

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**CONTROL DE TEMPERATURA INICIAL EN LA
SOLUCIÓN DE DESORCIÓN PARA MEJORAR
LA EXTRACCIÓN DE ORO**

TESIS

Presentada por:

Bach. PAOLO DAVID BARRIGA DEZA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

**TACNA –PERÚ
2023**

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

CONTROL DE TEMPERATURA INICIAL EN LA SOLUCIÓN DE DESORCIÓN PARA MEJORAR LA EXTRACCIÓN DE ORO

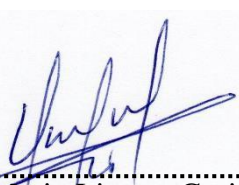
Tesis sustentada el 20 de diciembre del 2023, estando integrado el jurado calificador por

PRESIDENTE



.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO



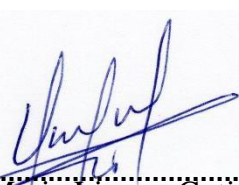
.....
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

VOCAL



.....
Mtro. Daniel Jesús Zevallos Ramos

ASESOR



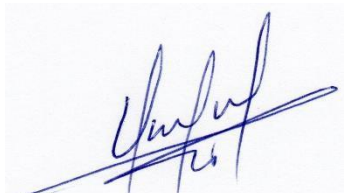
.....
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 077851-2023-FAIN/UNJBG de la tesis titulada: **CONTROL DE TEMPERATURA INICIAL EN LA SOLUCIÓN DE DESORCIÓN PARA MEJORAR LA EXTRACCIÓN DE ORO**, presentada por **Bach. PAOLO DAVID BARRIGA DEZA** para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalurgista.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 7 %, por lo que CERTIFICO LA SIMILITUD de la tesis que está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el Repositorio Institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención del Título Profesional de Ingeniero Metalurgista.



.....
DNI: 00797389

Nataniel Mario Linares Gutiérrez



DEDICATORIA

A mis padres Oscar David Barriga Sosa y Dina Judith Deza Cruzate los gestores de todo lo logrado hasta este punto de mi vida; así como también a mi menor hermana Genifer Rosita Geraldine mi apoyo y mano derecha.

Mi motor y motivo ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Queridos Oscar, Judith y Geraldine,

Hoy quiero expresar mi más profundo agradecimiento por todo el apoyo incondicional que me han brindado durante mi proceso de investigación y elaboración de mi tesis. No puedo imaginar haber llegado hasta aquí sin su constante aliento y amor.

Oscar, como mi padre, has sido un faro de sabiduría y orientación a lo largo de este arduo camino. Tu aliento y tu confianza en mis habilidades me han dado la fuerza necesaria para enfrentar los desafíos y superar los obstáculos que se presentaron en el camino. Tu dedicación y ejemplo como persona trabajadora y perseverante han sido una fuente de inspiración en cada paso de mi trayectoria académica.

Judith, mi querida madre, tu amor incondicional y tu dedicación han sido mi mayor fortaleza. Tú siempre me has brindado un hombro en el que apoyarme y una mano que me ha alentado a seguir adelante. Tus palabras de aliento y tus gestos de apoyo han sido el combustible que necesitaba para llegar hasta el final. No puedo agradecerte lo suficiente por ser mi mayor admiradora y creer en mí en todo momento.

Geraldine, mi amada hermana, has sido mi compañera de viaje en esta travesía académica. Tu apoyo siempre que lo necesité (nunca

recibí un no por respuesta), ha sido invaluable para mi crecimiento y desarrollo como estudiante. Siempre has estado ahí para escucharme, comprenderme y brindarme tu apoyo incondicional. Tu presencia ha sido una fuente constante de alegría y motivación por ser un buen ejemplo para ti. Estoy agradecido por tener una hermana tan increíble como tú.

De nuevo, gracias Óscar, Judith y Geraldine, por ser mi piedra angular, por estar a mi lado y por ser mi inspiración constante. Su amor y apoyo han sido el motor que me ha impulsado a superar cada obstáculo y a lograr este importante hito en mi vida académica.

En este momento de culminación, quiero que sepan que su presencia en mi vida ha sido mi mayor bendición. Los amo profundamente y valoro cada sacrificio que han hecho para ayudarme a alcanzar mis metas. Su fe en mí ha sido fundamental para conseguir este logro académico, y mi tesis no habría sido posible sin su amor, apoyo y paciencia.

A los profesionales y colegas metalurgistas que aportaron en este proyecto de investigación con sus conocimientos y consejos.

Con gratitud eterna,

Paolo

Contenido

CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.0. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN ...	3
1.1. Antecedentes del problema a investigar	3
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Formulación del problema	4
1.4. Formulación del problema principal	5
1.5. Objetivos de la investigación	5
1.5.1. Objetivo General	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
1.6. Justificación e importancia de la investigación.....	6
1.6.1. Justificación teórica.....	6
1.6.2. Justificación práctica	6
1.6.3. Justificación académica	7
1.7. Limitaciones	7
1.8. Formulación de hipótesis	7
1.8.1. Hipótesis general	7
1.8.2. Hipótesis específicas	8

1.9.	Variables.....	8
1.9.1.	Definición conceptual de la variable independiente	8
1.9.2.	Definición operacional de las variables independientes.....	8
1.9.3.	Definición conceptual de la variable dependiente	9
1.9.4.	Definición operacional de la variable dependiente	9
1.10.	Operacionalización de variables	9
CAPÍTULO II	10
MARCO TEÓRICO	10
2.0.	MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	10
2.0.1.	Descripción General del Proceso.....	10
2.0.2.	Equipamiento Principal	11
2.0.3.	Gestión de residuos sólidos	12
2.1.	Antecedentes del trabajo de investigación.....	12
2.1.1.	Antecedentes internacionales	12
2.1.2.	Antecedentes nacionales	14
2.2.	Base teórica.....	15
2.2.1.	Carbón activado.....	16
2.2.2.	Adsorción	19
2.2.3.	Elución	34
2.3.	Definición de términos	46

CAPÍTULO III	47
MARCO METODOLÓGICO	47
3.0. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
3.1. Planteamiento metodológico.....	47
3.2. Población y muestra	47
3.3. Equipos y Materiales.....	48
3.4. Procedimiento de las pruebas experimentales	51
3.5. Técnicas de recolección de datos.....	51
3.6. Técnicas para el procesamiento de datos	51
CAPÍTULO IV	52
RESULTADOS	52
4.0. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	52
4.1. Descripción de las pruebas experimentales	52
4.2. Presentación y análisis de los resultados	52
4.2.1. Caracterización de variables.....	55
4.2.2. Variación de temperatura bajo condiciones actuales.....	59
4.2.3. Ajuste de modelo cinético	63
4.3. Contrastación de hipótesis.....	68
CAPÍTULO V	70
DISCUSIÓN	70

5.0.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN ...	70
5.1.	Pruebas de validación del modelo experimental.....	70
5.2.	Aplicación de la tecnología encontrada	70
5.2.1.	Control de temperatura	70
	CONCLUSIONES	76
	RECOMENDACIONES	78
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	ANEXOS	82

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 - Flowsheet general del circuito de desorción.....	11
Figura 2 - Representación gráfica de la estructura del grafito	18
Figura 3 - Gráfico de la estructura de carbono de carbón activado	18
Figura 4 - Descripción de etapas en proceso CIP	21
Figura 5 - Inyector de aire para transferencias de carbón/lodo	23
Figura 6 - Circuito en cascada CIP	23
Figura 7 - Formación de aurocianuro.....	26
Figura 8 - Interacción entre el carbón activado y Au(CN)	27
Figura 9 - Efecto de iones.....	29
Figura 10 - Capacidad de adsorción de oro versus pH.....	30
Figura 11 - Diámetro de partícula de Au y tiempo de adsorción.....	32
Figura 12 - Relación inversa de la capacidad de adsorción y temperatura	33
Figura 13 - Figuras de columnas de elución.....	36
Figura 14 - Configuración típica del circuito AARL	38
Figura 15 - Circuito típico del proceso Zadra.....	39
Figura 16 - Efecto de la temperatura en la elución de oro de dos muestras diferentes de carbón activado	41
Figura 17 - efecto de la temperatura sobre la eficiencia de desorción del oro.....	41
Figura 18 - Elución y la velocidad del flujo.....	42
Figura 19 - concentración de cianuro en la disolución de oro	44

Figura 20 - Dispersión de cada una de las variables.....	56
Figura 21 - Nivel de significancia con diagrama de Pareto.....	58
Figura 22 - Temperatura vs Tiempo en la campaña N° 5.....	59
Figura 23 - Temperatura vs Tiempo en la campaña N° 6.....	60
Figura 24 - Temperatura vs Tiempo en la campaña N° 7.....	60
Figura 25 - Temperatura vs Tiempo en la campaña N° 8.....	61
Figura 26 - Prueba de normalidad de temperaturas iniciales.....	62
Figura 27 - Cálculo de constantes cinéticas de campaña 1.....	65
Figura 28 - Cálculo de constantes cinéticas de campaña 2.....	66
Figura 29 - Cálculo de constantes cinéticas de campaña 3.....	66
Figura 30 - Cálculo de constantes cinéticas de campaña 4.....	67
Figura 31 - Temperaturas de trabajo vs tiempo en campañas iniciales	69
Figura 32 - Constante cinética en campaña 9.....	73
Figura 33 - Constante cinética en campaña 10.....	74
Figura 34 - Constante cinética en campaña 11.....	74
Figura 35 - Constante cinética en campaña 12.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Variabilidad de temperatura.....	4
Tabla 2 - Operacionalización de las variables	9
Tabla 3 - Mecanismo sugeridos de diversos autores para la adsorción de Au(CN)	25
Tabla 4 - Variables de campaña 1	53
Tabla 5 - Variables de campaña 2	53
Tabla 6 - Variables de campaña 3	54
Tabla 7 - Variables de campaña 4	54
Tabla 8 - Análisis de correlación.....	55
Tabla 9 - ANOVA campaña 1	57
Tabla 10 - ANOVA campaña 2	57
Tabla 11 - ANOVA campaña 3	57
Tabla 12 - ANOVA campaña 4	58
Tabla 13 - Resumen de variación de temperaturas.....	61
Tabla 14 - Resumen de temperaturas iniciales.....	62
Tabla 15 - Estadísticos descriptivos de análisis de temperaturas iniciales.....	63
Tabla 16 - Constantes cinéticas de campañas iniciales	67
Tabla 17 - Temperaturas de trabajo	68
Tabla 18 - Resumen de temperaturas finales.....	71
Tabla 19 - Estadísticos descriptivos de análisis de temperaturas iniciales.....	72
Tabla 20 - Constantes cinéticas de campañas finales.....	75

RESUMEN

La evaluación metalúrgica del presente trabajo fue desarrollada en las instalaciones de una planta de pequeña minería en el rubro de extracción de oro del sur de Perú, ubicada en la región Ayacucho, específicamente en la sección de desorción del carbón activado proveniente de los ciclos de adsorción en tanques agitados, se estudió la influencia de las variables de proceso alcalinidad, fuerza de cianuro y temperatura de la solución de desorción determinándose como variable con mayor significancia estadística a la temperatura en la desorción del oro. Se determinó que el correcto control operativo de la temperatura inicial y durante todo el ciclo de desorción alcanza constantes cinéticas mayores a las que donde existe variación de esta variable, la disminución en 86,09% del coeficiente de variación después del control de temperatura permite alcanzar un incremento desde $K = 1,83 \text{ días}^{-1}$ hasta $K = 3,53 \text{ días}^{-1}$ que en términos porcentuales significan un 92,96% de mejora en el valor de la constante cinética promedio según el ajuste al modelo de primer orden García-Zuñiga.

Palabras claves: CIP, carbón activado, elución, desorción, García-Zuñiga, constante cinética, AARL, Zadra.

ABSTRACT

This metallurgical evaluation developed in the present work was carried out in small gold extraction plant's facilities in southern Peru, located in the Ayacucho region, specifically in the activated carbon desorption section from the cycles of adsorption in stirred tanks, the influence of the process variables as alkalinity, cyanide strength and temperature of the desorption solution was studied. It was found the temperature as the variable with the greatest statistical significance in gold desorption. Has been found that the correct operational control of the initial temperature and throughout the elution cycle reaches kinetic constants greater than those where there is variation of this variable, the decrease of 86.09% of the coefficient of variation of the temperature after the control of temperature will allows reaching an average value of $K = 3.53 \text{ days}^{-1}$ as an improved kinetic constant according to the fit to the first-order García-Zuñiga model.

Keywords: CIP, activated carbon, elution, desorption, García-Zuñiga, kinetic constant, AARL, Zadra.

INTRODUCCIÓN

El uso de carbón activado en el proceso de extracción de oro, elemento que permite la concentración y en el que se aplica el proceso de desorción para su posterior refinamiento, requiere el control de muchas variables operativas a fin de garantizar adecuadas eficiencias operativas que garanticen la recuperación del oro absorbido. El presente trabajo demuestra que el correcto control de la temperatura de la solución eluyente en los ciclos de desorción tiene impacto directo y favorable en la cinética de desorción.

La secuencia correlativa de los capítulos que integran la tesis sustentan el desarrollo de la presente investigación, el capítulo I abarca la problemática planteada así como las justificaciones necesarias para su desarrollo; en tanto que los conceptos y fundamentos teóricos aplicados quedan referenciados en el capítulo II; las técnicas y los pasos necesarios que ayuden a resolver el problema planteado están estructurados en el capítulo III; en los capítulos IV y V se detallan los resultados obtenidos y de los cuales se desprenden las recomendaciones necesarias a fin de ampliar la aplicación del trabajo desarrollado.

ABREVIATURAS

AARL:	Proceso Aglo Americano
Amp:	Amperios
CIC:	Carbón En Columna
CIP:	Carbón En Pulpa
CIL:	Carbón En El Lixiviado
gr:	Gramo
L:	Litro
m ² :	Metro Cuadrado
m ³ :	Metro Cubico
mg:	Miligramo
ml:	Mililitro
°C:	Grados Centígrados
ppm:	Partes por millón
Tm:	Tonelada Métrica
V:	Volumen
v:	Voltaje
VI:	Variable independiente
VD:	Variable dependiente

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.0. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes del problema a investigar

El oro que se adsorbe durante la etapa de enriquecimiento del carbón activado, proceso anterior a la desorción, es despojado del carbón mediante una inversión de la cinética de adsorción, proceso conocido como elución en el que se hace circular una solución diluida de cianuro y alcohol en flujo ascendente a través de un lecho estacionario de carbón activado cargado, esta solución de desorción requiere ser calentada, bajo esta afirmación, la temperatura representa la variable que será la base del presente estudio.

1.2. Descripción del problema

El proceso de desorción se caracteriza por la simplicidad del diseño y operación del sistema; sin embargo, las fluctuaciones de temperatura en la solución de elución o desorción registradas durante la etapa de puesta en marcha de las diferentes campañas, reduce significativamente la eficiencia de desorción.

Se presenta la siguiente tabla a manera de resumen en el que se indica la variabilidad de temperatura inicial en la solución de desorción:

Tabla 1*Variabilidad de temperatura*

Fecha	Temperatura
	°C
17/01/2023	60
11/01/2023	50
08/01/2023	62
03/02/2023	61
09/02/2023	87
21/02/2023	50
26/02/2023	60
11/03/2023	50

Como consecuencia inmediata a estas fluctuaciones, se presume la extensión y variación del tiempo del ciclo de desorción requerido entre campañas debido a cinéticas de desorción bajas.

Se realizó una revisión sobre data real de planta encontrándose como factor común la variación antes mencionada, el rango de esta variación de temperatura oscila entre 50°C y 87°C demostrando el poco control de este parámetro al iniciar los ciclos de desorción.

1.3. Formulación del problema

Las plantas industriales de beneficio aurífero, al igual que cualquier otro proceso industrial, requieren de constantes innovaciones a fin de asegurar la optimización de sus procesos.

1.4. Formulación del problema principal

La problemática antes mencionada permite plantear la siguiente interrogante:

¿De qué forma se puede mejorar la cinética de desorción?

El afán de optimizar procesos industriales conmina a reducir (o, si es posible, eliminar totalmente) la pérdida de tiempo y recursos, los gastos innecesarios y los errores operativos que se producen.

Basado en esta premisa, se propone el control estricto de la temperatura inicial de solución de elución, de tal manera que al iniciar todas las campañas se uniformice este valor, el valor de temperatura inicial será determinado después del análisis estadístico sobre la data proporcionada; se demostrará a la temperatura inicial como variable significativa en la cinética de desorción.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo General

Demostrar a la temperatura de la solución de elución como variable con mayor relevancia en los ciclos de desorción de oro.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Estimar el rango operativo de temperatura inicial en la solución de elución a fin de garantizar cinéticas de desorción más adecuadas.
- Disminuir la variación de temperatura durante el ciclo de elución.

1.6. Justificación e importancia de la investigación

La optimización de procesos suele implicar la introducción de mejoras en aspectos y/o elementos determinados del proceso, en este caso sobre el control de temperatura de la solución de elución, de tal manera que esto permita la obtención de un proceso más eficaz, en ese sentido, se debe considerar que alcanzar una mayor cinética de transferencia representa la disminución considerable de costos al procesar la misma cantidad de soluciones en un menor tiempo de operación.

1.6.1. Justificación teórica

El desarrollo de la presente investigación presenta información bibliográfica la cual permitirá reconocer la importancia del control obligatorio de la temperatura para alcanzar mejores recuperaciones en tiempos más cortos, con este argumento se pretende utilizar la energía requerida para garantizar la transferencia de oro pero que al mismo tiempo nos permita disminuir los tiempos en los ciclos de desorción.

1.6.2. Justificación práctica

Esta investigación está orientada a determinar la principal variable y su posterior control a fin de generar mejores porcentajes de recuperación en un menor tiempo de operación gracias al análisis de data real de campo; este es el enfoque práctico con el que se pretende aportar a la industria hidro-metalúrgica de oro.

1.6.3. Justificación académica

Se plantea el análisis estadístico de data recopilada durante diferentes periodos de tiempo a fin de demostrar el rol preponderante de la temperatura inicial, la correcta aplicación del rigor estadístico a la data histórica permitirá predecir y señalar el parámetro con mayor significancia estadística, brindando preliminarmente la oportunidad de mejorar la etapa de desorción de la planta en estudio.

1.7. Limitaciones

La data utilizada en el análisis de la presente investigación se originó durante la medición, seguimiento y trazabilidad metalúrgica en una planta de extracción de oro del sur de Perú, ubicada en la región Ayacucho.

Las limitaciones están sujetas a la disponibilidad nula del uso de las instalaciones para efectuar pruebas metalúrgicas sustentadas en diseños experimentales, si bien es cierto que la aplicación de este tipo de investigación podría permitir obtener resultados con mayor grado de exactitud y reproducibilidad de todos los factores de campo, se debe entender el derecho de confidencialidad por parte de los administradores de la empresa y el hecho de reservar sus instalaciones para este tipo de pruebas. Sin embargo, el desarrollo favorable de la presente investigación pretende justificar el uso de pruebas posteriores más robustas como es el caso de los ya mencionados DOE.

1.8. Formulación de hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

- Aplicando y controlando una adecuada temperatura en la solución de elución es posible incrementar la cinética de desorción en los ciclos de desorción.

1.8.2. Hipótesis específicas

- Existe una relación significativa entre la variación de temperatura de la solución de elución y la cinética de desorción.
- La disminución de variabilidad al controlar la temperatura inicial en la solución es significativa.

1.9. Variables

1.9.1. Definición conceptual de la variable independiente

Se define como variable independiente o tratamiento a aquellas donde, a través de su manipulación, se puede explicar la ocurrencia de otros fenómenos.

1.9.2. Definición operacional de las variables independientes

Se proponen a las siguientes variables para en el presente estudio donde se estudiará la causalidad e influencia que tienen estas variables sobre la cantidad de oro desorbido.

- Temperatura Inicial
- Alcalinidad
- Porcentaje de cianuro

1.9.3. Definición conceptual de la variable dependiente

Se define como variable dependiente a aquella que resulta de la manipulación de las variables independientes, su valor mide los resultados del experimento.

1.9.4. Definición operacional de la variable dependiente

Las interacciones de las variables definidas como independientes establecen la magnitud de la eficiencia del proceso, siendo en este caso la variable dependiente:

- Porcentaje de extracción

1.10. Operacionalización de variables

Tabla 2

Operacionalización de las variables

Variable	Dimensión	Indicador
VI		
Temperatura Inicial	Temperatura	°C
Alcalinidad	Potencial de hidrógeno	pH
Porcentaje de cianuro	Fuerza de cianuro	%
VD		
Porcentaje de extracción	Extracción	%

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.0. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

2.0.1. Descripción General del Proceso

La planta de beneficio se localiza a 12 km de distancia de la mina, en la confluencia de la quebrada Santa Rosa con la quebrada Acaville, distrito de Sancos, provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho, encontrándose en las cotas de 1270 y 1280 msnm. El tratamiento del mineral es mediante una planta de cianuración por percolación con una capacidad de 200 t/día con ley promedio de 15 g Au/t, la producción mensual de oro en barras de doré oscila de 40 a 50 kg promediando recuperaciones de 97,5 %.

El mineral es en su mayoría del tipo óxido y es proporcionado principalmente por la mina, otra cantidad es suministrada por acopiadores a fin de completar la capacidad de procesamiento, el mineral grueso mayor a 1 pulgada y de baja ley (5 a 12 g Au/t) es tratado en el PAD de lixiviación mientras que los finos son aglomerados con cemento para su posterior lixiviación en tanques.

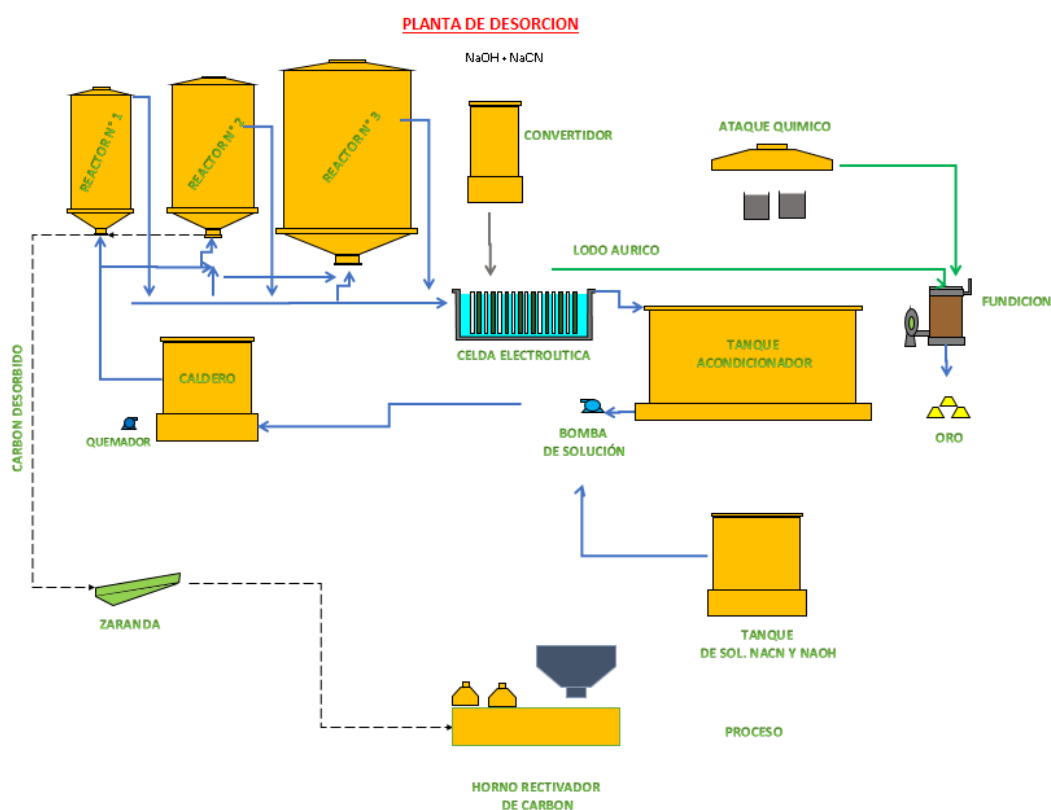
En cuanto al proceso desarrollado en planta, se utiliza una técnica de cianuración clásica para este tipo de minerales auríferos, para ello el material es previamente chancado en dos etapas con cribado y separación de finos. La molienda posterior es desarrollada en dos etapas, en esta etapa se utilizan dos molinos de bolas hasta alcanzar P80 de -200 micrones, esta granulometría es necesaria para desarrollar el proceso de cianuración CIP en 9 tanques de lixiviación durante aproximadamente 40 horas, se alcanza leyes de 8 kg de Au/ton de carbón, el carbón cargado es direccionado hacia la planta de desorción donde es lavado con una solución caliente que contiene cianuro y alcohol, la

solución enriquecida es finalmente conducida hacia electrodeposición para su precipitación electrolítica.

La disposición de los principales equipos involucrados en el proceso de desorción es representada en la siguiente figura:

Figura 1

Flowsheet general del circuito de desorción



Nota. El diagrama es de autoría propia elaborado según la distribución de los principales equipos del circuito de desorción.

2.0.2. Equipamiento Principal

- 08 chancadoras de quijada
- 10 fajas alimentadoras de chancado
- 02 molinos de bolas 5x6

- 03 molinos de bolas 4x5
- 03 bombas de solución
- 04 bombas de pulpas
- 02 pelitizadores
- 03 reactores de desorción:
 - R1: capacidad de 1,1 t de carbón
 - R2: capacidad de 1,5 t de carbón
 - R3: capacidad de 2,9 t de carbón

2.0.3. Gestión de residuos sólidos

El material residual de la planta de beneficio denominado relave minero, es dispuesto en la cancha de relaves, esta zona tiene la característica de ser en toda su extensión totalmente impermeable, para ello se instala una base de geomembrana a fin de garantizar el confinamiento del pasivo ambiental y evitar fugas, manteniendo de esta manera un círculo cerrado con cero efluentes.

2.1. Antecedentes del trabajo de investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

El efecto de la temperatura sobre la dinámica de desorción es cuantificado en el estudio presentado por Van Deventer & Van der Merwe (1993) de esta forma se pretende diferenciar el efecto de la temperatura frente a los generados por la adición de cianuro y la fuerza iónica. Determinaron que el incremento de temperatura tendrá efecto negativo sobre la adsorción del oro a efectos de descomposición del cianuro en tanto que este incremento mejora

significativamente la dinámica de desorción, la descomposición del cianuro se da principalmente por su hidrólisis y que, además esta, se ve acelerada por el incremento de temperatura, esta degradación ocasiona que la superficie del carbón sea menos susceptible a la adsorción del cianuro áurico, por tanto, se desestabiliza el equilibrio del cianuro de oro razón por la cual se ve enormemente favorecida la desorción, se calculó que la energía de activación para esta descomposición es de $87,1 \text{ kJ mol}^{-1}$, en cuanto a al calor isostérico de adsorción, se contabilizó una disminución de 18,2 a 8,8 kJ al realizarse un pretratamiento con solución de cianuro a elevada temperatura de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ antes de la desorción, entendiéndose que el calor isostérico de desorción es la energía necesaria para que ocurra la desorción, esta disminución favorecerá la dinámica de desorción.

Van Deventer & Van Der Merwe (1994) hacen referencia a la desproporción existente entre la gran cantidad de trabajos enfocados al entendimiento de la adsorción de oro frente a la poca información científica que explique el mecanismo de desorción del oro absorbido, frente a ese contexto, enfocan su investigación para formular el mecanismo de desorción de la especie valiosa sobre el carbón activado cargado, identifican a la adsorción de cationes “espectadores” así como a la adsorción de cianuro en la superficie del carbón como los subprocesos más relevantes en la elución del aurocianuro. Cationes (M^{n+}) como los de potasio presentes en la solución eluyente y en el carbón son denominados “espectadores”, estos desfavorecen la desorción del oro debido a la fuerte absorción con sus pares iónicos como el aurocianuro al formar $M^{n+}(\text{Au}(\text{CN})^-)$; por otro lado, reconocen la importancia de realizar un

pretratamiento con solución de cianuro caustica caliente del carbón donde esta solución reacciona con los grupos funcionales superficiales del carbón pasivándolo e inhibiéndolo de la adsorción de aniones metálicos cianurados ya que al convertir más electronegativa la superficie esta es menos compatible con el par iónico aurocianuro, la eficiencia de esta pasivación está determinada en gran medida por la temperatura y severidad del pretratamiento.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Alvarez & Camargo (2022) desarrollaron la tesis denominada “Optimización en la recuperación de oro del proceso de desorción de carbón activado en la empresa Ecoservicios e Ingeniería limpia S.A.C.”, lograron optimizar a través de un diseño experimental hexagonal los parámetros metalúrgicos más importantes para el proceso de desorción de oro a partir de carbón activado acopiado, insumo que por tener diferente origen al provenir de empresas variadas, presenta características heterogéneas, sumado a ello se presenta la problemática del porcentaje considerable de finos, 28,6% malla -28 según la evaluación granulométrica, pruebas previas de aglomeración del carbón fino seguidas de sus respectivas pruebas de desorción determinaron como mejores parámetros de acondicionamiento el uso de 3 kg de cemento y 3,5 kg de arenas por cada 20 kg de carbón activado, en tanto que las pruebas de desorción señalan a la concentración de cianuro y temperatura de trabajo como parámetros más significativos, es en base a estos criterios que se complementa la evaluación con el uso de un diseño hexagonal, los resultados dan cuenta del porcentaje de recuperación alcanzado de 98,2% en 24 horas, cuando se

optimizan la temperatura y la concentración de cianuro a 86,27 °C y 1,11% respectivamente.

2.2. Base teórica

La historia del oro comienza en la antigüedad, se encontraron pedacitos de oro en cuevas españolas que fueron utilizadas por personas del paleolítico alrededor del 40,000 a.C., el oro es el "hijo de Zeus", escribió el poeta griego Píndaro. Los romanos llamaron el metal amarillo aurum que significa "amanecer brillante", el oro es el primer elemento y primer metal mencionado en la Biblia, donde aparece en más de 400 referencias (Yannopoulos, 1991).

Pocos metales son nobles como el oro, siendo por naturaleza no reactivos, debido a esta característica estos deben ser concentrados por métodos que raramente involucren cambios de fase, esto hace que sea mucho más fácil concentrar oro de soluciones que de fases sólidas, el carbón activado es un adsorbente que incrementa la concentración de oro en la misma fase (Rogans, 2012).

La recuperación de oro y plata a partir de soluciones cargadas mediante el uso de carbón activado consta de tres operaciones comunes en las diferentes plantas extractivas:

- Etapa de cargado: Adsorción de oro y plata de la solución cargada en el carbón.
- Elución o Desorción: Extracción de oro y plata del carbono en una solución más concentrada.

- Regeneración de carbono: Tratamiento físico-químico a fin de recuperar las propiedades del carbón activado.
- Producción de oro metálico: Mediante la electro-obtención o cementación de oro de la solución concentrada eluída.

2.2.1. Carbón activado

La adsorción con carbón es un método común en la remoción de especies disueltas, el carbón es particularmente adepto a remover iones disueltos en bajas concentraciones (Free, 2022)

El carbón activado se introdujo como adsorbente para la recuperación de oro y plata de soluciones de cianuro alrededor de 1880. Sin embargo, la adsorción de oro sobre carbón no podía competir con la filtración y la cementación con zinc hasta principios de la década de 1950, cuando Zadra (1950) desarrolló un proceso para extraer oro y plata del carbono cargado (Yannopoulos, 1991).

Se generaliza el término “carbón activado”, para una familia de materiales carbonáceos altamente porosos que no pueden ser definidos por una fórmula estructural o por análisis químico, en otras palabras, un pedazo de carbón con millones de pequeños agujeros entrelazados (poros) es llamado carbón activado. (Rogans, 2012).

2.2.2. Propiedades y aplicación

Debido a su gran área superficial de $500 - 1500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ y por su gran porosidad debido a su estructura carbonosa, el carbón activado posee la

capacidad de adsorber metales preciosos (Ros, 2017); después del proceso de activación del carbón, la estructura altamente porosa posee un área superficial $1400 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ y un volumen de poro de $0,5$ a $1,8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ (Van Der Merwe, 1991).

Las propiedades más importantes del carbón activado en la recuperación del oro son: (a) capacidad de adsorción; (b) velocidad de adsorción; (c) resistencia mecánica y al desgaste; (d) características de reactivación; (e) distribución de tamaño de partículas; se debe tener en cuenta factores no técnicos como costo y disponibilidad de abastecimiento para seleccionar el tipo de carbón a utilizar (Marsden & House, 2006)

Así mismo, Rogans (2012) afirma que las siguientes características son necesarias debido a la naturaleza de la pulpa: (a) alta afinidad por oro; (b) dureza, resistencia a la abrasión; (c) densidad adecuada para mezclar en pulpa.

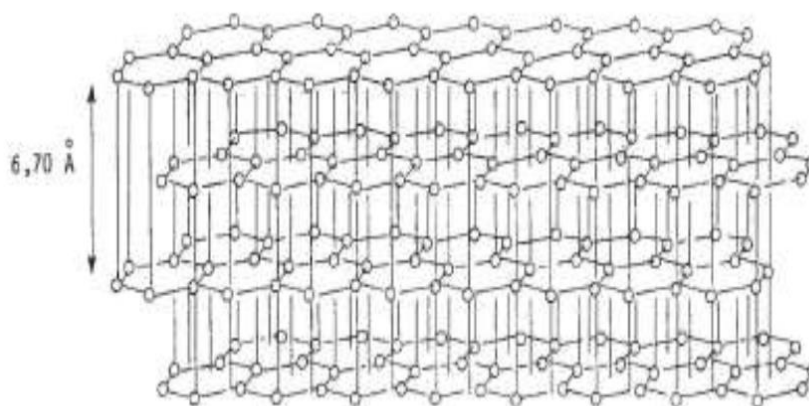
1.1.1.1. Estructura

El carbón activado tiene, aunque menos ordenada, una estructura similar que el grafito. Estudios de rayos x han sugerido que el carbón activado tiene dos estructuras básicas: (a) pequeñas regiones de cristales elementales, compuestas de capas aproximadamente paralelas con átomos ordenados hexagonalmente; (b) red de carbonos hexagonales desordenados,

entrecruzados y espaciados, los cuales son más pronunciados en carbones formados de materiales con alto contenido de oxígeno (Marsden & House, 2006).

Figura 2

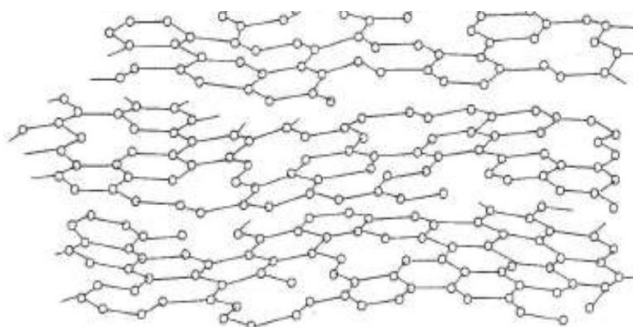
Representación gráfica de la estructura del grafito



Nota: Representación esquemática de la estructura del grafito. Los círculos indican las posiciones de los átomos de carbono, mientras que las líneas horizontales representan enlaces carbono a carbono. Gráfico tomado de GJ McDougall, Carbon School 1985-Lecture 2.

Figura 3

Gráfico de la estructura de carbono de carbón activado



Nota: Representación esquemática de la estructura propuesta de carbón activado. Los grupos funcionales orgánicos que contienen oxígeno se encuentran en los bordes de los sistemas de anillos de grafitos rotos. Gráfico tomado de GJ McDougall, Carbon School 1985-Lecture 2.

2.2.3. Adsorción

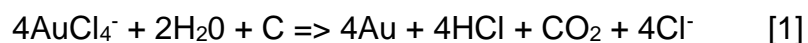
Es importante entender correctamente el mecanismo de absorción debido a que los principales procesos de recuperación del oro (CIP/CIL/CIC) dependen precisamente del resultado de esta adsorción.

La adsorción es un término usado para describir la tendencia de átomos y moléculas en fases líquidas o gaseosas para adherirse en superficies sólidas, se denomina “adsorbado” a la especie separada y que se concentra en la superficie de la fase sólida llamado “adsorbente” (Rogans, 2012).

Si bien es cierto que, aún no existe un consenso general sobre el mecanismo por el cual el complejo auro-cianurado es adsorbido en el carbón activado, investigadores como Jackson (1986) sugieren que la adsorción es un proceso de intercambio iónico, indica que el mecanismo involucra la adsorción de cationes en la doble capa de difusión sobre aniones ya adsorbidos, esta adsorción de pares iónicos sería del tipo $M^{n+}[Au(CN)_2^-]_n$.

Sin embargo, Hiskey, Jiang & Ramodorai (1990) citados por Teirlinck & Petersen (1996) sostienen que para complejos auro-clorurados la adsorción involucra la reducción del oro en la superficie del carbón.

Teirlinck & Petersen (1996) sustentan la reducción del cloruro de oro al estado metálico mediante la siguiente reacción:



2.2.2.1. Técnicas de adsorción

El tratamiento de minerales de baja ley y alto contenido de arcilla mediante los procesos: carbón en pulpa (CIP), carbón-in leach (CIL) y los procesos de carbón en columna (CIC) desplazaron al proceso Merrill-Crow logrando mayor producción a menores costos de capital al presentar menores problemas operativos (Brier & Lee, 2020).

- Carbón en lixiviación

El CIL es un proceso simultáneo de lixiviación de oro (por cianuración) y adsorción sobre carbón activado, aplicable principalmente para el procesamiento minerales carbonáceos de oro, este proceso ayuda a minimizar el problema de pre-robbing (Brier & Lee, 2020).

- Carbón en columnas

Al proceso de enriquecimiento de carbón a partir de soluciones provenientes de lixiviación sin partículas de mineral o concentrado, se le conoce como carbón en columna (CIC). Por lo general, el carbón es parcialmente fluidizado por el flujo de solución de lixiviación hacia arriba a través de columnas CIC, estas son ubicadas a diferentes elevaciones a fin de crear presión de cabeza para el flujo de la solución, este proceso requiere una previa separación de partículas/líquido después de la lixiviación (Free, 2022).

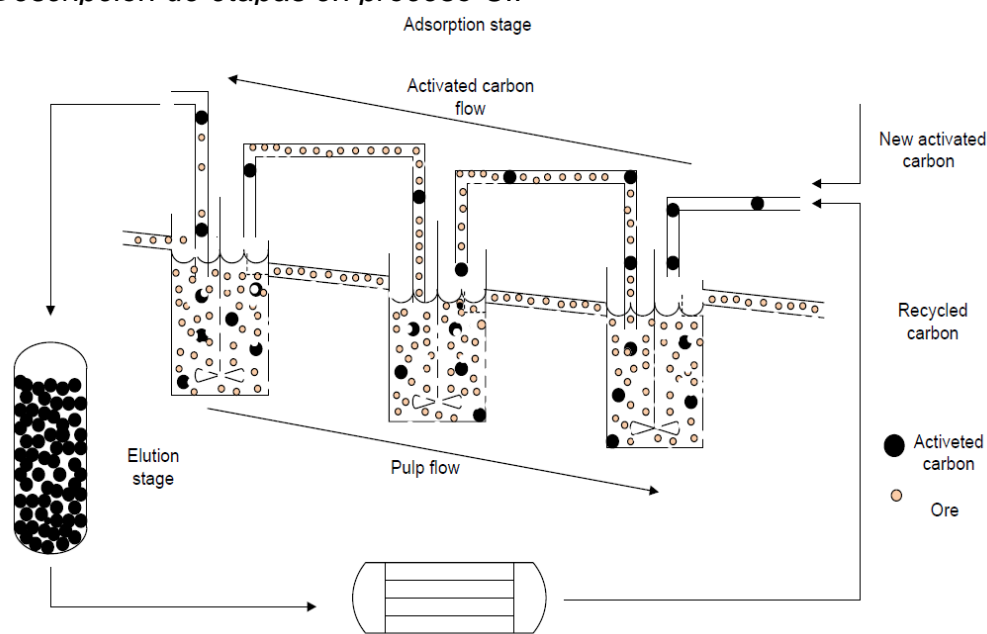
Se mencionaron algunas técnicas en la adsorción del oro a manera de resumen, sin embargo, el recuento bibliográfico estará más enfocado en el proceso de carbón en pulpa (CIP), debido a que es el que actualmente es usado en planta y sobre la cual está basado el presente estudio.

- Carbón en pulpa

El proceso tecnológico en el procesamiento de oro conocido como circuito CIP consiste en las etapas de adsorción, elución y regeneración como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Descripción de etapas en proceso CIP



Nota: Representación gráfica donde se ve los distintos procesos para la obtención de oro. Gráfico tomado de (Philip,2025).

La exposición del carbón con pulpa o suspensión lixiviada con partículas presentes luego de la lixiviación es conocida como el proceso de carbón en pulpa (CIP) (Free, 2022).

El carbón activado se mezcla directamente con la pulpa lixiviada y se adsorbe el oro de la solución, se usa generalmente para tratar menas de baja ley, alimentadas con carbón granular (6- 28 mallas) en contracorriente con la pulpa cianurada (Ros, 2017).

Mediante esta técnica, se puede cargar el carbón con 3000-4000 g Au/ton cuando se retira del primer tanque CIP (último tanque para el flujo de carbón) (Yannopoulos, 1991).

La pulpa se airea vigorosamente y se agita para promover la reacción sólido-líquido, el tiempo de retención requerido depende del mayor tamaño de grano de oro, y puede variar de 2 a 24 horas, el promedio de tiempo de retención varía entre 20 a 60 minutos (Yannopoulos, 1991).

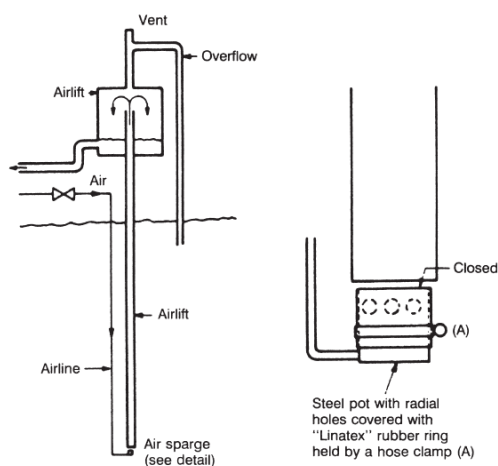
El flujo de la pulpa lixiviada entra en contacto con el flujo del carbón activado por medio de un agitador en cada tanque, además de la agitación, la corriente de aire generado tiene la importante función de facilitar el contacto entre las fases presentes (Abdel-Aziz, 2013; Merchuk & Gluz, 2002 citados por Dueñas, 2020).

Se utilizan dispositivos de cribado entre etapas para la separación de carbón de la pulpa, como zarandas vibratorias, incluso con sistemas de limpieza con aire, con tamaños de mallas determinados sobre cada tanque, la pulpa y el carbón son levantados por medio de un airlift exterior ubicado sobre la zaranda vibratoria por encima del tanque (Yannopoulos, 1991).

La pulpa fluye a través de la zaranda al siguiente tanque CIP en línea, el carbón granular grueso se retenido se devuelto al tanque del que provino. El carbón se mueve a contracorriente entre etapas mediante bombas verticales de impulsor empotradas Figura 5 (Yannopoulos, 1991).

Figura 5

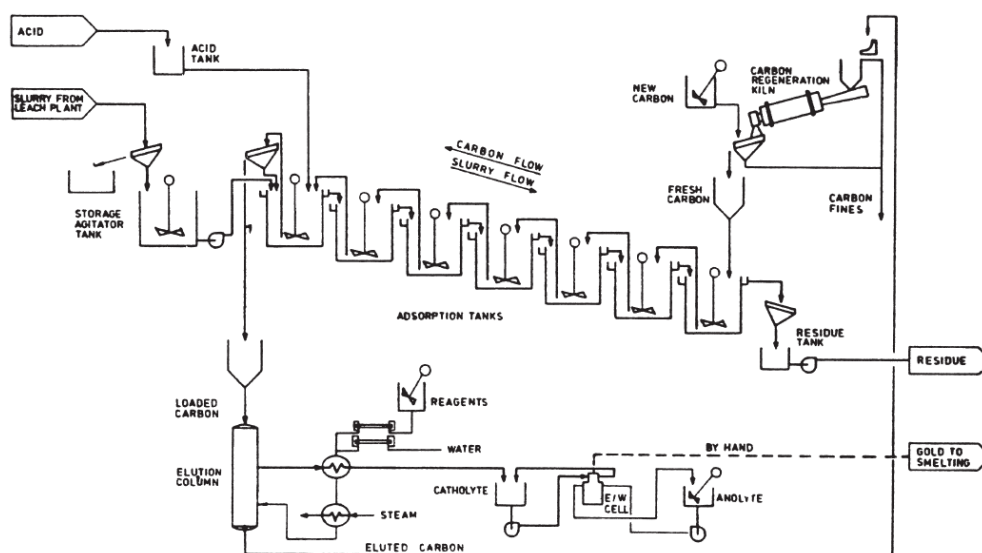
Inyector de aire para transferencias de carbón/lodo



Nota: Esquema usado para la transferencia de aire. Gráfico tomado de G.C. Young, W. D. Duglas and M.J. Hampshire, in Mining Engineering 1984.

Figura 6

Circuito en cascada CIP



Nota: Representación gráfica donde se ve que el flujo de carbono es contrario al flujo de lodo. Gráfico tomado de G.C. Young, W. D. Duglas and M.J. Hampshire, in Mining Engineering 1984

2.2.2.2. Mecanismo de adsorción

El mecanismo de adsorción del oro en la superficie del carbón se puede explicar cómo: (a) La adsorción del complejo aniónico de oro y cianuro se lleva a cabo mediante fuerzas electroestáticas de atracción o de van der Waals; (b) El complejo de oro y cianuro se altera a otra forma y se precipita en forma reducida sobre la superficie de carbono (Brier & Lee, 2020).

La adsorción de complejos auro-cianurados sobre partículas de carbón poroso implica la difusión en los poros y la atracción sobre zonas activas, constituyendo una operación unitaria muy importante en la minería de oro moderna (Yannopoulos, 1991).

Las complejas estructuras físicas y químicas del carbón activado permiten la adsorción de diferentes especies por varios mecanismos, esta es la razón por la que el mecanismo exacto de adsorción de oro a partir de soluciones cianuradas ha sido difícil de determinar (Marsden & House, 2006).

El mecanismo para la adsorción de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ ha sido propuesto por diferentes investigadores, la tabla 3 presenta un resumen de los mecanismos propuestos.

Tabla 3

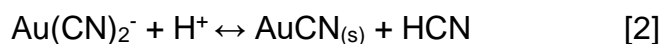
Mecanismo sugeridos de diversos autores para la adsorción de Au(CN)

Teoría	Mecanismos sugeridos	Autores
A	Mecanismo de reducción de Au(CN)_2^-	Green (1913), Feldtman (1914), Edmands (1917),
B	Atracción electrostática de Au(CN)_2^- sobre la superficie cargada positivamente del carbón.	Garten and Weiss (1957), Cho et al. (1979), Kuzminykh and Tjurin (1968)
C	Mecanismo de par iónico con catión en la forma de $\text{M}^{n+}[\text{Au(CN)}_2^-]_n$	Davidson (1974), McDougall et al. (1980), Gross and Scott (1927), Adams and Fleming (1989), Tsuchida et al. (1984), Cho and Pitt (1979)
D	Mecanismo de no par iónico en la forma de Au(CN)_2^-	Jones et al., (1989); Ibrado and Fuerstenau (1992; 1995); Klauber (1991)

Nota: Esquema tomado de (Philip,2015).

- Mecanismo de reducción

Philip (2015) basado en la investigación de Bailey (1987) refiere que el complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ es reducido a su forma de precipitado $\text{Au}(\text{CN})$ sobre la superficie del carbón, el mecanismo es explicado por la siguiente reacción de descomposición:

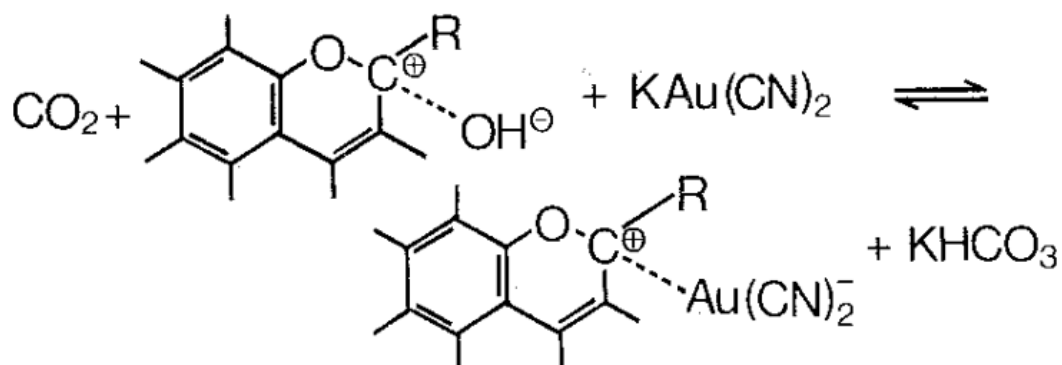


- Mecanismo de atracción electrostática

Sustenta que los aniones $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ se cargan en el carbón mediante un mecanismo de intercambio de aniones que involucraba interacciones electrostáticas simples entre cargas positivas y negativas (Garten et al. (1957) citados por McDougall & Hancock, 1981); basaron esta afirmación en la siguiente reacción:

Figura 7

Formación de aurocianuro



Nota: El gráfico muestra las interacciones electrostáticas del carbono para la formación de aurocianuro. Adaptación tomada de McDougall & Hancock, 1981, Gold complexes and activated carbon

- Mecanismo de par iónico

McDougall et al. (1980) concluyen que $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ no puede ser adsorbido sin la presencia de cationes estabilizadores bajo condiciones alcalinas; del

mismo modo Marsden & House (2006) refieren que la extracción de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ es mejorada por la presencia de electrolitos de Ca y K.

(Adams, 1989) la siguiente reacción que sustenta la adsorción mediante la formación del par iónico:



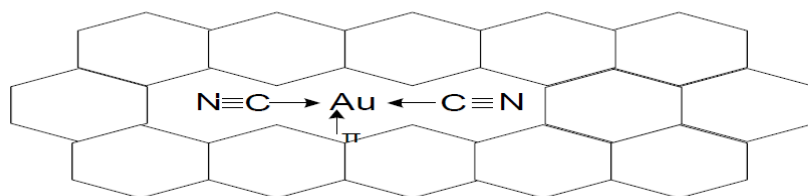
donde M^{n+} puede ser cualquiera de Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+

- Mecanismo de no par iónico

A fin de probar el estado químico exacto del adsorbato, estudios tanto con espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) e infrarrojo (IR) han indicado que el ion aurocianuro se adsorbe en pequeñas placas de grafito en el carbón activado como un ion complejo intacto con una transferencia parcial de electrones al ion oro (I) (Jai et al., 2011).

Figura 8

Interacción entre el carbón activado y $\text{Au}(\text{CN})$



Nota: El gráfico muestra las interacciones entre el carbono y el ion aurocianuro. Adaptado de de (Ibrado, 1994).

2.2.2.3. Especies de oro adsorbidos

Comprender la naturaleza del oro adsorbido permite darnos una idea del requerimiento de reactivos necesarios para la subsecuente etapa de elución, (Adams, 1989) sugiere que probablemente las principales formas del oro adsorbido sobre la superficie del carbón activado son: Au(s), AuCN, Au(CN)₂⁻ o Mⁿ⁺[Au(CN)₂]_n.

Investigaciones detalladas usando espectroscopia Mossbauer y espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS o ESCA) sobre soluciones típicas de lixiviación de oro, mostraron que complejos cianurados de oro son adsorbidos predominantemente como par iónico Mⁿ⁺[Au(CN)₂]_n (Harris et al., 1994; Frostiak, 2000 et al. citados por Marsden & House, 2006).

2.2.2.4. Factores que influyen en la adsorción

El trabajo presentado por Fleming & Nicol (1984) concluye que las variables más importantes que afectan el equilibrio de carga en la adsorción de oro cianurado, son la fuerza iónica, el valor de pH y la temperatura de la solución.

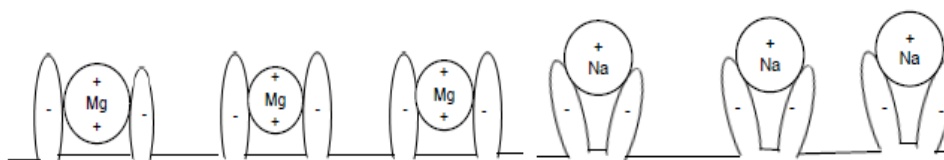
- Fuerza iónica

El efecto de la fuerza iónica de la solución sobre la carga de carbono es significativo, Davidson (1974) citado por Yannopoulos (1991) demostró experimentalmente que el grado en que varios complejos de cianuro de oro se adsorben en el carbón activado depende de su catión, el auro-cianuro de calcio parece ser el más fuertemente complejo adsorbido.

Philip (2015) sugiere que la fuerza iónica es mayor para cationes divalentes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) debido al mayor número de oxidación que cationes monómeros (Na^{1+} y K^{1+}) consecuentemente, la mayor magnitud fuerza iónica de Mg^{2+} causará una mejor interacción con el de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ que con Na^+ como se muestra en la figura 9.

Figura 9

Efecto de iones



Nota: El gráfico muestra la mayor magnitud de fuerza que poseen los iones divalentes respecto a los monovalentes (Philip,2015).

- Concentración de cianuro

Una mayor concentración de cianuro libre tiene un efecto perjudicial sobre la adsorción de oro con carbón. Sin embargo, el cianuro libre en solución impide la co-adsorción del cobre; por lo tanto, se recomienda una solución con cianuro libre en la adsorción de oro sobre el carbón desde el licor cargado de lixiviación de minerales de oro que contienen cobre (Brier & Lee, 2020).

- El efecto del pH

Dependiendo del pH en la solución, los valores de potencial zeta del carbón cambian de positivo a negativo, y por lo tanto el comportamiento de adsorción del carbón para adsorber iones protones e hidroxilos cambian también con respecto al pH. Se ha encontrado que la carga de equilibrio de oro sobre el

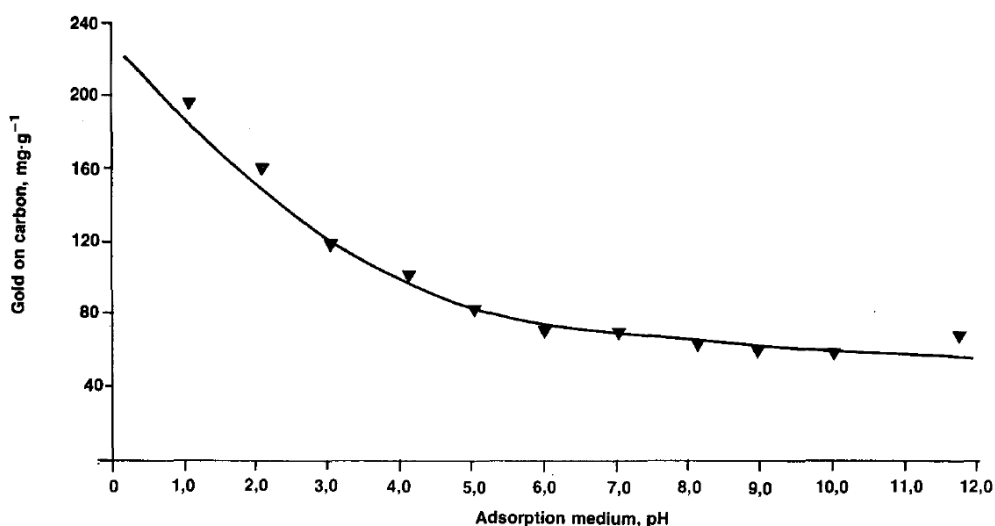
carbón aumenta con un pH más bajo. Las influencias de los iones Ca^{2+} y OH^- son opuestas en la práctica, una alta concentración de Ca^{2+} mejora la adsorción de oro, mientras que un pH alto disminuye la carga de adsorción de oro (Van Der Merwe, 1991).

Dado que tanto los iones de hidrógeno como los de hidróxido tienden a ser adsorbido por el carbón, el pH afecta la capacidad de adsorción del carbón. La carga de equilibrio de oro en el carbón aumenta con un pH más bajo, el pH se ajusta con cal; altas concentraciones de calcio mejoraran la adsorción de oro, mientras que un pH alto la disminuirá (Yannopoulos, 1991).

La figura 10 corresponde a los resultados de la evaluación efectuada por McDougall et al. (1980) donde se evaluó la capacidad de adsorción de oro del carbón en función del pH de una solución que contenía 190 mg Au/l.

Figura 10

Capacidad de adsorción de oro versus pH



Nota: Efecto del valor de pH del medio de adsorción sobre la capacidad de oro del carbón (condiciones experimentales: volumen de solución 300ml, masa de carbón 0,25gr, atmósfera de nitrógeno, concentración inicial de oro 190mg.l. Diagrama tomado de (McDougall, 1980).

La adsorción es virtualmente independiente del valor de pH en el rango de 12 a 6, mientras que la capacidad de oro aumenta fuertemente con valores de pH en el rango de 5 a 1, la adsorción máxima es 60 mg de oro por gramo de carbono a pH 12, en comparación con 200 mg de oro por gramo de carbono a pH 1,0.; la velocidad de carga es constante a partir de pH 6,0, debajo de este valor la velocidad aumenta al disminuir pH (McDougall et al., 1980).

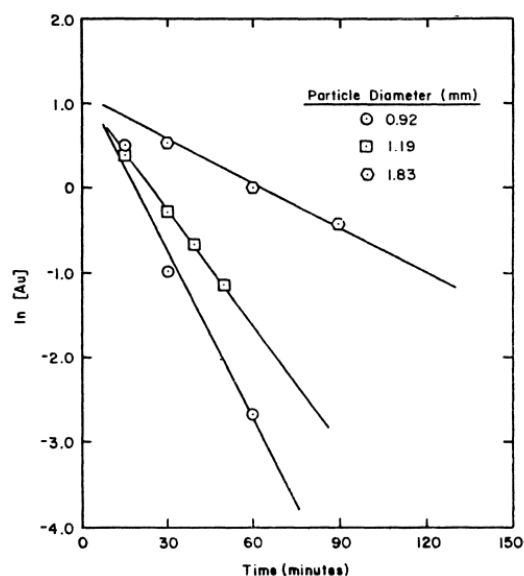
- Tamaño de partícula

La velocidad de adsorción se ve afectada significativamente por el tamaño de las partículas de carbón, tamaños de partícula más pequeños, para la misma masa de carbono, mejoran la adsorción de oro debido al aumento en área superficial (Yannopoulos, 1991).

La velocidad de adsorción se ve significativamente afectada por el tamaño de partícula de carbón, con partículas más pequeñas de tamaño, hay una mayor tasa de adsorción debido a una mayor superficie de adsorción. Aunque el rango de tamaño de las partículas es relativamente pequeño en un circuito, sin embargo, es significativo. (Brier & Lee, 2020).

Figura 11

Diámetro de partícula de Au y tiempo de adsorción



Nota: Efecto del tamaño de partícula sobre la tasa de adsorción de oro [Au] = 3 ppm; diámetro = 2,18 mm de oro 190mg.l. Diagrama tomado de (Brier & Lee,2020).

- Presencia de oxígeno

El efecto de oxígeno disuelto en la adsorción de oro a partir de soluciones cianuradas es más significativo en soluciones de baja fuerza iónica, las cuales son la mayoría de soluciones industriales de lixiviación, a pesar de esto, algunos beneficios son observados en actuales sistemas de adsorción especialmente como catalizador en la oxidación del cianuro, resultando en la disminución de la concentración de cianuro favoreciendo a la adsorción (Marsden & House, 2006).

Se supuso que la funcionalidad del oxígeno superficial desempeñaba un papel importante en la adsorción de oro. Sin embargo, no se encontró que la

concentración de oxígeno en la superficie de carbono se correlacionara con las características de adsorción de oro (Jia et al., 1998).

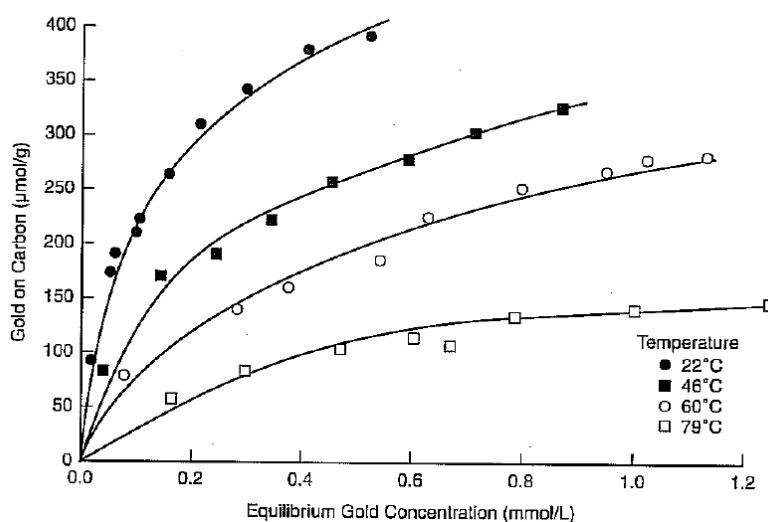
- Temperatura

Marsden & House (2006) indican que la adsorción de oro sobre carbón activado es exotérmica, lo que explica la capacidad de revertir la adsorción al aumentar la temperatura, consecuentemente, la capacidad disminuye en tanto la temperatura se incrementa.

La figura 12 muestra la relación inversa de la capacidad de adsorción y la temperatura.

Figura 12

Relación inversa de la capacidad de adsorción y temperatura

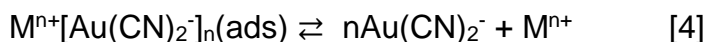


Nota: La gráfica muestra isoterma de adsorción en equilibrio para cianuro de oro sobre carbón a diferentes temperaturas. Diagrama tomado de (Marsden & House,2026).

2.2.3. Elución

Esencialmente la elución es un proceso contrario a la adsorción, el carbón activado cargado usado en la adsorción es “despojado” del oro por medio de la elución para formar una solución concentrada la cual es posteriormente procesada por electrowinning para recuperar el oro (Lodi, 2006).

Marsden & House (2006) describen al proceso de desorción, comúnmente referido como elución, como un proceso inverso a la adsorción, indican que los factores químicos y físicos que inhiben la adsorción generalmente mejoran la desorción, presentan la siguiente reacción simple para describir a la desorción.



La adsorción de oro por el carbón activado está controlada por un fenómeno químico determinado por una serie de factores, invertir la acción de estos factores claves que favorecen la adsorción revertirá el mecanismo de adsorción (Rogans, 2012).

El carbón activado que ha sido cargado con oro y otros metales en el proceso de adsorción debe ser tratado en la etapa de elución para desorber los metales desde el carbón, esto produce una solución de alto contenido de oro que es adecuado para la recuperación final del oro a través de electro-winning o precipitación con polvo de zinc, además permite al carbón ser reciclado para ser utilizado nuevamente en el circuito de adsorción, típicamente el carbón es

reusado entre 100 y 400 ciclos de adsorción dependiendo de la calidad y la efectividad del proceso de reactivación aplicada (Marsden & House, 2006).

Snyders et al. (2017) indican que es ampliamente aceptado que el rendimiento del circuito de adsorción influye directamente a los circuitos de elución y regeneración de carbón, sin embargo, lo que es a menudo ignorado es como el rendimiento de la elución y la regeneración influirán en el circuito de adsorción.

Con el fin de alcanzar bajas pérdidas en la solución barren en el circuito de adsorción, es importante mantener una concentración baja de oro en el carbón en la última etapa de adsorción, lo cual significa que el carbón debe ser siempre eluído eficientemente (Fleming et al., 2011 citados por Snyders et al., 2017).

Se demostró que podría ocurrir un incremento de pérdidas de oro soluble del 370% incrementando de cero a 50 g/t el contenido de oro en el carbón eluído que se reciclará para el circuito de adsorción (Fleming et al., 2011).

El carbón activado, al ser un excelente adsorbente para el oro soluble, no cede fácilmente al oro adsorbido, desde la invención del método Zadra para eluir oro y plata de carbón activado cargado, se ha promovido el uso de carbón activado en la extracción de oro de sus minerales, así mismo una serie técnicas que requieren un periodo de tiempo más corto que los de Zadra se desarrollaron posteriormente, todas las técnicas de elución se basan en la transferencia de masa de oro soluble acomplejado, generado por un gradiente de concentración favorable y altas temperaturas (Yannopoulos, 1991).

2.2.3.1. Técnicas de Elución

Las técnicas de elución comúnmente usados industrialmente son el proceso Zadra, el proceso con alcohol Heinen y el proceso Anglo American Research Laboratories AARL llevados a cabo en columnas de elución similares a lo mostrado en la figura 13(Philip, 2015).

Además, un número de variaciones de cada uno de estos métodos han sido desarrollados para adaptarse a las necesidades propias de cada operación y en la búsqueda de mejores resultados en tema de costos operativos, aspectos ambientales y mejores cinéticas de desorción.

Figura 13

Figuras de columnas de elución



Nota: Columnas de elución típicas que sirve para pone ren contacto soluciones para extraer los complejos de cianuro y los metals presents. Figura adaptada de (Philip,2015).

- Proceso de elución con alcohol Heinen

Fue desarrollado por H. J. Heinen et al. en el U.S. Bureau of Mines en 1976, este proceso es una extensión del proceso Zadra, propone la adición de alcohol en 20% v/v a la solución de elución (0,1 NaCN, 1% NaOH y 20% etanol a 80°C). La adición de alcohol reduce el tiempo del ciclo de elución a cinco o seis horas, por lo tanto, el tamaño de infraestructura operativa se reduce drásticamente (Yannopoulos, 1991).

En el proceso de desorción, iones de oro y plata son liberados del carbón activado al ser contactados con NaOH y NaCN conteniendo además un solvente como el etanol, metanol, acetona o acetonitrilo; el solvente orgánico etanol es capaz de aumentar la actividad de CN^- y $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, como resultado, la liberación de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ en el solvente resulta más eficaz, el solvente reduce la actividad superficial del electrolito y genera mayor facilidad para “mojar” el carbón, haciendo más rápida la velocidad de desorción (Tahli & Wahyudi, 2017).

Las principales desventajas de este sistema son los altos riesgos de incendio y explosión asociados con el alcohol, así como el mayor costo de operación debido a la pérdida de alcohol por volatilización. El carbón despojado por esta técnica no requiere regeneración frecuente (Yannopoulos, 1991).

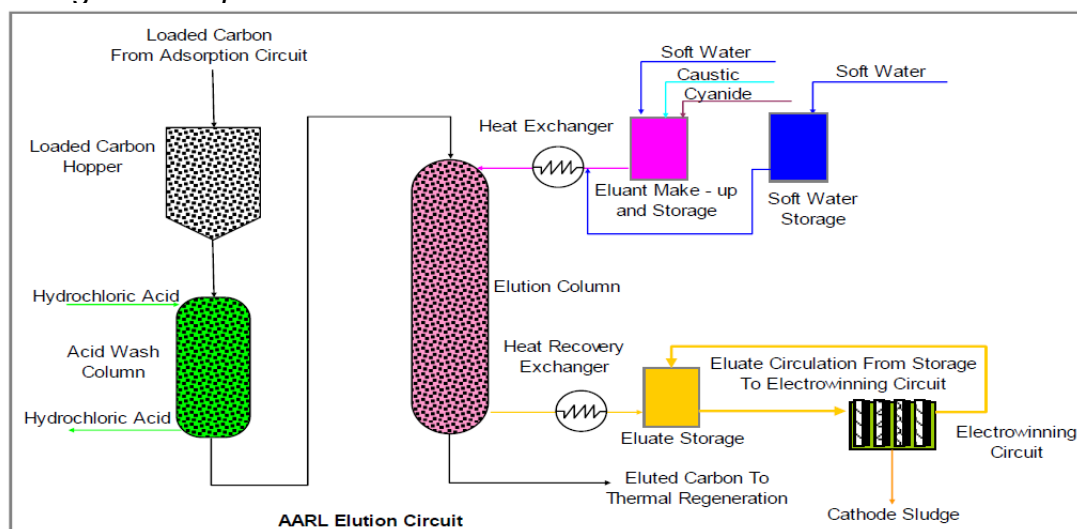
- Proceso de elución angloamericano AARL

Fue desarrollado por R. J. Davidson e implica el pre-acondicionamiento del carbón cargado con la mitad de volumen de lecho con NaOH al 5 % y NaCN al 1 % durante 30 minutos a una hora, y luego el carbón con cinco volúmenes de

lecho con agua caliente (110 °C) a un caudal de tres volúmenes de cama por hora (BV/h). La alta temperatura de funcionamiento impone una presión de trabajo de 50-100 kPa. El tiempo total del ciclo, incluyendo el pre-lavado ácido, es de nueve horas, considerablemente más corta que la del tratamiento atmosférico Zadra (Yannopoulos, 1991).

Figura 14

Configuración típica del circuito AARL



Nota: Proceso de la AARL el oro es recuperado por electrodeposición a través de una serie de actividades mostrados. Figura adaptada de (Rogans,2012).

- Proceso de elución Zadra

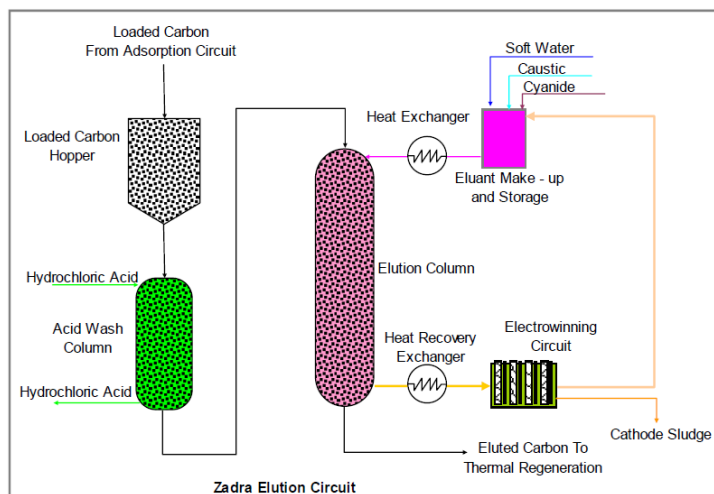
En este proceso la desorción y electro-winning operan simultáneamente por recirculación continua de la solución de elución a través de la columna de elución y las celdas de electrodeposición en serie, esta es una característica diferente del proceso AARL.

Una solución que contiene aproximadamente 1 a 2% de hidróxido de sodio y 0.1% de cianuro de sodio es usado a 95 °C, con un caudal de 2 bv/h. Este proceso conlleva entre 36 y 72 horas para eluir el carbón cargado hasta una carga residual menor a 100 g/t (Marsden & House, 2006)

La solución cianuro-cáustica es bombeada hacia la columna de desorción con un caudal de 2 a 3 bv/hora, previamente calentada, esta solución enriquecida es enviada a electro-winning dónde se deposita el oro en los cátodos, la solución despojada retorna hacia la columna de elución a través de bombas de alimentación previo acondicionamiento (Rogans, 2012). La figura 15 describe un circuito típico del proceso Zadra.

Figura 15

Circuito típico del proceso Zadra.



Nota: Proceso Zadra consiste en circular en el sistema solución de hidróxido de sodio al 1%. Figura adaptada de (Rogans,2012).

2.2.3.2. Factores que influyen en la elución

- Temperatura

Todas las plantas de desorción operan con elevadas temperaturas, la tendencia moderna está orientada a plantas de elución que trabajen a

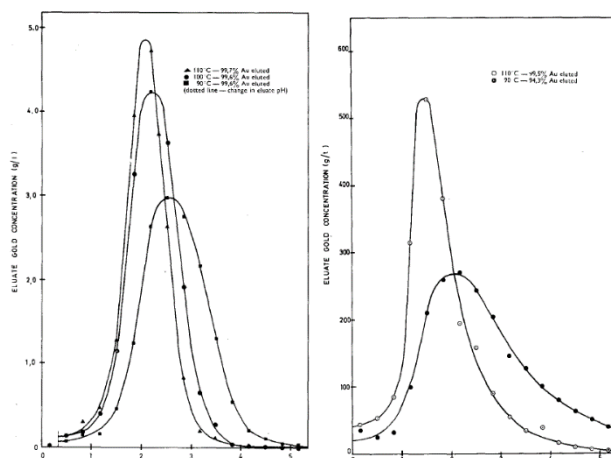
temperaturas por encima de 100 °C con el uso de equipos de alta presión (Rogans, 2012).

La investigación realiza por Davidson & Veronese (1979) concluye que la temperatura es la variable operacional más importante en la elución del oro, sugieren además, un rango de trabajo entre 100 a 110 °C para la elución de oro de carbón activado, describen ventajas en este rango de trabajo como tiempos de operación más cortos (2 a 3 horas) debido a caudales de elución más altos que a su vez son más concentrados para la posterior electro-obtención de oro.

La figura 16 describe gráficamente el efecto de la temperatura en la elución de oro de dos muestras diferentes de carbón activado cargado. La elución fue evaluada a diferentes temperaturas incrementando los caudales de elución (BV/h) para ambas muestras, Davidson & Veronese (1979) reportan el efecto significativo al incrementar la temperatura de 90 a 110 °C alcanzando recuperaciones de 99,6% después de 6 BV a 110 °C frente a 94,3% después de 6 BV a 90 °C en una de las muestras.

Figura 16

Efecto de la temperatura en la elución de oro de dos muestras diferentes de carbón activado

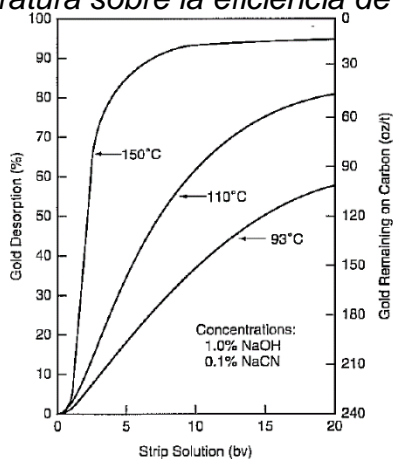


Nota: Efecto de las temperaturas en la elución de dos muestras de carbono. Tomada de (Davidson & Veronese, 1979).

La temperatura es el factor más importante en la elución de oro cianurado en carbón activado. Por ejemplo, la velocidad de elución a 180 °C es 8 veces más rápida que a 90 °C a presión atmosférica, la figura 17 muestra el efecto de la temperatura sobre la eficiencia de desorción del oro; aunque es posible reducir sustancialmente los tiempos de elución operando a temperaturas mayores a 100 °C, se requiere el uso de presiones elevadas para mantener el medio eluyente en la fase líquida (Marsden & House, 2006).

Figura 17

Efecto de la temperatura sobre la eficiencia de desorción del oro



Nota: Efecto de la temperatura en la desorción de oro empleando la solución del proceso Zadra (Marsden & House, 2006).

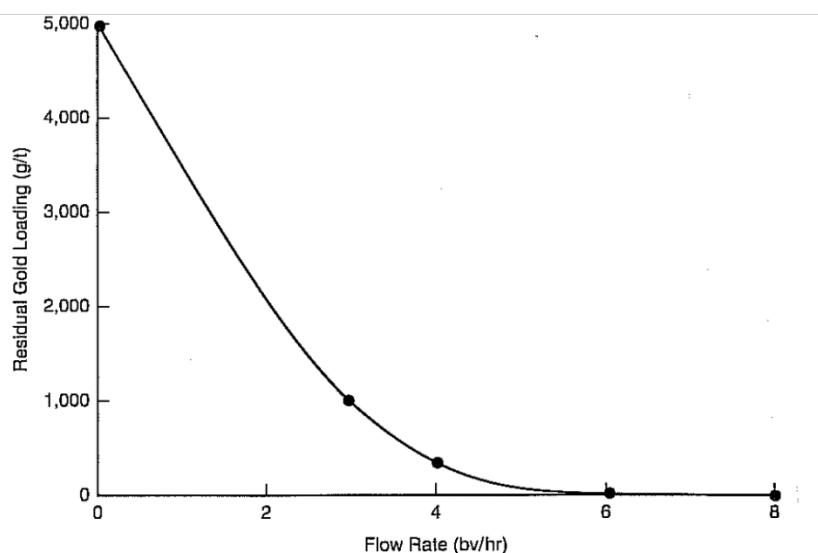
- Caudal de solución

El flujo o caudal de la solución de elución es expresado normalmente en volumen de cama de carbón por hora (bv/h).

La velocidad de elución tiende a ser virtualmente independiente de la velocidad del flujo sobre 1 bv/h, sin embargo, el oro residual cargado en el carbón disminuye con el incremento de la velocidad del flujo después de un tiempo fijo como cómo muestra tal como se muestra en la figura 18.

Figura 18

Elución y la velocidad del flujo



Nota: Efecto del caudal sobre la carga promedio de oro residual después de 20 horas. Adaptada de (Marsden & House, 2006).

En pruebas efectuadas por Davidson & Veronese (1979) en diferentes muestras de carbón, variando el flujo de elución a 110 °C, se encontró que la

diferencia de eficiencias de elución en todos los casos marginales. Sin embargo, los resultados sugieren que el carbón mejor eluído fue a un flujo de 3 bv/h, mientras un flujo más rápido de 5 bv/h puede ser usado para la elución de carbón de tamaño más fino.

Altos flujos en los ciclos de elución (2 a 2.5 bv/h) son importantes para movilizar o extraer el oro cianurado del interior del carbón activado. Las condiciones de elución son favorables para la formación de incrustaciones, éstas se forman en sitios como intercambiadores de calor, boquillas de tuberías, etc. la formación de estas incrustaciones disminuirán el flujo y reducirán la transferencia de calor, por lo tanto, impactarán negativamente a la elución, es importante usar agua pura y químicos tanto como sea posible (Rogans, 2012).

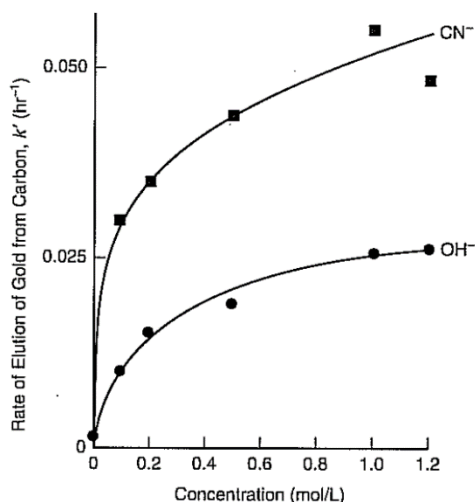
Típicamente, velocidades de flujo de 2 a 4 bv/h son usados para producir un carbón con baja carga residual de oro, evitando al mismo tiempo la necesidad de tratar volúmenes excesivamente grandes de eluyente (Marsden & House, 2006).

- Concentración de cianuro e hidróxido

El efecto de la concentración de cianuro en la disolución de oro se ilustrada en la figura 19. El incremento de la concentración de cianuro aumenta la competencia de iones cianuro con especies cianuradas de oro por los lugares de adsorción sobre el carbón ayudando al desplazamiento del oro del carbón (Marsden & House, 2006).

Figura 19

Concentración de cianuro en la disolución de oro



Nota: Variación de la velocidad de elución con la fuerza del eluyente a una fuerza iónica constante. Adaptada de (Marsden & House, 2006)

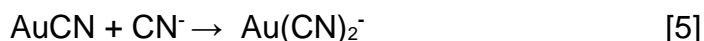
La disminución en la velocidad de elución a concentraciones más altas se atribuyó a el efecto opuesto del cianuro y la fuerza iónica. fue ilustrado que, a una fuerza iónica constante (logrado por la adición de NaCl), un aumento en las concentraciones de cianuro e hidróxido dio como resultado una cinética de desorción.

2.2.3.3. Mecanismos de elución

- Basado en la naturaleza del oro absorbido

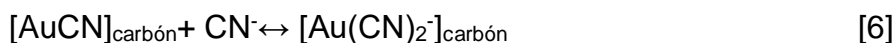
Según este mecanismo la naturaleza del oro adsorbido determina la necesidad de CN⁻ en el proceso de elución. El complejo AuCN es fuertemente adsorbido en el carbón mientras que (AuCN)₂⁻ es más soluble en agua y más fácilmente desorbido de la superficie del carbón, por tanto, la adición de CN⁻

resultará en el cambio de la naturaleza del oro adsorbido según la reacción 4 (Davidson & Bailey, 1991 citados por Philip, 2015).



- Basado en la adsorción competitiva del cianuro

De acuerdo a esta teoría, la presencia de CN^- causa una competencia por los sitios de adsorción con $(\text{AuCN})_2^-$, desplazando así el $(\text{AuCN})_2^-$ de la superficie del carbón produciéndose de esta forma la elución (Adams and Nicol, 1986 citados por Philip, 2015).



- Basado en la pasivación de la superficie del carbón

La capacidad de adsorción de oro en un carbón fresco de una solución con 24,5 mg Au/L es más alta que un carbón enjuagado con 20 g/L de KCN (pre-tratado) antes de ser usado en adsorción. Esta baja adsorción sugiere que habría formación de CN^- degradado que se deposita en la superficie del carbón activado durante el pre-tratamiento resultando en una mejora en la elución del oro por la baja receptividad del oro en la adsorción (Van Der Merwe, 1991).

2.3. Definición de términos

- DOE
- Fuerza de cianuro
- Calor isostérico neto
- Desorber un gas, un líquido o una sustancia disuelta de una superficie en la que esté adsorbido significa retirarlo de esa superficie
- Solución barren

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.0. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Planteamiento metodológico

El método estructurado de recopilación y análisis de data real de planta permitirá la obtención de menores tiempos de extracción a partir del mejor control de temperatura en la solución de desorción; se propone la aplicación del método de investigación analítico cuantitativo correlacional no experimental apoyado del uso de herramientas estadísticas y matemáticas a fin de cuantificar el problema de investigación, la presente investigación presenta características del tipo analítico correlacional, es decir que busca la relación entre variable dependiente y variables independientes sobre la data histórica proporcionada por la empresa en mención.

3.2. Población y muestra

Bajo la perspectiva antes detallada, la población sobre la que se aplica el análisis estadístico es finita y limitada a un periodo de tiempo, la presente investigación presenta muestreo no probabilístico, el sustento para no realizar un muestreo aleatorio se da por la diferencia mínima entre el número de muestras y la población total, sin embargo, con fines demostrativos se establece el cálculo del tamaño de muestra basado en la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} \quad [8]$$

Donde:

n = tamaño de muestra

N = tamaño de la población

Z² = valor de estadístico Z según el nivel de confianza

p = probabilidad de ocurrir un evento estudiado (éxito)

q = probabilidad de que no ocurra el evento estudiado (1-p)

e = error estimado

Según lo indicado, considerando un nivel de confianza de 95%, se establece los siguientes valores: Z=1,96; p=0,5; q= 0,5; e=0,05 y N= 12, el tamaño calculado es de 11,7 muestras por lo tanto se utilizará toda la población para el análisis respectivo. La población corresponde a un total de 12 campañas correspondientes al periodo enero – marzo del 2023, en las 8 primeras campañas se aplicará el análisis estadístico respectivo para posteriormente en las 4 últimas campañas evaluar las mejores condiciones de temperatura.

3.3. Equipos y Materiales

A continuación, se menciona los principales equipos utilizados en planta dentro de la etapa de desorción:

- Reactores

Son columnas de gran altura, forradas con material refractario para soportar altas temperaturas y presión alta, por donde circula la solución que contiene oro y los reactivos.

- Tanque de acondicionamiento

Es un depósito por donde circula la solución proveniente de la descarga de la celda electrolítica, en donde se agrega en algunas ocasiones el alcohol.

- Tanque de preparación de solución de NaCN

Es el recipiente en donde se prepara la solución de cianuro de sodio y soda caustica.

- Caldero

Equipo auxiliar encargado de proporcionar la energía necesaria para calentar soluciones, este equipo es asistido por intercambiadores de calor, que es un sistema de tuberías por donde circula la solución que va siendo calentada.

- Quemador

Es el impulsor que se enciende con una chispa y con ayuda del aire y gas generan el calentamiento de las tuberías.

- Faja transportadora

Equipo por donde se evacua el carbón desorbido.

- Celda electrolítica

Corresponde a las instalaciones donde ocurren las reacciones electroquímicas, donde el consumo de energía eléctrica impulsa las reacciones no espontáneas de óxido reducción para precipitar el oro.

- Rectificador

Es un dispositivo que permite administrar corriente eléctrica a la celda de manera óptima.

- Campana extractora de gases

Es un equipo que sirve para absorber los gases generados por el calentamiento de la solución en la celda.

- Bomba de succión de mano

Es un tipo de bomba de uso práctico utilizado para administrar alcohol al proceso.

- Bomba estática

Bomba para transferencia de solución con 3HP de potencia, presenta caja de bombeo de acero inoxidable.

Dentro de la etapa de desorción se utiliza los siguientes reactivos:

- Cianuro de Sodio (NaCN)
- Soda Caustica (NaOH)
- Alcohol (OH)

Algunos de los materiales utilizados en las tareas rutinarias son:

- Botellas de vidrio: Utilizados para muestreo de solución

- Balones de gas: Insumo importante para poder usar el quemador que impulsará el aumento de temperatura en el proceso.

3.4. Procedimiento de las pruebas experimentales

El presente trabajo tiene características de una investigación no experimental, motivo por el cual, la elaboración de un procedimiento de pruebas queda exceptuado.

3.5. Técnicas de recolección de datos

Se desarrolló un muestreo no probabilístico, es decir que no fue necesario aplicar la aleatoriedad para la selección de muestras al contar con una población muy pequeña, el correcto almacenamiento digital del seguimiento metalúrgico de los valores operativos permite contar con el respaldo necesario para ser fuente de colección de los datos vertidos en la presente investigación.

3.6. Técnicas para el procesamiento de datos

Se utilizará los siguientes programas en el análisis estadístico de la data proporcionada:

- MS EXCEL
- MINITAB 19

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.0. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Descripción de las pruebas experimentales

De acuerdo con lo argumentado en el marco metodológico sobre el tipo de diseño, no se realizaron pruebas experimentales, sino que a partir de data recopilada del proceso por un periodo de 3 meses se constituye y desarrolla el presente trabajo a fin de mejorar la eficiencia de desorción, de acuerdo a esa línea de investigación corresponde detallar las variables operativas, siendo estas, el porcentaje o fuerza de cianuro, la alcalinidad del medio valorado en términos de pH y la temperatura de ingreso de la solución eluyente, las variables mencionadas tienen influencia sobre la cinética de desorción del oro, por lo que serán consideradas variables independientes, o más propiamente, como variables predictoras, así mismo, el porcentaje de recuperación de oro representará la variable dependiente y es a partir de esta que se determinará el grado de significancia de las variables mencionadas.

El control estricto de las variables mencionadas en la planta donde se desarrolla el presente trabajo permite generar un registro de data la cual servirá de materia prima para el siguiente análisis.

4.2. Presentación y análisis de los resultados

Se explicó anteriormente la división de las 12 campañas en tres secciones, las primeras cuatro campañas representan la primera sección donde

se analiza la influencia de la temperatura sobre las otras variables; las siguientes tablas muestran la data de cada una de las campañas que se utilizaran en los siguientes análisis estadísticos:

Tabla 4

Variables de campaña 1

Fecha	Recuperación	CN	Alcalinidad	Temperatura
	%	%	pH	°C
02/01/2023	21.12	0.46	13.00	60
03/01/2023	31.52	0.40	12.50	64
04/01/2023	43.48	0.78	13.00	65
04/01/2023	57.68	0.80	13.00	73
04/01/2023	73.30	0.80	13.00	82
05/01/2023	77.88	0.48	12.00	78
05/01/2023	87.73	0.56	13.00	80
05/01/2023	90.54	0.45	13.00	80
06/01/2023	91.05	0.28	13.00	80
06/01/2023	91.30	0.25	13.00	79

Tabla 5

Variables de campaña 2

Fecha	Recuperación	% CN	pH	T °C
	%	%	pH	°C
07/01/2023	35.06	0.47	13.00	62
08/01/2023	65.91	0.43	13.00	80
08/01/2023	82.51	0.48	13.00	84
08/01/2023	88.67	0.45	13.00	82
08/01/2023	89.75	0.41	13.00	81
09/01/2023	90.49	0.38	12.50	80
09/01/2023	90.69	0.35	13.00	80
09/01/2023	90.79	0.26	13.00	81
10/01/2023	90.83	0.24	13.00	78
10/01/2023	90.85	0.24	13.00	79

Tabla 6*Variables de campaña 3*

Fecha	Recuperación	% CN	pH	T °C
11/01/2023	%	%	pH	°C
11/01/2023	2.49	0.22	13.00	50
11/01/2023	5.88	0.21	13.00	61
11/01/2023	9.55	0.20	13.00	78
11/01/2023	13.50	0.18	12.50	84
11/01/2023	16.20	0.26	13.00	84
11/01/2023	18.36	0.24	13.00	86
11/01/2023	19.17	0.21	12.50	82
12/01/2023	19.56	0.14	12.50	85
12/01/2023	19.75	0.12	12.50	81
12/01/2023	19.93	0.10	13.00	81

Tabla 7*Variables de campaña 4*

Fecha	Recuperación	% CN	pH	T °C
03/02/2023	%	%	pH	°C
03/02/2023	14.37	0.47	13.00	61
03/02/2023	31.87	0.49	13.00	74
03/02/2023	50.43	0.47	13.00	76
03/02/2023	62.86	0.50	12.50	80
04/02/2023	74.95	0.47	13.00	78
04/02/2023	83.34	0.46	14.00	79
04/02/2023	86.31	0.37	13.00	81
04/02/2023	86.65	0.42	13.00	79
05/02/2023	88.57	0.36	13.00	80
05/02/2023	90.16	0.58	13.00	80

Los detalles de todos los valores para el cálculo de las recuperaciones en cada una de las campañas quedan referenciados en el anexo del presente trabajo.

4.2.1. Caracterización de variables

Establecidas las variables independientes y de respuesta, se analiza la interacción entre estas variables mediante el análisis de correlación, posteriormente con la aplicación de regresiones múltiples se determina la relevancia de cada una de estas variables.

4.2.1.1. Correlación de variables

Se mide el grado de correlación existente en cada una de las variables predictores con la variable respuesta, los valores de correlación Pearson cercanos a 0 indicaran baja correlación mientras que valores cercanos a 1 indicaran buena correlación, se utilizó un nivel de significancia de $\alpha=0,05$.

Se resume los resultados obtenidos en la siguiente tabla:

Tabla 8

Análisis de correlación

Variable 1	Variable 2	Campaña 1		Campaña 2		Campaña 3		Campaña 4	
		Correlación	Valor p	Correlación	Valor p	Correlación	Valor p	Correlación	Valor p
CN	Recuperación	-0,272	0,447	-0,517	0,126	-0,430	0,215	-0,242	0,500
Alcalinidad	Recuperación	0,077	0,832	-0,174	0,632	-0,480	0,161	0,208	0,563
Temperatura	Recuperación	0,955	0,000	0,851	0,002	0,880	0,001	0,873	0,001
Alcalinidad	CN	0,174	0,630	-0,047	0,898	0,413	0,236	-0,098	0,788
Temperatura	CN	-0,094	0,796	-0,155	0,669	-0,225	0,531	-0,144	0,692
Temperatura	Alcalinidad	0,047	0,898	-0,075	0,837	-0,418	0,230	0,030	0,934

Nota: correlación valorada en software Minitab

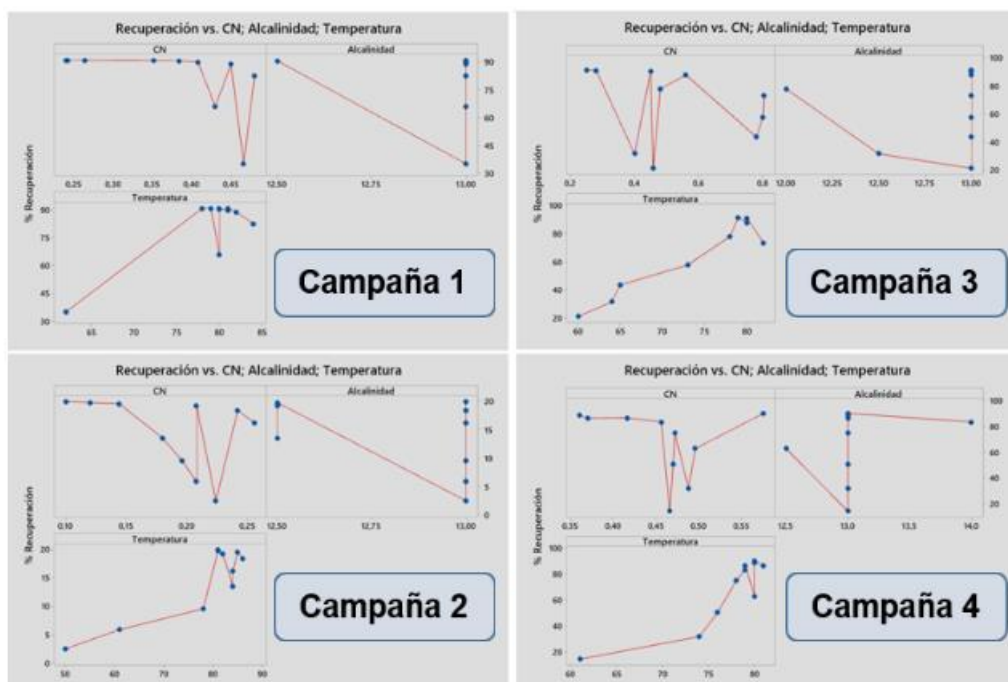
En todas las campañas, la correlación preponderante corresponde a la temperatura y a la recuperación al presentar valores superiores a 0,85 siendo además correlaciones directas al presentar solo valores positivos y presentar

valores p inferior a 0,05 (nivel de significancia) indicando que la correlación entre estas variables es significativa.

Los resultados del análisis descrito mediante el grado de correlación y nivel de significancia son replicados mediante los siguientes gráficos de dispersión, donde también es notorio la relación directa que existe entre recuperación y temperatura, mientras que entre recuperación y las otras dos variables no hay una relación definida.

Figura 20

Dispersión de cada una de las variables



Nota: dispersión elaborada en software Minitab, se evidencia en todas campañas la correlación directa entre temperatura y % de recuperación.

4.2.1.2. Análisis de regresión multivariable

Se aplica regresión lineal múltiple a la data contenida en cada una de las campañas seleccionadas con la finalidad de discernir las variables con

significancia estadística, el análisis de varianza de cada una de las regresiones es resumido en las siguientes tablas:

Tabla 9

ANOVA campaña 1

Análisis de Varianza campaña 1					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	5994,71	1998,24	37,61	0,00
CN	1	233,39	233,39	4,39	0,08
Alcalinidad	1	27,98	27,98	0,53	0,50
Temperatura	1	5425,36	5425,36	102,12	0,00
Error	6	318,75	53,13		
Total	9	6313,46			

Tabla 10

ANOVA campaña 2

Análisis de Varianza campaña 2					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	2636,11	878,70	16,99	0,00
CN	1	465,25	465,25	9,00	0,02
Alcalinidad	1	52,48	52,48	1,01	0,35
Temperatura	1	1732,32	1732,32	33,50	0,00
Error	6	310,29	51,71		
Total	9	2946,40			

Tabla 11

ANOVA campaña 3

Análisis de Varianza campaña 3					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	304,44	101,48	9,89	0,01
CN	1	15,69	15,69	1,53	0,26
Alcalinidad	1	0,61	0,61	0,06	0,82
Temperatura	1	196,51	196,51	19,16	0,01
Error	6	61,54	10,26		
Total	9	365,98			

Tabla 12

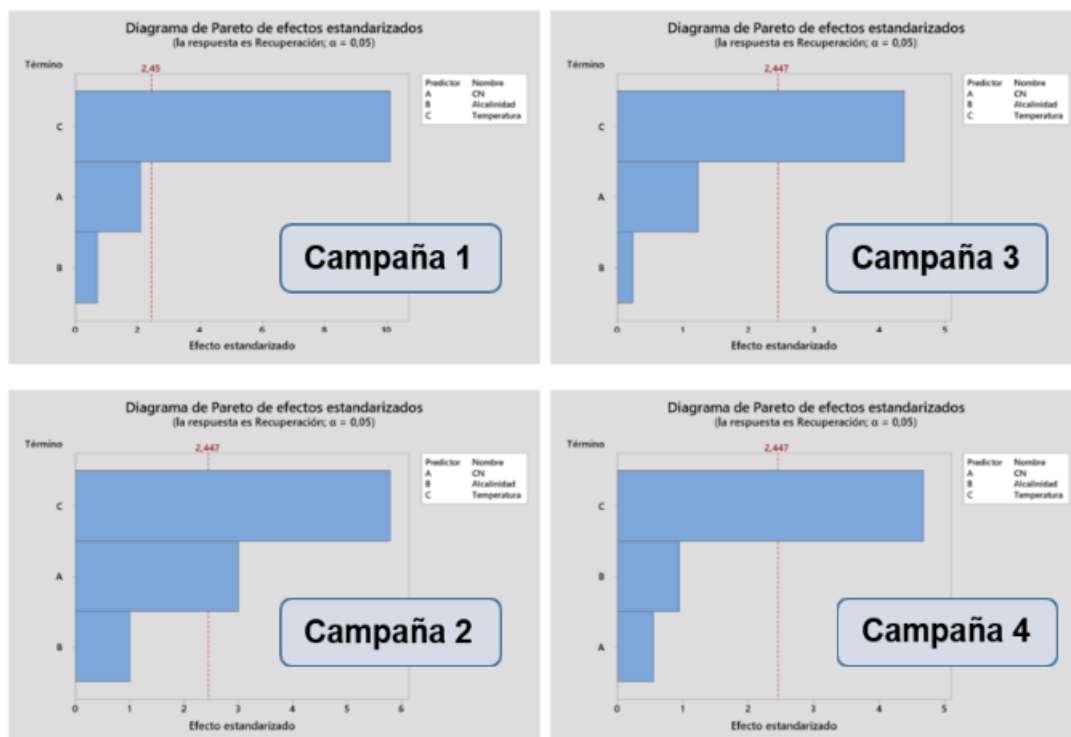
ANOVA campaña 4

Análisis de Varianza campaña 4					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	5141,50	1713,83	8,26	0,02
CN	1	65,46	65,46	0,32	0,60
Alcalinidad	1	187,97	187,97	0,91	0,38
Temperatura	1	4547,23	4547,23	21,90	0,00
Error	6	1245,66	207,61		
Total	9	6387,16			

En todos los casos la temperatura representa la variable con mayor significancia al tener valor p inferiores a 0,05; se puede representar el siguiente análisis mediante el uso de diagramas de Pareto tal como se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 21

Nivel de significancia con diagrama de Pareto



Nota: diagrama de significancia tipo Pareto valorado en software Minitab.

Se establece a la temperatura como la variable de mayor relevancia o de mayor impacto sobre la recuperación de oro según los análisis mostrados.

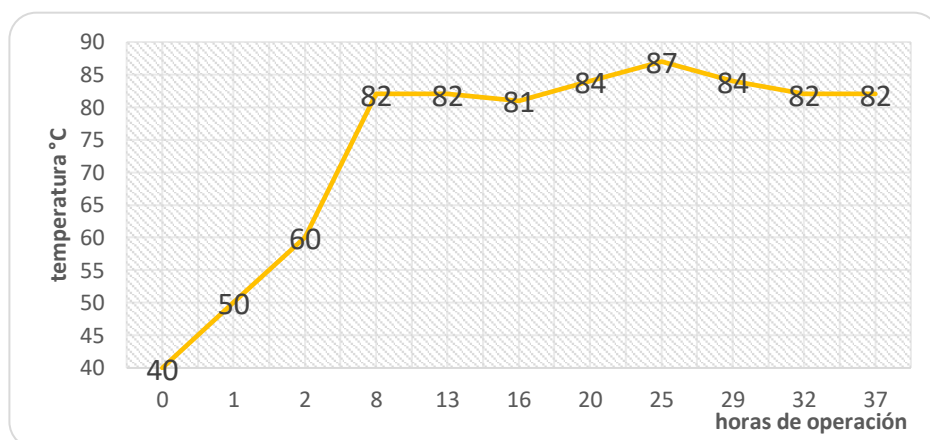
A partir del análisis anterior, se hace un estudio más detallado en la variación de la temperatura durante el tiempo de elución a fin de cuantificar esta variación y relacionarlo con los niveles de recuperación.

4.2.2. Variación de temperatura bajo condiciones actuales

A través de las siguientes figuras podemos apreciar la variación de temperatura inicial en las 4 campañas siguientes:

Figura 22

Temperatura vs Tiempo en la campaña N° 5

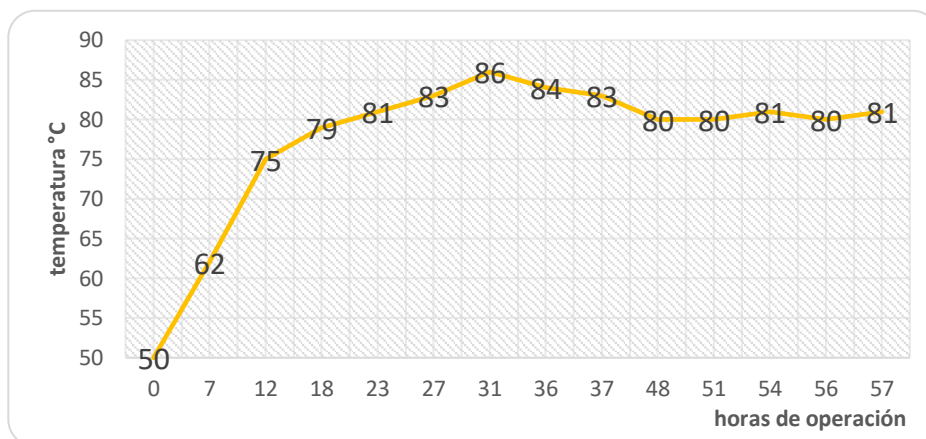


Nota: el delta de temperatura entre el valor inicial y el punto más alto alcanza un valor de 47 °C

En la figura anterior, la temperatura inicial es de 40 °C, la temperatura se estabiliza después de 8 horas aproximadamente.

Figura 23

Temperatura vs Tiempo en la campaña N° 6

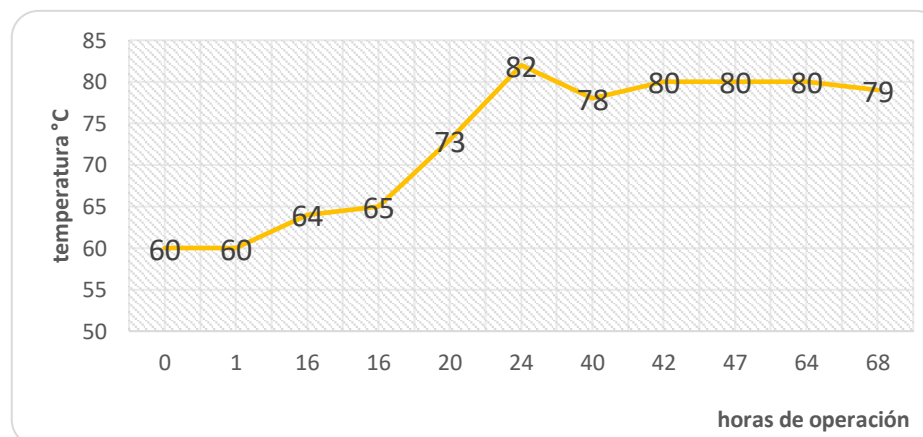


Nota: el delta de temperatura entre el valor inicial y el punto más alto alcanza un valor de 36 °C

En la figura anterior, la temperatura inicial es de 50 °C, la temperatura se estabiliza después de 23 horas aproximadamente.

Figura 24

Temperatura vs Tiempo en la campaña N° 7

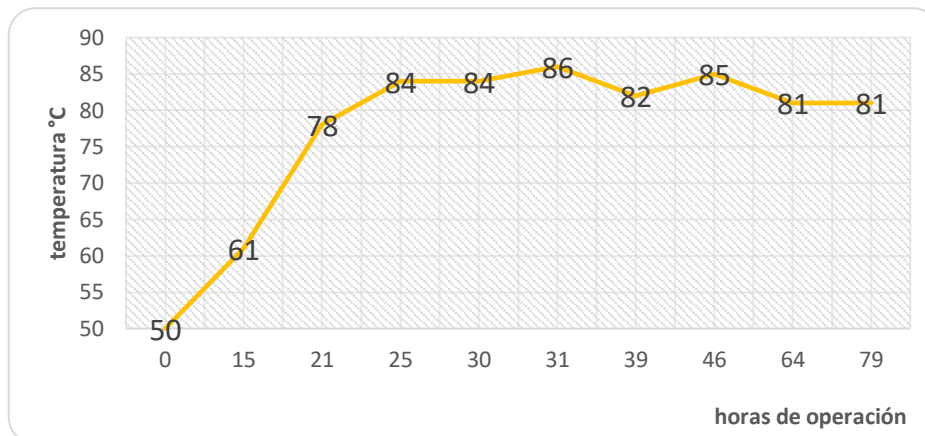


Nota: el delta de temperatura entre el valor inicial y el punto más alto alcanza un valor de 22 °C

En la figura anterior, la temperatura inicial es de 60 °C, la temperatura se estabiliza después de 24 horas aproximadamente.

Figura 25

Temperatura vs Tiempo en la campaña N° 8



Nota: el delta de temperatura entre el valor inicial y el punto más alto alcanza un valor de 36 °C

En la figura anterior, la temperatura inicial es de 50 °C, la temperatura se estabiliza después de 23 horas aproximadamente.

La siguiente tabla muestra a manera de resumen, a partir de los datos utilizados en la construcción de gráficos anteriores, el rango de variación de temperatura, así como el tiempo en que la temperatura tarda en estabilizarse:

Tabla 13

Resumen de variación de temperaturas

N° campaña	temperatura mínima	temperatura máxima	tiempo
	°C	°C	h
5	40	87	8
6	50	86	23
7	60	82	24
8	50	86	23

4.2.2.1. Variabilidad inicial

La siguiente tabla muestra los valores de temperatura obtenidos en cada una de las mediciones, a partir de los cuales se intenta explicar la variación que se presenta en todas las campañas analizadas.

Tabla 14

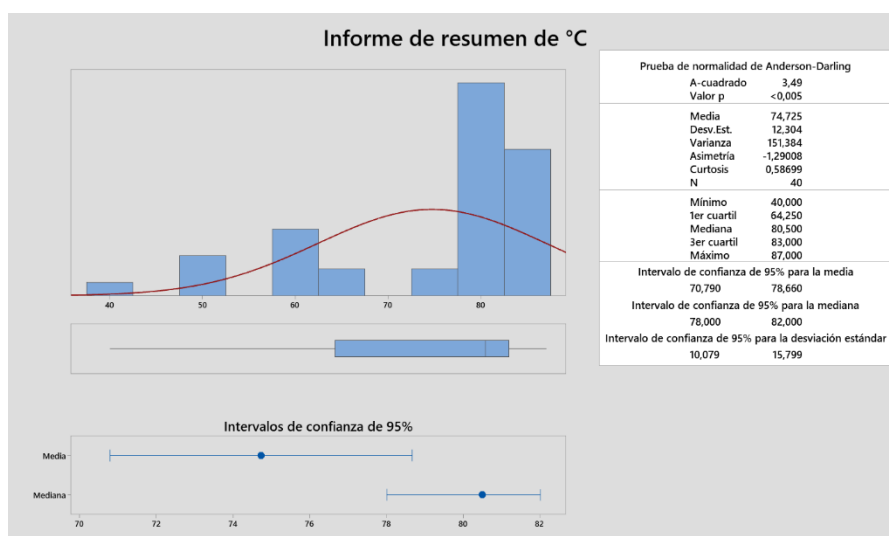
Resumen de temperaturas iniciales

campaña 5	campaña 6	campaña 7	campaña 8
°C	°C	°C	°C
40	50	60	50
50	62	60	61
60	75	64	78
82	79	65	84
82	81	73	84
81	83	82	86
84	86	78	82
87	84	80	85
84	83	80	81
82	80	80	81

Nota: valores medidos en el desarrollo de todo el ciclo de desorción en cada una de las campañas mencionadas

Figura 26

Prueba de normalidad de temperaturas iniciales



Nota: Las temperaturas siguen una distribución no normal, diagrama elaborado con software Minitab

De los gráficos anteriormente presentados de tiempo vs. temperatura, se puede deducir que a partir de 80°C es donde la tendencia de temperatura muestra un comportamiento cuasi-estable, este valor coincide con la mediana de 80,5 °C obtenida del análisis de normalidad aplicado a los datos de la anterior tabla, donde se determinó que los valores analizados no siguen una distribución normal según queda indicado en la siguiente figura donde además se señala el valor p como menor al nivel de significancia 0,05.

El coeficiente de variación, en adelante C.V., permite determinar la homogeneidad de los valores, en ese sentido valores diferentes a 80 °C indicaran un proceso muy heterogéneo es decir muy variable (al menos en las primeras horas). El siguiente cuadro resumen indica un C.V. de 16,47 en el análisis de estadísticos descriptivos aplicado a todos los datos, lo que implica la existencia de heterogeneidad considerable.

Tabla 15

Estadísticos descriptivos de análisis de temperaturas iniciales

Variable	N	Media	EE de la media	Desv.Est.	C.V.	Mín	Máx	Mediana
°C	40	74,72	1,95	12,30	16,47	40,00	87,00	80,50

4.2.3. Ajuste de modelo cinético

A partir de las recuperaciones obtenidas en las cuatro campañas seleccionadas, donde se halló los porcentajes de recuperación, se realiza la determinación de las constantes cinéticas que servirán como punto de

comparación entre en el proceso actual y cuando se haya implementado el control de temperatura.

Para la determinación de las constantes cinéticas, se utiliza la herramienta Solver del programa Excel, el cual a través de iteraciones sucesivas calcula al error mínimo de ajuste de los datos reales con los modelos cinéticos establecidos, se establece previamente una recuperación máxima de acuerdo con la mayor recuperación obtenida en cada campaña.

Estos modelos son ampliamente utilizados en el modelamiento de procesos que describen una función de tipo cuadrática, siendo estos:

- Modelo cinético de primer orden García Zúñiga

$$R(t) = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad [9]$$

- Modelo cinético de segundo orden Klimpel

$$R(t) = R_{\infty} \left[1 - \frac{1}{kt} (1 - e^{-kt}) \right] \quad [10]$$

- Modelo cinético fracción rápido – lento

$$R = R_{\infty} [\theta_r (1 - e^{-k_r t}) + \theta_l (1 - e^{-k_l t})] \quad [11]$$

$$\theta_r + \theta_l = 1$$

Las siguientes figuras muestran las capturas de pantalla de la hoja de cálculo donde se visualiza el detalle de los valores calculados en la obtención de las constantes cinéticas, cabe mencionar que las primeras columnas muestran el tiempo de operación expresados en días con las recuperaciones reales, mientras que las columnas siguientes pertenecen a las recuperaciones y errores de ajuste en cada uno de los modelos mencionados.

Figura 27

Cálculo de constantes cinéticas de campaña 1

MODELOS CINÉTICOS																																																																																																															
<table border="1"> <tr><td>k</td><td>1.19</td></tr> <tr><td>rmax</td><td>91.30</td></tr> </table>		k	1.19	rmax	91.30	<table border="1"> <tr><td>k</td><td>2.04</td></tr> <tr><td>rmax</td><td>91.30</td></tr> </table>		k	2.04	rmax	91.30	<table border="1"> <tr><td>rmax</td><td>91.30</td></tr> <tr><td>Kr</td><td>1.07</td></tr> <tr><td>Kl</td><td>1.24</td></tr> <tr><td>Or</td><td>0.30</td></tr> <tr><td>OI</td><td>0.70</td></tr> <tr><td>Or + OI</td><td>1.00</td></tr> </table>		rmax	91.30	Kr	1.07	Kl	1.24	Or	0.30	OI	0.70	Or + OI	1.00																																																																																						
k	1.19																																																																																																														
rmax	91.30																																																																																																														
k	2.04																																																																																																														
rmax	91.30																																																																																																														
rmax	91.30																																																																																																														
Kr	1.07																																																																																																														
Kl	1.24																																																																																																														
Or	0.30																																																																																																														
OI	0.70																																																																																																														
Or + OI	1.00																																																																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tiempo (d)</th> <th>% Recuperación Au Real</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>21.12</td></tr> <tr><td>0.66</td><td>31.52</td></tr> <tr><td>0.67</td><td>43.48</td></tr> <tr><td>0.84</td><td>57.68</td></tr> <tr><td>1.01</td><td>73.30</td></tr> <tr><td>1.66</td><td>77.88</td></tr> <tr><td>1.76</td><td>87.73</td></tr> <tr><td>1.96</td><td>90.54</td></tr> <tr><td>2.67</td><td>91.05</td></tr> <tr><td>2.85</td><td>91.30</td></tr> </tbody> </table>	Tiempo (d)	% Recuperación Au Real	0.00	0.00	0.00	21.12	0.66	31.52	0.67	43.48	0.84	57.68	1.01	73.30	1.66	77.88	1.76	87.73	1.96	90.54	2.67	91.05	2.85	91.30	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">García Zuñiga</th> </tr> <tr> <th>% Ext. Au</th> <th>Error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.38</td><td>20.74</td></tr> <tr><td>49.63</td><td>18.11</td></tr> <tr><td>50.32</td><td>6.84</td></tr> <tr><td>57.68</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>63.73</td><td>9.57</td></tr> <tr><td>78.67</td><td>0.79</td></tr> <tr><td>80.09</td><td>7.64</td></tr> <tr><td>82.41</td><td>8.14</td></tr> <tr><td>87.50</td><td>3.55</td></tr> <tr><td>88.21</td><td>3.09</td></tr> <tr><td>Σ Error</td><td>78.48</td></tr> </tbody> </table>	García Zuñiga		% Ext. Au	Error	0.00	0.00	0.38	20.74	49.63	18.11	50.32	6.84	57.68	0.00	63.73	9.57	78.67	0.79	80.09	7.64	82.41	8.14	87.50	3.55	88.21	3.09	Σ Error	78.48	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Kilmpel</th> </tr> <tr> <th>% Ext. Au</th> <th>Error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.32</td><td>20.79</td></tr> <tr><td>41.16</td><td>9.64</td></tr> <tr><td>41.71</td><td>1.76</td></tr> <tr><td>47.67</td><td>10.01</td></tr> <tr><td>52.59</td><td>20.71</td></tr> <tr><td>65.33</td><td>12.55</td></tr> <tr><td>66.66</td><td>21.07</td></tr> <tr><td>68.90</td><td>21.65</td></tr> <tr><td>74.66</td><td>16.40</td></tr> <tr><td>75.65</td><td>15.65</td></tr> <tr><td>Σ Error</td><td>150.22</td></tr> </tbody> </table>	Kilmpel		% Ext. Au	Error	0.00	0.00	0.32	20.79	41.16	9.64	41.71	1.76	47.67	10.01	52.59	20.71	65.33	12.55	66.66	21.07	68.90	21.65	74.66	16.40	75.65	15.65	Σ Error	150.22	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Fracción Rapido - Lento</th> </tr> <tr> <th>% Ext. Au</th> <th>Error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.38</td><td>20.74</td></tr> <tr><td>49.65</td><td>18.13</td></tr> <tr><td>50.33</td><td>6.86</td></tr> <tr><td>57.68</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>63.71</td><td>9.59</td></tr> <tr><td>78.61</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>80.03</td><td>7.69</td></tr> <tr><td>82.34</td><td>8.20</td></tr> <tr><td>87.44</td><td>3.61</td></tr> <tr><td>88.15</td><td>3.15</td></tr> <tr><td>Σ Error</td><td>78.71</td></tr> </tbody> </table>	Fracción Rapido - Lento		% Ext. Au	Error	0.00	0.00	0.38	20.74	49.65	18.13	50.33	6.86	57.68	0.00	63.71	9.59	78.61	0.73	80.03	7.69	82.34	8.20	87.44	3.61	88.15	3.15	Σ Error	78.71
Tiempo (d)	% Recuperación Au Real																																																																																																														
0.00	0.00																																																																																																														
0.00	21.12																																																																																																														
0.66	31.52																																																																																																														
0.67	43.48																																																																																																														
0.84	57.68																																																																																																														
1.01	73.30																																																																																																														
1.66	77.88																																																																																																														
1.76	87.73																																																																																																														
1.96	90.54																																																																																																														
2.67	91.05																																																																																																														
2.85	91.30																																																																																																														
García Zuñiga																																																																																																															
% Ext. Au	Error																																																																																																														
0.00	0.00																																																																																																														
0.38	20.74																																																																																																														
49.63	18.11																																																																																																														
50.32	6.84																																																																																																														
57.68	0.00																																																																																																														
63.73	9.57																																																																																																														
78.67	0.79																																																																																																														
80.09	7.64																																																																																																														
82.41	8.14																																																																																																														
87.50	3.55																																																																																																														
88.21	3.09																																																																																																														
Σ Error	78.48																																																																																																														
Kilmpel																																																																																																															
% Ext. Au	Error																																																																																																														
0.00	0.00																																																																																																														
0.32	20.79																																																																																																														
41.16	9.64																																																																																																														
41.71	1.76																																																																																																														
47.67	10.01																																																																																																														
52.59	20.71																																																																																																														
65.33	12.55																																																																																																														
66.66	21.07																																																																																																														
68.90	21.65																																																																																																														
74.66	16.40																																																																																																														
75.65	15.65																																																																																																														
Σ Error	150.22																																																																																																														
Fracción Rapido - Lento																																																																																																															
% Ext. Au	Error																																																																																																														
0.00	0.00																																																																																																														
0.38	20.74																																																																																																														
49.65	18.13																																																																																																														
50.33	6.86																																																																																																														
57.68	0.00																																																																																																														
63.71	9.59																																																																																																														
78.61	0.73																																																																																																														
80.03	7.69																																																																																																														
82.34	8.20																																																																																																														
87.44	3.61																																																																																																														
88.15	3.15																																																																																																														
Σ Error	78.71																																																																																																														

Nota: Desarrollo de constantes cinéticas con herramienta Solver en Microsoft Excel

Figura 28

Cálculo de constantes cinéticas de campaña 2

MODELOS CINÉTICOS							
		k 3.34 rmax 90.85		k 52.13 rmax 90.85		rmax 90.85 Kr 3.34 Kl 3.34 Or 0.30 Ol 0.70 Or + Ol 1.00	
		García Zuñiga		Klimpel		Fracción Rapido - Lento	
Tiempo (d)	% Recuperación Au Real	% Ext. Au	Error	% Ext. Au	Error	% Ext. Au	Error
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.48	35.06	72.29	37.23	87.19	52.13	72.29	37.23
0.63	65.91	79.58	13.66	88.07	22.15	79.58	13.66
0.72	82.51	82.51	0.00	88.42	5.91	82.51	0.00
0.80	88.67	84.54	4.13	88.67	0.00	84.54	4.13
0.86	89.75	85.73	4.03	88.83	0.92	85.73	4.03
0.91	90.49	86.44	4.05	88.93	1.56	86.44	4.05
1.09	90.69	88.47	2.22	89.26	1.43	88.47	2.22
1.70	90.79	90.54	0.25	89.83	0.96	90.54	0.25
2.48	90.83	90.83	0.00	90.15	0.68	90.83	0.00
2.73	90.85	90.84	0.01	90.21	0.64	90.84	0.01
		Σ Error	65.59	Σ Error	86.39	Σ Error	65.59

Nota: Desarrollo de constantes cinéticas con herramienta Solver en Microsoft Excel.

Figura 29

Cálculo de constantes cinéticas de campaña 3

MODELOS CINÉTICOS							
		k 1.35 rmax 19.93		k 78.84 rmax 19.93		rmax 19.93 Kr 1.23 Kl 1.41 Or 0.30 Ol 0.70 Or + Ol 1.00	
		García Zuñiga		Klimpel		Fracción Rapido - Lento	
Tiempo (d)	% Recuperación Au Real	% Ext. Au	Error	% Ext. Au	Error	% Ext. Au	Error
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	2.49	0.09	2.40	2.49	0.00	0.09	2.40
0.65	5.88	11.60	5.72	19.54	13.65	11.62	5.73
0.86	9.55	13.70	4.15	19.63	10.08	13.71	4.16
1.04	13.50	15.02	1.52	19.68	6.18	15.03	1.52
1.25	16.20	16.20	0.00	19.72	3.52	16.20	0.00
1.31	18.36	16.52	1.84	19.73	1.38	16.52	1.84
1.63	19.17	17.72	1.44	19.77	0.60	17.72	1.45
1.91	19.56	18.40	1.15	19.79	0.24	18.40	1.16
2.66	19.75	19.37	0.38	19.83	0.08	19.36	0.38
3.30	19.93	19.69	0.23	19.85	0.08	19.69	0.24
		Σ Error	18.84	Σ Error	35.82	Σ Error	18.88

Nota: Desarrollo de constantes cinéticas con herramienta Solver en Microsoft Excel.

Figura 30

Cálculo de constantes cinéticas de campaña 4

MODELOS CINÉTICOS											
k		1.44		k		4.89		rmax		90.16	
rmax		90.16		rmax		90.16		Kr		1.47	
								Kl		1.47	
								Or		0.30	
								Ol		0.70	
								Or + Ol		1.00	

Tiempo (d)	% Recuperación Au Real	García Zuñiga		Klimpel		Fracción Rápido - Lento	
		% Ext. Au	Error	% Ext. Au	Error	% Ext. Au	Error
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.06	14.37	7.00	7.37	11.22	3.15	7.08	7.28
0.51	31.87	47.56	15.69	57.20	25.34	47.86	16.00
0.68	50.43	56.81	6.37	64.05	13.62	57.07	6.64
0.84	62.86	63.95	1.09	68.67	5.81	64.14	1.28
1.21	74.95	74.95	0.00	74.95	0.00	74.95	0.00
1.44	83.34	79.54	3.80	77.41	5.93	79.42	3.92
1.69	86.31	82.89	3.43	79.24	7.07	82.65	3.66
1.82	86.65	84.27	2.38	80.03	6.61	83.98	2.67
2.02	88.57	85.93	2.65	81.04	7.53	85.56	3.01
2.22	90.16	87.13	3.02	81.84	8.32	86.71	3.45
		Σ Error	45.80	Σ Error	83.38	Σ Error	47.91

Nota: Desarrollo de constantes cinéticas con herramienta Solver en Microsoft Excel

De acuerdo con los valores presentados, es deducible que el modelo cinético que mejor describe el comportamiento de desorción corresponde al de García Zuñiga, este modelo presenta el menor valor de error en tres de las cuatro campañas analizadas, la siguiente tabla resume los valores de las constantes calculadas donde se promedia un valor de $K = 1,83 \text{ días}^{-1}$.

Tabla 16

Constantes cinéticas de campañas iniciales

N° de campaña	valor de K días ⁻¹
1	1,19
2	3,34
3	1,35
4	1,44

Nota: Todos los valores corresponden a constantes ajustados al modelo de García-Zuñiga

4.3. Contrastación de hipótesis

H_0 = La temperatura inicial en la solución de elución no incrementa la cinética de desorción en los ciclos de desorción.

H_1 = Aplicando la adecuada temperatura inicial en la solución de elución es posible incrementar la cinética de desorción en los ciclos de desorción.

La temperatura de trabajo en la campaña 2 alcanza un valor más alto de manera más rápida, ver figura 31, en comparación a las otras campañas analizadas. El valor de la constante de cinética $K = 3,34 \text{ días}^{-1}$ de la campaña mencionada presenta un valor muy superior a las otras, este valor esta alineado a la hipótesis principal donde se plantea que una adecuada temperatura permitirá mejorar la cinética de desorción, el registro de las temperaturas queda establecido en la siguiente tabla:

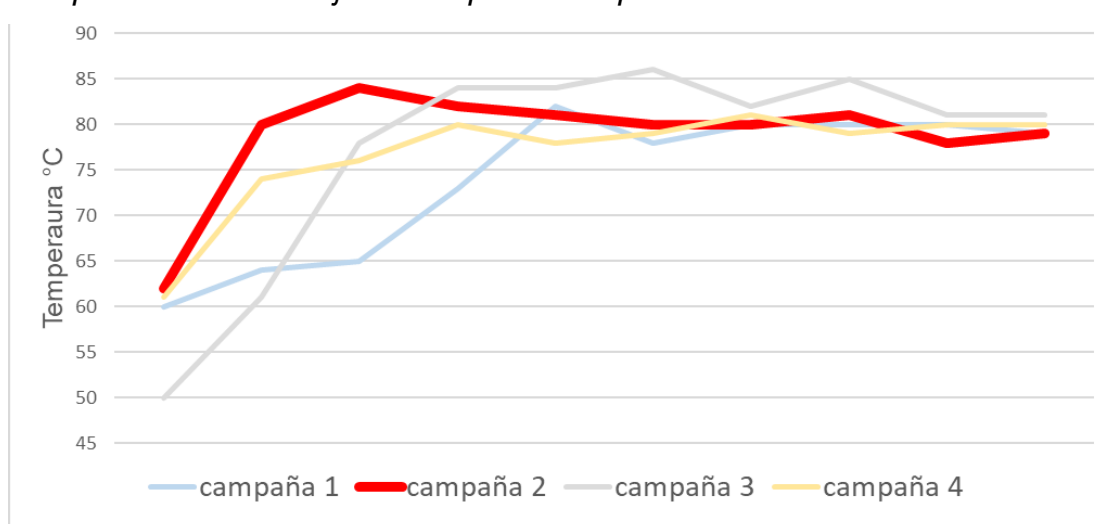
Tabla 17

Temperaturas de trabajo

campana 1	campana 2	campana 3	campana 4
°C	°C	°C	°C
60	62	50	61
64	80	61	74
65	84	78	76
73	82	84	80
82	81	84	78
78	80	86	79
80	80	82	81
80	81	85	79
80	78	81	80
79	79	81	80

Figura 31

Temperaturas de trabajo vs tiempo en campañas iniciales



Nota: la campaña 2 desarrolla una temperatura más alta de manera más rápida.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.0. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Pruebas de validación del modelo experimental

Por el tipo de investigación desarrollado, donde el enfoque principal está orientado a mejorar el control operativo de la temperatura, no se ha desarrollado ningún modelo matemático, sin embargo, en los siguientes párrafos se demostrará que la aplicación del control de temperatura mejora sustancialmente la desorción de oro.

5.2. Aplicación de la tecnología encontrada

El control estricto de temperatura inicial en la solución de desorción aplicado a cuatro campañas finales (9, 10, 11 y 12) nos permitirá corroborar lo anteriormente planteado, es decir se evaluará la influencia de la temperatura sobre la cinética de desorción.

5.2.1. Control de temperatura

Se muestra el resumen de las temperaturas en las campañas mencionadas:

Tabla 18*Resumen de temperaturas finales*

campaña 9	campaña 10	campaña 11	campaña 12
°C	°C	°C	°C
79	80	80	79
80	79	79	78
78	84	79	83
77	82	84	82
82	81	83	85
78	80	80	82
80	78	83	80
80	81	80	80
80	78	80	80
79	79	79	82
		81	84
		80	86
			82

Nota: valores medidos en el desarrollo de todo el ciclo de desorción en cada una de las campañas mencionadas

5.2.1.1. Variabilidad final

En el análisis desarrollado sobre la variación de temperatura en las campañas 5, 6, 7 y 8 se determinó un coeficiente de variación de 16,47. Es deseable disminuir este valor a fin de demostrar un mejor control sobre la temperatura inicial, así como durante todo el proceso de elución, en la siguiente tabla se detalla los estadísticos correspondientes a la variación de temperaturas finales.

Tabla 19*Estadísticos descriptivos de análisis de temperaturas iniciales*

N° campaña	N	Media	EE de la media	Desv.Est.	C.V.	Mín.	Máx.	Mediana
9	10	79,30	0,45	1,42	1,79	77,00	82,00	79,50
10	10	80,20	0,59	1,87	2,34	78,00	84,00	80,00
11	12	80,67	0,50	1,72	2,14	79,00	84,00	80,00
12	13	81,77	0,65	2,35	2,87	78,00	86,00	82,00

Nota: la media general de los coeficientes de variación indica 2,29.

Todos los valores correspondientes a la columna de coeficiente de variación indican valores muy inferiores a 16,67. Si bien es cierto, que valores cercanos a cero son ideales, podemos tener certeza que los valores mostrados indican muy poca variación en el desarrollo de la desorción en todas las campañas.

5.2.1.2. Evaluación de cinéticas de temperaturas finales

En la evaluación previa de las cinéticas en las campañas iniciales, se determinó un promedio de la constante $K = 1,83 \text{ días}^{-1}$; la aplicación del mejor control de temperatura inicial en la solución de desorción, así como la menor variación de este valor durante los ciclos de elución son evaluadas a fin de determinar los valores de las constantes correspondientes a las campañas 9, 10,

11 y 12. Para esta evaluación también se utilizó como modelo cinético el desarrollado por García Zuñiga; las siguientes figuras muestran los valores obtenidos con la herramienta Solver de Microsoft Excel.

Figura 32

Constante cinética en campaña 9

AJUSTE DE MODELO CINÉTICO																																																	
<table border="1"> <tr> <td>k</td> <td>2.51</td> </tr> <tr> <td>rmax</td> <td>93.17</td> </tr> </table>		k	2.51	rmax	93.17																																												
k	2.51																																																
rmax	93.17																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tempo (d)</th> <th>% Recuperación Au Real</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>35.54</td></tr> <tr><td>0.16</td><td>53.05</td></tr> <tr><td>0.67</td><td>73.16</td></tr> <tr><td>0.84</td><td>90.05</td></tr> <tr><td>1.01</td><td>92.28</td></tr> <tr><td>1.66</td><td>92.74</td></tr> <tr><td>1.76</td><td>92.93</td></tr> <tr><td>1.96</td><td>93.03</td></tr> <tr><td>2.17</td><td>93.11</td></tr> </tbody> </table>	Tempo (d)	% Recuperación Au Real	0.00	0.00	0.00	35.54	0.16	53.05	0.67	73.16	0.84	90.05	1.01	92.28	1.66	92.74	1.76	92.93	1.96	93.03	2.17	93.11	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">García Zuñiga</th> </tr> <tr> <th>% Ext. Au</th> <th>Error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.81</td><td>34.73</td></tr> <tr><td>30.77</td><td>22.28</td></tr> <tr><td>75.99</td><td>2.82</td></tr> <tr><td>81.86</td><td>8.18</td></tr> <tr><td>85.73</td><td>6.55</td></tr> <tr><td>91.74</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>92.06</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>92.49</td><td>0.54</td></tr> <tr><td>92.78</td><td>0.33</td></tr> <tr> <td>Σ Error</td> <td>77.30</td> </tr> </tbody> </table>	García Zuñiga		% Ext. Au	Error	0.00	0.00	0.81	34.73	30.77	22.28	75.99	2.82	81.86	8.18	85.73	6.55	91.74	1.00	92.06	0.87	92.49	0.54	92.78	0.33	Σ Error	77.30
Tempo (d)	% Recuperación Au Real																																																
0.00	0.00																																																
0.00	35.54																																																
0.16	53.05																																																
0.67	73.16																																																
0.84	90.05																																																
1.01	92.28																																																
1.66	92.74																																																
1.76	92.93																																																
1.96	93.03																																																
2.17	93.11																																																
García Zuñiga																																																	
% Ext. Au	Error																																																
0.00	0.00																																																
0.81	34.73																																																
30.77	22.28																																																
75.99	2.82																																																
81.86	8.18																																																
85.73	6.55																																																
91.74	1.00																																																
92.06	0.87																																																
92.49	0.54																																																
92.78	0.33																																																
Σ Error	77.30																																																

Nota: Desarrollo de constante cinética con herramienta Solver en Microsoft Excel

Figura 33*Constante cinética en campaña 10*

AJUSTE DE MODELO CINÉTICO																																																					
<table border="1"> <tr> <td>k</td> <td>4.43</td> </tr> <tr> <td>rmax</td> <td>93.57</td> </tr> </table>		k	4.43	rmax	93.57																																																
k	4.43																																																				
rmax	93.57																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tiempo (d)</th> <th>% Recuperación Au Real</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>36.11</td></tr> <tr><td>0.29</td><td>67.89</td></tr> <tr><td>0.72</td><td>84.98</td></tr> <tr><td>0.80</td><td>91.32</td></tr> <tr><td>0.86</td><td>92.44</td></tr> <tr><td>1.07</td><td>93.20</td></tr> <tr><td>1.51</td><td>93.40</td></tr> <tr><td>1.74</td><td>93.50</td></tr> <tr><td>2.06</td><td>93.54</td></tr> <tr><td>2.23</td><td>93.57</td></tr> </tbody> </table>	Tiempo (d)	% Recuperación Au Real	0.00	0.00	0.00	36.11	0.29	67.89	0.72	84.98	0.80	91.32	0.86	92.44	1.07	93.20	1.51	93.40	1.74	93.50	2.06	93.54	2.23	93.57	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">García Zuñiga</th> </tr> <tr> <th>% Ext. Au</th> <th>Error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>1.43</td><td>34.68</td></tr> <tr><td>67.89</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>89.64</td><td>4.66</td></tr> <tr><td>90.86</td><td>0.47</td></tr> <tr><td>91.51</td><td>0.93</td></tr> <tr><td>92.77</td><td>0.43</td></tr> <tr><td>93.45</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>93.53</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>93.56</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>93.57</td><td>0.00</td></tr> <tr> <td>Σ Error</td> <td>41.27</td> </tr> </tbody> </table>	García Zuñiga		% Ext. Au	Error	0.00	0.00	1.43	34.68	67.89	0.00	89.64	4.66	90.86	0.47	91.51	0.93	92.77	0.43	93.45	0.05	93.53	0.02	93.56	0.02	93.57	0.00	Σ Error	41.27
Tiempo (d)	% Recuperación Au Real																																																				
0.00	0.00																																																				
0.00	36.11																																																				
0.29	67.89																																																				
0.72	84.98																																																				
0.80	91.32																																																				
0.86	92.44																																																				
1.07	93.20																																																				
1.51	93.40																																																				
1.74	93.50																																																				
2.06	93.54																																																				
2.23	93.57																																																				
García Zuñiga																																																					
% Ext. Au	Error																																																				
0.00	0.00																																																				
1.43	34.68																																																				
67.89	0.00																																																				
89.64	4.66																																																				
90.86	0.47																																																				
91.51	0.93																																																				
92.77	0.43																																																				
93.45	0.05																																																				
93.53	0.02																																																				
93.56	0.02																																																				
93.57	0.00																																																				
Σ Error	41.27																																																				

Nota: Desarrollo de constante cinética con herramienta Solver en Microsoft Excel

Figura 34*Constante cinética en campaña 11*

AJUSTE DE MODELO CINÉTICO																																																					
<table border="1"> <tr> <td>k</td> <td>3.26</td> </tr> <tr> <td>rmax</td> <td>94.04</td> </tr> </table>		k	3.26	rmax	94.04																																																
k	3.26																																																				
rmax	94.04																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tiempo (d)</th> <th>% Recuperación Au Real</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>33.09</td></tr> <tr><td>0.23</td><td>55.11</td></tr> <tr><td>0.42</td><td>70.13</td></tr> <tr><td>0.73</td><td>79.20</td></tr> <tr><td>0.89</td><td>85.94</td></tr> <tr><td>1.28</td><td>88.15</td></tr> <tr><td>1.44</td><td>89.97</td></tr> <tr><td>1.51</td><td>91.88</td></tr> <tr><td>1.67</td><td>93.37</td></tr> <tr><td>1.92</td><td>94.04</td></tr> </tbody> </table>	Tiempo (d)	% Recuperación Au Real	0.00	0.00	0.00	33.09	0.23	55.11	0.42	70.13	0.73	79.20	0.89	85.94	1.28	88.15	1.44	89.97	1.51	91.88	1.67	93.37	1.92	94.04	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">García Zuñiga</th> </tr> <tr> <th>% Ext. Au</th> <th>Error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>1.06</td><td>32.03</td></tr> <tr><td>49.99</td><td>5.12</td></tr> <tr><td>70.13</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>85.40</td><td>6.21</td></tr> <tr><td>88.85</td><td>2.91</td></tr> <tr><td>92.61</td><td>4.46</td></tr> <tr><td>93.18</td><td>3.21</td></tr> <tr><td>93.35</td><td>1.47</td></tr> <tr><td>93.63</td><td>0.26</td></tr> <tr><td>93.86</td><td>0.18</td></tr> <tr> <td>Σ Error</td> <td>55.83</td> </tr> </tbody> </table>	García Zuñiga		% Ext. Au	Error	0.00	0.00	1.06	32.03	49.99	5.12	70.13	0.00	85.40	6.21	88.85	2.91	92.61	4.46	93.18	3.21	93.35	1.47	93.63	0.26	93.86	0.18	Σ Error	55.83
Tiempo (d)	% Recuperación Au Real																																																				
0.00	0.00																																																				
0.00	33.09																																																				
0.23	55.11																																																				
0.42	70.13																																																				
0.73	79.20																																																				
0.89	85.94																																																				
1.28	88.15																																																				
1.44	89.97																																																				
1.51	91.88																																																				
1.67	93.37																																																				
1.92	94.04																																																				
García Zuñiga																																																					
% Ext. Au	Error																																																				
0.00	0.00																																																				
1.06	32.03																																																				
49.99	5.12																																																				
70.13	0.00																																																				
85.40	6.21																																																				
88.85	2.91																																																				
92.61	4.46																																																				
93.18	3.21																																																				
93.35	1.47																																																				
93.63	0.26																																																				
93.86	0.18																																																				
Σ Error	55.83																																																				

Nota: Desarrollo de constante cinética con herramienta Solver en Microsoft Excel

CONCLUSIONES

1. Los análisis de correlación y regresión múltiple sobre las variables de alcalinidad, fuerza de cianuro y temperatura indican, en el primero, una fuerte relación de dependencia directa entre la temperatura y recuperación del oro, este valor de correlación promedio de 0,89 supera ampliamente a las medias de las correlaciones recuperación vs alcalinidad y fuerza de cianuro, cuyos promedios son -0,09 y -0,37 respectivamente, así mismo, el análisis de regresión muestra valores de significancia p en todos los casos menores a 0,05 solo para la variable de temperatura, siendo $p = 0,002$ como valor promedio de las cuatro campañas iniciales; queda demostrado con el resultado de los análisis anteriores a la temperatura de la solución de elución como la variable con mayor relevancia en los ciclos de desorción de oro.
2. La evaluación inicial determinó que un incremento rápido en la temperatura de trabajo en la solución eluyente tiene influencia positiva sobre la constante cinética, esta afirmación es corroborada en los análisis de las campañas posteriores, donde el mejor control operativo de la temperatura alrededor de 80 °C desde el inicio del ciclo de desorción permitió obtener mejores constantes cinéticas. El valor promedio de las constantes antes y después de la implementación del control operativo son 1,83 días⁻¹ y 3,53 días⁻¹ respectivamente, esta diferencia sustancial permite establecer un rango operativo de alrededor de 80 °C como

temperatura inicial en la solución de elución a fin de garantizar cinéticas de desorción más adecuadas.

3. El mejor control operativo de la temperatura de trabajo de la solución eluyente permitió alcanzar el objetivo principal del presente trabajo, se estableció como estadístico de comparación al coeficiente de variación. Los valores promedio antes y después del control operativo fueron 16,47 y 2,29. Con estos valores se alcanza una disminución de 86,09% el valor de variación de temperatura.

RECOMENDACIONES

1. De la presente investigación se desprende que el control operativo de la temperatura inicial alrededor de 80 °C permite alcanzar mejores cinéticas de recuperación en la desorción del oro, esta afirmación deduce a la temperatura como la variable principal, sin embargo, no se puede menoscar la importancia de las otras variables como la alcalinidad, fuerza de cianuro y otras variables no consideradas para este trabajo, cada una de ellas cumple un rol preponderante en los ciclos de desorción, ya sea para alcanzar el pH de trabajo o la potencia de cianuro necesaria para garantizar un buen despojamiento del metal precioso contenido en el lecho de carbón activado.
2. El estudio presentado estuvo enfocado principalmente en el mejoramiento de la cinética de desorción del oro, sin embargo, es ampliamente difundido que la plata es el elemento acompañante en los procesos de adsorción y desorción de carbón activado, en ese sentido, el presente estudio debe ampliarse para la evaluación del metal argento a fin de obtener mejores recuperaciones de ambos metales preciosos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, M. (1989). *The chemistry of the carbon in pulp process*. University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Alvarez, M., & Camargo, Y. (2022). *Optimización en la recuperación de oro del proceso de desorción de carbón activado en la empresa Ecoservicios e Ingeniería limpia s.a.c.*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ.
- Brier, J., & Lee, J. L. (2020). *Gold Metallurgy and the Environment*.
- Davidson, R. J., & Veronese, V. (1979). Further Studies on the Elution of Gold From Activated Carbon Using Water As the Eluant. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 79(15), 437–445.
- Dueñas, F. (2020). *Evaluación de parámetros hidrodinámicos en un reactor airlift piloto para su potencial aplicación en procesos de lixiviación de minerales oxidados de cobre*.
http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/15706/Dueñas_mf.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fleming, C. A., Mezei, A., Bourricaudy, E., Canizares, M., & Ashbury, M. (2011). Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits. *Minerals Engineering*, 24(6), 484–494.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.021>
- Fleming, C. A., & Nicol, M. J. (1984). Absorption of Gold Cyanide Onto Activated Carbon - Iii. Factors Influencing the Rate of Loading and the Equilibrium Capacity. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 84(4), 85–93.
- Free, M. L. (2022). *Hydrometallurgy, Fundamentals and Applications (Second)*.
- Jackson, E. (1986). *Hydrometallurgical Extraction and Reclamation*. Ellis Horwood.
- Jai, G., Senanayake, G., Shah, N., Thi-Le, X. N., Parkinson, G., & Fawcett, D. (2011). *Aurocyanide complex on granular activated carbons derived Adsorption of the aurocyanide - preliminary study*. MURDOCH.

- Jia, Y. F., Steele, C. J., Hayward, I. P., & Thomas, K. M. (1998). Mechanism of adsorption of gold and silver species on activated carbons. *Carbon*, 36(9), 1299–1308. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00091-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00091-8)
- Lodi, A. (2006). *OPTIMIZING THE OPERATING CONDITIONS OF GOLD ELUTION AND ELECTROWINNING FOR TAU LEKOA STREAM AT KOPANANG GOLD PLANT*.
- Marsden, J., & House, C. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction John O Marsden and C Lain House (Second)*. Society for mining, metallurgy and exploration.
- McDougall, G. J., & Hancock, R. D. (1981). Gold complexes and activated carbon - A literature review. *Gold Bulletin*, 14(4), 138–153. <https://doi.org/10.1007/BF03216558>
- McDougall, G. J., Hancock, R. D., Nicol, M. J., Wellington, O. L., & Copperthwaite, R. G. (1980). Mechanism of the Adsorption of Gold Cyanide on Activated Carbon. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 80(9), 344–356.
- Philip, T. (2015). *Effect of temperature , contact time and agitation speed during pre- treatment on elution of gold* (Issue December). Stellenbosch University.
- Rogans, J. (2012). Activated Carbon in Gold Recovery. *Kemix (Pty) Ltd, June*, 1–34.
- Ros, A. (2017). *Recopilación sobre la Metalurgia del Oro*.
- Snyders, C. A., Akdogan, G., Bradshaw, S. M., & Van Wyk, A. P. (2017). Gold CIP and CIL process optimization in a capital constraint environment. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(8), 819–828. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n8a13>
- Tahli, L., & Wahyudi, T. (2017). Desorption of gold and silver from activated carbon. *Indonesian Mining Journal*, 20(1), 39–47. <https://doi.org/10.30556/imj.vol20.no1.2017.184>
- Teirlinck, P. A. M., & Petersen, F. W. (1996). The nature of gold-iodide adsorption onto coconut-shell carbon. *Minerals Engineering*, 9(9), 923–930. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00084-2](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00084-2)

- Van Der Merwe, P. F. (1991). *Fundamentals of the Elution of Gold Cyanide From Activated Carbon*. June.
- Van Deventer, J., & Van der Merwe, P. (1993). The effect of temperature on the desorption of gold cyanide from activated carbon. *Thermochimica Acta*, 221(1), 99–113. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(93\)80527-H](https://doi.org/10.1016/0040-6031(93)80527-H)
- Van Deventer, J., & Van Der Merwe, P. (1994). *The Mechanism of Elution of Gold Cyanide from Activated Carbon*. 25(December), 829–838.
- Yannopoulos, J. C. (1991). *The Extractive Metallurgy of Gold Extractive of Gold*.

ANEXOS

- Resumen de datos, campañas 1 al 4

RESUMEN CAMPAÑA 1							
Lote	Carbón Húmedo	Humedad	Carbón Seco	Au en Carbón	Au Fino	Ley de cabeza	Vol. Solución
	kg	%	kg	g/kg	g	g	L
1	5446.50	29.45	3842.51	2.43	9344.97	11008.47	4600
2	1041.00	28.47	744.63	2.23	1663.50		

Hora	Fecha	Au	pH	% CN	VOL	AMP	T °C	Au Acumulado	Fecha	Recuperación	CN	Alcalinidad	Temperatura
								mg/L		%	%	pH	°C
15:50	02/01/2023								02/01/2023				
15:55	02/01/2023	505.35	13	0.458	2.9	498	60	505.35	02/01/2023	21.12	0.46	13.00	60
7:40	03/01/2023	248.98	12.5	0.4	3	279	64	754.33	03/01/2023	31.52	0.40	12.50	64
8:00	04/01/2023	286.09	13	0.78	2.9	300	65	1040.43	04/01/2023	43.48	0.78	13.00	65
12:00	04/01/2023	340.06	13	0.8	2.9	298	73	1380.49	04/01/2023	57.68	0.80	13.00	73
16:00	04/01/2023	373.72	13	0.804	2.9	318	82	1754.21	04/01/2023	73.30	0.80	13.00	82
7:45	05/01/2023	109.52	12	0.48	2.9	248	78	1863.73	05/01/2023	77.88	0.48	12.00	78
10:10	05/01/2023	235.72	13	0.56	2.9	496	80	2099.45	05/01/2023	87.73	0.56	13.00	80
14:50	05/01/2023	67.42	13	0.45	2.9	360	80	2166.87	05/01/2023	90.54	0.45	13.00	80
8:00	06/01/2023	12.17	13	0.28	2.9	250	80	2179.05	06/01/2023	91.05	0.28	13.00	80
12:10	06/01/2023	5.92	13	0.25	3	220	79	2184.96	06/01/2023	91.30	0.25	13.00	79

RESUMEN CAMPAÑA 2							
Lote	Carbón Húmedo	Humedad	Carbón Seco	Au en Carbón	Au Fino	Ley de cabeza	Vol. Solución
	kg	%	kg	g/kg	g	g	L
1	4970.00	32.23	3368.17	3.83	12913.56	16589.65	4600
2	1479.50	28.56	1056.95	3.48	3676.09		

Hora	Fecha	Au	pH	% CN	AMP	T °C	Au Acumulado	Fecha	Recuperación	CN	Alcalinidad	Temperatura	
							mg/L		%	%	pH	°C	
2:20	07/01/2023								07/01/2023				
13:45	08/01/2023	1264.36	13.00	0.466	886	62	1264.36	08/01/2023	35.06	0.47	13.00	62	
17:20	08/01/2023	1112.79	13.00	0.430	630	80	2377.15	08/01/2023	65.91	0.43	13.00	80	
19:30	08/01/2023	598.60	13.00	0.480	621	84	2975.75	08/01/2023	82.51	0.48	13.00	84	
21:30	08/01/2023	222.14	13.00	0.450	570	82	3197.89	08/01/2023	88.67	0.45	13.00	82	
23:00	08/01/2023	39.02	13.00	0.408	578	81	3236.91	08/01/2023	89.75	0.41	13.00	81	
0:05	09/01/2023	26.72	12.50	0.384	549	80	3263.63	09/01/2023	90.49	0.38	12.50	80	
4:30	09/01/2023	7.01	13.00	0.352	569	80	3270.64	09/01/2023	90.69	0.35	13.00	80	
19:05	09/01/2023	3.62	13.00	0.264	542	81	3274.27	09/01/2023	90.79	0.26	13.00	81	
13:50	10/01/2023	1.35	13.00	0.242	543	78	3275.62	10/01/2023	90.83	0.24	13.00	78	
19:45	10/01/2023	0.97	13.00	0.240	546	79	3276.59	10/01/2023	90.85	0.24	13.00	79	

RESUMEN CAMPAÑA 3							
Lote	Carbón Húmedo	Humedad	Carbón Seco	Au en Carbón	Au Fino	Ley de cabeza	Vol. Solución
	kg	%	kg	g/kg	g	g	L
1	5081.50	31.23	3494.55	1.26	4389.15	5530.67	4600
2	1413.50	30.14	987.47	1.16	1141.52		

Hora	Fecha	Au	pH	% CN	AMP	T °C	Au Acumulado	Fecha	Recuperación	CN	Alcalinidad	Temperatura	
							mg/L		%	%	pH	°C	
12:17	11/01/2023								11/01/2023				
12:22	11/01/2023	30.00	13.00	0.224	408	50	30.00	11/01/2023	2.49	0.22	13.00	50	
3:50	11/01/2023	40.73	13.00	0.208	545	61	70.72	11/01/2023	5.88	0.21	13.00	61	
9:00	11/01/2023	44.11	13.00	0.196	527	78	114.83	11/01/2023	9.55	0.20	13.00	78	
13:15	11/01/2023	47.49	12.50	0.180	562	84	162.33	11/01/2023	13.50	0.18	12.50	84	
18:10	11/01/2023	32.51	13.00	0.256	589	84	194.84	11/01/2023	16.20	0.26	13.00	84	
19:45	11/01/2023	25.87	13.00	0.242	586	86	220.71	11/01/2023	18.36	0.24	13.00	86	
3:30	11/01/2023	9.75	12.50	0.208	608	82	230.46	11/01/2023	19.17	0.21	12.50	82	
10:05	12/01/2023	4.68	12.50	0.144	564	85	235.13	12/01/2023	19.56	0.14	12.50	85	
4:05	12/01/2023	2.31	12.50	0.120	511	81	237.44	12/01/2023	19.75	0.12	12.50	81	
19:30	12/01/2023	2.14	13.00	0.100	508	81	239.58	12/01/2023	19.93	0.10	13.00	81	

RESUMEN CAMPAÑA 4							
Lote	Carbón Húmedo	Humedad	Carbón Seco	Au en Carbón	Au Fino	Ley de cabeza	Vol. Solución
	kg	%	kg	g/kg	g	g	L
1	5185.00	31.76	3538.24	3.49	12330.78	15099.00	4600
2	1291.30	29.92	904.94	3.06	2768.22		

Hora	Fecha	Au	pH	% CN	AMP	T °C	Au Acumulado	Fecha	Recuperación	% CN	pH	T °C
		mg/L		%		°C	mg/L	03/02/2023	%	%	pH	°C
1:15	03/02/2023					61	471.52	03/02/2023	14.37	0.47	13.00	61
1:20	03/02/2023	471.52	13.00	0.466	512	61	1045.96	03/02/2023	31.87	0.49	13.00	74
12:20	03/02/2023	574.44	13.00	0.488	509	74	1655.46	03/02/2023	50.43	0.47	13.00	76
16:20	03/02/2023	609.50	13.00	0.470	498	76	2063.39	03/02/2023	62.86	0.50	12.50	80
20:15	03/02/2023	407.94	12.50	0.496	467	80	2460.17	04/02/2023	74.95	0.47	13.00	78
5:00	04/02/2023	396.77	13.00	0.472	523	78	2735.57	04/02/2023	83.34	0.46	14.00	79
10:40	04/02/2023	275.41	14.00	0.456	449	79	2833.13	04/02/2023	86.31	0.37	13.00	81
16:30	04/02/2023	97.56	13.00	0.370	480	81	2844.03	04/02/2023	86.65	0.42	13.00	79
19:40	04/02/2023	10.90	13.00	0.416	407	79	2907.33	05/02/2023	88.57	0.36	13.00	80
0:30	05/02/2023	63.30	13.00	0.360	402	80	2959.29	05/02/2023	90.16	0.58	13.00	80
5:10	05/02/2023	51.96	13.00	0.576	460	80						

- Resumen de datos, campañas 5 a 8 para determinación de variabilidad de temperatura

CAMPAÑA 5 09/02/2023

hora	tiempo	tiempo ac	temperatura
	h	h	°C
15:48	0.00	0	40
16:40	0.87	1	50
17:45	1.08	2	60
0:00	6.25	8	82
4:40	4.67	13	82
8:10	3.50	16	81
12:00	3.83	20	84
17:00	5.00	25	87
20:30	3.50	29	84
0:15	3.75	32	82
4:40	4.42	37	82

CAMPAÑA 6 21/02/2023

hora	tiempo	tiempo ac	temperatura
	h	h	°C
17:14	0.00	0	50
0:30	7.27	7	62
5:40	5.17	12	75
11:35	5.92	18	79
16:00	4.42	23	81
20:00	4.00	27	83
0:00	4.00	31	86
4:50	4.83	36	84
6:18	1.47	37	83
16:45	10.45	48	80
20:30	3.75	51	80
23:15	2.75	54	81
1:05	1.83	56	80
2:30	1.42	57	81

CAMPAÑA 7 26/02/2023

hora	tiempo	tiempo ac	temperatura
	h	h	°C
15:50	0.00	0	60
15:55	0.08	1	60
7:40	15.75	16	64
8:00	0.33	16	65
12:00	4.00	20	73
16:00	4.00	24	82
7:45	15.75	40	78
10:10	2.42	42	80
14:50	4.67	47	80
8:00	17.17	64	80
12:10	4.17	68	79

CAMPAÑA 8 11/03/2023

hora	tiempo	tiempo ac	temperatura
	h	h	°C
12:22	0.00	0	50
3:50	15.47	15	61
9:00	5.17	21	78
13:15	4.25	25	84
18:10	4.92	30	84
19:45	1.58	31	86
3:30	7.75	39	82
10:05	6.58	46	85
4:05	18.00	64	81
19:30	15.42	79	81

- Resumen de datos campañas 9 a 12, determinación del incremento de la constante cinética promedio.

RESUMEN CAMPAÑA 9							
Lote	Carbón Húmedo	Humedad	Carbón Seco	Au en Carbón	Au Fino	Ley de cabeza	Vol. Solución
	kg	%	kg	g/kg	g	g	L
1	5676.50	29.35	4010.45	1.28	5133.37	6541.37	4600
2	1064.00	28.47	761.08	1.85	1408.00		

Hora	Fecha	Au	pH	% CN	VOL	AMP	TEMP	Au Acumulado	Recuperación	CN	Alcalinidad	Temperatura
								mg/L	%	%	pH	°C
15:50	03/03/2023											
15:55	03/03/2023	505.35	13	0.458	2.9	498	79	505.35	35.54	0.46	13.00	79
7:40	04/03/2023	248.98	12.5	0.4	3	279	80	754.33	53.05	0.40	12.50	80
8:00	05/03/2023	286.09	13	0.78	2.9	300	78	1040.43	73.16	0.78	13.00	78
12:00	05/01/2023	240.06	13	0.8	2.9	298	77	1280.49	90.05	0.80	13.00	77
16:00	05/03/2023	31.72	13	0.804	2.9	318	82	1312.21	92.28	0.80	13.00	82
7:45	06/03/2023	6.52	12	0.48	2.9	248	78	1318.73	92.74	0.48	12.00	78
10:10	06/03/2023	2.72	13	0.56	2.9	496	80	1321.45	92.93	0.56	13.00	80
14:50	06/03/2023	1.42	13	0.45	2.9	360	80	1322.87	93.03	0.45	13.00	80
8:00	06/03/2023	1.17	13	0.28	2.9	250	80	1324.05	93.11	0.28	13.00	80
12:10	06/03/2023	0.92	13	0.25	3	220	79	1324.96	93.17	0.25	13.00	79

RESUMEN CAMPAÑA 10							
Lote	Carbón Húmedo	Humedad	Carbón Seco	Au en Carbón	Au Fino	Ley de cabeza	Vol. Solución
	kg	%	kg	g/kg	g	g	L
1	5278.60	29.76	3707.69	3.46	12828.60	16107.84	4600
2	1498.70	29.87	1051.04	3.12	3279.24		

Hora	Fecha	Au	pH	% CN	VOL	AMP	TEMP	Au Acumulado	Recuperación	CN	Alcalinidad	Temperatura
								mg/L	%	%	pH	°C
2:20	08/03/2023											
2:25	08/03/2023	1264.36	13	0.466	2.8	886	80	1264.36	36.11	0.47	13.00	80
9:20	08/03/2023	1112.79	13	0.43	2.8	630	79	2377.15	67.89	0.43	13.00	79
19:30	08/03/2023	598.60	13	0.48	2.9	621	84	2975.75	84.98	0.48	13.00	84
21:30	08/03/2023	222.14	13	0.45	2.9	570	82	3197.89	91.32	0.45	13.00	82
23:00	08/03/2023	39.02	13	0.408	2.9	578	81	3236.91	92.44	0.41	13.00	81
4:05	09/03/2023	26.72	12.5	0.384	2.9	549	80	3263.63	93.20	0.38	12.50	80
14:30	09/03/2023	7.01	13	0.352	2.8	569	78	3270.64	93.40	0.35	13.00	78
20:05	09/03/2023	3.62	13	0.264	2.9	542	81	3274.27	93.50	0.26	13.00	81
3:50	10/03/2023	1.35	13	0.242	2.9	543	78	3275.62	93.54	0.24	13.00	78
7:45	10/03/2023	0.97	13	0.24	2.8	546	79	3276.59	93.57	0.24	13.00	79

RESUMEN CAMPAÑA 11							
Lote	Carbón Húmedo	Humedad	Carbón Seco	Au en Carbón	Au Fino	Ley de cabeza	Vol. Solución
	kg	%	kg	g/kg	g	g	L
1	4998.00	38.98	3049.78	3.57	10887.71	14167.18	4600
2	1465.00	29.16	1037.81	3.16	3279.47		

Hora	Fecha	Au	pH	% CN	VOL	AMP	TEMP	Au Acumulado	Recuperación	CN	Alcalinidad	Temperatura
								mg/L	%	%	pH	°C
21:55	15/04/2023											
22:00	15/04/2023	1019.19	14	0.76	2.8	574	80	1019.19	33.09	0.76	14.00	80
3:30	16/04/2023	677.98	14	0.716	2.8	548	79	1697.16	55.11	0.72	14.00	79
8:00	16/04/2023	462.73	14	0.6	2.8	516	79	2159.89	70.13	0.60	14.00	79
15:30	16/04/2023	279.28	14	0.54	2.8	474	84	2439.17	79.20	0.54	14.00	84
19:15	16/04/2023	207.71	14	0.58	2.9	476	83	2646.88	85.94	0.58	14.00	83
4:45	17/04/2023	68.04	13.5	0.416	2.8	441	80	2714.92	88.15	0.42	13.50	80
8:30	17/04/2023	55.96	13	0.35	2.9	450	83	2770.87	89.97	0.35	13.00	83
10:10	17/04/2023	59.01	13	0.32	2.9	425	80	2829.88	91.88	0.32	13.00	80
14:00	17/04/2023	45.83	13	0.27	2.9	429	80	2875.72	93.37	0.27	13.00	80
20:05	17/04/2023	20.42	12.5	0.248	2.8	400	79	2896.14	94.04	0.25	12.50	79
0:15	18/04/2023	16.98	13	0.424	2.8	440	81	2913.12	94.59	0.42	13.00	81
4:00	18/04/2023	9.64	13	0.4	2.8	418	80	2922.76	94.90	0.40	13.00	80

RESUMEN CAMPAÑA 12							
Lote	Carbón Húmedo	Humedad	Carbón Seco	Au en Carbón	Au Fino	Ley de cabeza	Vol. Solución
	kg	%	kg	g/kg	g	g	L
1	5220.00	30.67	3619.03	3.45	12485.64	15776.06	4600
2	1445.00	30.15	1009.33	3.26	3290.42		

Hora	Fecha	Au	pH	% CN	VOL	AMP	TEMP	Au Acumulado	Recuperación	CN	Alcalinidad	Temperatura
								mg/L	%	%	pH	°C
	23/05/2023											
2:00	23/05/2023	1141.48	13	0.47	3.4	1750	79	1141.48	33.28	0.47	13.00	79
5:45	23/05/2023	1073.04	13	0.54	3.4	1765	78	2214.52	64.57	0.54	13.00	78
10:10	23/05/2023	612.42	13	0.56	3.45	1850	83	2826.94	82.43	0.56	13.00	83
15:25	24/05/2023	212.86	13	0.448	3.4	1950	82	3039.80	88.63	0.45	13.00	82
21:00	24/05/2023	106.36	13	0.304	3.4	1900	85	3146.16	91.74	0.30	13.00	85
4:00	25/05/2023	23.40	12.5	0.11	3.4	1600	82	3169.56	92.42	0.11	12.50	82
8:25	25/05/2023	14.86	12.5	0.176	3.4	1525	80	3184.42	92.85	0.18	12.50	80
14:25	25/05/2023	5.82	13	0.48	3.4	1675	80	3190.24	93.02	0.48	13.00	80
17:15	25/05/2023	11.61	13	0.344	3.4	1625	80	3201.85	93.36	0.34	13.00	80
19:45	25/05/2023	7.36	13	0.36	3.4	1650	82	3209.21	93.57	0.36	13.00	82
23:45	26/05/2023	5.45	13	0.26	3.2	1600	84	3214.66	93.73	0.26	13.00	84
4:00	26/05/2023	3.95	13	0.2	3.2	1600	86	3218.60	93.85	0.20	13.00	86
9:30	26/05/2023	5.14	13	0.128	3.5	1800	82	3223.74	94.00	0.13	13.00	82