



# **UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Modelo de mejora para el ratio de consumo de cianuro mediante las herramientas TOC, programación lineal y poka yoke en una empresa del sector minero

## **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Para optar el título profesional de Ingeniero Industrial

### **AUTOR(ES)**

Maravi Salcedo, Grimaldo Andres	0009-0003-9916-8435
Hachiya Eguchi, David	0009-0003-4651-5982

### **ASESOR(ES)**

Martínez Leguía, Juan Fernando	0000-0003-4505-1437
--------------------------------	---------------------

**Lima, 16 de noviembre de 2023**

## **Dedicatoria**

*Dedicamos el presente trabajo a nuestras familias quienes nos apoyaron e inspiraron para continuar y perseverar en todo su desarrollo.*

*David Hachiya Eguchi*

*Dedico el presente trabajo a mi amada Micaela, quien es mi principal fuente de inspiración y motivación. A mi querida esposa Angelica, por su inquebrantable respaldo y amor incondicional. A mis padres, quienes me han guiado con sabiduría y amor a lo largo de toda mi vida. Este logro es un tributo a su constante apoyo y sacrificio.*

*Andres Maravi Salcedo*

## **Agradecimientos**

A nuestros asesores por todo el apoyo brindado y por compartir todos los conocimientos que nos han permitido llegar aquí.

Asimismo, al gerente general, al gerente y superintendente del área de procesos por la confianza y disposición de datos para realizar el presente trabajo.

## Resumen

El presente trabajo fue desarrollado en una mina dedicada a la extracción de oro mediante el proceso de lixiviación en pads, ubicada en el departamento de la Libertad y define un modelo de mejora para el ratio de consumo de cianuro, reactivo usado en el proceso de recuperación de oro, mediante la implementación de herramientas TOC, programación lineal y Poke Yoke. Las principales causas del incremento del ratio de cianuro en la planta de procesos se debe a un programa de cianuración para riego de celdas no diferenciado por etapa, un aumento de flujo de solución rica por demanda de planta y a la regulación manual de la dosificación de cianuro y tiempos de traslado.

El actual problema ha incrementado el costo de cianuro de sodio para el periodo de un año en \$776,212 que representan un sobre costo de 14% de la facturación anual por consumo de cianuro.

Para contrarrestar el problema se aplicó Teoría de restricciones TOC con el fin de determinar el cuello de botella y disminuir sus efectos. Una vez levantada la restricción en la adición de cianuro definimos la concentración óptima según la etapa de riego de las celdas con la ayuda de la programación lineal, teniendo como objetivo maximizar el uso de cianuro en celdas con mineral nuevo o de pocos días de riego. Como último paso reducimos el tiempo de regulación de cianuro mediante la aplicación de Poka Yoke, limitando la intervención del ser humano mediante la automatización de la adición del cianuro de sodio.

El proyecto de mejora se implementó en 3 meses y una vez operando logro reducir el ratio de consumo de 0.22 kg de cianuro de sodio por cada tonelada seca de mineral (TMS) a 0.17 kg/TMS, logrando disminuir en \$1,953,503 el consumo de cianuro de sodio para el año siguiente a la implementación.

Podemos concluir que la combinación de herramientas de mejora de procesos como TOC, programación lineal y poka yoke resulta altamente efectivo para reducir el ratio de consumo de cianuro por tonelada de mineral seco, generando reducciones en el costo operativo del área.

**Palabras clave:** Teoría de restricciones TOC, programación lineal, Poka Yoke, riego diferenciado.

## Abstract

The present work was developed in gold heap leaching process of a mine located in La Libertad - Perú. This work proposes an improvement model for the cyanide consumption ratio using the following tools: TOC, linear programming and poka yoke. The main reasons of the increase in cyanide consumption ratio were: no leaching stage differentiation in cyanidation heap irrigation, increase of rich solution flow due to plant demand and the manual regulation of cyanide dosage and mobilization times.

The current problem has increased the cost of sodium cyanide by \$776,212 for a year, it represents an additional cost of 14% in annual billing for cyanide consumption.

In order to reduce this problem, we applied the Theory of Constraints TOC in order to determine the bottleneck and reduce its effects.

Once the restriction in the cyanide addition process was overcome, we defined the optimal cyanide concentration according to the heap leaching stage using linear programming, in order to maximize the use of cyanide in heap with new mineral. As a last step we reduce the cyanide regulation time using a Poka Yoke system.

This project was implemented in 3 months and once in operation it was able to reduce the cyanide consumption ratio from 0.22 to 0.17 kg per mineral metric ton, this means a reduction of \$1,953,503 in sodium cyanide consumption per year after the project implementation. We can conclude that the combination of these process improvement tools are highly effective in reduce the cyanide consumption ratio, resulting a reductions of the operating cost.

**Key words:** Theory of constraints TOC, linear programming, Poka Yoke, differential irrigation.

U201014470\_MARAVI SALCEDO, GRIMALDO ANDRES\_Modelo de mejora para el ratio de consumo de cianuro mediante las herramientas TOC, programación lineal y poka yoke en una empresa del sector minero

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorioacademico.upc.edu.pe">repositorioacademico.upc.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
2	Submitted to Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas Trabajo del estudiante	1%
3	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	1%
4	Ramirez Gonzalez, Mabel Fiorella   Paucar Mayta, Luis Alberto   Tapia Liendo, Sergio Alberto   Huerto Santillan, Yury Clemente. "Estado de la Ecoeficiencia del Sector Industrias Alimentarias del Departamento de Lima", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021 Publicación	<1%
5	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1%

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes del proyecto.....	1
1.1.1 La minería de metales preciosos en el mundo .....	1
1.1.2 La minería de metales preciosos en el Perú.....	1
1.2 Marco teórico.....	3
1.2.1 Lean Manufacturing .....	3
1.2.2 Teoría de Restricciones (TOC).....	3
1.2.3 Poka Yoke .....	4
1.2.4 Programación Lineal.....	4
<b>2. PROBLEMÁTICA DE LA ORGANIZACIÓN .....</b>	<b>6</b>
2.1 Descripción de la organización.....	6
2.2 Identificación del problema .....	8
2.3 Análisis de causas .....	9
2.3.1 Programa de cianuración para riego de celdas no diferenciado por etapa.....	10
2.3.2 Aumento de flujo por demanda de planta.....	10
2.3.3 Regulación manual de dosificación de cianuro y tiempos de traslados .....	11
2.4 Planteamiento de objetivos .....	12
2.4.1 Objetivo general: .....	12
2.4.2 Objetivos específicos:.....	12
<b>3. PROPUESTA DE INGENIERÍA.....</b>	<b>13</b>
3.1 Vinculación de causa con la solución.....	13
3.2 Diseño detallado de la solución .....	14
3.2.1 Aplicar TOC para cumplimiento del programa de dosificación de cianuro por etapa de riego.....	14
3.2.1.1 Identificar la restricción.....	14
3.2.1.2 Explotar la restricción.....	14
3.2.1.3 Subordinarse a la restricción.....	15
3.2.1.4 Elevar la restricción.....	15

<b>3.2.1.5</b>	<b>Regresar al paso inicial</b> .....	16
3.2.2	Reducción de los tiempos de regulación de dosificación de cianuro y traslados mediante un sistema Poka Yoke .....	16
3.2.3	Optimizar la dosificación de cianuro según la demanda de flujo de planta mediante la aplicación de programación lineal .....	17
<b>3.2.3.1</b>	<b>Las variables de decisión</b> .....	17
<b>3.2.3.2</b>	<b>La función objetivo</b> .....	17
<b>3.2.3.3</b>	<b>Las restricciones metalúrgicas.</b> .....	18
<b>3.2.3.4</b>	<b>Restricciones operativas:</b> .....	18
3.3	Diseño de indicadores.....	19
3.4	Consideraciones para la implementación .....	20
3.4.1	Presupuesto de la solución: Gestión de recursos .....	20
3.4.2	Cronograma de desarrollo: Gestión del tiempo.....	22
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS DEL PROYECTO</b> .....	<b>23</b>
4.1	Validación funcional.....	23
4.1.1	Cumplimiento de programa de cianuración de acuerdo con la etapa de riego ....	23
4.1.2	Reducción del incremento de cianuro en el proceso de lixiviación. ....	23
4.1.3	Reducción de demoras en la regulación de concentración de cianuro y traslados. 24	
4.2	Evaluación del impacto económico .....	26
4.3	Evaluación de matriz de riesgo del proyecto.....	28
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>29</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	29
5.2	RECOMENDACIONES .....	29
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>30</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>32</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Producción de plata en Perú por empresas</i> .....	2
<b>Tabla 2</b> <i>Producción de oro en Perú por empresas</i> .....	2
<b>Tabla 3</b> <i>Comparativa entre producción clásica y el basado en la filosofía Lean</i> .....	3
<b>Tabla 4</b> <i>Etapas de riego para celdas en riego</i> .....	14
<b>Tabla 5</b> <i>Líneas de riego por celda</i> .....	15
<b>Tabla 6</b> <i>Resumen de toneladas y consumo de cianuro</i> .....	26
<b>Tabla 7</b> <i>Ahorro estimado si se mantenía el ratio actual</i> .....	26
<b>Tabla 8</b> <i>Modelo en LINGO para maximizar concentración en celdas, según el flujo de trabajo por línea</i> .....	33

## ÍNDICE DE FIGURA

<b>Figura 1</b> <i>Producción de oro 2022 en el Perú</i> .....	1
<b>Figura 2</b> <i>Proceso productivo en mina</i> .....	6
<b>Figura 3</b> <i>Flow Sheet de riego de celdas de lixiviación con cianuro</i> .....	6
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama de flujo de recuperación de oro en planta procesos</i> .....	7
<b>Figura 5</b> <i>DOP del proceso de dosificación de cianuro</i> .....	7
<b>Figura 6</b> <i>Proceso de dosificación de cianuro</i> .....	8
<b>Figura 7</b> <i>Árbol de problemas del incremento de consumo de cianuro</i> .....	8
<b>Figura 8</b> <i>Detalle de ponderación de causas raíz - eventos del 2021</i> .....	9
<b>Figura 9</b> <i>Pareto del incremento de ratio de consumo expresado en miles de dólares</i> .....	9
<b>Figura 10</b> <i>Diagrama de flujo para el proceso de recuperación de oro con balance de masa</i> .....	10
<b>Figura 11</b> <i>Volumen real vs teórico – periodo 2021</i> .....	11
<b>Figura 12</b> <i>DAP del proceso de control y regulación de cianuro</i> .....	11
<b>Figura 13</b> <i>Árbol de objetivos</i> .....	12
<b>Figura 14</b> <i>Diagrama de flujo y balance de masa luego de eliminar la restricción</i> .....	16
<b>Figura 15</b> <i>Promedio de cianuro ppm por etapa de riego</i> .....	23
<b>Figura 16</b> <i>Ratio de consumo de cianuro antes del proyecto</i> .....	24
<b>Figura 17</b> <i>Ratio de consumo de cianuro despues del proyecto</i> .....	24
<b>Figura 18</b> <i>DAP del proceso de control y regulación de cianuro luego del proyecto</i> .....	25
<b>Figura 19</b> <i>TMS procesado vs consumo cianuro</i> .....	25
<b>Figura 20</b> <i>Equipos del sistema poka yoke</i> .....	32
<b>Figura 21</b> <i>Implementación del proyecto para riego diferenciado</i> .....	32

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1 Antecedentes del proyecto

### 1.1.1 La minería de metales preciosos en el mundo

Según informe del WGC o World Gold Council del 31 de enero acerca de las tendencias de demanda de oro (sin las transacciones OTC), este se ha incrementado en 18% el año pasado, alcanzando un consumo global de 4,741 TM, el más alto desde el 2011. El precio promedio del oro se mantiene desde los últimos 15 años reforzando su momento favorable. (Osinergmin, 2023)

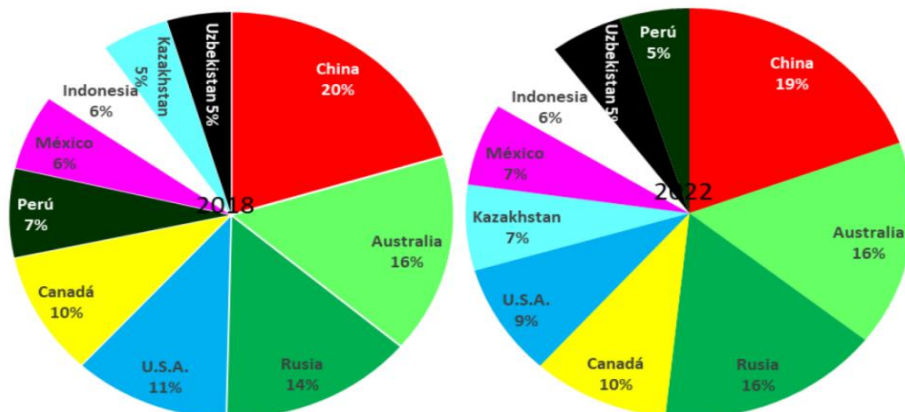
Por otro lado, el Silver Institute en el 2023, indicó que en el 2021 y 2022 la demanda por la plata batió récords y ven con entusiasmo este año. Sin embargo, sus precios no lograron llegar a los valores récord de la década pasada. (Osinergmin, 2023)

### 1.1.2 La minería de metales preciosos en el Perú

El Perú destaca como país productor de oro y plata. Sin embargo, en los últimos años ha perdido posiciones (ver figura 1) debido a diferentes factores como: la ausencia de nuevos grandes proyectos que reemplacen a los que han ido terminando su ciclo, a los conflictos sociales cada vez más recurrentes y a la minería informal e ilegal. (Osinergmin, 2023)

**Figura 1**

*Producción de oro 2022 en el Perú*



Nota: Adaptado de “Informe Mensual de Energía y Minería”, por Osinergmin, 2023

Por otro lado, según el USGS o United States Geological Survey, el Perú figura como un país con las más grandes reservas de plata del mundo y quinto en reservas de oro. El valor del Perú para el mundo en la extracción de metales preciosos ha atraído a las empresas mineras más relevantes del mundo y del Perú a desarrollar proyectos. Como resultado, estas inversiones han permitido que estos dos metales preciosos aporten en el 2022 con el 15.5% del valor del volumen exportado. En las tablas 1 y 2 se muestra la producción de oro y plata por empresas. (Osinermin, 2023)

**Tabla 2**

*Producción de plata en Perú por empresas*

Empresa	2022	Promedio mensual 2022	Promedio anual (2016 - 2022)*
Antamina	504	45	560
Ares	241	31	398
Volcan	207	21	249
Chinalco	204	15	182
NR El Porvenir	166	11	136
Buenaventura	143	39	485
SPCC	141	12	145
NR Perú	124	10	123
Oxidos de Pasco	116	7	90
El Brocal	110	10	128

**Tabla 1**

*Producción de oro en Perú por empresas*

Empresa	2022	Promedio mensual 2022	Promedio anual (2016 - 2022)*
Poderosa	9.43	0.69	8.58
Yanacocha	7.58	1.30	14.25
Retamas	6.46	0.49	6.04
Consortio Minero Horizonte	5.83	0.52	6.31
Ares	5.16	0.46	6.09
Shahuindo	4.75	0.30	3.47
GoldFields	4.19	0.38	4.63
Buenaventura	4.13	0.45	5.52
Alto Chicama	3.24	0.79	9.04

Nota: Adaptado de “Informe Mensual de Energía y Minería”, por Osinermin, 2023

La mina donde se desarrolló el estudio es de oro a cielo abierto que mediante el proceso de lixiviación en pads produce barras de oro doré y debido a su exitosa exploración ha permitido extender la vida de la mina. Actualmente procesa 36,000 toneladas de mineral por día y ha registrado una producción en el 2022 de 98,500 Onzas de oro.

## 1.2 Marco teórico

### 1.2.1 Lean Manufacturing

El sistema de producción Lean es la persecución de mejorar un sistema de producción mediante la eliminación del despilfarro o todas aquellas cosas que no aportan valor al producto y que el cliente no está dispuesto a pagar. Para ello, utiliza una serie de herramientas desarrolladas en Japón como: TPM, 5S, SMED, kan-ban, kaizen, heijunka, jidoka, etc. (Rajadell Carreras, 2021)

Son muchos los conceptos, estrategias, modos, que al ser realizados siempre de una manera determinada se asumen que son correctas. La filosofía lean se antepone a estos paradigmas de la producción clásica mediante la eliminación de residuos (ver tabla 3).(Instituto Andaluz de Tecnología (IAT), 2012)

**Tabla 3**

*Comparativa entre producción clásica y el basado en la filosofía Lean*

Producción clásica	Producción lean
Centrada en los resultados.	Centrada en los procesos.
No existen estándares o no se respetan.	Se siguen los estándares, son la base de la mejora.
El inventario asegura la producción.	El inventario es una pérdida, cubre los problemas y evita solucionarlos.
Los cambios en máquinas serán mínimos, ya que representan una pérdida.	Los tiempos de cambios en máquinas deben ser reducidos para cambiar con más frecuencia.
El flujo se mueve a través del proceso, siendo empujado ( <i>push</i> ) de las primeras operaciones a las siguientes.	El flujo se mueve a través del proceso y las operaciones finales tiran ( <i>pull</i> ) de las anteriores.
Lotes de producción grandes.	Lotes pequeños.
El orden y la limpieza son solo para las visitas.	El orden y la limpieza ayudan a identificar las pérdidas.

Nota: Adaptado de “La respuesta está en la innovación”, por Instituto Andaluz de Tecnología, 2012

### 1.2.2 Teoría de Restricciones (TOC)

La teoría de restricciones tiene como objetivo el incrementar las ganancias tanto a corto como a largo plazo. Este objetivo se logra generando mayores ingresos a través de las ventas y al mismo tiempo reduciendo los inventarios y gastos operativos.(Barragán Moreno, 2009)

La teoría de restricciones se basa en la idea que de que el funcionamiento de toda empresa consiste en una gran cadena de recursos independientes como son: máquinas, equipos, centros de trabajo, instalaciones y materiales, pero solo algunos de estos restringen o condicionan la salida de la producción (cuellos de botella). El reconocer esta independencia y su papel crucial de los cuellos de botella es el punto de inicio para la filosofía TOC. (Barragán Moreno, 2009)

### ***1.2.3 Poka Yoke***

El sistema poka-yoke introduce mecanismos a prueba de fallos para omitir el proceso de inspección al final o en la mitad del proceso. Debe estar presente en cada etapa del proceso.(Socconini Pérez Gómez, 2019)

Los sistemas Poka-Yoke se clasifican en tres niveles según sus métodos control (Caro, 2018):

Nivel 1: sistemas que evitan errores principalmente a través de mecanismos físicos.

Nivel 2: Un sistema que detiene un proceso cuando detecta un error. Detener un proceso facilita la evaluación del impacto de los errores detectados. Estos sistemas permiten que el proceso continúe.

Nivel 3: Un sistema que alerta de errores, pero no interviene deteniendo el proceso.

### ***1.2.4 Programación Lineal***

La programación lineal, según Fedosova et al. (2011) “es una rama de la investigación de operaciones que estudia la optimización de una función lineal sujeta a restricciones, que también son lineales” (p.7), entiéndese por función lineal a una ecuación de primer grado.

La programación lineal es esencialmente la lucha o competencia entre un conjunto de actividades (productos) por recursos limitados para lograr el máximo de rendimiento. (Guerrero Salas, 2009)

Por otro lado, la programación lineal te permite optimizar el comportamiento de tu sistema, minimizando así el consumo de recursos y costos. En otros casos, el objetivo es maximizar los beneficios asociados al uso del sistema (Suñé et al., 2016).

## 2. PROBLEMÁTICA DE LA ORGANIZACIÓN

### 2.1 Descripción de la organización

Dentro de los procesos productivos de una mina de oro, uno de los procesos de mayor relevancia es el de lixiviación, debido a que un adecuado flujo de riego y de concentración de cianuro podrán recuperar el oro del mineral. Para ello es vital que el área de adsorción realice un eficiente control de flujo de solución y una adecuada dosificación de cianuro. En la figura 2 se muestra el proceso productivo en mina.

**Figura 2**

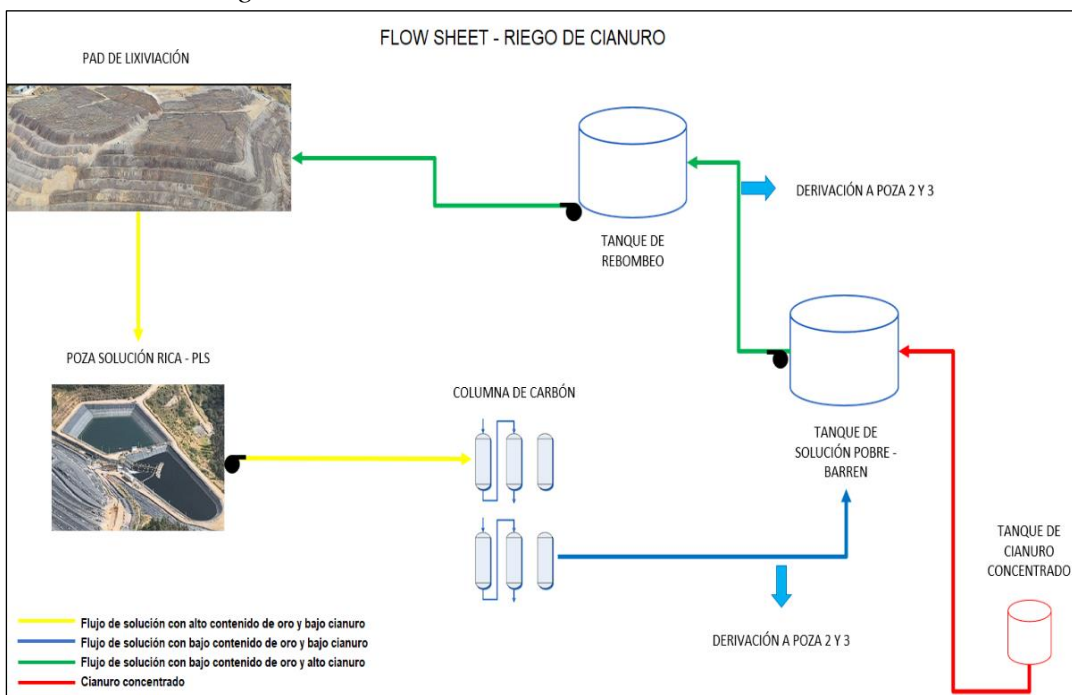
*Proceso productivo en mina*



Para el presente trabajo nos centraremos solo en el proceso de recuperación de oro y plata dentro de planta tal como lo muestra el Flow sheet de la figura 3 y el diagrama de flujo de la figura 4

**Figura 3**

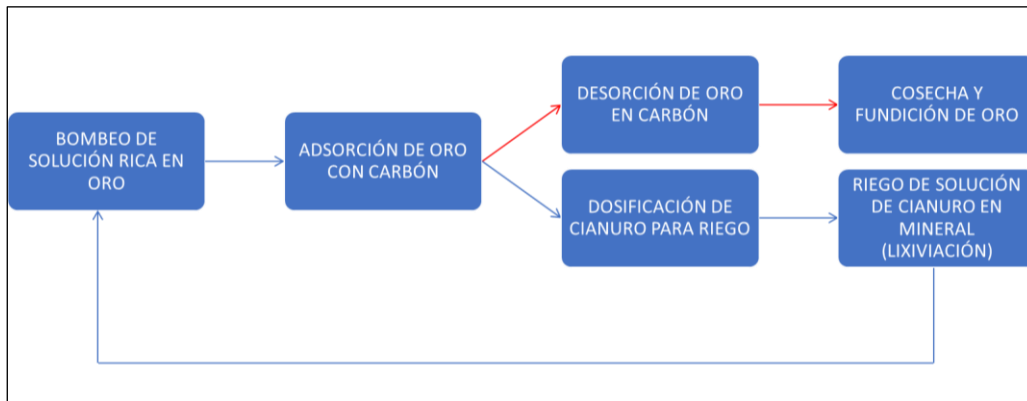
*Flow Sheet de riego de celdas de lixiviación con cianuro*





**Figura 4**

*Diagrama de flujo de recuperación de oro en planta procesos*

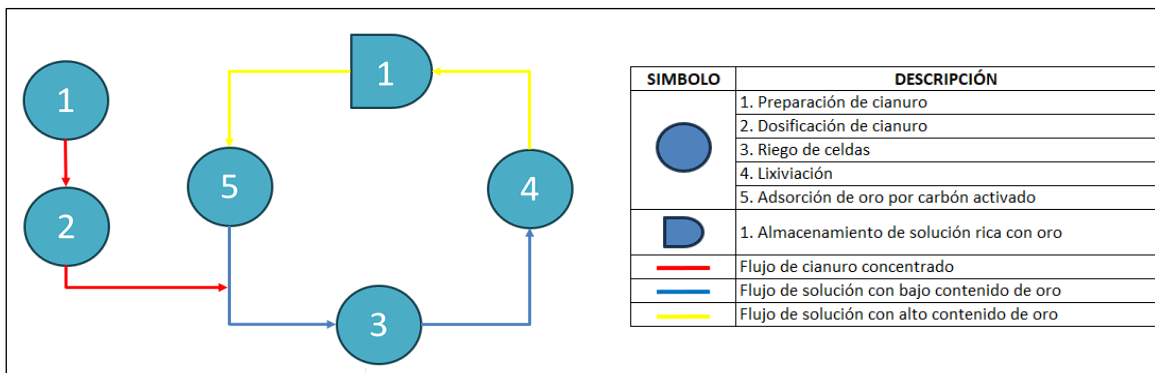


La solución pobre o también llamada barren que sale de las columnas de carbón, parte del proceso de adsorción, ingresa a un tanque de almacenamiento al cual se le adiciona cianuro de sodio para que la solución recupere sus propiedades de disolución de oro.

El proceso de dosificación de cianuro dentro de la planta ADR corresponde a uno de los procesos más importantes en la recuperación de oro y plata dentro de la unidad minera, ya que el cianuro es el reactivo usado para la disolución de oro y plata del mineral. En la figura 5, se muestra el DOP del proceso de dosificación de cianuro.

**Figura 5**

*DOP del proceso de dosificación de cianuro*



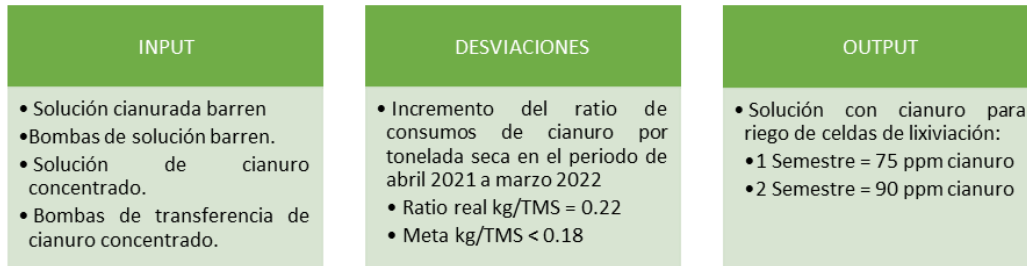
El área de metalurgia ha logrado definir un cambio en la concentración de cianuro de acuerdo a la etapa de riego de las celdas de lixiviación, con el fin de minimizar el tiempo de recuperación, para disponer de áreas nuevas.

## 2.2 Identificación del problema

Para el año 2021 se ha podido apreciar un incremento en el ratio de consumo de cianuro en la planta ADR respecto a la meta propuesta por laboratorio metalúrgico. En la figura 6 se muestra el proceso de dosificación de cianuro.

**Figura 6**

*Proceso de dosificación de cianuro*

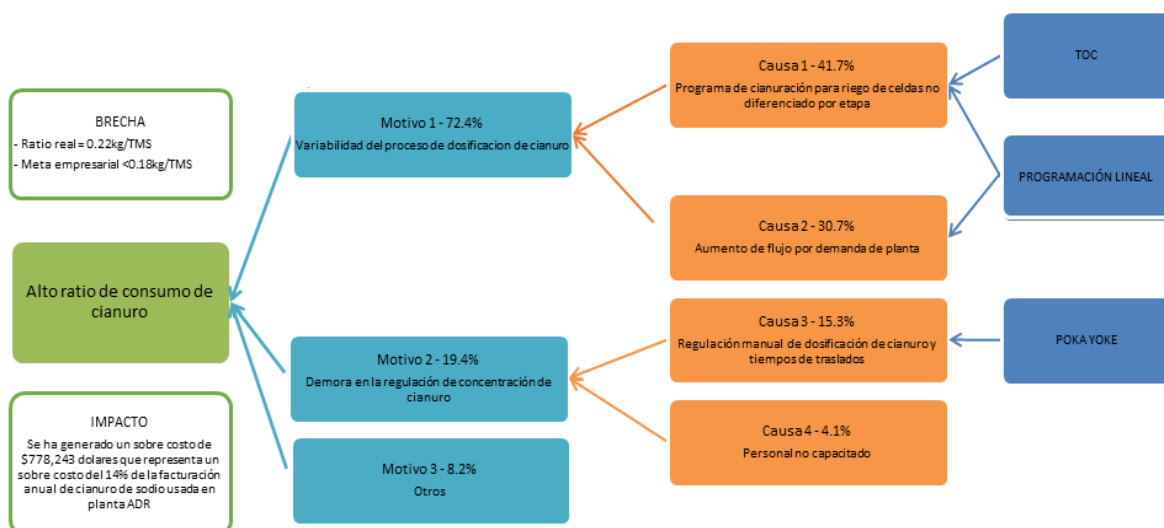


Cabe mencionar que en la industria de minería cada compañía tiene su propio estándar, ya que cada yacimiento minero tiene un diseño único. (Herrera Herbert, 2017) Por ello, se compara el ratio real versus el estimado o meta propuesto por la empresa luego de pruebas metalúrgicas.

En la figura 7 se muestra el árbol de problemas del incremento de ratio de cianuro por tonelada de mineral seco.

**Figura 7**

*Árbol de problemas del incremento de consumo de cianuro*



### 2.3 Análisis de causas

Para el análisis de las causas raíz se utilizaron los registros de eventos ocurridos en todo el 2021. Además, se realizó la ponderación de estos eventos de acuerdo a su duración y con ello la pérdida en \$ generada de cianuro. Los resultados se muestran en la figura 8.

**Figura 8**

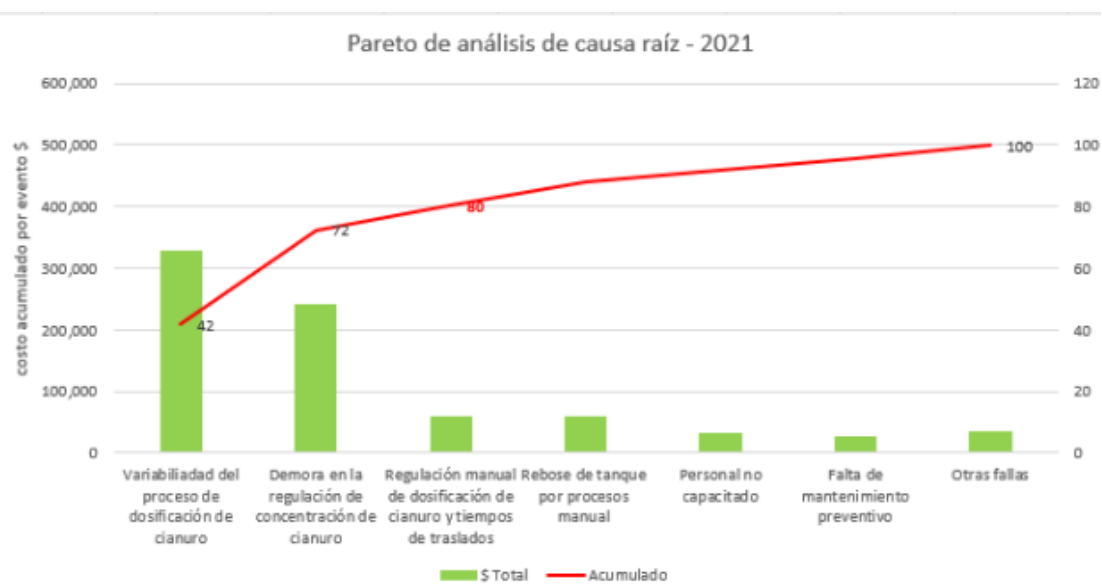
*Detalle de ponderación de causas raíz - eventos del 2021*

Variabilidad de consumo de cianuro 2021	Eventos al año	\$ por evento	\$ Total	fx	Acumulado
Programa de cianuración para riego no diferenciado por etapa	27	12,173	328,681	41.7	42
Aumento de flujo por demanda de planta	35	6,920	242,186	30.7	72
Regulación manual de dosificación de cianuro y tiempos de traslados	73	833	60,803	7.7	80
Rebose de tanque por procesos manual	15	4,004	60,066	7.6	88
Personal no capacitado	8	4,004	32,035	4.1	92
Falta de mantenimiento preventivo	7	4,004	28,031	3.6	95
Otras fallas	9	4,004	36,040	4.6	100

Con el fin de priorizar las causas de mayor impacto, se realizó un diagrama de Pareto para cuantificar las pérdidas de cianuro en miles de dólares por causa raíz (ver figura 9).

**Figura 9**

*Pareto del incremento de ratio de consumo expresado en miles de dólares*

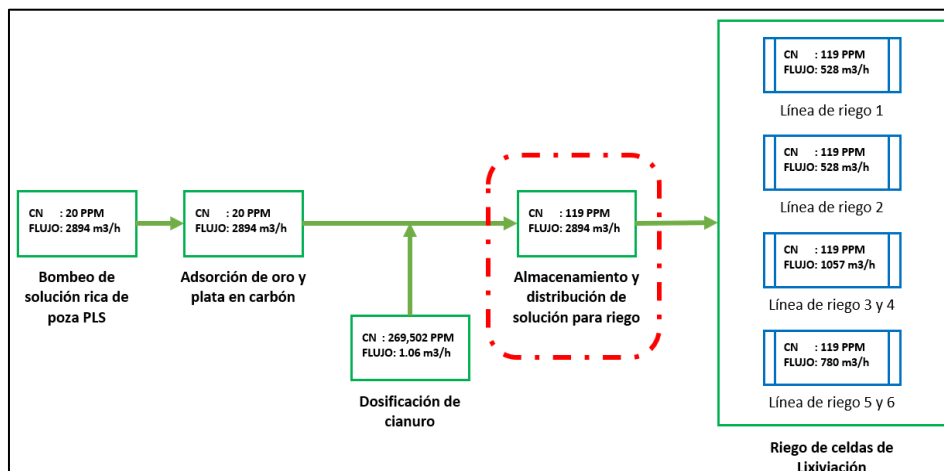


### 2.3.1 Programa de cianuración para riego de celdas no diferenciado por etapa

Actualmente, el programa de cianuración no realiza un riego diferenciado por etapa, es decir incrementar la concentración de cianuro por cada línea de bombeo de manera independiente según la etapa en la que se encuentra la celda, debido a que el diseño inicial de planta no contemplaba esta necesidad. En la figura 10 se muestra el diagrama de flujo para el proceso de recuperación de oro con balance de masa.

**Figura 10**

*Diagrama de flujo para el proceso de recuperación de oro con balance de masa*



Del diagrama podemos concluir que el proceso: “Almacenamiento y distribución de solución para riego” está generando una restricción del tipo física, debido a que no logra diferenciar la concentración necesaria para el riego de celdas de acuerdo con la etapa causando un incremento en el consumo de cianuro cada vez que ingresa una celda nueva, no teniendo en cuenta los parámetros operativos definidos por el área de metalurgia.

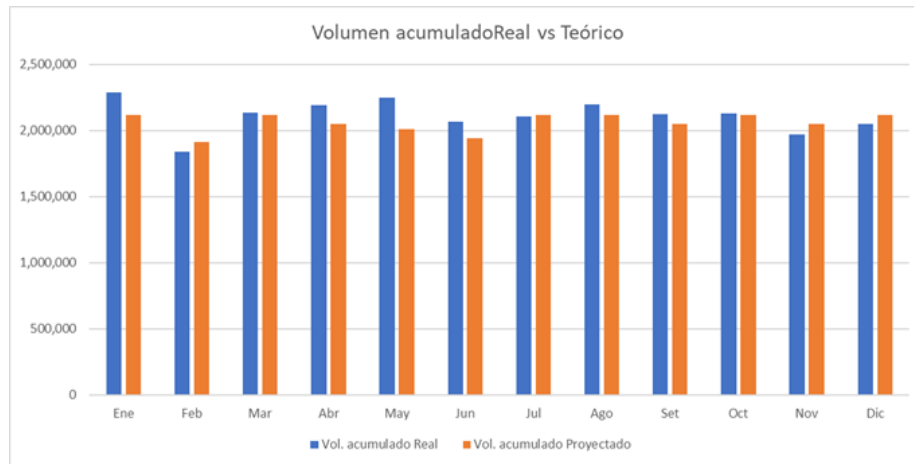
### 2.3.2 Aumento de flujo por demanda de planta

El incremento de flujo por planta favorece a una mayor retención de oro en carbón, al pasar mayor flujo de solución, logramos adsorber mayor cantidad de oro en las columnas de carbón.

Pero este incremento de flujo requiere una adición de cianuro al retornar a las celdas de lixiviación. En el 2021 se ha tenido un incremento de 609,292 m<sup>3</sup> respecto al proyectado. En la figura 11 se muestra el volumen real vs teórico del flujo de cianuro en el periodo 2021.

**Figura 11**

*Volumen real vs teórico – periodo 2021*



**2.3.3 Regulación manual de dosificación de cianuro y tiempos de traslados**

En la actualidad, el sistema de dosificación no cuenta con la instrumentación necesaria para el control de dosificación de cianuro. Como la regulación de dosificación de cianuro se realiza de manera manual, se ha evaluado mediante un DAP los tiempos para la regulación de concentración de cianuro, los resultados se muestran en la figura 12.

**Figura 12**

*DAP del proceso de control y regulación de cianuro*

DAP DEL PROCESO DE CONTROL Y REGULACIÓN DE CIANURO							
Diagrama 1	Resumen						
	Actividad	Actual		Propuesta			
Tarea: Contro y regulación de cianuro	Operación	7.1					
	Transporte	19.4					
	Espera	29.9					
Lugar: Pad de lixiviación	Inspección	0.0					
	Almacenamiento	0.0					
Elaborado: Andrés Maravi / David Hachiya	Distancia (m)						
	Tiempo (horas - hombre)	56.4					
Descripción	Tiempo (minutos)	Símbolo				Observaciones	
Traslado de planta a rebombeo	4.7	●	➔	◐	◑	▲	
Toma de muestra de solución	3.1	●	➔	◐	◑	▲	
Traslado de muestra a laboratorio químico	4.8	●	➔	◐	◑	▲	
Análisis de muestra	15.4	●	➔	◐	◑	▲	
Traslado de planta a rebombeo	4.9	●	➔	◐	◑	▲	
Toma de muestra de solución	2.9	●	➔	◐	◑	▲	
Traslado de muestra a laboratorio químico	5.0	●	➔	◐	◑	▲	
Análisis de muestra	14.5	●	➔	◐	◑	▲	
Reporte a gerencia	1.2	●	➔	◐	◑	▲	
<b>Total</b>	<b>56.4</b>	<b>7.1</b>	<b>19.4</b>	<b>29.9</b>			

El tiempo total para regular la concentración de cianuro es de 56.4 minutos y el traslado representa el 34% del tiempo total de proceso de regulación de flujos.

## 2.4 Planteamiento de objetivos

### 2.4.1 Objetivo general:

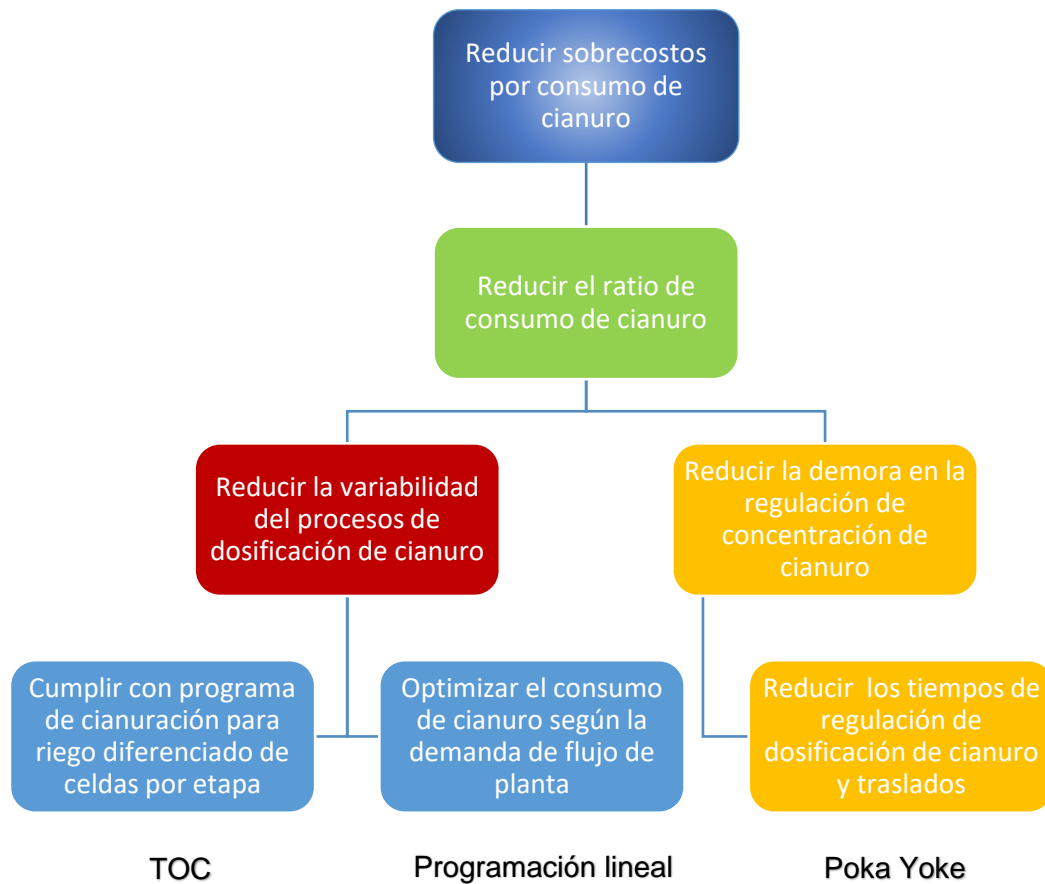
Reducir el ratio de consumo de cianuro mediante las herramientas TOC, programación lineal y poka yoke en una empresa del sector minero

### 2.4.2 Objetivos específicos:

- Aplicar teoría de restricciones TOC para el cumplimiento del programa de cianuración para riego diferenciado de celdas por etapa.
- Reducir los tiempos de regulación de dosificación de cianuro y traslados mediante un sistema Poka Yoke
- Optimizar la dosificación de cianuro según la demanda de flujo de planta mediante la aplicación de programación lineal.

**Figura 13**

*Árbol de objetivos*



### 3. PROPUESTA DE INGENIERÍA

#### 3.1 Vinculación de causa con la solución

<b>CAUSA RAIZ</b>	<b>HERRAMIENTA PROPUESTA</b>	<b>VINCULACIÓN</b>
<b>Programa de cianuración para riego de celdas no diferenciado</b>	<b>TOC</b>	<p>Se plantea el uso de TOC para identificar el cuello de botella en el proceso de riego y con ello lograr que el riego de celdas se efectúe según la etapa de riego en la que se encuentra.</p> <p>En el artículo de Ortiz Barrios (2013) se observa el uso de las herramientas TOC y PL para la administración de recursos con condiciones restrictivas de demanda y capacidades de un proceso.</p> <p>El autor Cevallos et al.(2020), además indica que la herramienta TOC también ayuda a que los demás componentes no restrictivos del proceso puedan apoyar al cuello de botella y de no alcanzar aun así la demanda requerida, sugiere la mejora de la capacidad de la restricción.</p>
<b>Regulación manual de dosificación de cianuro y tiempos de traslados</b>	<b>Poka Yoke</b>	<p>El uso de un sistema poka yoke nos ayudará a reducir el tiempo de regulación de la dosificación de cianuro y traslados, así como a aminorar los posibles errores en la regulación.</p> <p>Según Rosio et al.,(2019) el sistema poka yoke es propuesto como medida de diagnosticabilidad para detectar fallos en los productos terminados.</p> <p>Adicionalmente, según estudios de Dudek &amp; Szewieczek (2009), el sistema poke yoke ayuda en la prevención de defectos en el producto y al ser ubicado donde ocurrió o puede ocurrir el error informa de manera inmediata cuando este se hace presente.</p>
<b>Aumento de flujo por demanda de anta</b>	<b>Programación lineal</b>	<p>Por medio de la programación lineal se establecerá las nuevas dosificaciones de cianuro según la etapa de riego, reduciendo así el aumento de flujo por demanda de planta.</p> <p>Como indica Reyes Sotelo et al.,(2017) la programación lineal es una eficiente herramienta para determinar la planificación de producción mediante la modelación de los diferentes escenarios propuestos de demanda, minimizando costos, tiempos extras y ocios.</p> <p>Y según estudios de Samaniego Guevara (2021), la programación lineal es empleada para definir distintas opciones de producción, según los intereses financieros, con lo cual se logra óptimos costos de operación e inventario.</p>

### 3.2 Diseño detallado de la solución

Para el diseño de la solución propuesta se requiere detallar las prioridades a implementar con el fin de realizar la secuencia de actividades. Primero se deberá aplicar TOC para determinar el cuello de botella y aminorar su impacto, luego para el control de la dosificación se aplicará Poke Yoke y finalmente con la programación lineal minimizaremos el consumo de cianuro respecto al flujo y concentración de cianuro por etapa de riego.

#### 3.2.1 Aplicar TOC para cumplimiento del programa de dosificación de cianuro por etapa de riego.

##### 3.2.1.1 Identificar la restricción

El área de metalurgia luego de realizar investigaciones ha definido 3 etapas de riego en una celda, las cuales diferencian en la concentración requerida de cianuro según los días de riego como se detalla en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Etapas de riego para celdas en riego*

Etapa de riego de celdas de lixiviación	Días de riego	Concentración de cianuro libre en ppm
<b>Humectación</b>	0 a 5	120 a 140
<b>Producción</b>	5 a 20	80 a 100
<b>Agotamiento</b>	20 a 60	40 a 60

Realizando un análisis de la situación actual mediante el diagrama de flujo y balance de masa detallado en la figura 10, se pudo observar que luego de realizar la “dosificación de cianuro” se tiene un alto inventario de cianuro en el “almacenamiento y distribución de solución para riego”, por lo cual al distribuir a cada sector de riego la concentración de cianuro está supeditada a la concentración del tanque de almacenamiento.

##### 3.2.1.2 Explotar la restricción

En esta etapa definiremos estrategias para aprovechar la restricción, por ello se tomó las siguientes acciones:

- Una de las ventajas del proceso de almacenamiento y distribución de solución para riego es la infraestructura con la que cuenta; zona contenida ante derrames, facilidad



de energía eléctrica, espacio para instalación de líneas adicionales, fácil accesibilidad.

- También se aprovechará que el tanque de almacenamiento de solución cuenta con 6 líneas y bombas independientes las cuales trasladan la solución con cianuro a las celdas, con lo que facilitaría una adición independiente de cianuro por línea.

### 3.2.1.3 Subordinarse a la restricción

En esta etapa los procesos que no representan una restricción deberán seguir el ritmo de la actual restricción, con el fin de obtener beneficios globales:

- Se coordina con el área encargada del “riego de celdas de lixiviación” y se define las líneas que regaran las celdas según la etapa de riego, como se detalla a en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Líneas de riego por celda*

Etapa de riego de celdas de lixiviación	Línea de riego
<b>Humectación</b>	1
<b>Producción</b>	2
<b>Agotamiento</b>	3 y 4
<b>Riego de taludes</b>	5 y 6

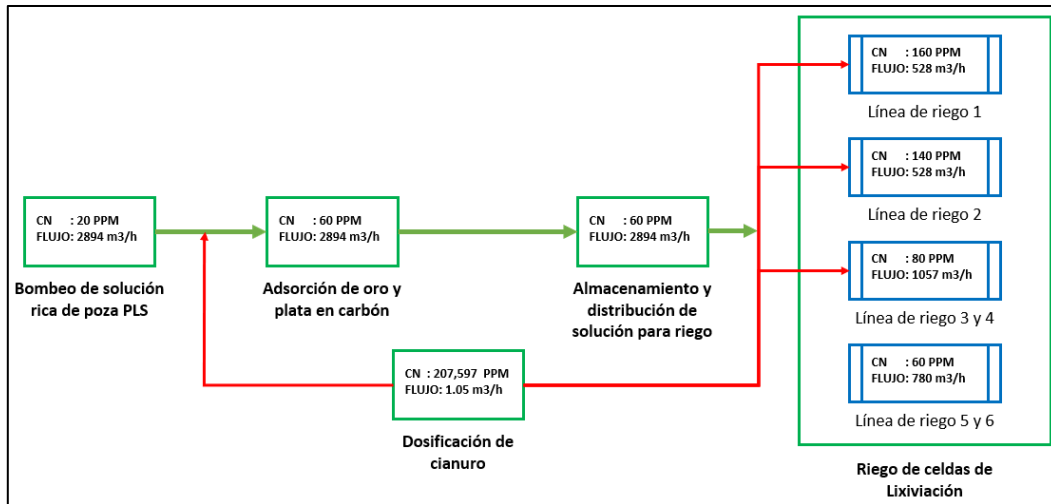
### 3.2.1.4 Elevar la restricción

En este punto se evalúa la factibilidad de la implementación, la cual requiere de la compra de equipos y materiales y la capacitación del personal.

- La dosificación de cianuro se modificará (ver figura 14), con el fin de alimentar la concentración requerida por planta, para la desorción, y lo restante se distribuirá a cada línea según la necesidad por etapa de riego.
- Tendido de línea de tuberías de planta, donde está ubicado el tanque de preparación y dosificación de cianuro a rebombeo, punto de almacenamiento y distribución de solución para riego.
- Implementación de sistema de instrumentación para la correcta dosificación de cianuro.

**Figura 14**

*Diagrama de flujo y balance de masa luego de eliminar la restricción*



Con esta modificación de adición de cianuro logramos reducir el consumo de cianuro de 13,584 kg de cianuro a 10,461 kg para una dosificación promedio del requerido manteniendo los mismos flujos de procesamiento por planta.

### 3.2.1.5 Regresar al paso inicial

Luego de mejorar la capacidad de dosificación de cianuro a las celdas de lixiviación podemos concluir que la restricción de dosificación de cianuro respecto a la etapa de riego ha mejorado, tal como se muestra en el grafico se ha logrado disminuir el consumo de cianuro en 3,124 kg para un mismo flujo.

Es necesario evaluar nuevamente todo el proceso para comprobar la existencia de una nueva restricción.

### 3.2.2 Reducción de los tiempos de regulación de dosificación de cianuro y traslados mediante un sistema Poka Yoke

El sistema poka yoke propuesto formará parte del nuevo sistema de dosificación de cianuro para riego de celdas por etapas (punto 3.2.1). Este sistema poka yoke estará conformado por flujómetros y válvulas de control instalados en cada una de las succiones de las bombas de riego. El sistema, de acuerdo con lo seteado por el operativo, calculará el flujo de inyección

de solución de cianuro concentrado proporcional al flujo de solución barren con la cual se regará a las celdas de lixiviación.

De esta forma se reducirá el tiempo de regulación de concentración de cianuro y sus variaciones. La intervención de la mano humana se limitará, con el fin de evitar errores gracias a la automatización del sistema.

### **3.2.3 Optimizar la dosificación de cianuro según la demanda de flujo de planta mediante la aplicación de programación lineal**

Como se detalló anteriormente se ha establecido una nueva dosificación de cianuro respecto a la etapa de riego de cada celda. Por ello el área de planta ADR requiere maximizar las concentraciones de cianuro respecto al flujo que regara cada línea según la etapa de riego de las celdas de lixiviación.

Con el programa planteado podremos calcular el consumo diario de cajas de cianuro de sodio, según el flujo y concentración que se requiere para cada línea.

Primero plantearemos nuestro problema de programación lineal siguiendo los siguientes pasos:(Soler Fajardo et al., 2016)

#### **3.2.3.1 Las variables de decisión**

Identificación	Variable
<b>Xi</b>	Concentración de cianuro en cada línea ppm
<b>Fi</b>	Flujo de solución por línea (m <sup>3</sup> /h)

#### **3.2.3.2 La función objetivo**

Maximizar el consumo de cianuro diario en kilogramos para el riego de celdas de lixiviación, cumpliendo la dosificación de cianuro (en ppm) de acuerdo con la etapa de riego. Para ello se cuenta con la cantidad de flujo que pasa en cada línea de riego (Fi) y la concentración de cianuro libre (Xi) con la cual regara cada línea de riego.

$$\text{Máximo consumo de cianuro (kg)} = (X1F1 + \dots + X6F6) * 24 * 1.88 / 1000$$

### 3.2.3.3 Las restricciones metalúrgicas.

- La dosificación para celdas en humectación deberá ser mayor a 120 ppm y menor a 140 ppm de cianuro libre:  $120 < X1 < 140$
- La dosificación para celdas en producción deberá ser mayor a 80 ppm y menor a 100 ppm de cianuro libre:  $80 < X2 < 100$
- la dosificación para celdas en agotamiento deberá ser mayor a 40 ppm y menor a 60 ppm de cianuro libre:  $40 < X3, X4 < 60$
- La dosificación para el riego de taludes deberá ser menor a 45 ppm:  $X5, X6 < 45$
- Las concentraciones de X5 y X6 son iguales.
- La concentración de cianuro libre y el flujo por planta deberá ser mayores o iguales a cero (no negatividad).

### 3.2.3.4 Restricciones operativas:

- Restricción por bomba de make up;  
 $F5 * X5 + F6 * X6 \leq 18,500$
- Restricción por bomba de inyección en rebombeo  
 $F1 * X1 + F2 * X2 + F3 * X3 + F4 * X4 \leq 154,000$

Donde

C = Concentración de cianuro en pozas

Z = flujo total por planta ( $F1 + \dots + F6$ )

Y = Cianuro en ppm a utilizar por día.

### 3.3 Diseño de indicadores

En la siguiente tabla se muestran los escenarios As Is – To Be una vez implementado el proyecto con la finalidad de realizar el seguimiento.

Indicador	Unidad	Actual (As Is)	Objetivo (To Be)	% Mejora	Herramienta
Ratio de consumo de cianuro	Kg/TMS	0.22	0.17	22.73%	TOC
Tiempo para regular la concentración de cianuro	Min	56.4	32.2	42.91%	Poka Yoke
Concentración de cianuro promedio por día	ppm (agotamiento)	119	49.25	58.61%	Programación Lineal
	ppm (producción)	119	93.9	21.09%	
	ppm (humectación)	119	133.55	12.23%	

A continuación, se describe la ficha técnica del indicador de “ratio de consumo de cianuro”.

Finalmente se muestra la ficha técnica de los indicadores de “tiempo para regular la

FICHA TÉCNICA DE INDICADORES	
<b>Nombre</b>	RATIO DE CONSUMO DE CIANURO
<b>Objetivo</b>	Medir el consumo de cianuro utilizado para regar las toneladas de mineral apilado en el Pad de Lixiviación
<b>Fórmula de cálculo</b>	$\frac{\text{kilogramos de cianuro utilizados}}{\text{Tonelaje de mineral puesto en Pad de lixiviacion}}$
<b>Unidades</b>	kg/TMS
<b>Referencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: green;">●</span> MENORA 0.18</li> <li><span style="color: yellow;">●</span> ENTRE 0.18 y 0.21</li> <li><span style="color: red;">●</span> MAYORA 0.21</li> </ul>
<b>Valor actual</b>	0.22 kg/TMS
<b>Responsable del cálculo</b>	Jefe de guardia planta procesos
<b>Frecuencia del cálculo</b>	Semanal - Mensual
<b>Fuente de información</b>	Consumo de cianuro diario y tonelaje puesto en Pad de lixiviación diario

concentración de cianuro” y “concentración de cianuro promedio por día”.

FICHA TÉCNICA DE INDICADORES	
<b>Nombre</b>	TIEMPO PARA REGULAR LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO
<b>Objetivo</b>	Medir el tiempo de regulación de cianuro en las líneas de riego al Pad de lixiviación
<b>Fórmula de cálculo</b>	$\frac{\text{Tiempo de regulación de concentración}}{\text{Número total de regulaciones por día}}$
<b>Unidades</b>	Minutos
<b>Referencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: green;">●</span> MENORA 25</li> <li><span style="color: yellow;">●</span> ENTRE 25 a 35</li> <li><span style="color: red;">●</span> MAYORA 35</li> </ul>
<b>Valor actual</b>	56.4 minutos

FICHA TÉCNICA DE INDICADORES	
<b>Nombre</b>	CONCENTRACIÓN DE CIANURO PROMEDIO POR DÍA
<b>Objetivo</b>	Medir la concentración de cianuro promedio para el riego de las celdas respecto al volumen procesado por la línea de riego.
<b>Fórmula de cálculo</b>	Concentración de cianuro por día: $\frac{\text{Suma producto de concentraciones y volumen diario por línea}}{\text{Sumatoria de volúmenes}}$
<b>Unidades</b>	ppm (parte por millón)
<b>Referencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: green;">●</span> Humectación: 120 a 140 ppm</li> <li><span style="color: yellow;">●</span> Producción: 80 a 100 ppm</li> <li><span style="color: red;">●</span> Agotamiento: menor a 70 ppm</li> </ul>
<b>Valor actual</b>	119 ppm para todas las celdas

### 3.4 Consideraciones para la implementación

#### 3.4.1 Presupuesto de la solución: Gestión de recursos.

El costo del proyecto para modificar el diseño de planta e implementar el sistema poka yoke fue de US\$ 1,226,735.60. El detalle de la implementación se detalla a continuación:

PRESUPUESTO						
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit US\$	Parcial US\$	Total US\$
<b>A</b>	<b>MODIFICACIÓN DEL DISEÑO DE PLANTA E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA POKA YOKE (POR LICITACIÓN)</b>					<b>\$1,226,735.60</b>
<b>ACTIVIDADES PRELIMINARES</b>						
<b>CONCEPTUALIZACIÓN DE IDEA</b>						
	Círculos de calidad	glb	1	\$27,000.00	\$27,000.00	\$27,000.00
	Pruebas metalúrgicas	glb	1	\$12,000.00	\$12,000.00	\$12,000.00
<b>1</b>	<b>RECURSO HUMANO</b>					<b>\$389,250.00</b>
<b>1.1</b>	<b>Administración del Proyecto</b>					
	Gerente del proyecto/Supervisor del proyecto/Supervisor SSOMA	glb	1	\$81,000.00	\$81,000.00	\$81,000.00
<b>1.2</b>	<b>Sistema de bombeo</b>					
	Lider mecánico/soldador/apoyo montaje y soldadura	glb	1	\$84,000.00	\$84,000.00	\$84,000.00
	Técnico especialista HDPE/apoyo montaje	glb	1	\$66,000.00	\$66,000.00	\$66,000.00
<b>1.3</b>	<b>Sistema eléctrico/instrumentación</b>					
	Ingeniero eléctrico/instrumentista/técnico eléctrico/técnico instrumentista/especialista HDPE	glb	1	\$102,000.00	\$102,000.00	\$102,000.00
<b>1.4</b>	<b>Pruebas integrales de funcionamiento del sistema (Supervisión/líderes)</b>					
	Sistema de bombeo	glb	1	\$18,750.00	\$18,750.00	\$18,750.00
	Sistema eléctrico	glb	1	\$12,500.00	\$12,500.00	\$12,500.00
	Programación de lógica de control	glb	1	\$25,000.00	\$25,000.00	\$25,000.00
<b>2</b>	<b>PROTOCOLOS COVID-19</b>					<b>\$11,250.00</b>
	EPP's básicos y específicos	glb	1	\$8,250.00	\$8,250.00	\$8,250.00
	Insumos por protocolo Covid-19	glb	1	\$3,000.00	\$3,000.00	\$3,000.00
<b>3</b>	<b>EQUIPOS POR SISTEMA</b>					<b>\$622,950.00</b>
<b>3.1</b>	<b>Sistema de bombeo</b>					
	Bombas	glb	2	\$86,040.00	\$172,080.00	\$172,080.00
	Tuberías y accesorios de acero al carbono	glb	1	\$74,100.00	\$74,100.00	\$74,100.00
	Tuberías y accesorios HDPE	glb	1	\$28,560.00	\$28,560.00	\$28,560.00
	Válvulas de alivio	glb	2	\$3,720.00	\$7,440.00	\$7,440.00
<b>3.2</b>	<b>Sistema eléctrico/instrumentación (poka yoke)</b>					
	Tablero eléctrico para bombas	glb	2	\$25,350.00	\$50,700.00	\$50,700.00
	Equipamiento para cubículo de MCC	glb	2	\$4,590.00	\$9,180.00	\$9,180.00
	Equipo para automatización, PLS	glb	1	\$208,380.00	\$208,380.00	\$208,380.00
	Válvulas automáticas	glb	4	\$4,500.00	\$18,000.00	\$18,000.00
	Flujómetros	glb	6	\$6,000.00	\$36,000.00	\$36,000.00
	Tableros FLEX I/O para instrumentación	glb	1	\$18,510.00	\$18,510.00	\$18,510.00
<b>4</b>	<b>MATERIALES E INSUMOS</b>					<b>\$28,680.00</b>
<b>4.1</b>	<b>Sistema de bombeo</b>					
	Materiales para montaje de líneas de acero	glb	1	\$5,610.00	\$5,610.00	\$5,610.00
	Materiales para montaje de líneas de HDPE	glb	1	\$5,820.00	\$5,820.00	\$5,820.00
	Materiales para montaje de bombas e instrumentos	glb	1	\$6,480.00	\$6,480.00	\$6,480.00
	Materiales para montaje de base de bombas	glb	1	\$1,680.00	\$1,680.00	\$1,680.00
<b>4.2</b>	<b>Sistema eléctrico/instrumentación</b>					
	Cables y accesorios eléctricos	glb	1	\$5,550.00	\$5,550.00	\$5,550.00
	Cables y accesorios de instrumentación	glb	1	\$3,540.00	\$3,540.00	\$3,540.00
<b>5</b>	<b>GASTOS ADMINISTRATIVOS</b>					<b>\$9,350.00</b>
	Logística y coordinaciones de procura (aduanas, despacho)	glb	1	\$2,600.00	\$2,600.00	\$2,600.00
	EMO, SCTR, Seguro vida ley	glb	1	\$6,750.00	\$6,750.00	\$6,750.00
<b>6</b>	<b>UTILIDADES</b>					<b>\$126,255.60</b>
	Utilidades (12%)	glb	1	\$126,255.60	\$126,255.60	\$126,255.60

Entre las consideraciones técnicas para modificar el diseño de planta e implementación de sistema poka yoke tenemos:

- Instalación de dos nuevas bombas para la impulsión y transferencia de solución de cianuro.
- Tendido de nuevas líneas de tuberías de acero al carbono para envío de solución de cianuro desde planta ADR a Leachpad.
- Tiempo de parada por drenado y llenado de las nuevas líneas de acero al carbono y HDPE.

- Espacio disponible en MCC para el tablero eléctrico para el control de las nuevas bombas.
- Corte de suministro eléctrico para el conexionado de nuevo tablero eléctrico.
- Espacio libre en buzones eléctricos y banco ductos para tendido del nuevo cableado eléctrico e instrumentación.

El costo para implementar la programación lineal es de \$7,300.00. El detalle de la implementación se detalla a continuación:

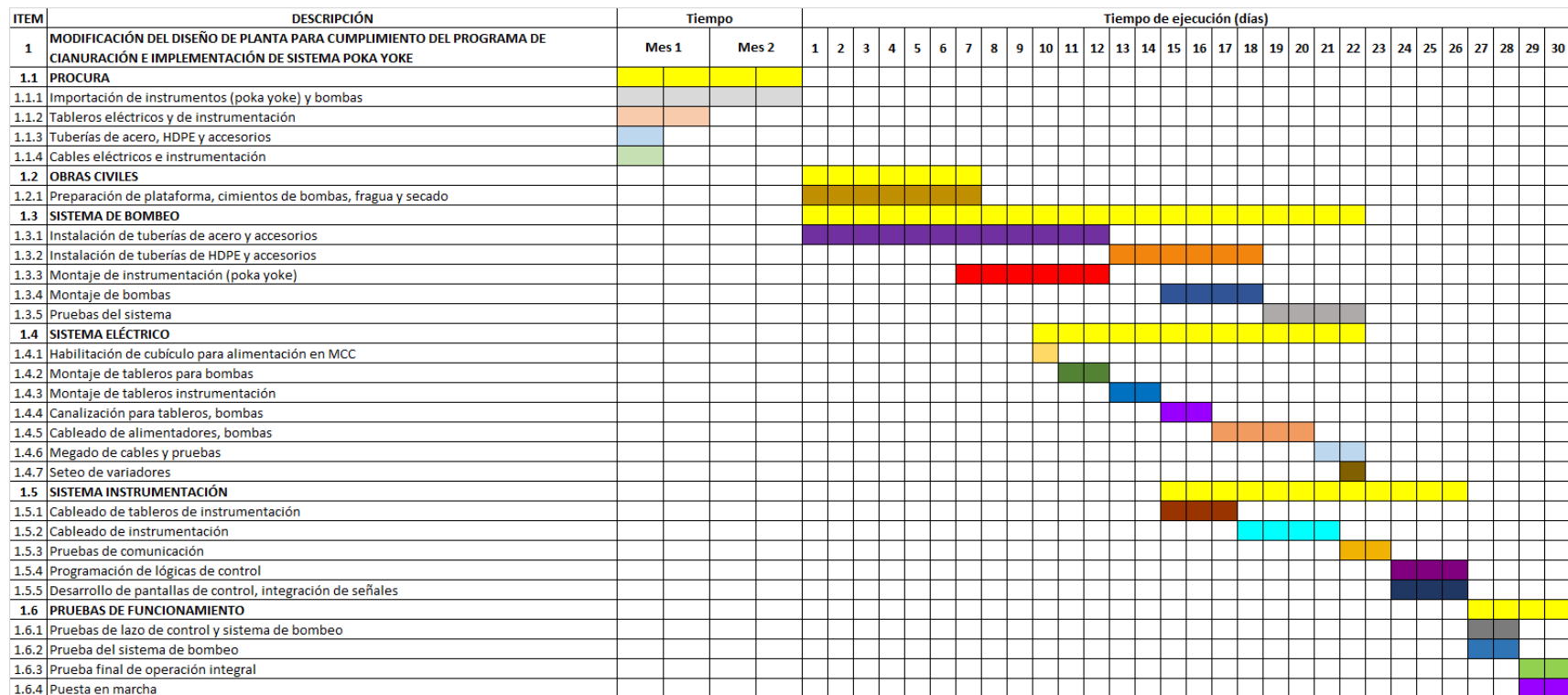
B	IMPLEMENTACIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL					\$7,300.00
1	RECURSO HUMANO					\$7,300.00
1.1	Planteamiento de programación lineal					
	Desarrollador de PL	glb	1	\$3,000.00	\$3,000.00	\$3,000.00
1.2	Pruebas de aplicación de programación lineal, mejoras					
	Desarrollador de PL	glb	1	\$1,500.00	\$1,500.00	\$1,500.00
	Software especializado	glb	2	\$1,000.00	\$2,000.00	\$2,000.00
1.3	Capacitación del personal					
	Capacitador en uso de aplicación de programación lineal	glb	1	\$800.00	\$800.00	\$800.00

Entre las consideraciones técnicas para la implementar la programación lineal tenemos:

- Instalación de canaletas, tendido de cableado eléctrico para nueva PC con programación lineal.

### 3.4.2 Cronograma de desarrollo: Gestión del tiempo.

A continuación, cronogramas de la aplicación de las herramientas propuestas:



ITEM	DESCRIPCIÓN	Tiempo (semanas)	
2	<b>DESARROLLO DE MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA DOSIFICACIÓN DE CIANURO</b>		
2.1	Levantamiento de información del sistema: variables, restricciones.		
2.2	Planteamiento de objetivo, desarrollo de modelo de PL		
2.3	Pruebas del modelo de PL		
2.4	Ajustes y mejoras del modelo de PL		
2.5	Capacitación de personal operativo		



## 4. RESULTADOS DEL PROYECTO

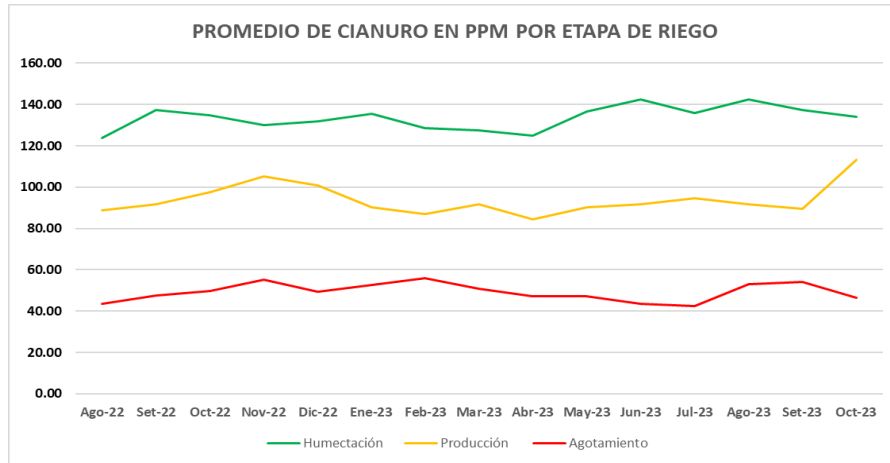
### 4.1 Validación funcional

#### 4.1.1 Cumplimiento de programa de cianuración de acuerdo con la etapa de riego

La implementación del sistema de riego diferenciado según etapa tomó tres meses (de enero a marzo del 2022) y ha logrado optimizar la adición de cianuro en las celdas tomando en cuenta su etapa de riego, tal como lo podemos apreciar en figura 15.

**Figura 15**

*Promedio de cianuro ppm por etapa de riego*



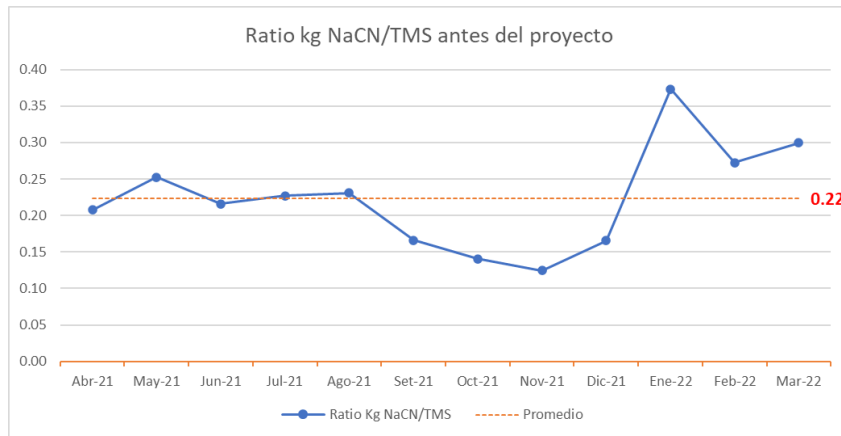
En el periodo de agosto del 2022 a octubre del 2023, el promedio de cianuro en agotamiento fue de 49.25 ppm; producción de 93.90 ppm y en humectación de 133.55 ppm.

#### 4.1.2 Reducción del incremento de cianuro en el proceso de lixiviación.

Entre el periodo de abril del 2021 a marzo del 2022, antes de la implementación del proyecto, el ratio mensual de consumo de cianuro por tonelaje procesado fue de 0.22 kg/TMS (ver figura 16). Como complemento del sistema de riego diferenciado, se utilizó la herramienta de programación lineal (técnicas de optimización) con el fin de maximizar el consumo de cianuro según la variación del flujo tratado en planta.

**Figura 16**

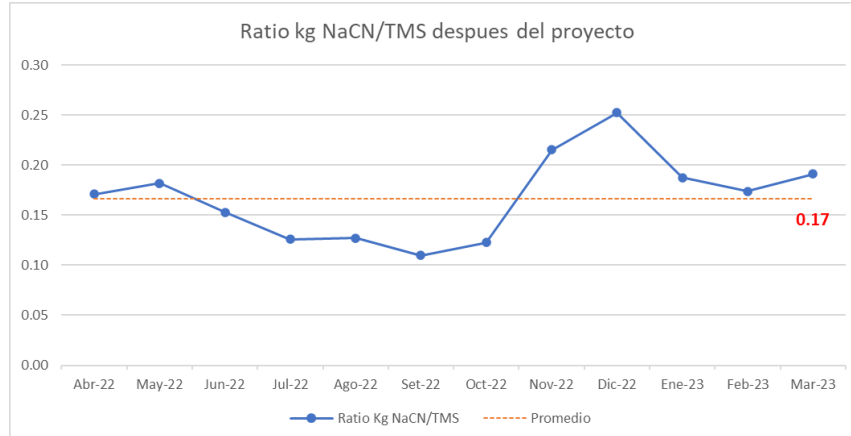
*Ratio de consumo de cianuro antes del proyecto*



Mientras que para el año siguiente el ratio se redujo a 0,17 kg/TMS (ver figura 17). Por lo cual podemos concluir que el proyecto ha sido exitoso.

**Figura 17**

*Ratio de consumo de cianuro despues del proyecto*
































#### 4.1.3 Reducción de demoras en la regulación de concentración de cianuro y traslados.

Junto con la implementación del sistema de riego diferenciado según etapa, se implementó un sistema poka yoke con la finalidad de reducir las demoras por traslado y espera de resultados de laboratorio en el proceso de regulación de concentración de cianuro. El poka yoke consta de un sistema automatizado de inyección de cianuro concentrado a las líneas de riego según la etapa de riego y está conformado por flujómetros y válvulas automáticas que regulan la concentración de cianuro según la

cantidad de flujo de solución a regar en el pad y concentración requerida. En la figura 18 se muestra el DAP del proceso de control y regulación de cianuro luego de implementar el proyecto.

**Figura 18**

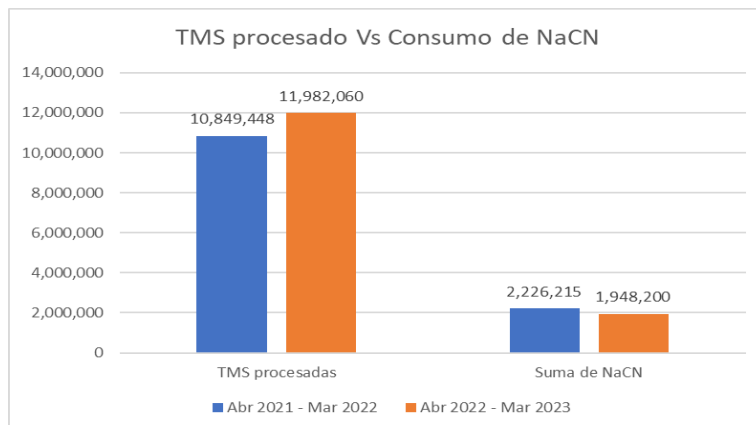
*DAP del proceso de control y regulación de cianuro luego del proyecto*

DAP DEL PROCESO DE CONTROL Y REGULACIÓN DE CIANURO						
Diagrama 1		Resumen				
Tarea: Contro y regulación de cianuro		Actividad	Actual	Propuesta		
		Operación 	8			
		Transporte 	4			
		Espera 	0			
Lugar: Pad de lixiviación		Inspección 	1			
		Almacenamiento 	1			
Elaborado: Andrés Maraví / David Hachiya						
		Distancia (m)				
		Tiempo (horas - hombre)				
Descripción	Tiempo (minutos)	Símbolo				Observaciones
Traslado de planta a rebombeo	4.7					
Toma de muestra de solución	3.1					
Traslado de muestra a laboratorio químico	4.8					
Análisis de muestra	15.4					
Seteo en sistema de dosificación de cianuro	3					
Reporte a gerencia	1.2					
Total		32.20	7.3	9.5	15.4	

Con las mejoras propuestas se aprecia que el consumo de cianuro por tonelaje de mineral procesado (TMS) entre abril del 2022 y marzo del 2023, fue menor respecto al consumo en el mismo periodo del año anterior, a pesar de haber procesado mayor tonelaje de mineral (Ver figura 19).

**Figura 19**

*TMS procesado vs consumo cianuro*



El ratio promedio anual de consumo de cianuro en kilogramos por tonelada métrica seca (TMS) ha disminuido de 0.22 a 0.17, generando un ahorro de \$ 1,953,503.00 dólares.

## 4.2 Evaluación del impacto económico

Para el análisis del impacto económico vamos a analizar el ratio de consumo del periodo antes de la mejora propuesta (abr 2021 a marzo 2022) y luego de la mejora (abril 2022 y marzo 2023)

**Tabla 6**

*Resumen de toneladas y consumo de cianuro*

Periodo	TMS procesadas	Suma de NaCN	Costo de NaCN\$	Ratio promedio
Abr 2021 - Mar 2022	10,849,448	2,226,215	6,322,449	0.22
Abr 2022 - Mar 2023	11,982,060	1,948,200	5,532,888	0.17

Luego se analizar el ahorro logrado luego de la implementación de la mejora para el ratio de consumo de cianuro por tonelaje de mineral seco en la tabla 7, para el caso que se mantenga el ratio de 0,22 kg/TMS

**Tabla 7**

*Ahorro estimado si se mantenía el ratio actual*

CONSUMO TEÓRICO - PERIDO ABR 2022 AL MAR 2023				
Periodo	TMS procesadas	Suma de NaCN	Costo de NaCN\$	Ratio promedio
Abr 2022 - Mar 2023	11,982,060	2,636,053	7,486,391	0.22
Ahorro	Dif \$	1,953,503		
	% ahorro	26.09		
	Peso NaCN	687,853		

En la siguiente tabla se detalla el flujo de caja donde el proyecto tuvo un VAN de \$2,586,165 y un TIR 112% para un periodo de 5 años.

### Flujo de caja

		22	23	24	25	26	
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	
<b>Ingresos</b>							
Ahorro de consumo de NaCN		\$ 1,953,503.00	\$ 1,038,270.63	\$ 909,975.44	\$ 801,020.48	\$ 623,631.17	
<b>Inversión</b>							
Etapa de diseño	\$ 35,843.83						
Implementación	\$ 1,234,035.60						
<b>Costos</b>							
Personal para mantenimiento LASA		\$ 15,433.07	\$ 15,433.07	\$ 15,433.07	\$ 15,433.07	\$ 15,433.07	
Repuestos		\$ 4,400.00	\$ 5,400.00	\$ 5,400.00	\$ 6,800.00	\$ 6,800.00	
Back up equipos		\$ 20,000.00	\$ 24,000.00	\$ 20,000.00	\$ 18,000.00	\$ 20,000.00	
<b>Flujo de caja</b>							
	-\$ 1,269,879	\$ 1,913,670	\$ 993,438	\$ 869,142	\$ 760,787	\$ 581,398	
Valor presente		\$ 1,693,513	\$ 778,007	\$ 602,359	\$ 466,605	\$ 315,560	\$ 3,856,045

TIR	112%
VAN	\$ 2,586,165
PERIODO DE RECUPERACIÓN	11 meses
IR	2.04

Tasa de Descuento de la Empresa para evaluar sus proyectos	13%
--	-----

### 4.3 Evaluación de matriz de riesgo del proyecto

ÁREA REVISORA	COMENTARIO U OBSERVACIÓN	PLAN DE ACCIÓN
<b>Mantenimiento planta</b>	Sera necesario capacitar al personal de mantenimiento de planta sobre el manejo y mantención de bombas de presión positiva, usadas en el proyecto. Así mismo, el personal de automatización tendrá que entrenarse en la programación lógica para el sistema Scada.	- La empresa ganadora de la implementación se encargó de capacitar en operación y mantenimiento a todas las áreas involucradas. Así mismo, se proporcionó los manuales, P&ID y PFD del proyecto.
<b>Gestión ambiental</b>	El proyecto debe garantizar que ante la rotura de tubería de las líneas que trasladan y dosifica cianuro concentrado desde planta hasta el sistema de rebombeo deben contar con un sistema de contención para evitar impactos ambientales.	- El proyecto cuenta con un sistema de protección de doble tubería para contención de derrames de líneas que trasladan cianuro de planta a tanques de rebombeo. También, se aprovecha el sistema de contención del tanque de rebombeo para la instalación de los sistemas de inyección de cianuro a las líneas.
<b>Seguridad y salud ocupacional</b>	Se requiere cambiar y actualizar procedimientos para la distribución de cianuro a las líneas de riego al Pad, así mismo los procedimientos para mantención de equipos relacionados con el sistema de riego de cianuro diferenciado por etapas.	- Se implemento 4 procedimientos nuevos para la operación segura de la dosificación de cianuro en las líneas.
<b>Logística</b>	Al consumir menor cantidad de cajas de cianuro por día, se deberá cambiar el nuevo quiebre de stock. Así mismo, se deberá renegociar los futuros contratos anuales con las empresas proveedoras de cianuro.	- Contratos y logística, renegocian los contratos anuales de abastecimiento de cianuro.
<b>Geotecnia</b>	N/A	
<b>Gestión social</b>	N/A	

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES**

- Los resultados de la implementación del modelo de mejora para el ratio del consumo de cianuro mediante las herramientas TOC, programación lineal y poka yoke logró reducir de 0.22 a 0.17 kg de cianuro por TMS equivalente a \$1,953,503.
- Al eliminar la restricción y maximizar la cantidad de cianuro en las etapas de humectación y producción en el proceso de adición de cianuro en las celdas por etapa de riego, se ha reducido el consumo de cianuro en 687,853 kg de cianuro luego de la implementación del modelo de mejora.
- Después de la implementación del modelo de mejora se aprecia una diferenciación en la cantidad de cianuro de acuerdo de la etapa de riego, para el año siguiente a la implementación, el promedio de cianuro en la etapa de humectación fue de 133.55 ppm, producción de 93.90 ppm y agotamiento 49.25 ppm.
- Mediante la implementación del sistema poka yoke, se logró reducir el tiempo de traslados en la regulación de adición de cianuro en un 38% equivalente a 10 min del total en el proceso de regulación.

### **5.2 RECOMENDACIONES**

- Evaluar la factibilidad de implementar un medidor de concentración de cianuro para eliminar por completo la intervención de personal operativo y tomar las decisiones más rápidas.
- Se recomienda realizar nuevamente un análisis de restricciones en el sistema de riego de celdas, si bien se logró eliminar la restricción en el punto de dosificación tendríamos que evaluar si los demás procesos relacionados con la adición y riego de celdas no tendrán nuevas restricciones.
- Como se puede apreciar en el presente trabajo la implementación de Poka Yoke ha logrado disminuir la intervención humana, por ello sería conveniente evaluar en que otros puntos del proceso de recuperación de cianuro se puede implementar y de esta manera evitar errores humanos.
- Se requiere implementar un plan de mantenimiento y calibración en los flujómetros de las líneas de solución cianurada, con el fin de ajustar la dosificación de cianuro requerida.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Barragán Moreno, M. (2009). *Toc: de lo complejo a lo sencillo*. El Cid Editor.  
<https://elibro.upc.elogim.com/es/lc/upc/titulos/28560>
- Caro, J. M. (2018, February 18). “Poka Yoke”: *Metodología Lean Six Sigma para prevenir Errores de Medicación*. <https://Www.Stoperroresdemedicacion.Org/Es/Blog/Poka-Yoke-Metodologia-Lean-Six-Sigma-Para-Prevenir-Errores-de-Medicacion/>.  
<https://www.stoperroresdemedicacion.org/es/blog/poka-yoke-metodologia-lean-six-sigma-para-prevenir-errores-de-medicacion/>
- Cevallos, R. P., Toro Loor, R., & Moreira Cedeño, M. (2020). Aplicación de la teoría de restricciones (TOC) en un proceso de fabricación de chocolates. *Journal Business Science*, 13–24.
- Dudek, M., & Szewieczek, D. (2009). The Poka-Yoke method as an improving quality tool of operations in the process. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, 36(1). [https://www.researchgate.net/publication/44385664\\_The\\_Poka-Yoke\\_method\\_as\\_an\\_improving\\_quality\\_tool\\_of\\_operations\\_in\\_the\\_process](https://www.researchgate.net/publication/44385664_The_Poka-Yoke_method_as_an_improving_quality_tool_of_operations_in_the_process)
- Fedossova, A., Buitrago Suescún, O. Y., & Britto Agudelo, R. A. (2011). *Introducción a la Programación Lineal con aplicaciones en administración de operaciones* (1st ed.). Colegio de Estudios Superiores de Administración - CESA.  
<https://elibro.upc.elogim.com/es/lc/upc/titulos/222425>
- Guerrero Salas, H. (2009). *Programación Lineal aplicada* (2nd ed.). Ecoe Ediciones.  
<https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2017/07/Programaci%C3%B3n-lineal-2ed.pdf>
- Herrera Herbert, J. (2017). *Introducción a la minería: conceptos, tecnologías y procesos* (Vol. 1). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minar y Energías.  
<https://oa.upm.es/63396/>
- Instituto Andaluz de Tecnología (IAT). (2012). *La respuesta está en la innovación*. Asociación Española de Normalización y Certificación.  
<https://elibro.upc.elogim.com/es/lc/upc/titulos/53578>



- Ortiz Barrios, M. A. (2013). Teoría de restricciones y modelación PL como herramientas de decisión estratégica para el incremento de la productividad en la línea de toallas de una compañía del sector textil y de confecciones. *Propect*, 21–29. <https://doi.org/10.15665/rp.v1i1.24>
- Osinergmin. (2023). *Informe Mensual de Energía y Minería*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4302698/2023.03.15%20Informe%20Mensual%20de%20Energ%C3%ADa%20y%20Miner%C3%ADa.pdf?v=1679439049>
- Rajadell Carreras, M. (2021). *Lean Manufacturing: Herramientas para producir mejor*. Ediciones Diaz de Santos S.A. [https://books.google.com.pe/books?id=40VIEAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=40VIEAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Reyes Sotelo, Y., Mula, J., Díaz Madronero, M., & Gutiérrez González, E. (2017). Plan maestro de producción basado en programación lineal entera para una empresa de productos químicos. *Universidad Pablo de Olavide*, 147–168. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/195385/1/1022416308.pdf>
- Rosio, C., Aslam, T., Srikanth, K. B., & Shetty, S. (2019). Towards an assessment criterion of reconfigurable manufacturing systems within the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 28, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.013>
- Samaniego Guevara, H. (2021). Plan de producción farmacéutica de soluciones parentales con programación lineal. *Estudios de La Gestión*, 187–210. <https://doi.org/10.32719/25506641.2021.10.9>
- Socconini Pérez Gómez, L. V. (2019). *Lean Company: más allá de la manufactura*. Marge Books. <https://elibro.upc.elogim.com/es/lc/upc/titulos/117565>
- Soler Fajardo, F., Molina Focazzio, F., & Rojas Cortés, L. (2016). *Álgebra lineal y programación lineal: con aplicaciones a ciencias administrativas, contables y financiera* (3rd ed.). Ecoe Ediciones Ltda. <https://elibro.upc.elogim.com/es/lc/upc/titulos/122455>
- Suñé, A., Fonollosa, J. B., Fernández, V., & Sallán, J. M. (2016). *Programación lineal: métodos cuantitativos para la toma de decisiones*. Universitat Politècnica de Catalunya. <https://elibro.upc.elogim.com/es/lc/upc/titulos/61485>

## 7. ANEXOS

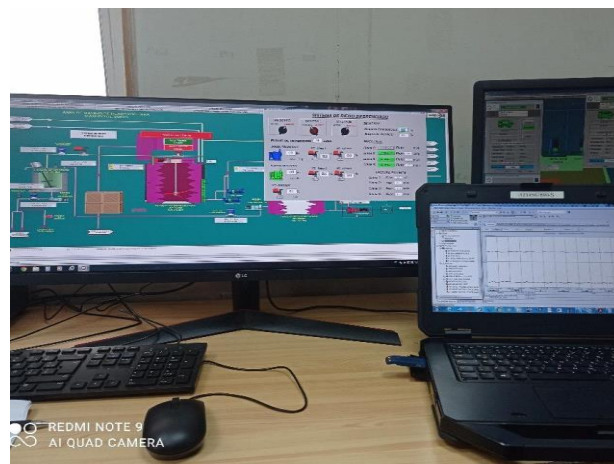
**Figura 20**

*Equipos del sistema poka yoke*



**Figura 21**

*Implementación del proyecto para riego diferenciado*



**Tabla 8**

*Modelo en LINGO para maximizar concentración en celdas, según el flujo de trabajo por línea*

```
MAX = (X1*F1+X2*F2+X3*F3+X4*F4+X5*F5+X6*F6-C*Z)*24*1.88/1000;  
  
!VALORES DE FLUJO;  
F1 = 450;  
F2 = 440;  
F3 = 440;  
F4 = 440;  
F5 = 250;  
F6 = 180;  
  
!FLUJO TOTAL;  
Z = F1+F2+F3+F4+F5+F6;  
  
!CIANURO DE POZAS;  
C = 15;  
  
!RESTRICCIONES METALURGICAS POR CICLO DE RIEGO;  
  
@BND(120,X1,140);  
@BND(80,X2,100);  
@BND(40,X3,60);  
@BND(40,X4,60);  
@BND(30,X5,45);  
@BND(30,X6,45);  
X5 = X6;  
  
!RESTRICCIONES OPERATIVAS;  
  
!RESTRICCIÓN POR BOMBA DE MAKE UP;  
  
F5*X5 + F6*X6 <= 18500;  
  
!RESTRICCIÓN POR BOMBA DE INYECCIÓN EN REBOMBEO;  
  
F1*X1 + F2*X2 + F3*X3 + F4*X4 <= 154000;
```