento total de la mina. El modelo de cálculo aplicado se describe en la Ecuación 3.3, de tal forma que la diferencia de volumen de agua que existe entre la entrada y salida corresponde al agua evaporada e incorporada en el producto. A su vez, se convierte en un filtro de verificación de datos, dado que la sumatoria de los volúmenes de vertimiento no pueden ser mayor a la sumatoria de los volúmenes de captación.

$$HHA = EA - SA \quad [ 3.3 ]$$

Dónde:



HHa: Huella hídrica azul, l/s

EA: Entrada total de agua, l/s

SA: Vertimiento total de agua, l/s

### **3.3.1.2 Cálculo de la Huella Hídrica Gris**

Para el cálculo de la Huella Hídrica Gris Total, se determinó la HHG de cada etapa del proceso en base a la ecuación 2.7. Tal ecuación, expresa en su numerador la carga contaminante aportada por el proceso minero y el denominador el potencial de asimilación de la fuente hídrica hacia un contaminante en específico (Hoekstra et al., 2011). El parámetro escogido como contaminante referente en las corrientes líquidas para el cálculo de la HHG fue la Demanda Química de Oxígeno DQO (mg/l). Este parámetro se relaciona con la cantidad de contaminantes que son susceptibles a oxidarse (Smith & Mudder, 1996). En este caso, el cianuro es un elemento muy susceptible a oxidación, por lo tanto, los niveles de DQO aumentan en presencia del este (Dávila, 2020). Además, a través de la DQO se puede identificar un nivel de contaminación de las descargas líquida residuales (Skouteris et al., 2018).

### **3.3.2 METODOLOGÍA WATER PINCH**

En este estudio se consideraron cuatro contaminantes clave, incluidos: DQO, ST, Fe y Cu. La metodología se basó en Wang y Smith (1998) para analizar la red de corrientes líquidas, la cual consta de dos objetivos para lograr la minimización del consumo de agua fresca y/o regenerada y la generación de residuos líquidos:

- Minimización de residuos líquidos mediante un enfoque de único contaminante.
- Minimización de residuos líquidos mediante un enfoque de múltiples contaminantes.

#### **3.3.2.1 Curva Compuesta de Concentraciones de Contaminantes**

Para el método de la Curva Compuesta de Concentraciones (CCC) se consideraron todas las etapas que presentan un consumo de agua, las cuales fueron de uso

doméstico (SD<sub>1</sub>), molienda (S<sub>1</sub>), cianuración y cribado (S<sub>2</sub>), elusión (S<sub>3.1</sub>) y lavado de carbón (S<sub>3.2</sub>). En esta metodología es necesario considerar ciertas premisas:

- Caudal de entrada es igual a caudal de salida para cada etapa ( $Q_{in} = Q_{out}$ ) (Prakash & Shenoy, 2005).
- La concentración máxima de salida es igual a la concentración de salida de cada etapa ( $C_{out} = C_{i,out}^{max}$ ) (Molar Vázquez, 2014).
- La concentración máxima de entrada es igual a la concentración de entrada de cada etapa ( $C_{in} = C_{i,in}^{max}$ ) (Molar Vázquez, 2014).
- No se consideran pérdidas o ganancia de agua en los procesos (Prakash & Shenoy, 2005)
- La carga contaminante es constante en cada etapa (Prakash & Shenoy, 2005).

A partir de la ecuación 3.4 se determina a carga contaminante ( $\Delta m_i$ ) (Mohammadnejad et al., 2012; Molar Vázquez, 2014).

$$\Delta m_i = (C_{i,out} - C_{i,in}) \times F_i \quad [ 3.4]$$

Dónde:

$\Delta m_i$ : carga contaminante de la etapa i, g/h

$F_i$ : caudal de agua fresca que ingresa a la etapa i, m<sup>3</sup>/h.

$C_{i,in}$ : concentración de entrada a la etapa i, mg/L.

$C_{i,out}$ : concentración de salida a la etapa i, mg/L.

- Flujo mínimo de agua fresca en una red de corrientes líquidas sin reúso

A partir de la ecuación 3.5 se puede obtener el flujo mínimo de agua fresca, sin embargo, en una red de corrientes líquidas sin reúso se considera que la concentración máxima de entrada en cada etapa es igual a cero ( $C_{in} = 0$ ), por lo tanto la ecuación 3.6 se convierte en (Mohammadnejad et al., 2012; Molar Vázquez, 2014):

$$f_{i,min} = \frac{\Delta m_i}{C_{i,out} - C_{i,in}} \quad [ 3.5]$$

$$f_{i,min} = \frac{\Delta m_i}{C_{i,out}} \quad [ 3.6]$$

Dónde:

$f_{i,min}$ : caudal mínimo de agua fresca para la etapa i, m<sup>3</sup>/h.

- Caudal mínimo de agua fresca en una red de corriente líquidas con reúso.

Después de haber establecido los requerimientos de agua fresca para las corrientes sin reúso, la integración de los procesos se lleva a cabo. Las corrientes de descarga de una operación pueden ser reusadas directamente en otra sin que el nivel de contaminación de la corriente perjudique al nuevo proceso. En la integración, es necesario el uso de la Curva Compuesta de Concentraciones para la determinación de la pendiente del punto *Pinch*, de acuerdo a la ecuación 3.7 (Khezri et al., 2010). En donde el flujo de agua óptimo para las operaciones se obtiene con el inverso de la pendiente del punto *Pinch*, ecuación 3.8 (Molar Vázquez, 2014).

$$pendiente = \frac{C_{pinch}}{\Delta m_{pinch}} \quad [ 3.7]$$

$$f_{min} = \frac{\Delta m_{pinch}}{C_{pinch}} \times 1000 \quad [ 3.8]$$

Dónde:

$f_{min}$ : caudal mínimo de agua fresca necesaria para el proceso, m<sup>3</sup>/h.

$\Delta m_{pinch}$ : masa transferida en el punto *Pinch*, mg/L

$C_{pinch}$ : concentración del contaminante en el punto *Pinch*, mg/L

Se considera que el flujo mínimo de agua fresca para la red de corrientes líquidas es el valor más alto de los flujos, dado por la ecuación 3.9 (Mohammadnejad et al., 2012).

$$f_{min} = \max\{f_{min,A}, f_{min,B}, f_{min,C} \dots\} \quad [ 3.9]$$

### 3.3.2.2 Múltiples contaminantes

En un sistema en donde la transferencia de masa incluye dos o más contaminantes, se resuelve con un enfoque de múltiples contaminantes (Mohammadnejad et al., 2012). En otras palabras, se analiza la transferencia de masa de uno de los contaminantes (limitante) con respecto al otro (Khezri et al., 2010). Las etapas analizadas con un enfoque de múltiples contaminantes fueron el cribado y la cianuración, con respecto a los contaminantes Fe y Cu. Esto se debe a que, durante la etapa de cianuración, el cianuro además del oro también entra en contacto con otros metales presentes en la pulpa. El contacto del cianuro con metales como Fe y Cu, forma complejos fuertes de cianuro (metal-cianuro), los cuales son de lenta degradación lo que generan mayor demanda de cianuro en el proceso (Dávila, 2020)

Identificados los contaminantes claves, se dibuja el perfil de agua límite en función de las concentraciones de entrada y salida de uno de los contaminantes (contaminante límite), posterior se determina la concentración del otro contaminante en función del primero a través de la siguiente ecuación 3.10 (Mohammadnejad et al., 2012):

$$\frac{C_{i,R,n} - C_{i,R,in}}{C_{i,R,out} - C_{i,R,in}} = \frac{C_{i,j,n} - C_{i,j,in}}{C_{i,j,out} - C_{i,j,in}} \quad [ 3.10]$$

Donde:

$C_{i,R,n}$  : concentración del contaminante de referencia en la operación I en el intervalo n, ppm.

$C_{i,R,in}$  : concentración de entrada del contaminante de referencia en la operación I, ppm.

$C_{i,r,out}$  : concentración de salida del contaminante de referencia en la operación I, ppm.

$C_{i,j,n}$  : : concentración del contaminante j en la operación I en el intervalo n, ppm.

$C_{i,j,in}$  : concentración de entrada del contaminante j en la operación I, ppm.

$C_{i,j,out}$  : concentración de salida del contaminante j en la operación I, ppm.

El caudal real para las operaciones se determina a partir de la ecuación 3.11 y 3.12:

$$f_{in} = f_i \times \theta_{i,n} \quad [ 3.11]$$

$$f_{in} = T_{i,n} + q_{lim} + F_{in} = f_i \times \theta_{i,n} \quad [ 3.12]$$

Donde:

$f_{in}$ : caudal requerido, m<sup>3</sup>/h.

$f_i$ : caudal entrada, m<sup>3</sup>/h.

$F_{i,n}$ : agua dulce requerida en cada operación, m<sup>3</sup>/h.

$T_{i,n}$ : caudal de agua disponible para la reutilización, m<sup>3</sup>/h.

$q_{lim}$ : caudal de agua de la operación  $i$  que es suministrada o reutilizada por la operación  $i$ , m<sup>3</sup>/h.

$\theta_{i,n}$  se determina por la ecuación 3.13 y las concentraciones de salida por las ecuaciones 3.14 y 3.15:

$$\theta_{i,n} = \max \left[ \frac{C_{i,j,n+1} - C_{i,j,in}}{C_{i,j,n+1} - W_{i,j,n}} \right] \quad [ 3.13]$$

$$W_{i,j,n} = \frac{T_{i,n} \times W_{i,j,n} + \sum q_{lim} \times W_{lim}}{T_{i,n} + \sum q_{lim} + F_{in}} \quad [ 3.14]$$

$$W_{i,j,n+1} = W_{i,j,n} + \frac{f_i \times (C_{i,j,n+1} - C_{i,j,in})}{T_{i,n+1}} \quad [ 3.15]$$

Donde:

$W_{i,j,n}$ : Concentración promedio del contaminante, ppm.

$W_{i,j,n+1}$ : Concentración de salida de cualquier operación como concentración de entrada de la siguiente operación, ppm.

### 3.3.2.3 Configuración de la red de corrientes líquidas

El diseño de la nueva configuración de agua se basó en el modelo de cuadrilla establecido por Kun y Smith (1998). El modelo permite diseñar una red de corrientes

líquidas que cumple con el objetivo de consumo mínimo de agua fresca y/o regenerada y visibiliza las corrientes residuales más favorables para reusarse (Kuo & Smith, 1998). El modelamiento de la red se establece en función de los caudales mínimos limitantes, que para el campamento minero Bonanza, corresponden a los flujos de agua fresca ( $C_{in} = C_o = 0$ ) y los flujos de residuos líquidos para la planta de beneficio Rumicuri ( $C_{in} = C_o \neq 0$ ). Es decir, se estableció dos tipos de configuración de red de corrientes líquidas, la primera para un sistema que se enfoca en el reúso/reciclaje máximo de agua sin regeneración y el segundo sistema que ofrece reúso/reciclaje con regeneración de efluentes (Alva et al., 2007).

La configuración de la red de corrientes considera un nuevo caudal objetivo, el cual es el valor de flujo mínimo de agua establecido con la metodología *Pinch* (Ecuación 3.7). Para la determinación de los flujos de agua requeridos para cada proceso, es necesario mantener fija la carga contaminante transferida. De tal forma, que al mezclarse las corrientes de agua fresca y/o regenerada con las corrientes residuales reusadas, se satisfaga la carga contaminante y no se altere el balance de masa.

### **3.4 ESCENARIOS PARA EL DISEÑO DE LA POSIBLE NUEVA RED DE CORRIENTE LÍQUIDAS**

#### **3.4.1 ESCENARIOS PLANTEADOS**

##### **3.4.1.1 Escenario I – Flujo mínimo de agua para un solo contaminante**

El primer escenario corresponde a la red de corrientes líquidas diseñada en función del flujo mínimo de agua fresca consumida para un solo contaminante dando un enfoque de regeneración-reúso. El flujo mínimo se determinó anteriormente con la metodología *Pinch* y en este escenario se consideró el posible reúso máximo de las corrientes residuales líquidas seleccionadas (molienda, elusión, lavado de carbón, cianuración y cribado). A diferencia de la corriente restante (uso doméstico) se consideró el flujo actual de agua. A partir de este nuevo posible escenario se logró establecer las diferencias porcentuales respecto al escenario actual de la planta.

### **3.4.1.2 Escenario II – Flujo mínimo**

De la misma manera que el escenario I, la red de corrientes líquidas fue diseñada en función del flujo mínimo de agua fresca consumida para un solo contaminante, pero con un enfoque de regeneración-reciclaje y reúso. El flujo mínimo se determinó anteriormente con la metodología *Pinch* y en este escenario se consideró el reciclaje máximo de las corrientes regeneradas (cianuración y cribado) y el reúso máximo de las corrientes (elusión y lavado de carbón).

### **3.4.1.3 Escenario III – Flujo mínimo**

El tercer escenario tiene una configuración en la red de corrientes líquidas diseñada en función del flujo mínimo de agua fresca consumida por dos contaminantes con un enfoque de regeneración-reúso. Al igual que los otros escenarios, el flujo mínimo se determinó con la metodología *Pinch* y en este escenario se consideró el reciclaje máximo de las corrientes regeneradas (cianuración y cribado) y el reúso máximo de las corrientes (elusión y lavado de carbón). Al igual que los otros escenarios este presentó reducción en el consumo de agua fresca y/o regenerada y por ende en la generación de residuos líquidos.

## **3.4.2 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS PLANTEADOS**

El objetivo de la comparación es visualizar porcentualmente el mejor escenario, por lo tanto, fue necesario establecer criterios para su comparación. La optimización del flujo de agua fresca y/o regenerada requerida, determinado como la diferencia entre el consumo de agua actual con el consumo de agua con reúso, reciclaje y regeneración. Optimización de la generación de residuos líquidos, establecido por la diferencia del flujo actual de descargas líquidas con respecto a las descargas del sistema incluido el reúso, regeneración y reciclaje. El reciclaje del agua, determinado como el caudal de residuos líquidos que vuelve a ser parte del proceso productivo después de ser regenerado en la PT-RLles. Y reúso del agua, definido por el flujo de agua que se reusa en todo el sistema.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

##### 4.1.1 BALANCE DE MASA POR ETAPAS

En las siguientes figuras, se expone el flujo de materia de cada etapa en el proceso de obtención del oro. La materia prima, los productos químicos y el agua se consideraron como entradas; en cambio, los residuos líquidos se consideraron como salidas.

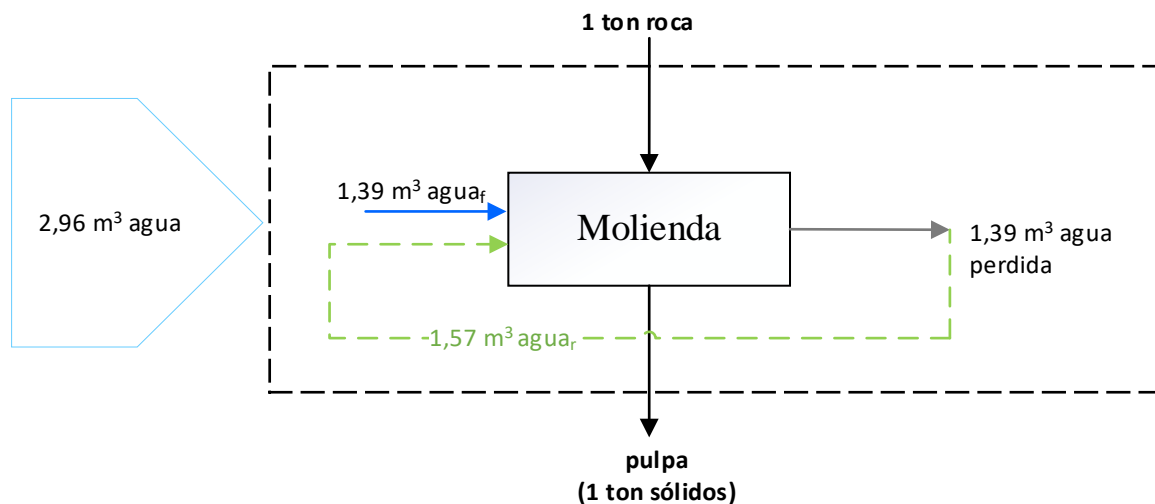
##### 4.1.1.1 Molienda

En la etapa de molienda (Figura 4.1) el volumen de agua consumido fue de 2,96 m<sup>3</sup>/tsólidos. Los molinos trabajan a una capacidad de 1tsólidos/h, el flujo de agua es constante durante todo el proceso de molienda, por lo que en un día se consume alrededor de 454,67 m<sup>3</sup> de agua, valor por debajo del rango descrito ya en literatura de minería del oro (500 m<sup>3</sup>) (Rodríguez, 2019). El consumo de agua en esta etapa es uno de los más representativos con respecto a todo el proceso de obtención del oro debido a que la molienda produce mejores rendimientos en un medio húmedo. Los molinos se alimentan de agua a un flujo constante, para trabajar con una concentración de sólidos del 60%, que en literatura la cantidad apropiada de sólidos en las pulpas hace del proceso de cianuración más eficiente (Velín, 2014).

Durante el proceso de molienda; la pulpa cargada de arena y lodos es depositada en piscinas de almacenamiento, en donde, el agua es clarificada por decantación natural y el residuo líquido sobrenadante vuelve a ser reintegrado al proceso de molienda. El valor de recirculación en esta etapa es del 100% (1,57 m<sup>3</sup>/tsólidos), generando cero residuos líquidos. Sin embargo, a pesar de existir una línea de reciclaje de agua, el flujo de salida no abastece a la cantidad de agua necesaria en el proceso como flujo de entrada, por lo tanto, es necesario el ingreso de una línea de agua fresca (1,39 m<sup>3</sup>/tsólidos). El déficit de agua representa las pérdidas causadas por evaporación o fuga en el proceso de decantación. En conclusión, el flujo de agua fresca necesaria para el



proceso de la molienda, va a ser igual a la cantidad de agua pérdida en el proceso ( $1,4 \text{ m}^3$ ). Estudios reportados en literatura muestran que, del agua descargada a piscinas de almacenamiento que hacen la función de una relavera, solo entre 20 al 58% puede ser recuperada por decantación y se puede llegar a perder hasta un 52% por evaporación dependiendo de las condiciones climáticas (Pacheco & Durán, 2007).



**Figura 4.1** Flujo de materia en el proceso de molienda

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.1.1.2 Beneficio

La Figura 4.2 describe la fase de beneficio conformado por las etapas de cianuración y cribado. Esta fase requirió una tasa de consumo de agua de  $2,5 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ . Además, esta fase no implica acumulación ni pérdida de materia, por lo que el agua que ingresa a las etapas de cianuración y cribado se transforma en un residuo líquido industrial y es descargado a la misma tasa. El consumo de agua para el proceso de lixiviación/cianuración requiere un ingreso de agua de  $1,64 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ , sin embargo, es únicamente el 17% ( $0,28 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ ) el agua fresca, que ingresa al proceso y el resto es agua recirculada ( $2,23 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ ). Si bien en la etapa de cribado, el consumo de agua es menor ( $0,87 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ ), la diferencia respecto al proceso anterior, radica en que aquí se utiliza a un 100% agua recirculada, siendo un ingreso nulo de agua fresca.

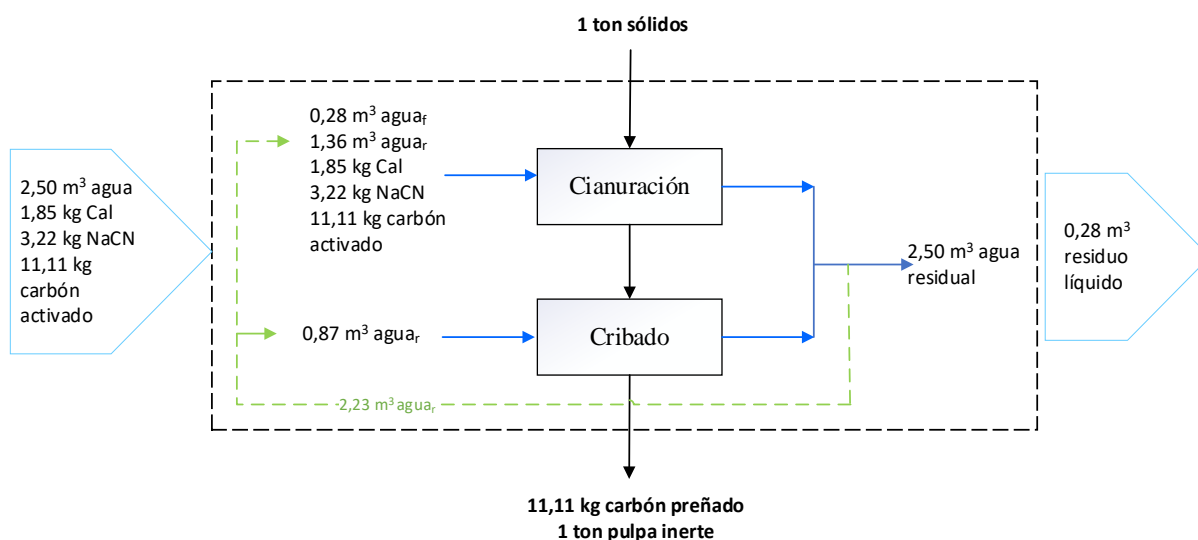
El consumo neto de agua fresca es esta fase ( $0,28 \text{ m}^3$ ), está sobre el rango de uso de agua para pequeña minería a nivel sudamericano ( $0,11 \text{ m}^3$ ). Esta condición, es debido a que en los últimos años, el aumento de consumo de agua en plantas de menor tamaño ha aumentado por el aumento de procesamiento de mineral (Montes & Cantalloppts, 2019). Además, esta fase se caracteriza por presentar un porcentaje alto de recirculación de agua (89%), valor por encima a los señalados en estudios previos en lo referente a recirculación de aguas en procesos hidrometalúrgicos: cianuración (56%) y a su vez cribado (35%) (Rodríguez et al., 2015).

Respecto a los aditivos adicionados en esta fase, el valor del cianuro de sodio ( $\text{NaCN}$ ) fue  $3,22 \text{ kg/t}$  que se disuelven en  $1,64 \text{ m}^3$  de agua obteniendo un valor promedio de en la concentración de  $\text{NaCN}$  de hasta  $2000 \text{ ppm}$  ( $1,9 \text{ g/l}$ ). Para los procesos de lixiviación se han establecidos bibliográficamente valores típicos de concentraciones de cianuro sódico que van desde los  $100 \text{ ppm}$  hasta las  $500 \text{ ppm}$  (Arias Lafargue et al., 2017; Smith y Mudder, 1996). En ciertos casos cuando la mena contiene compuestos que consumen cianuro este puede elevarse hasta  $1000 \text{ ppm}$ , sin embargo, el valor reportado en este estudio es mayor, es decir, la planta está trabajando con un exceso de cianuro con el fin de garantizar la máxima recuperación del oro. A partir de este proceso se consigue una recuperación de oro de hasta el 95% en menas concentradas (Ros, 2017).

El exceso de cianuro mencionado está influenciado por compuestos cianicidas (zinc, cobre, hierro, arsénico y antimonio) presentes en la mena, los cuales consumen cianuro e inhiben la disolución del oro, dichos compuestos son comunes en la zona de estudio Camilo Ponce Enríquez (Peña & Menéndez, 2016). Además, durante el proceso de lixiviación/cianuración la presencia de minerales que contienen sulfuros como (piritas, pirrotinas o calcopiritas) en conjunto con cianuro forman tiocianatos (Fernández, 2007), los cuales influyen negativamente al momento de detoxificar los residuos líquidos resultantes del proceso (Fernández, 2007).

Finalizado el proceso de lixiviación, el carbón ya preñado de oro ( $11,11 \text{ kg}$ ) es separado del efluente mediante una criba; proceso en el cual es necesario el uso de

agua. La pulpa inerte residual, es transportada a las relaveras (1 tonelada de material inerte) junto con el volumen de residuos líquidos del proceso ( $2,5 \text{ m}^3$ ), mientras que el carbón preñado es llevado al proceso de desorción (Aranda, 2011).



Nota. (Línea verde) Indica recirculación del residuo líquido del proceso de cianuración y cribado hacia las mismas fases.

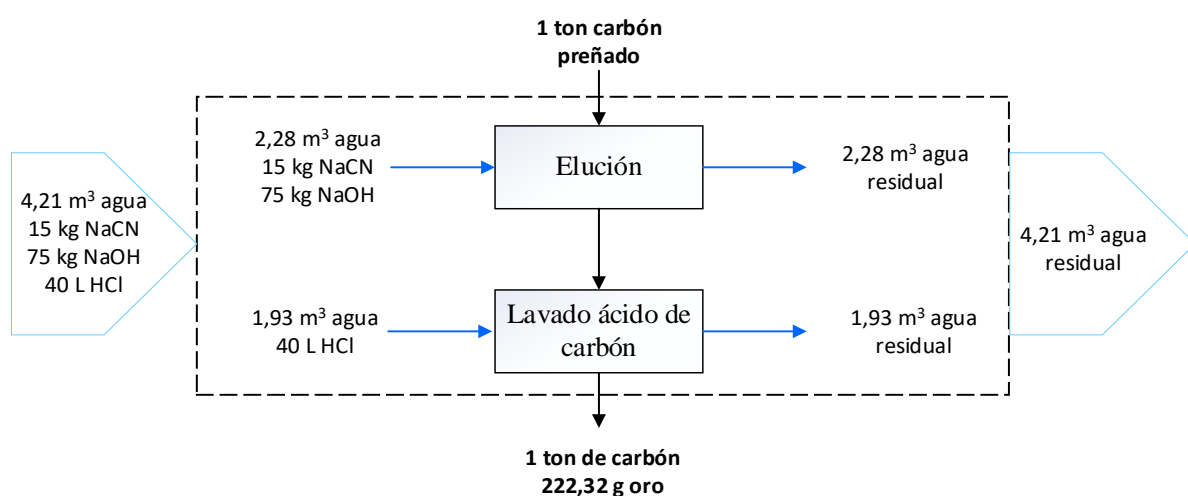
**Figura 4.2** Flujo de materia en los procesos de cianuración y cribado

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.1.1.3 Recuperación del oro

La fase de recuperación del oro (Figura 4.3) se desarrolla en dos etapas: elusión y lavado de carbón. El consumo de agua fresca, está vinculado a la cantidad de carbón preñado (adsorción del oro) incorporado a la fase ( $t_{\text{carbón}}$ ). Esta fase presentó un consumo de agua de  $4,21 \text{ m}^3/t_{\text{carbón}}$ . En efecto, en la bibliografía se reporta como un 4% del total de agua fresca en el proceso de obtención de oro (Montes & Cantallopts, 2019). Adicional, la desorción del carbón y el oro, se desarrolla en una solución con concentración de NaCN (0,1 a 0,2%) y NaOH (1%), a valores dentro del rango para los evidenciados en este estudio que fueron NaOH ( $75 \text{ kg}/t_{\text{carbón}}$ ) y NaCN ( $15 \text{ kg}/t_{\text{carbón}}$ ). Logrando así una eficiencia de recuperación del oro de hasta el 90% (Pineda, 2015). Es decir, durante esta etapa, se recupera la mayor cantidad de oro dejando como residuo una solución impregnada en oro y un carbón con la menor cantidad de metal.

Después de la elución, la solución cargada en oro es lavada ácidamente. Durante el lavado de carbón se necesita  $1,93 \text{ m}^3$  de agua para finalizar el proceso y una solución de HCl al 3% (40L), lo que removería las impurezas como sales, limos y otros metales sin interés económico (Aranda, 2011). Adicional, el lavado ácido al carbón complementa el reacondicionamiento del mismo ya que la presencia de calcio bloquea la eficiencia de adsorción del carbón activado generando recuperación bajas de oro (Ros, 2017). La cantidad de residuos líquidos proveniente de ambas etapas generan un volumen de  $4,21 \text{ m}^3$  de agua, que al ser una fase que no acumula materia, todo el volumen que ingresa se convierte en un residuo líquido industrial.



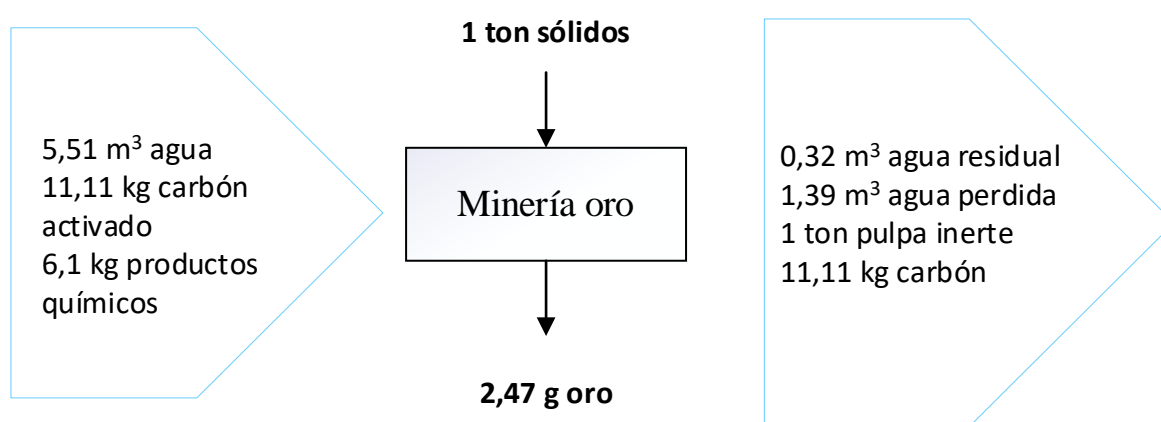
**Figura 4.3** Flujo de materia en los procesos de elución y lavado de carbón

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.1.2 BALANCE DE MASA GLOBAL

La Figura 4.4 muestra el balance de masa global del proceso de obtención del oro. La entrada de agua fresca y/o regenerada  $5,51 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ , la cual genera una salida de residuos líquidos de  $0,32 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ . Parte de la pérdida de agua en todo el proceso se relaciona principalmente a la evaporación o fuga ( $1,4 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ ). De acuerdo con literatura, la cantidad de agua utilizada en minería de oro, puede oscilar entre 10 a  $30 \text{ m}^3$  de agua por tonelada de roca extraída (Kuhn, 2011).

Para el proceso de obtención del oro fueron necesarios alrededor de 6,1 kg de productos químicos, valor mayormente vinculado al agente lixivante NaCN como parte de la etapa de lixiviación. Además, dentro del proceso de lixiviación también se genera el mayor aporte de materia prima: el carbón activado 11,11 kg/tsólidos. Finalmente, las descargas sólidas se mantuvieron en 1 tonelada de sólidos inertes y los 11,11 kg carbón activado, los cuales serán reacondicionados para volver al proceso de adsorción.



**Figura 4.4** Flujo de materia proceso minero del oro

ELABORACIÓN: Vilaña J

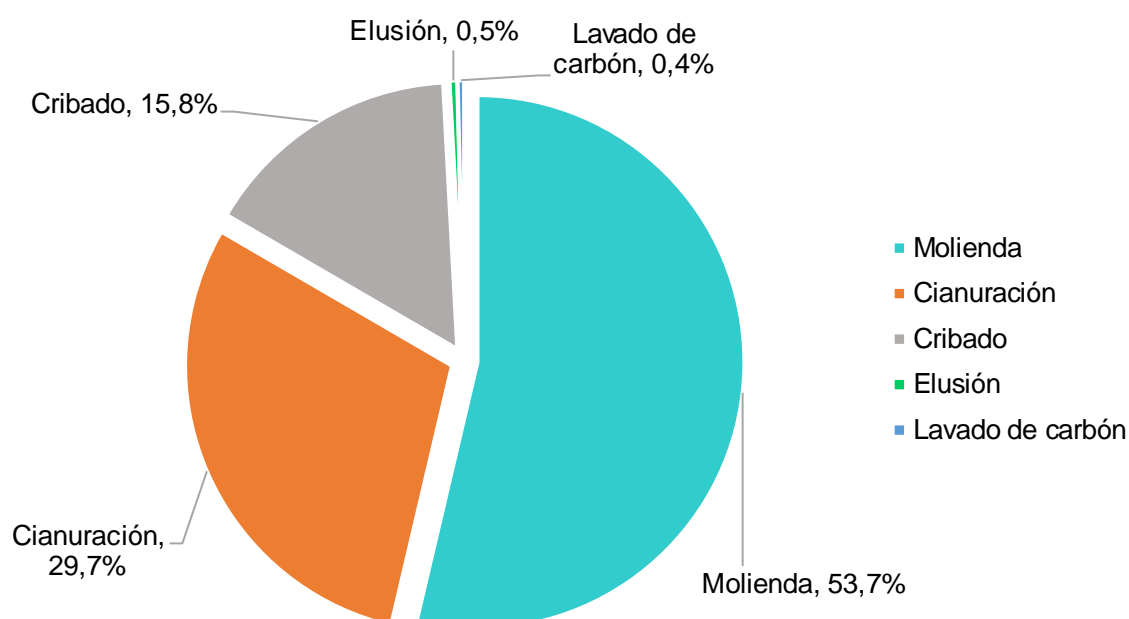
#### 4.1.2.1 Consumo de agua

La Tabla 4.1 y la Figura 4.5, presentan la distribución del consumo de agua en cada etapa del proceso de obtención de oro. La minería del oro, se caracteriza por la abundante cantidad de agua usada en su proceso, llegando a un consumo de 5,41 m<sup>3</sup>/tsólidos, donde la etapa de molienda tiene el mayor consumo de agua con un 54%% (2,96 m<sup>3</sup>/tsólidos). Por consiguiente, las etapas de recuperación del oro como elusión y lavado ácido de carbón, son las que reflejan menor incidencia en consumo de agua con un 1%.

**Tabla 4.1***Consumo de agua por etapa en m<sup>3</sup>/tsólidos*

Etapa	Consumo de agua (m <sup>3</sup> /tsólidos)	% Consumo de agua
Molienda	2,96	53,7
Cianuración	1,64	29,7
Cribado	0,87	15,8
Elusión	0,025	0,5
Lavado de carbón	0,021	0,4
Total	5,51	100

ELABORACIÓN: Vilaña J.

**Figura 4.5** Consumo de agua por etapa en %

ELABORACIÓN: Vilaña J.

**4.1.2.2 Consumo de agua fresca y agua reciclada**

La Tabla 4.2 y Figura 4.6, muestran la distribución del consumo de agua fresca y reciclada en cada etapa del proceso de obtención de oro. El consumo de agua fresca usada en el proceso minero corresponde al 31% (1,71 m<sup>3</sup>/tsólidos), mientras que el consumo de agua reciclada al 69% (3,79 m<sup>3</sup>/tsólidos). El costo asociado al mayor consumo de agua fresca, se da principalmente en la etapa de molienda que corresponde al 25% (1,39 m<sup>3</sup>/tsólidos); seguida por la etapa de cianuración con un 5%,

mientras que el consumo en las demás etapas llega a ser despreciable alcanzando un 1%, e incluso nulo como en la etapa del cribado.

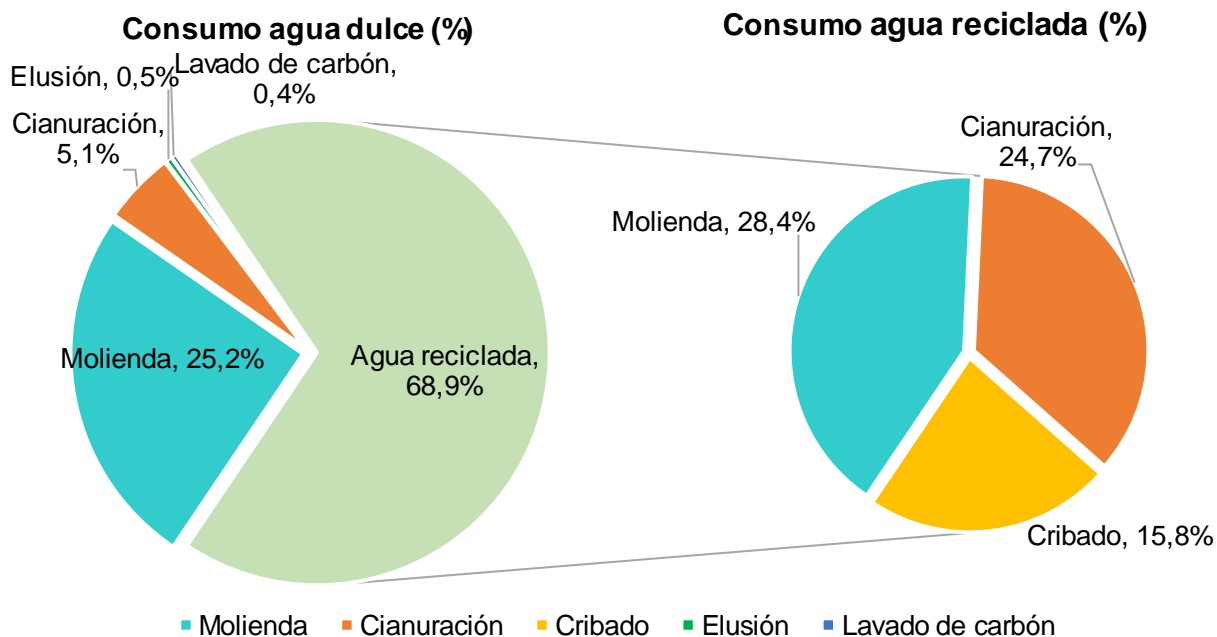
En todo el proceso minero el uso de agua reciclada corresponde al valor más representativo (69%) del sistema de agua. De la misma manera es en la molienda donde se da el mayor reciclaje de agua con un 28% (1,57 m<sup>3</sup>/tsólidos), seguido de las etapas de cianuración y cribado con un 40%. En contraste a las etapas de desorción (elusión y lavado de carbón), donde la tasa de reciclado es nula.

**Tabla 4.2**

*Consumo de agua fresca y reciclada por etapa en m<sup>3</sup>/tsólidos*

Etapa	Consumo de agua fresca (m <sup>3</sup> /tsólidos)	% Consumo de agua	Consumo de agua reciclada (m <sup>3</sup> /tsólidos)	% Consumo de agua
Molienda	1,39	25,2	1,57	28,4
Cianuración	0,28	5,1	1,36	24,7
Cribado	0,00	0,0	0,87	15,8
Elusión	0,03	0,5	0,00	0
Lavado de carbón	0,02	0,4	0,00	0
Total	1,71	31	3,79	69

ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 4.6** Consumo de agua fresca y recirculada por etapa en %

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.1.2.3 Consumo de productos químicos

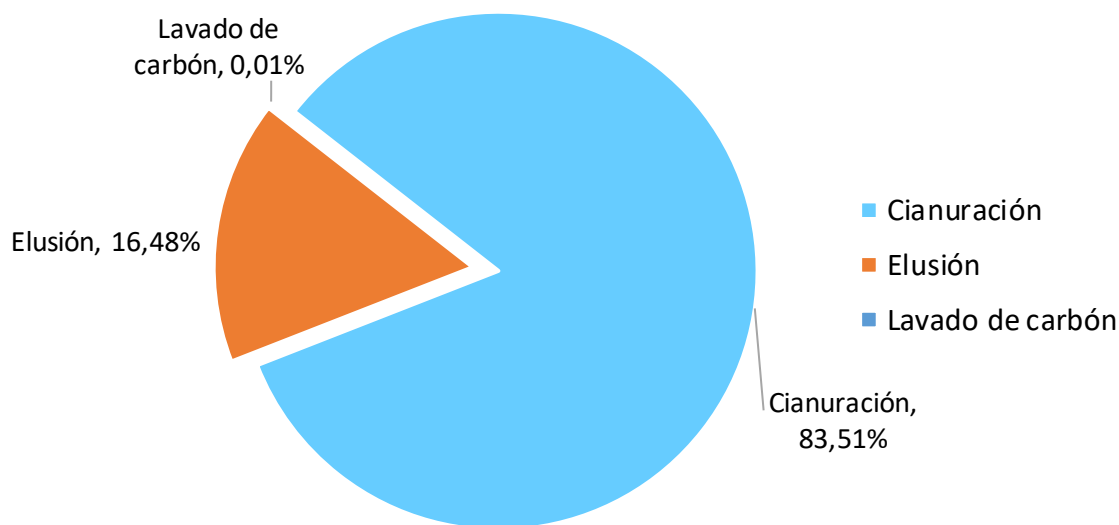
En la Tabla 4.3 y Figura 4.7, exponen el consumo medio de productos químicos por etapa en la minería del oro. Es así como en la etapa de lixiviación/cianuración es donde se da el mayor consumo de productos químicos 83,5% (5,07 kg/tsólidos). A diferencia de las etapas en donde el consumo de químicos es menor: el lavado ácido de carbón tiene un 0,01% (0,001 kg/tsólidos) e incluso nulo como en la molienda y el cribado.

**Tabla 4.3**

*Consumo de productos químicos por etapa en kg/tsólidos*

Etapa	Consumo de productos químicos (kg/tsólidos)	% Consumo de productos químicos
Molienda	0	0,0
Cianuración	5,07	83,5
Cribado	0	0,0
Elusión	1,0	16,5
Lavado de carbón	0,001	0,0
<b>Total</b>	<b>6,1</b>	<b>100</b>

ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 4.7** Consumo de productos químicos por etapa en %

ELABORACIÓN: Vilaña J.



#### 4.1.2.4 Generación de residuos líquidos

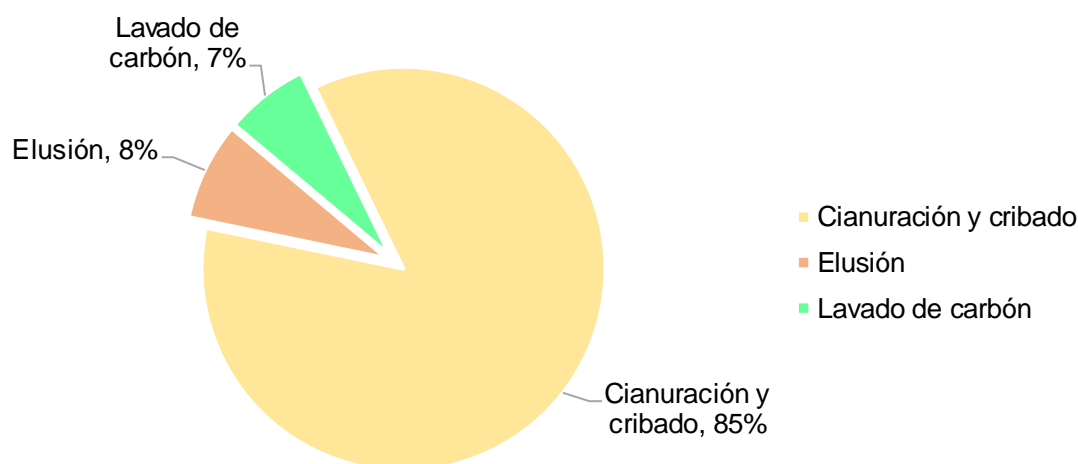
La Tabla 4.4 y Figura 4.8, señalan la cantidad de residuos líquidos generados a lo largo del proceso de obtención del oro, después del reciclaje de corrientes líquidas. En este caso, se evidencia que la etapa de lixiviación, es la etapa que más residuos líquidos genera con un 85% (0,28 m<sup>3</sup>/t<sub>sólidos</sub>). Mientras que, las etapas subsiguientes como la elución y lavado de carbón generan un valor menos representativo y correspondiente al 15%. En contraste con la etapa de molienda, que, si bien su consumo de agua es la más representativa del todo el proceso de obtención del oro, en este proceso se da un reciclaje total de la corriente de descarga líquida. Por ende, no existe una generación de residuo líquido final.

**Tabla 4.4**

*Generación de residuos líquidos por etapa en m<sup>3</sup>/t<sub>sólidos</sub>*

Etapa	Generación de residuos líquidos, (m <sup>3</sup> /t <sub>sólidos</sub> )	% Generación de residuos líquidos
Molienda	0	0
Cianuración y cribado	0,28	85,5
Elusión	0,03	7,9
Lavado de carbón	0,02	6,7
Total	0,32	100

ELABORACIÓN: Vilaña J.

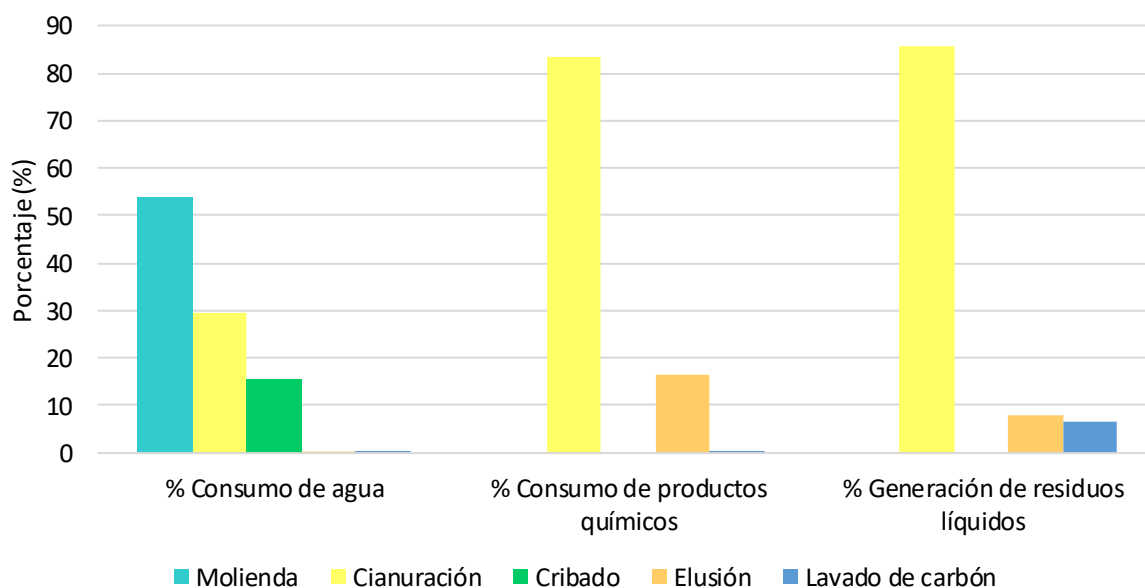


**Figura 4.8** Generación de residuos líquidos por etapa, %.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### 4.1.3 DETERMINACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DEL PROCESO MINERO

En la Figura 4.9, se expone la distribución porcentual de consumo de agua fresca, consumo de productos químicos y generación de residuos líquidos después de la recirculación en el proceso de procesamiento y obtención del oro. Con respecto al consumo de agua fresca, el mayor valor corresponde a la molienda (54%), sin embargo, al reciclarse la mayor cantidad de agua, no existe un residuo líquido (0%), por ende, no es un punto crítico. Se evidencia que, la fase de cianuración sería la fuente principal de generación de residuos líquidos (85%), con un consumo de agua fresca considerable (30%) y un uso de productos químicos alto (84%). Las etapas de refinamiento (elusión y lavado de carbón) poseen un consumo de agua fresca, uso de productos químicos y una generación de residuos líquidos notables. Por lo tanto, las alternativas de reciclaje de corrientes líquidas también son necesarias en estas etapas.



**Figura 4.9** Distribución del consumo de agua fresca, productos químicos y generación de residuos líquidos.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### **4.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES LÍQUIDAS**

##### **4.1.4.1 Caracterización fisicoquímica de las corrientes líquidas**

En la Tabla 4.5, se exponen los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica de las distintas corrientes líquidas que conforman el sistema de evaluación. En los muestreos, se logró identificar que el origen del agua dulce que ingresa al campamento minero Bonanza, proviene de una fuente subterránea. Mientras que, en la planta de beneficio Rumicuri el origen es una fuente natural río arriba. El uso de estas fuentes, se distribuye tanto para el proceso productivo como para el uso doméstico dentro de cada campamento.

En los muestreos se evidenció que, el agua que ingresa a los campamentos para uso doméstico, no presenta sustancias que podrían afectar su calidad. Los parámetros analizados en las corrientes líquidas de agua fresca están dentro de los límites permisibles de agua para uso doméstico Tabla 1 del Anexo 1 – TULSMA (MAE, 2015). Los valores reportados de DQO son bajos e iguales a 0 mg/L, la conductividad varía entre 242  $\mu\text{s/cm}$  y 470  $\mu\text{s/cm}$ , los sulfatos oscilan entre 72,5 mg/L hasta 99 mg/L y los valores de sólidos totales están entre 154 mg/L hasta 391 mg/L. Los sulfatos en el agua pueden tener su origen con el contacto con suelos ricos en minerales sulfatados y como es el caso; la zona Ponce Enríquez se caracteriza por concentraciones altas de estos (Peña & Menéndez, 2016).

La corriente de agua fresca ( $ED_1$ ) tras ser usada en el proceso doméstico, se vuelve un residuo líquido ( $SD_1$ ) con una carga contaminante relacionada principalmente a materia orgánica. Esta corriente residual refleja al DQO como el parámetro más importante, con un valor de 554,33 mg/L (agua gris), valor dentro de los rangos comúnmente reportados en caracterización de aguas grises (100 – 700 mg/L) (Torres & Ures, 2012). En cuanto a sólidos totales, la corriente de descarga contiene una cantidad relativamente baja de sólidos de 453 mg/L (agua gris). Además, presentó valores neutros de pH que varían entre 6,89 y 6,79 y valores de temperatura ambiente superiores de los 20°C. Otro aspecto importante es la presencia de sulfatos en la corriente de descarga (67 mg/L). Los valores reportados muestran concentraciones

relativamente altas del ion sulfato tanto para el agua fresca como para el agua gris. Esto puede deberse a la presencia de dióxido de azufre en la atmósfera o por el contacto de las corrientes líquidas con suelos ricos en minerales sulfatados (Severiche & González, 2012).

**Tabla 4.5**

*Caracterización fisicoquímica de corrientes líquidas de uso doméstico*

Tipo	ID	Q (L/s)	pH in situ	Temperatura °C	CE (µs/cm)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Sulfatos (mg/L)	ST (mg/L)
Agua dulce Bonanza	ED <sub>1</sub>	0,33	7,01 (7,18 - 6,84)	20,80 (21,7 - 19,9)	242,00 (246 - 238)	0,00 -	72,50 (76 - 69)	104,00 (106 - 102)
Agua dulce Rumicuri	ED <sub>1</sub>	-	7,29 (7,33 - 7,24)	25,60 (25,8 - 25,4)	470,00 (470 - 470)	13,50 (15 - 12)	99,00 (110 - 88)	391,00 (396 - 386)
Agua gris	SD <sub>1</sub>	0,33	6,84 (6,89 - 6,79)	20,85 (22,1 - 19,6)	479,50 (491 - 468)	554,33 (557 - 550)	77,00 (78 - 76)	453,00 (626 - 280)

Nota. (CE) Conductividad eléctrica; (Q) Caudal; (ST) Sólidos totales

ELABORACIÓN: Vilaña J.

En la Tabla 4.6, se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica de las diferentes corrientes líquidas que conforman el sistema evaluado. Se evidenció en la Tabla 4.5, que las corrientes de agua fresca (ED<sub>1</sub>) que ingresan a las etapas de producción, no evidencian presencia de contaminantes que puedan afectar algún proceso subsiguiente (Dávila, 2020).

Dentro de las etapas de procesamiento y obtención del oro (molienda, lixiviación y elusión), los valores que se muestran en las diferentes corrientes líquidas (S<sub>1</sub>, S<sub>2.1</sub>, S<sub>2.1</sub>, S<sub>3.1</sub>, S<sub>3.2</sub>) reflejan que los grupos de contaminantes más importantes son DQO, CN<sup>-</sup> y CNt. Los valores de CNt oscilan entre los 47 mg/L (lavado de carbón) hasta 621 mg/L (cianuración), mientras que los valores de CN<sup>-</sup> van desde los 4 mg/L (lavado de carbón) hasta los 415,25 mg/L (cianuración). Los componentes orgánicos, expresados en valor de DQO alcanzaron niveles altos desde 165,33 mg/L (lavado de carbón) a 1209 mg/L (elusión) y 3975 mg/L (cianuración). El aumento de los niveles de DQO en las distintas etapas se relaciona a que el cianuro presente es muy susceptible a ser oxidado.

La concentración de sulfatos en las corrientes líquidas de producción (S<sub>1</sub>, S<sub>2.1</sub>, S<sub>2.2</sub>, S<sub>3.1</sub>, S<sub>3.2</sub>) varía desde 18,5 mg/L (molinos) hasta 1475 mg/L (cianuración). El aumento en la concentración de sulfatos se ve ampliamente relacionado con la presencia de minerales sulfurados en la zona de estudio. Además, los mismos minerales (arsenopirita, pirita, calcopirita, etc.) aportan un aumento en la concentración de metales en las corrientes líquidas, fluctuando con valores de Fe desde 0,66 mg/L (molienda) hasta 172,5 mg/L (cianuración), mientras que los valores de Cu oscilan desde 0.23 mg/L a 71,5 mg/L. La presencia de estos minerales es muy importante, ya que actúan como cianicidas dentro del proceso (Smith & Mudder, 1996). Con respecto a la concentración de sólidos (ST) en las corrientes del sistema de producción se reportaron valores altos que oscilan desde 18225 mg/L (elusión), 1183 mg/L (lavado de carbón) hasta valores bajos como 219 mg/L (molienda). Las corrientes líquidas en las cuales abundan las sustancias inorgánicas presentaron valores que oscilan entre 267  $\mu\text{s/cm}$  (molienda) a 11600  $\mu\text{s/cm}$  (cianuración) en conductividad, estos valores también están vinculados a la presencia de iones en solución de CN<sup>-</sup> y de otros electrolitos en menor proporción como son los nitritos y sulfatos (Dávila, 2020). Además, se encontró que el pH presentó valores alcalinos de 10,1 (cianuración), 12,9 (elusión) y 9,23 (lavado de carbón). Esta condición alcalina en el pH se relaciona principalmente con la adición de cal a una de las etapas del proceso de producción.

**Tabla 4.6***Caracterización fisicoquímica de las corrientes líquidas del proceso de obtención de oro*

Proceso	Fase	ID	Q (L/s)	pH in situ	Temperatura °C	Conductividad (µs/cm)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Sulfatos (mg/L)
1. Molienda	Molinos	S <sub>1</sub>	4,11	7,68	20,8	267	12,67	18,5
				(7,74 - 7,61)	(21,6 - 20)	(269 - 265)	(12 - 13)	(19 - 18)
2. Lixiviación/Adsorción	Cianuración	S <sub>2.1</sub>	2,63	10,1	28,3	11600	3975	675
				(10 - 10,2)	(28,7 - 27,9)	-	(3975 - 3975)	(675 - 675)
	Cribado	S <sub>2.2</sub>	2,69	9,52	28,3	3960	838,5	1475
				(9,53 - 9,50)	(28,7 - 27,9)	-	(840 - 827)	(1500 - 1450)
3. Elución	Elusión	S <sub>3.1</sub>	3,12	12,905	33,4	2895	1209	84
				(12,92 - 12,89)	(34,8 - 32)	(2910 - 2880)	(1217 - 1204)	(86 - 82)
	Lavado de carbón	S <sub>3.2</sub>	3,09	9,23	23,8	1931	165,33	99
				(9,16 - 9,3)	(23,9 - 23,7)	(2072 - 1790)	(166 - 164)	(100 - 98)
	Relavera	S <sub>4.1</sub>	-	9,21	26,05	3380	875	600
				(9,38 - 9,04)	(25,7 - 26,4)	-	(875 - 875)	(600 - 600)
	Piscina de homogenización	S <sub>4.2</sub>	2,40	9,53	28,5	3140	835,5	600
				(9,54 - 9,51)	(28,7 - 28,3)	-	(837 - 834)	(850 - 350)
	Torres de filtración	S <sub>4.3</sub>	0,84	8,96	27,7	3220	723	900
				(9,1 - 8,82)	(27,9 - 27,5)	-	(725 - 721)	(950 - 850)
4. Tratamiento	Tratamiento químico	S <sub>4.4</sub>	0,84	8,43	26,45	2940	649	850
				(8,47 - 8,39)	(26,8 - 26,1)	-	(650 - 648)	(1000 - 700)
	Filtración/adsorción	S <sub>4.5</sub>	0,84	7,93	27	2950	625,5	825
				(8,14 - 7,71)	(27,1 - 26,1)	-	(626 - 625)	(1100 - 550)
	Piscina de sedimentación	S <sub>4.6</sub>	0,84	7,67	26,85	2960	629,5	675
				(7,74 - 7,6)	(27,3 - 26,4)	-	(636 - 623)	(700 - 650)
	Piscina de almacenamiento final	S <sub>4.7</sub>	0,84	7,67	27,4	2670	624	725
				(7,72 - 7,62)	(27,5 - 27,3)	-	(649 - 599)	(900 - 550)

Continuación...

Proceso	Fase	ID	ST (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	CN <sup>-</sup> (mg/L)	CNt (mg/L)
1. Molienda	Molinos	S <sub>1</sub>	219 (222 - 216)	0,66 (0,72 - 0,6)	0,23 (0,23 - 0,22)	-	-
		S <sub>2.1</sub>	7282 (2980 - 11584)	172,5 (179,5 - 165,5)	71,5 (72 - 71)	415,25 (404,23 - 426,27)	621,04 (610,01 - 632,06)
2. Lixiviación/Adsorción	Cribado	S <sub>2.2</sub>	3194 (3174 - 3214)	158,5 (159,5 - 154,5)	66 (69 - 63)	84,52 (88,2 - 80,84)	363,81 (367,48 - 360,13)
		S <sub>3.1</sub>	18225 (21060 - 15390)	11,46 (11,68 - 11,24)	0,505 (0,51 - 0,5)	138,01 (138,03 - 138,01)	520,2 (520,3 - 520,2)
3. Elución	Lavado de carbón	S <sub>3.2</sub>	1183 (1230 - 1136)	5,52 (5,56 - 5,48)	0,5 (0,51 - 0,48)	4 (4,00 - 4,00)	47 (47,00 - 47,00)
		S <sub>4.1</sub>	2704 (2958 - 2450)	133,25 (134 - 131,5)	37,75 (38,5 - 36)	110,24 (110,24 - 110,24)	363,81 (367,48 - 360,13)
4. Tratamiento	Piscina de homogenización	S <sub>4.2</sub>	3049 (3106 - 2992)	157 (161 - 156)	56,5 (67 - 65)	84,23 (88,2 - 80,25)	378,51 (367,48 - 360,13)
		S <sub>4.3</sub>	2986 (3080 - 2892)	145 (147,5 - 142,5)	51,5 (63 - 40)	73,53 (73,6 - 76,4)	257,31 (257,31 - 257,31)
		S <sub>4.4</sub>	2947 (3010 - 2884)	133,5 (136 - 131)	49 (51,5 - 46,5)	36,75 (44,10 - 29,40)	242,54 (257,24 - 227,84)
4. Tratamiento	Filtración/adsorción	S <sub>4.5</sub>	2883 (3000 - 2766)	130,5 (133 - 128)	39,5 (42 - 37)	33,08 (36,75 - 29,4)	224,22 (235,29 - 213,14)
		S <sub>4.6</sub>	2847 (2980 - 2714)	145 (147,5 - 142,5)	42 (44,5 - 39,5)	25,73 (22,05 - 29,4)	238,87 (235,19 - 242,54)
		S <sub>4.7</sub>	2603 (2724 - 2482)	134 (136,5 - 131,5)	39 (41,5 - 36,5)	22,05 (22,05 - 22,05)	220,49 (227,84 - 213,14)
		S <sub>4.7</sub>	2603 (2724 - 2482)	134 (136,5 - 131,5)	39 (41,5 - 36,5)	22,05 (22,05 - 22,05)	220,49 (227,84 - 213,14)

Nota: ( ) Rango de variación, (Q) Caudal, (ID) identificación de la corriente.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

Una vez finalizada la etapa de lixiviación, se genera una corriente residual global del proceso ( $S_2$ ), que incluye la mezcla de los residuos líquidos de las etapas de cianuración y cribado que posteriormente serán depositados en relaveras. La corriente proveniente de los relaves ( $S_{4.1}$ ) se caracteriza por una alta concentración en DQO (875 mg/L), que a su vez se relaciona por la cantidad de iones en solución de  $CN^-$ , cuya concentración es de 110,24 mg/L. Los valores reportados de  $CN_t$  fueron de 363,81 mg/L, que en comparación con estudios de relaves se evidenció que las concentraciones de cianuro pueden llegar hasta los 433 mg/L (Fajardo et al., 2010). Además, esta corriente presenta un importante aporte de metales pesados, se detectó Fe (133,25 mg/L) y Cu (110,24 mg/L). Con respecto a parámetros como ST, sulfatos y conductividad, las concentraciones reportadas fueron de 2704 mg/L, 600 mg/L y 3380  $\mu\text{s}/\text{cm}$  respectivamente, reflejando valores altos de estos contaminantes. En este punto se evidenció que los parámetros mencionados ( $CN_t$ ,  $CN^-$ , DQO, Sulfatos, Fe y Cu) superan considerablemente los límites permisibles de la norma Tabla 9 del Anexo 1 – TULSMA (MAE, 2015). Por lo tanto, se evidencia que es necesario un tratamiento de detoxificación previo a la descarga de las corrientes residuales.

Dentro del proceso de detoxificación se establecen las corrientes líquidas del sistema ( $S_{4.2}$ ,  $S_{4.3}$ ,  $S_{4.4}$ ,  $S_{4.5}$ ,  $S_{4.6}$  y  $S_{4.7}$ ), donde se evidencia que el cianuro es el parámetro clave debido a su toxicidad. Los valores de cianuro fluctúan entre 378,51 mg/L ( $S_{4.2}$  – homogenización) a 220,49 mg/L ( $S_{4.7}$  - descarga) de  $CN_t$ , mientras que la concentración de  $CN^-$  oscila entre 84,23 mg/L a 22,05 mg/L, en donde el primer valor corresponde a la corriente previa a la detoxificación y el segundo a la corriente posterior al proceso de detoxificación. La disminución en la concentración del cianuro puede deberse también a un proceso de eliminación natural como la volatilización, sin embargo, la mayor remoción del cianuro se da dentro del proceso de detoxificación llegando a ser hasta un 45% (Agbesi et al., 2013; Anning et al., 2019).

Entre los metales pesados presentes en las corrientes de inicio y salida del tratamiento de detoxificación, se encontró concentraciones de Fe (157 mg/L - 134 mg/L) y Cu (56,5 mg/L – 39 mg/L). Este fenómeno está relativamente asociado a la presencia de sulfuros (600 mg/L a 725 mg/L), ya que por acción del oxígeno los sulfuros se oxidan



a sulfatos y ocasionan la liberación de metales (Smith & Mudder, 1996). Los valores altos de conductividad CE se deben a la presencia de varios electrolitos (iones metálicos, sulfatos, nitritos, entre otros) en las corrientes residuales, sin embargo, durante el tratamiento de detoxificación la concentración de CE disminuye (3140  $\mu\text{s/cm}$  – 2670  $\mu\text{s/cm}$ ), logrando remociones de CE significativas. Con respecto al pH registrado, se podría catalogar como ligeramente alcalino y osciló de 7,67 a 9,53. El pH de la corriente líquida que ingresó a la PT-RLles disminuyó gradualmente debido a la neutralización del ambiente alcalino, dado posiblemente por la degradación del cianuro en las etapas de tratamiento (Agbesi et al., 2013).

Los valores de DQO se relacionan con la degradación del cianuro en el tratamiento de las corrientes líquidas, los valores encontrados oscilan desde 835,5 mg/L (influyente) hasta 624 mg/L (efluente). Al comparar el valor de DQO del influyente de la planta de tratamiento de este estudio con bibliografía (DQO 150 mg/L) se encontró que es superior (Agbesi et al., 2013). Con respecto a ST, este parámetro mostró poca variabilidad de remoción durante todo el tratamiento (influyente: 3049 mg/L – efluente: 2603 mg/L). En general, los valores para parámetros como CN, CNT, Fe, Cu, ST, DQO y sulfatos están fuera de norma y poseen bajos rendimientos de remoción Tabla 9 del Anexo 1 – TULSMA (MAE, 2015).

#### 4.1.4.2 Monitoreo de caudales

En la Tabla 4.7, se presentan los caudales (L/s) de las corrientes líquidas generadas dentro del uso doméstico de la actividad minera. Además, presenta el flujo de agua ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) que a diferencia del caudal este considera las horas operativas de la fase.

**Tabla 4.7**  
*Caudales corrientes líquidas domésticas*

Fase	Identificación		Q (L/s)	Flujo de agua ( $\text{m}^3/\text{d}$ )
	E	S		
Campamento	ED <sub>1</sub>	SD <sub>1</sub>	0,33	14,2

ELABORACIÓN: Vilaña J.

En la Tabla 4.8, se presentan los caudales (L/s) y el flujo de agua ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) de las corrientes líquidas generadas en cada fase del proceso productivo y a su vez las

corrientes del proceso de tratamiento de la PT-RLles. El flujo de agua de las corrientes identificadas considera el tiempo de operación de cada una de las fases.

**Tabla 4.8**  
*Caudales corrientes líquidas mineras*

Proceso	Fase	Identificación		Q	Flujo de agua
		E	S	(L/s)	(m <sup>3</sup> /d)
1. Molienda	Molinos	E <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	4,11	354,67
2. Lixiviación/Adsorción	Cianuración	E <sub>2.1</sub>	S <sub>2.1</sub>	2,63	189,43
	Cribado	E <sub>2.2</sub>	S <sub>2.2</sub>	2,7	100,56
3. Elución	Elución	E <sub>3.1</sub>	S <sub>3.1</sub>	3,12	2,85
	Lavado de carbón	E <sub>3.2</sub>	S <sub>3.2</sub>	3,09	2,42
	Piscina de homogenización	-	S <sub>4.2</sub>	2,40	86,44
	Torres de filtración	-	S <sub>4.3</sub>	0,84	30,30
4. Tratamiento	Tratamiento químico	-	S <sub>4.4</sub>	0,84	30,30
	Filtración/adsorción	-	S <sub>4.5</sub>	0,84	30,30
	Piscina de sedimentación	-	S <sub>4.6</sub>	0,84	30,30
	Piscina de almacenamiento final	-	S <sub>4.7</sub>	0,84	30,30

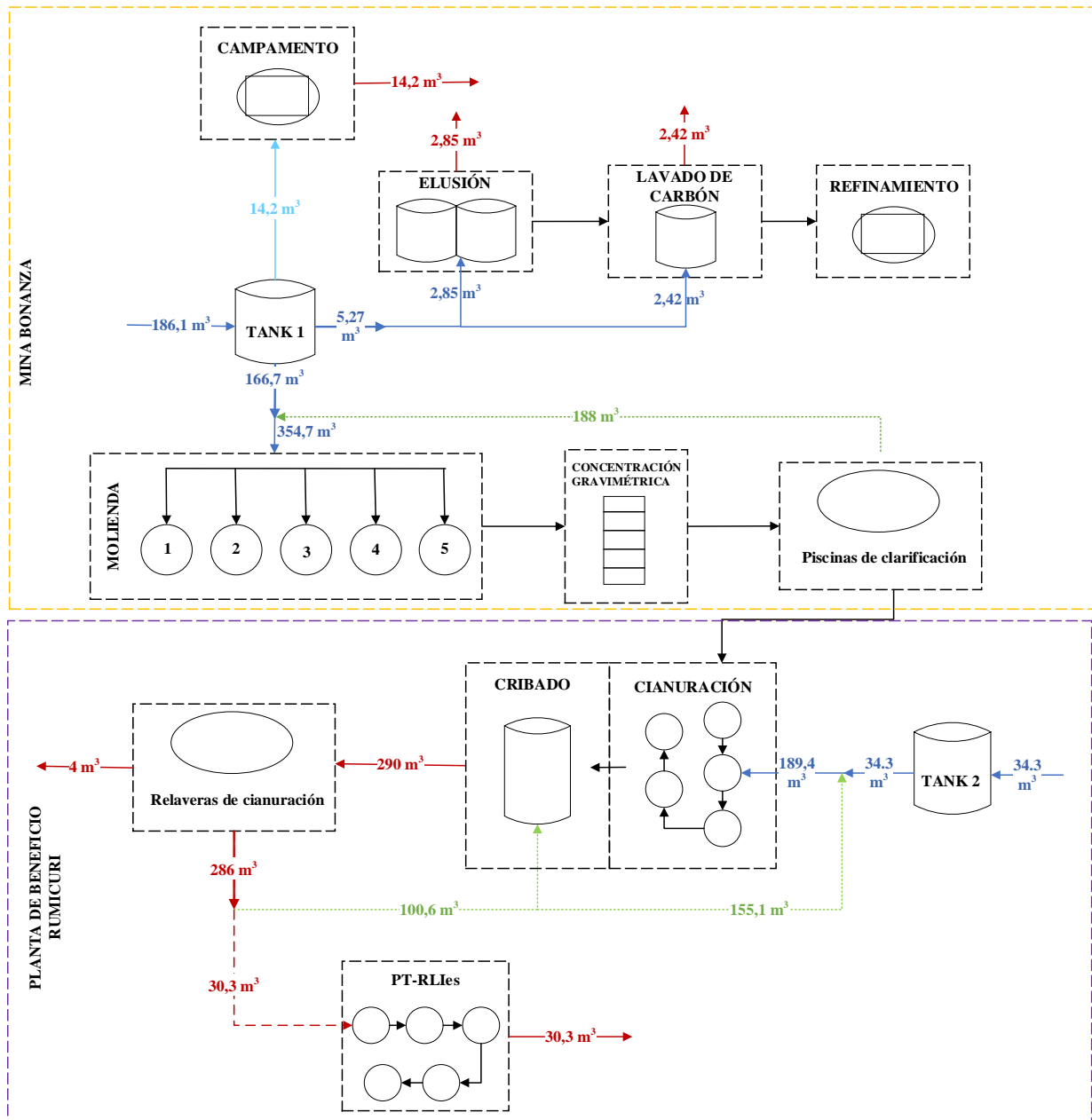
ELABORACIÓN: Vilaña J.

## 4.2 HUELLA HÍDRICA

### 4.2.1 BALANCE HÍDRICO

Como se observa en la Figura 4.10, hay dos flujos de agua entrante (186,2 m<sup>3</sup> y 34,3 m<sup>3</sup>) que alimentan a todo el sistema con agua dulce. El agua almacenada en el tanque 1 se utiliza para alimentar las corrientes de agua hacia los procesos de molienda (166,7 m<sup>3</sup>), elución y lavado de carbón (5,27 m<sup>3</sup>), así como también, alimenta la red de agua de consumo doméstico (14,2 m<sup>3</sup>), mientras que, el tanque 2 almacena agua que alimenta netamente la corriente de entrada al proceso de cianuración (34,3 m<sup>3</sup>). Las corrientes son devueltas como residuos líquidos (agua de proceso contaminada) para ser tratadas en una planta de tratamiento (30,3 m<sup>3</sup>) o vertidas al ambiente como descargas (4 m<sup>3</sup>).

En el presente estudio, la mayor parte del agua utilizada está relacionada con el procesamiento y obtención del oro, a excepción del agua dulce utilizada por el personal dentro del campamento minero en el aseo y la cocina. Este tipo de agua es considerada como indirecta dentro de todo el proceso. Los residuos líquidos se recogen de forma segura en relaveras antes de su tratamiento. Sin embargo, solo el 10% ingresa a la planta de tratamiento, el 88% se recicla y 2% se descarga sin tratamiento. La planta de tratamiento no tiene la capacidad para tratar todo el caudal del corriente residual generado.



**Figura 4.10** Balance Hídrico del proceso minero

ELABORACIÓN: Vilaña J.

**Tabla 4.9**  
*Descripción de las corrientes para el balance hídrico*

ID corrientes	Descripción	Flujo de agua, m <sup>3</sup> /d
ED <sub>1</sub>	Agua usada por el personal	14,4
SD <sub>1</sub>	Descarga producida por el personal	14,2
E <sub>1</sub>	Salida de agua fresca hacia el proceso de molienda	166,7
S <sub>1</sub>	Agua recirculada al proceso de molienda	188,0
E <sub>2</sub>	Entrada de agua dulce al tanque de almacenamiento	34,3
E <sub>2.2</sub>	Agua recirculada al proceso de cribado	100,6
E <sub>2.3</sub>	Agua recirculada al proceso de cianuración	155,2
E <sub>3.1</sub>	Agua utilizada en el proceso de elusión	2,8
E <sub>3.2</sub>	Agua utilizada en el proceso de lavado de carbón	2,4
S <sub>3.1</sub>	Descarga de residuos líquidos del proceso de elusión	2,8
S <sub>3.1</sub>	Descarga de residuos líquidos del proceso de lavado de carbón	2,4
S <sub>6</sub>	Descarga de agua tratada	30,3
<b>Determinación de caudales</b>		
$E_0 = E_1 + E_3 + ED_1$	Primera entrada de agua dulce al tanque de almacenamiento	186,2
$E_{1.1} = E_1 + S_1$	Agua utilizada en el proceso de molienda	354,7
$E_{2.1} = E_2 + E_{2.3}$	Agua utilizada en el proceso de cianuración	189,4
$S_2 = E_{2.1} + E_{2.2}$	Residuo líquido generado de los procesos de cianuración y cribado	290,0
$E_3 = E_{3.1} + E_{3.2}$	Salida de agua dulce hacia el proceso de elusión y lavado de carbón	5,3
$S_4 = E_{2.2} + E_{2.3} + S_6$	Residuo líquido de las relaveras	286,0
$S_5 = S_2 - S_4$	Descarga de residuos líquidos del proceso de cianuración y cribado sin tratamiento	4,0

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.2.2 HUELLA HÍDRICA AZUL

La determinación de la huella hídrica azul dentro del proceso de obtención del oro, se diferenció en dos tipos de agua: HHA directa y HHA indirecta. La primera hace referencia al agua usada dentro del proceso industrial y la segunda al agua usada en la parte doméstica. La Tabla 4.10, resume la contabilidad de la huella hídrica azul, dando un valor igual a 61,6 m<sup>3</sup>/kg<sub>oro</sub>, valor reportado en literatura refleja que para la obtención de 1 kg de oro se necesitan alrededor de 200 m<sup>3</sup> de agua (González & Echavarría, 2016). Además, los resultados demuestran que el 99,8% del agua azul está directamente relacionado con la producción y obtención del oro.

**Tabla 4.10**  
*Estimación de la Huella Hídrica Azul*

HHA m <sup>3</sup> /kg <sub>oro</sub>	HHA m <sup>3</sup> /kg <sub>oro</sub>
Huella Hídrica Azul Directa	61,5
Huella Hídrica Azul Indirecta	0,1
Huella Hídrica Azul	<b>61,6</b>

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.2.3 HUELLA HÍDRICA GRIS

En este estudio hay cinco corrientes de efluentes independientes que se toman en cuenta al momento de calcular la huella hídrica gris en la producción de oro. Las cuales son: las aguas del proceso minero que no se tratan y son vertidas al medio ( $S_{3.1}$ ,  $S_{3.2}$  y  $S_5$ ), el agua del proceso que se trata dentro de una planta PT-RLles antes de su vertido ( $S_6$ ) y el agua del campamento que no se trata y es vertido ( $SD_1$ ). Se ha seleccionada la DQO mg/L como parámetro de calidad del agua para identificar los niveles de contaminación en los residuos líquidos tratadas y no tratadas. Un total de 34,1 m<sup>3</sup> ( $E_{3.1}+E_{3.2}+ED_1$ ) fue extraído del tanque de almacenamiento<sub>1</sub> con una  $C_{affl}$  de DQO igual a 0 mg/L, mientras que 34,28 m<sup>3</sup> ( $E_2$ ) salió del almacenamiento<sub>2</sub> con una concentración DQO 13,5 mg/L. Luego de su uso 14,2 m<sup>3</sup> ( $SD_1$ ) fueron devueltos como vertidos grises sin tratamiento; 9,1 m<sup>3</sup> ( $S_{3.1}+S_{3.2}+S_5$ ) como vertidos del proceso de minero sin tratamiento y 30,3 m<sup>3</sup> ( $S_6$ ) como vertidos de agua tratada del proceso minero. Para el  $C_{max}$ , se utiliza el límite máximo permitido que puede recibir un cuerpo de agua dulce según la norma ambiental: 200 mg/L Tabla 9 del Anexo 1 – TULSMA (MAE, 2015). En este estudio los vertidos se dan en dos cuerpos de agua, por lo que la concentración natural ( $C_{nat}$ ) en valores de DQO medidos en los cuerpos receptores son de: 42,33 mg/L y 46 mg/L. En la Tabla 4.11 se muestra el total de la Huella Hídrica Gris para la producción de 1 kg oro es de 80 m<sup>3</sup>, valor alto que podría ser mucho más grande si las aguas no se tratasen antes de ser vertidas al medio.

**Tabla 4.11**  
*Estimación de la Huella Hídrica Gris*

Efluentes	Effl (m <sup>3</sup> /d)	C <sub>effl</sub> (mg/L)	Affl (m <sup>3</sup> /d)	C <sub>affl</sub> (mg/L)	HHG (m <sup>3</sup> /d)	HHG (m <sup>3</sup> /kg <sub>oro</sub> )
SD <sub>1</sub>	14,2	554,3	14,4	0,00	49,91	18,43
S <sub>3.1</sub>	2,8	1209,0	2,8	0,00	21,84	8,06
S <sub>3.1</sub>	2,4	165,3	2,4		2,53	0,94
S <sub>5</sub>	4,0	875,0	34,28	13,50	142,39	52,12
S <sub>6</sub>	30,3	624,0				
<b>Total, HHG (m<sup>3</sup>/ kg<sub>oro</sub>)</b>						<b>79,99</b>

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.2.4 HUELLA HÍDRICA

La Tabla 4.13, muestra el valor de la Huella Hídrica en la minería del oro, el valor estimado en este estudio fue 141,6 m<sup>3</sup>/kg<sub>oro</sub>, es decir que por cada kilogramo de oro extraído el consumo de agua es igual a la suma de cada uno de los indicadores estimados (HHA y HHG). La huella actual de consumo de agua (HHA) para producir un kilogramo de oro es de 61,6 m<sup>3</sup> y corresponde a un consumo de 166,8 m<sup>3</sup> de agua dulce. Valores reportados en literatura muestran que el consumo de agua dulce para producir un kilogramo de oro (HHA) puede alcanzar valores de hasta 1160 m<sup>3</sup> (sin recirculación) y 716 m<sup>3</sup> (con recirculación) (Baquero Muñoz, 2017). Con respecto a la HHG el valor estimado es de 80 m<sup>3</sup>/kg<sub>oro</sub>, de la misma manera se reportó en bibliografía que los valores de HHG en minería de oro llegan a ser de hasta 1500000 m<sup>3</sup>/kg<sub>oro</sub>, (Baquero Muñoz, 2017). El valor de la huella hídrica azul no es tan significativa en comparación a la huella hídrica gris. Se revela que el problema principal de la minería del oro se encuentra ligado a las perturbaciones en la calidad del recurso agua por contaminación de cianuro.

**Tabla 4.12**  
*Estimación de la Huella Hídrica*

<b>Indicadores</b>	<b>Consumo agua (m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>Consumo de agua (m<sup>3</sup>/kg<sub>oro</sub>)</b>
Huella Hídrica Azul	166,8	61,6
Huella Hídrica Gris	216,7	80,0
<b>Huella Hídrica</b>	<b>383,4</b>	<b>141,6</b>

ELABORACIÓN: Vilaña J.

### 4.3 ESTRATEGIAS DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS

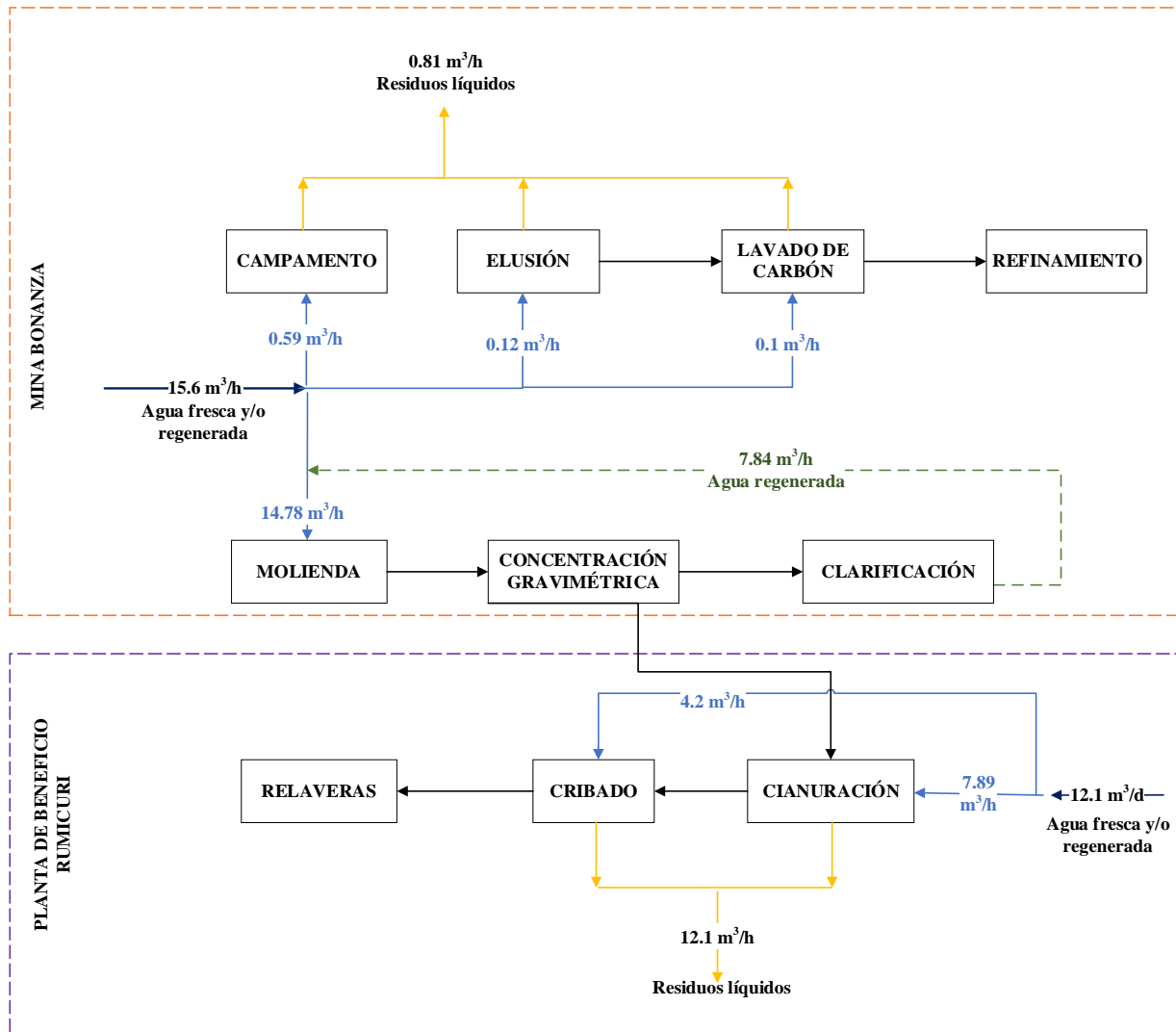
#### 4.3.1 METODOLOGÍA WATER PINCH CON ENFOQUE DE UNICO CONTAMINANTE

Dentro del proceso de obtención de oro se localizaron 6 puntos respecto al consumo de agua fresca y/o regenerada distribuidas en las distintas etapas del proceso. Dichas etapas se identificaron de la siguiente manera: uso doméstico, molienda, cianuración, cribado, elusión y lavado de carbón. El consumo de agua fresca y/o regenerada en todo el proceso de obtención del oro llega a los 670,5 m<sup>3</sup>/h. A pesar de que la molienda sea una de las etapas que mayor consumo de agua fresca tenga, no se consideró como punto crítico ya que no genera una corriente residual líquida que sirva de objeto para su reutilización posterior. Este proceso recicla su propia corriente residual en su totalidad.

La Figura 4.11 muestra las corrientes de agua fresca y/o regenerada y las corrientes de residuos líquidos de cada etapa del proceso, tanto para el campamento minero Bonanza como para la planta de beneficio Rumicuri. Como se muestra en la Figura 4.12, parte de la corriente de agua fresca es destinada para el uso doméstico dentro del campamento. En la molienda, el uso del agua es necesario para la concentración del mineral en las pulpas. En la etapa de desorción, el agua se utiliza para preparar las soluciones acuosas eluantes (CNa y NaOH). Y en la etapa de lavado ácido de carbón, el agua se usa para limpiar las impurezas inorgánicas (carbonato de calcio) de la superficie del carbón para su reactivación. Con respecto a las etapas de cianuración y cribado, el agua fue necesaria para la preparación de soluciones cianuradas y para el arrastre de material fino por la criba. Las etapas que requirieron de un consumo



mayor de agua fresca y/o regenerada fueron: cianuración y cribado ( $12,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ) representado el 43% de la demanda total de agua fresca en mina Bonanza y planta Rumicuri, respectivamente.



**Figura 4.11** Diagrama de flujo de la red de agua en la minería del Oro.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.3.1.1 Flujo mínimo de agua fresca sin reúso de residuos líquidos

La Tabla 4.13 muestra los datos límites del proceso minero. Consta de 6 etapas evaluadas durante todo el proceso minero, en términos de los contaminantes seleccionados: DQO, ST, Fe y Cu. Se incluyeron los valores de concentraciones

máximas de entrada ( $C_{in}$ ) y máximas de salida ( $C_{out}$ ) en mg/L, la masa transferida en cada operación ( $\Delta m_i$ ) en g/h y las tasas de flujo de agua ( $F_i$ ) en m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 4.13**  
*Valores límites del proceso minero*

Etapa	ID	Contaminante	$C_{in}$ (mg/L)	$C_{out}$ (mg/L)	$\Delta m_i$ (g/h)	$F_i$ (m <sup>3</sup> /h)	$f_{min}$ (m <sup>3</sup> /h)
Molienda	S <sub>1.1</sub>	DQO	6,72	12,67	88,00	14,78	6,95
		ST	116,07	219,00	1521,10	14,78	6,95
		Fe	0,12	0,23	1,60	14,78	6,95
Elusión	S <sub>3.1</sub>	DQO	0,00	838,50	99,51	0,12	0,12
		ST	104,00	3194,00	366,71	0,12	0,11
		Fe	0,11	66,00	7,82	0,12	0,12
Lavado de carbón	S <sub>3.2</sub>	DQO	0,00	1209,00	121,72	0,10	0,10
		ST	104,00	18225,00	1824,36	0,10	0,10
		Fe	0,11	0,51	0,04	0,10	0,08
Cianuración	S <sub>2.1</sub>	DQO	835,50	3975,00	24770,66	7,89	6,25
		ST	3049,00	7282,00	33398,37	7,89	4,85
		Fe	157,00	172,50	122,30	7,89	1,57
		Cu	56,50	71,50	118,35	7,89	1,66
Cribado	S <sub>2.2</sub>	DQO	835,50	838,50	12,57	4,19	0,02
		ST	3049,00	3194,00	607,56	4,19	0,22
		Fe	157,00	158,50	6,29	4,19	0,10
		Cu	56,50	66,00	39,81	4,19	0,60

Nota: (C) concentración máxima. (S<sub>D1</sub>, S<sub>3.1</sub>, S<sub>3.2</sub>) corrientes mina Bonanza. (S<sub>2.1</sub>, S<sub>2.2</sub>) corrientes pertenecientes a la Planta Rumicuri.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

La Tabla 4.14 muestra el flujo mínimo de agua para cada etapa en términos de un solo contaminante (DQO, ST, Fe, Cu).

**Tabla 4.14**  
*Flujo mínimo de agua total sin reúso de residuos líquidos*

ID	Contaminante	$F_{i\text{total}}$ (m <sup>3</sup> /h)	$f_{min\text{ total}}$ (m <sup>3</sup> /h)
S <sub>1.1</sub>	DQO	15,00	7,17
S <sub>3.1</sub>	ST	15,00	13,45
S <sub>3.2</sub>	Fe	15,00	13,53
S <sub>2.1</sub>	DQO	12,08	6,27
	ST	12,08	5,06
S <sub>2.2</sub>	Fe	12,08	1,67
	Cu	12,08	2,26

ELABORACIÓN: Vilaña J.

Considerando la DQO como único contaminante, el mínimo de agua fresca para las operaciones realizadas dentro de mina Bonanza (elusión, lavado de carbón, molienda), fue de 7,17 m<sup>3</sup>/h; siendo menor que el flujo total requerido 15 m<sup>3</sup>/h. En términos de ST y para los mismos procesos, el flujo mínimo de agua fue de 13,45 m<sup>3</sup>/h y con respecto al Fe fue de 13,53 m<sup>3</sup>/h. En conclusión, para términos de ST y Fe fue donde se encontró una menor optimización del flujo de agua fresca mínima requerida.

Con respecto a las operaciones realizadas dentro de planta Rumicuri (cianuración y cribado), considerando al Fe como único contaminante, se encontró que el flujo mínimo necesario de agua fue de 1,6 m<sup>3</sup>/h. Siendo este el flujo más pequeño con respecto a los otros contaminantes y que, además es menor al flujo total requerido 12,08 m<sup>3</sup>/h. En términos de DQO, fue donde se encontró el valor más alto de flujo mínimo de agua con un 6,3 m<sup>3</sup>/h.

Una vez establecidos los flujos mínimos de agua para un sistema sin reúso de corrientes y tratando a cada etapa por separado, a continuación, se procede a determinar los flujos de agua incluyendo la reutilización de corrientes. Por lo tanto, se demuestra que, al reutilizar agua, se logra disminuir el flujo de agua fresca mínima al mínimo.

#### **4.3.1.2 Flujo mínimo de agua fresca con reúso de residuos líquidos y Curva Compuesta de Concentraciones**

Las Tablas 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 muestran los Diagramas de Intervalos de Concentraciones (DIC) de cada etapa evaluada en términos de los contaminantes definidos (DQO, ST, Fe y Cu). Las tablas incluyen las concentraciones de contaminante en mg/L, los valores de masa retirada ( $\Delta m_i$ ) en g/h, la acumulación de la masa ( $\Delta m_{i \text{ acumulada}}$ ) en g/h y el flujo de agua ( $f_i$ ) en m<sup>3</sup>/h.

A su vez, de la Figura 4.12 a la 4.18 se expone la Curva Compuesta de Concentraciones (CCC) y la Línea de Suministro de Agua (LSA) respecto a las etapas evaluadas y a los contaminantes seleccionado (DQO, ST, Fe y Cu).

Tabla 4.15

Diagrama de intervalos de concentraciones para DQO

Concentración (mg/L)	Molienda	Elusión	Lavado de carbón	$\Delta m_i$ (g/h)	$\Delta m_i$ acumulada (g/h)	$f_{i \min}$ (m <sup>3</sup> /h)
	14,78 (m <sup>3</sup> /h)	0,12 (m <sup>3</sup> /h)	0,10 (m <sup>3</sup> /h)			
0,00				1,47	0,00	0,00
6,72	↑	↑	↑	89,31	1,47	0,22
12,67				181,15	90,78	7,17
838,50				37,30	271,93	0,32
1209,00					309,23	0,26

ELABORACIÓN: Vilaña J.

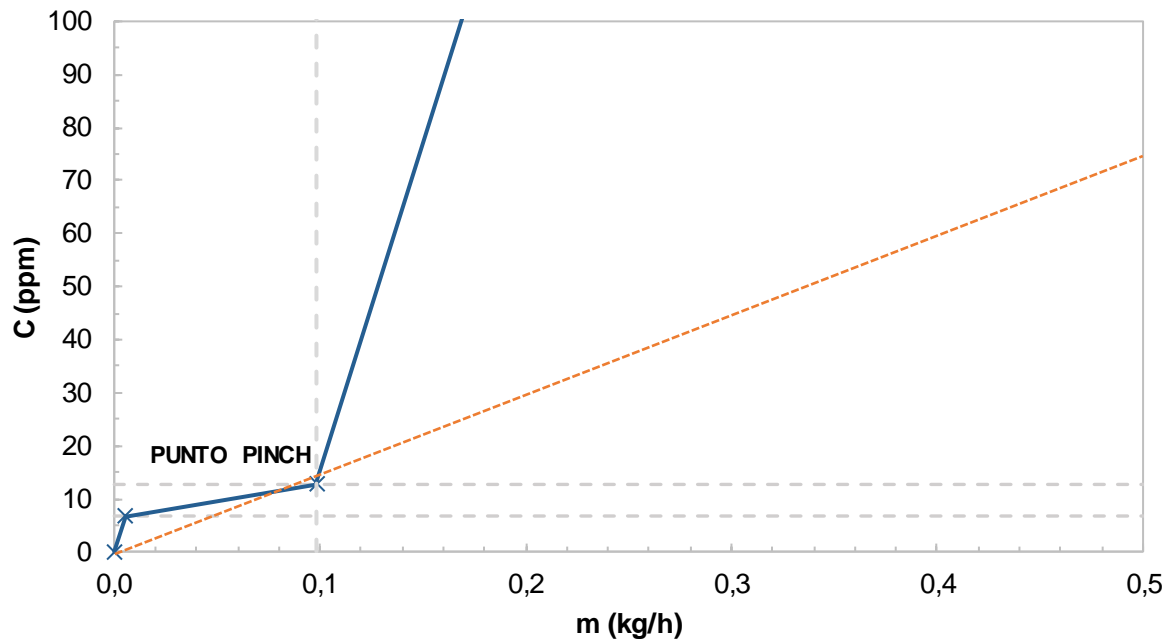


Figura 4.12 Curva Compuesta de Concentraciones en términos de DQO

Nota: (CCC) Curva Compuesta de Concentraciones en azul. (LSA) Línea Suministro de Agua en naranja.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

Con respecto a la Figura 4.12, el punto *Pinch* se encuentra en:  $C_{PINCH}$  igual 12,67 mg/L y  $\Delta m_{PINCH}$  igual a 0,09 kg/h, por lo que el caudal mínimo requerido en términos de DQO, considerado como contaminante único, es de 7,17 m<sup>3</sup>/h. Se demuestra que, la cantidad de agua dulce requerida puede disminuir de 15,0 m<sup>3</sup>/h a 7,17 m<sup>3</sup>/h lo que representa

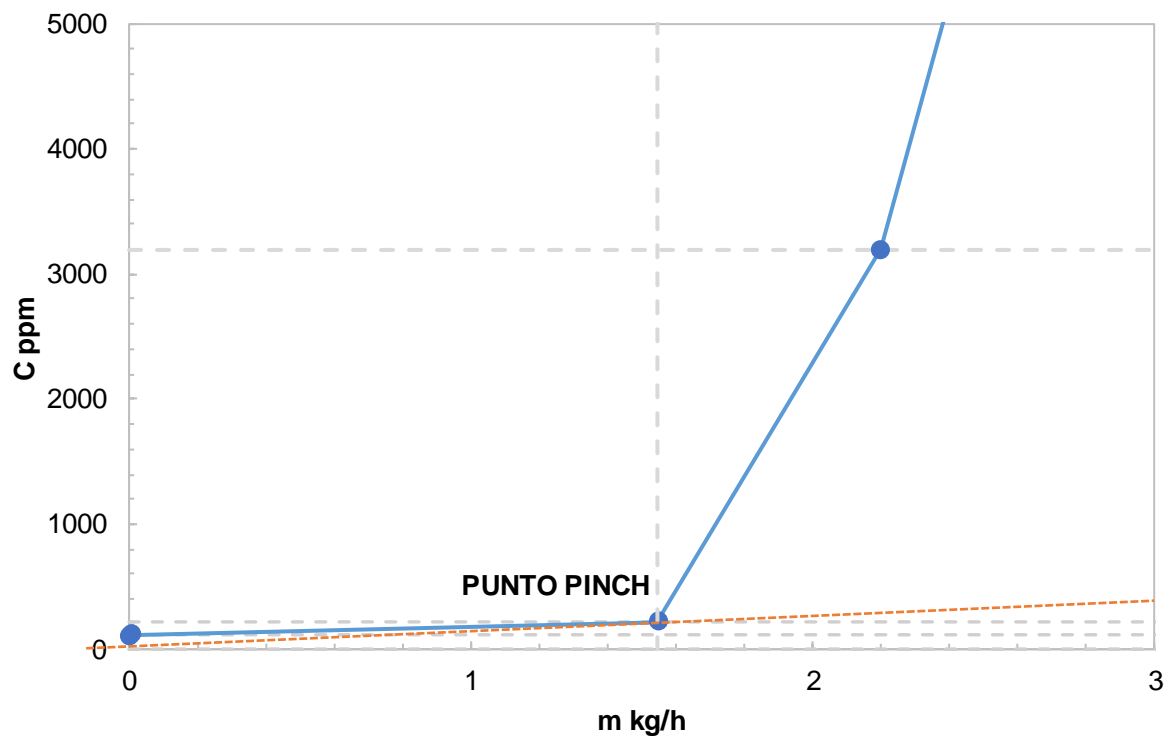
un 52%. El punto *Pinch* especifica que sobre este punto no es necesario el uso de agua fresca y se puede incluir el reúso de corrientes.

**Tabla 4.16**

*Diagrama de intervalos de concentraciones para ST*

Concentración (mg/L)	Molienda	Elusión	Lavado de carbón	$\Delta m_i$ (g/h)	$\Delta m_i$ acumulada (g/h)	$f_{i \min}$ (m <sup>3</sup> /h)
	14,78 (m <sup>3</sup> /h)	0,12 (m <sup>3</sup> /h)	0,10 (m <sup>3</sup> /h)			
104				1,53	0,00	0,00
116	↑			1543,68	1,53	0,13
219		↑		652,58	1545,21	13,44
3194			↑	1513,27	2197,79	0,71
18225					3711,06	0,20

ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 4.13** Curva Compuesta de Concentraciones en términos de ST

Nota: (CCC) Curva Compuesta de Concentraciones en azul. (LSA) Línea Suministro de Agua en naranja.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

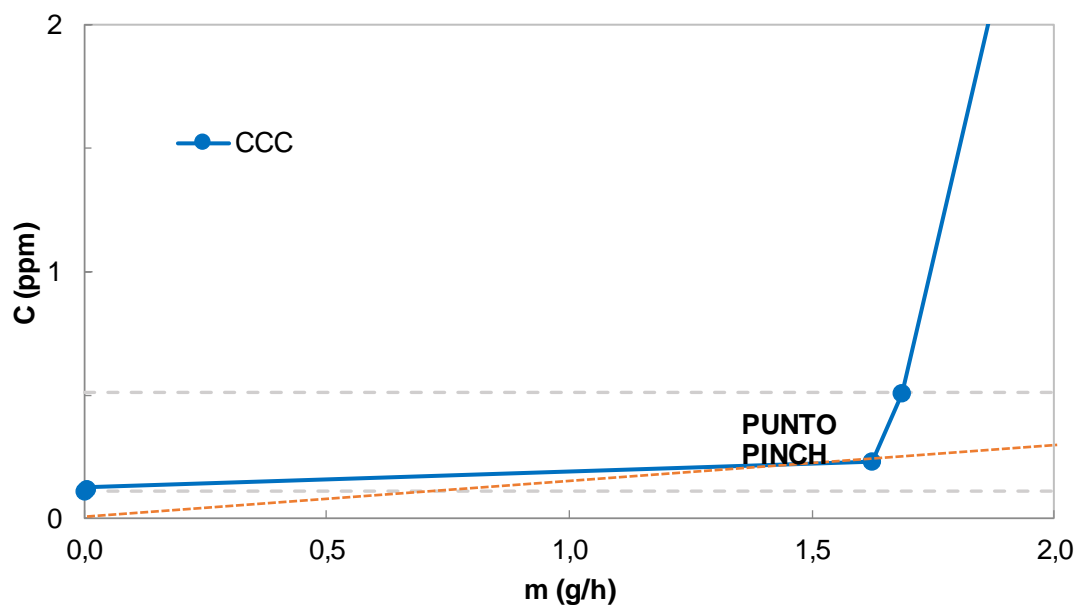
En la Figura 4.13, se evidencia que el punto *Pinch* se encuentra entre los valores  $C_{PINCH}$  igual 219 mg/L y  $\Delta m_{PINCH}$  igual a 1,55 kg/h, por lo que el caudal mínimo requerido en términos de ST, considerado como contaminante único, es de 13,44 m<sup>3</sup>/h. Se demuestra que la cantidad de agua dulce requerida puede disminuir de 15,0 m<sup>3</sup>/h a 13,44 m<sup>3</sup>/h, lo que representa aproximadamente un 10%.

**Tabla 4.17**

*Diagrama de intervalos de concentraciones para Fe*

Concentración (mg/L)	Molienda	Lavado de carbón	Elusión	$\Delta m_i$ (g/h)	$\Delta m_i$ acumulada (g/h)	$f_{i \min}$ (m <sup>3</sup> /h)
	14,78 (m <sup>3</sup> /h)	0,10 (m <sup>3</sup> /h)	0,12 (m <sup>3</sup> /h)			
0,11				0,003	0,000	0,00
0,12	↑			1,62	0,003	0,22
0,23		↑		0,06	1,62	13,53
0,51			↑	7,77	1,68	4,26
66,00					9,46	0,14

ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 4.14** Curva Compuesta de Concentraciones en términos de Fe

Nota: (CCC) Curva Compuesta de Concentraciones en azul. (LSA) Línea Suministro de Agua en naranja.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

Tomando la Figura 4.14 como referencia, se evidencia que el punto *Pinch* se encuentra entre los valores  $C_{PINCH}$  igual 0,23 mg/L y  $\Delta m_{PINCH}$  igual a 1,62 g/h. Por consiguiente, el caudal mínimo requerido en términos de Fe, considerado como contaminante único, es de 13,53 m<sup>3</sup>/h. Disminuir el flujo de 15,0 m<sup>3</sup>/h a 13,53 m<sup>3</sup>/h, representó un valor de 9,8%.

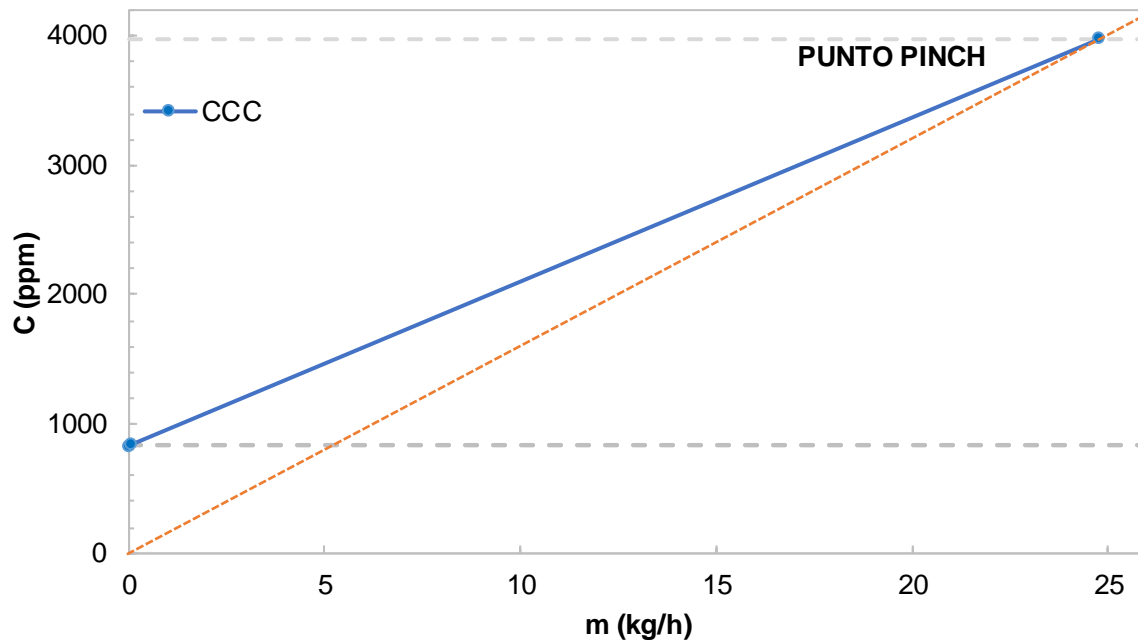
El flujo total de agua dulce requerido para los procesos de elusión, lavado de carbón y la etapa de uso doméstico dentro de la mina Bonaza en términos de los parámetros definidos (DQO, ST y Fe) fue de 7,17 m<sup>3</sup>/h, 13,44 m<sup>3</sup>/h y 13,53 m<sup>3</sup>/h, respectivamente. A su vez, la cantidad de agua fresca disminuye de 52%, 10% y 9,8%.

**Tabla 4.18**

*Diagrama de intervalos de concentraciones para DQO*

Concentración (mg/L)	Cianuración	Cribado	$\Delta m_i$ (g/h)	$\Delta m_i$ acumulada (g/h)	$f_{i \text{ min}}$ (m <sup>3</sup> /h)
	7,89 (m <sup>3</sup> /h)	4,19 (m <sup>3</sup> /h)			
835,50	↑	↑	36,24	0,00	0,00
838,50			24746,99	36,24	0,04
3975,00				24783,23	6,26

ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 4.15** Curva Compuesta de Concentraciones en términos de DQO

Nota: (CCC) Curva Compuesta de Concentraciones en azul. (LSA) Línea Suministro de Agua en naranja.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

En la Figura 4.15, se evidencia que el punto *Pinch* se encuentra entre los valores  $C_{PINCH}$  igual 3975 mg/L y  $\Delta m_{PINCH}$  igual a 24,78 kg/h. El caudal mínimo requerido en términos de DQO, considerado como contaminante único, es de 67,89 m<sup>3</sup>/h. La cantidad de agua dulce y/o regenerada se reduce desde 12,08 m<sup>3</sup>/h hasta 7,89 m<sup>3</sup>/h, lo que corresponde a un 35%.



Tabla 4.19

Diagrama de intervalos de concentraciones para ST

Concentración (mg/L)	Cianuración	Cribado	$\Delta m_i$ (g/h)	$\Delta m_i$ acumulada (g/h)	$f_{i \text{ min}}$ (m <sup>3</sup> /h)
	7,89 (m <sup>3</sup> /h)	4,19 (m <sup>3</sup> /h)			
3049,00	↑	↑	1751,61	0,00	0,00
3194,00			32254,32	1751,61	0,62
7282,00				34005,93	4,93

ELABORACIÓN: Vilaña J.

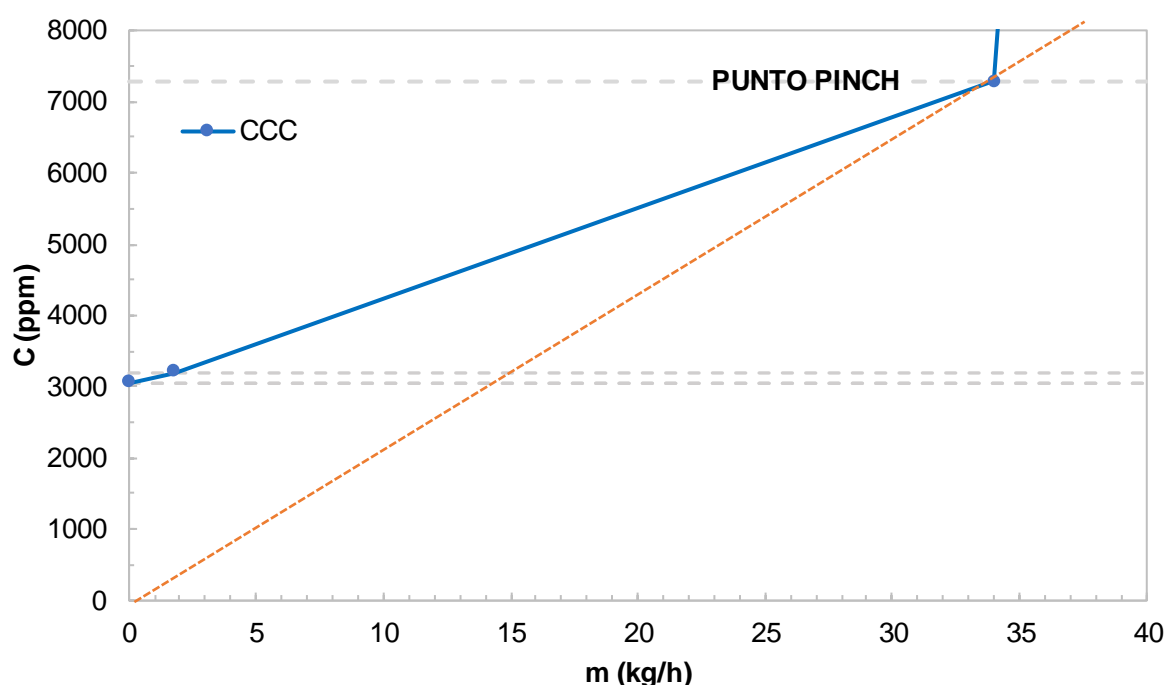


Figura 4.16 Curva Compuesta de Concentraciones en términos de ST

Nota: (CCC) Curva Compuesta de Concentraciones en azul. (LSA) Línea Suministro de Agua en naranja.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

Con respecto a la Figura 4.16, se evidencia que el punto *Pinch* se encuentra entre los valores  $C_{\text{PINCH}}$  igual 7282 mg/L y  $\Delta m_{\text{PINCH}}$  igual a 34,01 kg/h. Los resultados muestran que el caudal mínimo requerido en términos de ST, considerado como contaminante único, es de 8,03m<sup>3</sup>/h. La cantidad de agua dulce y/o regenerada se reduce desde 12,08 m<sup>3</sup>/h hasta 8 m<sup>3</sup>/h, lo que corresponde a un 33%.

Tabla 4.20

Diagrama de intervalos de concentraciones para Fe

Concentración (mg/L)	Cianuración	Cribado	$\Delta m_i$ (g/h)	$\Delta m_i$ acumulada (g/h)	$f_{i \min}$ (m <sup>3</sup> /h)
	7,89 (m <sup>3</sup> /h)	4,19 (m <sup>3</sup> /h)			
157,00	↑	↑	18,12	0,00	0,00
158,50			110,46	18,12	0,28
172,50				128,58	1,65

ELABORACIÓN: Vilaña J.

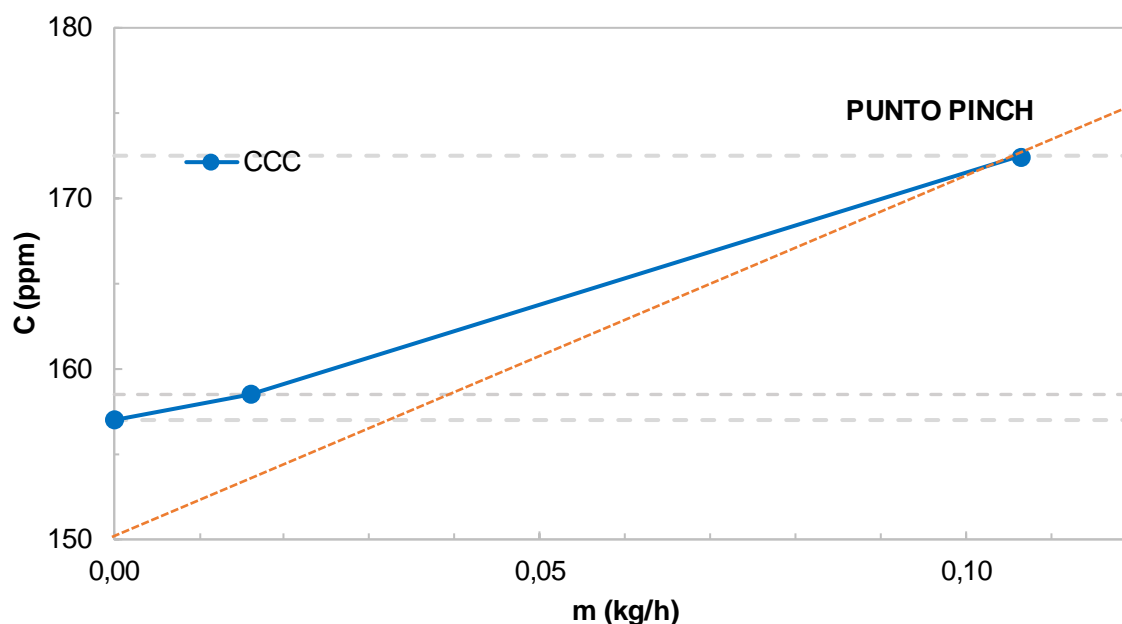


Figura 4.17 Curva Compuesta de Concentraciones en términos de Fe

Nota: (CCC) Curva Compuesta de Concentraciones en azul. (LSA) Línea Suministro de Agua en naranja.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

De la Figura 4.17 se evidencia que el punto *Pinch* se encuentra entre los valores  $C_{PINCH}$  igual a 172,5 mg/L y  $\Delta m_{PINCH}$  igual a 0,13 kg/h. De tal manera, considerado a Fe como contaminante único, el flujo mínimo reportado fue de 8,3 m<sup>3</sup>/h. La cantidad de agua dulce y/o regenerada se reduce desde 12,08 m<sup>3</sup>/h hasta 8,3 m<sup>3</sup>/h, lo que corresponde a un 31%.

Tabla 4.21

Diagrama de intervalos de concentraciones para Cu

Concentración (mg/L)	Cianuración	Cribado	$\Delta m_i$ (g/h)	$\Delta m_i$ acumulada (g/h)	$f_{i \min}$ (m <sup>3</sup> /h)
	7,89 (m <sup>3</sup> /h)	4,19 (m <sup>3</sup> /h)			
56,50	↑	↑	114,76	0,00	0,00
66,00			43,40	114,76	1,74
71,50				158,16	2,21

ELABORACIÓN: Vilaña J.

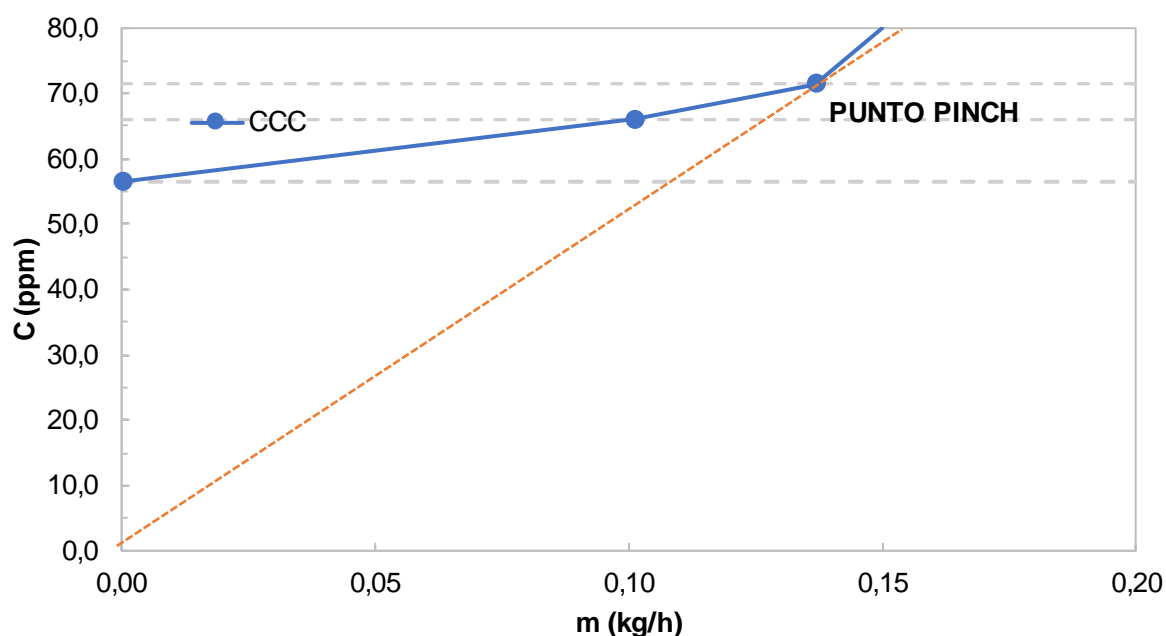


Figura 4.18 Curva Compuesta de Concentraciones en términos de Cu

Nota: (CCC) Curva Compuesta de Concentraciones en azul. (LSA) Línea Suministro de Agua en naranja

ELABORACIÓN: Vilaña J.

En la Figura 4.18 se muestra que el punto *Pinch* se encuentra entre los valores  $C_{PINCH}$  igual 71,5 mg/L y  $\Delta m_{PINCH}$  igual a 0,16 kg/h, por lo que el caudal mínimo requerido en términos de Cu, considerado como contaminante único, es de 10,54 m<sup>3</sup>/h. La cantidad de agua dulce y/o regenerada se reduce desde 12,08 m<sup>3</sup>/h hasta 10,54 m<sup>3</sup>/h, lo que corresponde a un 13%.

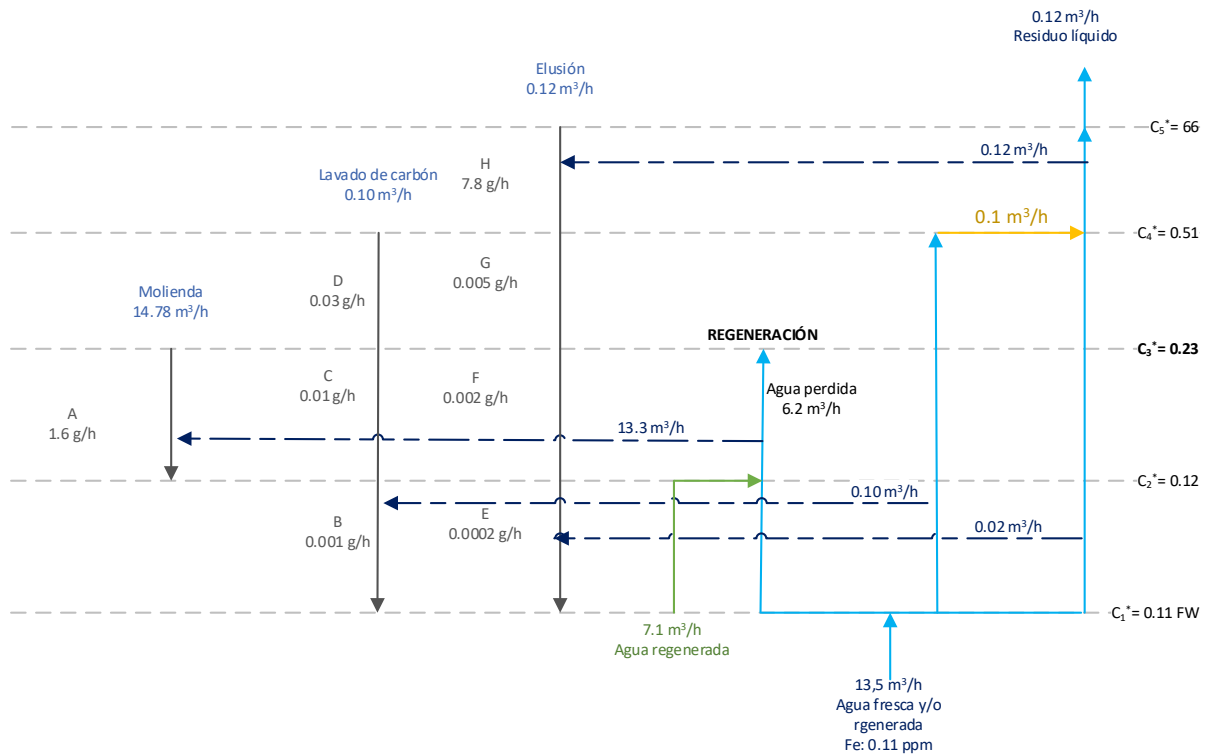
El flujo total de agua dulce y/o regenerada requerido para los procesos de cianuración y cribado dentro de la Planta de Beneficio Rumicuri en términos de los parámetros definidos (DQO, ST, Fe y Cu) fue de 7,89 m<sup>3</sup>/h, 8,03 m<sup>3</sup>/h, 8,3 m<sup>3</sup>/h y 10,54 m<sup>3</sup>/h respectivamente. A su vez, la cantidad de agua fresca disminuye de 35%, 33%, 31% y 13%.

De las etapas analizadas, la minimización de agua fresca y/o regenerada fue menor en términos de Fe (Bonanza) y Cu (Rumicuri). Por lo tanto, se seleccionó al Fe y Cu como contaminantes limitantes en el nuevo diseño de la red de corrientes líquidas.

#### **4.3.1.2 Configuración de la red de corrientes líquidas para un contaminante único**

Las Figuras 4.22, 4.24 y 4.26 presentan las posibles configuraciones a la red de corrientes líquidas tanto del campamento minero Bonanza como de la planta de beneficio Rumicuri. En el primer caso (Bonanza), considerando a Fe como el contaminante limitante el consumo de agua disminuyó un 14% (15,6 m<sup>3</sup>/h a 13,5 m<sup>3</sup>/h). Y en el segundo caso (Rumicuri), tomando a Cu como el contaminante limitante, el consumo de agua disminuyó un 13% (12,08 m<sup>3</sup>/h a 10,5 m<sup>3</sup>/h).

La Figura 4.19 muestra cuadrícula de diseño de la nueva posible red de corrientes líquidas para mina Bonanza. Una vez determinado el flujo mínimo de agua (*Pinch*: 13,5 m<sup>3</sup>/h), la red de agua se diseñó mediante la mezcla de dos corrientes: agua fresca y corriente residual de menor carga. Se logró que las corrientes cumplan con los requisitos de transferencia de masa, concentración de salida máxima del contaminante establecidos en la Tabla 4.13. Con respecto a la etapa de molienda, se recicla un 53% (7,1 m<sup>3</sup>/h agua regenerada) de la corriente residual, el 47% restante (6,2 m<sup>3</sup>/h) corresponde al agua pérdida durante el proceso de regeneración (clarificado). De esta forma, la corriente de ingreso a la molienda (13,3 m<sup>3</sup>/h), necesita de la mezcla de corrientes de agua fresca y regenerada para satisfacer los requisitos de transferencia de masa.

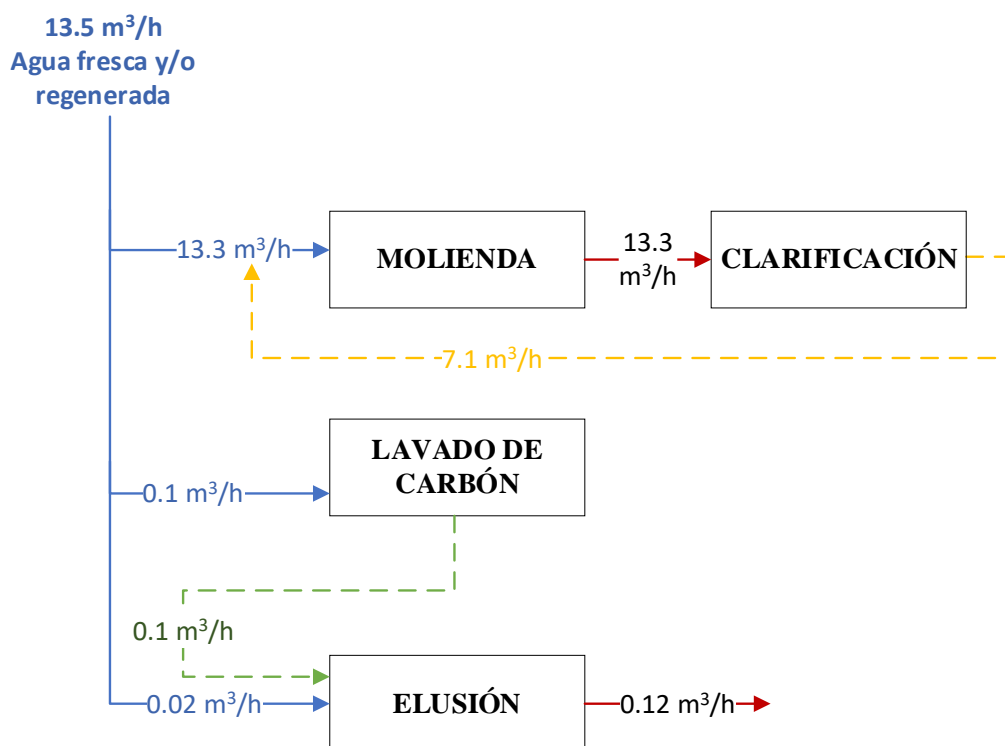


**Figura 4.19** Cuadrícula de diseño para Bonanza en términos de Fe

Nota: ( $C^*$ ) Límites de intervalos de concentración.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

Se analizó la posibilidad de reusar la corriente de la descarga doméstica (aguas grises) dentro de los procesos industriales mineros. De acuerdo a la Figura 4.20 se puede observar que la corriente residual no cumple con los requisitos para su reúso en otras operaciones ( $C_{i,ent} \leq C_{i,max}$ ). Y con respecto a las demás corrientes residuales, la que proviene de la fase del lavado de carbón puede reusarse en el proceso de elusión. De tal forma, que 0,1 m<sup>3</sup>/h son reusables y se genera una descarga nula en esta fase. La descarga final corresponde a la corriente proveniente de la etapa de elusión (0,12 m<sup>3</sup>/h) (Figura 4.22).

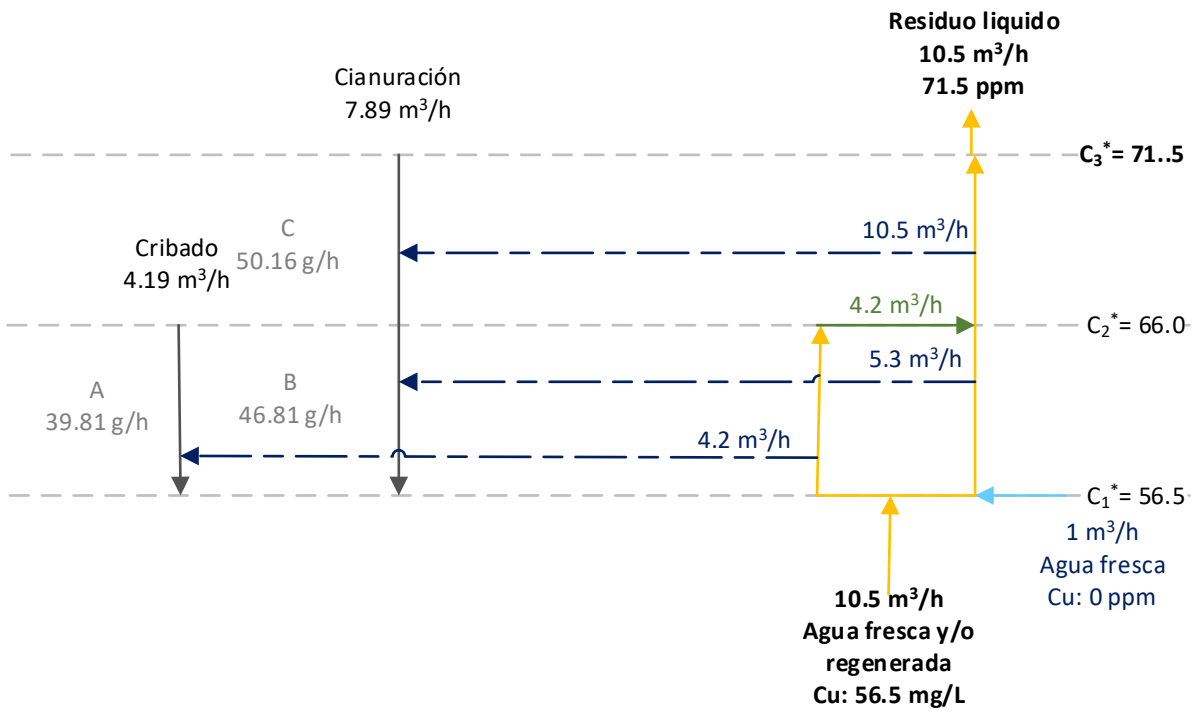


**Figura 4.20** Configuración de la red de residuos líquidos en términos de Fe para Bonanza

Nota: (Línea azul) Corrientes de agua fresca; (Línea amarilla) Corriente residual regenerada integrada a la corriente de agua fresca; (Línea verde) Corriente residual de reúso (Línea roja) Corriente de residuos líquidos.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

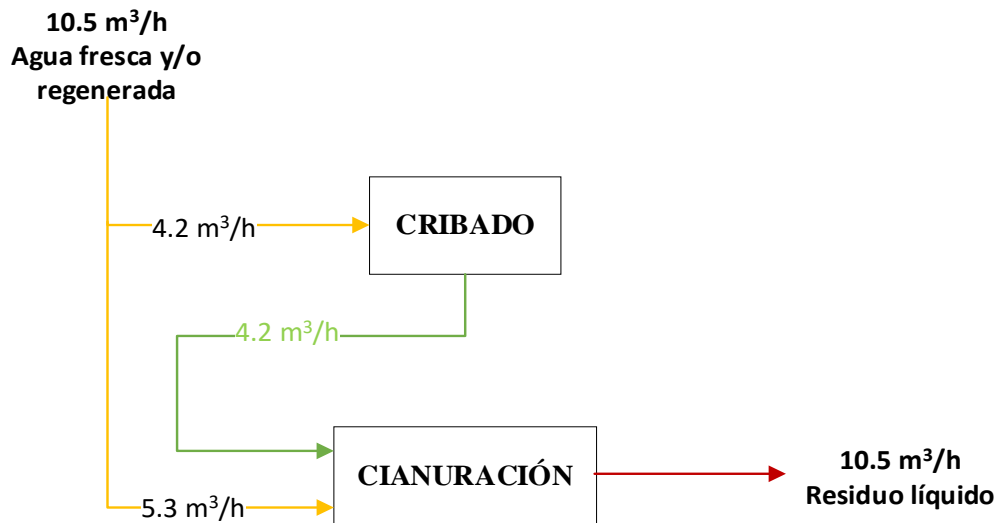
Con respecto a las corrientes líquidas presentes en la planta Rumicuri, la posible configuración a la red de agua se presenta en la Figura 4.22. La cuadrícula de diseño presentada en la Figura 4.21 muestra que la red se diseñó en base al consumo de agua mínimo (*Pinch*: 10,5 m<sup>3</sup>/h) y se basa en el reúso de corrientes con una alimentación de corrientes frescas y/o regeneradas. El residuo líquido del proceso de cribado puede reusarse en su totalidad (100%, 4,19 m<sup>3</sup>/h) dentro del proceso de cianuración, disminuyendo así el flujo de agua regenerada necesaria para esta etapa (5,3 m<sup>3</sup>/h). Además, para que la mezcla de corrientes de agua (regenerada y reusada) alcancen la concentración de salida máxima y la transferencia de masa (Tabla 4.13), fue necesario del ingreso de una corriente de agua fresca (1 m<sup>3</sup>/h).



**Figura 4.21** Cuadrícula de diseño para Rumicuri en términos de Cu

Nota: (C\*) Límites de intervalos de concentración.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

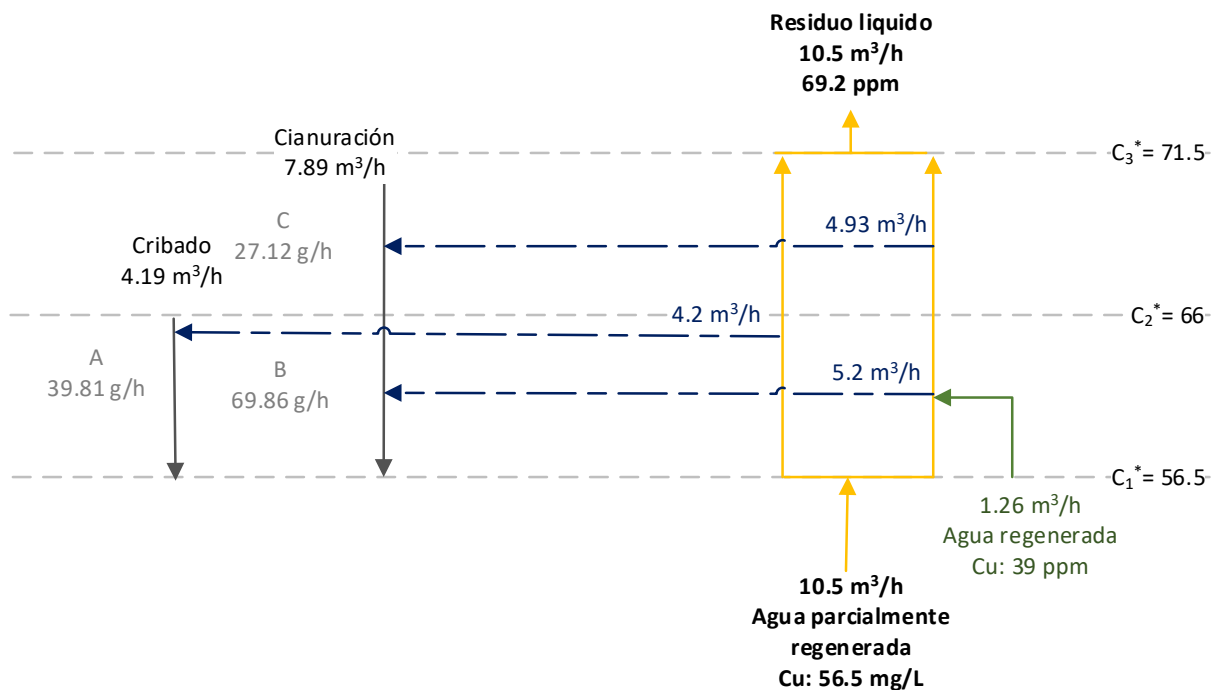


**Figura 4.22** Configuración de la red de residuos líquidos en términos de Cu para Rumicuri

Nota: (Línea amarilla) Corrientes de agua fresca y/o regenerada; (Línea verde) Corriente residual de reúso; (Línea roja) Corriente de residuos líquidos.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

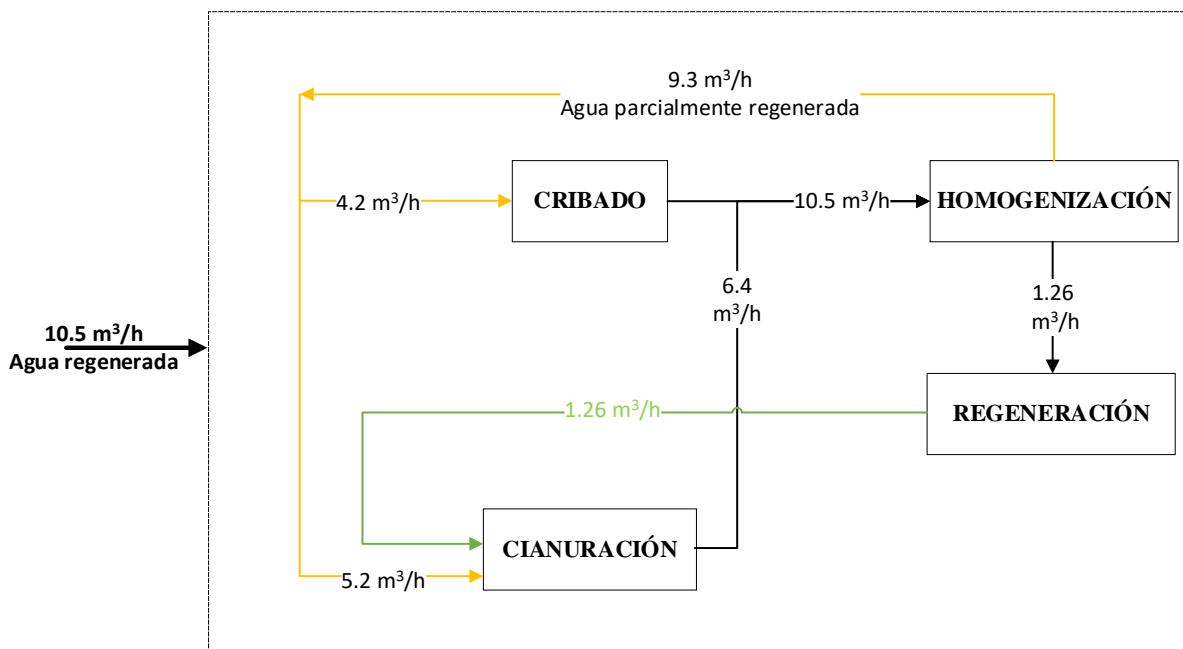
Otra posible configuración para la etapa de lixiviado (cianuración y cribado) se presenta en la Figura 4.24. La cuadrícula de diseño presentada en la Figura 4.23 evidencia que es posible la reutilización de toda la corriente líquida residual mediante el tratamiento parcial y total (regeneración) de dicha corriente. La red se diseñó en base al consumo de agua mínimo (*Pinch*: 10,5 m<sup>3</sup>/h). El proceso de cribado requiere un consumo de 4,2 m<sup>3</sup>/h de agua regenerada parcialmente, mientras que la cianuración de 3,6 m<sup>3</sup>/h. Para que la mezcla de las corrientes de entrada (fresca y/o regenerada y reusada) alcancen los requisitos (Tabla 4.13) fue necesario la integración de una corriente de agua regenerada completamente 1,26 m<sup>3</sup>/h. De tal manera, que se vuelve nula la corriente de agua fresca.



**Figura 4.23** Cuadrícula de diseño con enfoque de regeneración para Rumicuri en términos de Cu

Nota: (C\*) Límites de intervalos de concentración.  
ELABORACIÓN: Vilaña J.





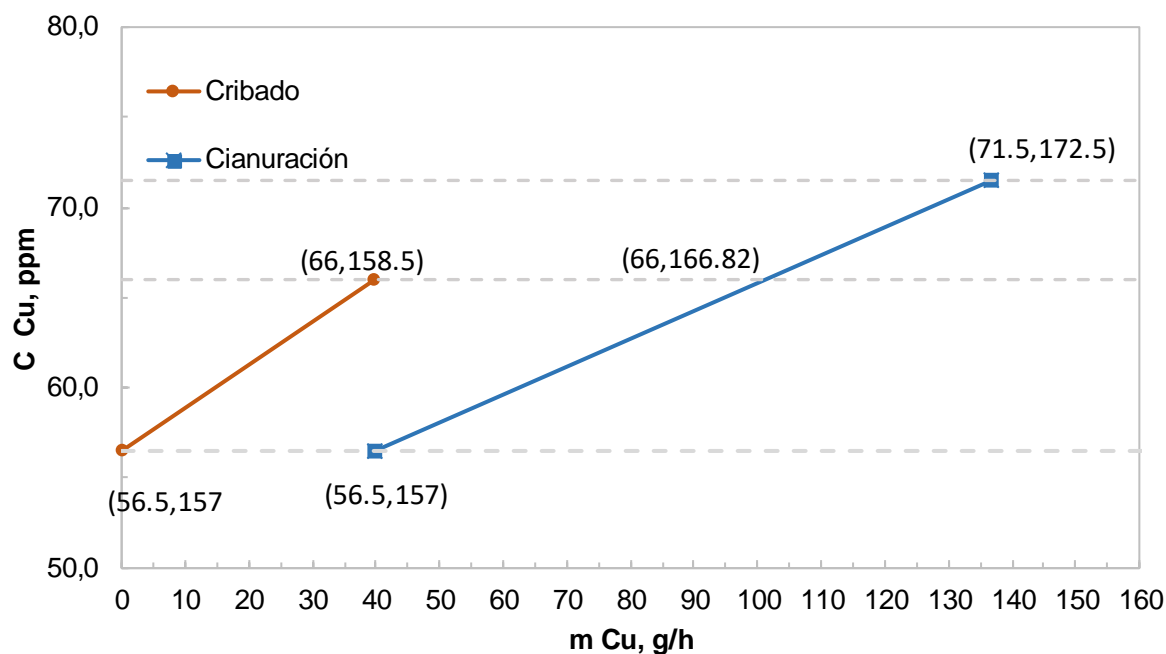
**Figura 4.24** Configuración de la red de residuos líquidos con regeneración en términos de Cu para Rumicuri

Nota: (Línea amarilla) Corrientes de agua fresca y/o regenerada; (Línea verde) Corriente residual de reúso; (Línea roja) Corriente de residuos líquidos.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.3.2 METODOLOGÍA WATER PINCH CON ENFOQUE DE MÚLTIPLES CONTAMINANTES

El propósito de este estudio es la minimización de agua mediante la mejor opción de reúso de corrientes líquidas residuales, de tal manera que es necesario establecer la concentración máxima a la que un proceso permite el ingreso de agua. En esta configuración de red de corrientes líquidas de dos contaminantes (Fe y Cu) se analizaron de acuerdo con su transferencia de masa. Se consideró al Cu como contaminante de referencia y en base a este se determinó la concentración de Fe (Figura 4.27). La operación de cribado termina en el intervalo 2, razón por lo cual se investiga la posibilidad de reúso de esta corriente dentro de la operación de cianuración. El agua que deja la operación de cribado tiene una concentración de Fe (158,5 ppm) y Cu (66 ppm) menor a la concentración del proceso de cianuración (Fe: 166,82; Cu: 66); por lo que es posible la reutilización de esta corriente.

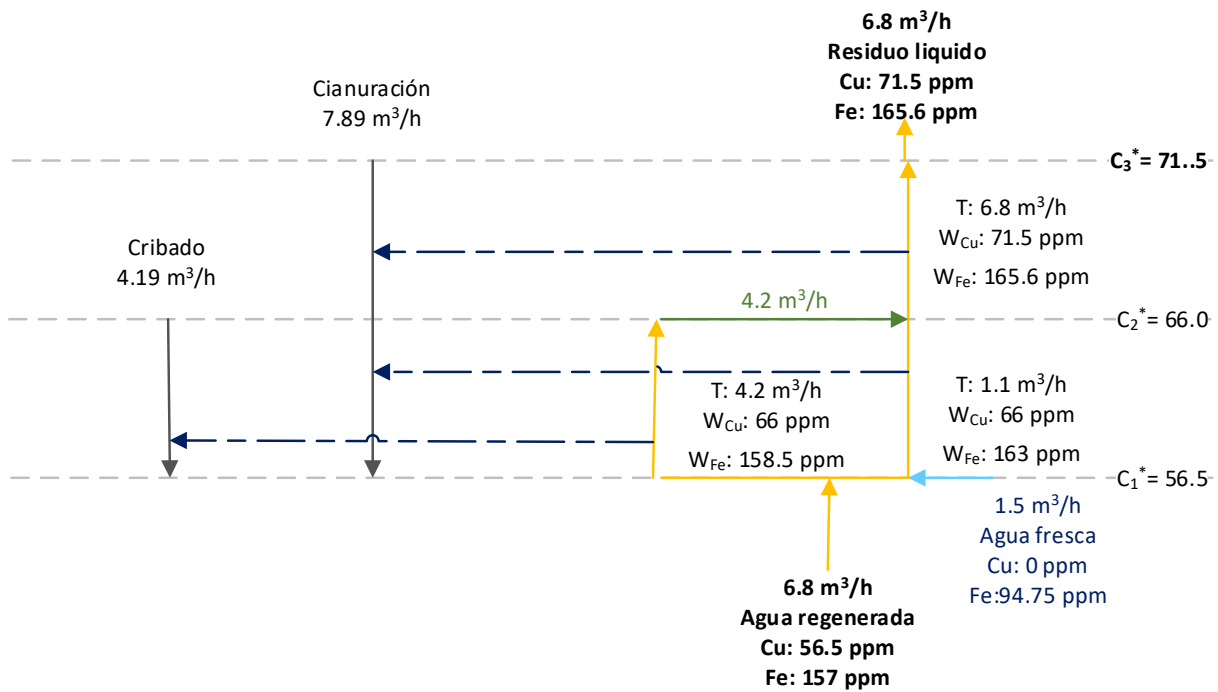


**Figura 4.25** Perfil límite de agua en función de Cu y Fe

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.3.2.1 Configuración de la red de corrientes líquidas para múltiples contaminantes

Para el diseño de la red de agua, se trazaron los límites de los intervalos de concentración y posteriormente se determinaron los caudales de agua en cada operación en función de la transferencia de masa de los contaminantes claves (Figura 4.26). Los cálculos realizados relacionados con los contaminantes seleccionados (Fe y Cu) para el enfoque de doble contaminante se presentan en el ANEXO 2. De tal manera, se logró disminuir el consumo total de agua fresca y/o regenerada a un 44%, dando un enfoque de doble contaminante ( $12,08 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $6,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

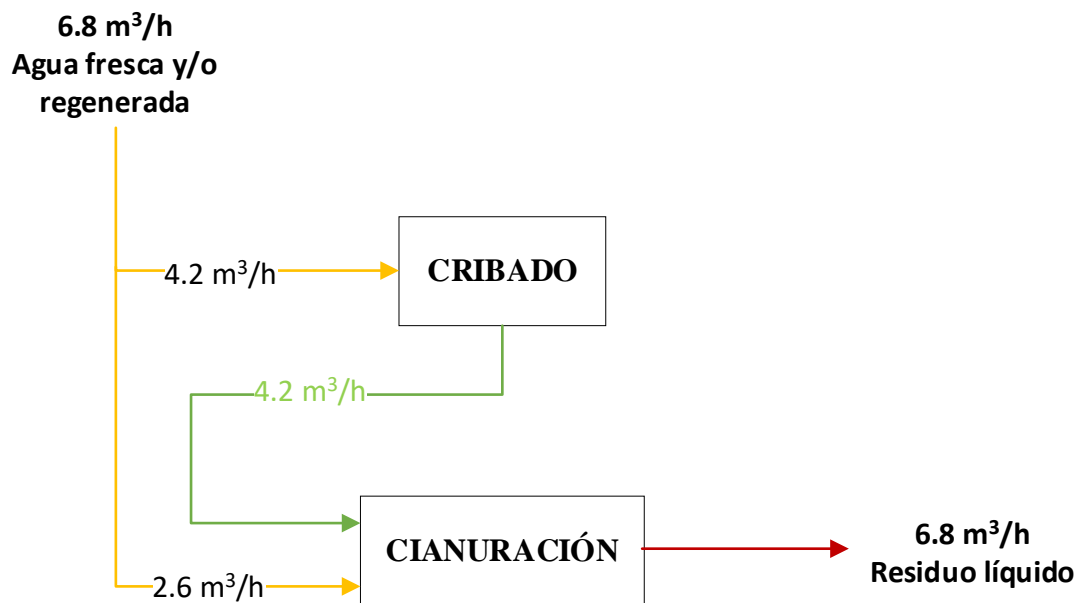


**Figura 4.26** Cuadrícula de diseño en términos de Cu y Fe.

Nota: ( $C^*$ ) Límites de intervalos de concentración.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

La Figura 4.27 muestra que la nueva red de corrientes líquidas obtuvo un consumo mínimo de agua de 6,8 m<sup>3</sup>/h, de la cual la corriente residual del cribado se reusó en un 100% (4,2 m<sup>3</sup>/h) en la etapa de cianuración. De tal forma, se evidenció que la demanda de agua fresca y/o regenerada en todo el sistema disminuyó. Asimismo, para alcanzar los requisitos de entrada de cada corriente ( $C_{i,ent} \leq C_{i,max}$ ) fue necesaria la integración de una corriente de agua fresca (1,5 m<sup>3</sup>/h) al proceso de cianuración. El ingreso de la corriente fresca tiene como objetivo alcanzar la transferencia de masa y concentraciones máximas establecidas anteriormente (Tabla 4.13).



**Figura 4.27** Configuración de la red de corrientes líquidas en términos de Fe y Cu

Nota: (Línea amarilla) Corrientes de agua fresca y/o regenerada; (Línea verde) Corriente residual de reúso; (Línea roja) Corriente de residuos líquidos.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.4 EVALUACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUO LÍQUIDOS INDUSTRIALES.

La Tabla 4.22, presenta las corrientes líquidas y los parámetros evaluados en la planta de tratamiento de residuos líquidos industriales procedentes de las etapas de cianuración y cribado. De acuerdo con los valores reportados en esta tabla, se muestra que la remoción total de contaminantes tuvo una eficiencia que oscila desde 14,63% hasta 73,82%.

Los parámetros que presentaron los valores más altos en remoción fueron CNT y CN- con valores de 41,75% y 73,82%. Por el contrario, los valores más bajos en remoción se presentaron en los sólidos (ST) con un valor de 14,63%. Con respecto a los metales (Fe y Cu), los valores de remoción oscilaron desde 14,65% hasta 30,97%, siendo el cobre (Cu) el metal que se removió más. La materia orgánica medida en términos de DQO obtuvo una remoción de 25,31% y en cuanto a sulfatos no presentó remoción alguna.

La planta de detoxificación consta de 5 etapas: homogenización, filtración, oxidación química, filtración/adsorción y sedimentación. El proceso de filtración en la etapa primaria presentó valores de eficiencia que van desde el 2% al 32% para ST y CNT respectivamente. Se puede considerar a la eliminación de ST como baja considerando que el sistema de filtración busca principalmente la eliminación/remoción de ST (Bonilla, 2017). Esta condición puede deberse a que el sistema se encuentra taponado o la dimensión de los sólidos presentes en la corriente residual a tratar es menor a la que fue diseñado el sistema (Dávila, 2020).

Con respecto a los demás procesos de la etapa terciaria: oxidación química, filtración/adsorción y sedimentación, tuvieron eficiencias de remoción de  $\text{CN}^-$  (14.30% al 50%), Cu (7,14% al 19,4%) y Sulfatos (2,94% al 18,18%). Teniendo en cuenta que el proceso de oxidación química busca la eliminación de cianuro libre ( $\text{CN}^-$ ) y de los complejos débiles de cianuro (WAD), se muestra que la eficiencia remoción de  $\text{CN}^-$  (50,02%) es mayor a la de CNT (5,74%). Esta deficiencia de rendimiento del proceso puede implicar una dosificación errónea del agente oxidante (Ramalho, 1996).

En general, durante todo el proceso de detoxificación los compuestos como sulfatos fueron los que menos eficiencia de remoción tuvieron, sin embargo, dentro de los límites normativos no presentan problema alguno. Los valores de eficiencia de la PT-RLes son propicios en cuanto a la recirculación de corrientes, no obstante, para vertidos en cuerpos de agua dulce, los parámetros de CNT,  $\text{CN}^-$ , DQO, ST, Fe y Cu no se ajustan a los límites de descarga de la Tabla 9 del Anexo 1 – TULSMA (MAE, 2015).

**Tabla 4.22***Parámetros evaluados en la PT-RLles del proceso minero*

Etapa	Operación	ID	Q (L/s)	pH in situ	T °C	CE (µs/cm)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	ST (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	CN <sup>-</sup> (mg/L)	CNt (mg/L)
<b>Pretratamiento</b>	Piscina de homogenización	S <sub>4.2</sub>	2,40	9,5	28,5	3140,0	835,5	600,0	3049,0	157,0	56,5	84,2	378,5
<b>Primaria</b>	Torres de filtración	S <sub>4.3</sub>	0,84	9,0	27,7	3220,0	723,0	900,0	2986,0	145,0	51,5	73,5	257,3
		%R	-	-	-	(13,46)	-	(2,07)	(7,64)	(8,85)	(12,70)	<b>(32,02)</b>	
<b>Terciaria</b>	Tratamiento químico	S <sub>4.4</sub>	0,84	8,4	26,5	2940,0	649,0	850,0	2947,0	133,5	49,0	36,8	242,5
		%R	-	-	(8,70)	(10,24)	(5,56)	(1,31)	(7,93)	(4,85)	<b>(50,02)</b>	(5,74)	
	Filtración/adsorción	S <sub>4.5</sub>	0,84	7,9	27,0	2950,0	625,5	825,0	2883,0	130,5	39,5	33,1	224,2
%R		-	-	-	(3,62)	(2,94)	(2,17)	(2,25)	<b>(19,39)</b>	(9,99)	(7,55)		
	Piscina de sedimentación	S <sub>4.6</sub>	0,84	7,7	26,9	2960,0	629,5	675,0	2847,0	145,0	42,0	25,7	238,9
		%R	(3,28)	(0,56)	-	-	<b>(18,18)</b>	(1,25)	-	-	<b>(22,22)</b>	-	
	Piscina de almacenamiento final	S <sub>4.7</sub>	0,84	7,7	27,4	2670,0	624,0	725,0	2603,0	134,0	39,0	22,1	220,5
		%R	-	-	(9,80)	(0,87)	-	(8,57)	(7,59)	(7,14)	(14,30)	(7,69)	
<b>% Remoción total</b>				-	-	(14,97)	(25,31)	-	(14,63)	(14,65)	<b>(30,97)</b>	<b>(73,82)</b>	<b>(41,75)</b>

Nota: (%R) Porcentaje de remoción en cada operación unitaria. (Q) Caudal. (T) Temperatura. (C) Conductividad. (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) Sulfatos. (ST) Sólidos

Totales.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

## **4.5 ESCENARIO PLANTEADO DE LA CONFIGURACIÓN DE LA RED DE AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA.**

### **4.5.1 ANÁLISIS DE ESCENARIOS**

#### **4.5.1.1 Escenario actual de la red de corrientes líquidas**

La configuración actual de la red de corrientes líquidas en el proceso de obtención del oro se expone en la Figura 4.29. El consumo de agua fresca y/o regenerada para todo el proceso de obtención del oro incluido la parte doméstica llega a ser de 27,9 m<sup>3</sup>/h. Con respecto a Bonanza la demanda de agua fresca y/o regenerada es de 15,6 m<sup>3</sup>/h y en Rumicuri es de 12,3 m<sup>3</sup>/h. El sistema actual de reciclaje de corrientes residuales líquidas se presenta mediante la práctica de un tratamiento parcial de aguas (clarificación – homogenización) y uno total (PT-RLles). Dicho sistema además muestra un porcentaje de reciclaje para mina Bonanza del 50% (7,84 m<sup>3</sup>/h - molienda) y para planta Rumicuri del 89% (10,9 m<sup>3</sup>/h – cianuración y cribado). En términos generales, el porcentaje de reciclaje en todo el proceso minero es del 67%. En lo que respecta a las corrientes residuales, se presenta una descarga global de 2,47 m<sup>3</sup>/h (9%).

#### **4.5.1.2 Escenario I: Flujo mínimo de agua con enfoque único contaminante, regeneración/reúso**

La Figura 4.30, muestra una posible configuración de la red de corrientes líquidas. En esta configuración se da un enfoque de regeneración-reúso. La demanda total de agua fresca y/o regenerada en todo el sistema estuvo alrededor de 24,5 m<sup>3</sup>/h. El consumo de agua fresca y/o regenerada en todo el sistema logra una optimización del 12% (3,4 m<sup>3</sup>/h). Además, este consumo se reduce hasta en un 13% (9,2 a 7,9 m<sup>3</sup>/h), correspondiendo a un consumo equivalente a 6,8 m<sup>3</sup>/h (Bonanza) y 1,1 m<sup>3</sup>/h (Rumicuri). Con respecto al reúso y reciclaje de las corrientes líquidas, este escenario alcanza un reúso del 18% (4,3 m<sup>3</sup>/h) y una regeneración general del 68% (16,6 m<sup>3</sup>/h). De igual manera, las corrientes residuales disminuyen un 9% (2,17 a 1,97 m<sup>3</sup>/h), esto

implica que la planta de tratamiento de aguas cianuradas logre tratar 1 m<sup>3</sup>/h (menos de su capacidad) y se descarguen menos aguas al medio.

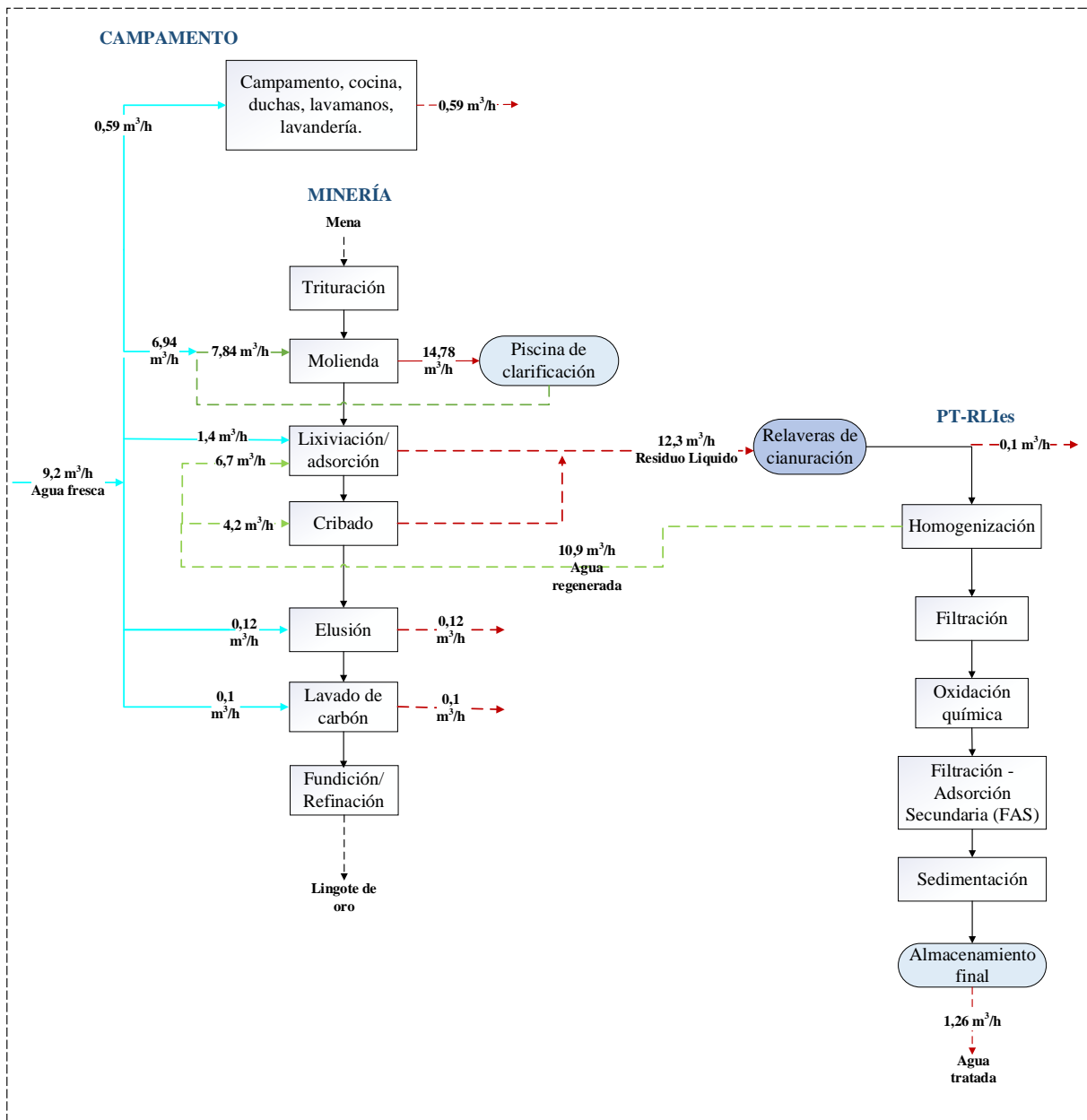
#### **4.5.1.3 Escenario II: Flujo mínimo de agua con enfoque único contaminante, reúso, regeneración/reciclaje.**

Otra configuración de red de corrientes líquidas se puede ver en la Figura 4.31. Esta configuración da un enfoque de reúso, regeneración y reciclaje considerando un único contaminante. La demanda total de agua fresca y/o regenerada en todo el sistema estuvo alrededor de 23,3 m<sup>3</sup>/h. El sistema logra una reducción de consumo de agua fresca y/o regenerada del 17% (4,6 m<sup>3</sup>/h). Con respecto al consumo de agua dulce se logra una reducción de hasta un 25% (2,3 m<sup>3</sup>/h), esta corriente en procesos de cianuración y cribado es nula, en lugar de eso, se usa la mezcla de corrientes regeneradas (parcial y total). En general, el sistema logra un reúso menor al 1% (0,1 m<sup>3</sup>/h) y un reciclaje del 76% (17,7 m<sup>3</sup>/h). Y con respecto a las corrientes de residuos líquidos se reduce en un 67% (2,17 m<sup>3</sup>/h a 0,71 m<sup>3</sup>/h).

#### **4.5.1.4 Escenario III: Flujo mínimo de agua con enfoque de doble contaminante: regeneración/reúso.**

La Figura 4.32 muestra la posible configuración de la red de corrientes líquidas. En esta configuración se da un enfoque de regeneración-reúso considerando dos contaminantes. El consumo total de agua fresca y/o regenerada llega a ser de 20,8 m<sup>3</sup>/h, lo que representa una disminución del 26% (7,1 m<sup>3</sup>/h). En general, el sistema logra un consumo de agua dulce del 40% (8,4 m<sup>3</sup>/h), un reúso del 21% (4,3 m<sup>3</sup>/h) y un reciclaje del 60% (12,4 m<sup>3</sup>/h). De igual forma, las corrientes residuales disminuyeron un 9% (2,17 a 1,97 m<sup>3</sup>/h).

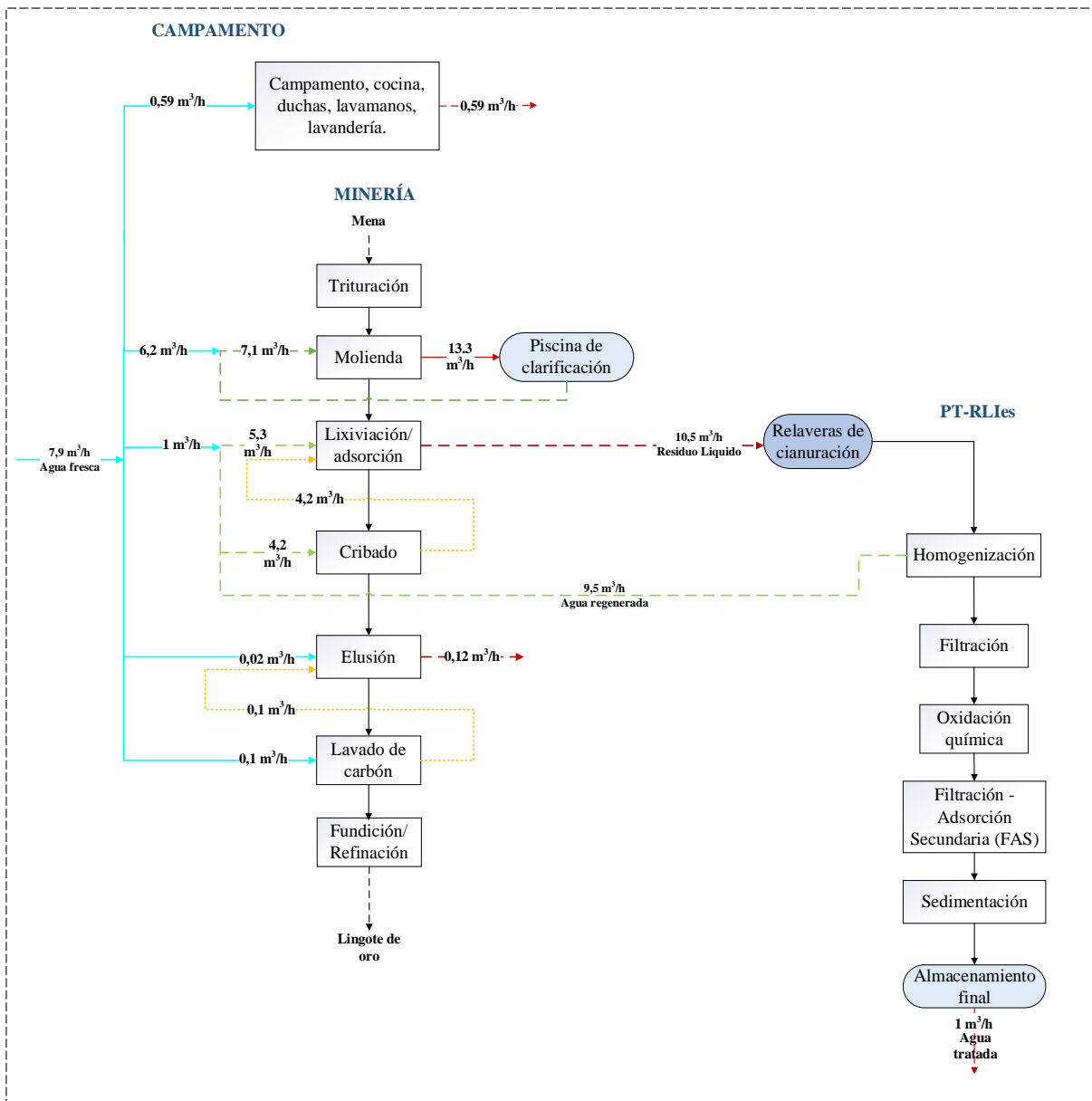




**Figura 4.28** Escenario actual de la red de corrientes líquidas

Nota: (Línea celeste) Ingreso de agua fresca para compensar el consumo o pérdida del agua; (Línea verde) Ingreso agua regenerada; (Línea roja) Corriente de residuos líquidos.

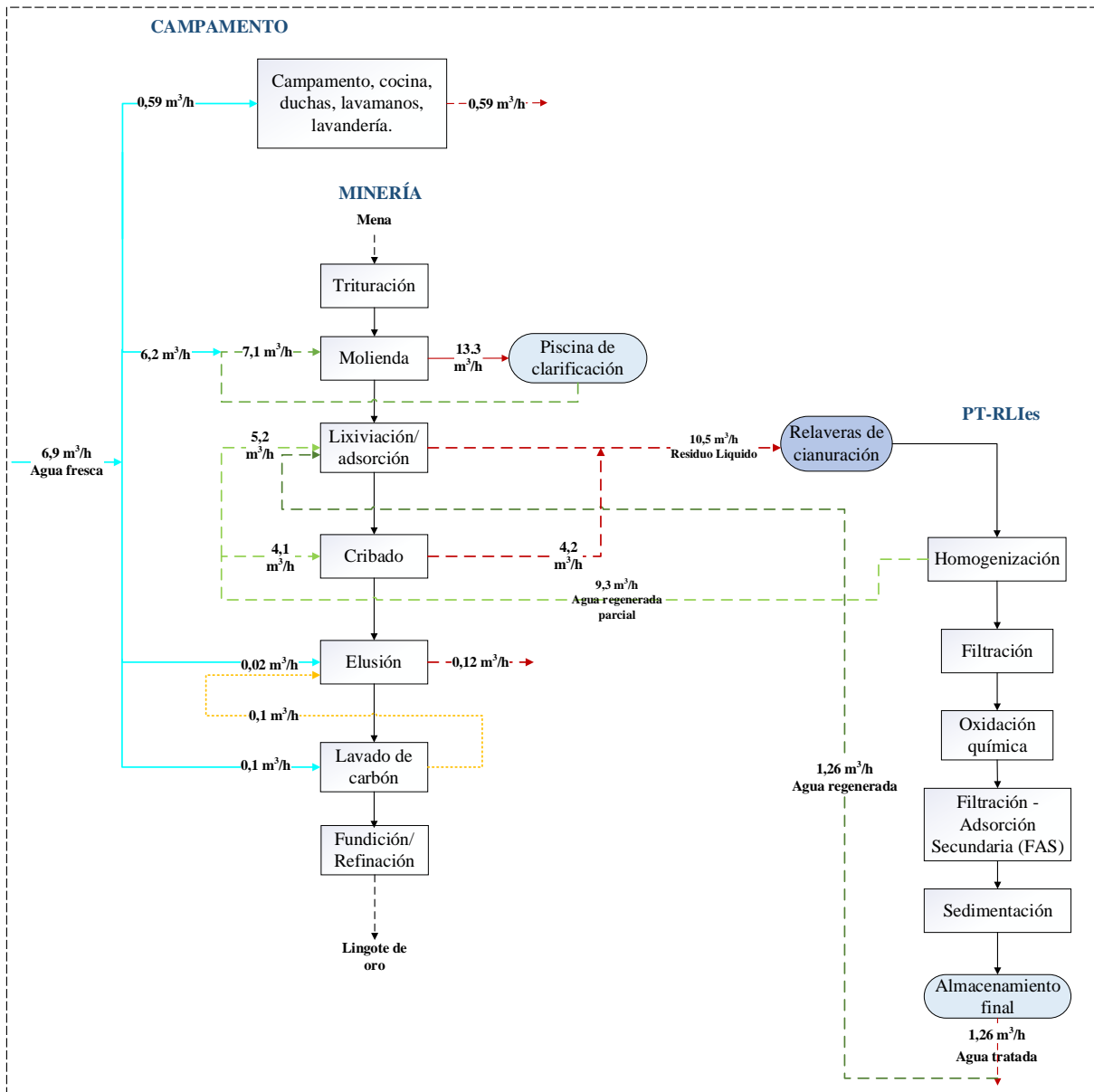
ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 4.29** Escenario I: Flujo mínimo de agua con enfoque de un solo contaminante: regeneración/reúso

Nota: (Línea celeste) Ingreso de agua fresca para compensar el consumo o pérdida del agua; (Línea verde) Ingreso agua regenerada; (Línea amarilla) Corriente residual de reúso; (Línea roja) Corriente de residuos líquidos.

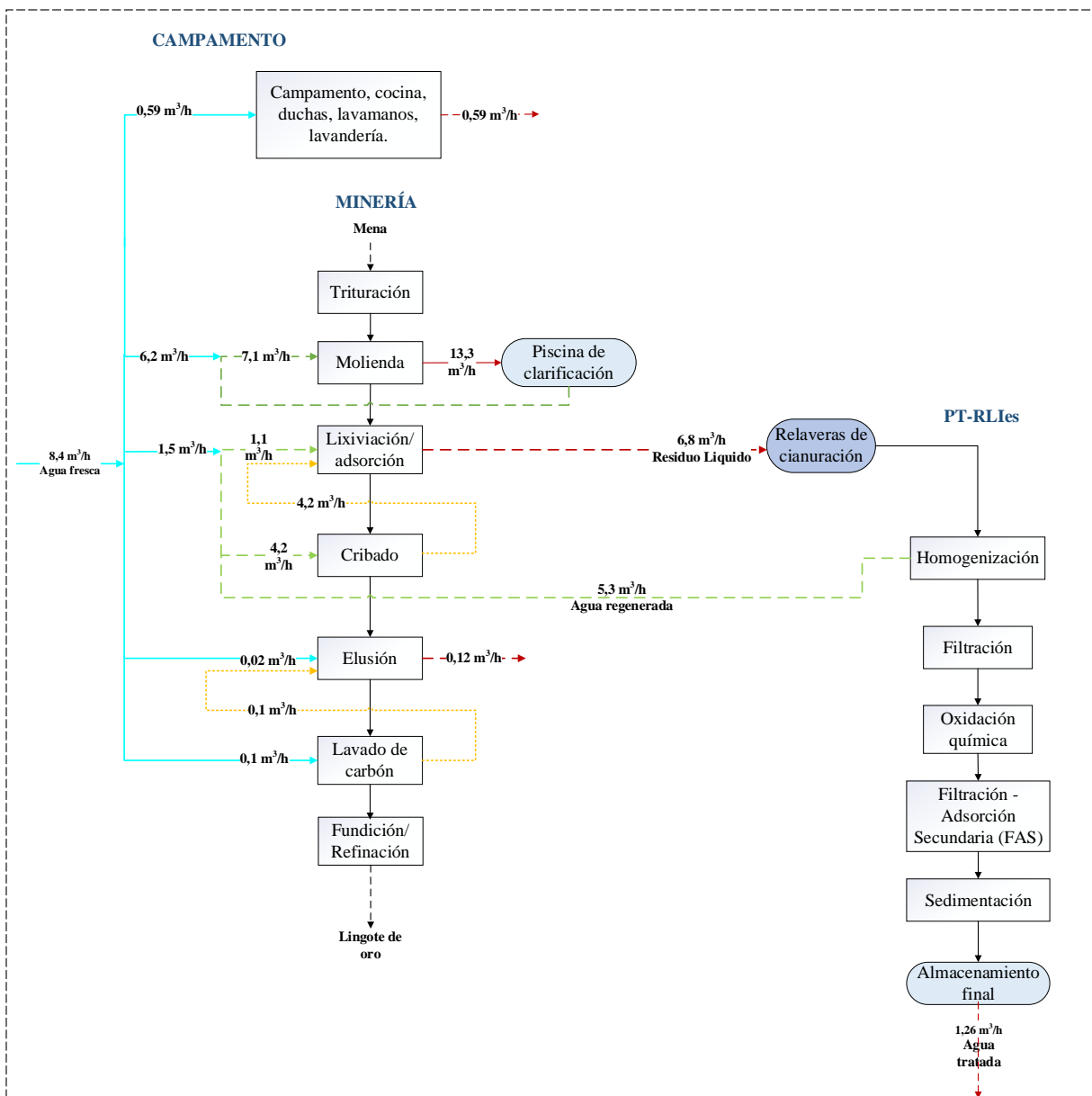
ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 4.30** Escenario II: Flujo mínimo de agua con enfoque de un solo contaminante: reúso, regeneración/reciclaje

Nota: (Línea celeste) Ingreso de agua fresca para compensar el consumo o pérdida del agua; (Línea verde) Ingreso agua regenerada; (Línea amarilla) Corriente residual de reúso; (Línea roja) Corriente de residuos líquidos.

ELABORACIÓN: Vilaña J.



**Figura 4.31** Escenario III: Flujo mínimo de agua con enfoque doble contaminante

Nota: (Línea celeste) Ingreso de agua fresca para compensar el consumo o pérdida del agua; (Línea verde) Ingreso agua regenerada; (Línea amarilla) Corriente residual de reúso; (Línea roja) Corriente de residuos líquidos.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

#### 4.5.2 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL ESCENARIO ÓPTIMO

Los criterios seleccionados para la comparación de escenarios se presentan en la Tabla 4.23. En resumen, se compararon 3 escenarios con enfoques diferentes respecto al escenario corrientes líquidas actual (Figura 4.34).

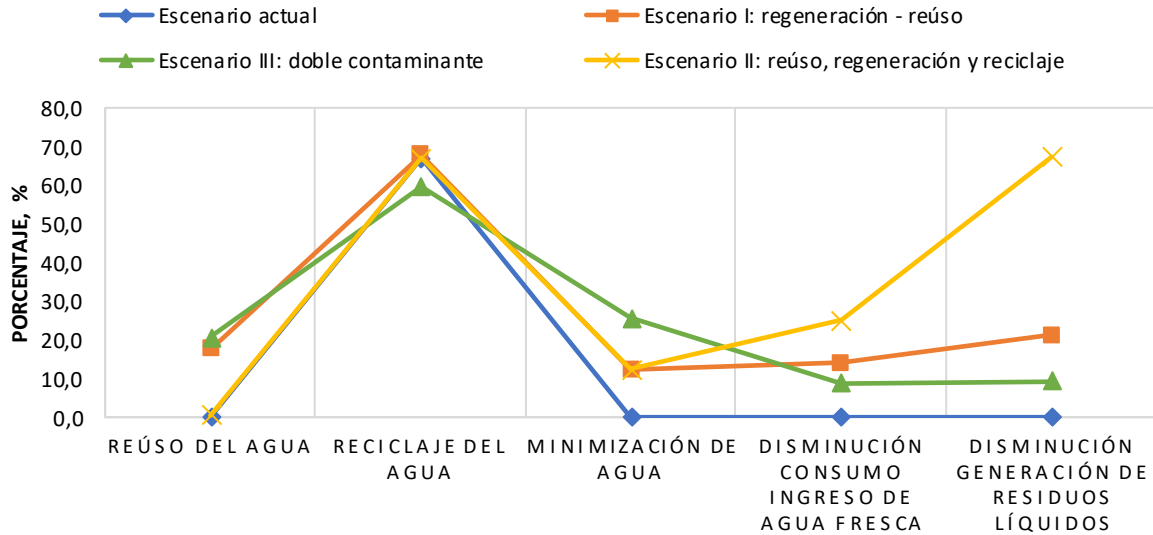
**Tabla 4.23**  
*Comparación de escenarios*

Aspecto	Unidad	Escenario actual	Único Contaminante		Escenario III: doble contaminante
			Escenario I: regeneración – reúso	Escenario II: regeneración y reciclaje	
Flujo de agua	(m <sup>3</sup> /h)	27,9	24,5	24,5	20,8
Flujo de agua fresca	(m <sup>3</sup> /h)	9,2	7,9	6,9	8,4
Flujo de agua reciclada	(m <sup>3</sup> /h)	18,7	16,6	16,4	12,4
Flujo de agua reusada	(m <sup>3</sup> /h)	0	4,3	0,1	4,3
Flujo de residuos líquidos	(m <sup>3</sup> /h)	2,2	1,7	0,7	2,0
Reúso del agua	%	0	18	0,4	21
Reciclaje del agua	%	67	68	67	60
Minimización de agua	%	0	12	12	26
Disminución consumo ingreso de agua fresca	%	0	14	25	9
Disminución generación de residuos líquidos	%	0	21	67	9

ELABORACIÓN: Vilaña J.

Los escenarios I y III son los que abordaron un mayor reúso de residuos líquidos (18% - 4,3 m<sup>3</sup>/h; 21% - 4,3 m<sup>3</sup>/h) y un menor consumo de agua fresca (7,9 – 8,4 m<sup>3</sup>/h). A su vez estos escenarios presentaron una baja tasa de consumo de agua (27,9 a 24,5 y 20,8 m<sup>3</sup>/h) y una disminución del 21% y 9% (1,7 m<sup>3</sup>/h – 2 m<sup>3</sup>/h) en la generación de residuos. Tanto el escenario I como el III presentaron valores altos en reciclaje del agua 67% y 60% respectivamente, esto en comparación con el escenario actual que posee un valor del 67%. En cuanto a el escenario II, este fue en el que más se redujo el consumo de agua fresca (25%; 6,9 m<sup>3</sup>/h), con un valor en el reciclaje del 67% (16,4 m<sup>3</sup>/h). Los valores del agua reusada son muy bajos en este escenario (0,4%), pero la disminución de residuos líquidos presenta el valor más potencial en comparación con los demás escenarios (67%). Por otro lado, en comparación con el enfoque de un solo

contaminante, la minimización del agua a través de un doble contaminante (Escenario III) es más precisa, pero no necesariamente refleja el escenario óptimo.



**Figura 4.32** Comparación de escenarios.

ELABORACIÓN: Vilaña J.

En definitiva, el escenario II fue el que presentó mayores beneficios para la red de corrientes líquidas de las plantas de estudio (Bonanza y Rumicuri). Esta red propone una reducción del consumo de agua fresca y/o regenerada del 12%, lo que representa un ahorro de 3,4 m<sup>3</sup>/h. De modo que, la generación de residuos líquidos también disminuye a un 67%, lo que implica menor residuos a tratar y descargar.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- La huella hídrica actual del proceso minero es de  $141,6 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{oro}}$ , que consta de una huella hídrica azul igual a  $61,6 \text{ m}^3$  y una huella hídrica gris de  $80 \text{ m}^3$ . Este último valor supusiera ser mayor si no se trataran de cierta manera los residuos líquidos. El agua consumida en la etapa de molienda fue la que más contribuyó a la huella hídrica azul mientras que las aguas lixiviadas contribuyeron a la huella hídrica gris. El valor de la huella hídrica azul con respecto a la huella hídrica gris es menos representativo, por lo que se demuestra que el mayor problema de la minería de oro está ligado a la perturbación de la calidad del recurso agua por contaminación de cianuro.
- Para procesar 1 tonelada de roca - sólidos se necesita de  $5,51 \text{ m}^3$  de agua fresca y  $6,1 \text{ kg}$  de productos químicos. La mayor incidencia en cuanto a consumo de agua se presentó en las etapas de molienda (54%) y cianuración (30%). En cuanto a la generación de residuos líquidos, el volumen alcanzado fue de  $0,32 \text{ m}^3/\text{tsólidos}$ . En este caso, las principales operaciones generadoras de residuos líquidos fueron la cianuración y el cribado (85%), mientras que los volúmenes de descarga de las operaciones como elusión y lavado de carbón fueron casi despreciables (15%).
- La caracterización del residuo líquido después del proceso productivo (lixiviación y cribado) reveló que la corriente de descarga contiene altas concentraciones de cianuros en su forma libre y total ( $110,24 \text{ mg/L}$  y  $363,81 \text{ mg/L}$ ). Pese al tratamiento que se da a la corriente de descarga, tras el proceso de depuración, mantiene concentraciones altas de los mismos ( $22,1 \text{ mg/L}$  y  $220,5 \text{ mg/L}$ ). El proceso de depuración en cuanto a cianuros alcanza una eficiencia de remoción del 74% y 41% respectivamente, sin embargo, sigue siendo un proceso poco eficiente considerando que la normativa establece un límite de  $0,1 \text{ mg/L}$ . El efluente previo al tratamiento también presentó un alto contenido orgánico (DQO:  $875 \text{ mg/L}$ ), valor

asociado a la presencia de cianuros. La presencia de Fe y Cu constituyeron un aporte significativo en la concentración de metales (133,25 mg/L y 37,75 mg/L), cuya remoción en el tratamiento resultó ser poco eficiente (14,6%). Con respecto a los residuos líquidos provenientes de las etapas de molienda, elusión y lavado de carbón, reflejaron concentraciones altas de ST (219 mg/L a 18225 mg/L) y de cianuros totales (520,18 mg/L). Estas corrientes residuales no poseen tratamiento alguno, he ahí la importancia de establecer nuevas configuraciones de reúso y evitar descargas.

- Con la aplicación de la metodología *Pinch*, considerando únicos contaminantes, se determinó el flujo mínimo de agua para un sistema con reúso de residuos líquidos. Se identificaron las corrientes a analizar del campamento minero Bonanza (S<sub>1.1</sub>, S<sub>3.1</sub> y S<sub>3.2</sub>) y de la planta de beneficio Rumicuri (S<sub>2.1</sub> y S<sub>2.2</sub>) y se determinaron los contaminantes claves (DQO, ST, Fe y Cu). Los contaminantes se analizaron por separado y se determinó el flujo mínimo para cada uno de ellos. Para las operaciones en mina Bonanza la cantidad de agua fresca se redujo a 7,17 m<sup>3</sup>; 13,45 m<sup>3</sup> y 13,53 m<sup>3</sup> (DQO, ST y Fe) y para las operaciones en la planta de beneficio Rumicuri la cantidad de agua fue 7,89 m<sup>3</sup>; 8,03 m<sup>3</sup>; 8,3 m<sup>3</sup> y 10,54 m<sup>3</sup> (DQO, ST, Fe y Cu). Como es claro, la minimización es menor para Fe y Cu, por lo tanto, se consideraron como los contaminantes limitantes para cada sistema respectivamente (Bonanza y Rumicuri). Ahora, considerando la metodología *Pinch* para múltiples contaminantes, se analizaron dos contaminantes en simultáneo (Fe y Cu) y se analizó su transferencia de masa de un contaminante respecto a otro. Se determinó que la cantidad de agua se reduce a 6,8 m<sup>3</sup>.
- Dentro de las configuraciones de las corrientes, se analizó la posibilidad de reusar las corrientes líquidas de un proceso a otro considerando los requisitos de entrada a cada corriente para no afectar su rendimiento operacional. Por lo tanto, la corriente residual gris (descarga doméstica) no cumplió con los requisitos de transferencia de masa de contaminantes y concentraciones máximas de ingreso.
- El objetivo de la investigación tiene que ver con encontrar una alternativa óptima de minimización de aguas dentro del proceso productivo, para poder configurar su



red de corrientes líquidas. La optimización global del escenario II, evidenció un conjunto de aportes ambientales descritos principalmente como minimización de agua (12%) y generación de residuos líquidos (67%), logrando así un enfoque de cero descargas.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Evaluar la posibilidad de regenerar corrientes residuales dentro de mina Bonanza para un mayor reciclaje.
- Dar prioridad al correcto tratamiento de residuos líquidos, puesto que se evidencia que entre menos contaminantes tenga la corriente, la minimización del agua va a ser mayor.
- Se recomienda considerar más contaminantes y operaciones, así como otras posibilidades de *Water Pinch*, como la regeneración y el reciclaje en estudios de red de agua, puesto que los cálculos son más precisos.
- Si bien, la metodología de la Huella Hídrica en conjunto con el análisis *Pinch* permite minimizar el consumo de agua mediante reciclaje o reúso, en la práctica la potencialidad de lograrlo podría verse limitada debido a temas económicos y logísticos, por ende, es necesario comparar los resultados con la realidad de la zona de estudio y establecer las limitantes.
- Fomentar la investigación de la huella hídrica gris en la minería, puesto que, evidencia el grado de contaminación del recurso hídrico por la actividad misma.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, A., & Martínez, E. (2010). *Agua: Un derecho humano fundamental* (1a ed., Vol. 21). Abya-Yala.
- Agbesi, M., Adiyiah, J., & Okwaning, E. (2013). Physico-chemical Characteristics of a Gold Mining Tailings Dam Wastewater. *Environmental Science and Engineering*, 2, 469–477.
- Alva, A., Kokossis, A. C., & Smith, R. (2007). A conceptual decomposition of MINLP models for the design of water-using systems. *International Journal of Environment and Pollution*, 29(1–3), 177–205.
- Anning, C., Wang, J., Chen, P., & Batmunkh, I. (2019). Determination and detoxification of cyanide in gold mine tailings: A review. *Water Management & Research*, 1–10.
- Aranda, G. (2011). EIA: Planta de Desorción. *Tecnología en Recursos y Servicios, S.A.*, 105.
- Arias Lafargue, T., Fernández Compta, D., Sánchez Rodríguez, Y., & Portuondo Lasserra, A. (2017). Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro-Barita de Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 37(3), 461–476.
- Balla, W. H., Rabah, A. A., & Abdallah, B. K. (2018). Pinch Analysis of Sugarcane Refinery Water Integration. *Sugar Tech*, 20(2), 122–134.
- Baquero Muñoz, A. T. (2017). *Aplicabilidad del concepto de huella hídrica en la minería aurífera*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Bermeo, V. P., & Vicuña, B. F. (2019). *Estudio De Impacto Ambiental Para La Etapa De Beneficio De La Concesión Minera Expobonanza S.a Ubicada En El Cantón Camilo Ponce Enríquez*. Universidad Politecnica Salesiana Sede Cuenca.
- Bonilla, L. (2017). Tratamiento de aguas residuales de textilería utilizando carbón activado. En *Grupo de capacitación e investigación* (1a ed.).
- Cárcamo, H. (2003). Operaciones Mecánicas. *Universidad Católica del Norte*, 174.

- Chen, W., Hong, J., Wang, C., Sun, L., Zhang, T., Zhai, Y., & Zhang, Q. (2021). Water footprint assessment of gold refining: Case study based on life cycle assessment. *Ecological Indicators*, 122, 1–9.
- Concha, E. (2017). Minería global contemporánea o financiarizada. *Ola Financiera*, 10(27), 81–116.
- Cruz González, J. K. (2012). *Análisis De La Huella Hídrica En La Explotación Minera De Carbón A Cielo Abierto En La Mina De El Cerrejón (La Guajira)*. Universidad Piloto de Colombia.
- Dávila, W. (2020). *Evaluación Operacional De Una Planta De Tratamiento De Residuos Líquidos Procedentes Del Proceso De Cianuración Para Extracción De Oro: Caso Expausa*. Escuela Politécnica Nacional.
- Fajardo, J., Burbano, D., Burbano, E., Néstor, A., & Rosero, M. (2010). Estudio De Métodos Químicos De Remoción De Cianuro Presente En Residuos De Cianuración Provenientes Del Proceso De Extracción De Oro De Veta En El Departamento De Nariño. *Revista Luna Azul*, 31, 8–16.
- Fernández, B. (2007). *Desarrollo de un nuevo metodo de tratamiento de cianuro de aguas residuales de mina*. Universidad de Oviedo.
- Frías, M., Fátima, D., Suárez, J., Díaz, I., Alonso, J., & Liriano, E. (2015). Estudio de la cinética de lixiviación de oro y plata de una mena cuarzosa de origen epitermal. *XI Congreso Cubano de Geología*, 1–9.
- Gallardo, C., & Dávila, T. (2020). *Propuesta De Diseño De Un Biofiltro Híbrido Para El Tratamiento De Aguas Grises Del Campamento Minero Bonanza*. Escuela Politecnica Nacional.
- García, Á., & Rodríguez, R. (2006). *Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente*. Instituto Geológico y Minero de España.
- González, A., & Echavarría, N. (2016). Manual de Producción y Consumo Sostenible Gestión del Recurso Hídrico: Minería de Oro. *Corporacion Autonoma de Antiquía*,

73.

- Guelli Ulson, S. M. D. A., Xavier, M. F., Da Silva, A., & Ulson De Souza, A. A. (2011). Water reuse and wastewater minimization in chemical industries using differentiated regeneration of contaminants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *50*(12), 7428–7436.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. En *Earthscan* (Vol. 31, Número 2).
- Hu, N., Feng, X., & Deng, C. (2011). Optimal design of multiple-contaminant regeneration reuse water networks with process decomposition. *Chemical Engineering Journal*, *173*(1), 80–91.
- Khezri, S. M., Lotfi, F., Tabibian, S., & Erfani, Z. (2010). Application of water pinch technology for water and wastewater minimization in aluminum anodizing industries. *International Journal of Science, Environment and Technology*, *7*(2), 281–290.
- Kongolo, K., & Mwema, M. . (1998). The extractive metallurgy of gold. *Hyperfine Interactions*, *11*, 281–289.
- Kuhn, R. (2011). No todo lo que brilla es oro: conflictos socio ambientales alrededor de dos proyectos de minería a gran escala en el Ecuador. *Universidad Andina Simón Bolívar Sede*, 88.
- Kuo, W., & Smith, R. (1998). Water-Use and Effluent Treatment. *Trans IChem*, *76*.
- Liu, H., Ren, L., Zhuo, H., & Fu, S. (2019). Water footprint and water pinch analysis in ethanol industrial production for water management. *Water*, *11*(3), 1–11.
- MAE. (2020). Línea de base nacional para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala de Oro en Ecuador, Conforme la Convención de Minamata sobre Mercurio. *Ministerio del Ambiente*, 1–89.
- Mariano Romero, C. E., Alcocer Yamanaka, V. H., & Morales Manzanares, E. (2005).

- Diseño de sistemas hidráulicos bajo criterios de optimización de puntos de pliegue y múltiples criterios. *Ingeniería hidráulica en México*, 20, 31–42.
- Mason de la Fuente, S. (2017). Análisis de factibilidad sobre la reutilización de las aguas servidas de alto Hospocio en la minería del cobre de la I región de Tarapacá. En *Universidad Técnica Federico Santa María*.
- Mendez, R., Vidal, G., Lober, K., & Marquez, F. (2007). Produccion limpia en la Industria curtiembre. En *Universidad de Santiago de Compostela* (Vol. 1).
- MINMINAS. (2015). Guía para la elaboración del programa de uso eficiente y ahorro del agua en la minería de metales preciosos y carbón PUEAA. *Ministerio de Minas y Energía Universidad de Cordoba*, 52.
- Mohammadnejad, S., Ataei, A., Bidhendi, G. R. N., Mehrdadi, N., Ebadati, F., & Lotfi, F. (2012). Water pinch analysis for water and wastewater minimization in Tehran oil refinery considering three contaminants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(5), 2709–2728.
- Molar Vázquez, M. A. (2014). *Consumo de agua en un sistema de multicomponentes aplicando el punto de pliegue*. Universidad Veracruzana.
- Montes, C., & Cantallopts, J. (2019). Consumo de agua en la minería del cobre al 2018. En *Ministerio de Minería Chile*.
- Mudd, G. M. (2008). Sustainability reporting and water resources: A preliminary assessment of embodied water and sustainable mining. *Mine Water and the Environment*, 27(3), 136–144.
- Nemati, K., Romdhana, H., & Lameloise, M. L. (2019). Pinch methods for efficient use of water in food industry: A survey review. *Sustainability*, 11, 1–26.
- Northey, S. A., Mudd, G. M., Saarivuori, E., Wessman-Jääskeläinen, H., & Haque, N. (2016). Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *Journal of Cleaner Production*, 135, 1098–1116.
- Pacheco, L. A., & Durán, M. del C. (2007). Uso del agua en la industria minera.

*Tecnología, Ciencia, Educación*, 22(1), 15–29.

- Peña, E., & Menéndez, J. M. (2016). Environmental study of gold mining tailings in the Ponce Enriquez mining area (Ecuador). *DYNA*, 83(195), 237–245.
- Pineda, M. (2015). *Diseño De Una Planta Para Desorción De Carbón Activado Por El Método Zadra, En Sominur Cía. Ltda. Ubicada En El Distrito Minero Bella Rica*. Universidad Técnica de Machala.
- Prakash, R., & Shenoy, U. V. (2005). Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations. *Chemical Engineering Science*, 60(1), 255–268.
- Prakotpol, D., & Srinophakun, T. (2004). GAPinch: Genetic algorithm toolbox for water pinch technology. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(2), 203–217.
- Priya, G. S. K., & Bandyopadhyay, S. (2017). Multiple objectives Pinch Analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 119, 128–141.
- Ramalho, R. S. (1996). Tratamiento de Aguas Residuales. En *Reverté*.
- Rašković, P. (2010). Water Pinch Technology for Designing Wastewater Reduction and Water Conservation Systems. *Working Paper*, 26.
- Registro Oficial N° 517. (2011). *Ley de Minería*. 1–47.
- Rivela, B., Méndez, R., Bornhardt, C., & Vidal, G. (2004). Towards a cleaner production in developing countries: A case study in a Chilean tannery. *Waste Management and Research*, 22(3), 131–141.
- Rodríguez, C., Baeza, S., Campero, C., Matsuda, C., Veas, M. A., Romero, L., Del Piano, C., Gordillo, F., Vicuña, S., Bonelli, S., Donoso, G., Sauma, E., Gironás, J., Pica, A., Valdés, J. M., Barton, J., Tapia, C., & Frías, D. (2015). *Desafíos En Agua Y Energía En Regiones Mineras Deserticas* (p. 172).
- Rodríguez Mur, I. C. (2017). Implementación tecnologías limpias en unidades mineras

- ubicadas en la zona aurífera del departamento de Antioquia. *Teknos revista científica*, 17(1), 30.
- Rodriguez, R. (2019). *Ampliación De Proceso Bonanza E Instalación De Planta Rumicuri - Ecuador*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Rolén, A. (2015). *Water Pinch Analysis of a Lignocellulosic Ethanol Production Process*. 50–63.
- Romero, J. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales Romero R*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ros, A. (2017). *Recopilación sobre la metalurgia del oro*.
- Sanchez, F., Jaramillo, O., & Verdugo, N. (2010). *Estudio Nacional del Agua: Agua Superficial*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Sánchez, L. E. (2005). Manejo De Residuos Solidos En Minería. *II Curso Internacional de aspectos geológicos de protección ambiental*, 15, 239–250.
- Severiche, C. A., & González, H. (2012). *Evaluación Analítica Para La Determinación De Sulfatos En Aguas Por Método Turbidimétrico Modificado*. 3(2), 6–11.
- Silva, P. K., Vida, E. De, & Mina, D. (2016). *Residuos Mineros* (p. 13). Universidad Central de Venezuela.
- Skouteris, G., Ouki, S., Foo, D., Saroj, D., Altini, M., Melidis, P., Cowley, B., Ells, G., Palmer, S., & O'Dell, S. (2018). Water footprint and water pinch analysis techniques for sustainable water management in the brick-manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 172, 786–794.
- Smith, A., & Mudder, T. (1996). *Tratamiento de residuos de cianuración*. Mining Journal Books.
- SONAMI. (2018). *Informe Consumo de Agua en Minería* (p. 24). Sociedad Nacional de Minería.
- Thevendiraraj, S., Klemeš, J., Paz, D., Aso, G., & Cardenas, G. J. (2003). Water and

- wastewater minimisation study of a citrus plant. *Resources, Conservation and Recycling*, 37(3), 227–250.
- Toalongo, E. (2012). Diseño De Un Sistema De Recolección, Depuración Y Aprovechamiento De Aguas Residuales Para Fincas Agroecológicas Familiares En La Parroquia El Valle – Cantón Cuenca. *Universidad de Cuenca*, 65.
- Torres, D., & Ures, P. (2012). El reciclaje de aguas grises como complemento a las estrategias de gestión sostenible del agua en el medio rural. *Diputación de A Coruña*, 265–284.
- Velín, K. (2014). *Mejoramiento y simulación de una planta de recuperación de oro por concentración gravimétrica, flotación y cianuración ubicada en Piñas, provincia de El Oro*. Escuela Politécnica Nacional.
- Vera, J. A. (2015). Mecanismo de producción más limpia: el reuso de aguas residuales en la actividad minera. *Vox Juris*, 30(2), 263–278.
- Wang, Y. P., & Smith, R. (1994). Wastewater minimisation. *Chemical Engineering Science*, 49(7), 981–1006.