



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIVISION DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MINAS, METALURGIA Y
GEOLOGÍA

**Evaluación estadística del proceso de lixiviación tras paro operativo
de equipos de concentración gravimétrica durante el periodo de
contingencia sanitaria**

TESINA QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO METALÚRGICO

PRESENTA

JOSÉ TRINIDAD LEDESMA GUERRA

ASESOR

DR. MARIO ALBERTO CORONA ARROYO

CO-ASESOR

DR. JOEL EVERARDO VALTIERRA OLIVARES

Guanajuato, Gto., Noviembre 2021
Asunto: Aprobación de Trabajo
de Titulación

DR. GILBERTO CARREÑO AGUILERA
DIRECTOR DE DIVISION DE INGENIERIAS
CAMPUS GUANAJUATO
PRESENTE

Los que suscriben, revisores del trabajo, que como requisito para obtención de Título Profesional, fue presentado a revisión por:

C. José Trinidad Ledesma Guerra

Pasante del Programa Educativo de Ingeniero Metalúrgico de la División de Ingenierías del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en la Modalidad de Trabajo de Tesis, con el Título:

"Evaluación estadística del proceso de lixiviación tras paro operativo de equipos de concentración gravimétrica durante el periodo de contingencia sanitaria"

Una vez leído, analizado y revisado el trabajo, ha sido aprobado para que continúe con los trámites requeridos para solicitar fecha y sustente examen.


Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente
"La Verdad Os Hará Libres"

Dr. Mario Alberto Corona Arroyo
Director del Trabajo



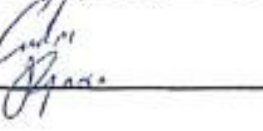
Dr. Joel Everardo Valtierra Olivares
Codirector del Trabajo



Dr. Juan Carlos Baltazar Vera
Sinodal del Trabajo



Dr. Martín Caudillo González
Sinodal del Trabajo



Ing. Carlos Alberto Reynoso González
Sinodal del Trabajo



DIVISION DE INGENIERIAS CAMPUS GUANAJUATO
Ex - Hacienda San Mallas s/n 36000, Guanajuato, Gto., Tels (473) 732 2291, 732 3864

Índice

Índice de imágenes.....	4
Índice de tablas	6
Capítulo 1. Minera Penmont	7
Capítulo 2. Planta de Beneficio.	10
2.1 Trituración.....	10
2.2 Molienda	12
2.3 ILR.....	14
2.4 Reactores	14
2.5 Lavado contra corriente.....	15
2.6 Proceso Merrill-Crowe	16
2.7 Depósito de jales.....	17
Antecedentes de la lixiviación.....	17
Capítulo 3.	20
3.1 Planteamiento del problema.	20
3.2 Hipótesis.....	21
3.3 Objetivo general.....	21
3.4 Objetivos específicos.....	21
3.5 Justificación.....	21
Capítulo 4. Metodología.....	22
4.1 Muestras Minerales	22
4.2 Caracterización mineralógica	22
4.3 Determinación de Au Grueso.....	23
4.4 Muestreo de reactores.	24
4.5 Análisis estadístico.	24
Capítulo 5. Resultados.....	26
5.1 Pruebas para identificar oro grueso.....	26
5.2 Caracterización mineralógica	28
5.3 Muestreo de planta.....	30
5.4 Análisis estadístico	32
5.4.1 Comparación del proceso de cianuración en presencia de los concentradores gravimétricos.....	33

5.4.2	Comparación del proceso de cianuración sin operación de equipos de concentración gravimétrica	38
5.4.3	Eficiencia del proceso de cianuración antes y después del paro de equipos de concentración gravimétrico	43
Capítulo 6. Conclusiones		45
Referencias		47
Anexos		48

Índice de Imágenes

Imagen 1.	Ubicación de Mina La Herradura, H. Caborca, Sonora, México.....	7
Imagen 2.	Stock de gruesos. Reporte de material stock PLD Herradura al 17 de marzo 2021. .	10
Imagen 3.	Componentes del sistema rompedor de rocas.....	11
Imagen 4.	Circuito de trituración.....	12
Imagen 5.	Circuito de molienda, PLD 2. Fuente: Lab. Metalúrgico. Ing. Valentín Cedillo	13
Imagen 6.	Reactores con agitación para el proceso de lixiviación.	15
Imagen 7.	Plantas de lixiviación dinámica, PLD 1 a la derecha y PLD2 del lado izquierdo, en el centro el sistema de lavado contra corriente, en los costados los reactores, en el fondo la zona de trituración seguida de los domos del stock de finos y las naves del circuito de molienda.	16
Imagen 8.	Resultados del primer estudio del efecto de la concentración del cianuro y presión del oxígeno en la tasa de disolución de plata a 24°C. (DEITZ & HALPERN, 1953).....	19
Imagen 9.	Eficiencia de lixiviación mensual de ambas plantas, de enero del 2019 a la fecha. Fuente: Laboratorio Metalúrgico.....	20
Imagen 10.	Análisis granulométrico de los compósitos quincenales 1 y 2 en ambas plantas.....	26
Imagen 11.	Partículas de plata nativa libre, fracción -200 en ambas imágenes. a)Cola de proceso PLD. 1 b)Cola de proceso PLD 2.	30
Imagen 12.	Ley de sólidos en los reactores de PLD 2	31
Imagen 13.	Horas de operación mensual de los equipos de concentración gravimétrica en PLD 1 y 2.....	33
Imagen 14.	Resultados de análisis ANOVA para los meses con mayor número de horas en operación del concentrador gravimétrico en PLD 1.	33
Imagen 15.	Prueba de Tukey y Fisher, igualdad de media mensual de eficiencia de lixiviación, PLD 1	34
Imagen 16.	Pruebas HSU y Dunnett para probar igualdad de medias mensuales de eficiencia de lixiviación, PLD 1.....	35

Imagen 17.	Resultados de análisis ANOVA con grado de significancia de 0.05 y un solo factor, para los meses con mayor número de horas en operación del concentrador gravimétrico en PLD 2.	35
Imagen 18.	Prueba de Fisher, igualdad de medias mensuales de eficiencia de lixiviación PLD 2. 36	
Imagen 19.	Prueba de HSU, igualdad de medias mensuales de eficiencia de lixiviación, PLD 2.. 36	
Imagen 20.	Resultados de la prueba de comparación de medias de PLD 1 y 2, junio 2019, noviembre 2019 y febrero 2020.	36
Imagen 21.	Diagrama de caja de las PLD operando el proceso de gravimetría.....	37
Imagen 22.	Gráfica de control de noviembre del 2019 en PLD 1.	38
Imagen 23.	Gráfica de control del mes de noviembre de 2019 en PLD 2.....	38
Imagen 24.	Resultados análisis ANOVA comparación de medias mensuales de eficiencia de lixiviación sin operar el proceso de gravimetría.	39
Imagen 25.	Prueba de Fisher, comparación de medias mensuales de la eficiencia de lixiviación sin el proceso de gravimetría, PLD 1.....	39
Imagen 26.	Pruebas HSU, comparación de medias mensuales de la eficiencia de lixiviación sin el proceso de gravimetría, PLD 1.	40
Imagen 27.	Resultados del análisis ANOVA comparación de medias mensuales de eficiencia de lixiviación sin el proceso gravimétrico.	40
Imagen 28.	Prueba de Fisher, comparación de medias mensuales de la eficiencia de lixiviación sin el proceso de gravimetría, PLD 2.....	41
Imagen 29.	Pruebas HSU, comparación de medias mensuales de la eficiencia de lixiviación sin el proceso de gravimetría, PLD 2.	41
Imagen 30.	Resultado de la comparación de medias entre PLD 1 y PLD 2 después del paro operativo del proceso gravimétrico.	42
Imagen 31.	Gráfica de valores individuales, PLD 1 a la derecha y PLD 2 a la izquierda. No se reporta diferencia significativa.	42
Imagen 32.	Resultados prueba T de Student y análisis ANOVA comparando el proceso antes y después del paro operativo del proceso gravimétrico. PLD 1	43
Imagen 33.	Gráfica de valores individuales y gráfica de caja con y sin el proceso de gravimetría.	43
Imagen 34.	Resultados pruebas T de Student y análisis ANOVA comparando el proceso antes y después del paro operativo del proceso gravimétrico. PLD 2.	44
Imagen 35.	Gráfica de valores individuales y gráfica de caja con y sin operar el proceso de gravimetría en PLD 2	44

Índice de Tablas

Tabla 1.	Balace de agua y pulpa del circuito de molienda.....	13
Tabla 2.	Condiciones monitoreadas del mineral en el circuito de lixiviación.....	14
Tabla 3.	Meses donde el proceso gravimétrico tuvo mayor número de horas en operación contra los meses comparados después de paro operativo en PLD 1.	25
Tabla 4.	Meses donde el proceso gravimétrico tuvo mayor número de horas en operación contra los meses comparados después de paro operativo en PLD 2.	25
Tabla 5.	P ₈₀ de los compósitos de ambas plantas.....	26
Tabla 6.	Análisis valorado del compósito 2 en PLD 1.	27
Tabla 7.	Análisis valorado del compósito 2 en PLD 2	27
Tabla 8.	Resultado de pruebas para determinar oro grueso.....	28
Tabla 9.	Especies identificadas por microscopía electrónica de barrido.....	29
Tabla 10.	Ensaye valorado del espesador primario y tanque de balance.	32
Tabla 11.	Análisis valorado, compósito 1 PLD 1.	48
Tabla 12.	Análisis valorado, compósito 1 PLD 2.	48
Tabla 13.	Datos usados en el análisis estadístico de PLD 1 antes del paro de los equipos de gravimetría.....	49
Tabla 14.	Datos usados en el análisis estadístico de PLD 1 después del paro de los equipos de concentración gravimétrica.	50
Tabla 15.	Datos usados en el análisis estadístico en PLD 2 antes del paro de los equipos de concentración gravimétrica.	51
Tabla 16.	Datos usados en el análisis estadístico en PLD 2 después del paro de los equipos de concentración gravimétrica.	52

Capítulo 1. Minera Penmont

Introducción

Minera Penmont es una empresa subsidiaria de Fresnillo PLC, actualmente cuenta con dos minas en operación, la primera es unidad La Herradura descubierta en el año de 1991, inició operaciones en 1997, la segunda es la unidad Noche buena sumándose a la operación en 2011. Unidad La Herradura se ubica a 80 km en línea recta al norte y 55° al oeste de la ciudad de H. Caborca, Sonora. La Herradura cuenta con dos importantes vías de comunicación terrestre, la carretera estatal No. 18 Caborca a Puerto Peñasco la cual cuenta con 100 km pavimentados y otro tramo de 20 km de terracería y la carretera internacional federal No. 2 Hermosillo a Santa Ana a Tijuana. El poblado más cercano es el ejido Juan Alvares perteneciente al municipio de H. Caborca, Sonora. La imagen 1 muestra el mapa donde se puede apreciar la localización de la unidad la herradura.

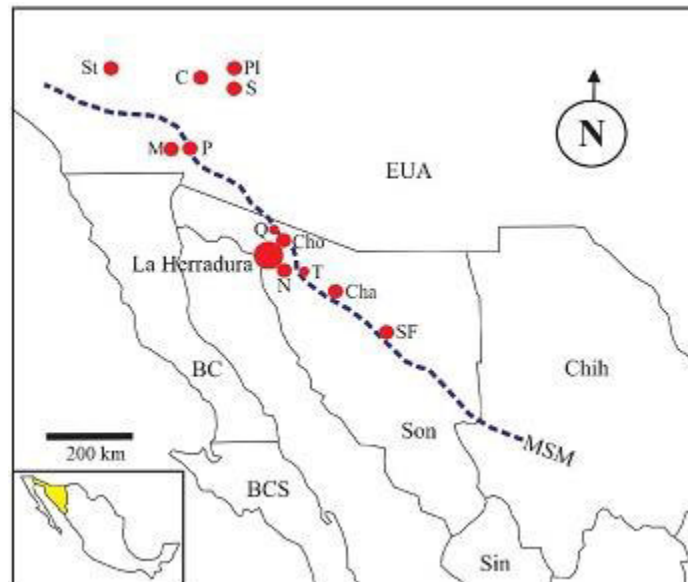


Imagen 1. Ubicación de Mina La Herradura, H. Caborca, Sonora, México.

Minera Penmont se coloca como una de las más relevantes del país debido a su liderazgo en producción de Au. Socialmente, cuenta con un sistema de gestión de salud, seguridad, medio ambiente y relaciones con la comunidad lo que la ha llevado a obtener certificados como: Industria limpia, código internacional del manejo de cianuro, desempeño ambiental, empresa socialmente responsable y excelencia ambiental, gracias a su trabajo con los más altos estándares en estos temas.

El proceso metalúrgico se inicia con la extracción del mineral, el cual es rezagado y acarreado para su procesamiento. Este se lleva a cabo de dos formas distintas, de acuerdo con la ley del mineral de cabeza: 1) en forma estática en los patios de lixiviación mediante percolación o 2) en tanques de agitación dinámica y lavado contra corriente en una de sus dos plantas de lixiviación dinámica. En ambos casos, la solución rica producida es procesada en plantas Merrill-Crowe para el precipitado de metales preciosos.

A principios del año 2020, el mundo entero experimentaría un suceso histórico debido a la pandemia surgida en el continente asiático, esto llegó a modificar desde la forma que vivíamos hasta la forma de trabajar, la unidad minera no estuvo exenta de dicha situación ya que la noche del lunes 30 de marzo del 2020, el Consejo de Salubridad General del gobierno federal declaró estado de emergencia sanitaria en todo el territorio nacional a causa de la pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2 (Covid-19). Entre las medidas sanitarias tomadas como prevención destaca la suspensión de todas las actividades no esenciales en los sectores públicos, privado y social. Además, se pidió a la ciudadanía evitar realizar actividades fuera de casa, mantener la sana distancia y las medidas básicas de higiene. En este contexto, las actividades denominadas esenciales son las consideradas de vital importancia para el funcionamiento óptimo del país durante la pandemia del coronavirus o cualquier otra emergencia sanitaria (Montalvo, 2020). El día 31 de marzo de 2020 en la conferencia de prensa, del hoy presidente Andrés Manuel López Obrador, el subsecretario de salud Hugo López Gatell dio a conocer la lista de actividades consideradas esenciales que no detendrían sus labores durante la contingencia sanitaria, dentro de las cuales no se encontraba el sector minero.

Sin embargo, la unidad La herradura opera con procesos continuos que no pueden detenerse ni operar bajo autonomía, es necesario la intervención humana, siendo prácticamente imposible e inviable económicamente llegar a un paro, más allá de aquellos paros de mantenimiento programados y de periodos muy cortos, sin tener consecuencias catastróficas sobre todo para el medio ambiente. Tras varias reuniones con las autoridades encargadas y el sindicato, se llegó al acuerdo de operar los procesos críticos y con la menor cantidad de personal posible para respetar reglas sanitarias. La unidad minera comenzó a trabajar en una operación aislada llamada “burbuja” donde todos los trabajadores fueron organizados evitando la convivencia con sus familias durante algunos periodos de tiempo disminuyendo el contacto con la población y principalmente manteniendo condiciones de trabajo dignas.

Debido a la disminución de personal en las áreas de trabajo, fue necesario realizar cambios de personal en la operación para tener el menor impacto posible en la producción, así fue como se optó por detener el proceso de concentración gravimétrica y el proceso ILR (Intensive Leach Reactor), que dependen uno del otro, para disponer de este personal en otras áreas; estos procesos hasta la fecha (agosto 2021) siguen en paro ya que no se ha percibido una deficiencia en la recuperación del metal de interés.

Tomar una decisión, como lo es detener la operación de un proceso que ha mostrado incrementar la recuperación de metales preciosos, no se debe decidir a la ligera, por ello se realizaron diferentes pruebas metalúrgicas, como identificación de Au grueso, caracterización mineralógica, cinéticas de cianuración y análisis estadísticos como pruebas de hipótesis y herramientas 6 sigma usadas en el control de calidad, que ayudan en la toma de decisiones. El presente trabajo, tiene la finalidad de evaluar el proceso bajo las condiciones mencionadas y reiterar que las plantas operan en condiciones iguales con y sin el proceso gravimétrico cuya finalidad es captar partículas de Au de tamaño grandes, y lixiviarlas en el ILR.

Capítulo 2. Planta de Beneficio.

Unidad La Herradura cuenta con dos plantas de lixiviación dinámica (PLD), la primera inaugurada en 2014 y la segunda comenzó sus operaciones en 2018. El objetivo de producción de las plantas es procesar 20 mil toneladas diarias en conjunto. Ambas plantas, cuentan con procesos independientes, sin embargo, los circuitos son idénticos de tal manera que se consideran plantas espejo ya que se utilizó el mismo diseño conceptual en ambas plantas, en la planta 2 se realizaron mejoras simples resultado de las experiencias aprendidas.

El depósito mineral cuenta con una ley promedio de oro de 1 g/Ton con lo cual se alcanzan contenidos superiores a los 3 millones de onzas de Au minerables a tajo abierto. El yacimiento es clasificado como mesotermal en zona de cizalla. El metal de interés se presenta como Au nativo y electrum (de la Torre, 2004).

2.1 Trituración.

El área de trituración comienza en el patio de gruesos donde se cuenta con pilas de mineral de diferentes leyes de manera estratégica, para mantener la cabeza alimentada lo más controlada posible, como se observa en la imagen 2. El patio cuenta con una rampa de acceso para permitir el ingreso del acarreo de una manera segura.

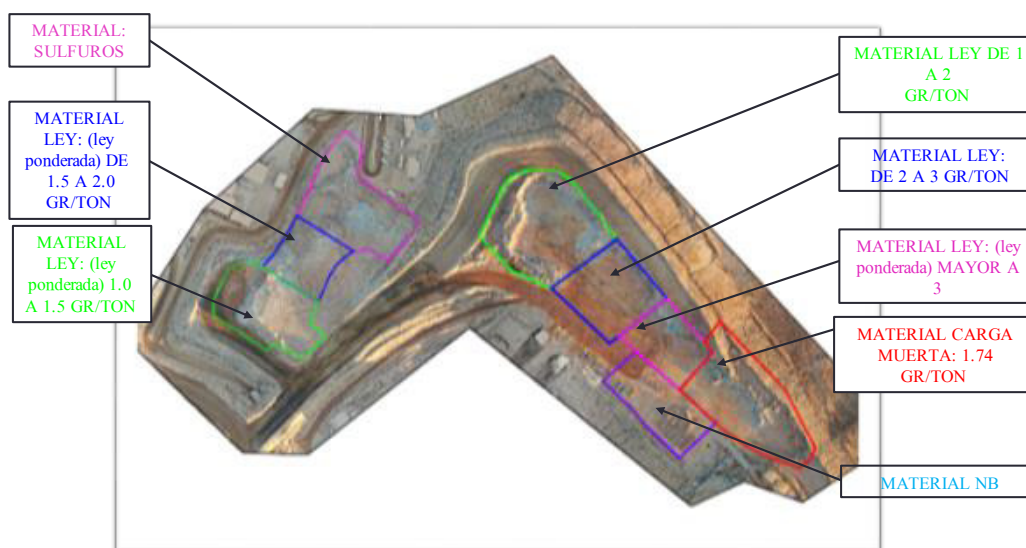


Imagen 2. Stock de gruesos. Reporte de material stock PLD Herradura al 17 de marzo 2021.

Con ayuda de un cargador frontal y camiones de acarreo el mineral es alimentado al circuito de trituración que comienza con una parrilla cuadrada cuya abertura es de 24 pulgadas, el mineral mayor a este tamaño es reducido con ayuda de un sistema rompedor de roca modelo **MRH30 / BX20 ED** como se muestra en la imagen 3.

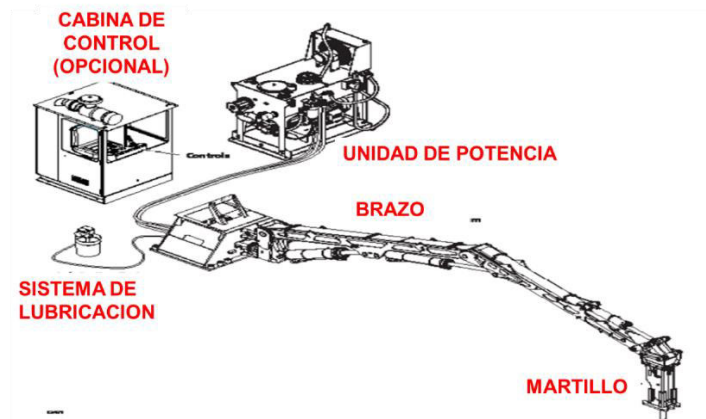


Imagen 3. Componentes del sistema rompedor de rocas.

El mineral a -24" es recibido en una tolva para posteriormente clasificarlo con una criba Grizzly, un alimentador de cadena es el que se encarga de la alimentación del mineral a la criba, esta última tiene una abertura de 6" en su lado más angosto, los finos de la criba son enviados al stock pile de finos mientras que los gruesos son alimentados a un trituradora de quijada con una abertura de descarga de 6", este último equipo opera en circuito abierto por lo que su descarga se combina con los finos de la criba y son enviados en la misma banda al stock de finos. Como medida de seguridad y cuidado del medio ambiente, el stock de finos está situado dentro de un domo para reducir la cantidad de partículas finas liberadas al ambiente. En la imagen 4 se aprecia un diagrama general del circuito de trituración.

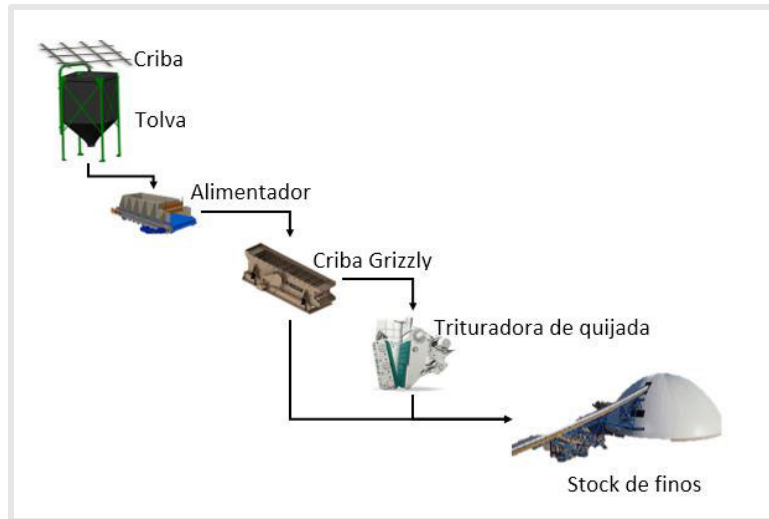


Imagen 4. Circuito de trituración.

2.2 Molienda

El circuito de molienda inicia con 4 alimentadores de cadena cuya descarga es transportada por medio de una banda para alimentar al molino SAG 28'X12', la banda transporta una carga fresca de alrededor de 430 TPH con una humedad de 2%, la descarga del molino es clasificada en una criba vibratoria cuyos módulos tienen aberturas rectangulares de 1"X1/4", los gruesos retornan al molino con ayuda de 2 bandas transportadoras y 1 banda de cangilones, los finos de la criba son bombeados a un distribuidor para ser clasificados en los hidrociclones del molino SAG. El sistema de hidrociclones consta de 2 baterías, una es Stan-By y la otra se encuentra operando, con 4 hidrociclones cada una con su propio distribuidor que alimenta a cada hidrociclón. La descarga de los hidrociclones, es decir los gruesos, son alimentados al molino remolador, y los finos son pasados por una criba cuya principal función es retirar restos de basura que se encuentren en la pulpa. El molino remolador es el molino de bolas de 18'X31.5' y opera en un circuito cerrado con ayuda de sus propios hidrociclones, que al igual cuenta con dos baterías con 8 hidrociclones cada una, los finos de estos se mezclan con los finos del molino SAG y de igual manera pasan por la criba de basura y al final son alimentados al espesador de cabeza donde se obtiene una solución rica, que es enviada al proceso Merrill-Crowe, y pulpa que se envía a la agitación. En la tabla 1 e imagen 5 se representa el balance de materia del circuito de molienda.

Tabla 1. Balance de agua y pulpa del circuito de molienda.

Flujo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
% Sólidos	98	69	98	62	59	29	77	75	60	42	75	39
Relación Liq/Sol	0.02	0.45	0.02	0.62	0.69	2.45	0.30	0.33	0.67	1.38	0.33	1.55
G.E. de pulpa	2.66	1.78	2.66	1.64	1.601	1.23	1.96	1.91	1.62	1.36	1.91	1.33
Sólidos, tph	427	435	8	427	427	79	348	1095	1095	348	746	427
Agua, tph o m ³ /hr	8.7	195.3	0.2	266.7	296.7	192.7	104.0	364.9	729.8	481.0	248.8	661.7
Pulpa, tph	435.7	630.0	7.9	693.7	723.7	271.4	452.3	1459.5	1824.4	829.3	995.1	1088.7
Sólidos, m ³ /hr	155.3	158.1	2.8	155.3	155.3	28.6	126.7	398.1	398.1	126.7	271.4	155.3
Pulpa, m ³ /hr	164.0	353.4	3.0	421.9	452.0	221.3	230.7	762.9	1127.8	607.6	520.2	817.0

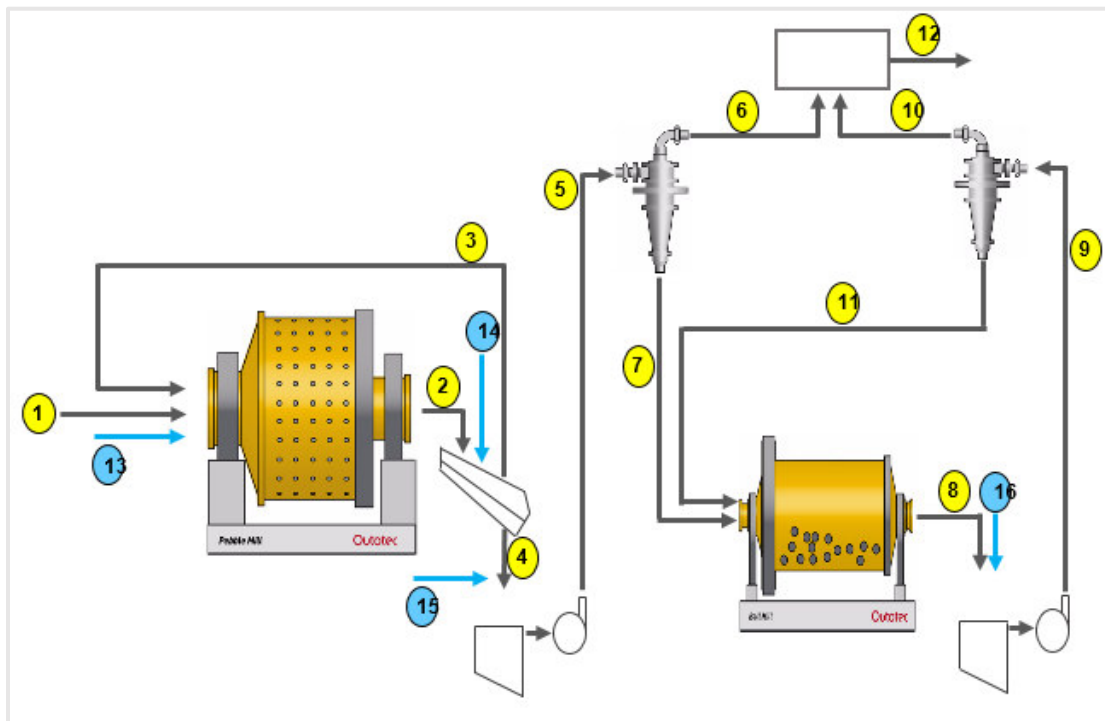


Imagen 5. Circuito de molienda, PLD 2. Fuente: Lab. Metalúrgico. Ing. Valentín Cedillo

Anteriormente, el circuito cerrado del molino remolador contaba con un proceso de concentración gravimétrica, en el cajón de descarga del molino una bomba alimenta pulpa a un concentrador Knelson Modelo KC-QS48, el concentrado de este equipo es alimentado al proceso ILR (Rector de alta intensidad) y la cola es retornada al molino remolador.

2.3 ILR

Al proceso ILR se alimenta el concentrado de los equipos Knelson con altos contenidos de oro, este concentrado se expone a condiciones extremas de lixiviación como son 18,000 ppm de cianuro de sodio (NaCN) y además se le adiciona oxígeno para favorecer la velocidad de reacción, la solución obtenida es una solución rica en contenidos de Au.

2.4 Reactores

La pulpa del bajo flujo proveniente del espesador de cabeza es alimentada al proceso de agitación que consta de 7 reactores con una capacidad de 2680 m³ cada uno, brindando un tiempo de agitación de 48-50 horas; los reactores cuentan con un sistema de agitación mecánico que permite mantener las partículas en suspensión para disolver los contenidos de oro presentes en el mineral, la solución de los reactores cuenta con una concentración de NaCN de 300 ppm además de la inyección de oxígeno líquido que favorece la velocidad de lixiviación. Los reactores se disponen de manera escalonada para favorecer la transferencia de pulpa por gravedad. En la tabla 2 se muestran las condiciones monitoreadas del mineral en el proceso de agitación y en la imagen 6 se encuentra el sistema de reactores de la PLD 2.

Tabla 2. Condiciones monitoreadas del mineral en el circuito de lixiviación.

Alimentación Pulpa	m ³ /Hr
% Sólidos	%
NaCN ppm	[NaCN] ppm
Oxígeno	[O ₂ disuelto en solución]
Concentración solución	[Au] ppm
pH	10.5<pH<11.7



Imagen 6. Reactores con agitación para el proceso de lixiviación.

2.5 Lavado contra corriente.

En el sistema de lavado contra corriente, como su nombre lo dice, se busca lavar el mineral para recuperar la mayor cantidad posible de Au en la solución de la pulpa, para esto se cuenta con 5 lavadores en serie donde la solución y la pulpa se alimentan en sentido opuesto, entre cada lavador se encuentra un Oktop (nombre que pone Outotec a este producto que es un agitador/mezclador) que ayuda a tener una alimentación más homogénea al lavador además de favorecer el lavado de la pulpa. Al igual que los reactores, los lavadores también se disponen de manera escalonada para la transferencia de la solución de lavado y bombear únicamente la pulpa de un lavador a otro, la solución se transporta sin necesidad de una bomba. La solución estéril proveniente de la planta Merrill es alimentada al quinto lavador de manera que se realice un lavado de la pulpa y se arrastren los valores en solución hacia el lavador siguiente y así sucesivamente hasta llegar al primer lavador como solución de proceso o semi-rica, la pulpa de los reactores es alimentada al primer lavador terminando en el quinto como colas del proceso las cuales son enviadas al depósito de jales con ayuda de sistema de bombas de desplazamiento. En cada lavador se monitorea lo siguiente:

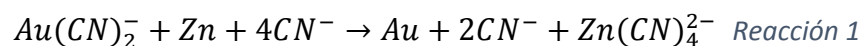
- Turbidez (NTU)
- pH
- Masa de cama (Cantidad de sólidos en la zona de compresión)
- Metros de clarificación
- Torque del motor



Imagen 7. Plantas de lixiviación dinámica, PLD 1 a la derecha y PLD2 del lado izquierdo, en el centro el sistema de lavado contra corriente, en los costados los reactores, en el fondo la zona de trituración seguida de los domos del stock de finos y las naves del circuito de molienda.

2.6 Proceso Merrill-Crowe

La solución rica obtenida del espesador primario es enviada a la planta Merrill-Crowe cuyo objetivo es obtener un precipitado con alto contenido de Au a partir de la solución rica, para esto primero se debe de tener una solución lo más clarificada posible, para ello se cuenta con un cono de sedimentación denominado Hooper y filtros de discos, el siguiente paso es desoxigenar la solución con ayuda de la torre desoxigenadora, en este punto la solución está lista para adicionar el zinc en polvo junto con tierra diatomita y precipitar los contenidos de metales preciosos en la solución mediante la reacción 1.



El producto que se obtiene es una solución turbia con precipitado de oro la cual es alimentada a los filtros prensa donde son retenidos los sólidos que es la parte de

interés en este caso. El producto retenido en los filtros se envía al proceso de fundición donde se obtienen barras de doré.

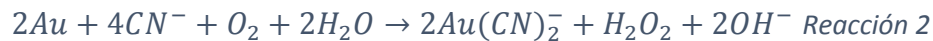
2.7 Depósito de jales.

El depósito de jales recibe las colas del proceso de ambas plantas a través de 5 líneas, dos de la PLD 1 y 3 líneas de la PLD 2. Las colas que se envían cuentan con un porcentaje de solución considerable, además de bajos contenidos de oro por ello debe ser recuperada. Para esto, la presa cuenta con diferentes válvulas que permite distribuir de manera controlada la pulpa que se deposita para obtener una topografía en el depósito que permita escurrir la solución a una zona específica, la diferencia de gravedad específica entre los sólidos y la solución permite una separación de manera natural, así se crea una especie de laguna dentro del depósito, un sistema de bombeo ayuda a enviar la solución para utilizarla nuevamente en el proceso. Como medida de protección al medio ambiente y proceso normativo, el depósito de jales se construye sobre un terreno preparado y recubierto con un polietileno de alta densidad (Liner) para impedir filtraciones y contaminación de cuerpos de agua subterránea, para vigilar la estabilidad del bordo de contención se tiene un sistema de radar que ayuda en la detección de desplazamiento de terreno, también se cuenta con testigos piezométricos para detectar movimientos del suelo y levantamientos topográficos de rutina como medida de control. Con respecto al monitoreo de cuerpos de agua subterráneos se cuenta con pozos cerca para monitorear concentraciones de agentes contaminantes.

Antecedentes de la lixiviación.

El nacimiento de la hidrometalurgia moderna comenzó en el año de 1887 cuando fueron establecidos dos importantes procesos, el primero, el proceso de lixiviación para tratar menas de oro y el segundo el proceso Bayer para la producción de alúmina (Habashi, 2005). La cianuración es parte del proceso de beneficio de metales preciosos, su objetivo es disolver los contenidos de estos, con una solución cianurada y alcalinizada, para pasar de una solución estéril a una solución rica en contenidos de estos metales, es uno de los métodos más utilizados para la extracción de oro y plata (Nava-Alonso, Elorza-Rodríguez, Uribe-Salas, & Pérez-Garibay, 2007) esto debido a su simplicidad y bajo costo. Para llevar a cabo la

cianuración el mineral es reducido hasta tamaños micrométricos, se pone en agitación en tanques con ayuda de una propela y un sistema mecánico. El mineral en la agitación cuenta con un porcentaje de sólidos entre un 50-55%, un pH básico(>10.5) y una concentración de cianuro según las características del mineral. La reacción más comúnmente usada para la disolución de oro en una solución cianurada en la reacción de Elsner (Deschênes, 2016):



Algunos estudios han encontrado que, en concentraciones bajas de cianuro, la tasa de disolución se encuentra en función del cianuro y en concentraciones altas de este, la tasa de disolución se encuentra en función del oxígeno. Además, existe una proporción directa entre la concentración del cianuro y la tasa de disolución, dicha proporción es lineal (Deschênes, 2016). En el año de 1947, experimentos realizados por P. F. Thompson demostraron claramente que el proceso de cianuración del oro es un fenómeno de corrosión, además, combinado sus resultados experimentales con datos de (DEITZ & HALPERN, 1953), imagen 8, se llegó a la siguiente ecuación

$$\text{Tasa de disolucion} = 2 \frac{AD_{O_2}}{\delta} [O_2] = k[O_2] \text{ Ecuación 1}$$

Donde:

- A= es el área superficial del metal en contacto con la solución
- D_{O_2} = coeficiente de difusión del oxígeno disuelto
- δ = el espesor de la capa límite

Esto también coincide con los resultados encontrados por Deitz y Halpern's reafirmando el hecho que a concentraciones altas de cianuro la tasa de disolución depende del oxígeno (Habashi, ONE HUNDRED YEARS OF CYANIDATION, 1987).

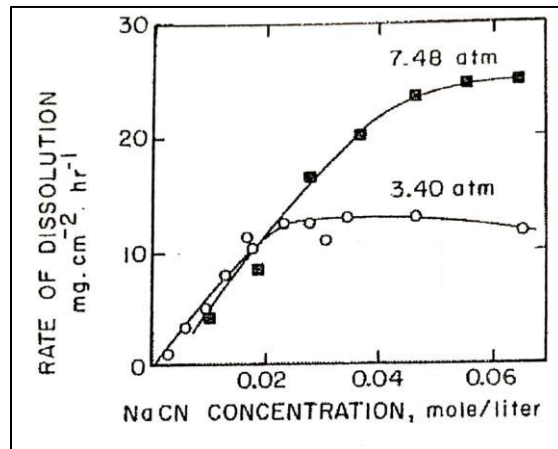


Imagen 8. Resultados del primer estudio del efecto de la concentración del cianuro y presión del oxígeno en la tasa de disolución de plata a 24°C. (DEITZ & HALPERN, 1953)

Algunas sustancias ayudan a acelerar la tasa de disolución del oro como los son: plomo, sales de mercurio, bismuto y iones de talio (Guzman, 2000), la adición de sales de plomo es una práctica usada por más de 60 años, y sobre todo por la alta toxicidad que presentan los otros elementos haciendo a las sales de plomo la opción más viable. Por el contrario, los factores que afectan la lixiviación del oro son: tamaño de grano, efectos galvánicos, velocidad de agitación, temperatura y el efecto preg-robbing que se presenta en minerales con materia carbonosa. (Deschênes, 2016).

Capítulo 3.

3.1 Planteamiento del problema.

En el mes de abril del 2020, como medida sanitaria a causa de la pandemia, fue necesario operar todas las áreas con el menor personal posible, y fue así como se optó por el paro operativo de los concentradores Knelson y el proceso ILR. Después un año de dicho paro operativo, no se ha percibido un cambio en la recuperación del metal de interés, como se observa en la imagen 9 donde se representa la eficiencia de lixiviación en función de los meses transcurridos durante la contingencia, aunado a esto, no se ha detectado presencia de oro grueso en las colas de las plantas que esté relacionado con el descarte del proceso de gravimetría. Al no ser identificada una diferencia entre la eficiencia del proceso previo al paro y posterior a este, surge la idea que los reactores cuentan con el tiempo de residencia necesario para lixiviar las partículas de oro.

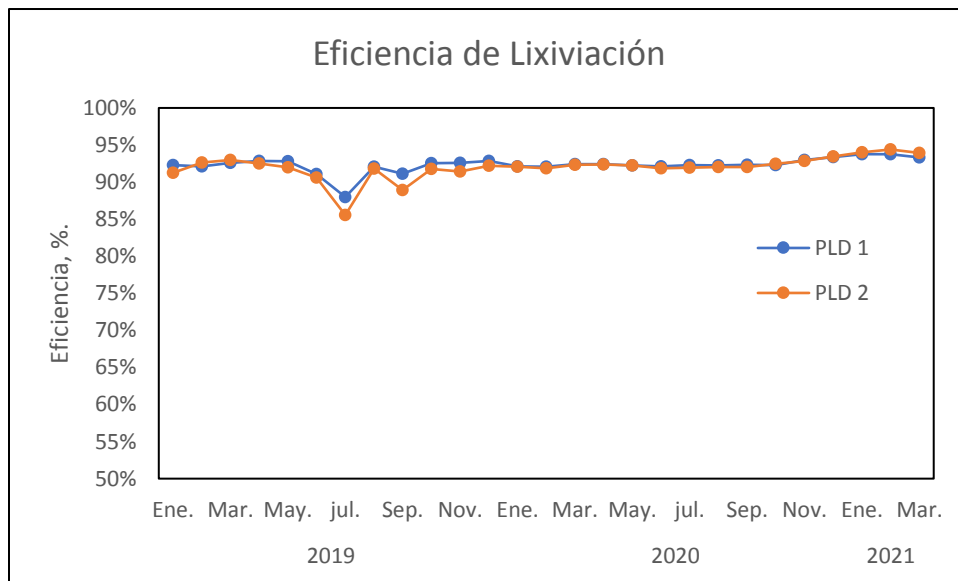


Imagen 9. Eficiencia de lixiviación mensual de ambas plantas, de enero del 2019 a la fecha.
Fuente: Laboratorio Metalúrgico.

Es así como nace la necesidad de realizar un estudio a fondo y evaluar la diferencia operacional con y sin el proceso gravimétrico para lo cual se recurrirá al empleo de métodos estadísticos y pruebas metalúrgicas que ayuden en la toma de decisiones en cuanto a omitir completamente este proceso.

3.2 Hipótesis

El circuito de lixiviación de la planta dinámica cuenta con el tiempo de residencia necesario para disolver las partículas de oro grueso que se han identificado en los depósitos minerales.

3.3 Objetivo general

Realizar una evaluación estadística de la eficiencia de lixiviación antes y después del paro operativo del proceso gravimétrico, así como analizar con pruebas metalúrgicas las colas del proceso para descartar presencia de oro grueso.

3.4 Objetivos específicos

- Realizar un muestro de las colas del proceso para análisis de oro grueso, especies minerales presentes y caracterización mineralógica.
- Realizar un muestreo del circuito de lixiviación de PLD 2 para realizar un análisis valorado y evaluar la cinética de lixiviación en este.
- Comparar mediante un estudio de análisis estadístico las eficiencias de lixiviación antes y después del paro operativo de los equipos de concentración gravimétrica y evaluar el impacto de este cambio en el proceso.

3.5 Justificación

La concentración gravimétrica de oro grueso antes del proceso de cianuración en tanques agitados es una práctica común en muchas minas y ha mostrado incrementar la recuperación global en muchos casos, sin embargo, al ser un proceso más en el circuito es evidente el incremento de costos en reactivos, equipos, energía y personal de operación, por ello es importante evaluar la aportación de este proceso a la recuperación global del metal de interés. En las plantas de lixiviación dinámica de la unidad La Herradura no se ha identificado un impacto negativo en la eficiencia del proceso tras más de un año que se dejó fuera de operación el proceso gravimétrico. Al descartar el proceso de gravimetría pone a disposición nuevos equipos y personal operativo para áreas distintas, se reduce el gasto de reactivo indirectamente y el consumo de energía, todo esto sin afectar la productividad de la planta. De igual manera, se disminuye el riesgo de un robo por la generación de concentrados gravimétricos y soluciones de alta concentración de Au.

Capítulo 4. Metodología.

4.1 Muestras Minerales

Las muestras que se usaron en el estudio son las siguientes

→ 2 compósitos quincenales de las colas de proceso de ambas plantas. Los compósitos se realizaron y prepararon de la siguiente manera.

1. Tres días de muestreo a la semana (lunes, martes y miércoles) haciendo los cortes 3 veces al día (Mañana, medio día y tarde).
2. Se separan las muestras por día, se lavan, se filtran, se secan y se pesan.
3. Para tomar la cantidad deseada se realiza una proporción en peso de cada muestra en base al peso total, es decir, que la muestra tomada represente la ley media de los días muestreados.

→ Muestreo de reactores

Se realizó el muestreo de la alimentación del espesador primario, los 7 reactores y el bajo flujo del lavador contra corriente #5 (Tanque de Balance, TB), en dos días diferentes de la siguiente manera.

1. En el caso de los reactores se muestreo un punto cercano al derrame de cada uno con ayuda de un cortador convencional.
2. Para el espesador primario y el bajo flujo del quinto lavador se realizó el corte con un cortador manual.
3. Se realizaron 5 cortes cada 30 minutos.
4. Las muestras se lavaron, se filtraron, se secaron y se pesaron.
5. Se prepararon las muestras para ensaye.
6. Además, se tomaron 2 kg de la muestra Alimentación al espesador primario y TB, para análisis granulométrico y ensaye valorado.

4.2 Caracterización mineralógica

Para la caracterización mineralógica se utilizaron dos muestras, Colas PLD 1 y Colas PLD 2, únicamente del compósito 1 de los dos realizados. La caracterización consistió en realizar un análisis modal mediante microscopía electrónica de barrido, el cual consta en la adquisición de imágenes con electrones retrodispersados para

delinear las partículas minerales para su posterior identificación a través de análisis con rayos X. Las muestras fueron analizadas en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDT), para esto cada muestra fue tamizada en dos fracciones: +200 y -200# para facilitar su análisis en el microscopio. Mediante este estudio se buscó identificar principalmente las partículas portadoras de Au y Ag y su relación textural con la ganga.

4.3 Determinación de Oro Grueso

Para la inspección de oro grueso se utilizaron las muestras de colas de los dos compósitos quincenales de cada planta. El proceso de determinación de Oro Grueso se realizó de dos formas: 1) análisis químico valorado utilizando las mallas 70, 100, 140, 200, 230 y 325 y 2) utilizando la técnica de determinación de Oro Grueso la cual consiste en comparar las leyes de Au entre las fracciones +150 y -150 de 1 kg de muestra pulverizada.

A continuación, se describe a detalle la preparación de las muestras para el análisis de oro grueso:

a) Análisis granulométrico valorado

1. Se toman 2 kg de mineral seco y se desgruma completamente.
2. Se hace un lavado del material en la malla 325 colectando las lamas (material fino).
3. El material grueso se tamizó durante 8 minutos en la serie de mallas 70, 100, 140, 200 230, y 325.
4. Una vez realizado el análisis granulométrico se pulverizan únicamente los contenidos de las mallas 70, 100 y 140 y se envía cada fracción a análisis químico por Au.
5. Se realiza el balance metalúrgico de las fracciones y se determina la distribución de Au por tamaño de partícula.

b) Para el ensayo de oro grueso se realiza lo siguiente:

1. Se toma un 1 kg del compósito
2. Se pulveriza durante 2 min.

3. Pasar la muestra por la malla 150. La cantidad del material +150 deben de ser 50 g.
4. Se envían a ensaye las dos fracciones, si el resultado en la ley de Oro de la fracción +150 es cinco veces mayor al obtenido en la fracción -150, se determina la presencia de oro grueso en la muestra analizada.
5. Las muestras se analizaron en el laboratorio químico de la planta y en un laboratorio externo, esto último únicamente para el compósito 2.

4.4 Muestreo de reactores.

Como se describe en el apartado 2-5, el flujo de la pulpa en el circuito de lixiviación comienza con la alimentación al espesador primario, después a los reactores 1-7 únicamente por fuerza de gravedad, la pulpa se lava en 5 lavadores contra corriente y termina en el tanque de balance para ser enviada al depósito de jales con ayuda de las bombas de desplazamiento. Para evaluar el porcentaje de lixiviación en los reactores se procede a realizar el muestreo cada 30 minutos por un periodo de 2 ½ horas. La muestra recolectada se preparará como se describe en el apartado 4.1.

4.5 Análisis estadístico.

El laboratorio químico de la unidad realiza un muestreo constante de las plantas para monitorear la eficiencia de lixiviación reportando datos diarios del proceso. Es así como se realizó un análisis estadístico haciendo una comparación de medias de eficiencia de lixiviación antes y después del paro de los concentradores Knelson, cabe mencionar que los concentradores gravimétricos operaban durante ciertas horas al día, es por ello que se compara únicamente los meses donde se cuenta con una mayor cantidad de horas en operación como se observa en las tablas 3 y

4

Tabla 3. Meses donde el proceso gravimétrico tuvo mayor número de horas en operación contra los meses comparados después de paro operativo en PLD 1.

PLD 1					
Antes			después		
Mes	Media	SD	Mes	Media	SD
Ene. 2019	92.3	0.006	Ene. 2021	93.97	0.01
Mar. 2019	92.75	0.006	Mar. 2021	93.35	0.01
Abr. 2019	92.71	0.002	Abr. 2021	92.9	0.004
Jun. 2019	91.93	0.009	Jun. 2020	92.25	0.005
Jul. 2019	91.25	0.011	Jul. 2020	92.27	0.001
Sep. 2019	91.53	0.015	Sep. 2020	92.19	0.001
Nov. 2019	92.47	0.002	Nov. 2020	92.74	0.003
Feb. 2020	92.3	0.0009	Feb. 2020	92.94	0.005

Tabla 4. Meses donde el proceso gravimétrico tuvo mayor número de horas en operación contra los meses comparados después de paro operativo en PLD 2.

PLD 2					
Antes			Después		
Mes	Media	SD	Mes	Media	SD
May. 2019	92.06	0.008	Jul. 2020	91.88	0.006
Jun. 2019	91.36	0.01	Ago. 2020	92.08	0.001
Oct. 2019	92.3	0.009	Oct. 2020	92.6	0.006
Nov. 2019	91.48	0.01	Nov. 2020	92.83	0.003
Dic. 2019	92.07	0.007	Dic. 2020	94.32	0.016
Ene. 2020	92.14	0.003	Ene. 2021	94.28	0.012
Feb. 2020	92.05	0.004	Feb. 2021	94.07	0.013

Las pruebas estadísticas realizadas fueron:

- Análisis ANOVA
- Prueba de Tukey
- Prueba de Fisher
- Prueba de Dunnett
- Prueba de HSU

Capítulo 5. Resultados

5.1 Pruebas para identificar oro grueso.

En la imagen 10 se presentan las curvas de los análisis granulométricos de los compósitos realizados de las colas de proceso, además, en la tabla 2 se muestra el valor del P₈₀ de cada compósito teniendo un resultado similar en ambas plantas cerca de 120 micrómetros.

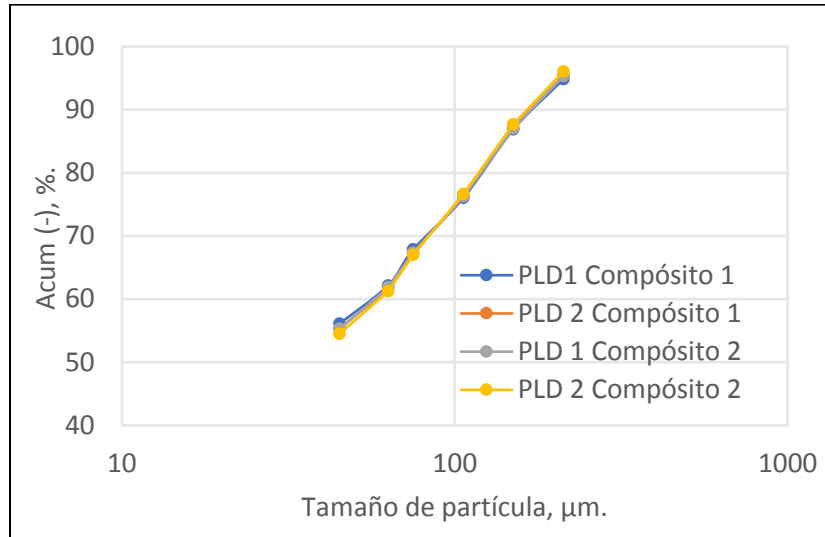


Imagen 10. Análisis granulométrico de los compósitos quincenales 1 y 2 en ambas plantas

Tabla 5. P₈₀ de los compósitos de ambas plantas

	Compósito 1	Compósito 2
PLD 1	122.11 µm.	125.30 µm.
PLD 2	121.23 µm.	119.40 µm.

En la tabla 4 y 5 se muestra los resultados de los ensayos valorados del compósito 2 en las plantas 1 y 2, respectivamente, encontrando que cerca del 52% del contenido de Au está en la fracción más fina (-45 micrómetros), tomando en cuenta que esta fracción es la de más proporción en peso. Como se puede apreciar en estas tablas, el resto del Au se encuentra distribuido homogéneamente en el resto de las fracciones de tamaño. Este comportamiento es similar en las 4 muestras de colas analizadas. El análisis valorado del compósito 1 se encuentran en el anexo de este documento.

Tabla 6. Análisis valorado del compósito 2 en PLD 1.

Malla		Tamaño de partícula, μm .	Peso, %.	Ley, g/Ton	Contenido Au, mg	Distribución, %
70		212	5.06	0.17	0.02	6.55
100	-70	150	8.73	0.15	0.03	10.01
140	-100	106	11.06	0.12	0.03	10.07
200	-140	75	9.13	0.11	0.02	7.88
230	-200	63	5.75	0.11	0.01	5.15
325	-230	45	6.78	0.12	0.02	6.17
	-325		53.49	0.13	0.14	54.16
Cabeza calculada.				0.13		

Tabla 7. Análisis valorado del compósito 2 en PLD 2

Mallas		Tamaño de partícula, μm .	Peso, %	Ley, g/Ton	Contenido Au, mg	Distribución, %
70		212	3.92	0.066	0.01	5.54
100	-70	150	8.37	0.058	0.01	10.39
140	-100	106	11.09	0.048	0.01	11.40
200	-140	75	9.64	0.047	0.01	9.70
230	-200	63	5.75	0.044	0.01	5.42
325	-230	45	6.76	0.043	0.01	6.22
	-325		54.47	0.044	0.05	51.32
Cabeza calculada.				0.05		

En la tabla 8 se encuentra el resultado de las pruebas para determinar oro grueso de los compósitos 1 y 2 de ambas plantas de acuerdo con la técnica para la determinación de Au grueso que se sigue en el laboratorio metalúrgico de unidad La Herradura. Es importante mencionar que la muestra se pulverizó como se describe en la metodología. Además, en las dos últimas filas de la tabla 6 se encuentra el resultado de pruebas enviadas a un laboratorio externo únicamente del compósito 2 de las dos plantas con la finalidad de tener mayor confiabilidad en los ensayos de Au. Ninguno de los compósitos reportó presencia de Au grueso, la ley ponderada del compósito 2 en cada planta es similar a la ley reportada por el laboratorio externo.

Tabla 8. Resultado de pruebas para determinar oro grueso.

Planta	Compósito	Peso, g			Ley de Au, g/ton		Ley Ponderada Au (g/ton)	Relación Au (+150/-150)	Oro Grueso
		+150	-150	Total	+150	-150			
PLD 1	Compósito 1	64.17	934	998	0.142	0.240	0.234	0.59	NO
	Compósito 2	56	951	1,007	0.191	0.199	0.198	0.96	NO
PLD 2	Compósito 1	50.92	948	999	0.121	0.140	0.139	0.86	NO
	Compósito 2	60.91	933	994	0.052	0.059	0.059	0.88	NO
Externo	PLD 1	49.95	960	1,010	0.240	0.172	0.175	1.40	NO
	PLD 2	50.34	960	1,010	0.200	0.066	0.073	3.03	NO

Comparando los resultados de las tablas 6 y 7 con los de la tabla 8, encontramos que en las dos primeras el contenido de Au sumado de las fracciones +70, +100 y +140 es alrededor del 25%, comparado con el 4% de la fracción gruesa que se tiene en la tabla 5 dando indicio que posiblemente el Au que se encuentra en las fracciones gruesas está ocluido por lo cual se restringe el contacto con la solución cianurada impidiendo así su lixiviación, datos que coinciden con la información de la tabla 8 (mineral pulverizado) de que el Au no es grueso.

Debido a lo encontrado en las tablas anteriores se decidió enviar muestras de las colas de proceso (compósito 1) de cada planta para realizar un análisis de caracterización mineralógico y determinar la relación textural que guardan las especies de Au.

5.2 Caracterización mineralógica

Se enviaron muestras de las colas de proceso de cada planta al CITD (Centro de investigación y desarrollo tecnológico) a las cuales se les realizó un análisis modal mediante microscopia electrónica de barrido. En la tabla 9 se enlistan los minerales identificados, incluyendo la composición mineralógica (en % peso). Los sulfuros de valor son galena, esfalerita y calcopirita que presentan muy baja concentración, menor a 0.1% en peso. Se detectaron tres especies de plata: plata nativa, estromeyerita y clorargirita, las cuales son inferiores a 0.01%. Además, se identificaron otras especies de plomo, hinsdalita, coronadita y fosfohedyfana, sumando entre ellas menos de 0.1%. Cabe mencionar que no se detectaron especies de oro.

Tabla 9. Especies identificadas por microscopía electrónica de barrido

Grupo	Mineral	Densidad (g/cm3)	Fórmula	Composición Mineralógica (% Peso)	
				PLD 2	PLD 1
Sulfuros	Galena	7.4	PbS	0.01	<0.01
	Esfalerita	4.0	(Zn,Fe)S	<0.01	0.01
	Calcopirita	4.2	CuFeS ₂	0.00	0.00
	Pirita	5.0	FeS ₂	0.28	0.38
	Pirrotita	4.6	FeS	0.01	<0.01
Especies de plata	Plata Nativa	10.5	Ag	0.000	0.000
	Estromeyerita	6.2	AgCuS	<0.001	0.001
	Clorargirita	5.5	AgCl	0.000	0.000
Otros Cu	Cu Nativo	8.9	Cu	<0.01	0.00
Otros Pb	Hinsdalita	4.6	(Pb,Sr)Al ₃ (PO ₄ SO ₄)(OH,H ₂ O) ₆	0.04	0.07
	Coronadita	5.4	Pb(Mn ⁴⁺ ,Mn ²⁺) ₈ O ₁₆	0.01	0.01
	Fosfohedryfana	5.9	Ca ₂ Pb ₃ (PO ₄) ₃ Cl	<0.01	0.00
Gangas	Cuarzo	2.7	SiO ₂	46.43	46.04
	Albita	2.6	NaAlSi ₃ O ₈	19.42	19.31
	Ortoclasa	2.6	KAlSi ₃ O ₈	7.70	9.46
	Muscovita	2.8	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	14.60	13.40
	Ankerita	3.1	Ca(Mg,Fe)(CO ₃) ₂	3.69	3.17
	Ox. Fe	5.3	Fe _x O _y	0.90	1.02
	Actinolita	3.0	Ca ₂ (Mg,Fe ²⁺) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	0.69	0.76
	Biotita	3.1	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	0.75	0.78
	Acero	7.8	-----	0.18	0.13
	Clorita	2.4	(Mg ₃ ,Fe ₂)Al(AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₈	1.38	1.50
	Calcita	2.7	Ca(CO ₃)	1.67	1.78
	Epidota	3.4	Ca ₂ Fe ³⁺ Al ₂ (Si ₂ O ₇)(SiO ₄)O(OH)	0.67	0.69
	Rutilo	4.3	TiO ₂	0.12	0.17
	Ilmenita	4.7	Fe ²⁺ TiO ₃	0.05	0.05
	Dolomita	2.8	CaMg(CO ₃) ₂	0.43	0.33
	Apatito	3.1	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	0.21	0.24
	Diópsido	3.4	CaMgSi ₂ O ₆	0.31	0.17
	Andradita	3.9	Ca ₃ Fe ₂ Al(SiO ₄) ₃	0.41	0.49
	Zircón	4.6	ZrSiO ₄	0.05	0.03
Monazita	5.1	Ce _{0.5} La _{0.25} Nd _{0.2} Th _{0.05} (PO ₄)	0.02	0.01	

Los resultados de la PLD1 y PLD2 muestran composiciones muy similares entre sí, lo que lleva a la afirmación que se alimenta un mineral homogéneo en ambas plantas. Se identificaron especies minerales de sulfuros en cantidades muy bajas, lo cual descarta presencia de Au en solución sólida, sobre todo en la pirita. La plata

nativa no está en concentración suficientes para ser cuantificada por este método. En cuanto a los minerales de ganga predomina el cuarzo con un 46% en ambas muestras, además de albita, muscovita y ortoclasas, lo que hace suponer que los minerales de Au podrían estar ocluidos en estos minerales. No se lograron identificar partículas de Au libres ni ocluidas en la muestra, sin embargo, fue posible identificar dos partículas libres de Ag nativa en cada muestra como se aprecia en la imagen 11 a) y b).

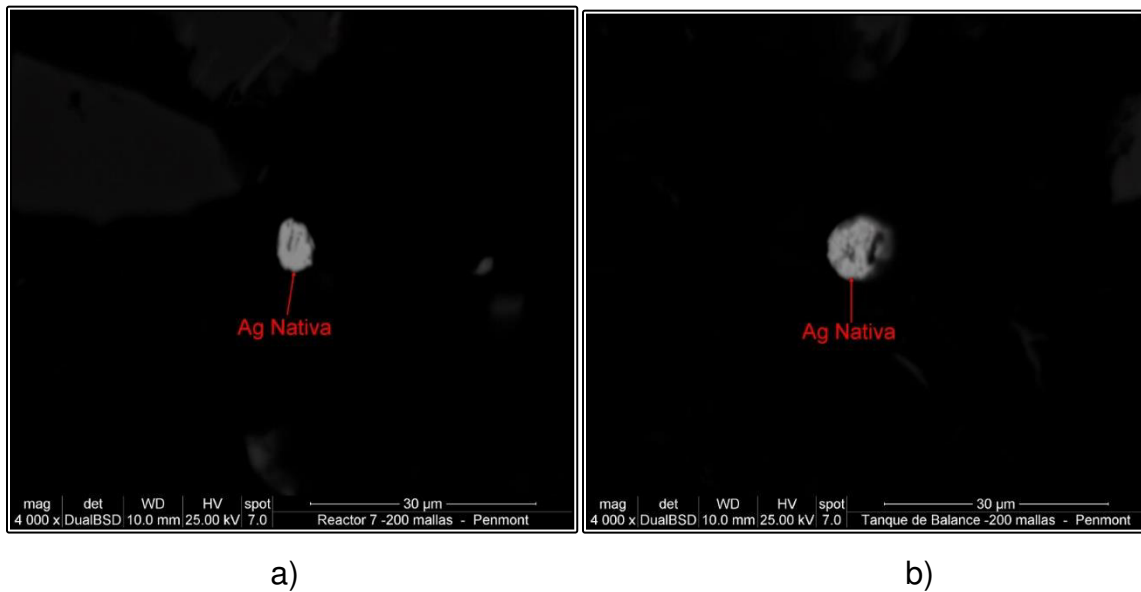


Imagen 11. Partículas de plata nativa libre, fracción -200 en ambas imágenes. a) Cola de proceso PLD. 1 b) Cola de proceso PLD 2.

5.3 Muestreo de planta.

Ya que en el análisis mineralógico no se encontraron especies de Au, se decidió hacer el muestro de los reactores para tener un contexto de lo que está pasando en el circuito de lixiviación en cuanto a contenidos de Au en cada reactor obteniendo los resultado de la imagen 12 se muestra la ley Au en función del desplazamiento de la pulpa durante el proceso de cianuración con la finalidad de reforzar la hipótesis de que el tiempo de residencia del mineral en los reactores es suficiente para disolver el Au grueso identificado en el yacimiento. La imagen muestra como primer punto la alimentación al espesador con una ley de 0.71, pasando por los reactores 1 al 7 y finalizando en el tanque de balance (TB) con una ley de 0.14, se puede

apreciar como la ley no disminuye gradualmente en cada reactor, esto se debe a la variación en la ley de cabeza, también debemos de tomar en cuenta la exposición del mineral con el cianuro desde el circuito de molienda. Realizando los cálculos observamos una diferencia del 83% de la ley entre el espesador primario y el reactor 1. La lixiviación alcanzada en esta fracción del circuito corresponde al 88% de la recuperación deseada considerando una cabeza promedio de 1 g/ton, reforzando la hipótesis de que se cuenta con tiempo de residencia adecuado para la lixiviación.

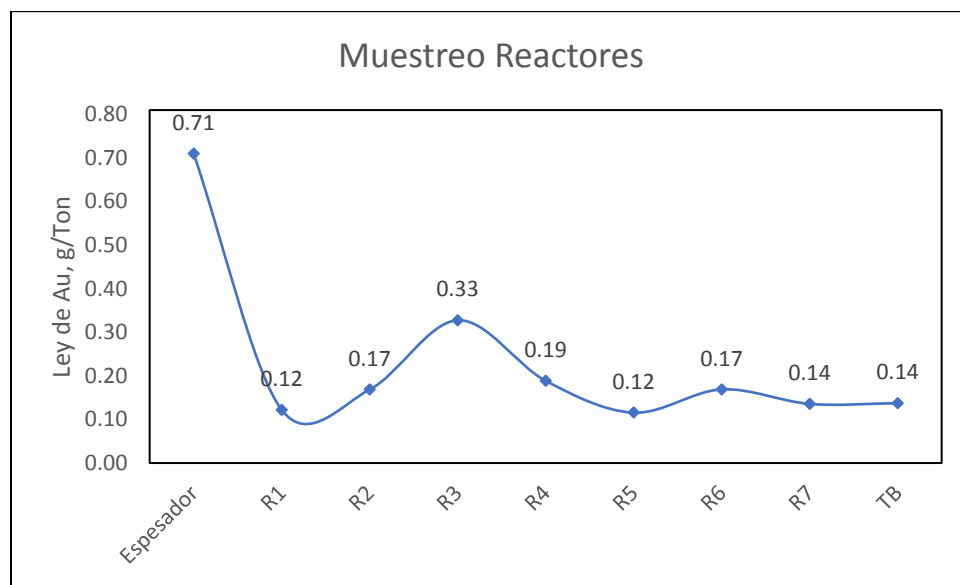


Imagen 12. Ley de sólidos en los reactores de PLD 2

Como complemento del muestreo de planta, se realizó un análisis por fracciones de tamaño de partícula a las muestras etiquetadas como Espesador y TB, con la finalidad de realizar una inspección al contenido de Au en cada fracción. Los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 10. Ensaye valorado del espesador primario y tanque de balance.

Malla		Tamaño	Peso		Ley Au, g/ton.		Contenido Au, mg.		Eficiencia %	
			Espesador	TB	Espesador	TB	Espesador	Cola		
+70		212	61.21	57.42	0.22	0.08	0.01	0.00	68.02	
+100	-70	150	170.02	138.28	0.25	0.08	0.04	0.01	74.11	
+140	-100	106	232.14	211.97	0.30	0.07	0.07	0.01	78.76	
+200	-140	75	189.91	188.35	0.30	0.07	0.06	0.01	78.25	
+230	-200	63	117.59	118.37	0.24	0.08	0.03	0.01	66.72	
+325	-230	45	123.93	126.97	0.49	0.07	0.06	0.01	84.61	
	-325		1105.2	1158.64	0.44	0.08	0.48	0.10	80.13	
					Cab. Ensy.	0.33	Cab. Calc.	0.38	0.08	79.17
					Cola Ensy.	0.11				

Como se puede apreciar, en las fracciones más finas se reportan los valores más altos mientras que en las fracciones gruesas se reportaron las menores eficiencias esto lleva a pensar que el Au en las fracciones gruesas no logra lixiviarse por que posiblemente se encuentra ocluido. Además, las cabezas de la imagen 12 y la tabla 10 no coinciden ya que las muestras fueron tomadas en diferentes días.

5.4 Análisis estadístico.

En la unidad minera se cuenta con una base de datos diarios donde se almacenan las horas de operación de algunos equipos, análisis químicos de muestreos, paros programados y balances metalúrgicos de los cuales se consideraron las horas de operación de los concentradores gravimétricos y las eficiencias de lixiviación. Para realizar este estudio estadístico y evaluar el efecto de los concentradores gravimétricos sobre la eficiencia de lixiviación de la planta se tomó en cuenta las horas de operación de los concentradores gravimétricos anteriores al paro operativo con la finalidad de establecer un periodo de operación representativo. En la imagen 13 se muestran las horas de operación de los concentradores Knelson antes del paro operativo de los equipos. Como se puede observar, las horas de operación no son constantes, es por ello por lo que se consideraron los meses con mayores horas de trabajo en cada planta.

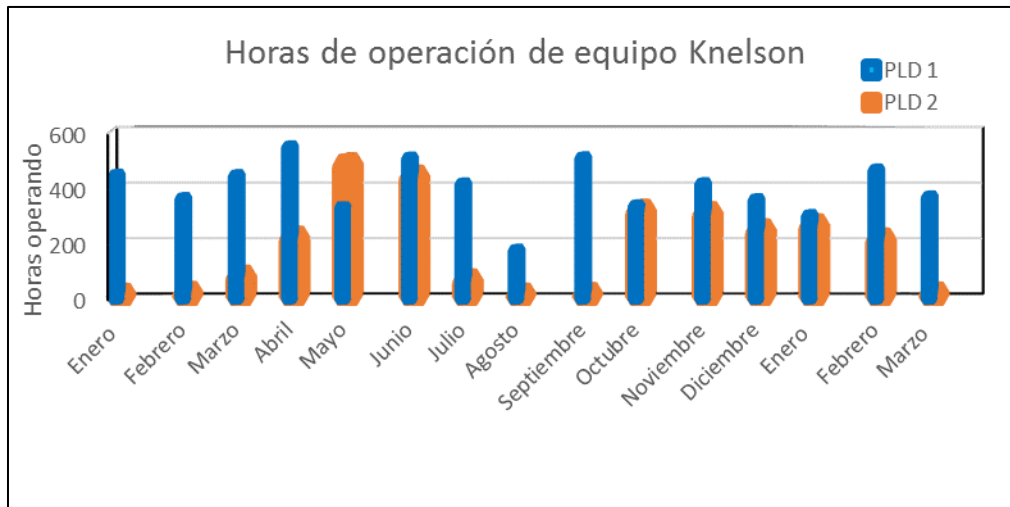


Imagen 13. Horas de operación mensual de los equipos de concentración gravimétrica en PLD 1 y 2.

5.4.1 Comparación del proceso de cianuración en presencia de los concentradores gravimétricos

A partir de la imagen 15 los meses que tomamos en cuenta para el análisis estadístico en la PLD 1 son los siguientes: enero, marzo, abril, junio, julio, septiembre, y noviembre del 2019, y por último febrero del 2020. Como primer paso se compararon estos meses para comprobar si existe igualdad de medias en cuanto a la eficiencia de lixiviación mensual reportada por el Laboratorio Metalúrgico de la Herradura. El análisis ANOVA de un solo factor arrojó los resultados que se aprecian en la imagen 14.

Método					
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales				
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales				
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$				
<i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i>					
Información del factor					
Factor	Niveles	Valores			
Factor	8	Ene. 2019, Mar. 2019, Abr. 2019, Jun. 2019, Jul. 2019, Sep. 2019, Nov. 2019, Feb. 2020			
Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	7	0.05487	0.007839	7.74	0.000
Error	222	0.22476	0.001012		
Total	229	0.27963			

Imagen 14. Resultados de análisis ANOVA para los meses con mayor número de horas en operación del concentrador gravimétrico en PLD 1.

Ya que el valor P es menor a 0.5 se rechaza la hipótesis nula de igualdad de media aceptando la hipótesis alterna concluyendo que existe una diferencia significativa en la media de los meses. Por tal motivo se decidió realizar las pruebas de Tukey, Fisher, Dunnett y Hsu que ayudan a identificar igualdad de medias en un grupo de muestras, en este caso identificar en cuales meses existe diferencia.

La imagen 15 muestra los resultados de la prueba de Tukey y Fisher, respectivamente encontrando en ambas que el único mes que presenta diferencia en la media es Julio 2019, como se observa en la imagen, es el único mes que no comparte una letra en común.

Para corroborar esta información la imagen 16 muestra el mismo resultado, pero ahora con las pruebas de Hsu y Dunnett, donde el mes de julio 2019 es el único con diferencia en la media, esto se puede apreciar ya que los intervalos del mes de julio son los únicos que no tocan la línea de confianza.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Abr. 2019	29	0.927796	A
Mar. 2019	30	0.92750	A
Nov. 2019	30	0.92644	A
Ene. 2019	29	0.92305	A
Feb. 2020	27	0.92144	A
Jun. 2019	29	0.91772	A
Sep. 2019	28	0.91141	A
Jul. 2019	28	0.8778	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Abr. 2019	29	0.927796	A
Mar. 2019	30	0.92750	A
Nov. 2019	30	0.92644	A
Ene. 2019	29	0.92305	A
Feb. 2020	27	0.92144	A
Jun. 2019	29	0.91772	A
Sep. 2019	28	0.91141	A
Jul. 2019	28	0.8778	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Imagen 15. Prueba de Tukey y Fisher, igualdad de media mensual de eficiencia de lixiviación, PLD

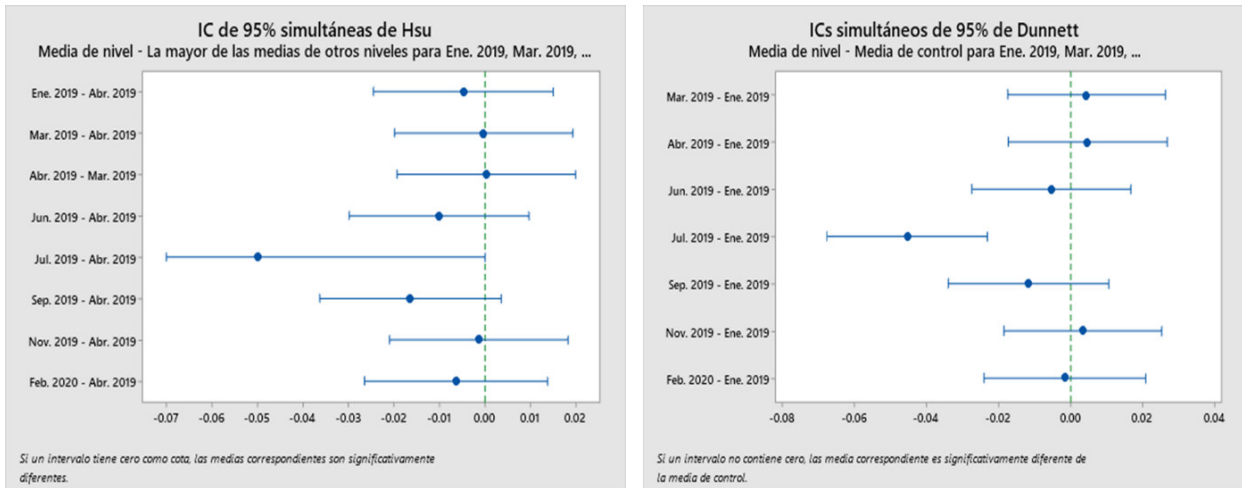


Imagen 16. Pruebas HSU y Dunnett para probar igualdad de medias mensuales de eficiencia de lixiviación, PLD 1.

Ahora, para el caso de la PLD 2 el mismo procedimiento se replicó en los meses con mayor cantidad de horas en operación del equipo de gravimetría que son los siguientes: mayo, junio octubre, noviembre y diciembre del 2019, además enero y febrero del 2020. El análisis ANOVA de igual manera rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas, imagen 17. Los resultados de las imágenes 18 y 19 mostraron diferencia en la prueba de Tukey, prueba de Fisher y prueba de HSU, esta diferencia para los meses de junio y noviembre únicamente, cuyas medias mensuales son las menores del grupo de meses. En el caso de la prueba de Dunnett no se reportó diferencia de medias en ningún mes, pero debemos considerar que 3 de las 4 pruebas si encontraron esta diferencia.

Método					
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales				
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales				
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$				
Filas no utilizadas	1				
<i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i>					
Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	6	0.002958	0.000493	3.89	0.001
Error	197	0.024952	0.000127		
Total	203	0.027909			

Imagen 17. Resultados de análisis ANOVA con grado de significancia de 0.05 y un solo factor, para los meses con mayor número de horas en operación del concentrador gravimétrico en PLD 2.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%				Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%			
Factor	N	Media	Agrupación	Factor	N	Media	Agrupación
Oct. 2019	30	0.92189	A	Oct. 2019	30	0.92189	A
Ene. 2020	26	0.920828	A B C	Ene. 2020	26	0.920828	A
Dic. 2019	31	0.92072	A B	Dic. 2019	31	0.92072	A
Feb. 2020	29	0.91855	A B C	Feb. 2020	29	0.91855	A
May. 2019	29	0.91626	A B C	May. 2019	29	0.91626	A B
Nov. 2019	29	0.91244	B C	Nov. 2019	29	0.91244	B
Jun. 2019	30	0.91187	C	Jun. 2019	30	0.91187	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Imagen 18. Prueba de Fisher, igualdad de medias mensuales de eficiencia de lixiviación PLD 2.

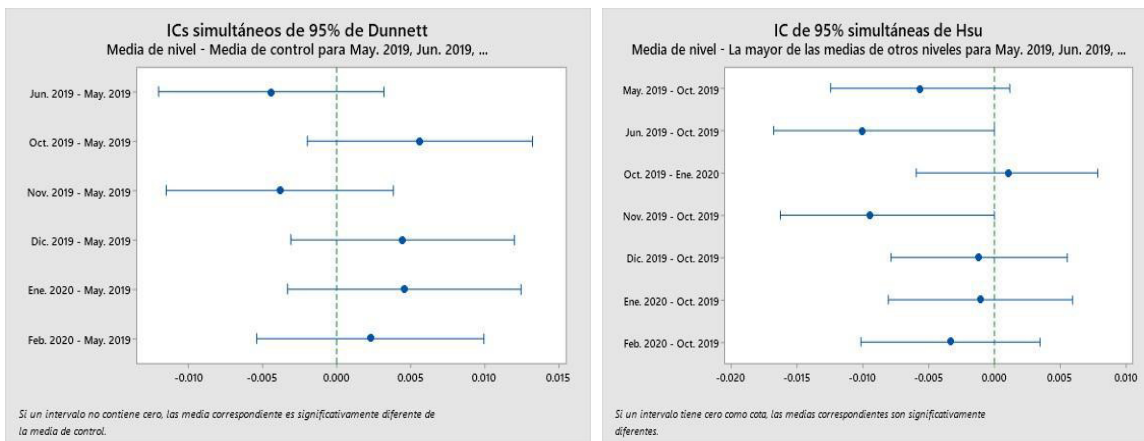


Imagen 19. Prueba de HSU, igualdad de medias mensuales de eficiencia de lixiviación, PLD 2.

Recordando que los meses analizados se eligieron de acuerdo con el mayor número de horas de operación del proceso gravimétrico en cada planta, encontrándose una coincidencia en los meses de junio y noviembre del 2019 y febrero del 2020. A partir de esto, se decide hacer una comparación de las dos plantas con el propósito de evaluar su eficiencia obteniendo los resultados que muestran en las imágenes 20 y 21.

Estadísticas descriptivas					Prueba		
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
PLD1 CON	86	0.92193	0.00987	0.0011	Hipótesis alterna	$H_2: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
PLD2 CON	84	0.91544	0.00924	0.0010	Valor T	GL	Valor p
					4.43	167	0.000

Imagen 20. Resultados de la prueba de comparación de medias de PLD 1 y 2, junio 2019, noviembre 2019 y febrero 2020.

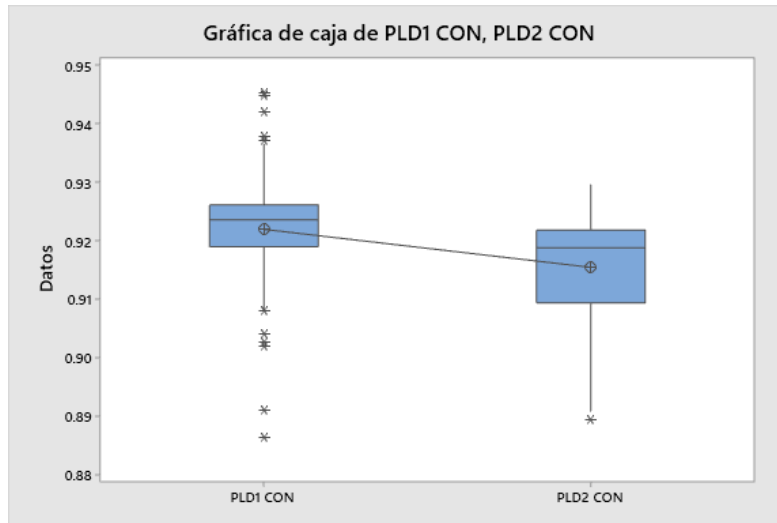


Imagen 21. Diagrama de caja de las PLD operando el proceso de gravimetría.

Como se observa en la imagen 20 y 21, existe una diferencia significativa en la eficiencia de las plantas en cuanto a los meses analizados, la PLD 1 cuenta con una mayor eficiencia, su variación es menor, pero presenta más puntos atípicos. Para evaluar mejor el control del proceso se procedió a la elaboración de gráficas de control que se muestran en las imágenes 22 y 23 donde se representa la eficiencia promedio del mes de noviembre y límite superior y menor contra el promedio de 10 grupos de datos de 3 muestras cada uno (30 días registrados correspondientes al mes de noviembre) en ambas plantas. Haciendo la comparación de las gráficas tenemos que en la PLD 2, imagen 23, contamos con un proceso más controlado, al principio de la gráfica tenemos una tendencia descendente hasta el punto 5, después de esto la curva tiene una reacción de recuperación manteniendo un orden en todos sus puntos sin dar saltos espontáneos, esto muestra que la planta se mantiene en control, hacen ajustes cuando son necesarios, caso contrario a la primera gráfica, imagen 22, donde no se aprecia esta tendencia, la curva muestra mayor variación.

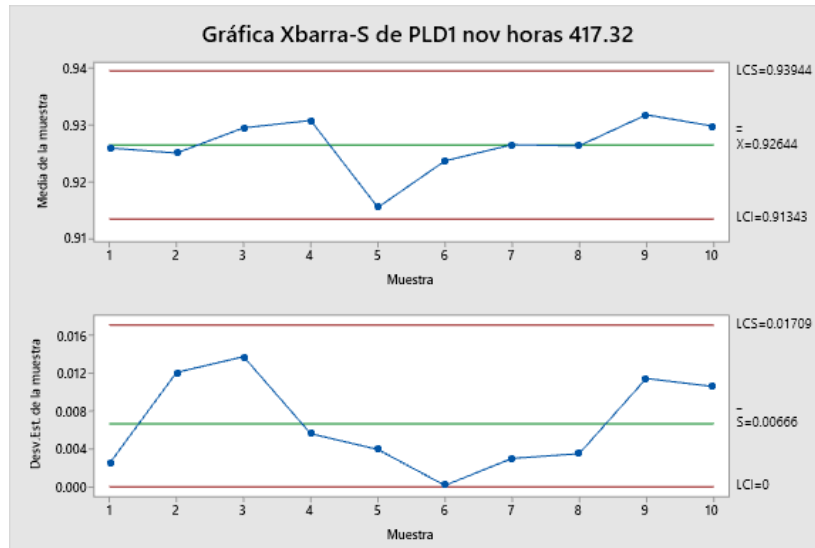


Imagen 22. Gráfica de control de noviembre del 2019 en PLD 1.

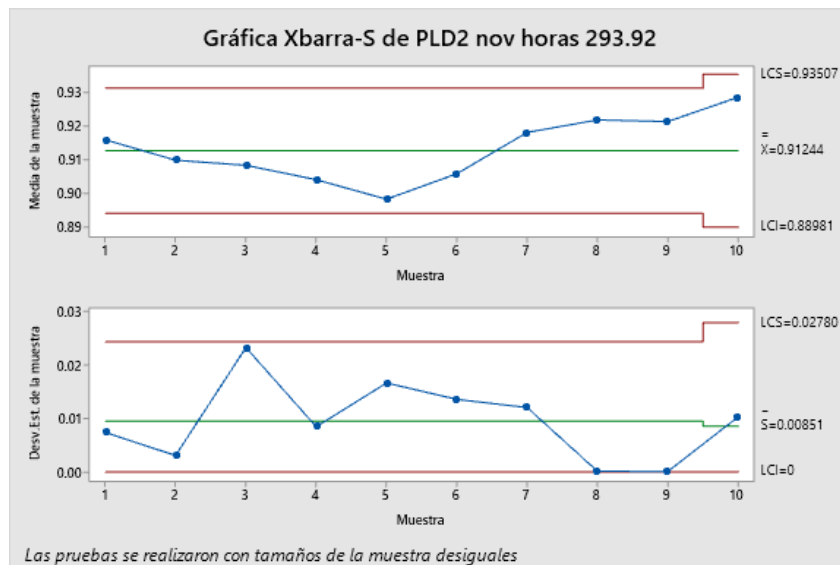


Imagen 23. Gráfica de control del mes de noviembre de 2019 en PLD 2.

5.4.2 Comparación del proceso de cianuración sin operación de equipos de concentración gravimétrica

El siguiente paso fue analizar los meses posteriores al descarte de la gravimetría, donde el objetivo es el mismo, ver si existe una diferencia en la media de eficiencia de lixiviación, primero en cada planta y posteriormente comparar ambas plantas. En la imagen 24 se observa el resultado del análisis ANOVA donde se reporta que existe una diferencia significativa en la eficiencia media mensual (valor $P < 0.5$) para el caso de la PLD 1.

Método					
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales				
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales				
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$				
<i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i>					
Información del factor					
Factor	Niveles Valores				
Factor	7 Jul. 2020, Ago. 2020, Oct. 2020, Nov. 2020, Dic. 2020, Ene. 2021, Feb. 2021				
Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	6	0.01526	0.002543	21.92	0.000
Error	187	0.02169	0.000116		
Total	193	0.03695			

Imagen 24. Resultados análisis ANOVA comparación de medias mensuales de eficiencia de lixiviación sin operar el proceso de gravimetría.

Las pruebas de Tukey, Fisher, Dunnett y las pruebas de Hsu, imágenes 25 y 26, indican una igualdad de medias en los meses consecutivos, es decir la eficiencia es igual en un periodo de tiempo (de dos a tres meses), pero va cambiando, este cambio es un incremento en la lixiviación conforme transcurre el tiempo, comenzando con un ascenso desde junio 2020 hasta enero del 2021. En otras palabras, existe diferencia significativa entre los meses, pero dicha diferencia es positiva. Obsérvese que los meses están ordenados de manera descendente tanto de eficiencia alcanzada como de tiempo, a excepción de febrero del 2021.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%				Comparaciones en parejas de Fisher				
Factor	N	Media	Agrupación	Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%	Factor	N	Media	Agrupación
Ene. 2021	31	0.94278	A	Ene. 2021	31	0.94278	A	Ene. 2021
Feb. 2021	18	0.94066	A	Feb. 2021	18	0.94066	A	Feb. 2021
Dic. 2020	31	0.93791	A	Dic. 2020	31	0.93791	A	Dic. 2020
Nov. 2020	29	0.927642	B	Nov. 2020	29	0.927642	B	Nov. 2020
Oct. 2020	26	0.92602	B C	Oct. 2020	26	0.92602	B C	Oct. 2020
Ago. 2020	30	0.92175	B C	Ago. 2020	30	0.92175	C D	Ago. 2020
Jul. 2020	29	0.91880	C	Jul. 2020	29	0.91880	D	Jul. 2020
<i>Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.</i>				<i>Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.</i>				

Imagen 25. Prueba de Fisher, comparación de medias mensuales de la eficiencia de lixiviación sin el proceso de gravimetría, PLD 1.

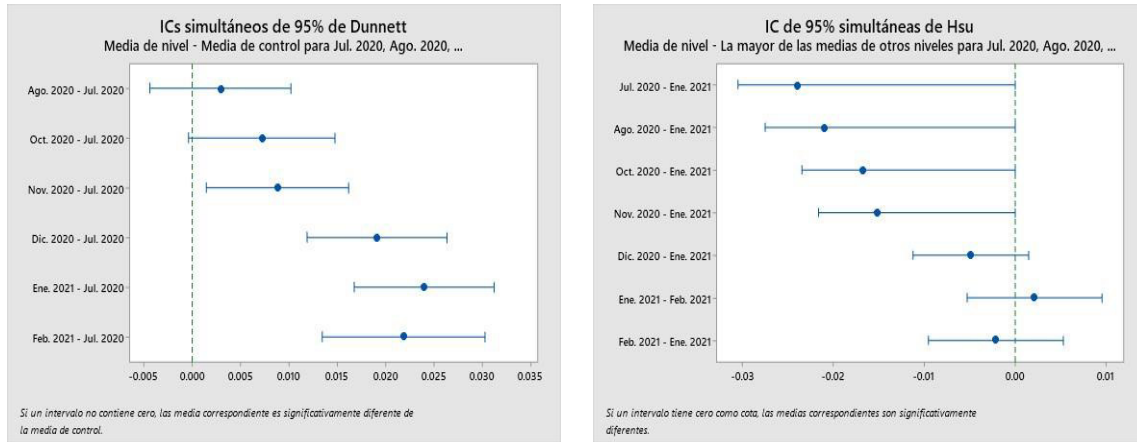


Imagen 26. Pruebas HSU, comparación de medias mensuales de la eficiencia de lixiviación sin el proceso de gravimetría, PLD 1.

Las mismas pruebas se repitieron para los datos de la PLD 2, pero con algunos meses diferentes, encontrándose resultados muy similares, como se observa en las imágenes 27, 28 y 29. El análisis ANOVA reportó diferencia significativa, y en cuanto a las demás pruebas, Tukey, Fisher, Hsu y Dunnett, el patrón resultante fue el mismo que el de la PLD 1.

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	8	Jun. 2020, Jul. 2020, Sep. 2020, Nov. 2020, Ene. 2021, Feb. 2021, Mar. 2021, Abr. 2021

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	7	0.008540	0.001220	22.44	0.000
Error	214	0.011634	0.000054		
Total	221	0.020175			

Imagen 27. Resultados del análisis ANOVA comparación de medias mensuales de eficiencia de lixiviación sin el proceso gravimétrico.

Las pruebas de Tukey y Fisher (imagen 28) y las pruebas de Dunnett y HSU (imagen 29) indican una igualdad de medias, como en el caso de la PLD1, en los meses consecutivos, el incremento en la eficiencia comienza con el mes de julio 2020 hasta enero del 2021, terminando con un descenso en febrero del 2021.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Ene. 2021	29	0.93974	A
Feb. 2021	26	0.93365	A B
Mar. 2021	30	0.93345	B
Abr. 2021	22	0.92908	B C
Nov. 2020	28	0.92781	B C
Sep. 2020	30	0.922937	C D
Jul. 2020	30	0.922743	C D
Jun. 2020	27	0.920984	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Ene. 2021	29	0.93974	A
Feb. 2021	26	0.93365	B
Mar. 2021	30	0.93345	B
Abr. 2021	22	0.92908	C
Nov. 2020	28	0.92781	C
Sep. 2020	30	0.922937	D
Jul. 2020	30	0.922743	D
Jun. 2020	27	0.920984	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Imagen 28. Prueba de Fisher, comparación de medias mensuales de la eficiencia de lixiviación sin el proceso de gravimetría, PLD 2.

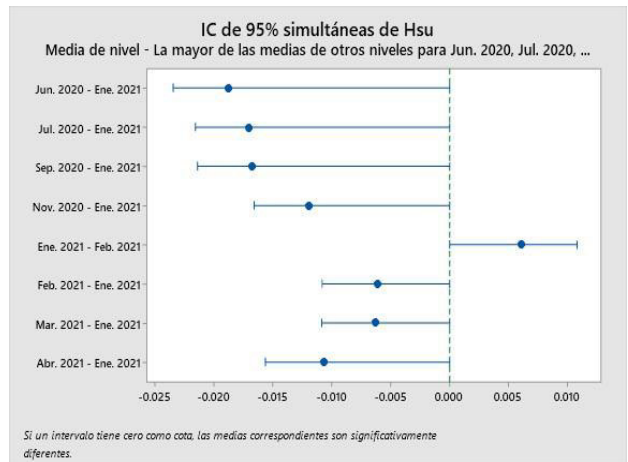
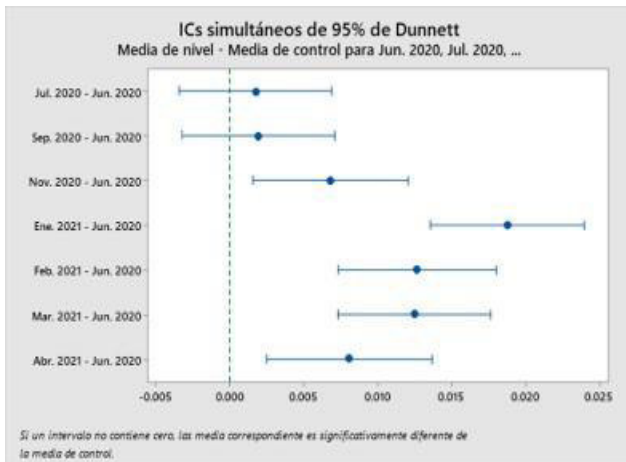


Imagen 29. Pruebas HSU, comparación de medias mensuales de la eficiencia de lixiviación sin el proceso de gravimetría, PLD 2.

Tomando nuevamente los meses que aparecen en ambas plantas, julio y noviembre del 2020 y enero y febrero del 2021, se procede a realizar las mismas pruebas en búsqueda de igualdad de medias y realizar una evaluación del rendimiento de ambas plantas. En la imagen 30 y 31 se muestran los resultados encontrados.

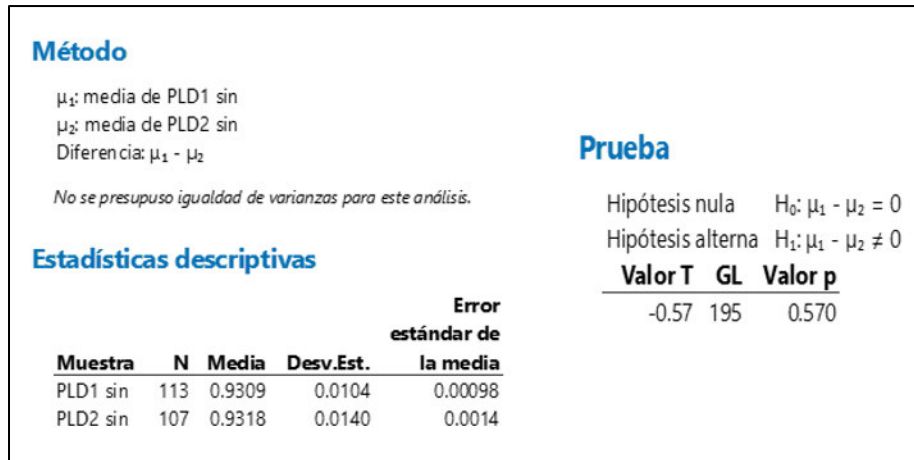


Imagen 30. Resultado de la comparación de medias entre PLD 1 y PLD 2 después del paro operativo del proceso gravimétrico.

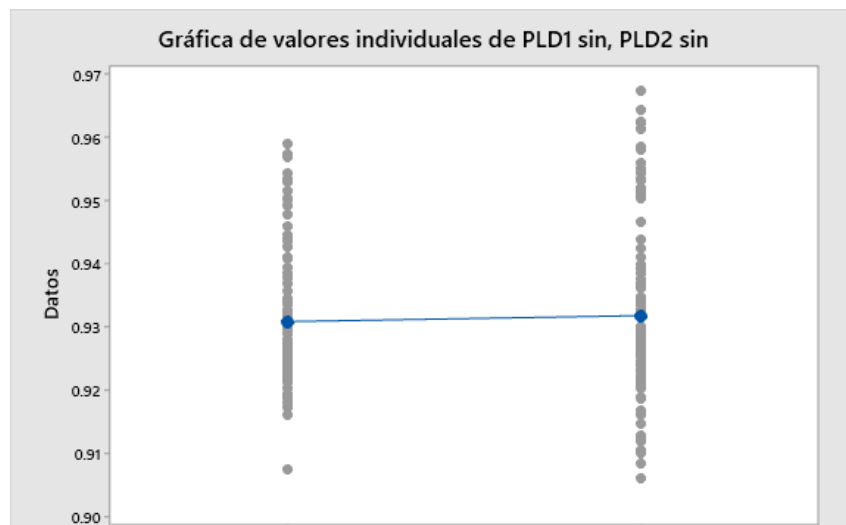


Imagen 31. Gráfica de valores individuales, PLD 1 a la derecha y PLD 2 a la izquierda. No se reporta diferencia significativa.

El resultado de la comparación de medias es que no hay diferencia significativa para ambas plantas, el valor de prueba P es mayor a 0.5

5.4.3 Eficiencia del proceso de cianuración antes y después del paro de equipos de concentración gravimétrico

Por último, se compara cada planta antes y después del paro de la gravimetría, comenzando con la PLD 1 cuyos resultados de las pruebas de T de Student, ANOVA, grafica de caja y grafica de intervalos mostraron una diferencia de medias como se observa en las imágenes 32 y 33.

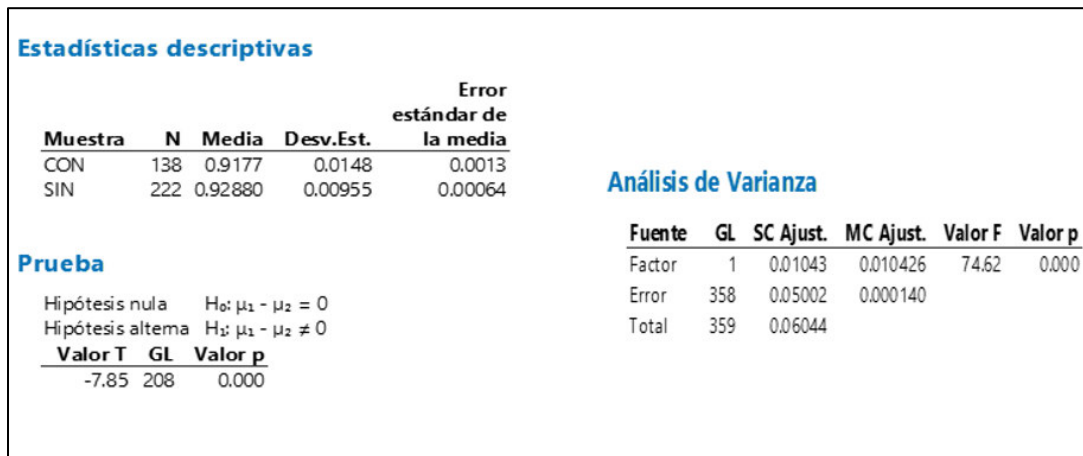


Imagen 32. Resultados prueba T de Student y análisis ANOVA comparando el proceso antes y después del paro operativo del proceso gravimétrico. PLD 1

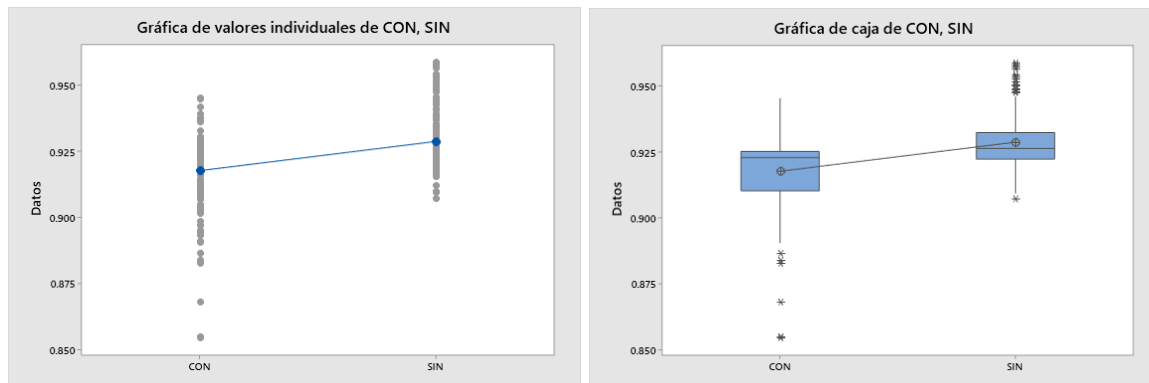


Imagen 33. Gráfica de valores individuales y gráfica de caja con y sin el proceso de gravimetría.

Analizando la 33 observamos como el proceso sin el concentrador gravimétrico opera con menos variación, los puntos se encuentran más agrupados y la caja se encuentra más estrecha, además el proceso muestra mayor eficiencia. Es conveniente mencionar que las pruebas de Tukey, Fisher, Hsu y Dunnett también arrojaron diferencia en la media de los datos analizados.

Estas mismas pruebas se realizaron para la PLD 2 donde se obtuvieron datos muy similares, como se muestra en las imágenes 34 y 35.

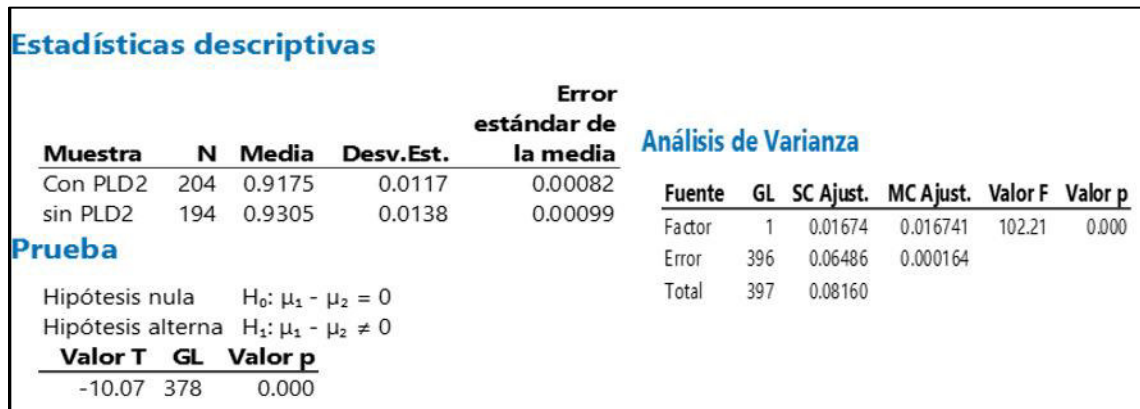


Imagen 34. Resultados pruebas T de Student y análisis ANOVA comparando el proceso antes y después del paro operativo del proceso gravimétrico. PLD 2.

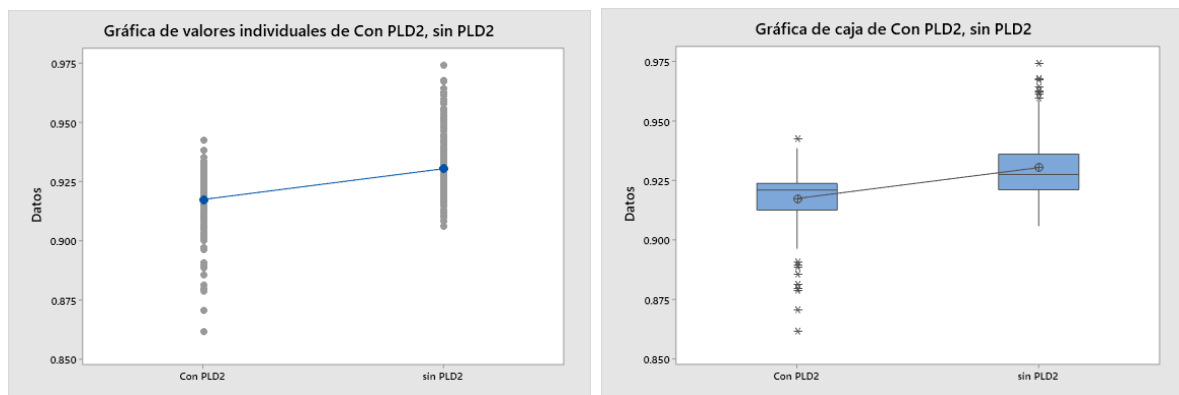


Imagen 35. Gráfica de valores individuales y gráfica de caja con y sin operar el proceso de gravimetría en PLD 2

Los resultados de las pruebas para el caso de la PLD 2 también arrojan diferencia en el proceso con y sin el concentrador gravimétrico, esta diferencia también es positiva ya que es un aumento en la eficiencia.

Las pruebas de Tukey, Fisher, Hsu y Dunnett también arrojaron diferencia significativa en la media de los datos, como sucedió en el análisis anterior de la PLD 1.

El aumento en la eficiencia de lixiviación no se atribuye al descarte de los concentradores gravimétricos, sin embargo, los resultados soportan el que estos equipos aún y cuando no se encuentran en operación, no representan un efecto negativo para la operación de la planta.

Capítulo 6. Conclusiones

- ✓ No se encontró presencia de Au grueso en las colas del proceso de las plantas de lixiviación en ninguno de los dos compósitos realizados, esto es imagen de un correcto circuito de lixiviación y control de tiempo de residencia del mineral en lixiviación.
- ✓ En el análisis de caracterización no se encontraron partículas de Au libres ni asociadas a otras especies, el análisis de microscopia electrónica de barrido no identificó especies de Au, además, el análisis encontró las mismas especies minerales en las dos muestras con la misma distribución en peso.
- ✓ El muestreo en planta reveló que en los primeros reactores se lleva a cabo la mayor parte del proceso de lixiviación, la ley no disminuye de forma graduar de acuerdo con número de reactor, debido a la variación en la ley de cabeza, pero se cuenta con el tiempo de residencia necesario para alcanzar la eficiencia deseada. El análisis valorado mostró, como es de esperarse, mayores eficiencias en los tamaños más pequeños.
- ✓ Previo al paro operativo de los concentradores gravimétricos la PLD 1 presentaba una mayor eficiencia que la PLD 2 en su proceso de lixiviación, aunque también mostró tener mayor variación. Además, la mayoría de los meses analizados no arrojaron diferencia de medias de lixiviación, en otras palabras, mantenían el proceso estable.
- ✓ Después del paro, las plantas operaron con la misma eficiencia entre sí, además, la eficiencia mostró un incremento, en ambas plantas, hasta llegar a su máximo valor en el mes de enero del 2021.
- ✓ Al detener el proceso gravimétrico no se identificó una disminución de la eficiencia en ninguna de las dos plantas, el análisis ANOVA, T de Student, Pruebas de Tukey, Fisher, Hsu y Dunnett reportaron diferencia significativa

antes y después del paro de este proceso, esta diferencia es positiva para el proceso, ya que como se menciona se cuenta con un incremento en la lixiviación. Este incremento no se atribuye al descarte de los equipos, sin embargo, no se encontró evidencia de que su omisión afecte de manera negativa a la eficiencia del proceso.

- ✓ Se recomienda operar las dos Planta de Lixiviación Dinámica sin los concentradores gravimétricos Knelson y los equipos ILR.

Referencias

- de la Torre, J. (2004). *Geología del Yacimiento Mina La Herradura*. Caborca, Sonora.
- DEITZ, F., & HALPERN, J. (1953). Reaction of Silver with Aqueous Solutions of Cyanide and Oxygen. En *J. Metals* 5 (págs. 1109-1116).
- Deschênes, G. (2016). *Advences in the Cyanidation of Gold*. Toronto: El Elsevier.
- Guzman, L. C. (2000). *Gold cyanidation with potassium persulfate in the presence of a thallium (I) salt*.
- Habashi, F. (1987). *ONE HUNDRED YEARS OF CYANIDATION*.
- Habashi, F. (2005). A short history of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*.
- Montalvo, A. (31 de Marzo de 2020). ¿Cuáles son las actividades esenciales que no pararán en la contingencia del Covid-19? *El Economista*.
- Nava-Alonso, F., Elorza-Rodríguez, E., Uribe-Salas, A., & Pérez-Garibay, R. (2007). Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. *Revista de metalurgia*, 20-28.

Anexos

Tabla 11. Análisis valorado, compósito 1 PLD 1.

Mallas		Tamaño de partícula, μm	Peso %	Ley, g/Ton	Contenido Au, mg	Distribución, %
+70		212	5.15	0.10	0.01	11.66
+100	-70	150	7.95	0.04	0.01	7.76
+140	-100	106	10.88	0.04	0.01	8.93
+200	-140	75	8.18	0.03	0.01	5.80
+230	-200	63	5.72	0.07	0.01	8.24
+325	-230	45	6.02	0.04	0.00	5.35
	-325		56.10	0.04	0.05	52.26
Cabeza calculada.				0.05		

Tabla 12. Análisis valorado, compósito 1 PLD 2.

Mallas		Tamaño de partícula, μm	Peso, %	Ley, g/Ton	Contenido Au, mg	Distribución, %
+70		212	4.64	0.07	0.01	4.88
+100	-70	150	8.29	0.04	0.01	4.90
+140	-100	106	10.81	0.06	0.01	9.66
+200	-140	75	8.95	0.11	0.02	13.79
+230	-200	63	5.51	0.09	0.01	6.99
+325	-230	45	6.53	0.09	0.01	8.00
	-325		55.27	0.07	0.07	51.77
Cabeza calculada				0.07		

Tabla 13. Datos usados en el análisis estadístico de PLD 1 antes del paro de los equipos de gravimetría.

PLD 1							
Ene. 2019	Mar. 2019	Abr. 2019	Jun. 2019	Jul. 2019	Sep. 2019	Nov. 2019	Feb. 2020
91.82%	91.35%	93.29%	88.62%	90.68%	91.94%	92.56%	92.25%
92.47%	91.45%	92.94%	92.30%	92.44%	92.39%	92.85%	92.33%
93.36%	92.39%	92.79%	90.84%	92.29%	86.79%	92.36%	92.29%
92.24%	92.88%	92.70%	91.80%	92.34%	89.85%	92.32%	92.11%
92.01%	92.91%	92.43%	90.39%	89.05%	91.96%	93.79%	92.27%
91.99%	92.99%	92.70%	91.41%	91.58%	92.65%	91.39%	91.31%
91.47%	92.24%	92.60%	93.64%	89.70%	91.11%	94.52%	90.25%
92.62%	92.27%	92.81%	92.64%	89.32%	92.30%	92.01%	92.23%
90.53%	92.72%	92.63%	92.77%	90.15%	92.36%	92.29%	92.22%
91.62%	92.83%	92.58%	91.83%	90.51%	88.40%	92.71%	92.29%
92.89%	92.93%	92.56%	91.14%	90.87%	85.44%	93.72%	92.23%
92.96%	92.38%	92.16%	90.41%	91.03%	89.45%	92.79%	92.46%
92.91%	92.94%	92.75%	90.20%	60.00%	90.69%	91.21%	92.38%
92.70%	93.28%	92.17%	91.03%	63.83%	89.53%	91.45%	92.26%
91.13%	93.88%	92.69%	92.45%	70.13%	90.80%	91.98%	92.78%
93.27%	93.41%	92.95%	90.80%	79.73%	88.25%	92.36%	92.34%
92.86%	91.87%	92.66%	92.55%	85.49%	90.31%	92.35%	92.46%
92.71%	92.88%	92.87%	92.54%	90.28%	93.95%	92.38%	90.87%
92.75%	92.53%	94.68%	93.28%	90.21%	90.89%	92.48%	91.92%
92.82%	93.13%	92.73%	93.06%	91.06%	93.72%	92.47%	92.18%
91.66%	92.02%	92.60%	92.65%	91.01%	92.16%	92.99%	92.44%
91.80%	92.85%	92.93%	92.90%	91.88%	92.62%	93.02%	91.72%
91.32%	92.35%	92.96%	92.60%	91.23%	92.48%	92.35%	92.36%
92.59%	92.83%	92.91%	92.86%	92.51%	90.95%	92.51%	92.32%
92.60%	92.66%	92.38%	92.85%	92.53%	93.62%	92.45%	92.25%
92.80%	92.77%	92.86%	91.83%	92.97%	92.68%	92.58%	92.97%
92.12%	93.99%	92.72%	90.41%	92.43%	92.30%	94.49%	92.43%
92.60%	93.96%	92.57%	92.50%	92.59%	92.36%	94.20%	
92.21%	92.68%	92.98%	89.10%			92.35%	
	93.12%					92.37%	

Tabla 14. Datos usados en el análisis estadístico de PLD 1 después del paro de los equipos de concentración gravimétrica.

PLD 1							
Ene. 2021	Mar. 2021	Abr. 2021	Jun. 2020	Jul. 2020	Sep. 2020	Nov. 2020	Feb. 2021
94.37%	93.93%	93.48%	92.12%	92.28%	92.23%	92.63%	93.12%
93.77%	93.02%	93.86%	92.22%	92.73%	92.20%	92.56%	93.23%
93.94%	92.42%	92.93%	92.27%	92.34%	92.44%	92.96%	93.18%
93.05%	93.54%	93.27%	90.98%	92.22%	93.41%	93.36%	92.98%
94.08%	93.46%	92.70%	91.55%	92.68%	92.26%	92.74%	92.49%
93.44%	93.27%	93.15%	91.21%	92.23%	92.44%	92.79%	92.24%
92.03%	93.52%	93.37%	92.32%	91.61%	91.98%	92.74%	93.69%
92.55%	93.90%	93.44%	92.23%	91.91%	92.22%	92.66%	93.24%
95.05%	94.11%	93.03%	92.53%	92.27%	92.15%	92.69%	93.37%
94.77%	95.03%	93.19%	92.69%	92.33%	92.82%	93.28%	95.31%
94.79%	92.40%	92.77%	92.19%	92.27%	91.85%	94.92%	92.97%
95.16%	94.89%	92.62%	92.26%	91.80%	92.14%	92.62%	92.50%
94.46%	94.37%	93.10%	91.78%	92.20%	92.32%	92.60%	95.69%
92.45%	94.80%	91.98%	92.34%	92.24%	92.08%	92.71%	95.91%
92.34%	94.54%	92.95%	92.24%	92.03%	92.17%	92.63%	95.75%
94.10%	95.84%	92.58%	91.21%	93.05%	92.31%	92.72%	93.86%
93.86%	92.65%	92.50%	92.59%	90.73%	92.67%	92.79%	92.71%
95.35%	92.26%	92.65%	92.29%	92.21%	92.20%	93.01%	93.77%
91.86%	92.66%	92.86%	92.20%	93.46%	92.34%	92.63%	93.19%
93.57%	93.24%	93.10%	92.23%	92.63%	92.24%	92.63%	92.58%
94.59%	92.80%	91.84%	91.53%	92.17%	92.11%	92.69%	91.60%
94.28%	92.72%	92.60%	92.35%	92.40%	92.08%	92.71%	93.17%
94.39%	92.94%		92.33%	93.10%	92.15%	93.09%	93.15%
95.02%	92.39%		92.29%	92.24%	92.26%	93.45%	92.90%
95.44%	93.18%		92.26%	92.24%	92.86%	91.71%	92.35%
93.13%	92.64%		92.21%	92.24%	92.15%	92.18%	92.55%
94.26%	93.14%		92.23%	92.25%	92.13%	92.26%	
94.78%	90.96%			92.15%	92.19%	92.11%	
94.36%	92.69%			91.93%	92.21%		
	93.07%			92.27%	92.19%		

Tabla 15. Datos usados en el análisis estadístico en PLD 2 antes del paro de los equipos de concentración gravimétrica.

PLD 2						
May. 2019	Jun. 2019	Oct. 2019	Nov. 2019	Dic. 2019	Ene. 2020	Feb. 2020
91.05%	89.69%	90.58%	90.84%	92.18%	92.14%	92.07%
91.52%	92.42%	90.13%	92.30%	91.55%	92.18%	92.23%
87.87%	91.42%	88.83%	91.57%	92.98%	92.39%	91.12%
92.65%	90.18%	92.62%	91.11%	93.18%	92.28%	91.44%
92.03%	90.50%	92.32%	90.61%	91.50%	92.27%	92.72%
92.23%	91.81%	92.24%	91.16%	92.57%	92.20%	91.47%
91.10%	90.94%	92.29%	88.14%	92.54%	91.81%	90.01%
91.07%	92.18%	92.74%	92.26%	92.37%	91.13%	92.19%
90.58%	92.18%	92.00%	92.04%	92.43%	91.56%	91.55%
91.02%	91.03%	92.14%	91.30%	91.68%	91.87%	90.33%
92.12%	90.90%	92.07%	90.21%	92.43%	92.21%	91.51%
92.53%	89.70%	90.70%	89.65%	93.04%	90.46%	91.56%
92.20%	90.70%	92.08%	90.31%	92.27%	92.76%	92.65%
91.89%	92.21%	90.66%	87.96%	91.57%	92.71%	91.92%
93.33%	92.70%	92.26%	91.16%	92.63%	92.16%	92.50%
92.88%	92.95%	91.25%	91.74%	92.59%	92.65%	92.33%
93.54%	92.02%	93.35%	89.09%	92.24%	92.32%	92.23%
92.35%	92.61%	92.23%	90.86%	90.69%	91.49%	92.24%
92.29%	91.30%	92.15%	90.55%	92.97%	92.69%	92.84%
92.78%	92.16%	91.71%	92.94%	92.80%	92.12%	91.96%
93.28%	90.32%	93.28%	91.87%	91.28%	92.38%	92.87%
92.28%	92.10%	92.80%	92.16%	90.21%	92.44%	91.62%
92.25%	92.18%	93.36%	92.14%	92.62%	91.87%	91.89%
92.03%	92.06%	92.09%	92.16%	92.20%	92.09%	91.67%
92.64%	90.93%	92.52%	92.11%	90.62%	92.16%	92.02%
72.08%	90.06%	94.27%	92.10%	91.90%	91.81%	90.16%
90.08%	88.92%	93.82%	92.11%	90.90%		92.30%
91.98%	91.31%	93.84%	92.10%	92.04%		92.38%
87.05%	91.96%	93.12%	93.55%	92.12%		92.02%
88.54%	86.16%	92.19%		91.75%		
				92.39%		

Tabla 16. Datos usados en el análisis estadístico en PLD 2 después del paro de los equipos de concentración gravimétrica.

PLD 2						
Jul. 2020	Ago. 2020	Oct. 2020	Nov. 2020	Dic. 2020	Ene. 2021	Feb. 2021
92.52%	91.53%	92.07%	92.76%	92.74%	93.61%	92.56%
92.43%	91.80%	92.81%	92.65%	92.73%	93.00%	92.93%
92.27%	91.98%	91.64%	93.23%	92.91%	94.24%	93.25%
92.15%	91.17%	91.91%	93.43%	92.36%	95.12%	92.69%
91.23%	92.01%	91.76%	92.98%	92.23%	95.17%	92.96%
92.58%	92.10%	92.08%	92.99%	91.26%	92.22%	95.22%
92.30%	92.10%	92.30%	92.81%	92.28%	92.86%	95.82%
91.04%	91.87%	92.87%	92.77%	91.29%	92.86%	96.23%
92.37%	91.22%	92.59%	92.87%	92.31%	95.32%	94.00%
92.58%	92.19%	92.09%	93.27%	92.39%	95.14%	96.75%
91.60%	92.20%	92.83%	93.19%	92.62%	95.35%	93.70%
91.47%	92.14%	92.26%	93.02%	92.18%	92.80%	92.93%
90.61%	92.12%	92.19%	90.83%	92.07%	96.45%	94.25%
91.19%	92.08%	93.18%	92.89%	92.24%	93.21%	93.37%
92.17%	92.16%	92.77%	92.14%	93.63%	92.07%	93.93%
92.02%	92.09%	93.29%	93.48%	95.52%	94.12%	92.09%
93.67%	91.94%	93.19%	93.15%	97.45%	93.84%	95.45%
91.22%	94.18%	93.20%	92.79%	95.33%	92.45%	95.04%
91.21%	92.15%	91.70%	92.63%	96.78%	95.85%	
91.03%	92.47%	92.18%	92.98%	94.47%	92.76%	
92.71%	92.23%	93.47%	92.75%	95.98%	95.18%	
91.01%	92.16%	93.33%	92.80%	96.29%	93.76%	
91.67%	91.63%	93.22%	92.84%	95.01%	94.67%	
92.18%	92.08%	94.13%	93.18%	94.78%	94.25%	
92.19%	92.10%	92.94%	92.96%	96.75%	94.38%	
91.89%	93.53%	91.64%	92.13%	92.43%	93.34%	
91.86%	93.65%		92.09%	93.57%	96.14%	
92.09%	92.10%		92.14%	94.83%	95.50%	
91.28%	92.22%		92.43%	94.85%	96.26%	
	92.05%			93.27%	95.61%	
				94.99%	95.09%	