

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA



“ESTUDIO DE LA MEJORA DE LOS PARÁMETROS EN LA
RECUPERACIÓN DE PLATA UTILIZANDO MINITAB 17,
PLANTA ZTRATEK S.A. (Cía. MINERA CASAPALCA S.A)”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
QUÍMICO

PRESENTADO POR:

BACHILLER: Edwin Pedro ZARIA CHAVARRIA

LIMA - PERÚ
2016

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida. A mis padres Margarita y Pedro por ser fuente de inspiración y motivación para superarme cada día más y así terminar el gran esfuerzo que empezaron algunos años a Vilma por creer en mí y ser uno de los motores en mi vida.

AGRADECIMIENTO

Siendo esta oportunidad propicia, deseando hacer llegar mi más profundo y sincero agradecimiento a mi Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga quien forjó mi formación profesional y a las personas que contribuyeron a este esfuerzo, brindando valiosas sugerencias, consejos personales en los diferentes campos, críticas consecutivas y apoyo incondicional:

Al Ing. ABEL NILO JUSCAMAYTA TOMASEVICH quien me asesoró esta investigación con esmero y preocupación de maestro.

Así mismo a la Empresa ZTRATEK S.A.C (Cía. MINERA CASAPALCA S.A) quien colaboró con los materiales y equipos para la presente investigación.

INDICE

CAPITULO I

1. ASPECTOS GENERALES.....	9
1.1. ORIGEN Y EVOLUCIÓN.....	9
1.2. UBICACIÓN.....	9
1.3. GEOGRAFÍA.....	10
1.3.1. Clima	11
1.3.2. Fisiografía.....	11
1.4. RECURSOS.....	11
1.4.1. Recursos hídricos.....	11
1.4.2. Aire comprimido.....	11
1.4.3. Recurso eléctrico.....	11
1.4.4. Recurso humano.....	11
1.5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.5.1. Problema general	12
1.5.2. Problema específico.....	12
1.6. OBJETIVOS.....	12
1.6.1. objetivo general.....	12
1.6.2. objetivo específico.....	12

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO	
2.1.PROCESOS HIDROMETALURGICOS EN EL BENEFICIO DE LA PLATA.....	14
2.1.1. Lixiviación.....	14
2.1.2. Agentes disolventes.....	14
2.2.MÉTODO DE LIXIVIACIÓN.....	15
2.3.VARIABLES EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN.....	16
2.4.MINITAB 17.....	17
2.5.CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD.....	17
2.6.DIAGRAMA DE PARETO.....	18
2.7.CONTROL DE VARIABLES.....	19
2.8.CAUSAS DE LA VARIACIÓN.....	22
2.9.PROCESO ESTABLE.....	24
2.10.CAPACIDAD DE PROCESO.....	26
2.11.MUESTREO.....	32
2.12.PRUEBA DE NORMALIDAD.....	33
2.13.ANÁLISIS DE REGRESIÓN.....	35

CAPITULO III.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE PLATA EN LA PLANTA ZTRATEK S.A.C (Cía. MINERA CASAPALCA S.A).....	38
3.1.SITUACION ACTUAL.....	38
3.2.CIRCUITO DE LIXIVIACIÓN DE PLATA.....	40
3.2.1. Concentrado tratado del primer circuito.....	40
3.2.2. Secado del concentrado acondicionado del primer circuito.....	40
3.2.3. Lixiviación de plata.....	40
3.2.4. Precipitación de plata.....	40
3.2.5. Filtración.....	40
3.3.PUNTOS DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS	43

CAPITULO IV

4. ESTUDIO ESTADÍSTICO.....	45
4.1.ETAPAS DE INVESTIGACIÓN.....	46
4.2.TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.....	46
4.2.1. Medición del proceso.....	47
4.2.2. Evaluación de los indicadores de desempeño en el circuito de lixiviación de plata.....	47
A. Diagrama de Pareto.....	47
B. Diagrama de Ishikawa.....	49
C. Estudio de R&R y graficas de rachas de medida.....	51
D. Prueba de normalidad de Anderson-Darling.....	54
E. Análisis de capacidad de proceso.....	55
F. Análisis de valor Sigma.....	57
4.3.PRUEBA DE MEJORA CON MINITAB 17.....	59
4.3.1. Modelo matemático del circuito de lixiviación de plata.....	59

CAPITULO V

5. ESTUDIO DE MEJORA EN LA LIXIVIACIÓN DE PLATA.....	63
5.1.PLAN DE SOLUCIONES.....	63

CAPITULO VI

6. FASE DE CONTROL.....	71
6.1.FASE DE CONTROL.....	71

CAPITULO VII

7. EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	74
7.1.MEJORAS OBTENIDAS.....	74
7.2. RESULTADOS DE PARÁMETROS OBTENIDOS CON MINITAB 17.....	75
7.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE PROCESOS.....	78

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

GLOSARIO

- LSC : límite de control superior
- LIC : límite de control inferior
- LSE : límite superior de especificación
- LIE : límite inferior de especificación
- DPMO: Defectos por millón de oportunidades
- Cp : Índice de Capacidad
- Cpi: Capacidad unilateral inferior
- CEP: Control estadístico de procesos
- 6σ : Metodología de mejora de procesos, centrada en la reducción de la variabilidad de los mismos, consiguiendo reducir o eliminar los defectos o fallas.
- Cps: Capacidad unilateral superior
- Cpk :Descentramiento relativo
- Barren: Cantidad mínima de plata que retorna al proceso de lixiviación.
- Clarificador: tanque de retención de impurezas en el proceso de precipitación de plata.
- Ratio: Relación cuantificada entre dos magnitudes que refleja su proporción.
- pH: Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa
- SPC: Statical Process Control
- R&R: Análisis de repetibilidad y reproducibilidad

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación estudia el tema de la mejora en la recuperación de plata utilizando Minitab 17, de la Planta ZTRATEK S.A.C (Cía. MINERA CASAPALCA S.A) con la finalidad de obtener mayor cantidad de plata en el circuito de lixiviación que es un tipo de mineral de sulfuro de cobre como calcopirita (CuFeS_2), calcocita (Cu_2S) y argentita (Ag_2S).

En efecto es experimental y estadístico para determinar los mejores rangos operativos y una descripción del proceso de lixiviación de plata.

Se elabora los diagramas de proceso y el cronograma de trabajo. En la fase medición se describe la situación actual del proceso a través del mapa de flujo de valor, se identifican las variables de entrada y salida de cada uno de los procesos del circuito de lixiviación de plata para seleccionar las variables críticas del proceso que influyen en el problema principal mediante análisis R&R. La fase de mejora es la última que se desarrolla y se divide en dos grupos: En el primer grupo se desarrolla el planteamiento de la mejora en distintos puntos del proceso por cada herramienta analizada usando Minitab 17 y el modelo matemático que rige en el proceso de lixiviación de plata. En el segundo grupo se desarrolla el diseño para las variables que influyen en el problema principal mediante un plan de acción en distintos puntos que influyen en la recuperación. En cuanto la metodología de investigación, esta será una investigación descriptiva, causal y comparativa.

RESUMEN

El desarrollo de esta tesis contempla el diseño de un sistema de control estadístico de rangos operativos en una empresa de lixiviación de plata, empleando herramientas estadísticas para elevar la recuperación de plata.

En su primera parte se presenta las generalidades de la planta ZTRATEK S.A.C (Cía. MINERA CASAPALCA S.A.) donde se revisa la historia de esta empresa. En el segundo capítulo se determina un marco teórico sobre el proceso de lixiviación de plata y el control estadístico.

En el tercer capítulo se realizó una descripción del proceso operacional del circuito de lixiviación de plata detallando los parámetros de control como también puntos de muestreos.

El cuarto capítulo se presenta las técnicas de investigación, evaluación de indicadores de desempeño en el circuito de lixiviación de plata, formulación de modelos matemático que rige el circuito y la simulación de rangos operativos para obtener una recuperación de 90 % en plata realizada con el software Minitab 17, fue la herramienta para la construcción y análisis de gráficas de control.

El quinto capítulo se realizó el estudio de mejora, se da a conocer un plan de mejora para obtener para mantener constante los rangos operativos simulados con el software Minitab 17.

El sexto capítulo se realizó la fase de control después de los cambios realizados en la planta, viendo la tendencia de los rangos operativos en planta en tiempo real.

Y el siguiente capítulo se realizó la evaluación de resultados mediante indicadores de procesos se presenta los beneficios obtenidos en cuanto a la mejora continua de la evaluación

CAPÍTULO I

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. ORIGEN Y EVOLUCIÓN

La planta ZTRATEK S.A.C (Cía. Minera Casapalca S.A.) es una empresa establecida el año 2011, dedicada al procesamiento y comercialización de concentrados de cobre y plata el cual es obtenido mediante la lixiviación del concentrado de sus yacimientos de mineral tetraedrita.

En marzo del 2012 ZTRATEK S.A.C inicia trabajos de instalación del primer circuito en lixiviar el arsénico y antimonio de concentrados tetraedrita, así incrementar la ley de plata al concentrado.

En enero del 2013 se culmina la investigaciones en lixiviación de plata del concentrado tratado del primer circuito, en mayo del mismo año se realizaron las instalaciones de equipos y maquinarias del circuito de lixiviación de plata.

En diciembre del 2013 inicia el tratamiento del concentrado del primer circuito llegando a procesar 6 t/día con recuperación de 65% en plata.

En junio del 2014 se incrementa la capacidad de la Planta, alcanzando un nivel de producción de alrededor de 16tn/día. Llegando a una recuperación de 85% en plata.

Por otro lado, la empresa se embarca en un programa de inversiones conducentes a incrementar su capacidad de tratamiento, el cual se proyecta alcanzar el nivel de tratamiento por encima de las 32 tn/día.

1.2. UBICACIÓN

La Planta ZTRATEK S.A.C (Cía. Minera Casapalca S.A), se ubica en la carretera Central N° 9,5 Cajamarquilla, distrito de Lurigancho, provincia de Lima, departamento de Lima.

El área se ubica en la franja de la Costa Peruana, donde las alturas máximas llegan a 600 m.s.n.m.

Su acceso desde la ciudad de Lima, se efectúa utilizando la siguiente ruta: - Autopista Lima – Chosica = 9.5 km. - Trocha afirmada = 0.5 km.



FIGURA 1.1 MAPA DE UBICACIÓN

[FUENTE: DEPARTAMENTO DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA]

1.3. GEOGRAFÍA

1.3.1. Clima

El clima del área es típico de la Costa Peruana, cálido y húmedo en verano con temperaturas que oscilan durante el día entre 20° y 30° C con medias de 75 % de humedad relativa, mientras que en el invierno la temperatura oscila entre 11° y 18°, con humedad relativa de hasta 100 % que sumada a la precipitación de llovizna estacional, favorecen el desarrollo de vegetación en las lomas.

1.3.2. Fisiografía

Geomorfológicamente se reconocen depósitos eólicos que cubren las antiguas llanuras de inundación y flancos más bajos de los cerros; depósitos fluvio-aluvionales en las quebradas, testigos de períodos de avenidas de agua torrenciales y depósitos coluviales o de piedemonte que se extienden a manera de abanicos en los flancos escarpados de cerros pedregosos.

1.4. RECURSOS

1.4.1. Recursos hídricos

En la planta ZTRATEK S.A.C no contamos con agua, toda el agua se trae en cisternas de 16 a 18 m³, tanto para consumo humano así como las operaciones en planta. El requerimiento total de agua es aproximadamente de 20 m³ de agua al día en proceso operacional.

1.4.2. Aire comprimido

En la planta ZTRATEK S.A.C actualmente se cuenta con 04 compresoras eléctricas ATLAS COPCO GA90 de 500 CFM. En total la capacidad de aire permite operar 12 filtros de alta presión (consumo total de aire: 1844 CFM).

1.4.3. Energía eléctrica

Se cuenta con energía eléctrica de 1000 kW.

1.4.4. Recursos humanos

En la actualidad se cuenta con una fuerza laboral aproximada de 100 trabajadores; entre mecánicos, electricistas y operarios, también se cuenta con 40 empleados, quienes conforman las áreas de administración, logística, ingeniería y centro médico.

1.5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.5.1. Problema general

- En la línea de lixiviación de la Planta ZTRATEK S.A.C (Cía. Minera Casapalca S.A), de acuerdo al procesamiento de lixiviación se obtenía el 85 % de plata, motiva un estudio de mejora para incrementar la recuperación de plata utilizando Minitab 17.

1.5.2. Problemas específicos

- Se presenta limitaciones en el conocimiento de los procedimientos de determinación de los principales rangos operativos en cuanto al manejo de las variables de control tales como temperatura, concentración de reactivos, pH, tonelaje.
- La empresa no cuenta aplicaciones de nuevas tecnologías de investigación en el campo de procesamiento de minerales que contribuyan al incremento del conocimiento informático para mejorar procesos de recuperación de plata como es el uso de Minitab 17.

1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Objetivo General

- Realizar el estudio de mejora de parámetros operacionales, en la recuperación de plata en el proceso lixiviación de plata en la planta ZTRATEK S.A.C (Cía. Minera Casapalca S.A) usando Minitab 17.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Establecer los principales rangos operativos en cuanto al manejo de las variables operativas tales como: flujo de concentrado (kg/h), concentración de sulfato de cobre pentahidratado (mg/L), concentración de tiosulfato de sodio (mg/L), clarificador (g/L) y barren (mg/L).

- Aplicar nuevas técnicas de investigación utilizando software en el campo de procesamiento de minerales que contribuya al incremento del conocimiento en estas áreas tecnológicas, especialmente en lo referente al beneficio de los minerales.
- Elaborar la propuesta más viable, con los resultados obtenidos, para gestionar el mejoramiento del circuito de lixiviación de plata en la Planta ZTRATEK S.A.C a partir de las evaluaciones desprendidas del análisis teórico y práctico realizado con Minitab 17.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS EN EL BENEFICIO DE LA PLATA

2.1.1. Lixiviación

Es el procedimiento que tiene por finalidad la recuperación de un metal de un concentrado o una mena, mediante un disolvente y la separación de la solución resultante de la fracción sin disolver. La lixiviación es un proceso de la hidrometalurgia mediante el cual se extraen los metales de los minerales que contienen especies económicamente recuperables, a partir de una solución.

2.1.2. Agentes disolventes

Existen una serie de variables que influyen decisivamente en la elección del agente lixivante ideal para cada operación, como la naturaleza del mineral o concentrado a lixiviar y deben tener algunas de las siguientes características:

- Que sea selectivo, es decir, que disuelva en forma efectiva el metal que se pretende recuperar y que sea prácticamente inerte con los demás componentes del mineral o concentrado.
- Que la concentración del agente lixivante no sea muy alta y que reaccione disolviendo los valores metálicos a la temperatura ambiente.
- Los valores metálicos disueltos que se encuentran en fase acuosa pueda recuperarse fácilmente precipitándoles, con un reactivo químico o por precipitación electrolítica
- Que sea barato
- Que no sea toxico.
- Que sea regenerable

[Haung D.H.H., TwidwelD.L.G., Miller D.J.D. .- Hidrometalugia]

- a. **Hidróxido de sodio:** Conocido como sosa cáustica es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe humedad del aire (higroscópico). El hidróxido de sodio es muy corrosivo, generalmente se usa en forma sólida o como una solución de 50% en peso. Permite el control del pH en el proceso de lixiviación.
- b. **Sulfato cúprico pentahidratado:** Es el producto de la reacción química entre el sulfato de cobre (II) anhidro y agua. Éste se caracteriza por su color calipso y sus rápidos cambios de temperatura al agregarle más agua. Su fórmula química: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.
- c. **Tiosulfato de sodio pentahidratado:** Denominado hiposulfito sódico, es un compuesto inorgánico cristalino que se encuentra con mayor frecuencia en forma de pentahidrato $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. permite la formación del complejo de plata.[metalurgiaymateriales.mex.tl/blog_50469_LIXIVIACION-DE-ORO-Y-PLATA.]

2.2. MÉTODOS DE LIXIVIACIÓN

En la industria se practican varios métodos para contactar la fase sólida con la solución acuosa extractante en un espacio confinado. La selección del método de lixiviación depende de:

- **Características físicas y químicas de la mena**

Una mena de un elemento químico, generalmente un metal, es un mineral del que se puede extraer aquel elemento porque lo contiene en cantidad suficiente para poderlo aprovechar. Así, se dice que un mineral es mena de un elemento químico, o más concretamente de un metal, cuando mediante un proceso de minería se puede extraer ese mineral de un yacimiento y luego, mediante metalurgia, obtener el metal a partir de ese mineral.

Asociado al concepto de mena, está el de ganga. Se llama así al conjunto de todos los minerales sobrantes que se encuentran asociados a la mena en la roca extraída en un

yacimiento. La ganga hace que la ley del metal disminuya, por lo que es necesario separarla de la mena, como primera etapa en la concentración y obtención del metal.

2.3. VARIABLES EN EL PROCESO

En el proceso de recuperación existen una serie de variables que son las siguientes:

a. Dilución de la pulpa (μ)

Relación de líquido a sólido en la pulpa que debe ser óptima y permitir un mayor contacto, además ser fácilmente operable.

- **OBSERVACIÓN:** El tamaño de partícula debe de ser de malla 80 es el tamaño óptimo para un buen contacto con el concentrado y los agentes lixiviantes, se probó en laboratorio. [Laboratorio de investigaciones Metalúrgicas_ZTRATEK SAC, 2012].

b. Concentración de agentes lixiviantes

La concentración del sulfato de cobre pentahidratado y tiosulfato de sodio que se utiliza en la lixiviación de minerales de plata es una práctica común mantener la solución entre 60 g/L a 55 g/L en concentración. Laboratorio de investigaciones Metalúrgicas_ZTRATEK SAC, 2012].

- **OBSERVACIÓN:** Se prepara la solución, observando la relación entre los equivalentes gramos de los iones Tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$) y Cuproso (Cu^+), presentes en la solución lixiviante, en Tiosulfato de Sodio Pentahidratado ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) y Sulfato de Cobre Pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) respectivamente. [Laboratorio de investigaciones Metalúrgicas_ZTRATEK SAC, 2012].

$$\text{Ratio} = \frac{[Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O]}{[CuSO_4 \cdot 5H_2O]} = 1,3(\text{Ec. 2. 1})$$

c. Alcalinidad

Para una buena lixiviación de la plata es recomendable un medio alcalino, alrededor de pH mayor 8. [Laboratorio de investigaciones Metalúrgicas_ZTRATEK SAC, 2012].

- **OBSERVACIÓN:** A este pH podemos obtener el complejo de plata.

d. Tiempo de lixiviación

El tiempo de lixiviación para los minerales de plata por lo general es mayor a 3 horas, pero esta magnitud es solo referencial, puesto que está sujeto a la regulación de otras variables, aunque podía hasta cierto punto acelerarse mediante una trituration fina de la mena, usando soluciones de mayor concentración de tiosulfato de sodio y sulfato de cobre pentahidratado. [Laboratorio de investigaciones Metalúrgicas_ZTRATEK SAC, 2012].

e. Temperatura

Incrementando la temperatura se espera incrementar la disolución de la plata, por otro lado a mayor temperatura disminuye el contenido de O_2 en la solución. Experimentalmente se ha encontrado que la máxima temperatura permisible es $44^{\circ}C$. La energía de activación de la disolución de la plata está en 2 a 5 kcal/mol que es un valor típico para un proceso controlado por difusión. [Laboratorio de investigaciones Metalúrgicas_ZTRATEK SAC, 2012].

2.4. MINITAB

Minitab es un paquete estadístico que abarca todos los aspectos necesarios para el aprendizaje y la aplicación de la estadística en general. El programa incorpora opciones vinculadas a las principales técnicas de análisis estadístico (análisis descriptivo, contrastes de hipótesis, regresión lineal y no lineal, series temporales, análisis de tiempos de fallo, control de calidad, análisis factorial, ANOVA, análisis cluster, etc.), además de proporcionar un potente entorno gráfico y de ofrecer total compatibilidad con los editores de texto, hojas de cálculo y bases de datos más usuales. [CONTROL ESTADISTICO DE PROCESOS Dr.Reyes, Oct.2006].

2.5. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

El CEP o SPC (Statistical Process Control) constituye una metodología de diagnóstico de la estabilidad de un indicador de calidad, de un proceso y de su capacidad para cumplir con sus especificaciones o límites de tolerancia.

Lo definiremos como el uso de técnicas estadísticas y/o algoritmos de control estadístico para lograr uno o más de los siguientes objetivos:

- Incrementar al conocimiento acerca del proceso.
- Hacer que un proceso de comporte de una manera determinada.
- Reducir la variación de los parámetros de producto final, o de otra manera, mejorar el desempeño del proceso.



FIGURA 2.1. COMPORTAMIENTO GLOBAL DEL CONTROL DE PROCESOS

[FUENTE.BUREAU VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

2.6. DIAGRAMA DE PARETO

El diagrama de Pareto es una herramienta de análisis que ayuda a tomar decisiones en función de prioridades, el diagrama se basa en el principio enunciado por Vilfredo Pareto que dice:

"El 80% de los problemas se pueden solucionar, si se eliminan el 20% de las causas que los originan".

En otras palabras: un 20% de los errores vitales, causan el 80% de los problemas, o lo que es lo mismo: en el origen de un problema, siempre se encuentran un 20% de causas vitales y un 80% de triviales.

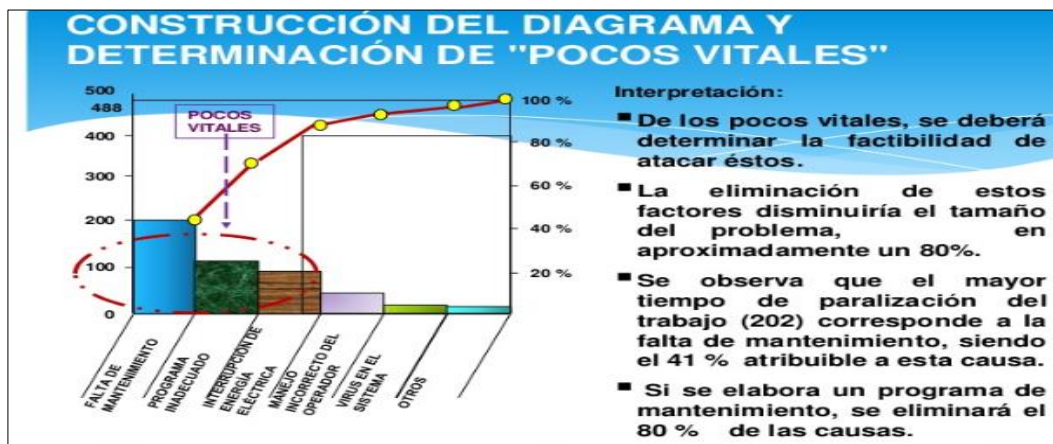


FIGURA 2.2. DIAGRAMA DE PARETO
[FUENTE. <http://es.slideshare.net/IMarlb0r0l/diagrama-pareto>]

2.7. CONTROL DE VARIABLES

2.7.1. Proceso

Es un conjunto de actividades mutuamente relacionadas que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados. Norma ISO 9000

Esta definición puede ser aplicada a cualquier tipo de proceso de una organización, ya sea desde los más simples a los más complejos, o aplicarlo al diseño, desarrollo o producción de un servicio.

La variación detectada es, así, la suma de la variabilidad real, intrínseca al proceso y debida a factores no controlados, más la variabilidad de la medida, ya que no existe un sistema de medición perfecto. [Dr. P. Reyes / Octubre 2006, CONTROL ESTADISTICO, Pag.19]

2.7.2. Variación

En todos los procesos repetitivos encontramos variación y, a pesar de que la variación está implícita en todo lo que se hace y lo que nos rodea, difícilmente se puede evitar. Las diferencias, ya sean grandes o pequeñas, siempre existen.



FIGURA 2.3. VARIACIÓN DE PROCESO
[FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

La variabilidad natural siempre existe en cualquier proceso de producción, no importa que tan bien diseñado esté. Esta variabilidad natural es denominada causas comunes o aleatorias de variabilidad, un proceso que opera en estas condiciones se dice que está en control estadístico.

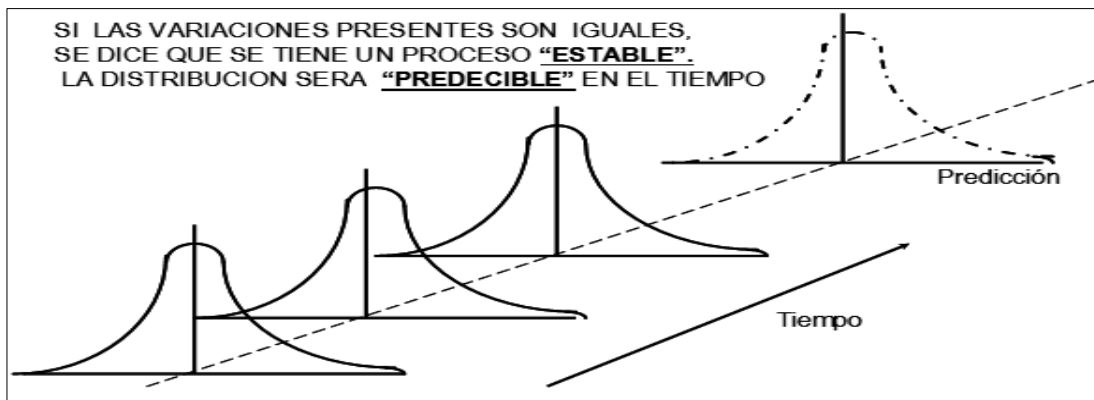


FIGURA 2.4. PROCESO EN CONTROL, CAUSAS COMUNES PRESENTES
[FUENTE: Dr. P. Reyes / Octubre 2006, CONTROL ESTADISTICO, Pag.19]

De la figura N° 2.4 cuando el proceso está en control, la mayor parte de la producción se encuentra dentro de los límites de control (LSC y LIC). Sin embargo cuando el proceso está fuera de control, una gran proporción del proceso se encuentra fuera de estos límites.

Existen otras fuentes de variabilidad que pueden ser causadas por máquinas, errores de operadores, materiales defectuosos o alguna otra (medio ambiente, métodos, mediciones). Esta variabilidad es muy grande en relación con la variabilidad natural y es originada por causas especiales o asignables haciendo que el proceso opere fuera de control estadístico [FUENTE: BUSSAB, W.O,e MORETTIN, P.A. (2002). Estadística Básica.].

El Objetivo del CEP es la detección oportuna de la ocurrencia de causas especiales para tomar acciones correctivas antes de que se produzcan unidades defectivas o no conformes, para esto se utilizan las cartas de control, permitiendo también la estimación de la capacidad del proceso y la reducción de la variabilidad en el proceso.

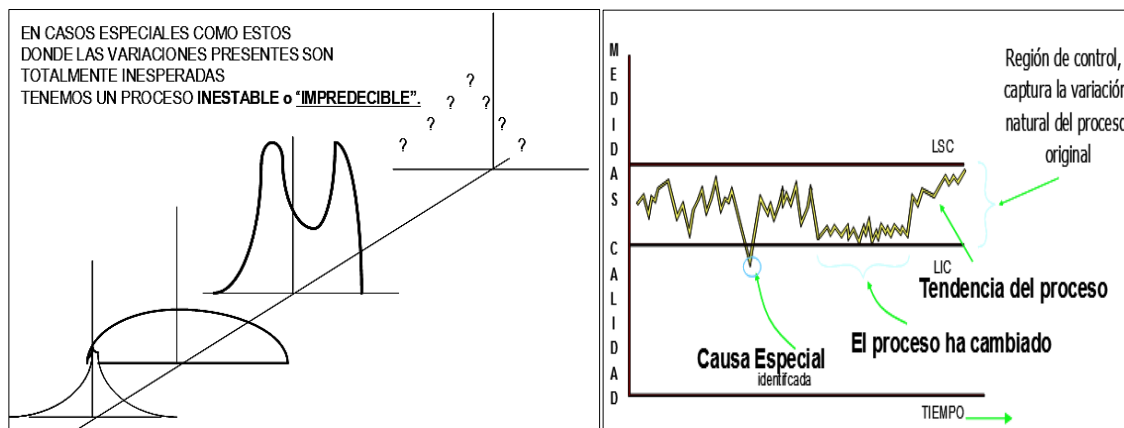


FIGURA 2.5. PROCESO FUERA DE CONTROL

[FUENTE: Dr. P. Reyes / Octubre 2006, CONTROL ESTADISTICO, Pag.20]

a. Factores de Influencia

Un resumen de los distintos factores que afectan a un proceso es el siguiente:

- Mano de obra.
- Materia prima.
- Medio ambiente.
- Método de producción.
- Máquinas.

- Medición.



FIGURA 2.6. FACTORES QUE INFLUYEN EN UN PROCESO
 [FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

2.8. CAUSAS DE LA VARIACIÓN

En todo proceso se producen variaciones. Éstas pueden ser de distinta naturaleza:

2.8.1. Causas no Asignables o Aleatorias

Su naturaleza es de tipo aleatorio, debidas a la propia variación natural del proceso, y como consecuencia de las mismas, el proceso tiene un comportamiento estable en el tiempo, de forma que las características de salida se pueden predecir.

Características

Las causas aleatorias se caracterizan por:

- Consistir en muchas causas de variación pequeña provocando pequeñas fluctuaciones en los datos sin afectar al proceso global.
- Aparecer en muchos instantes del proceso.
- Ser previsibles en el tiempo.
- Permanecer en el proceso y ser inherente a él.
- Difícil y antieconómico reducir sus efectos.

Nunca debe ajustarse un proceso cuando la variación es producida por causas aleatorias ya que, aunque individualmente contribuyen a pequeñas fluctuaciones, en conjunto nos dan información del patrón normal de comportamiento que sigue ese proceso.

Ejemplos de este tipo de causas serían: variaciones debidas a la materia prima, a diferencias de habilidad entre el personal, a factores ambientales, etc.

2.8.2. Causas Asignables o Especiales

La naturaleza de estas causas no es aleatoria, sino que aparecen esporádicamente en el proceso de forma que cuando actúan producen efectos definidos, y cuando se elimina la causa, se elimina la variación producida por ella.

Estas causas pueden provocar variaciones importantes que separen significativamente los datos respecto de la pauta esperada para ese proceso. Dan como consecuencia un proceso inestable sobre el que no se puede predecir la homogeneidad de las características de salida.

Características

Las causas especiales se caracterizan por: Constar de una o pocas causas importantes y fáciles de identificar.

- Aparecer esporádicamente en el proceso.
- Ser de variación inestable.
- Ser imprevisibles en el tiempo.
- Poder reaparecer.
- Actúan en un punto concreto del proceso.

Ejemplos de este tipo de causas serían: desajustes de maquinaria, fallos de controles, errores humanos, etc.

2.9. PROCESO ESTABLE

Las causas de variación, aleatorias y especiales, así como su intensidad hacen que un proceso pueda diferenciarse en:

- **Proceso estable:** Es el que resulta cuando sólo están presentes causas aleatorias de variación. También se dice, para este caso, que el proceso está bajo control.
- **Proceso inestable:** Es el que resulta cuando aparece alguna causa especial de variación

Si, al tomar los valores de un proceso, se asume que el comportamiento de los datos corresponde a una distribución normal, se puede representar el proceso mediante una campana de Gauss. A continuación, se representa un proceso estable y uno inestable a través de estas curvas de normalidad. Para ambos casos, la característica de estudio viene representada con la curva de distribución normal y el gráfico interpreta cómo varía ésta con el tiempo.

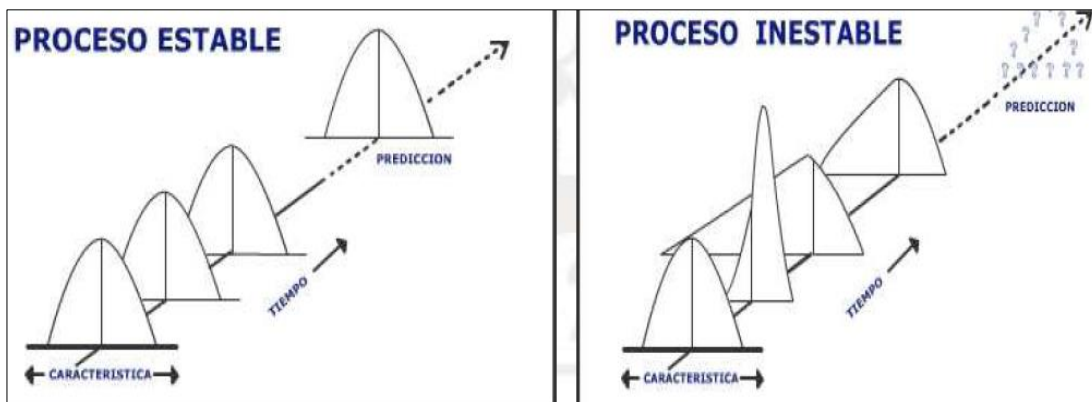


FIGURA 2.7. PROCESOS ESTABLE E INESTABLE

[FUENTE. BUREAU VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

NOTA:

- Para un proceso estable, se podrá predecir la pauta de comportamiento del proceso en función al tiempo.
- Para un proceso inestable, es una incertidumbre conocer su comportamiento a lo largo del tiempo.

2.9.1. Proceso Bajo Control

Un proceso se encuentra bajo control, siendo entonces un proceso estable, si:

- El proceso sólo se encuentra afectado por las causas aleatorias de variación.
- Se eliminan sucesivamente las causas especiales, de manera que la variación sea producida únicamente por las causas aleatorias.

Cabe aclarar en este contexto que, el hecho de que un proceso esté bajo control estadístico se refiere a que el proceso es consistente en su comportamiento. Esto no significa necesariamente que el producto o servicio cumpla con lo especificado, puede ser consistentemente incumplido, en el sentido de que, lo que se obtiene del proceso está fuera de las especificaciones. Así, por ejemplo, en el siguiente gráfico se aprecia que existen unos límites de control para el proceso denominados:

- LSC = límite de control superior.
- LIC = límite de control inferior.

Y también figuran los límites de especificaciones, establecidos por el cliente o la organización:

- LSE = límite superior de especificación.
- LIE = límite inferior de especificación.

El proceso está bajo control, porque los datos se encuentran dentro de los límites de control establecidos para el proceso, pero no cumple las especificaciones, ya que los

límites no cubren toda la curva de datos, de forma que quedarían elementos fuera de ella.

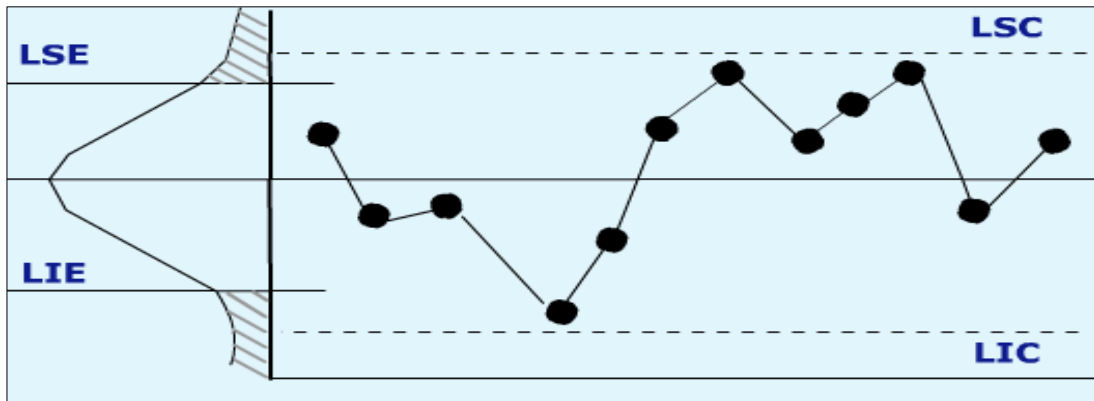


FIGURA 2.8. CARTA DE CONTROL
[FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

2.10. CAPACIDAD DE UN PROCESO

Como hemos comentado, un proceso sobre el que sólo actúan causas aleatorias se dice que está bajo control. Pero este hecho no significa necesariamente que las características de salida sean las especificadas. [BUSSAB, W.O,e MORETTIN, P.A. (2002). Estadística Básica.].

Para que ocurra esto, es preciso que la capacidad del proceso, que viene definida por la variación total debida a las causas aleatorias, sea la correcta.

- a. Un proceso es capaz cuando las medidas de las distribuciones estadísticas están dentro de los límites de especificación.
- b. La capacidad del proceso, satisface las especificaciones que generalmente se establecen con el cliente.

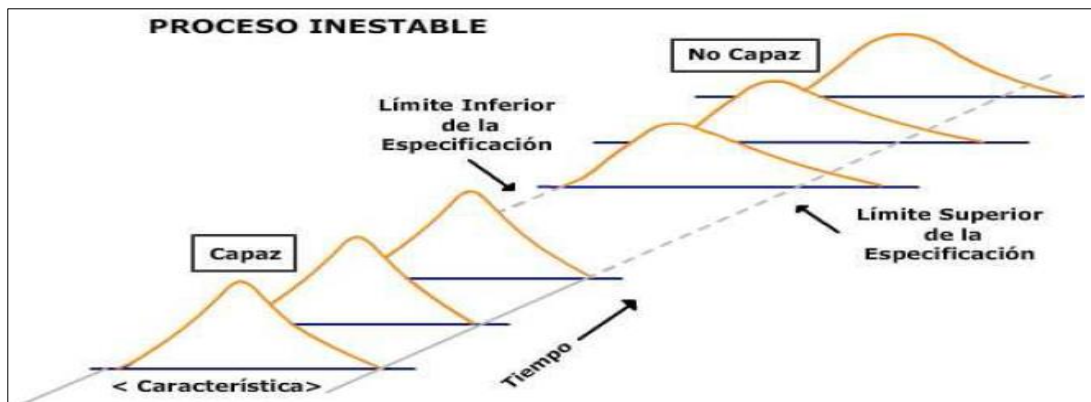
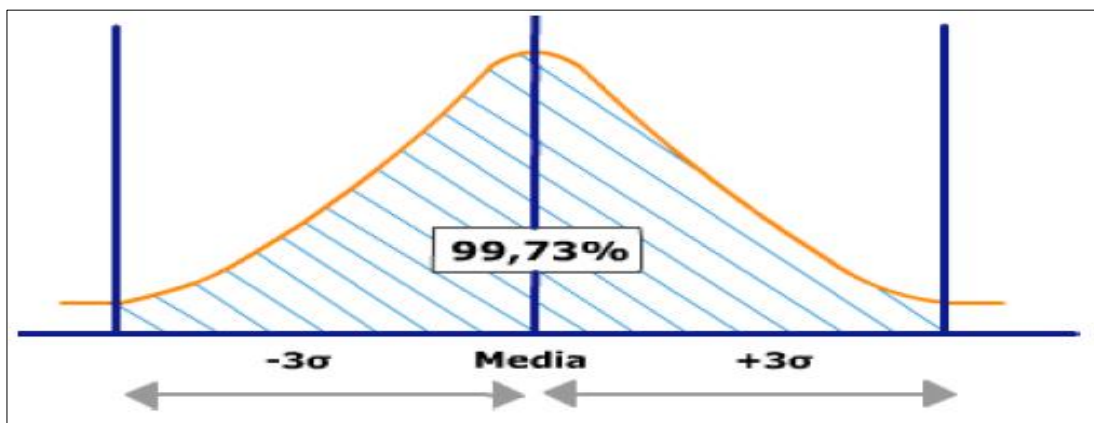


FIGURA 2.9. CAPACIDAD DE PROCESO
[FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

Se entiende que la capacidad es una medida de dispersión. Cuyo valor es 6 veces la desviación típica del proceso, (σ):

$$\text{Capacidad} = 6 * \sigma \text{ (Ec. 2. 2)}$$

Si el proceso está bajo control, es decir, no presenta causas especiales, y los datos que se tomen de él siguen una distribución Normal con $N(\mu, \sigma)$, el intervalo $\mu \pm 3\sigma$, correspondiente a una longitud 6σ , asume el 99.73% de la población.



.FIGURA 2.10. SEIS SIGMA
[FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

2.10.1. Índices de Capacidad

En la mayoría de los procesos se desea comparar un producto o servicio con un conjunto de especificaciones. Estas especificaciones denominadas generalmente límites de especificación, están determinadas por la propia organización o por el cliente. Algunas veces un producto se fabrica sin especificaciones previas, entonces se habla de límites de tolerancia naturales para el proceso. La capacidad del proceso, 6σ , es una medida de la dispersión natural de la variable que mide la calidad del producto o servicio. El intervalo 6σ es el que se corresponde con las tolerancias naturales del proceso.

Como ya hemos comentado, bajo normalidad, el 99,73% de la población estará dentro del intervalo 6σ centrado en la media del proceso, por lo que, en este caso, la capacidad del proceso sí es una medida representativa del porcentaje de población aceptable, pero no dice nada sobre si dicha calidad se ajusta o no a las especificaciones. Los índices de capacidad permiten analizar la variabilidad del proceso con relación a estos requisitos o especificaciones comparando la capacidad del proceso con estos requisitos. Se utilizará la siguiente notación para los límites de especificaciones:

- LSE = límite superior de especificación.
- LIE = límite inferior de especificación.

A continuación se muestran los índices de capacidad más habituales. Para la interpretación de los índices, se supondrá que la variable de interés se distribuye normalmente.

a. Índice de Capacidad Cp

También se denomina índice de variabilidad porque este índice de capacidad sólo considera variaciones, sin tener en cuenta si el proceso está o no centrado con respecto a la media. Se calcula según la fórmula:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Este índice compara la relación entre el intervalo de especificaciones, LSE Y LIE, y una medida de la variación del proceso como es la capacidad natural del proceso, 6σ .

Este índice compara la relación entre el intervalo de especificaciones, LSE Y LIE, y una medida de la variación del proceso como es la capacidad natural del proceso, 6σ .

INTERPRETACIÓN:

- Valores inferiores a 1 indican que el proceso no es capaz de cumplir con las especificaciones, obteniéndose valores fuera del intervalo especificado.
- Valores ligeramente superiores a 1 indican que, si el proceso está perfectamente centrado, se producirá un número muy pequeño de unidades defectuosas, que, sin embargo, aumentará si el proceso se descentra.
- Lo recomendable es obtener valores superiores a 1,33 correspondiente a una capacidad 6σ , para el cual el proceso es capaz. Así:

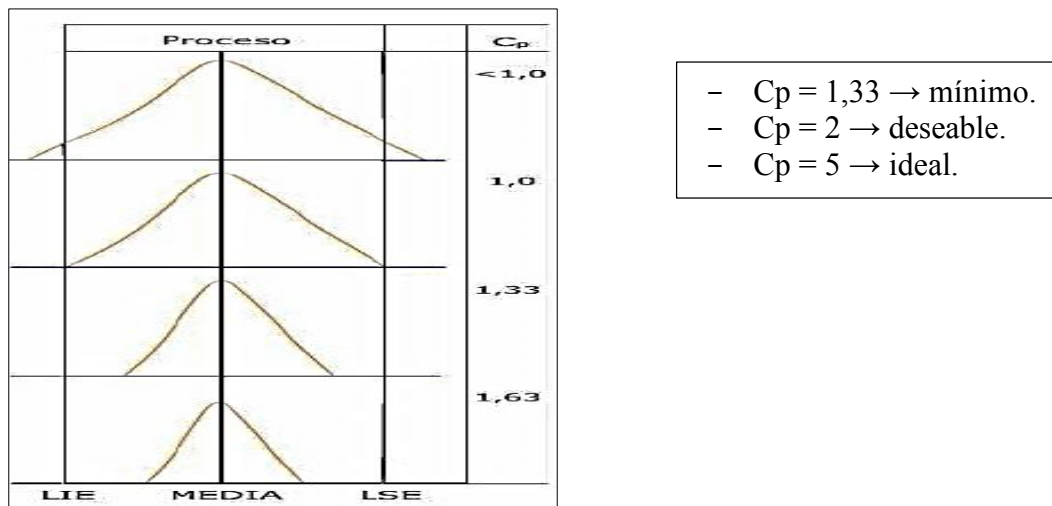


FIGURA 2.11. INDICE DE CAPACIDAD DE PROCESO

[FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

b. Índice de Capacidad C_{pi}

Se denomina índice de capacidad unilateral inferior, en inglés abreviado como C_{pl} . Se calcula según la fórmula:

$$C_{pi} = \frac{X - LIE}{3\sigma} \text{ (Ec. 2. 4)}$$

Este índice mide la relación entre el intervalo comprendido entre la media del proceso X , y el límite inferior de especificación, LIE, y 3σ , para una capacidad de 6σ . Se suele utilizar cuando el intervalo de especificación es unilateral y sólo existe límite de especificación inferior.

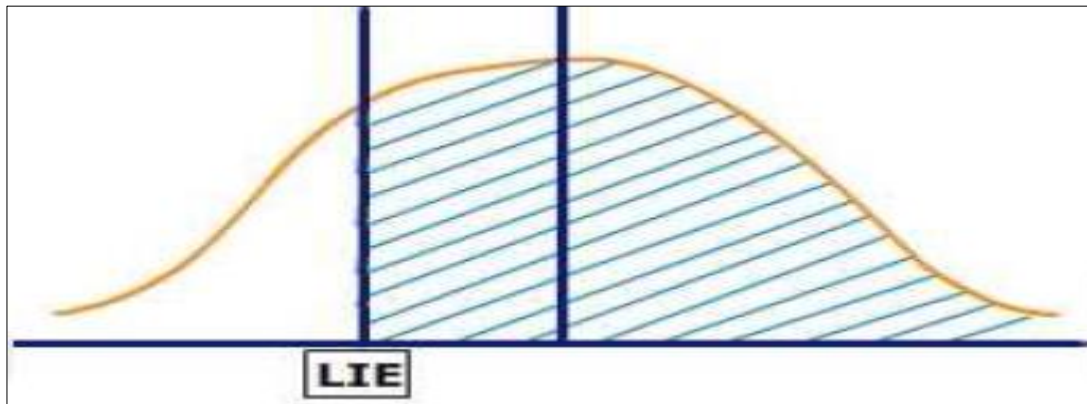


FIGURA 2.12. LÍMITE INFERIOR DE PROCESO
[FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

c. Índice de Capacidad Cps

Se denomina índice de capacidad unilateral superior, en inglés se utiliza la abreviatura Cpu. Se calcula según la fórmula:

$$C_{ps} = \frac{LIE - X}{3\sigma} \text{ (Ec. 2. 5)}$$

Este índice mide la relación entre el intervalo comprendido entre la media del proceso $\bar{X}$, y el límite superior de especificación, LSE, y 3σ , calculado para una capacidad igual a 6σ . Se suele utilizar cuando el intervalo de especificación es unilateral y sólo existe límite de especificación superior.

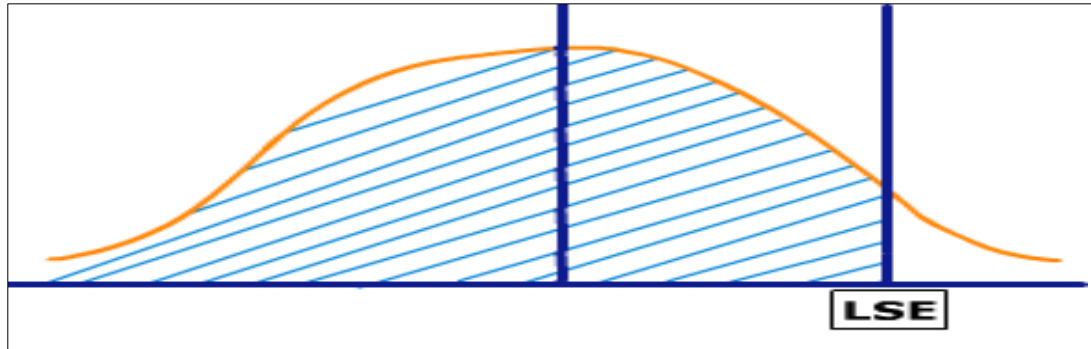


FIGURA 2.13 . LÍMITE SUPERIOR DE PROCESO
[FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

d. Índice de Capacidad Cpk

Se denomina índice de descentramiento relativo. La letra k se identifica con el coeficiente de descentralización, luego, este coeficiente se utiliza para calcular el índice de capacidad en procesos no centrados. El índice de capacidad Cpk no sólo mide la variación del proceso respecto a un intervalo especificado sino también la ubicación del proceso respecto a la media.

Se define como el menor valor encontrado entre el índice da capacidad unilateral superior, Cps, y el inferior, Cpi.

Viene definido por:

$$Cpk = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \right\} \text{ (Ec. 2. 6)}$$

Este índice tiene en cuenta:

- La media del proceso.
- La variación del proceso.

- Las especificaciones.

Se podrán dar dos casos:

- El proceso está centrado si $C_{pk}=C_p$.
- El proceso no está centrado si $C_{pk}<C_p$.

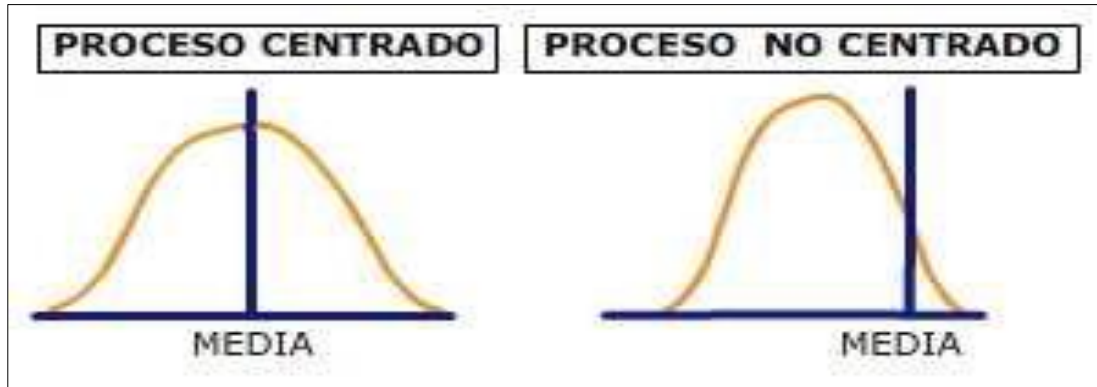


FIGURA 2.14. PROCESO CENTRADO Y NO CENTRADO

[FUENTE. BUREAO VERITAS/ W. Shewart y E. Deming, 1929]

Si $C_{pk}<1$ implica que en las condiciones actuales se está produciendo más de un 0,27% de defectos, para capacidad de proceso igual a 6σ .

2.11. MUESTREO

Es un método estadístico sistemático para obtener información sobre alguna característica de una población mediante el estudio de una fracción representativa de la población (es decir, la muestra). [Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (1998). Recolección de los datos].

Existen varias técnicas de muestreo que se pueden emplear tales como:

- muestreo aleatorio simple
- muestreo estratificado
- muestreo sistemático
- muestreo secuencial,

- muestreo de lotes salteados

Y la selección de las técnicas se determina según el propósito del muestreo y de las condiciones bajo las cuales se va a llevar a cabo.

El muestreo puede dividirse sin mucha rigidez en dos amplias áreas no excluyentes: “muestreo de evaluación” y “muestreo para proyectos”.

- a. El muestreo de aceptación se ocupa de la toma de decisión con respecto a aceptar o no aceptar un “lote” (es decir, un grupo de elementos) basada en el resultado de una muestra seleccionada de ese lote. Se dispone de una amplia gama de planes de muestreo de aceptación para satisfacer los requisitos o las aplicaciones específicas.
- b. El muestreo para la evaluación se utiliza en estudios enumerativos o analíticos para estimar los valores de una o más características en una población, o para estimar cómo se distribuyen esas características entre la población. El muestreo para la evaluación está frecuentemente asociado con sondeos donde la información se recopila de las opiniones del público sobre un tema, como en las encuestas de clientes. Puede igualmente aplicarse a la recopilación de datos para otros propósitos, tales como las auditorías. Una forma especializada del muestreo para la evaluación es el muestreo exploratorio, el cual se utiliza en estudios enumerativos para conseguir información sobre una o varias características de una población o de un subconjunto de una población. También lo es el muestreo de producción, que puede realizarse para llevar a cabo, por ejemplo, un análisis de la capacidad del proceso. Otra aplicación es el muestreo de materiales a granel (por ejemplo, minerales, líquidos y gases) para el cual se han desarrollado planes de muestreo.

2.12. REALIZAR UNA PRUEBA DE NORMALIDAD

Los resultados de la prueba indican si se debe rechazar o no se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos provienen de una población distribuida normalmente.

Puede realizar una prueba de normalidad y producir una gráfica de probabilidad normal en el mismo análisis. La prueba de normalidad y la gráfica de probabilidad suelen ser las mejores herramientas para juzgar la normalidad, especialmente cuando se trata de muestras pequeñas. [LIND, Douglas y MARCHAL, William y MASON, (2004).]

Tipos de pruebas de normalidad

Los siguientes son tipos de pruebas de normalidad que puede utilizar para evaluar la normalidad.

- **Prueba de Anderson-Darling**

Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si la diferencia observada es adecuadamente grande, usted rechazará la hipótesis nula de normalidad en la población.

- **Prueba de normalidad de Ryan-Joiner**

Esta prueba evalúa la normalidad calculando la correlación entre los datos y las puntuaciones normales de los datos. Si el coeficiente de correlación se encuentra cerca de 1, es probable que la población sea normal. El estadístico de Ryan-Joiner evalúa la fuerza de esta correlación; si se encuentra por debajo del valor crítico apropiado, usted rechazará la hipótesis nula de normalidad en la población. Esta prueba es similar a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

- **Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov**

Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si esta diferencia observada es adecuadamente grande, la prueba rechazará la hipótesis nula de normalidad en la población. Si el valor p de esta prueba es menor que el nivel de significancia (α) elegido, usted puede rechazar la hipótesis nula y concluir que se trata de una población no normal.

Comparación de las pruebas de normalidad de Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov y Ryan-Joiner

Las pruebas de Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov se basan en la función distribución empírica. La prueba de Ryan-Joiner (similar a la prueba de Shapiro-Wilk) se basa en regresión y correlación.

Las tres pruebas tienden a ser adecuadas para identificar una distribución no normal cuando la distribución es asimétrica. Las tres pruebas distinguen menos cuando la distribución subyacente es una distribución t y la no normalidad se debe a la curtosis. Por lo general, entre las pruebas que se basan en la función de distribución empírica, la prueba de Anderson-Darling tiende a ser más efectiva para detectar desviaciones en las colas de la distribución. Generalmente, si la desviación de la normalidad en las colas es el problema principal, muchos profesionales de la estadística usarían una prueba de Anderson-Darling como primera opción. [<http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/normality/test-for-normality/>].

2.13. ANÁLISIS DE REGRESIÓN

El análisis de regresión relaciona el comportamiento de una característica de interés (normalmente llamada la “variable de respuesta”) con los factores potencialmente causales (normalmente llamados “variables explicativas”). Tal relación está especificada por un modelo que puede venir del campo de la ciencia, economía, ingeniería, etc., o puede derivarse empíricamente. El objetivo es ayudar a comprender la causa potencial de variación en la respuesta, y para explicar cómo cada factor contribuye a la variación. Esto se consigue relacionando, estadísticamente, la variación en la variable de respuesta con la variación en las variables explicativas, y obtener el mejor ajuste, minimizando las desviaciones entre la predicción y la respuesta real.

El análisis de regresión permite al usuario hacer lo siguiente: Comprobar hipótesis con respecto a la influencia de variables explicativas potenciales sobre la respuesta, y utilizar esta información para describir el cambio estimado en la respuesta para un cambio dado en la variable explicativa;

Predecir el valor de la variable de respuesta, para valores específicos de las variables explicativas, predecir (a un nivel de confianza) el rango de valores dentro del cual se espera que esté la respuesta, dados los valores específicos para las variables explicativas;

Estimar la dirección y grado de asociación entre una variable de respuesta y una variable explicativa (aunque tal asociación no implica causalidad). Tal información podría utilizarse, por ejemplo, para determinar el efecto de cambio de un factor tal como la temperatura en el rendimiento del proceso, mientras que otros factores se mantienen constantes.

Entre algunos de los beneficios que esta técnica ofrece se encuentra que: el análisis de regresión puede proporcionar comprensión dentro de la relación entre varios factores y la respuesta de interés, y dicha comprensión puede ayudar a guiar las decisiones relacionadas con el proceso que está siendo estudiado y eventualmente mejorarlo. La comprensión producida por el análisis de regresión viene de su habilidad para describir concisamente el comportamiento de los datos de respuesta, compara los subconjuntos de datos diferentes pero relacionados, y analiza las relaciones potenciales de causa-efecto. Cuando las relaciones están bien modeladas, el análisis de regresión puede dar una estimación de las magnitudes relativas del efecto de las variables explicativas, así como identificar la importancia relativa de estas variables sobre el resultado. Esta información es potencialmente de gran valor en el control o mejora de los resultados del proceso. El análisis de regresión también puede proporcionar estimaciones de la magnitud y la fuente de influencia sobre la respuesta ocasionada por factores no medidos u omitidos en el análisis. Esta información se puede utilizar para mejorar el sistema de medición o el proceso. El análisis de regresión puede utilizarse para predecir los valores de la variable de respuesta, para determinados valores de una o más variables explicativas; igualmente puede utilizarse para pronosticar el efecto de cambios en variables explicativas sobre una respuesta existente o predicha. Puede ser útil dirigir dichos análisis antes de invertir tiempo o dinero en un problema cuando se desconoce la eficacia de una acción. Sin embargo también existen limitaciones como

lo puede ser que al realizar modelos de un proceso, se requiere habilidad en la especificación de un modelo de regresión adecuado (por ejemplo, lineal, exponencial, multivariable), y al utilizar diagnósticos para mejorar el modelo. La presencia de variables omitidas, errores de medición, y otras fuentes de variaciones inexplicadas en la respuesta puede complicar la realización del modelo. Las suposiciones específicas detrás del modelo de regresión en cuestión, y las características de los datos disponibles, determinan qué técnica de estimación es apropiada en un problema de análisis de regresión. Un problema que a veces se encuentra en el desarrollo de un modelo de regresión es la presencia de datos cuya validez es cuestionable. La validez de tales datos debería investigarse cuando sea posible, ya que la inclusión u omisión de datos del análisis podría influenciar las estimaciones de los parámetros del modelo, y así la respuesta.

La simplificación del modelo, minimizando el número de variables explicativas, es importante al realizar el modelo. La inclusión de variables innecesarias puede enmascarar la influencia de variables explicativas y reducir la precisión del modelo de predicciones. Sin embargo, la omisión de una variable explicativa importante puede limitar seriamente el modelo y reducir la utilidad de los resultados.

CAPÍTULO III

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE PLATA EN LA PLANTA ZTRATEK S.A.C (Cía. MINERA CASAPALCA S.A)

3.1. SITUACIÓN ACTUAL

El proceso de lixiviación de plata está constituido por las actividades que se describen en la FIGURA 3.1 desarrollado en la planta de procesos ZTRATEK S.A.C. (Cía. Minera Casapalca S.A).

Cuando el mineral de cabeza es extraído de la minera CASAPALCA S.A conocido como vetas (concentrado tetraedrita) y es transportada a la planta. Dentro de la planta, dicho mineral pasa por una serie de procesos a través de los equipos de procesamiento que lo convertirán en un concentrado final de alta ley de plata.

La mayoría de empresas mineras buscan mejorar la producción, para lo cual muchas veces se enfocan en conseguir mayor cantidad de maquinaria o personal pero no se dan cuenta que muchos recursos están ociosos o no son utilizados. Para ello, lo que se propone es un método de análisis en los procesos de producción mediante la metodología estadística con el fin de mejorar los parámetros más irregulares en el circuito de lixiviación de plata de la planta ZTRATEK S.A.C. (Cía. Minera Casapalca S.A).



3.2. CIRCUITO DE LIXIVIACIÓN DE PLATA

3.2.1. Concentrado tratado del primer circuito

- a. El concentrado que sale del circuito del primer circuito es disgregado con una ley de plata entre 500-600 Oz/Tc.

3.2.2. Secado del concentrado lixiviado acondicionado del primer circuito

- a. El concentrado lixiviado limpio producto del circuito de acondicionamiento tiene hasta un 16 % de humedad y es alimentado al horno rotativo mediante una tolva y una faja transportadora para el secado respectivo a 120 °C hasta obtener un porcentaje de humedad final de 0.5% aproximadamente.
- b. Este concentrado seco se descarga del horno rotativo y es alimentado a un molino de martillos para reducir el tamaño del concentrado aglomerado hasta malla 80, que a su vez desemboca en un tornillo transportador sin fin que lleva la carga al elevador de cangilones y éste alimentará a la tolva de finos del circuito de lixiviación de plata.

3.2.3. Lixiviación de plata

- a. Desde la tolva de finos, el concentrado lixiviado limpio seco y con un tamaño de partículas adecuado se alimentará al reactor N°1, $T = 44^{\circ}\text{C}$ a una razón de **600-700 kg/h**, mediante un tornillo dosificador y una faja transportadora.
- b. Simultáneamente se alimentará también una solución de **sulfato de cobre y tiosulfato de sodio** a un caudal de 20 m³/h y un **pH de 6.5**, de este reactor, la pulpa se alimentará al espesador N°1 por reboce. Del espesador N°1 se bombeará la pulpa con una bomba peristáltica al reactor N°2, $T = 44^{\circ}\text{C}$ donde se alimenta también la misma solución a un caudal de 17 m³/h que también por reboce alimentará al espesador N°2.

- c. La solución clarificada en los espesadores N°1 y N°2 se deposita en un tanque, del cual mediante una bomba Warman se alimentarán al filtro N°1 para su clarificación y enviarlo con una bomba centrífuga 4x3" al circuito de precipitación de plata.
- d. Continuando con la lixiviación, la pulpa del espesador N°2 se alimentará con una bomba peristáltica al rector N°3, $T= 44^{\circ}\text{C}$ en el cual también se alimenta solución de sulfato de cobre y tiosulfato de sodio con un caudal de $17 \text{ m}^3/\text{h}$, que por rebose desembocará en el espesador N°3. El reboce del espesador N°3 alimentará la cocha barren que a su vez alimenta al tanque barren o tanque de regeneración de la solución lixiviante.
- e. La pulpa sedimentada en el espesador N°3 alimentará con una bomba peristáltica al holding tank, y de éste con una bomba de cavidad progresiva se alimentará al filtro N°2 para obtener de esta manera el concentrado de cobre final con baja ley de plata aproximadamente entre 65-70 Oz/Tc. La solución producto de la separación desembocará en la cocha barren para su regeneración y continuar con la lixiviación en circuito cerrado.



FIGURA 3.2. REACTORES Y ESPESADORES

FUENTE. Elaboración Propia

3.2.4. Precipitación de la plata

- a. La solución clarificada y rica en plata que es procedente del circuito de lixiviación de plata es almacenada en un tanque de 50 m³ de capacidad, de donde es bombeado con una bomba centrífuga 3x2” a los filtros clarificadores del circuito de precipitación de plata.
- b. La solución clarificada (**500-600 mg/L de plata**) es alimentada a una torre o columna de vacío por succión con una bomba de vacío, que tiene la finalidad de extraer el oxígeno disuelto en él, para luego dosificar polvo de cobre a razón de 12 kg/h a 14 kg/h para precipitar la plata.

3.2.5. Filtración de electrolito de plata

- a. Luego de dosificar el polvo de cobre en la solución éste se bombea con una bomba centrífuga a un caudal de 30 m³/h a unos tanques de acondicionamiento, del cual con una bomba de cavidad progresiva se alimentarán a los filtros N°8 y N°9 en donde se cosecha el precipitado de plata.
- b. La solución barren que es el producto del filtrado del precipitado desembocará en la cocha barren (**100-120 mg/L de plata**), para su regeneración en el tanque barren con agitación constante del circuito de lixiviación de plata (con sulfato de cobre pentahidratado y tiosulfato de sodio a un pH de 6,5). Para luego retornar en circuito cerrado al circuito de lixiviación de plata.



FIGURA 3.3. FILTRO PRENSA

FUENTE. Elaboración Propia

3.3.PUNTOS DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS (RANGOS DE CONTROL)

- Faja transportadora (flujo de concentrado kg/h).
- Reactor N°1, Reactor N°2, Reactor N°3 (pH).
- Reactor N°1, Reactor N°2, Reactor N°3 (temperatura °C).
- Tanque de regeneración de electrolito lixivante (concentración de tiosulfato de sodio g/L y sulfato de cobre pentahidratado g/L).
- Tanque clarificador, solución de alta concentración de plata (clarificador mg/L de plata).
- Salida de solución de electrolito de baja concentración de plata, filtro N°8 y N°9 (barren mg/L de plata).

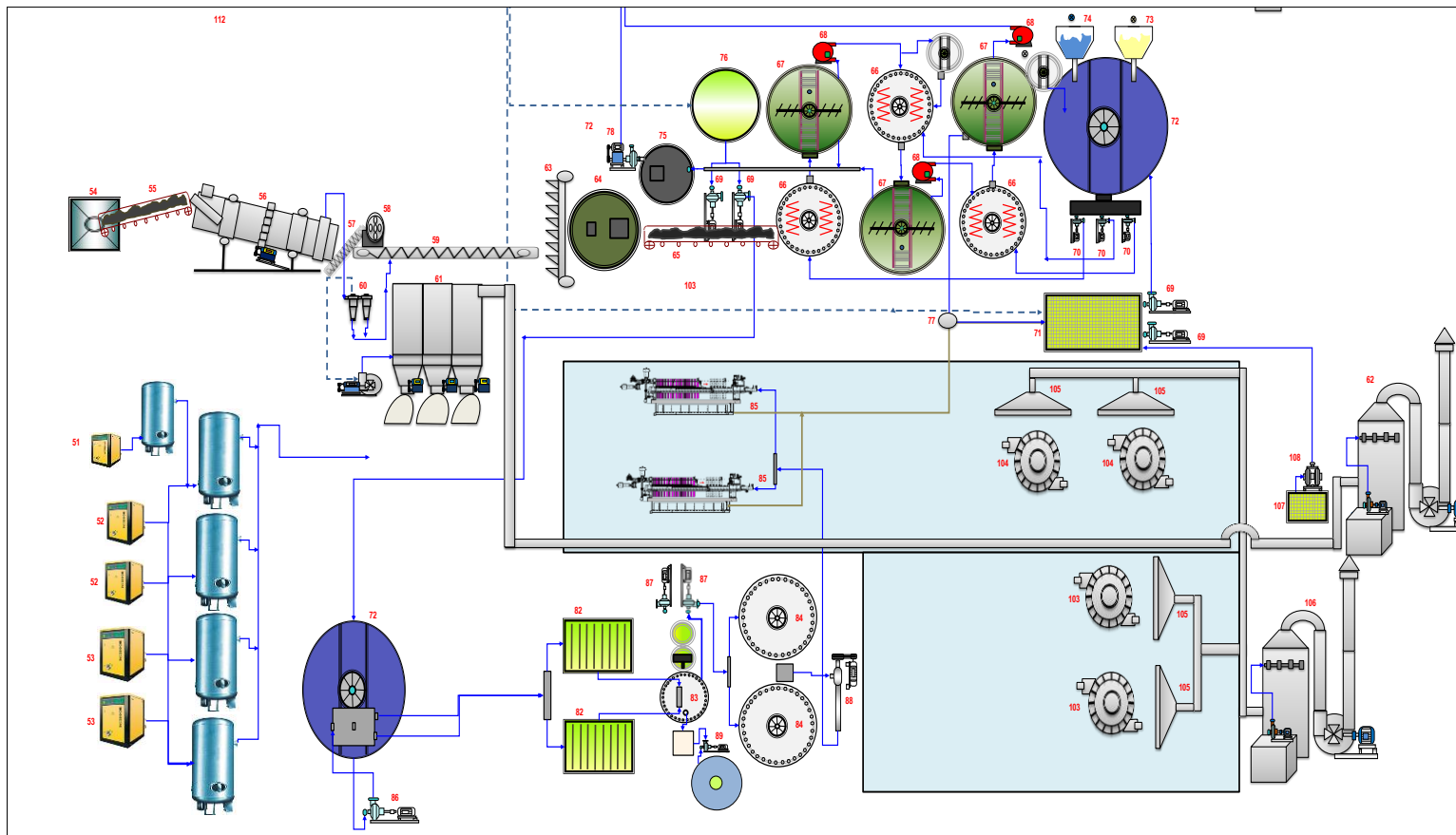


FIGURA 3.4. FLOW SHETT CIRCUITO DE LIXIVIACIÓN DE PLATA
FUENTE. Elaboración Propia

CAPITULO IV

4. ESTUDIO ESTADÍSTICO

4.1. ETAPAS DE INVESTIGACIÓN

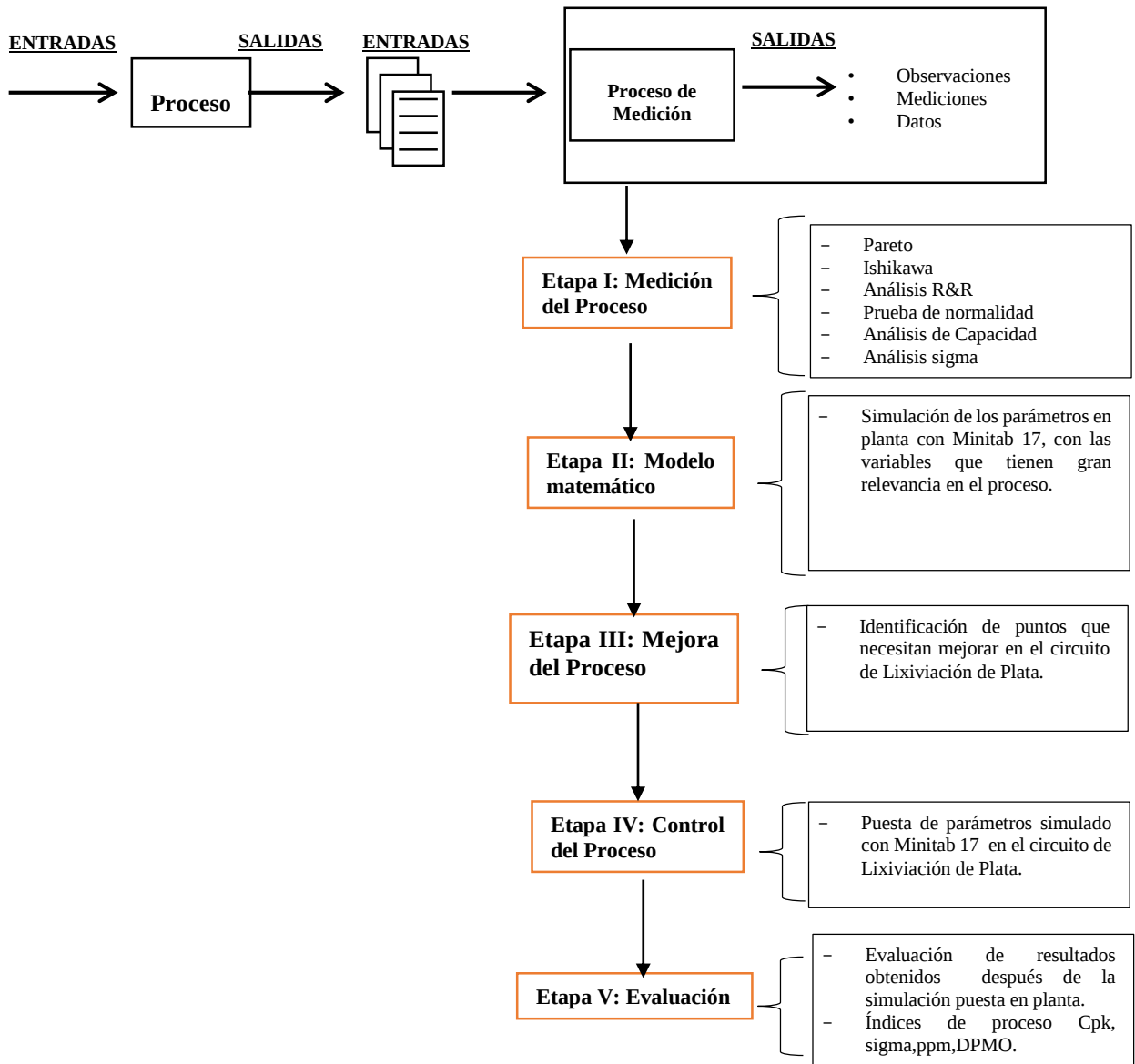


FIGURA 4.1. ETAPAS DE INVESTIGACIÓN DEL CIRCUITO DE LIXIVIACIÓN DE PLATA

FUENTE. Elaboración Propia

4.2. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

4.2.1 Medición del proceso (ETAPA I)

TABLA 4.1. MUESTRAS DE RANGOS OPERATIVOS DEL CIRCUITO DE LIXIVIACIÓN DE PLATA ANTES DEL ESTUDIO CON MINITAB 17.

TIOSULFATO DE SODIO(g/L)	SULFATO DE COBRE (g/L)	RA TIO	CLARIFICADOR (mg/L) de plata	BARREN (mg/L) de plata	3er ESPESADOR (%)	RECUPERACION Ag (%)	FLUJO DE CONC ENTRA DO Kg/h	C. Final	P H	FECHA	HORA
55.72	45.44	1.23	576.28	159.1	82.9	86.49	634.67	85.75	6.5	01/07/2015	09:00
55.72	45.92	1.26	739.23	85.12	86.07	88.9	621.83	84	6.5		11:00
55.72	45.21	1.29	658.14	121.15	85.15	85.93	630.29	88.67	6.5		13:00
58.81	46.3	1.27	639.52	148.36	85.61	85.94	616.29	86.63	6.5		15:00
58.76	45.49	1.29	476.55	115.16	85.45	87.1	635.54	81.96	6.5		17:00
59.39	45.95	1.29	521.12	131.49	84.04	86.26	619.5	85.75	6.5		19:00
51.73	38.88	1.33	692.85	163.93	83.29	85	630	94.5	6.5		21:00
60.03	45.51	1.32	556.11	153.39	83.89	84	628.25	82	6.5		23:00
58.55	45.14	1.3	513.29	131.92	84.29	84.8	629.42	95.67	6.5		01:00
59.39	45.95	1.29	491.24	118.73	84.12	84.79	615.42	93.63	6.5		03:00
57.85	45.58	1.27	815.51	150.41	84.46	85.14	620.08	92.17	6.5		05:00
56.64	45.19	1.25	627.94	132.5	83.89	85.07	617.46	92.17	6.5		07:00
75.52	56.74	1.33	733.14	61.02	87.93	88.86	623.63	69.71	6.5	02/07/2015	09:00
75.71	55.02	1.38	702.55	68.18	87.86	89.01	655.67	72.04	6.5		11:00
74.27	55.76	1.33	688.36	79.31	87.71	87.82	634.38	77.29	6.5		13:00
68.73	53.48	1.29	528.63	108.21	88.17	88.49	638.75	73.5	6.5		15:00
74.36	54.41	1.37	596.74	96.46	88.51	89.06	637.29	69.71	6.5		17:00
79.61	54.86	1.45	631.42	86.18	86.28	86.88	637.88	83.71	6.5		19:00
85.36	53.9	1.53	921.32	225.13	87.48	88.66	640.5	72.63	6.5		21:00
82.96	53.29	1.56	991.72	315.96	84.14	84.45	637.58	99.17	6.5		23:00
81.86	51.92	1.58	975.54	320.14	85.02	85.2	632.92	95	6.5		01:00
82.76	52.58	1.57	1008.36	308.24	83.51	83.92	636.71	102.37	6.5		03:00
81.09	57.03	1.42	821.11	205.34	84.8	86.92	633.21	82.83	6.5		05:00
80.21	57.84	1.39	708.11	110.25	88.77	89.14	625.92	67.96	6.5		07:00
74.87	57.49	1.3	671.09	88.31	89.59	90.94	647.21	58.63	6.5	03/07/2015	09:00
75.92	56.79	1.34	718.55	72.15	90.57	91.4	652.75	56	6.5		11:00
74.65	56.51	1.32	696.37	68.24	90.05	91.1	638.75	56.88	6.5		13:00
74.91	56.68	1.32	792.66	89.11	89.77	90.94	646.92	58.63	6.5		15:00
72.33	54.66	1.32	688.7	82.53	89.26	90.55	654.21	61.83	6.5		17:00
73.6	56.02	1.31	712.22	91.46	85.99	90.54	641.38	60.67	6.5		19:00
70.3	53.07	1.32	646.25	209.63	86.97	89.19	644.58	69.71	6.5		21:00
69.66	49.97	1.39	856.52	415.25	86	87.57	633.5	78.75	6.5		23:00
69	51.14	1.35	922.13	564.33	85.59	86.84	631.45	83.13	6.5		01:00
68.23	52.97	1.29	995.78	352.3	86.43	86.9	621.25	81.38	6.5		03:00
67.42	54	1.25	759.27	160.3	86.08	87	628.54	82	6.5		05:00

68.08	55.47	1.23	813.06	98.45	88.01	88.77	549.54	72.92	6.5		07:00
64.79	45.86	1.41	991.2	561.96	84.93	86.03	613.67	85.75	6.5	04/07/2015	09:00
65.08	44.08	1.48	1026.1	476.21	84.97	86.04	617.17	86	6.5		11:00
62.87	49.51	1.27	869.7	254.38	82.8	84.06	624.08	99.46	6.5		13:00
62.19	48.2	1.29	749.26	192.81	85.01	86.19	616.88	85.17	6.5		15:00
63.78	49.19	1.3	789.39	112.21	85.09	86.97	620.08	80.79	6.5		17:00
62.66	48.34	1.3	821.36	139.29	86.39	87.75	623.58	76.42	6.5		19:00
67.66	48.43	1.4	957.38	124.15	86.54	88.1	615.42	73.79	6.5		21:00
65.1	45.9	1.42	703.49	52.44	87.14	86.58	623.58	83.71	6.5		23:00
64.21	46.08	1.39	682.93	68.68	87.33	89.07	621.54	67.96	6.5		01:00
64.52	50.2	1.29	651.02	89.38	88.31	89.05	626.5	65	6.5		03:00
63.3	49.89	1.27	712.34	166.99	88.38	89.96	624.75	62.71	6.5		05:00
61.7	49.5	1.25	772.38	212.21	88.74	90.4	632.04	60.67	6.5		07:00
71.88	54.54	1.29	989.26	192.51	90.42	91.04	657.42	58.92	6.5	05/07/2015	09:00
73.97	58.11	1.27	947.22	222.1	90.28	91.5	672.29	57.17	6.5		11:00
73.34	56.23	1.3	1144.05	146.66	89.72	90.86	667.04	60.96	6.5		13:00
72.94	56.05	1.3	1020.12	162.1	89.91	90.53	655.96	62.13	6.5		15:00
75.67	58.4	1.3	980.61	130.12	89.41	90.34	661.21	63.88	6.5		17:00
75.8	57.64	1.32	941.22	148.46	89.09	90.29	654.79	61.45	6.5		19:00
75.77	55.46	1.37	990.39	256.22	90.35	90.62	650.13	60.96	6.5		21:00
72.86	57.89	1.26	883.85	356.4	88.87	89.58	657.71	68.54	6.5		23:00
72.94	57.25	1.27	847.31	333.28	89.09	89.74	659.46	67.67	6.5		01:00
71.94	58.24	1.24	815.1	348.61	89.98	90.78	651.88	60.08	6.5		03:00
67.24	54.19	1.24	918.32	210.19	90.17	90.95	637.88	57.75	6.5		05:00

FUENTE: Datos registrados por lab.químico ZTRATEK S.A.C.

FECHA: 23/07/2015

4.2.2. Evaluación de los indicadores de desempeño en el circuito de lixiviación de plata

Esta fase se enfoca a seleccionar una o más características para ser medidas, definiendo cómo serán medidas, estableciendo un plan de recolección de datos y evaluación apoyándose por el diagrama de Pareto, el diagrama de Ishikawa y el análisis de R&R, por medio de estos análisis identificaremos los puntos que se tienen que mejorar para lograr una mejora en la recuperación de plata.

A. Diagrama de Pareto

Es una gráfica para organizar datos de forma que estos queden en orden descendente, de izquierda a derecha y separados por barras. Permite asignar un orden de prioridades.

El diagrama permite mostrar gráficamente (pocos vitales, muchos triviales), es decir, que hay muchos problemas sin importancia frente a unos pocos muy importantes. Mediante la gráfica colocamos los "pocos que son vitales" a la izquierda y los "muchos triviales" a la derecha.

El diagrama facilita el estudio de las fallas en las industrias o empresas comerciales.

TABLA 4.2. DATOS ENCUESTADOS A OPERARIOS

Nº	DEFECTO	NÚMERO DE QUEJAS
1	Flujo de concentrado	25
2	Clarificador	23
3	Concentrado final	6
4	Barren	7
5	Filtro	3
6	Tercer espesador	2
7	Concentración de tiosulfato de sodio	1
8	Concentración de sulfato de cobre pentahidratado	1
9	Ratio	1
10	pH	1

FUENTE. Elaboración Propia

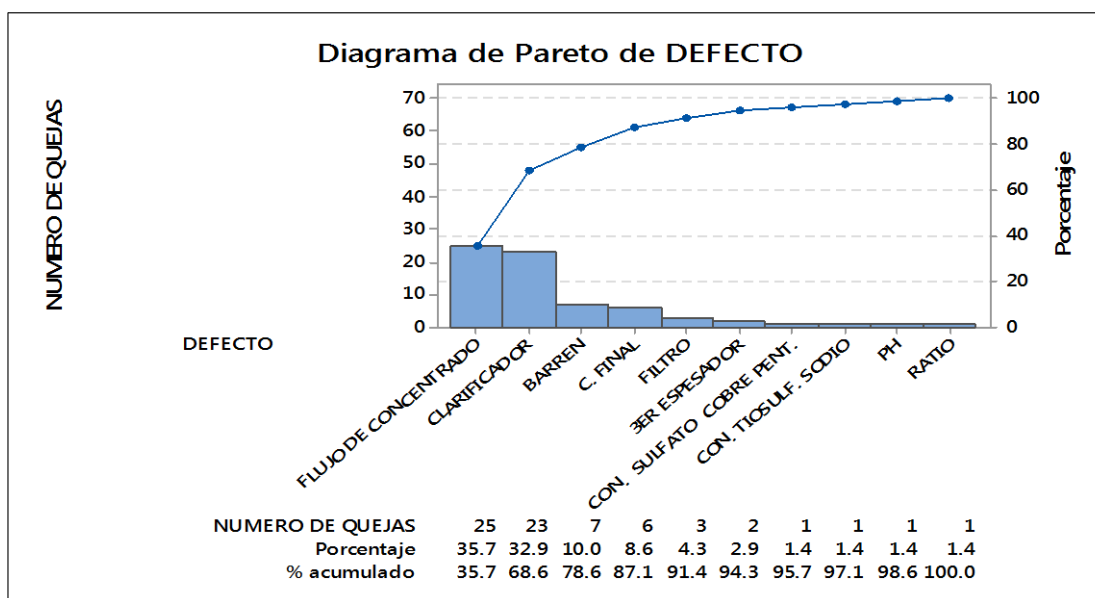


FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE PARETO DE LAS VARIABLES INFLUYENTES EN LA RECUPERACIÓN DE PLATA

FUENTE. Minitab 17

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Los problemas percibido con mayor frecuencia representando el 35.7% de las quejas es el flujo de concentrado, le sigue el clarificador con 32.9% y el 10% barren de ocurrencias, de evitar estas tres causas se lograria evitar 78.6% de las quejas. El 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema.

B. Diagrama de Ishikawa

Se emplea para poner de manifiesto las posibles causas asociadas a un efecto, facilitando de esta forma la tarea de identificar los factores verdaderos.

El diagrama de causa - efecto es conocido también como el “diagrama de las espigas de pescado” facilita el análisis de problemas mediante la representación de la relación entre un efecto y todas sus causas o factores que originan dicho efecto, es una forma gráfica, ordenada y sistemática para representar el complejo entramado de causas posibles que hay detrás de un efecto.

PASOS PARA CONSTRUIR EL DIAGRAMA DE ISHIKAWA

1. Definir el problema que se quiere solucionar.
2. Hacer una lluvia de ideas de todas las posibles causas del problema.
3. Organizar los resultados de la lluvia de ideas en categorías racionales.
4. Construir un diagrama causa y efecto que muestre de manera precisa las relaciones entre todos los datos de cada categoría.

NOTA:

- Identificar las causas secundarias a traves de flechas que terminan en las flechas secundarias, asi como las causas terciarias que afectan a las secundarias.
- Asignar la importancia de cada factor.
- Definir los principales conjuntos de probables causas: materiales, equipos,

métodos de trabajo, medio ambiente, mano de obra.

- Marcar los factores importantes que tienen incidencia significativa sobre el problema.
- Registrar cualquier información que pueda ser de utilidad.

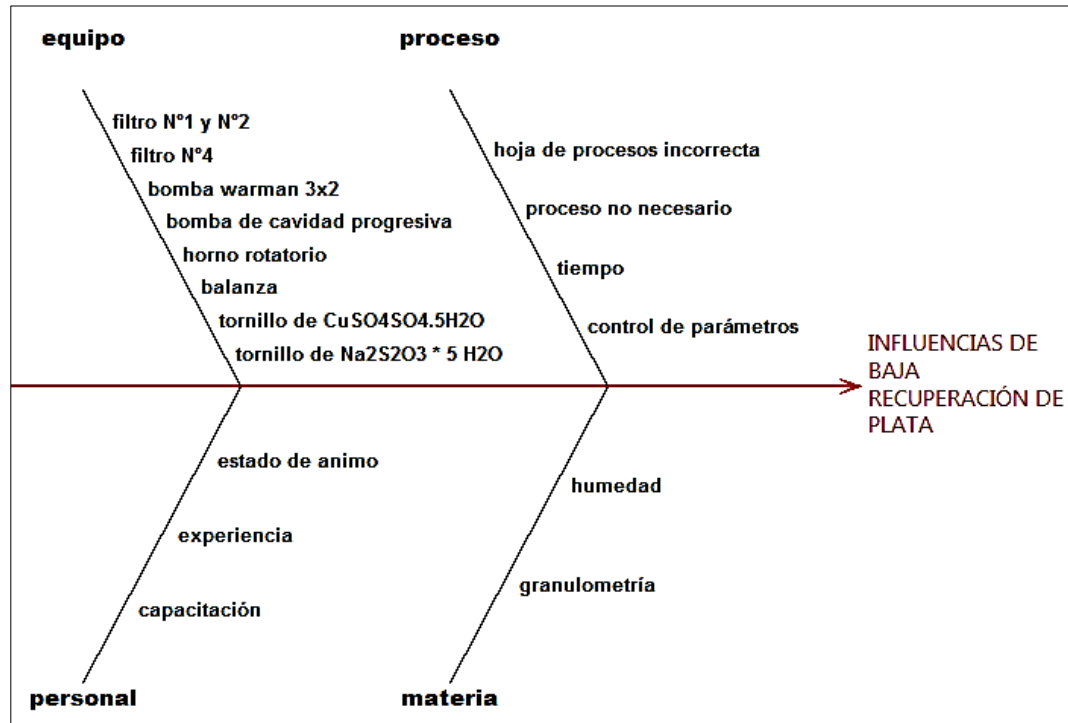


FIGURA 4.3. DIAGRAMA CAUSA – EFECTO DE LA RECUPERACIÓN DE PLATA

FUENTE: Minitab 17

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

El diagrama nos proporciona un conocimiento común de un problema complejo, con todos sus elementos y relaciones claramente visibles a la recuperación de plata, se organizó la búsqueda de causas de un determinado fenómeno.

- La falta de capacitación y el descuido del operario es causa de control de parámetros, que es causa de un error en el proceso.
- La calibración de equipos es causa que influye en la recuperación de plata.
- El cansancio, enfermedad y problemas del estado de ánimo, es causa del

personal que influye en la recuperación de plata.

- El acondicionamiento del material, La granulometría, el caudal del electrolito son causas a la baja en la recuperación de plata.
- El mal control de los parámetros es causa que influye en el proceso de recuperación de plata.

C. Estudio R&R y gráficos de rachas de medida

Estudio R&R

Un estudio R&R sirve para determinar, en variables continuas, cuanto de la variación total observada, se debe a la variación del sistema de medición y cuanto se debe a la variación de parte por parte.

La variación total del proceso se divide en:

- Variación parte por parte.
- Variación del sistema de medición.

A su vez la variación del sistema de medición se divide en:

- Repetibilidad
- Reproducibilidad

Con un estudio R&R se puede analizar:

Los datos para obtener la recuperación son obtenidos del laboratorio químico, para poder validar los datos que nos proporciona laboratorio químico se procede a realizar el estudio de R&R (reproducibilidad y repetibilidad) que nos proporciona información acerca de la repetibilidad de los datos que nos proporciona los distintos operadores y analista para una misma muestra.

Para lograr este análisis se procedió a enviar 10 muestras de cada parte del proceso y se hizo analizar por el 100% de los operadores y analistas aleatoriamente.

El resultado para este proceso fue de validez los resultados obtenidos según los parámetros de control de R&R.

TABLA 4.3. ANÁLISIS DE VARIABILIDAD DE LA MUESTRAS RECUPERACIÓN DE PLATA

PARTES	JEFE DE GUARDIA	MEDICIÓN /RECUPERACIÓN DE PLATA	PARTES	JEFE DE GUARDIA	MEDICIÓN /RECUPERACIÓN DE Ag	PARTES	JEFE DE GUARDIA	MEDICIÓN/ RECUPERACIÓN DE PLATA
1	ABEL	86.49	1	ALEX	85.2	1	WALTER	86.97
2	ABEL	88.9	2	ALEX	83.92	2	WALTER	87.75
3	ABEL	85.93	3	ALEX	86.92	3	WALTER	88.1
4	ABEL	85.94	4	ALEX	89.14	4	WALTER	86.58
5	ABEL	87.1	5	ALEX	90.94	5	WALTER	89.07
6	ABEL	86.26	6	ALEX	91.4	6	WALTER	89.05
7	ABEL	85	7	ALEX	91.1	7	WALTER	89.96
8	ABEL	84	8	ALEX	90.94	8	WALTER	90.4
9	ABEL	84.8	9	ALEX	90.55	9	WALTER	91.04
10	ABEL	84.79	10	ALEX	90.54	10	WALTER	91.5
1	ABEL	85.14	1	ALEX	89.19	1	WALTER	90.86
2	ABEL	85.07	2	ALEX	87.57	2	WALTER	90.53
3	ABEL	88.86	3	ALEX	86.84	3	WALTER	90.34
4	ABEL	89.01	4	ALEX	86.9	4	WALTER	90.29
5	ABEL	87.82	5	ALEX	87	5	WALTER	90.62
6	ABEL	88.49	6	ALEX	88.77	6	WALTER	89.58
7	ABEL	89.06	7	ALEX	86.03	7	WALTER	89.74
8	ABEL	86.88	8	ALEX	86.04	8	WALTER	90.78
9	ABEL	88.66	9	ALEX	84.06	9	WALTER	90.95
10	ABEL	84.45	10	ALEX	86.19	10	WALTER	91.16

FUENTE. Datos registrados por Lab.Químico
FECHA: 23/07/2015

ESTUDIO R&R DEL SISTEMA DE MEDICIÓN - MÉTODO XBARRA/R

Nombre del sistema de medición: ANALISIS R\$ R_RECUPERACIÓN DE PLATA

Notificado por: ZARIA CHAVARRIA, Edwin P.

Tolerancia: 90

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	7.77073	96.71
Repetibilidad	5.35567	66.65
Reproducibilidad	2.41506	30.06
Parte a parte	0.26451	3.29
Variación total	8.03524	100.00

La tolerancia del proceso es = 90

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (5.15 × DE)	%Var. estudio (%VE)	%Tolerancia (VE/Toler)
Gage R&R total	2.78760	14.3562	98.34	15.95
Repetibilidad	2.31423	11.9183	81.64	13.24
Reproducibilidad	1.55405	8.0033	54.82	8.89
Parte a parte	0.51430	2.6487	18.14	2.94
Variación total	2.83465	14.5984	100.00	16.22

El R&R contribuye con un 96.71 % por causa de equipo de medición completamente, por tanto la haciendo la lectura tabla el sistema de medición es pobre.

La variación parte - parte es la contribuye con un 3.29 % a la variación total

El estudio nos arroja un 15.95% de error en el sistema para controlar el proceso al entrar en el rango de 11 a 20 podemos decir que es un sistema de medición aceptable

Número de categorías distintas = 1

No puede discriminar entre partes

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

- Observamos que sólo el 96.71% de la variación total en los datos se debe al sistema de medición, mientras que un 3.29% de dicha variación es debida a las diferencias entre los elementos medidos.
- El error de R&R vs tolerancia es 98.34% y vs variación total del proceso es 15.95% lo que hace que el equipo de medición no sea adecuado para la medición.
- Respecto al número de categorías distintas que el sistema es capaz de distinguir, el valor obtenido de 1 nos indica que el sistema de medición empleado no es aceptable (en general, si el valor obtenido fuese 1 el sistema no sería útil para controlar el proceso; un valor de 4 o superior representa un sistema de medición capaz de distinguir un número aceptable de categorías).

TABLA N°1.1. EN EL ANEXOS 1

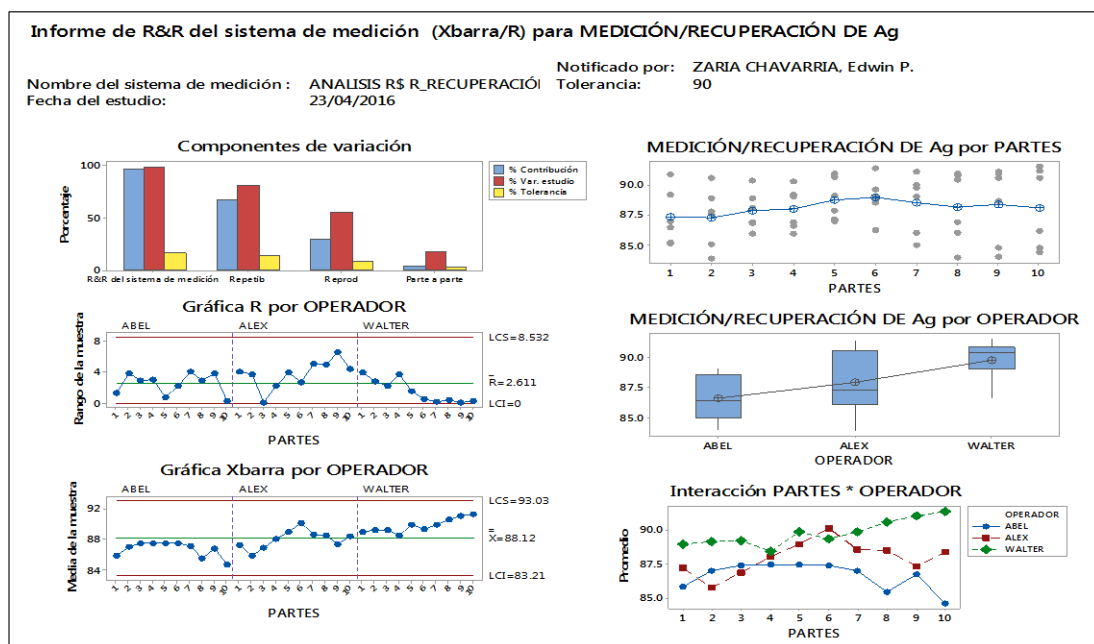


FIGURA 4.4. PRUEBA DE R & R

FUENTE: Minitab 17

INTERPRETACIÓN DE GRÁFICAS

- La primera gráfica confirma mucha variación debida al sistema de medición.
- En cuanto a los diagramas de control, en lo que se refiere al diagrama X barra, confirma un sistema de medición con problemas, la mayoría de los puntos, están dentro de los límites de control.
- En la gráfica medición/recuperación de plata por partes, los círculos se encuentran muy separados. No hay una buena consistencia de medición en la recuperación de plata.
- En la gráfica por operadores, se nota una variabilidad entre los distintos.

CONCLUSIÓN:

- El sistema de medición es bastante pobre, existe mucha variabilidad para medir una misma recuperación de plata, no se está midiendo consistentemente el porcentaje de plata por turno de proceso y finalmente urge observar con más detalle el trabajo de cada operador.

D. Prueba de normalidad de ANDERSON-DARLING

Nos permite examinar si la recuperación de plata sigue o no una distribución normal

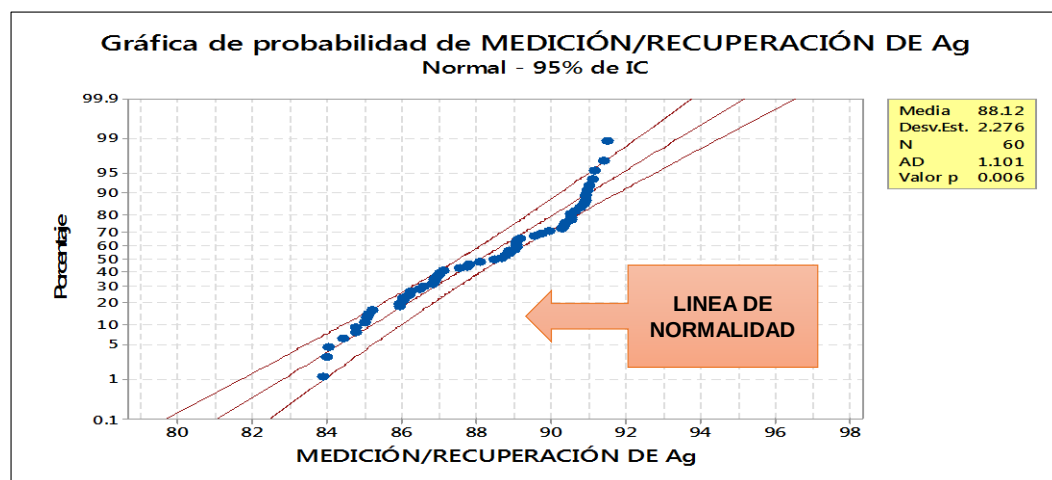


FIGURA 4.5. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LOS DATOS DE RECUPERACIÓN DE PLATA

FUENTE: Minitab 17

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

- Según el resultado nos enfocaremos en p-value según ANDERSON DARLING si el valor $P > 0.05$ quiere decir que los datos tienen una distribución normal, por ende en lo calculado $P = 0.006$ los datos no se encuentran dentro de una distribución normal.

E. Análisis de capacidad del proceso

Una necesidad muy frecuente en los procesos consiste en evaluar la variabilidad del proceso y tendencia central de una característica de calidad en la recuperación de plata, para así compararla con sus especificaciones de calidad. La capacidad de proceso es el grado de aptitud que tiene un proceso para cumplir con las especificaciones deseadas.

Cuando la capacidad de un proceso es alta, se dice que el proceso es capaz, cuando se mantiene estable a lo largo del tiempo, se dice que el proceso está bajo control, cuando no ocurre esto se dice que el proceso no es adecuado para el trabajo o requiere de inmediatas modificaciones.

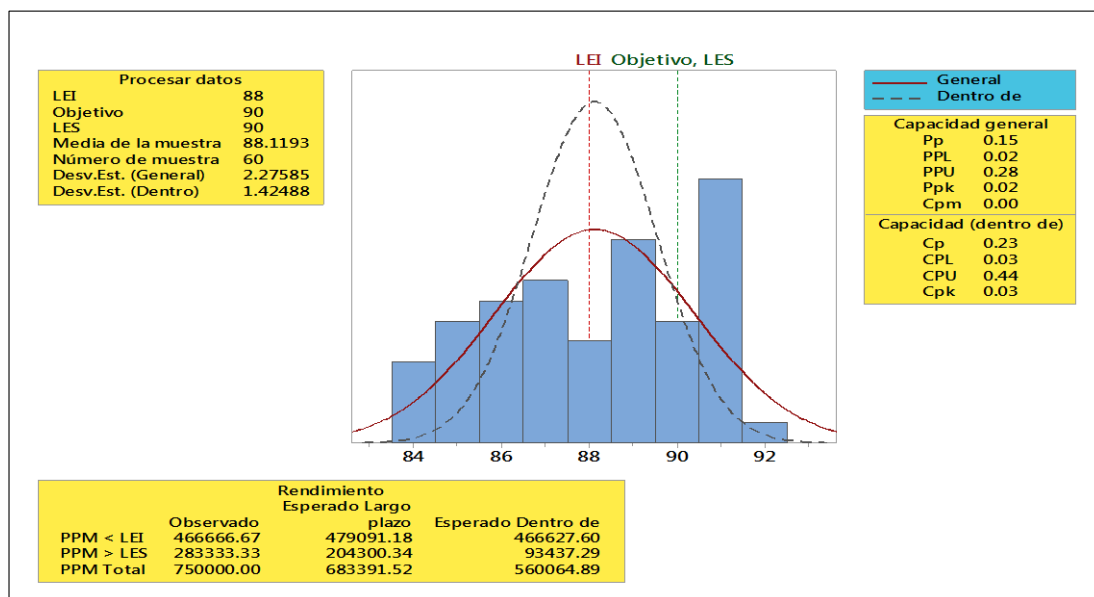


FIGURA 4.6. INFORME DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO EN LA RECUPERACIÓN DE PLATA (%)

FUENTE: Minitab 17

NOTA:

- $C_p = 1,33 \rightarrow$ mínimo.
- $C_p = 2 \rightarrow$ deseable.
- $C_p = 5 \rightarrow$ ideal.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

- $C_{pk} =$ menor 1.33, por lo tanto el proceso no cumple especificaciones. El software Minitab 17 muestra el indicador de proceso $C_{pk} = 0.03$ por tanto no cumple con las especificaciones en el proceso deseado en la recuperación de plata según la **ITEM 1.1 y 1.2 UBICADO EN ANEXO 1**, lo cual informa que hay demasiada variabilidad d parámetros en el circuito de lixiviación de plata.
- El índice P_p debe ser ≥ 1.33 para tener el potencial de cumplir con especificaciones (LIE, LSE). Lo cual se observa que el índice P_p muestra 0.15.

ITEM 1.1 Y 1.2 UBICADO EN ANEXO 1

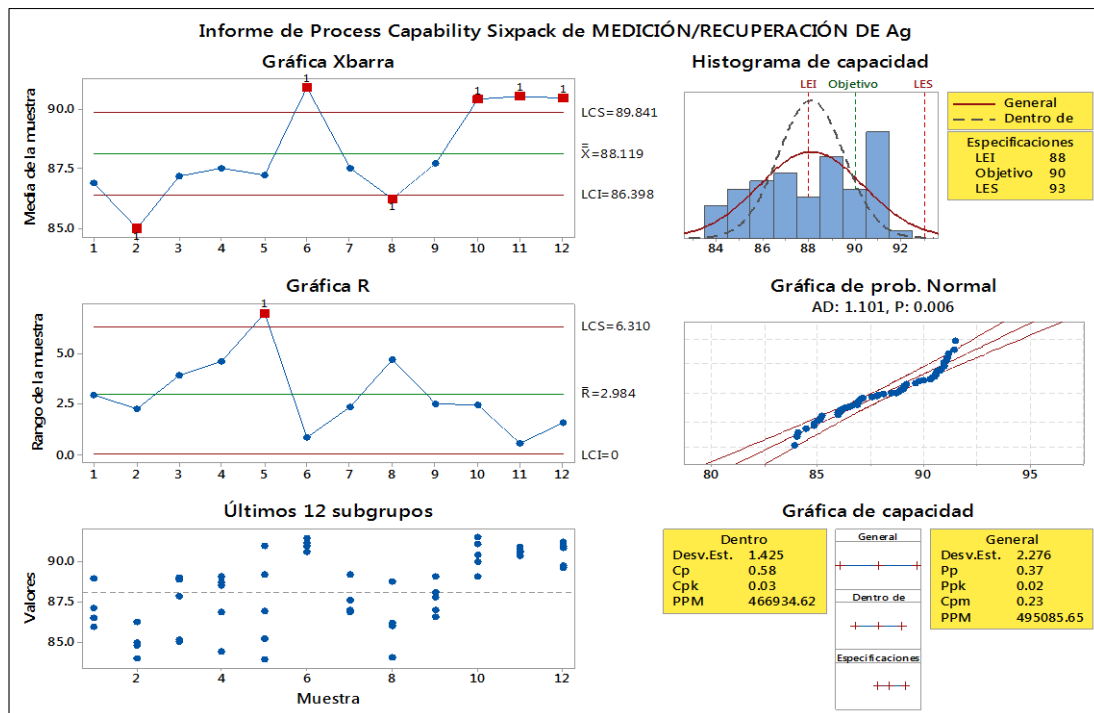


FIGURA 4.7. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO DE LA RECUPERACIÓN_1

FUENTE: Minitab 17

– **ANÁLISIS DE RESULTADOS:**

Se puede observar una tendencia hacia arriba o hacia abajo en las cartas de control (ascendentes y descendentes), se considera que 5 puntos o más indican una situación fuera de control. Por ende se encuentra fuera de control hay 6 puntos fuera de los límites.

La línea de especificaciones es muy corta, indicando que está fuera de control y el proceso.

NOTA: El proceso no es capaz, ya que $C_p < 1$ y $C_{pk} < 1$, existe demasiada variabilidad, es un proceso insuficiente, lo cual informa que necesita realizar un control de proceso en el circuito de lixiviación de plata.

 ITEM 1.1 Y 1.2 DE ANEXO 1

F. Análisis valor sigma

Para saber cuál es la capacidad inicial del proyecto (Valor Sigma) se realizó un análisis del mismo y se determinó que estábamos en 0.08 sigma según el análisis siguiente:

Los datos obtenidos de laboratorio (recuperación), no tienen una distribución normal según evaluado en la **FIGURA 4.5** por lo que se dio a evaluar usando el criterio de sospecha de causa asignable y el resto de la data al ser normal se procedió el Process Capability o capacidad del proceso visto en la **FIGURA 4.6 y 4.7**.

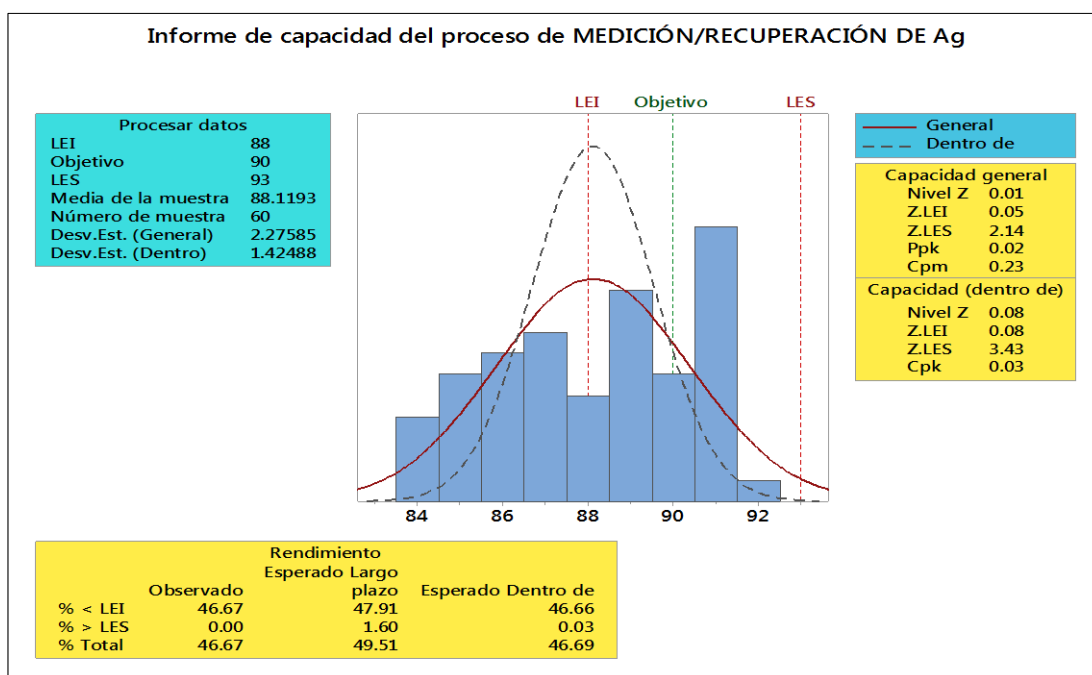


FIGURA 4.8. ANÁLISIS DE SEIS SIGMA / RECUPERACIÓN_1
FUENTE: Minitab 17

– INTERPRETACIÓN:

El nivel sigma, nos informa la calidad de nuestro proceso de lixiviación de plata, como también nos muestra el grado de defectos por millón de oportunidades en nuestro proceso.

Según lo calculado el Software Minitab 17 muestra $\sigma=0.08$

Según la **TABLA 1.4, ANEXO 1** en la evaluación nos arroja un $\sigma=0.08$, lo cual indica que hay DPMO= 968.938.

Lo que indica la **TABLA 1.3 y 1.4 ANEXO 1**. Nuestro nivel de calidad es muy bajo, necesita mejora en el Circuito de Lixiviación de Plata.

4.3. PRUEBAS DE MEJORA CON MINITAB 17

4.3.2. Formulación del modelo matemático del circuito de lixiviación de plata, simulación con software Minitab 17 (ETAPA II)

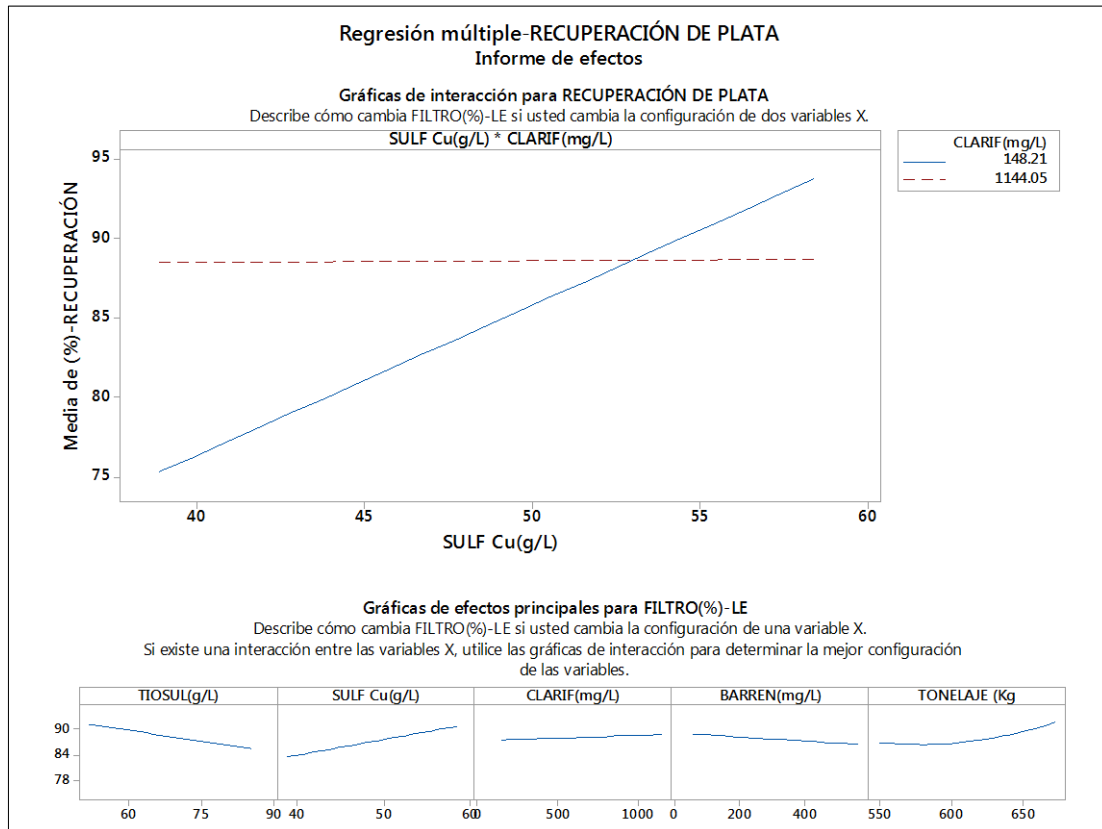


FIGURA 4.9. SIMULACIÓN CON MINITAB 17

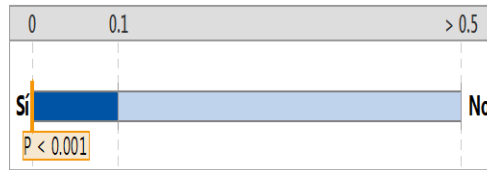
FUENTE: Minitab 17

– COMENTARIO:

- El primer cuadro se observa que hay un decaimiento de la recuperación, según la experiencia eso es cierto cuando uno excede la dosificación de tiosulfato de sodio a una concentración mayor de 60 kg/h, ocurre un fenómeno llamado dismutación por ende no debemos pasar ese rango.
- Se puede apreciar el segundo cuadro que cuando se añade más sulfato de cobre la recuperación aumenta, eso es cierto, teniendo en cuenta de no exceder debido a que puede generar una saturación y no queremos precipitar el cobre.

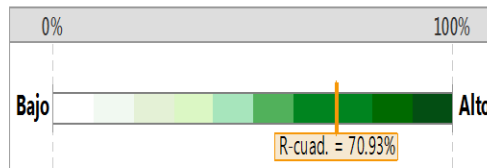
Informe de resumen

¿Existe una relación entre Y y las variables X?



La relación entre Y y las variables X del modelo es estadísticamente significativa ($p < 0.10$).

% de variación explicado por el modelo



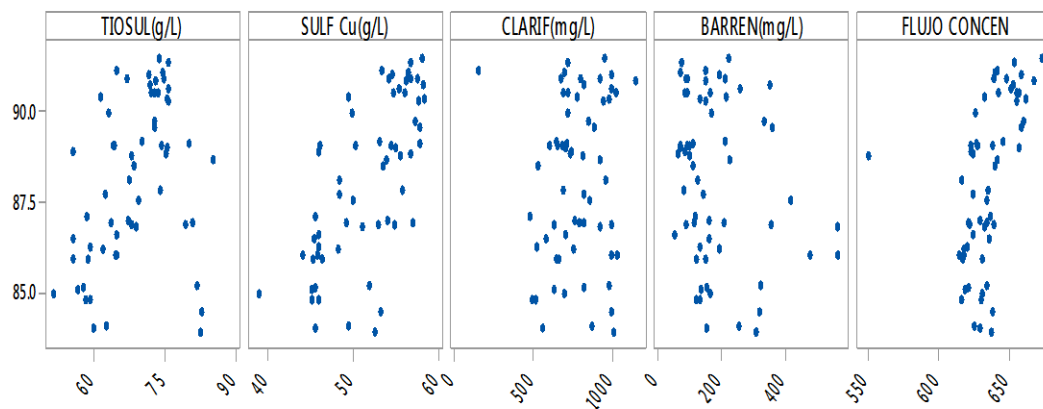
El modelo de regresión puede explicar 70.93% de la variación en Y.

Comentarios

Los siguientes términos están en la ecuación ajustada que modela la relación entre Y y las variables X:

X1: TIOSUL(g/L)
X2: SULF Cu(g/L)
X3: CLARIF(mg/L)
X4: BARREN(mg/L)
X5: FLUJO CONCENTRADO (Kg/h)
 $X5^2$, $X2 \times X3$

Si el modelo se ajusta adecuadamente a los datos, esta ecuación se puede utilizar para predecir FILTRO(%)-LE para valores específicos de las variables X, o para encontrar la configuración de las variables X que corresponda a un valor o rango de valores deseado para FILTRO(%)-LE.



Un fondo gris representa una variable X que no está en el modelo.

FIGURA 4.10. ANÁLISIS DE VARIABLES

FUENTE: Minitab 17

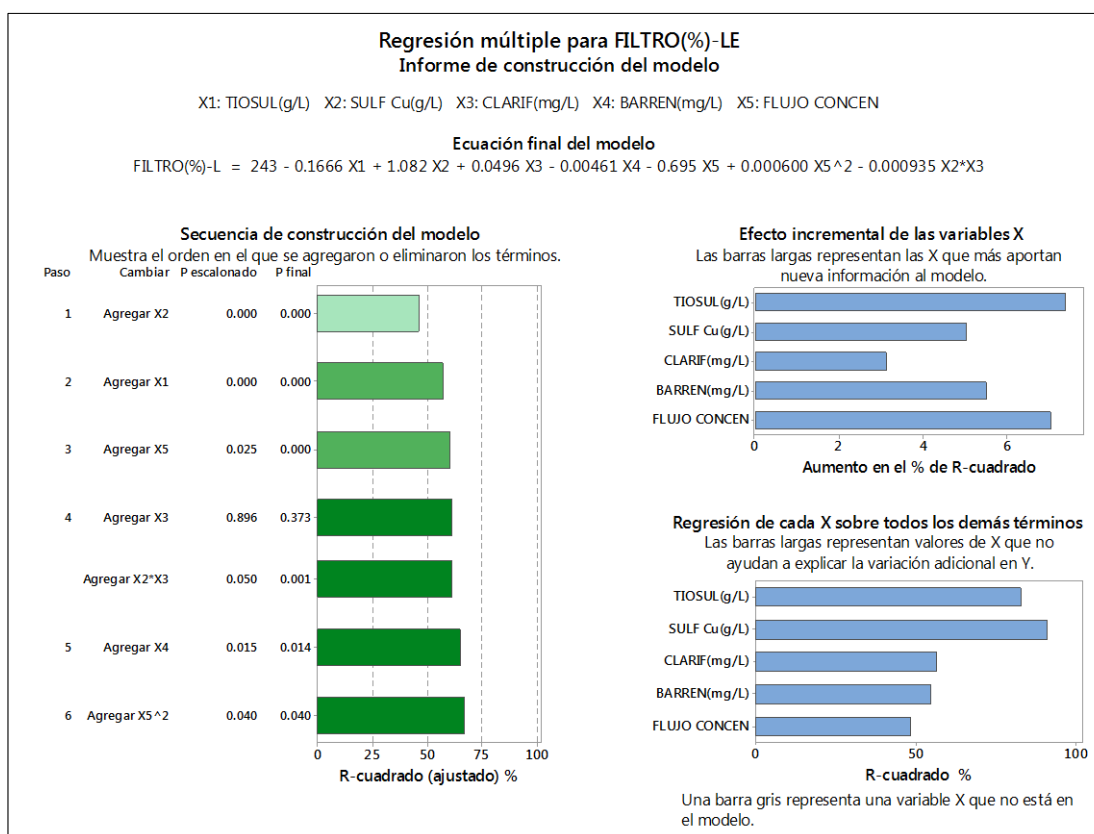


FIGURA 4.11. CONSTRUCCIÓN DE MODELO MATEMÁTICO

FUENTE: Minitab 17

4.3.1. Modelo matemático que rige el circuito de lixiviación de plata

$$\text{RECUPERACIÓN} = 243 - 0.1666 * X1 + 1.082 * X2 + 0.0496 * X3 - 0.00461 * X4 - 0.695 * X5 + 0.000600 * X5 * X5 - 0.000935 * X2 * X3 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

– OBSERVACIÓN:

El coeficiente de determinación (R^2) explica el porcentaje de la variación total observada en la variable dependiente, 70.93 %.

La recta de regresión puede explicar el 70.93% de la variación total observada en la recuperación de plata que influye la concentración de tiosulfato de sodio, sulfato de cobre pentahidratado, flujo de concentrado, barren y clarificador, el otro 29.67% se debe buscar por otros factores como factores ergonómicos, sistema laboral, sobreesfuerzo físico.

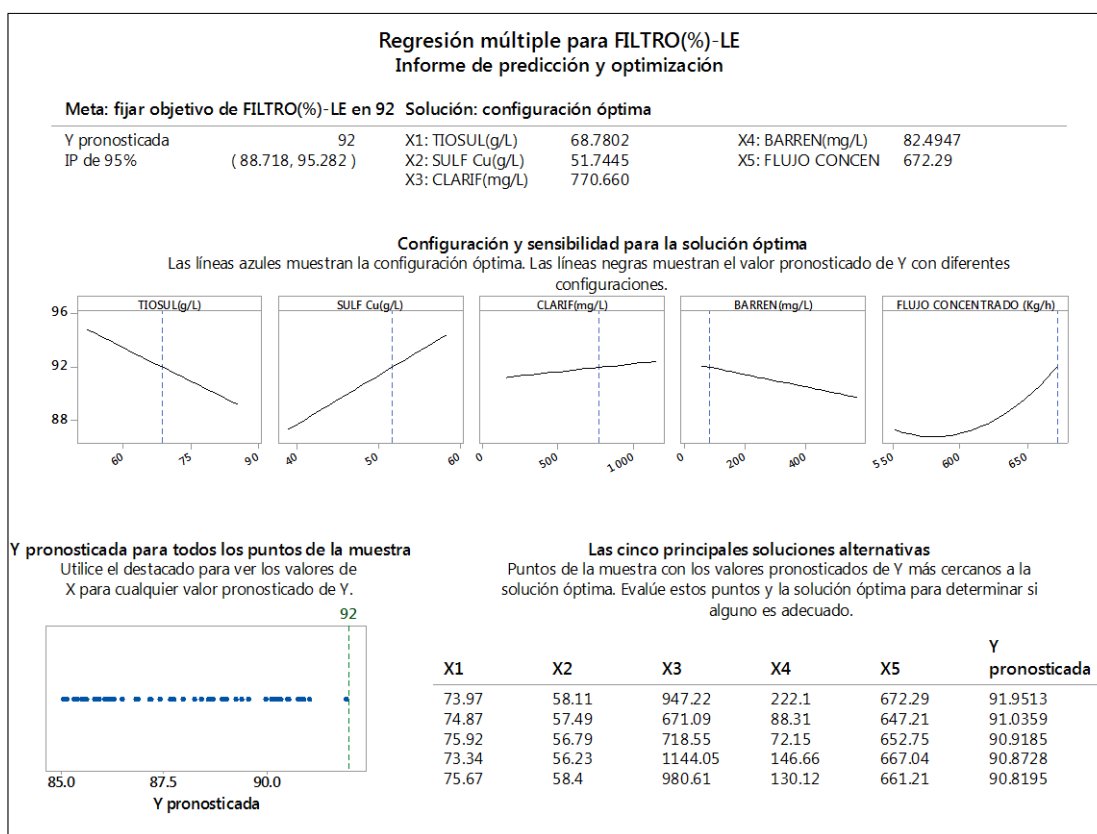


FIGURA 4.12. PREDICCIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO
FUENTE: Minitab 17

El software Minitab 17 nos presenta los siguientes valores que según el historial de datos que se usaron de la TABLA 4.3 para simular, arrojan las posibles variables que mantendrán la recuperación de plata en 90 % en el Circuito de Lixiviación de Plata. Se describe la simulación en el ANEXO 2.

TABLA 4.4. PARÁMETROS DE PRONOSTICOS DE PRUEBA PUESTOS EN PLANTA

X1	X2	X3	X4	X5	Y PRONÓSTICO
74.87	57.49	671.09	88.31	647.21	91.0359
75.92	56.79	718.55	72.15	652.75	90.9185
75.67	58.4	980.61	130.12	661.21	90.8195

FUENTE: Software Minitab 17

CAPÍTULO V

5. ESTUDIO DE MEJORA EN LA LIXIVIACIÓN DE PLATA

5.1. PLAN DE SOLUCIONES

Se realiza la ETAPA III mediante un programa de tareas para la implementación de soluciones que se cumplen en su totalidad y algunas tareas continuas para evitar que algún parámetro se salga fuera de control.

De esta matriz se logró identificar algunas soluciones que mejor representan la mejora de los controles de las variables. Es así que se identificó el siguiente cuadro de acciones para mejorar el proceso.

TABLA 5.1. PLAN DE TRABAJO PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE PLATA

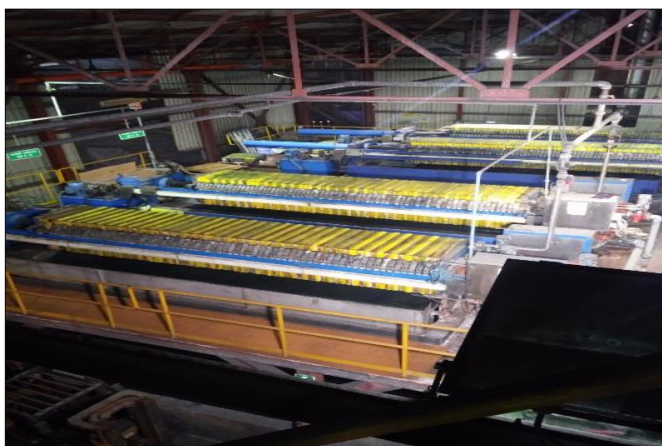
N°	Nombres Xs	ACCIÓN (QUÉ)	QUIEN	COMO	¿Por qué?	¿Cuándo?	TERMINO (P)	¿Dónde?	TERMINO
1	Humedad	Ajuste de parámetros de las bombas de alimentación del concentrado, ingreso de aire, tiempos de llenado de las rampas a los filtros	Jefe de Guardia	Calibración de RPM de las bombas alimentadoras de concentrado determinando el % humedad en cada filtrada.	Influye en la precipitación de plata debido a la carga de soda que hace que precipite la plata.	01/10/2015	07/10/2015	Área de Filtro de repulpado	07/10/2015
2	Acidez(monitoreo pH)	Ajustar el Rango de acidez de trabajo en la lixiviación de Ag	Jefe de Guardia	calibración del sensor de pH	Obliga el alto uso de sulfato de cobre para bajar el pH.	07/10/2015	14/10/2015	Tanque Barren N°3	14/10/2015
3	Recuperación de plata	Implementar frecuencia de mantenimiento en lixiviación de plata y cobre	Jefe de Guardia	Realizando mantenimientos preventivos del circuito total	menor tiempo de residencia y deficiencia en el proceso	14/10/2015	21/10/2015	Etapa de lixiviación de plata	21/10/2015
4		Realizar muestreo por etapas en el circuito de lixiviación de plata.	Jefe de Guardia	Implementación de toma de muestras por los operadores.	no existe una data definida de la recuperación	21/10/2015	28/10/2015	circuito de lixiviación de plata	28/10/2015
5	Flujo de tornillo alimentador	Estandarizar dosificación de tiosulfato, sulfato de cobre y calibrar la frecuencia del panel View alimentador.	Jefe de Guardia	PD y tabla de control para la dosificación de reactivos	influye en la recuperación de plata	28/10/2015	05/11/2015	circuito de lixiviación de plata	05/11/2015
6	Ley de plata en el concentrado	mejor acondicionamiento del concentrado que ingresa	Jefe de Guardia	Implementar una molino de martillo a la salida del horno de secado	A mayor granulometría del concentrado es difícil lixiviar o reacción de los reactivos.	05/11/2015	12/11/2015	cancha de acondicionamiento y molino de martillo	12/11/2015
7		Implementación de gestión a la vista	Jefe de Guardia	influye en la obtención en la mejora de resultados		12/11/2015	19/11/2015	circuito de lixiviación de plata	19/11/2015

8	flujo promotor de cobre	Calibración de dosificador de polvo de Cu ^o	Jefe de Guardia	influye en la precipitación de plata	saturación de solución de plata por exceso de polvo cobre	13/11/2015	14/11/2015	Circuito Merrill Crowell	14/11/2015
9	flujo promotor de reactivos	Realizar cálculos para la dosificación de promotor basados en la densidad de la alimentación de concentrado y solución	Jefe de Guardia	influye en la recuperación de plata en concentrado producto		14/11/2015	21/11/2015	circuito de lixiviación de plata y Merrill crowell	21/11/2015
10	calibración de la balanza	Calibrar la balanza de la faja N°5 debido a que la alimentación no es constante y sobrecargada	Jefe de Guardia	aforar la balanza con un peso fijo y calibrar el tornillo de alimentación	saturación de carga a los reactores y espesadores causa atascamiento en las tuberías y consumo en exceso de reactivos lixiviantes	21/11/2015	25/11/2015	circuito de lixiviación de plata y Merrill crowell	25/11/2015

FUENTE. Elaboración Propia

MEJORA DE LA HUMEDAD

Según el diagrama de Pareto identifica problemas en el ingreso del concentrado 35.4% de ocurrencias, que es el concentrado que viene del primer circuito por ende muestra una alta humedad por ello se tuvo que calibrar las bombas, rampas y tiempo de secado en el filtro de repulpado. (%humedad optima 12-16%) [Laboratorio de investigaciones Metalúrgicas_ZTRATEK SAC].



Se calibró las bombas, mediante rampas, rpm, tiempo de secado de los filtros de repulpado y cobre final

FIGURA 5.1. FILTROS CLEVER

FUENTE. Elaboración Propia

TABLA 5.2. CALIBRACIÓN DE BOMBAS DE FILTRO DE COBRE FINAL Y REPULPADO

BOMBA WARMAN 3X2					
RAMPA_1	1600	TIEMPO	450	PRESIÓN	3
RAMPA_2	2000	TIEMPO	1100	PRESIÓN	4
RAMPA_3	2400	TIEMPO	1200	PRESIÓN	5.5
RAMPA_4	2900	TIEMPO	500	PRESIÓN	9
BOMBA CHINA 4X3					
RAMPA_1	1400	TIEMPO	400	PRESIÓN	3
RAMPA_2	2000	TIEMPO	1200	PRESIÓN	4
RAMPA_3	2400	TIEMPO	1600	PRESIÓN	5.5
RAMPA_4	2600	TIEMPO	750	PRESIÓN	9
BOMBACAVIDAD PROGRESIVA					
RAMPA_1	100	TIEMPO	200	PRESIÓN	2.5
RAMPA_2	120	TIEMPO	300	PRESIÓN	4
RAMPA_3	130	TIEMPO	500	PRESIÓN	5.5
RAMPA_4	150	TIEMPO	500	PRESIÓN	9

FUENTE. Elaboración Propia

- En la **TABLA 5.2.** se presenta los parámetros de control puestos en el PANEL VIEW, para una mejor compactación y secado del concentrado que ingresará al circuito de lixiviación de plata, se presenta los valores de operación para los filtros de presión marca Cidelco.

IMPLEMENTACIÓN DE MOLINO DE MARTILLOS

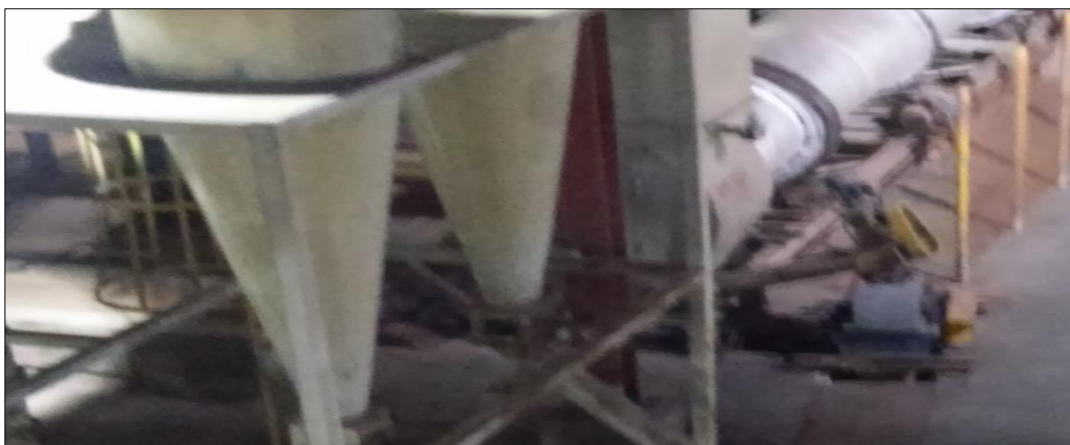


FIGURA 5.2. MOLINO DE MARTILLO

FUENTE. Elaboración Propia

- Se observó que la carga de ingreso del concentrado era demasiada gruesa por tanto el área de contacto era grande y la lixiviación era muy lenta , se evaluó la granulometría mediante prueba de mallas y se instaló un molino de martillos a la salida del horno de secado, lo cual ayudo en la eficiencia a un 80%.

CALIBRACIÓN DE LA BALANZA

Según la carta de control del informe del modelo matemático el flujo de concentrado presenta gran influencia por ende, se calibró la balanza de la faja transportadora N°5, anteriormente el concentrado que ingresaba era de 900 a 1010 kg/h, por ende la carga se saturaba, se hizo pruebas de caudal de electrolito y carga optima de acuerdo al dimensionamiento de los reactores y espesadores llegando a ingresar una carga promedio de 500-600 kg/h.

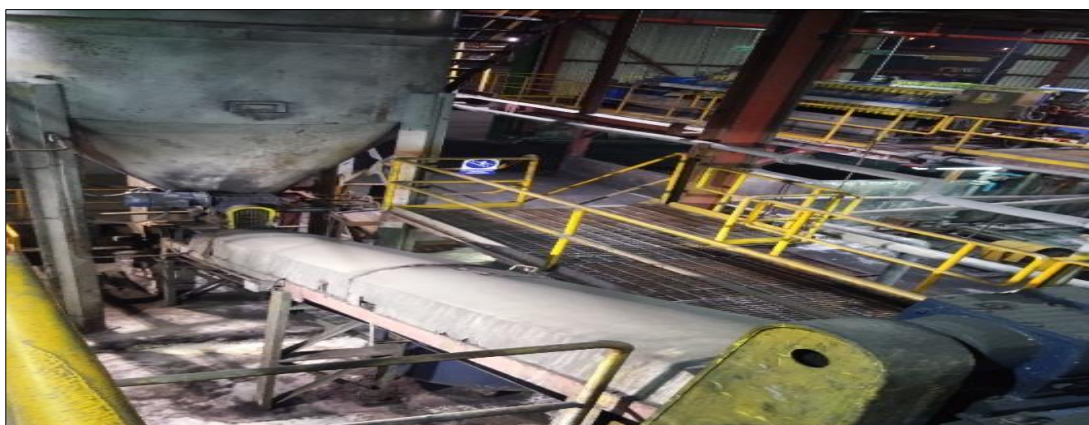


FIGURA 5.3. BALANZA DE LA FAJA N°5

FUENTE. Elaboración Propia

FLUJO DE TORNILLO ALIMENTADOR

Según el diagrama de Pareto presentó un 43% de las quejas se llegó a identificar que los reactivos de sulfato de cobre y tiosulfato de sodio no regeneraba de acuerdo al caudal de ingreso de electrolito a tratar, debido al tornillo alimentador y el Panel View se encontraban descalibrados se realizó un ajuste con el caudal de ingreso de electrolito a regenerar.

CAUDAL (m ³ /h)	PANEL DE SUL.Cu (kg/52m ³ /h)	PANEL DE TIO.SULF. (kg/52m ³ /h)	PESO kg/h SULF.Cu	PESO kg/h TIO.SULF
50	10	20	33.36	17.1
50	20	30	66.72	25.65
50	30	40	100.08	34.2
50	40	50	133.44	42.75
50	50	60	166.8	51.3
50	60	70	200.16	59.85
50	70	80	233.52	68.4

TABLA 5.3. CALIBRACIÓN DE REACTIVOS

FUENTE. Elaboración Propia

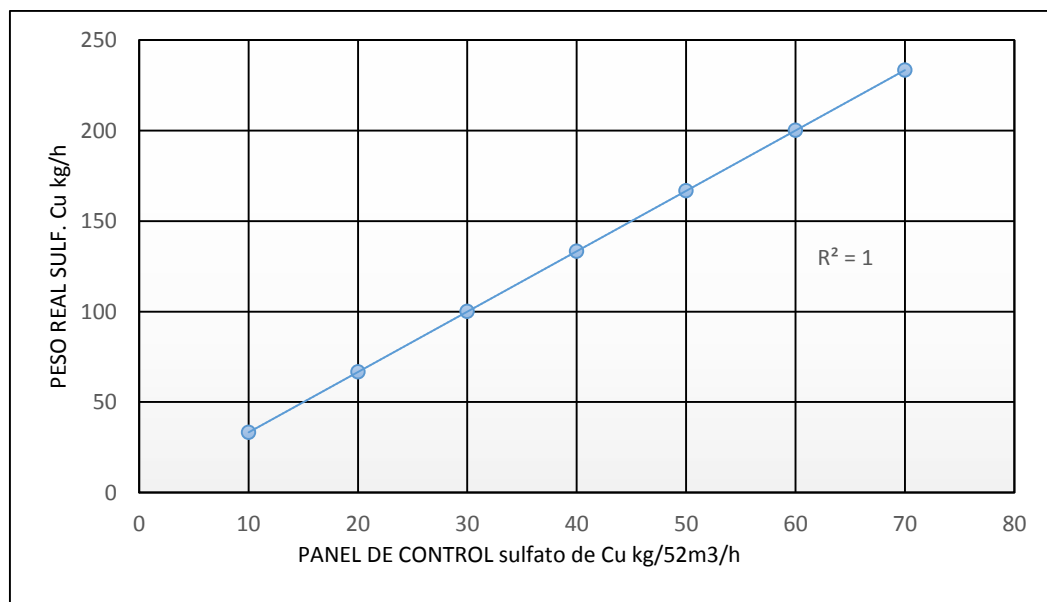


FIGURA 5.4. CALIBRACIÓN DEL TORNILLO DOSIFICADOR DE SULFATO DE COBRE

FUENTE. Elaboración Propia

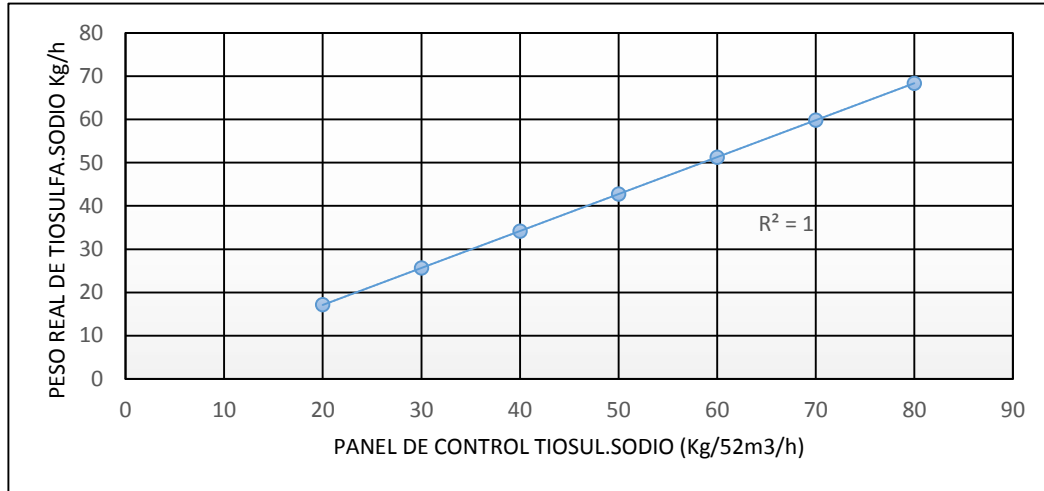


FIGURA 5.5. CALIBRACIÓN DEL TORNILLO DOSIFICADOR DE TIOSULFATO SODIO

FUENTE. Elaboración Propia



Se realizó la calibración de los tornillos dosificadores, aforando a distintas frecuencias para una dosificación contante.

FIGURA 5.6. TORNILLO DE DOSIFICACIÓN

FUENTE. Elaboración Propia

Se ajustó el tiempo de secado del concentrado de repulpado, anteriormente el secado era a 120°C, se hizo un seguimiento a diferentes temperaturas que llegamos a una temperatura de secado óptimo de 125°C-130°C por lote logrando a eliminar un mayor porcentaje de soda cáustica remanente del primer circuito.



FIGURA 5.7. HORNO ROTATORIO DE SECADO

FUENTE. Elaboración Propia

✚ CALIBRACIÓN DE DOSIFICACIÓN DE POLVO DE COBRE-MERRIL CROWELL

Se realizó la calibración del dosificador de polvo electrolítico, porque es uno de los parámetros más importantes en el proceso de recuperación plata, se realizó los ajustes en función al caudal de ingreso de solución rica en plata y así poder añadir el polvo de cobre requerido para poder precipitar la plata.

TABLA 5.4. DOSIFICACIÓN DE POLVO DE COBRE ELECTROLITICO

panel de control kg/32m ³ /h	Q (m ³ /h)	peso real (g/s)	peso real (kg/h)
12	25	2.96	10.656
14	25	3.47	12.492
16	25	3.94	14.184
18	25	4.54	16.344
20	25	5.07	18.252
22	25	5.47	19.692
24	25	5.97	21.442

FUENTE. Elaboración Propia

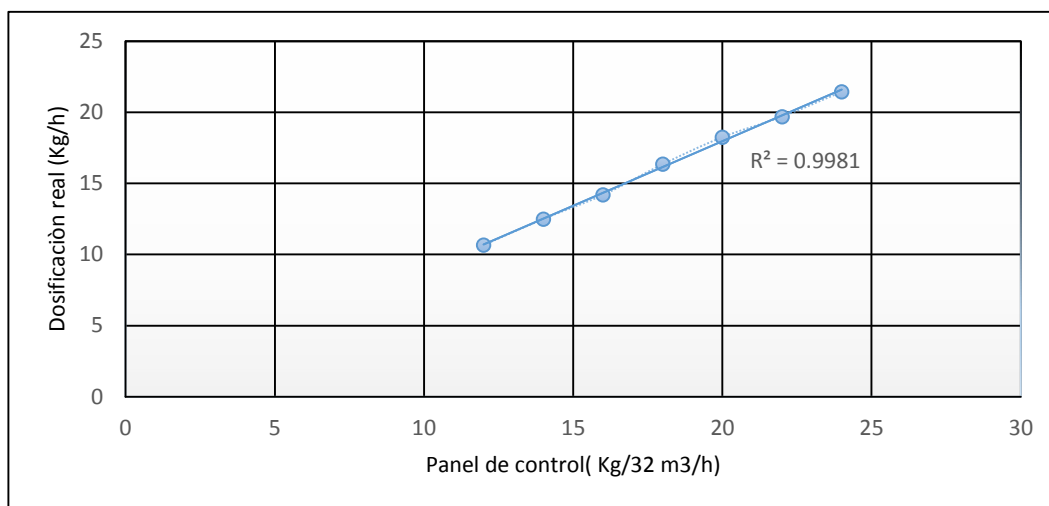


FIGURA 5.8. DOSIFICACIÓN POLVO DE COBRE
FUENTE. Elaboración Propia

CAPÍTULO VI

6. FASE DE CONTROL

6.1. FASE CONTROL DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE PLATA DESPÚES DE LOS CAMBIOS REALIZADOS EN PLANTA

Una vez ejecutadas las mejoras en nuestro proceso, desarrollamos la ETAPA IV el último paso es asegurar que los parámetros se mantengan a través del tiempo.

TABLA 6.1 DATOS RESULTANTES DESPUÉS DE LOS CAMBIOS REALIZADOS EN LA PLANTA SIMULADO CON MINITAB 17

TIOSULFATO DE SODIO	SULFATO DE COBRE	RATIO	CLARIFICADOR	BARREN	3er ESPESADOR	RECUPERACIÓN	FLUJO DE CONCENTRADO	CONCENTRADO	PH	FECHA	HORA
(g/L)	(g/L)		(mg/L)	(mg/L)	(%)	Plata (%)	(Kg/h)	Final			
74.87	57.49	1.3	671.09	88.31	89.59	90.94	647.21	58.63	6.5	02/02/2016	09:00
75.92	56.79	1.34	718.55	72.15	90.57	90.96	652.75	59.65	6.5		11:00
74.65	56.51	1.32	696.37	68.24	90.05	91.1	638.75	56.88	6.5		13:00
74.91	56.68	1.32	792.66	89.11	89.77	90.94	646.92	58.63	6.5		15:00
72.33	54.66	1.32	688.7	82.53	89.26	90.55	654.21	61.83	6.5		17:00
73.6	56.02	1.31	712.22	91.46	85.99	90.54	641.38	60.67	6.5		19:00
71.88	55.54	1.29	989.26	192.51	90.42	91.04	657.42	58.92	6.5		21:00
73.97	58.11	1.27	947.22	222.1	90.28	91.5	672.29	57.17	6.5		23:00
73.34	56.23	1.3	1114.09	146.66	89.72	90.86	667.04	60.96	6.5		01:00
72.94	56.05	1.3	1020.12	162.1	89.91	90.53	655.96	62.13	6.5		03:00
75.67	58.4	1.3	980.61	130.12	89.41	90.34	661.21	63.88	6.5		05:00
75.8	57.64	1.32	941.22	148.46	89.09	90.56	654.79	58.89	6.5		07:00
75.77	55.46	1.37	990.39	256.22	90.35	90.62	650.13	60.96	6.5	09/02/2016	09:00
72.86	57.89	1.26	883.85	356.4	88.87	89.58	657.71	68.54	6.5		11:00
72.94	57.25	1.27	847.31	333.28	89.03	89.74	659.46	67.67	6.5		13:00
71.94	58.24	1.24	815.1	348.61	89.98	90.78	651.88	60.08	6.5		15:00
67.24	54.19	1.24	918.32	210.19	90.17	90.95	637.88	57.75	6.5		17:00
64.88	53.33	1.22	959.66	148.21	90.43	91.16	640.21	56.58	6.5		19:00
68.28	52.62	1.3	1066.15	87.46	88.2	89.91	644.88	65.04	6.5		21:00
72.83	56.26	1.29	881.73	170.22	89.53	90.66	652.21	60.78	6.5	PROMEDIO	

FUENTE: Datos registrados por Lab. Químico

FECHA: 09/02/2016

– **COMENTARIO:**

Se puede observar los valores promedio obtenidos después de los cambios en la planta, son muy cercanos a los valores que presenta la simulación del software MINITAB 17 vista de la **TABLA 4.4**. Por tanto el valor promedio que presenta oscila entre 90- 91 % en recuperación de plata, que es un valor muy cercano al pronóstico de la simulación.

TABLA 6.2. RECUPERACIÓN ANTES Y DESPUÉS DEL ANÁLISIS

ANTES DE LOS CAMBIOS RECUPERACIÓN _1 (% PLATA)		
90.94	89.91	86.19
90.96	90.08	86.97
91.1	90.56	87.75
90.94	90.66	88.1
90.55	90.32	86.58
90.54	90.51	89.07
91.04	90.94	89.05
91.5	91.4	89.96
90.86	91.1	90.4
90.53	90.94	91.04
90.34	90.55	91.5
90.56	90.54	90.86
90.62	89.19	90.53
89.58	87.57	90.34
89.74	86.84	90.29
90.78	86.9	90.62
90.95	87	89.58
91.16	88.77	89.74
	86.03	90.78
	86.04	90.95
	84.06	89.71016949
DESPUÉS DE LOS CAMBIOS RECUPERACIÓN _2 (% PLATA)		
90.94	90.56	
90.96	90.62	
91.1	89.58	
90.94	89.74	
	90.78	
	90.95	
	91.16	

90.55	89.91
90.54	90.08
91.04	90.56
91.5	90.66
90.86	90.32
90.53	90.51
90.34	90.61375

FUENTE. Datos registrados por Lab.químico

– **COMENTARIO:**

Se aprecia la segunda columna el porcentaje de recuperación plata a llegado a un nivel constantes el promedio obtenido es de 90.61375 después de los cambios realizados en planta descritos en la **TABLA 5.1** del **CAPÍTULO V**, anteriormente se observa oscilaciones en la recuperación.

CAPÍTULO VII

7. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

7.1. MEJORAS OBTENIDAS

Comparando los resultados obtenidos antes y después del proyecto podemos afirmar:

1. La variabilidad de la operación decreció (DESVIACIÓN ESTANDAR =0.4).
2. El promedio de la recuperación se incrementó (RECUPERACIÓN=90.61%).

Ambos análisis se realizaron con data obtenida de Laboratorio Químico para poder comparar los datos que se tenían entre los periodos julio-2015 y febrero-2016.

En ambos periodos se tuvo los datos suficientes para poder demostrar estadísticamente que los valores obtenidos eran reales.

TABLA 7.1. CUADRO COMPARATIVO DE MEJORAS

	JULIO- 2015	FEBRERO-2016
RECUPERACIÓN	89.71	90.61
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1.42	0.4
VALOR SIGMA	0.08	3.44

FUENTE. Elaboración Propia

– COMENTARIO

- Se puede observar que hay un incremento de 0.9 % en recuperación de plata, monetariamente se obtuvo 112117.8799 US\$.

TABLA 7.2. CUADRO DE GANANCIAS

ANTES DE LOS CAMBIOS			DEPUES DE LOS CAMBIOS		
PRECIO DE PLATA	17.181	US\$/OZ	PRECIO DE PLATA	17.181	US\$/OZ
RECUPERACIÓN	FILTRO N°8 (kg)	FILTRO N°9 (kg)	RECUPERACIÓN	FILTRO N°8 (kg)	FILTRO N°9 (kg)
	1530	1525		1625	1615
89.71%	FILTRO N°8 (oz)	FILTRO N°9 (oz)	90.61%	FILTRO N°8 (oz)	FILTRO N°9 (oz)
	53969.16	53792.79		57320.19	56967.45
VENTA US\$	927244.138	924213.925	VENTA	984818.1844	978757.7585
TOTAL	1851458.063	US\$	TOTAL	1963575.943	US\$

GANANCIAS	112117.8799	US\$
-----------	-------------	------

FUENTE. Área Comercial Cía. Minera Casapalca S.A.

- Se puede apreciar que hay una disminución de la variabilidad en el proceso de Lixiviación de plata de 1.42 a 0.40 según calculado por la desviación estándar.

7.2. RESULTADOS CON PARÁMETROS SIMULADOS POR MINITAB 17

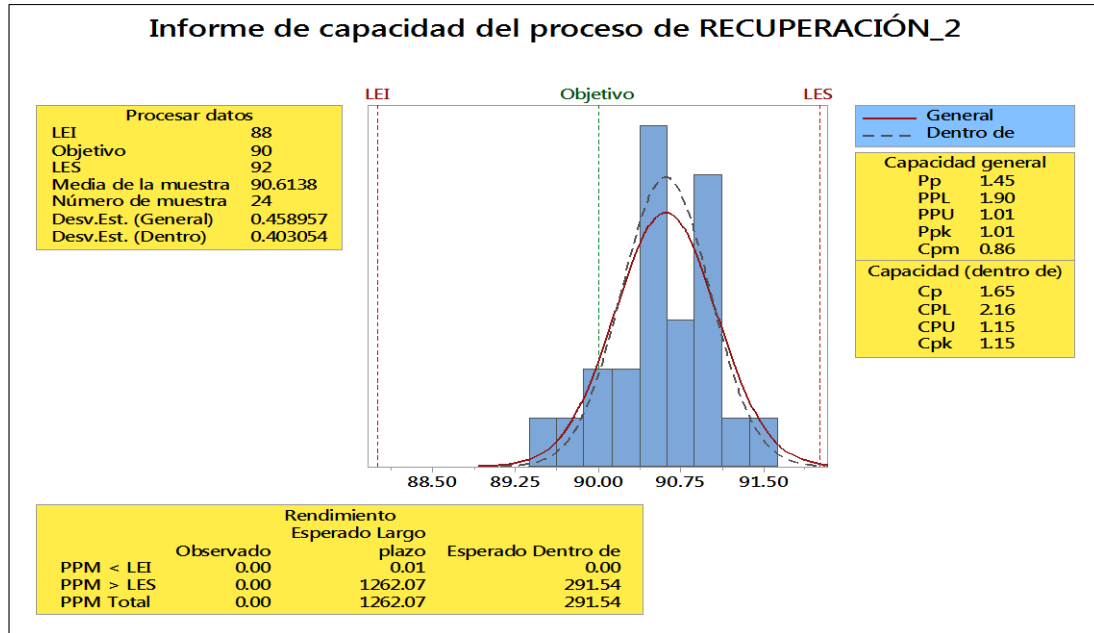


FIGURA 7.1. CAPACIDAD DE PROCESOS / RECUPERACION_2

FUENTE: Minitab 17

- INTERPRETACIÓN:

NOTA: El proceso es capaz, ya que $C_p > 1$ y $C_{pk} > 1$, no existe variabilidad, es un proceso suficiente.

ITEM 1.1 Y 1.2, ANEXO 1

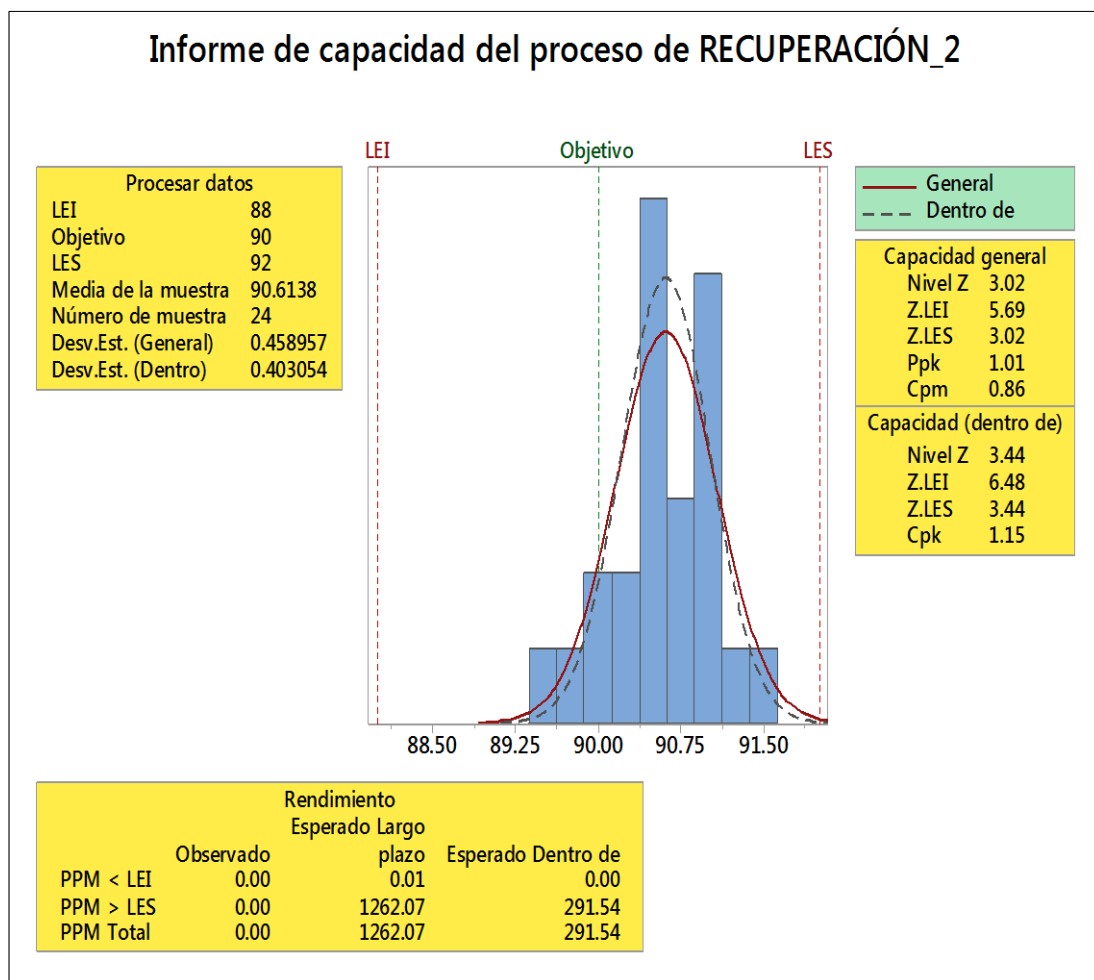


FIGURA 7.2. Seis Sigma / RECUPERACION_2

FUENTE: Minitab 17

– **ANÁLISIS DE RESULTADOS:**

Según lo calculado el sigma es $\sigma=3.44$, lo cual indica que hay DPMO = 290.91

- Se realizó la interpolación de la TABLA 1.4, ANEXO 1.

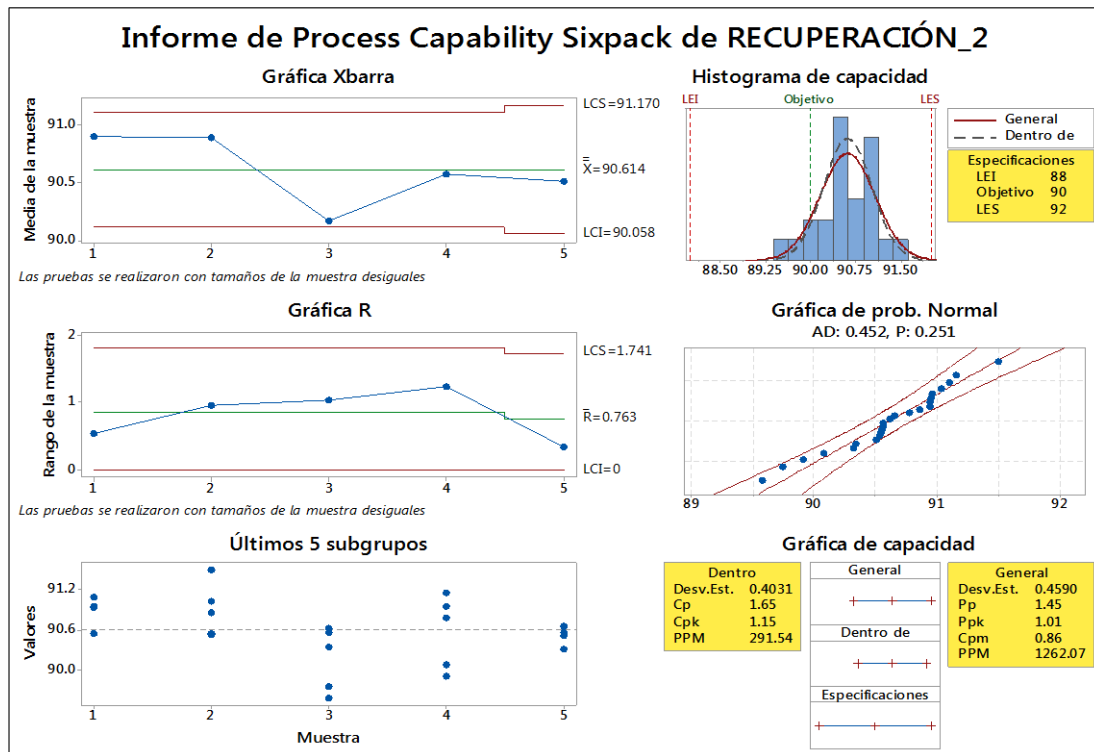


FIGURA 7.3. CARTA DE CONTROL/ RECUPERACION_2
FUENTE: Minitab 17

– INTERPRETACION:

Se puede observar una tendencia casi lineal y muy cercana a la media, lo cual indica que el proceso se está manteniendo casi constante, la gráfica de capacidad la línea de control de especificaciones se encuentra dentro de la línea general, por lo tanto la recuperación está dentro de los límites específicos deseado.

7.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE PROCESO

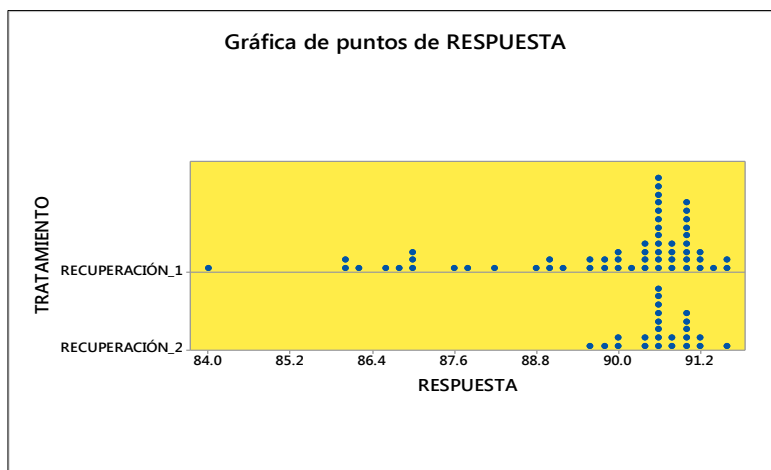
Evaluamos los indicadores de procesos de la data de Laboratorio Químico.

TABLA 7.3. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE LOS ÍNDICES DE PROCESO

CAPACIDAD DE PROCESO		ANTES RECUPERACIÓN_1	INTERPRETACIÓN	DESPUÉS RECUPERACIÓN_2	INTERPRETACIÓN
Capacidad potencial del proceso	Cp	0.58	No es adecuado para el trabajo, se requiere modificaciones serias	1.65	El proceso cumple satisfactoriamente las especificaciones
Mide la capacidad real	Cpk	0.03	El proceso es considerado Inadecuado, no cumple las especificaciones establecidas. Debe hacerse mejoramiento.	1.15	Significa que la variación actual del proceso, es igual a la variación permitida o especificada, por tanto, el proceso es considerado aceptable, no cumple satisfactoriamente las especificaciones. Se debe continuar el control del proceso.
Defectos en el proceso	PPM	466934.6 2	La efectividad del proceso es deficiente al bajo control del parámetros, se observa un elevado defecto por millón de oportunidades	291.54	Se mejoró los defectos del proceso, se observa un progreso de los parámetros en el circuito de Lixiviación de Plata.
Mide la mejora del proceso	Sigma	0.08	Necesita mejora en el proceso	3.44	Llegó a una calidad convencional
Defecto por millón	DPMO	968,938	Presenta demasiado defectos en el proceso	290.91	El proceso presenta una disminución de defectos en el proceso

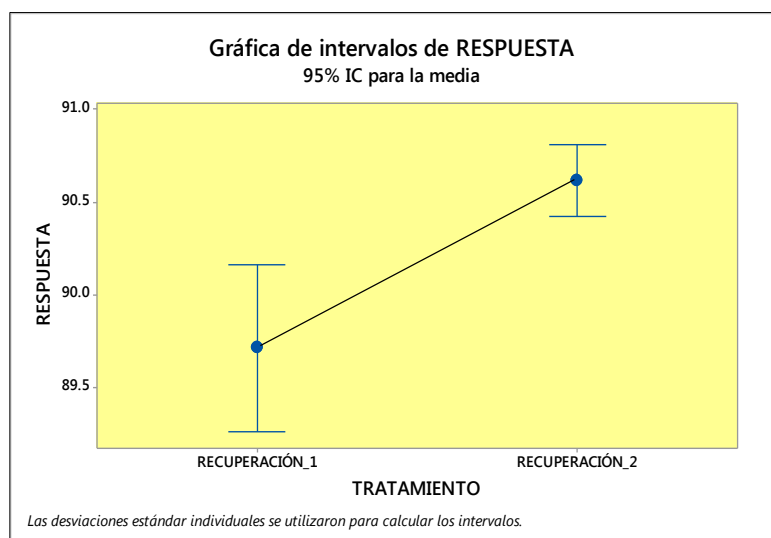
FUENTE. Elaboración Propia

- Se evaluaron los índices de procesos de acuerdo a las tablas puestas en los ANEXOS 1 como ÍTEM, según la estadística de proceso.



Se puede observar un incremento significativo RECUPERACION_2 el incremento del % de plata oscila entre 90-91%, después de los cambios puestos en planta.

FIGURA 7.4. DIAGRAMA COMPARATIVO DE RESPUESTA EN LA RECUPERACIÓN DE PLATA
FUENTE: Minitab 17



ANTES:
Grupo:TRATAMIENTO= RECUPERACION_1
Q1=89.26
MEDIANA=89.71
Q3=90.15
N=59
DESPUES:
Grupo:TRATAMIENTO= RECUPERACION_2
Q1=90.41
MEDIANA=90.61
Q3=90.80
N=24
Se observa un incremento de la mediana en la RECUPERACION_2.
RECUPERACIÓN=90.61%-89.71%=0.9%

FIGURA 7.5. INTERVALOS DE REPUESTA DE LA RECUPERACIÓN DE PLATA
FUENTE: Minitab 17

CONCLUSIONES

- Se logró realizar un estudio de mejora de parámetros en la recuperación de plata en el proceso de lixiviación de plata usando el software Minitab 17, en la planta ZTRATEK S.A (Cía. Minera Casapalca S.A), para lo cual se realizó una descripción del proceso del Circuito de Lixiviación de Plata, una fase de medición del proceso mediante el diagrama de Pareto (el flujo de concentrado presenta 35.7% y clarificador el 32,9% fue percibido con mayor frecuencia representando las mayores quejas y le sigue el barren con 10% de ocurrencias),se realizó evaluaciones con ayuda de la técnica de Ishikawa y el estudio R&R , determinando que el 96.71 % de la variación total de los datos se debe a sistemas de medición, por tanto concluimos que el circuito de lixiviación de plata presentaban los equipos la falta de calibración, seguidamente de realizó un modelo matemático que rige el circuito de lixiviación de plata:
$$\text{RECUPERACIÓN} = 243 - 0.1666 * X1 + 1.082 * X2 + 0.0496 * X3 - 0.004 * X4 - 0.695 * X5 + 0.000600 * X5 * X5 - 0.000935 * X2 * X3$$

Y un pronóstico de rangos operacionales para lograr la mejora en la recuperación de plata, es aceptada dicho modelo matemático porque según el coeficiente de determinación ($R^2 = 70.93 \%$), por tanto quiere decir que las variables dependiente (recuperación de plata), presenta una buena relación con las variables independientes (tiosulfato de sodio, sulfato de cobre pentahidratado, barren, tonelaje y clarificador) , plan de mejora de los puntos que necesitan tomar mayor importancia en planta, una fase de control del proceso y la evaluación de los resultados obtenidos mediante los índices de proceso

- Se estableció los principales rangos operativos en cuanto al manejo de las variables operativas las cuales son:
 - TIOSULFATO DE SODIO (g/L)= 74.87-75.92
 - SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO (g/L)= 57.49-58.4
 - CLARIFICADOR (mg/L)=671.09-980.61
 - BARREN (mg/L)=88.31-130.12
 - FLUJO DE CONCENTRADO (kg/h)=647.21-661.21
 - TEMPERATURA: 44°C
 - PH= 6.5
- Se logra aplicar una nueva técnica de investigación usando el software MINITAB 17 en el campo del procesamiento de minerales, en la cual se evaluaron los índices de procesos estadísticos para lograr la mejora de la recuperación de plata. La capacidad potencial del proceso C_p , logra aumentar a 1.65 lo cual afirma que el proceso cumple con las satisfacciones especificadas en la recuperación de plata, lo cual es sustentada por tablas estadísticas en calidad para determinar el buen desempeño del proceso. La capacidad real, C_{pk} , se observa un crecimiento hasta 1.15 lo que Significa que la variación actual del proceso, es igual a la variación permitida o especificada en recuperación de plata de 85%, por tanto, el proceso es considerado aceptable, se debe continuar el control del proceso y la variabilidad del proceso disminuyó de 1.42 a 0.40, determinándose por la desviación estándar
- Se logró una propuesta viable mediante el presente trabajo a partir de las metodologías estadísticas evaluadas por el Minitab 17, que permitió mejorar el proceso de lixiviación de plata sin inversión de ningún tipo, logrando un incremento de la recuperación plata en 0.9%, lo cual en cantidad se recupera 185 Kg plata/ día filtro que representa 112117.8799 US\$.

RECOMENDACIONES

- Elaborar y actualizar los procedimientos de trabajo. Además, elaborar un plan para la formación de instructores, es decir, operarios seleccionados y capacitados para que sean los encargados de enseñar las buenas prácticas y procedimientos de trabajo al personal nuevo.
- Cumplir el programa de mantenimiento, sobre todo los equipos de la planta, para garantizar un trabajo eficiente.
- El control estadístico de procesos permite mantener en rango las variables críticas encontradas.
- Se debe mantener en rangos las variables críticas ayudados con las cartas de control.
- En la toma de muestras ser muy cauteloso en la lectura, porque en este experimento la toma de datos es lo más importantes para disminuir el porcentaje de error.
- Los operadores como parte importante del sistema de control deberán ser entrenados continuamente.
- Es indispensable que los directivos, jefes y trabajadores trabajen con la nueva metodología a implementar para que se alcancen los objetivos deseados.

BIBLIOGRAFÍA

- Dr. P. Reyes MT. (1996). Control Estadístico del Proceso.
- BUSSAB, W.O,e MORETTIN, P.A. (2002). Estadística Básica. Río de Janeiro. Editora Saraiva.
- LIND, Douglas y MARCHAL, William y MASON, (2004). Robert. Estadística para administración y economía. Colombia. Editora Alfaomega.
- Treybal Robert E. Operaciones de transferencia de masa -2da Edición Mc Graw Hill, 2000.
- Mc Warren L. Julian C. y Harriott Meter –Operaciones Unitarias en Ingeniería Química - Mc Graw Hill, 1998.
- Esteban Domic M. hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, agosto 2011.
- Acheson J. Duncan (1996).Control de Calidad y Estadística Industrial. Colombia. Editora Alfaomega.
- Franklin A. Graybill, Hariharan K. (1994). Regression Analysis: concepts and applications Duxbury EE-UU. [en línea].
Disponible en: www.abebooks.com/Regression-Analysis-Concepts-Applications.
- William W. Hines, D. Montgomery (1993). Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Administración CECSA. México.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (1998). Recolección de los datos. En Metodología de la investigación (pp. 233-339). México: McGraw-Hill.
- http://metalurgiaymateriales.mex.tl/blog_50469_LIXIVIACION-DE-ORO-Y-PLATA.html.
- <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/normality/test-for-normality/>

ANEXOS

ANEXO 1

TABLA 1.1. NÚMERO DE CATEGORÍAS EN UN ANÁLISIS R&R

NÚMERO DE CATEGORÍAS	SIGNIFICA
menos de 2	el sistema no discrimina entre partes
2	las partes se dividen en dos grupos: grandes y pequeños
≥ 5	el sistema es aceptable y puede distinguir entre partes (*)
(*) entre más grande sea el número de categorías el sistema es mejor	

FUENTE. <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/quality-tools/measurement-system-analysis/gage-r-r-analyses/what-is-a-gage-r-r-study/>

✚ El número de distintas categorías nos dice cuántos grupos separados de partes el sistema es capaz de distinguir.

Es una tabla que nos indica, según los porcentajes obtenidos, qué tan aceptable es el sistema de medición según Action Group (AIAG), Measurement Systems Analysis Reference Manual):

TABLA 1.2. TABLA DE REFERENCIA MSA

% TOLERANCIA % STUDYVAR	% CONTRIBUCIÓN	EL SISTEMA DE MEDICIÓN ES
10% o menos	1% o menos	ideal
10% a 20%	1% a 4%	aceptable
20% a 30%	4% a 9%	marginal
30% o menos	10 % o más	pobre

FUENTE: F.Jeri/UNALM/Administración de Operaciones

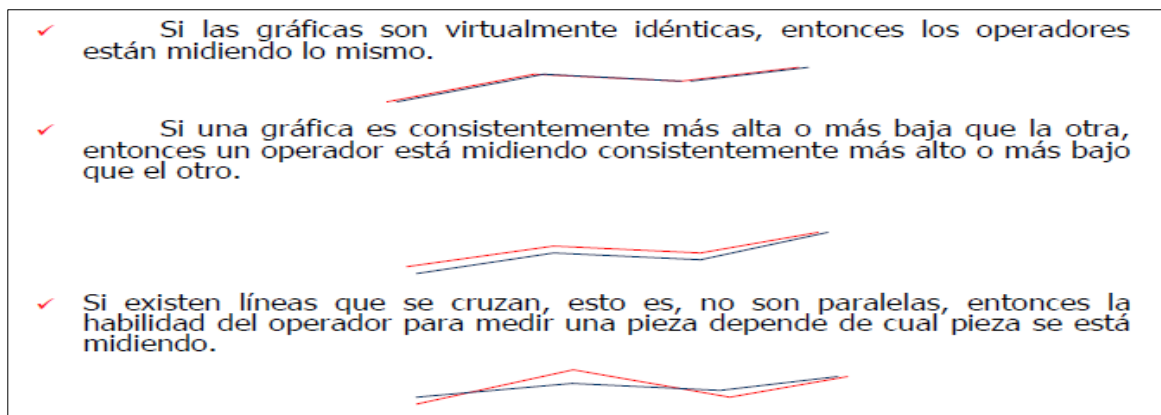


FIGURA 1.1. INTERPRETACIÓN DE GRÁFICAS DE INTERACCIONES

FUENTE: F.Jeri/UNALM/Administración de Operaciones

1.1. INTERPRETACIÓN DEL INDICADOR DE LA CAPACIDAD POTENCIAL DEL PROCESO C_p

- Si $C_p > 1.33$ significa que la variación actual del proceso, es menor a la variación permitida o especificada, por tanto, el proceso cumple satisfactoriamente las especificaciones.
- Si $1.33 > C_p > 1.0$ significa que la variación actual del proceso, es igual a la variación permitida o especificada, por tanto, el proceso es considerado aceptable, no cumple satisfactoriamente las especificaciones. Se debe continuar el control del proceso.
- Si $C_p < 1.0$ significa que la variación actual del proceso, es mayor a la variación permitida o especificada, por tanto, el proceso es considerado Inadecuado, no cumple las especificaciones establecidas. Debe hacerse mejoramiento.

1.2. INTERPRETACIÓN DEL INDICADOR DE CAPACIDAD REAL DEL PROCESO C_{pk}

- Si $C_{pk} > 1.33$ significa que la variación actual del proceso, es menor a la variación permitida o especificada, por tanto, el proceso cumple satisfactoriamente las especificaciones.
- Si $1.33 > C_{pk} > 1.0$ significa que la variación actual del proceso, es igual a la variación permitida o especificada, por tanto, el proceso es considerado aceptable, no cumple satisfactoriamente las especificaciones. Se debe continuar el control del proceso.

- Si $Cpk < 1,0$ significa que la variación actual del proceso, es mayor a la variación permitida o especificada, por tanto, el proceso es considerado Inadecuado, no cumple las especificaciones establecidas. Debe hacerse mejoramiento.

TABLA 1.3. NIVEL SIGMA VS DPMO, RENDIMIENTO

NIVEL SIGMA	DPMO	% DEFECTOS	RENDIMIENTO (%)	
0	993,193	93%	6,70%	0-3 necesita mejora
1	690,000	69%	31%	
2	308,537	31%	69%	
2.5	158,655	15.86%	84,14%	
3	66,807	7%	93%	3-4.5 calidad convencional
4	6,210	0.60%	99,40%	
4.5	1,350	0.14%	99,86%	
5	233	0.02%	99,97%	4.5-6 buen proceso
5.5	32	0.003%	99,997%	
6	3	0.00%	100,00%	6 proceso óptimo

FUENTE: F.Jeri/UNALM/Administración de Operaciones

TABLA 1.4. NIVEL SIGMA VS DPMO

DPMO	Nivel Sigma Corto Plazo (Zst)	Z Longo Plazo (Zlt)
1,000,000	0.00	-1.50
990,000	0.00	-1.50
980,000	0.00	-1.50
970,000	0.00	-1.50
960,000	0.00	-1.50
950,000	0.00	-1.50
940,000	0.02	-1.48
930,000	0.09	-1.41
920,000	0.15	-1.35
910,000	0.21	-1.29
900,000	0.26	-1.24
890,000	0.31	-1.19
880,000	0.36	-1.14
870,000	0.40	-1.10
860,000	0.44	-1.06
850,000	0.49	-1.01
840,000	0.53	-0.97
830,000	0.56	-0.94

820,000	0.60	-0.90
810,000	0.64	-0.86
800,000	0.67	-0.83
790,000	0.71	-0.79
780,000	0.74	-0.76
770,000	0.77	-0.73
760,000	0.80	-0.70
750,000	0.83	-0.67
740,000	0.86	-0.64
730,000	0.89	-0.61
720,000	0.92	-0.58
710,000	0.95	-0.55
700,000	0.98	-0.52
690,000	1.01	-0.49
680,000	1.04	-0.46
670,000	1.06	-0.44
660,000	1.09	-0.41
590,000	1.27	-0.23
580,000	1.30	-0.20
570,000	1.32	-0.18
560,000	1.35	-0.15
550,000	1.37	-0.13
540,000	1.40	-0.10
530,000	1.42	-0.08
520,000	1.45	-0.05
510,000	1.48	-0.02
500,000	1.50	0.00
490,000	1.52	0.02
480,000	1.55	0.05
470,000	1.58	0.08
460,000	1.60	0.10
450,000	1.63	0.13
440,000	1.65	0.15
430,000	1.68	0.18
420,000	1.70	0.20
410,000	1.73	0.23
400,000	1.75	0.25
390,000	1.78	0.28
380,000	1.81	0.31
370,000	1.83	0.33
360,000	1.86	0.36
350,000	1.88	0.38
340,000	1.91	0.41
330,000	1.94	0.44
320,000	1.97	0.47
310,000	2.00	0.50
300,000	2.02	0.52

290,000	2.05	0.55
280,000	2.08	0.58
270,000	2.11	0.61
260,000	2.14	0.64
250,000	2.17	0.67
240,000	2.21	0.71
230,000	2.24	0.74
220,000	2.27	0.77
210,000	2.31	0.81
200,000	2.34	0.84
190,000	2.38	0.88
180,000	2.42	0.92
170,000	2.45	0.95
160,000	2.49	0.99
150,000	2.54	1.04
140,000	2.58	1.08
130,000	2.63	1.13
120,000	2.68	1.18
110,000	2.73	1.23
100,000	2.78	1.28
90,000	2.84	1.34
80,000	2.91	1.41
70,000	2.98	1.48
60,000	3.06	1.56
50,000	3.15	1.65
40,000	3.25	1.75
30,000	3.38	1.88
20,000	3.55	2.05
10,000	3.83	2.33
9,900	3.83	2.33
9,800	3.83	2.33
9,700	3.84	2.34
9,600	3.84	2.34
9,500	3.85	2.35
9,400	3.85	2.35
9,300	3.85	2.35
9,200	3.86	2.36
9,100	3.86	2.36
9,000	3.87	2.37
8,900	3.87	2.37
8,800	3.87	2.37
8,700	3.88	2.38
8,600	3.88	2.38
8,500	3.89	2.39
8,400	3.89	2.39
8,300	3.90	2.40
8,200	3.90	2.40

8,100	3.90	2.40
8,000	3.91	2.41
7,900	3.91	2.41
7,800	3.92	2.42
7,700	3.92	2.42
7,600	3.93	2.43
7,500	3.93	2.43
7,400	3.94	2.44
7,300	3.94	2.44
7,200	3.95	2.45
7,100	3.95	2.45
7,000	3.96	2.46
6,900	3.96	2.46
6,800	3.97	2.47
6,700	3.97	2.47
6,600	3.98	2.48
6,500	3.98	2.48
6,400	3.99	2.49
6,300	4.00	2.50
6,200	4.00	2.50
6,100	4.01	2.51
6,000	4.01	2.51
5,900	4.02	2.52
5,800	4.02	2.52
5,700	4.03	2.53
5,600	4.04	2.54
5,500	4.04	2.54
5,400	4.05	2.55
5,300	4.06	2.56
5,200	4.06	2.56
5,100	4.07	2.57
5,000	4.08	2.58
4,900	4.08	2.58
4,800	4.09	2.59
4,700	4.10	2.60
4,600	4.10	2.60
4,200	4.14	2.64
4,100	4.14	2.64
4,000	4.15	2.65
3,900	4.16	2.66

FUENTE: F.Jeri/UNALM/Administración de Operaciones

1.3. DIAGRAMA DE POURBAIX DE LIXIVIACION DE PLATA A pH 7

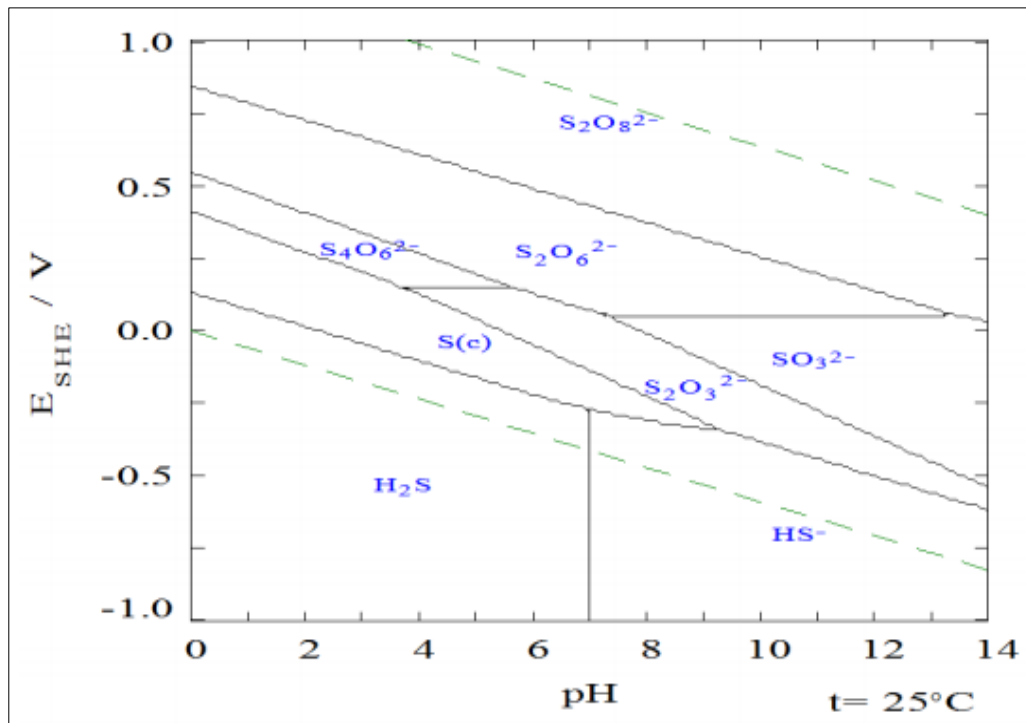


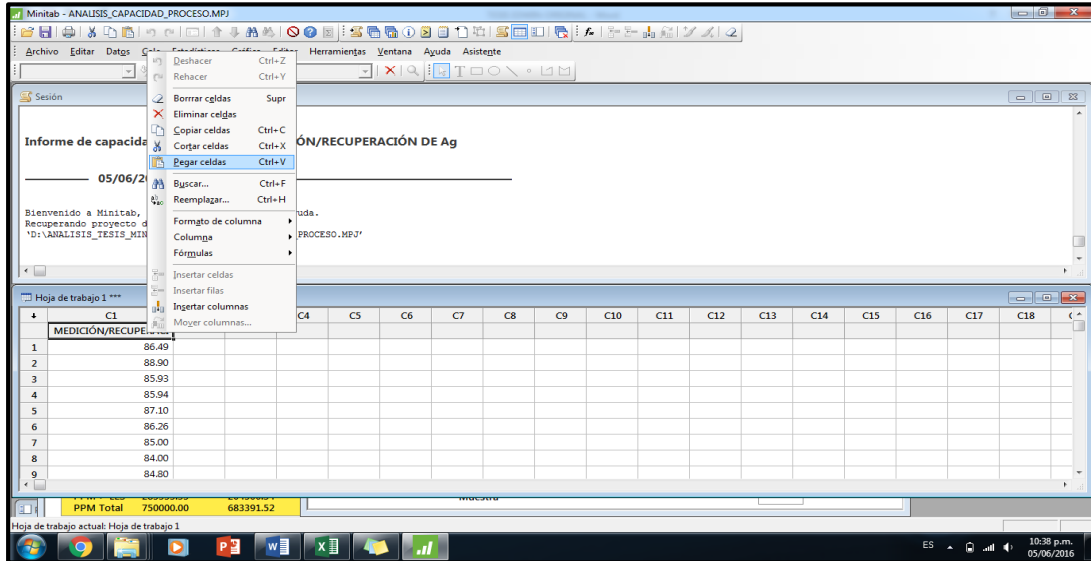
FIGURA 1.2. DIAGRAMA DE POURBAIX PARA EL SISTEMA $\text{S}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$
 FUENTE: Laboratorio de Investigaciones Metalúrgicas ZTRATEK S.A.C.

Eh vs pH (Pourbaix) para los sistemas tiosulfato-agua, con la finalidad de elucidar las especies acuosas estables y metaestables, así como las especies sólidas que se pudieran formar bajo distintas condiciones de potencial. Estos diagramas son de gran ayuda para identificar las especies causantes de los picos de oxidación. La Figura 1.2 muestra el diagrama de zonas de predominio para el sistema $\text{S}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ en el cual podemos observar que el tiosulfato predomina en una zona de pH de 5 a 14, aproximadamente. Sin embargo se aprecia que éste se oxida al incrementar el potencial; por ejemplo, en condiciones de pH 10.2 y potencial arriba de 0 V vs SHE, el tiosulfato se oxida a sulfito; por otro lado, a un valor de pH alrededor de 1, el tiosulfato se oxida a tetratiónato. Esto quiere decir que en estas zonas sería difícil disolver la plata, ya que no habría tiosulfato disponible para mantenerla en solución.

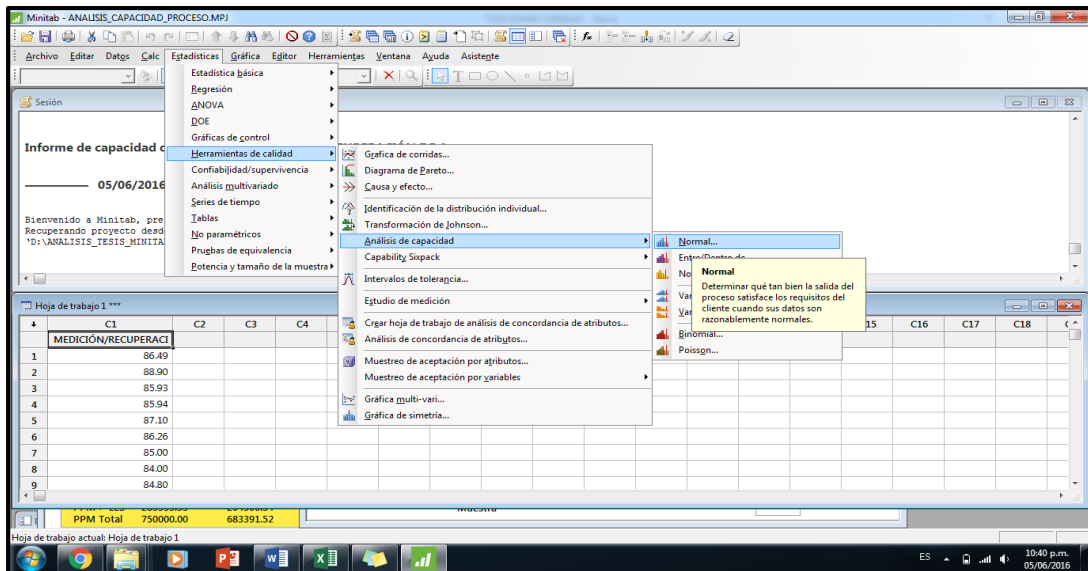
ANEXO 2

1. PASOS PARA DETERMINAR ANÁLISIS DE CAPACIDAD DEL PROCESO

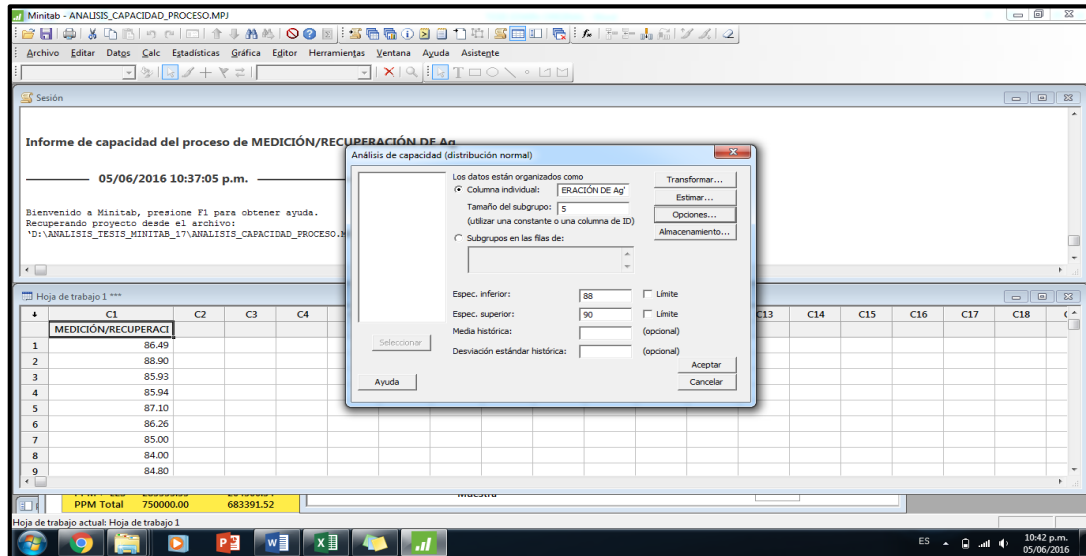
✚ Pegar los datos a evaluar (recuperación de plata)



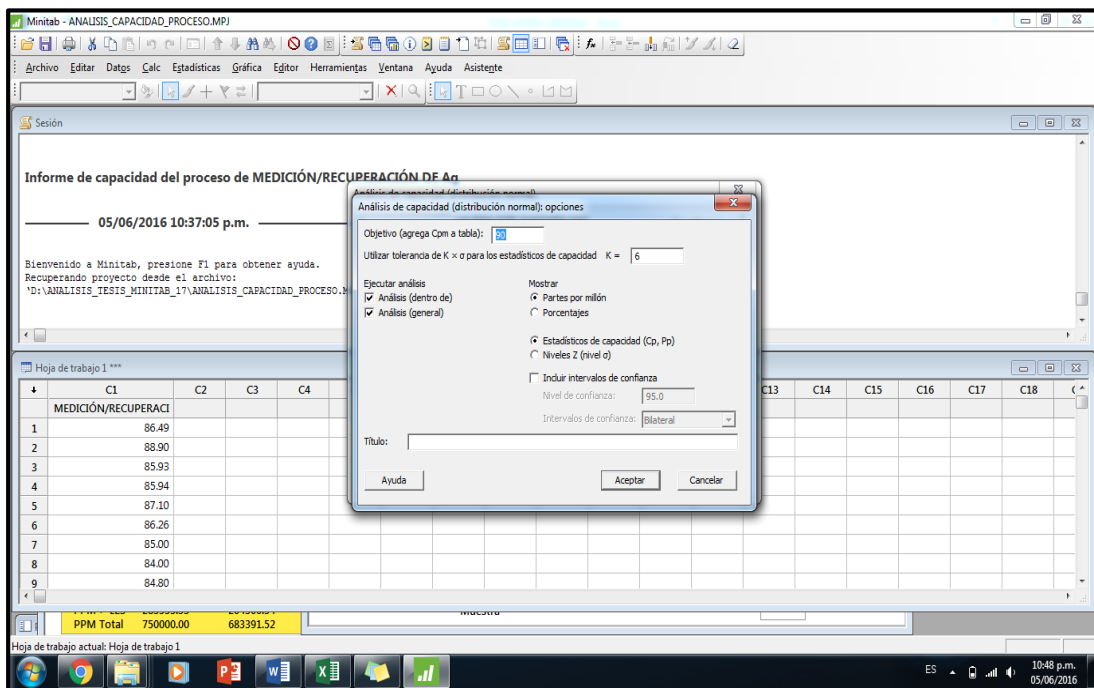
✚ Ir a estadística, herramientas de calidad, análisis de capacidad y normal (clic derecho).



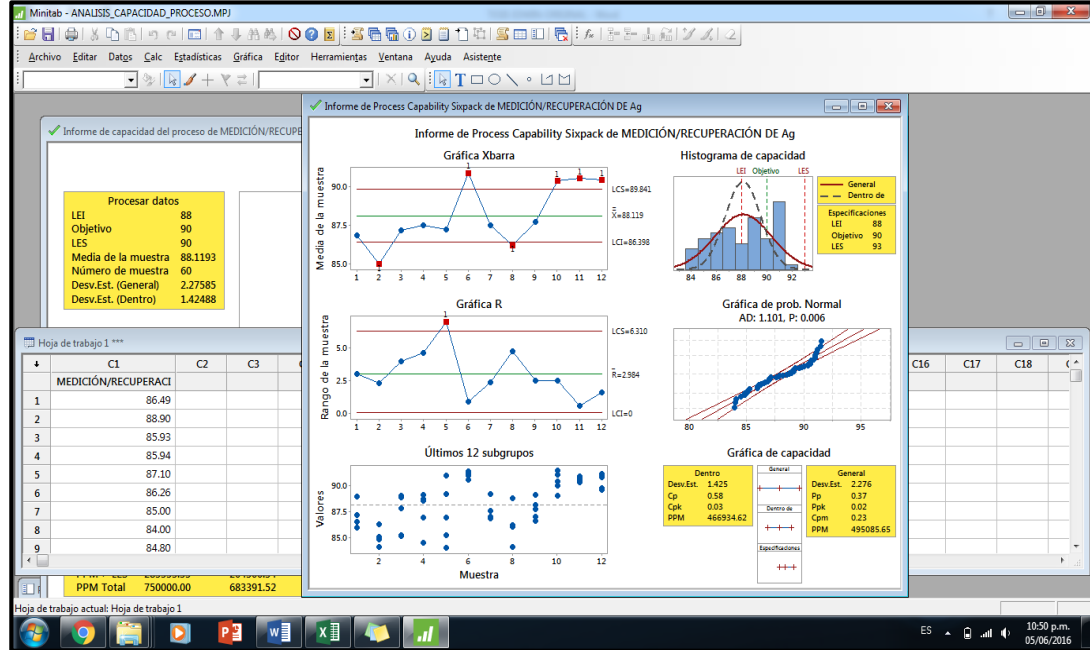
- Aparecerá la ventana de análisis de capacidad, seleccionar la columna a evaluar, colocar el tamaño de grupo 5 y en los límites superior e inferior introducir las especificaciones.



- Ir a opciones, colocar el objetivo a lograr y aceptar

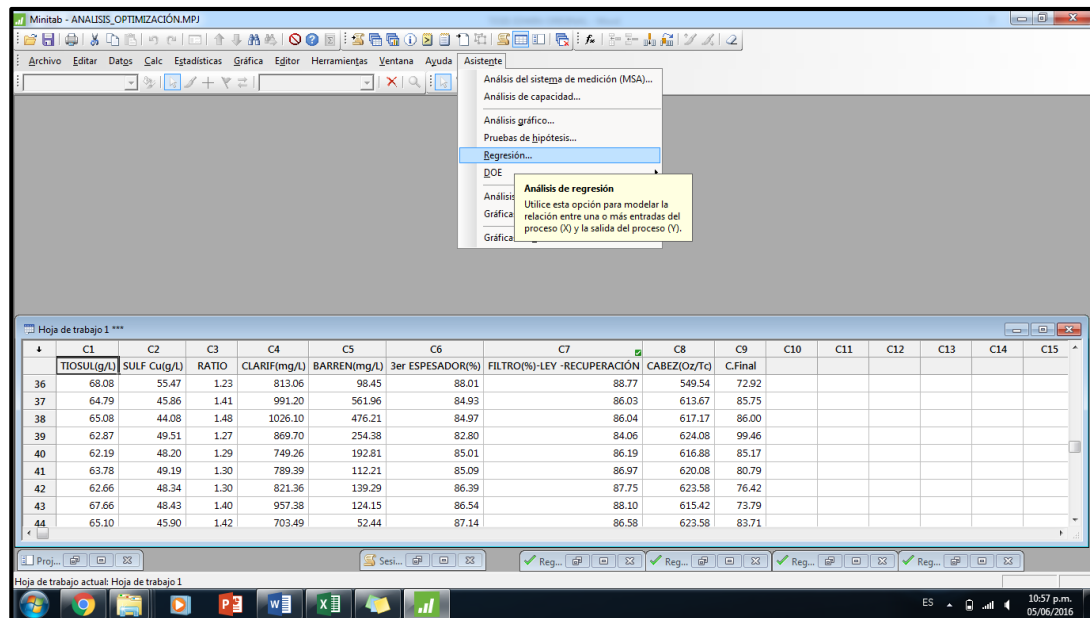


Se obtiene

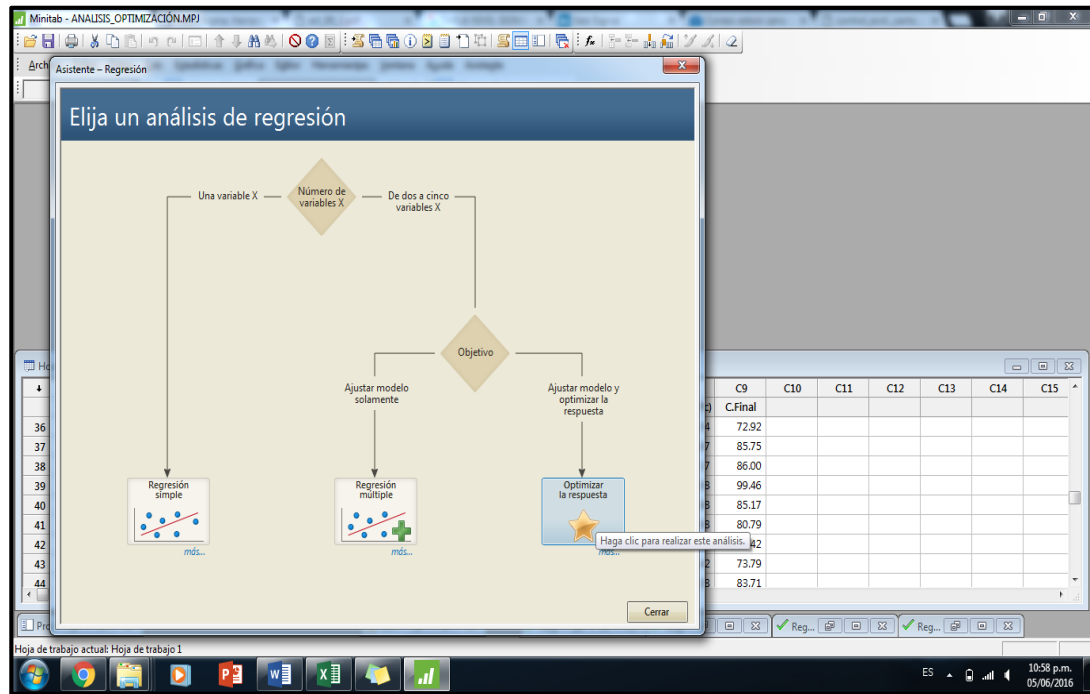


2. SIMULACIÓN DE MEJORA DE PARÁMETROS

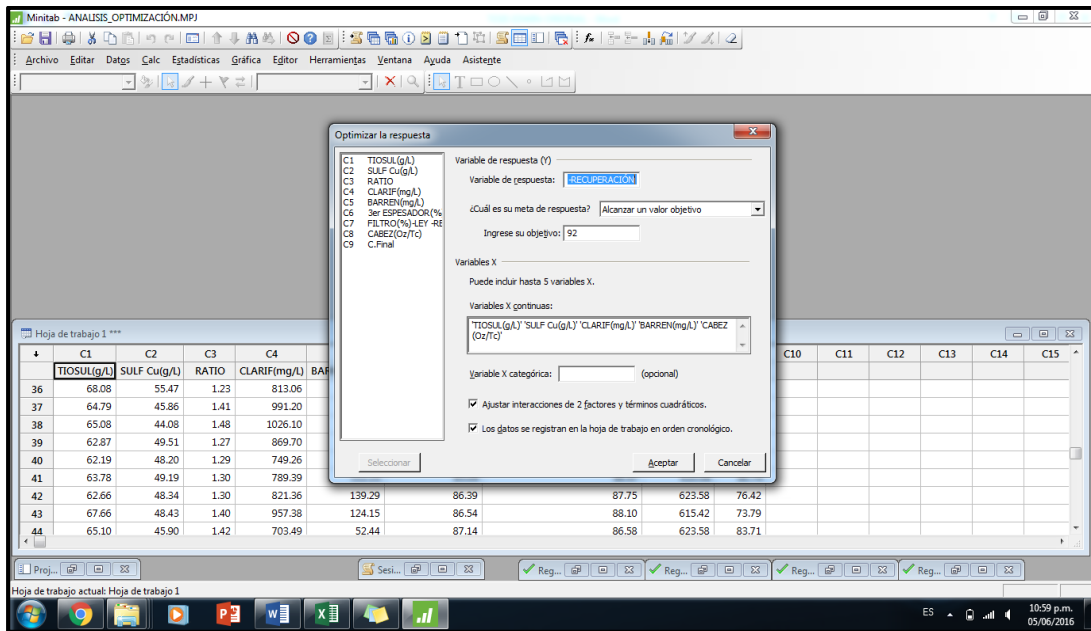
- Pegar los parámetros a evaluar
- Ir asistente y luego regresión.



📊 Seleccionar optimizar repuesta.



📊 Introducir las variables dependientes e independientes y clic en aceptar.



- Se visualizará una serie de gráficas entre ellas figura el modelo matemático que rige el circuito de lixiviación de plata, como los parámetros a usar para llegar al objetivo deseado.

