

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



TESIS

**RECUPERACION DE ORO POR ELECTRODEPOSICION A PARTIR DE
SOLUCIONES CIANURADAS PROVENIENTES DE LAS PILAS DE
LIXIVIACION EN LA PLANTA NUEVA BONANZA: CARAVELI – AREQUIPA**

(Investigación tecnológica)

PRESENTADO POR:

Br. ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Br. SOCRATES LEON SURCO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

ING. EDUARDO MARCELO QUISPE NINA

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: Recuperación de oro por electrodeposición a partir de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación en la planta nueva Bonanza: Caraveli-Arequipa. (Investigación tecnológica)

Presentado por: Br. Aldair Espinoza Fuentes DNI N° 71454096

presentado por: Br. Socrates Leon Surco DNI N° 76144946

Para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Metalurgico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 5 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 10 de abril de 2025



Firma

Post firma Eduardo Marcelo Quispe Nina.

Nro. de DNI 23957149

ORCID del Asesor 0000-0002-4473-1580

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:447642868

ALDAIR ESPINOZA FUENTES SOCRAT

RECUPERACION DE ORO POR ELECTRODEPOSICION A PARTIR DE SOLUCIONES CIANURADAS PROVENIENTES DE L...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:447642868

187 Páginas

Fecha de entrega

10 abr 2025, 8:31 a.m. GMT-5

24.882 Palabras

Fecha de descarga

10 abr 2025, 8:44 a.m. GMT-5

136.614 Caracteres

Nombre de archivo

TESIS FINAL 12.docx

Tamaño de archivo

15.1 MB

5% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.




Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 12 words)

Exclusions

- 38 Excluded Matches

Top Sources

- 5%  Internet sources
- 0%  Publications
- 3%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

PRESENTACION

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores Docentes, miembros del jurado:

En cumplimiento al art. 18 del Reglamento de Grados y Títulos vigente en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, aprobado por Resolución N° CU-324-2020-UNSAAC/ y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a su disposición el trabajo de investigación titulada:

“RECUPERACIÓN DE ORO POR ELECTRODEPOSICIÓN A PARTIR DE SOLUCIONES CIANURADAS PROVENIENTES DE LAS PILAS DE LIXIVIACIÓN EN LA PLANTA NUEVA BONANZA: CARAVELI – AREQUIPA”. (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo recuperar oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas provenientes de la planta Nueva Bonanza -Caraveli. Para llevar a cabo el estudio, se diseñará y construirá una celda electrolítica a escala de laboratorio, permitiendo un análisis más detallado del proceso.

El presente estudio contribuirá a la optimización de la tecnología actual empleada en la recuperación de oro. Además, será una valiosa fuente de información para profesionales especializados e interesados en los campos de la hidrometalurgia y la electrometalurgia.

Bach. Aldair Espinoza Fuentes

Bach. Socrates Leon Surco

DEDICATORIA

A mis padres Dante y Lucila, por creer siempre en mí, por sus consejos, por su apoyo continuo e incondicional en el transcurso de mi vida, estaré eternamente agradecido por todo lo que me inculcaron.

A Marisol, mi esposa y a mi hijo, Ian Darius, por su paciencia, por el constante apoyo incondicional y darme toda la fuerza para seguir adelante en mis proyectos.

A mis hermanos Bressly, Midwar y Amaru, quienes confiaron plenamente en mí y me motivaron a continuar avanzando en mi desarrollo profesional.

A Juanita y José, quienes desde el cielo me acompañan en cada paso que tomo.

Aldair Espinoza Fuentes.

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis está dedicado a mis padres, Aquelino y Maura, quienes son mi fuente constante de inspiración y el motor que me ha impulsado a alcanzar esta meta. Gracias a su amor incondicional, su paciencia y los valiosos consejos que me han brindado, he logrado culminar esta etapa de mi formación profesional. Soy lo que soy gracias a ellos.

A mis hermanos y hermanas, por su apoyo moral y por confiar siempre en mí. Gracias por estar a mi lado en todo momento. Esta tesis es un testimonio de sacrificio y dedicación, y no hubiera sido posible sin su respaldo.

Con todo mi cariño y gratitud, de corazón;

Socrates León Surco.

AGRADECIMIENTO

Primero, manifestamos nuestro reconocimiento a dios por habernos orientado en este trayecto. Además, expresamos nuestro agradecimiento a nuestro centro de estudios superiores, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

Agradecemos a los docentes y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por las lecciones, vivencias y valiosos saberes que nos han proporcionado para nuestra educación como profesionales competentes. Valoramos profundamente a cada uno por su compromiso y respaldo incondicional.

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento y especial gratitud al Ing. Eduardo Marcelo Quispe Nina, asesor de nuestra tesis, por su tiempo, capacidad y conocimientos al guiarnos durante su desarrollo. También valoramos su paciencia al orientarnos en el cumplimiento de los objetivos planteados.

Agradecemos a los dictaminantes por su generosidad y preciado tiempo dedicados a verificar este trabajo, así como a los miembros del jurado en la sustentación por la participación en la conclusión de esta investigación.

A nuestros familiares por su apoyo incondicional y la ayuda que nos brindaron, lo que nos permitió seguir adelante y convertirnos en mejores personas. Ellos fueron una fuente de motivación constante para nosotros.

Aldair y Socrates.

CONTENIDO

PRESENTACION.....	v
DEDICATORIA	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
LISTADO DE TABLAS.....	xviii
SIMBOLOGIA	xx
RESUMEN	xxi
ABSTRACT.....	xxii
INTRODUCCION	xxiii
CAPÍTULO I	1
ASPECTOS GENERALES	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema General.....	2
1.2.2. Problemas Específicos	2
1.3. Justificación.....	2
1.3.1. Justificación Económica	2
1.3.2. Justificación Tecnológica.....	3
1.3.3. Justificación Ambiental	3

1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes (estado de arte).....	5
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	5
2.1.2. Antecedentes nacionales	7
2.2. Bases teóricas	10
2.2.1. Oro	10
2.2.2. Definición de cianuración.....	12
2.2.3. Fundamentos termodinámicos de la lixiviación	13
2.2.4. Cinética química de la cianuración	18
2.2.5. mecanismos de cianuración	20
2.2.6. Cianuración de oro en pilas de lixiviación.....	22
2.2.7. Extracción de oro a partir de soluciones cianuradas.....	25
2.2.8. Método Merrill Crowe.	25
2.2.9. Método adsorción – desorción	30
2.2.10. Desorción de oro con carbón activado.....	33
2.2.11. Electroquímica.	33
2.2.12. Principios electroquímicos.....	34
2.2.12.1. Ionización	34
2.2.12.2. Potencial eléctrico estándar	35
2.2.12.3. Leyes electroquímicas	38

2.2.12.4. Conducción electrolítica	39
2.2.13. Leyes de Faraday	39
2.2.13.1. Primera ley de Faraday	40
2.2.13.2. Segunda ley de Faraday.....	40
2.2.14. Equivalente electroquímico	41
2.2.15. Eficiencia de corriente	42
2.2.16. Celdas electroquímicas	42
2.2.16.1. Celda galvánica.....	42
2.2.16.2. Celda electrolítica.	44
2.2.17. Electrometalurgia.....	45
2.2.18. Electrodeposición de oro.....	47
2.2.19. Reacciones químicas durante la electrodeposición de oro.....	50
2.2.19.1 Reducción catódica de oro.....	50
2.2.19.2. Reducción del oxígeno y agua.....	51
2.2.19.3. Reacciones anódicas.	52
2.2.20. Cinética de reacción durante la electrodeposición de oro.....	53
2.2.21. Electrolisis.....	58
2.2.22. Tipos de celda de electrodeposición	59
2.2.22.1. Celda ZADRA	59
2.2.22.2. Celda AARL	60
2.2.22.3. Celda de GRAFITO NIM	60
2.2.22.4. Celda de lana de acero MINTEK	62
2.2.23. Rectificador de corriente.....	63

3. HIPOTESIS Y VARIABLES.....	64
3.1. Hipótesis.....	64
3.1.1. Hipótesis General.....	64
3.1.2. Hipótesis Específica.....	64
3.2. Variables e indicadores	65
3.2.1. Variable Dependiente.....	65
3.2.2. Variables Independientes	65
3.2.3. Indicadores	65
3.2.4. Operacionalización de variables	66
4. METODOLOGÍA.....	67
4.1. Ámbito del estudio	67
4.2. Tipo de Investigación	69
4.3. Nivel de investigación	69
4.4. Método de investigación	70
4.5. Diseño de investigación	71
4.6. Población y muestra	73
4.6.1. Población de estudio	73
4.6.2. Muestra de estudio	73
4.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	73
4.7.1. Técnicas de recolección de datos	73
4.7.2. Instrumentos de recolección de datos	74

4.8.	Validez y confiabilidad de instrumentos	74
4.9.	Viabilidad	74
4.10.	Plan de análisis de datos	74
CAPITULO V		75
5.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	75
5.1.	Desarrollo del proyecto de investigación	75
5.2.	Proceso de construcción de la celda de electrodeposición	75
5.2.1.	Determinación de los parámetros de diseño de la celda	75
5.2.2.	Cálculo de las dimensiones del diseño de la celda.	76
5.2.3.	Elección de materiales para la fabricación de la celda.	89
5.2.4.	Montaje final de la celda de electrodeposición.	89
5.2.5.	Colocación de la celda en el circuito operativo del proceso.	91
5.3.	Pruebas experimentales	92
5.3.1.	Procedimiento experimental de electrodeposición	92
5.3.2.	Cálculos realizados	98
5.3.3.	Resultados	102
CAPITULO VI		106
6.	ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	106
6.1.	Diseño factorial 2^3	106
6.2.	Resultados de las pruebas metalúrgicas	107
6.3.	Análisis y discusión	130

6.3.1.	Representación geométrica de las combinaciones	130
6.3.2.	Diagrama de Pareto de efectos en la recuperación	131
6.3.3.	Grafica de residuos para % de Au.....	132
6.3.4.	Grafica normal de los efectos en la recuperación	133
6.3.5.	Análisis de los efectos principales de cada variable	134
6.3.6.	Análisis de varianza (ANOVA)	135
6.3.7.	Coefficientes codificados para el modelo matemático.....	136
6.3.8.	Modelo de correlación para la optimización del proceso	137
6.3.9.	Optimización de la recuperación	137
6.3.10.	Gráfico de superficie y contornos de respuesta (Y).....	139
6.4.	Discusión de resultados	140
CONCLUSIONES		141
RECOMENDACIONES.....		142
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		143
Anexos		¡Error! Marcador no definido.
Matriz de consistencia.....		¡Error! Marcador no definido.
ANEXO N° 01 REPORTE DE ANÁLISIS QUIMICO REALIZADO EN LABORATORIOS		147
ANEXO N° 02 FOTOGRAFÍAS TOMADAS DURANTE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO		

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema agua-cianuro.....	14
Figura 2 Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema oro-agua	15
Figura 3 Diagrama de estabilidad Eh-pH para sistemas oro-cianuro-agua a 25°C	16
Figura 4 Diagrama Eh-pH sistema Au-SCN-agua a 25°C.....	17
Figura 5 Interpretación de la cinética de cianuración de oro por el intermedio de las curvas de polarización.....	18
Figura 6 Representación esquemática de las etapas de una reacción química heterogénea	19
Figura 7 Disolución de oro	21
Figura 8 Diagrama de flujo de una planta de precipitación Merrill-Crowe.....	29
Figura 9 Terminología del proceso de adsorción y desorción en corriente alterna.	30
Figura 10 Lixiviación en columna nivel laboratorio.	31
Figura 11 Carbón en pulpa.....	32
Figura 12 Carbón en lixiviación.	33
Figura 13 Iones disociados en una solución.	34
Figura 14 Potencial estándar de elementos en soluciones acidas.	36
Figura 15 Potencial estándar de elementos en solución básica.	37
Figura 16 Celda galvánica	43
Figura 17 Celda electrolítica.....	44
Figura 18 Representación esquemática de requerimientos de un sistema de celda simple.	48
Figura 19 Esquemática de la caída de potencial a través de una celda electrolítica.	49
Figura 20 Curva corriente – potencial mostrando el efecto de concentración de oro.	54
Figura 21 curva corriente – potencial mostrando el efecto de concentración de cianuro.....	58

Figura 22 Tipo de celda Zadra.....	59
Figura 23 Esquema de celda electrolítica AARL.	60
Figura 24 Esquema de celda de grafito NIM.	61
Figura 25 Esquema de la celda de lana de acero MINTEK.....	62
Figura 26 Localización de la planta Nueva Bonanza	67
Figura 27 Diagrama de flujo de la planta de lixiviación en pilas.	68
Figura 28 Diseño de la celda electrolítica.....	77
Figura 29 Diseño de la tapa de la celda	78
Figura 30 Diseño de ánodo	79
Figura 31 Diseño del cátodo.	80
Figura 32 Diseño del tanque barren.	81
Figura 33 Diseño de varillas	82
Figura 34 Plano de diseño de la celda electrolítica.....	83
Figura 35 Plano de diseño de la tapa de la celda electrolítica.	84
Figura 36 Plano de diseño del ánodo.	85
Figura 37 Plano de diseño del cátodo.	86
Figura 38 Plano de diseño del tanque barren.....	87
Figura 39 Plano de diseño de las varillas.....	88
Figura 40 Celda ensamblada.....	90
Figura 41 Ánodo ensamblado.....	90
Figura 42 Cátodo ensamblado	91
Figura 43 Diagrama de flujo de circuito de electrodeposición.....	91
Figura 44 Circuito armado.....	92

Figura 45 Acondicionamiento de la solución cianurada.....	94
Figura 46 Cátodo con enmallado de la lana de acero y pesaje de la lana.....	94
Figura 47 Cátodos y ánodos en la celda.	95
Figura 48 Diseño completo del circuito.....	95
Figura 49 Circuito de electrodeposición en funcionamiento.	96
Figura 50 Reacciones presentes en la solución.....	97
Figura 51 Cosecha del cemento de oro presente en el cátodo.	97
Figura 52 Producto final	98
Figura 53 Pesaje inicial y final de la lana de acero.....	103
Figura 54 % de recuperación	105
Figura 55 Grafica de cubos de la recuperación de oro	130
Figura 56 Diagrama de Pareto	131
Figura 57 Grafica de residuos.....	132
Figura 58 Grafica normal de efectos estandarizados.....	133
Figura 59 Grafica de efectos principales	134
Figura 60 Resumen del análisis de varianza.....	135
Figura 61 Resumen del modelo	136
Figura 62 Coeficientes codificados.....	136
Figura 62 Coeficientes codificados.....	136
Figura 63 Optimización de respuesta: %	136
Figura 64 Grafica de contorno en la recuperación de oro.....	139

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del oro.....	11
Tabla 2. Propiedades químicas del oro.	12
Tabla 3. Operacionalización de variables	66
Tabla 4. Niveles de las variables.....	72
Tabla 5. Matriz del diseño factorial para la recuperación de oro.....	72
Tabla 6. Resultados del metal depositado en la lana de acero.	104
Tabla 7. Resultados obtenidos del análisis de laboratorio.	104
Tabla 8. % de recuperación de las pruebas realizadas en el laboratorio.....	105
Tabla 9. Valores mínimos y máximos	106
Tabla 10. Organización de diseño experimental.....	107
Tabla 11. Organización de diseño experimental con resultado.	107
Tabla 12. Condiciones iniciales para la prueba n° 01	108
Tabla 13. Balance metalúrgico de la prueba N° 01.....	108
Tabla 14. Condiciones iniciales para la prueba N°02	110
Tabla 15. Balance metalúrgico de la prueba N°02.....	110
Tabla 16. Condiciones iniciales para la prueba N° 03	112
Tabla 17. Balance metalúrgico de la prueba N°03.....	112
Tabla 18. Condiciones iniciales para la prueba N°04	114
Tabla 19. Balance metalúrgico de la prueba N°04.....	114
Tabla 20. Condiciones iniciales para la prueba N°05	116
Tabla 21. Balance metalúrgico de la prueba N°05.....	116
Tabla 22. Condiciones iniciales para la prueba N°06	118

Tabla 23. Balance metalúrgico de la prueba N°06.....	118
Tabla 24. Condiciones iniciales para la prueba N°07	120
Tabla 25. Balance metalúrgico de la prueba N°07.....	120
Tabla 26. Condiciones iniciales para la prueba N°08	122
Tabla 27. Balance metalúrgico de la prueba N°08.....	122
Tabla 28. Condiciones iniciales para la prueba N°09	124
Tabla 29. Balance metalúrgico de la prueba N°09.....	124
Tabla 30. Condiciones iniciales para la prueba N°10	126
Tabla 31. Balance metalúrgico de la prueba N°10.....	126
Tabla 32. Condiciones iniciales para la prueba N°11	128
Tabla 33. Balance metalúrgico de la prueba N°11.....	128
Tabla 34. factores óptimos para recuperación de oro	137

SIMBOLOGIA

Ac: corriente alterna

Dc: corriente directa

EC(%): porcentaje de eficiencia de corriente

mF: metal depositado

A/cm²: amperios por centímetro cuadrado

E.T.: electrodo de trabajo

E.R.: electrodo de referencia

A: amperios

V: voltios

m.s.n.m.: metros sobre nivel del mar

S.R.L.: sociedad de responsabilidad limitada

°C: grados Celsius

mg/L: miligramos por litro

pH: potencial de hidrogeno

%: porcentaje

n: cantidad de moles

Wh: watts por hora

RESUMEN

El proyecto de investigación tuvo como objetivo recuperar oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación de la planta Nueva Bonanza. Este estudio es de tipo tecnológico y de enfoque cuantitativo; se aplicó el diseño factorial 2^3 con puntos centrales, lo que incluyó 08 pruebas experimentales con los valores máximos y mínimos de cada variable, además de 03 pruebas con valores intermedios. Para las pruebas de laboratorio, se realizaron cálculos de las variables para el diseño y construcción del equipo. A través de esta investigación, se evaluó la viabilidad de realizar el proceso de electrodeposición directa, omitiendo los procesos de adsorción y desorción de soluciones cianuradas de oro, minimizando así los costos en obtención del metal valioso. Luego, los datos fueron analizados utilizando el software MINITAB 19, generando gráficas estadísticas y un modelo matemático. De acuerdo con los resultados de las 11 pruebas metalúrgicas realizadas, se logró una recuperación de oro del 70.83%, para valores de potencial eléctrico de 2.3V, tiempo de 1.5 horas y concentración de oro de 12.65 mg/l. Por otro lado, se alcanzó una alta extracción de oro de 94.72% para potencial eléctrico de 3.0V, tiempo de 2.5 horas y concentración de oro de 72.30mg/l, donde se observó que la concentración de oro es la variable más significativa en este estudio. De esta forma, podemos concluir que la recuperación de oro por electrodeposición directa es viable; como resultado, se obtuvo el modelo matemático: $\%R_{Au} = 70.7 - 6.78 X_1 - 6.44 X_2 - 0.027 X_3 + 6.25 X_1X_2 + 0.1678 X_1X_3 + 0.209 X_2X_3 - 0.1080 X_1X_2X_3 + 6.890$ Punto central.

Palabras claves: recuperación, electrodeposición, electrometalurgia, soluciones cianuradas.

ABSTRACT

The research project aimed to recover gold through direct electrodeposition from cyanide solutions originating from the leaching piles of the Nueva Bonanza plant. This study is of a technological nature and has a quantitative approach; a factorial design 2^3 with central points was applied, which included 08 experimental tests with the maximum and minimum values of each variable, in addition to 03 tests with intermediate values. For the laboratory tests, calculations of the variables were made for the design and construction of the equipment. Through this research, the feasibility of carrying out the direct electrodeposition process was evaluated, omitting the adsorption and desorption processes of cyanide gold solutions, thus minimizing costs in obtaining the valuable metal. Subsequently, the data were analyzed using MINITAB 19 software, generating statistical graphs and a mathematical model. According to the results of the 11 metallurgical tests conducted, a gold recovery of 70.83% was achieved for electric potential values of 2.3V, a time of 1.5 hours, and a gold concentration of 12.65 mg/l. On the other hand, a high gold extraction of 94.72% was reached for an electric potential of 3.0V, a time of 2.5 hours, and a gold concentration of 72.30 mg/l, where it was observed that the gold concentration is the most significant variable in this study. Thus, we can conclude that the recovery of gold through direct electrodeposition is feasible; as a result, the mathematical model obtained is: $\%R_{Au} = 70.7 - 6.78 X_1 - 6.44 X_2 - 0.027 X_3 + 6.25 X_1 X_2 + 0.1678 X_1 X_3 + 0.209 X_2 X_3 - 0.1080 X_1 X_2 X_3 + 6.890$ Central point.

Keywords: recovery, electrodeposition, electrometallurgy, cyanide solutions.

INTRODUCCION

La recuperación electrolítica del oro de soluciones de cianuro comenzó a implementarse industrialmente en el siglo XX con el método de Siemens-Halske. En este proceso, el oro presente en la solución cianurada es depositada en cátodos de plomo, los cuales se eliminan de manera periódica mediante fusión. El procedimiento se desarrolla en dos etapas en el cátodo fundido, donde el plomo se transforma en lingotes y, una vez aislado, se puede recuperar el oro. En 1950, Zadra ideó y realizó un experimento utilizando electrodos (cátodo) de lana de acero, la cual permite incrementar el área del cátodo y, por ende, el oro depositado se incrementa. Durante el proceso de electrodeposición, se aplica corriente eléctrica por un ánodo en una solución proveniente de la lixiviación con contenido metálico de oro, permitiendo así su extracción y posterior deposición en el cátodo a través de un proceso de galvanoplastia.

La electrodeposición es un método que permite extraer y depositar metal desde soluciones ricas mediante la utilización de energía eléctrica. Los equipos necesarios para llevar a cabo la electrolisis incluyen un rectificador de corriente, una celda, electrodos (ánodo y cátodo), y una solución cargada de oro. Además, se utilizan instrumentos de medición como un multímetro, pH metro y un cronómetro.

La finalidad del estudio es evaluar la viabilidad de implementar el proceso de electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas en la planta Nueva Bonanza, con el objetivo de mejorar la recuperación de oro y mejorar los costos operativos. El enfoque de la investigación consiste en determinar las condiciones operativas adecuadas para garantizar la eficiencia del proceso.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Planteamiento del problema

La tecnología tradicional para la extracción de oro de una solución diluida implica la adhesión del oro al carbón activado, seguida de la separación del carbón para obtener una solución concentrada, de la cual el oro se extrae mediante electrólisis convencional.

En la planta metalúrgica Nueva Bonanza, situada en el distrito de Caraveli en la región de Arequipa, se procesan minerales auríferos por cianuración. Estos minerales provienen en lotes del mismo yacimiento de la empresa, así como de diversas zonas aledañas pertenecientes a mineros artesanales, con contenidos metálicos variados. El producto final del proceso es el carbón activado cargado, que se transporta a otra planta de desorción para extraer el oro. Debido a esto, los costos de operación son elevados y las utilidades son mínimas. El presente estudio busca minimizar los costos operativos para la obtención del producto final, generando así mayores ganancias.

La problemática que se aborda en la elaboración del proyecto de investigación radica, en que los métodos de concentración previa típicamente empleados en la industria requieren un mayor número de operaciones para obtener el producto final de gran valor, lo que resulta en un incremento significativo en los costos del procedimiento. Por lo tanto, surge la necesidad de investigar el **método de electrodeposición directa** de soluciones cianuradas como una alternativa al uso de carbón activado para la obtención de oro.

La electrodeposición de oro a partir de soluciones cianuradas diluidas puede estar influenciada por diversas variables que afectan el proceso. Para ello, se investigará las variables

que inciden en la deposición electroquímica de oro para mejorar la eficiencia de las operaciones. Además, se diseñará y se construirá una celda de electrodeposición de tipo Mintek.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿Se podrá recuperar oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación de la planta Nueva Bonanza- Caraveli – Arequipa?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál será el potencial eléctrico necesario para la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación?
- ¿Cuál será el tiempo más adecuado para lograr la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación?
- ¿Cuál será la concentración óptima de oro para lograr la recuperación eficiente por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Económica

La presente investigación se justifica desde una perspectiva económica, ya que habrá una reducción en las etapas del proceso, lo que conlleva a un menor costo en la obtención de oro. El

proceso de electrodeposición utiliza electricidad para extraer el metal precioso de la solución. Este método es esencial para garantizar la recuperación total del oro durante la operación, especialmente en el caso de soluciones con alto grado de concentración. Además, el proceso generará un producto con menor presencia de metales básicos contaminantes, lo que reducirá tanto la necesidad como los costos asociados a la refinación del lingote final.

1.3.2. Justificación Tecnológica

Desde el punto de vista tecnológico, la justificación de la investigación radica en la combinación del proceso de cianuración de minerales auríferos en pilas de lixiviación y la electrodeposición directa de soluciones cianuradas, lo que permitirá optimizar la recuperación de oro al sustituir métodos convencionales como la adsorción con carbón activado y su posterior desorción, mediante el diseño y construcción de una celda tipo MINTEK.

1.3.3. Justificación Ambiental

La abundancia de empresas mineras en nuestro país nos impulsa a proponer el uso de la electrodeposición como un método más eficiente para mejorar la recuperación del oro. Este proceso, que implica la aplicación controlada de corriente eléctrica de acuerdo con los parámetros y procedimientos apropiados. De esta manera, buscamos evitar pérdidas significativas de materia prima e insumos, así como daños a la salud de las personas e impactos graves en el medio ambiente. Esto se debe a que los desechos químicos suelen ser descartados sin tratamiento y se liberan directamente a la atmósfera, lo que agrava la situación. Al implementar esta tecnología, aspiramos a promover una minería más sostenible, eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Recuperar oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación de la planta Nueva Bonanza – Caraveli – Arequipa.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar el potencial eléctrico requerido para lograr la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación.
- Determinar el tiempo necesario para asegurar la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación.
- Determinar la concentración de oro que garantice la recuperación eficiente por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes (estado de arte)

2.1.1. *Antecedentes internacionales*

Según Ojeda (2020), en su tesis titulada “Estudio electroquímico de la electrodeposición de oro y telurio de soluciones de cianuración”, El enfoque se centra en la necesidad de investigar métodos que faciliten la recuperación del oro y el telurio presentes en las soluciones de cianuración, así como en la búsqueda de formas de disminuir la contaminación del ambiente producida por la utilización del cianuro. La sobreexplotación de los yacimientos de metales preciosos obliga a la industria minera a procesar minerales con oro y otros metales resistentes a la cianuración. Por lo tanto, es necesario investigar la electrodeposición de telurio y oro de las soluciones de cianuración. Los experimentos electroquímicos se llevaron a cabo en una celda de electrodeposición de 100 ml de capacidad. Se ajustó el pH a un valor de 12 para la solución, se eliminó el oxígeno presente en la celda de electrodeposición, se instalaron cátodos y ánodos usando un potenciostato para su respectivo análisis. Se hicieron 08 pruebas experimentales, donde se renovaron los ánodos y cátodos al inicio de cada prueba. Luego, se empleó la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) para examinar los depósitos generados y determinar la morfología y composición química de los metales depositados. Se concluye que, durante la electrodeposición a nivel de laboratorio, se logró recuperar oro (20.93%) y telurio (17.65%) bajo las siguientes condiciones: pH 13, temperatura de 25°C, voltaje de 3.0 V y un tiempo de 24 horas, utilizando una concentración inicial de 100 ppm de oro y 129.56 ppm de telurio. No se obtuvo una recuperación selectiva con los potenciales empleados, ya que se formó un depósito compuesto por ambos metales. El análisis

mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) mostró que los sólidos formaban un complejo Au-Te. Además, transcurrido unas tres horas, se logró visualizar que el oro se deposita en el cátodo formando una capa de partículas de forma redondeada, mientras que el telurio se deposita en las partículas de oro formando estructuras similares a agujas o dendritas. A medida que aumenta el tiempo de prueba, las partículas de telurio tienden a adoptar una forma más redondeada. De acuerdo con el análisis EDS, se encontró que la mayoría del sólido estaba compuesto por oro (~18.93% en peso), mientras que la concentración de telurio era más baja (~2.5% en peso), lo cual se atribuye a que gran parte del telurio reducido no se deposita sobre el cátodo.

Meng y colaboradores (2021), en su artículo científico titulado “Eco-friendly and reagent recyclable gold extraction by iodination leaching-electrodeposition recovery”, proponen un proceso ecológico y reciclable para la obtención de oro, basado en su lixiviación con yodo y su posterior recuperación mediante electrodeposición. Para ello, se empleó un sistema de lixiviación con una solución de yodo-yoduro en agua. El proceso se llevó a cabo bajo condiciones controladas, investigando variables como el yodo y su concentración, la velocidad de agitación, temperatura y pH. Se concluyó que es posible extraer oro de soluciones obtenidas mediante lixiviación con yodo, alcanzando una tasa de recuperación del 99.25%. Además, la eficiencia de corriente fue del 75.67%, con el oro depositándose en el cátodo. Basado en el principio redox, durante el proceso de recuperación de oro se generó yodo sólido en el área del ánodo, alcanzando una tasa de recuperación del 83%. Además, el anolito pudo reciclarse de manera eficiente hasta cuatro veces y posteriormente reutilizarse tras ser diluido. El método de electrodeposición reduce fundamentalmente el costo de los reactivos para la lixiviación de oro con yodación. Hicieron un análisis que demostró que los complejos de oro-yodo (AuI_2^- y AuI_4^-) son estables en soluciones

acuosas en un amplio rango de pH. La adición de peróxido de hidrógeno mejora la formación de estos complejos, favoreciendo la lixiviación de oro.

García (2020) en su tesis doctoral “Estudio cinético termodinámico de la recuperación de oro y plata en soluciones acuosas de cianuro mediante procesos electroquímicos”, propone realizar un estudio cinético termodinámico para la recuperación de oro y plata en soluciones acuosas de lixiviación con cianuro mediante el proceso electroquímico de electrocoagulación. El proceso de electrocoagulación es un método electroquímico que integra diversas etapas, como oxidación, reducción, degradación, coagulación, adsorción, flotación y precipitación. El diseño experimental utilizado es 2^3 con una réplica, las variables utilizadas en esta investigación son pH, tipos de electrodos y tipos de solución. La investigación concluye que, al aplicar el proceso electroquímico de electrocoagulación a soluciones acuosas de cianuro, los resultados obtenidos en las pruebas demostraron que el proceso de electrocoagulación fue altamente efectivo. En soluciones con bajas concentraciones iniciales de 0.84 g/ton de oro y 17.16 g/ton de plata, se logró una remoción del 73.21% y 86.74%, respectivamente, en una sola etapa de diez minutos. Por otro lado, en soluciones con altas concentraciones de 65.5 g/ton de oro y 519 g/ton de plata, el proceso permitió alcanzar una remoción del 99-100% tras su aplicación en tres etapas.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Paulino & Salazar (2019), en su tesis “Variables que influyen en la electrodeposición del oro a partir de soluciones cianuradas diluidas en la empresa Ecoservicios e ingeniería limpia S.A.C – Puente Piedra – Lima”, Examinó celdas electrolíticas con características físicas y técnicas comparables a las empleadas en el método Zadra, centrándose en la eficacia de los electrodos porosos y la implementación de dispositivos mecánicos que mejoran la capacidad de transferencia de masa hacia el electrodo. Para llevar a cabo el desarrollo experimental, se utilizaron soluciones

diluidas de complejos cianurados, tanto en manera natural como con la presencia de contaminantes, para ver su impacto en el trabajo de investigación. Se examinó el gasto de la energía y se evaluó su eficiencia en el proceso, que se atribuyen a las reacciones químicas involucradas en la electrodeposición de oro, principalmente del hidrogeno y su evolución y la reducción del oxígeno.

Se utilizó un equipo mecánico para recircular la solución rica, lo que incrementó la concentración de elementos electroactivos y permitió alcanzar una extracción de oro superior al 99%. El autor sostiene que los ánodos y cátodos de acero inoxidable son más eficaces en el proceso de electrodeposición por electrocoagulación que la lana de acero tradicional, debido a la mejor distribución y uniformidad de su área expuesta.

El investigador concluye que el rendimiento de la celda cilíndrica en términos de recuperación de oro, utilizando un cátodo de malla de acero inoxidable, supera significativamente al de la lana de acero templado. Esto se debe a la superior estructura y mayor homogeneidad interna de la malla, lo que favorece un flujo más eficiente en la solución. En las pruebas realizadas bajo las mismas condiciones experimentales, los resultados de recuperación de oro fueron los siguientes: con la malla de acero inoxidable, se alcanzó un 99.8% en 60 minutos, mientras que con la lana de acero templado se obtuvo un 98% en el mismo período.

Escobar & Mendoza (2023) en su tesis denominado “Recuperación de oro y plata por electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales oxidados, de baja concentración en la zona de Río Seco – Carabayllo”, Se propone reemplazar el uso de carbón activado con la electrodeposición para recuperar los metales preciosos. Se pretende analizar la mineralogía de la muestra problemática para la identificación de los componentes, grado de liberación, enlaces y su distribución mineralógica del mineral seleccionado. El trabajo de

investigación consiste en un enfoque experimental que incorporó aspectos cualitativos, cuantitativos y deductivo, en donde estos experimentos se basaron en el método científico y se llevaron a cabo mediante la aplicación de técnicas de caracterización mineralógica, donde se realizó la lixiviación de minerales auríferos y su respectiva electrodeposición. La muestra utilizada para el estudio fue extraída del yacimiento en la zona de Río Seco – Carabayllo, con contenidos de minerales metálicos de oro y plata. Los análisis mineralógicos se desarrollaron en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, mientras que la experimentación metalúrgica se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa METALANDIN SAC.

Finalmente, se concluye que la electrodeposición en soluciones cianuradas de baja concentración constituye un método efectivo y económico para la extracción de oro y plata en la región de Río Seco - Carabayllo. Además, se presenta como una alternativa prometedora para optimizar los procesos de recuperación en la industria minera, al sustituir el uso de carbón activado por la electrodeposición en soluciones cianuradas. Los elevados niveles de recuperación de oro y plata evidencian la eficacia y viabilidad de la electrodeposición en este contexto.

Cruz (2016) en su tesis “Evaluación de los parámetros para el diseño y construcción de una celda de electro obtención para recuperar oro”, el objetivo principal consiste en evaluar los parámetros necesarios para el diseño y la construcción de una celda de electrodeposición destinada a la recuperación de oro. Además, se llevó a cabo un análisis del impacto de diversas variables operativas en el proceso, tales como la temperatura de trabajo, el tiempo de operación, la concentración del electrolito y la recuperación de metales. Esta evaluación se llevó a cabo utilizando ánodos y cátodos de acero inoxidable de tipo (304 L). El investigador llevó a cabo pruebas metalúrgicas de electrodeposición donde se variaron el potencial eléctrico y la intensidad

de corriente, el diseño y la construcción de la celda de electrodeposición muestran una mejora en los parámetros energéticos en comparación con otras celdas, y las pruebas realizadas han logrado una buena recuperación en el proceso de electrodeposición de oro. Como resultado de estas pruebas, se obtuvo un porcentaje de recuperación del 96.20% en la primera prueba, un 98.08% en la segunda, y una recuperación máxima del 99.04% en la tercera, utilizando una intensidad de corriente de 25 amperios y 2.6 voltios.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Oro

El oro es un elemento químico cuyo símbolo es Au, proviene del latín aurum, que significa brillante amanecer. Es un metal noble que posee las mejores características en sus propiedades físicas y químicas, es de mayor uso en las joyerías por presentar una inalterabilidad en diversos medios, Es uno de los metales más antiguos que se conocen y ha sido utilizado desde tiempos prehistóricos para la fabricación de joyas, monedas, y otros objetos valiosos.

2.2.1.1. Propiedades físicas.

El oro se caracteriza por ser más maleable y dúctil en comparación con otros metales, lo que le permite ser transformado en hilos de hasta 10 micrones de diámetro mediante trabajo en frío, así como en láminas de hasta 0.2 micrones de espesor. Además, presenta una excelente conductividad eléctrica y térmica, junto con una notable capacidad de deformación plásticas, mostradas en la tabla 1. (Ballester , 2000)

Tabla 1*Propiedades físicas de oro.*

Propiedades	Unidad	Valor
Número atómico		79
Peso atómico		197
Densidad a 20 °C	g.cm-3	19.32
Punto de fusión	°C	1064.4
Punto de ebullición	°C	2808
Conductividad térmica a 20 °C	W.cm-1. K-1	3.14
Resistividad térmica a 20 °C	Ω .cm	206*10-6
Entalpía de fusión	K.J.mol-1	12.77
Entalpía de vaporización	K.J.mol-1	324.4
Límite elástico	Mpa	55
Coefficiente de dilatación lineal a 20 °C	°C-1	14*10-6
Dureza (escala de Mohs)		2.5

Nota. Elaboración propia con base a (Ballester, 2000)

2.2.1.2 Propiedades químicas.

El oro tiene menor electronegatividad en comparación con otros metales de la tabla periódica, debido a la notable estabilidad de su único electrón en la capa externa. Este electrón está fuertemente ligado al núcleo, lo que define su estado metálico y le confiere una reactividad muy baja. Su enlace atómico es siempre de naturaleza covalente. Además, el oro no reacciona con el oxígeno ni con el azufre, incluso a altas temperaturas. Tampoco es atacado por los ácidos sulfúrico, fluorhídrico, fosfórico ni nítrico, excepto en concentraciones muy altas, ni por los ácidos orgánicos. En la tabla 2, se muestran las propiedades químicas del oro. (Ballester , 2000)

Tabla 2*Propiedades químicas de oro.*

Propiedades	Unidad	Valor
Sistema periódico		grupo IB
Configuración electrónica		4f145d106s1
Electrones por nivel		2,8,18,32,18,1
Número de oxidación (valencia)		3.1
Potencia de reducción a 25 °C	volt	1.50
Electronegatividad (escala de Pauling)		2.54
Estructura cristalina		cúbica centrada en las caras
Energía de ionización	K.J.mol ⁻¹	890,1
Radio atómico	Amstrong	1.44
Calor específico	J.g ⁻¹ .K ⁻¹	0.128
Volumen atómico a 20 ° C	Cm ³ .mol ⁻¹	10.21

Nota. Extraído de (Ballester , 2000)**2.2.2. Definición de cianuración**

La cianuración es un método hidrometalúrgico que utiliza soluciones cianuradas alcalinas como agente químico para la extracción de plata y oro de minerales con alto contenido metálico. La lixiviación con cianuro es, de hecho, el proceso más utilizado en la industria para la extracción de oro y plata.

Si bien el uso de cianuro implica ciertos riesgos y desafíos, hasta ahora no se ha encontrado un método económicamente más viable. No obstante, su aplicación plantea preocupaciones ambientales y de seguridad, por lo que es fundamental adoptar medidas estrictas para su manipulación y almacenamiento seguro. (Diez Canseco, 1978).

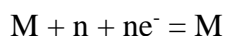
2.2.3. *Fundamentos termodinámicos de la lixiviación*

En los procesos hidrometalúrgicos en sistemas acuosos, resulta fundamental entender el comportamiento termodinámico del sistema. Se emplean los Diagramas de Pourbaix o Eh-pH para simplificar su comprensión. Estos esquemas, que ilustran la potencialidad del electrodo en relación al pH, se han creado para ilustrar los equilibrios en sistemas de corrosión metálica y en sistemas hidrometalúrgicos.

Se emplean los diagramas Eh-pH para ilustrar los equilibrios diversos en un sistema estable. Estos esquemas de manera teórica detallan las reacciones de hidrólisis, oxidación y reducción que suceden en soluciones de agua. Son una herramienta importante para comprender los procesos químicos y las transformaciones en sistemas acuosos.

Durante el proceso de lixiviación de oro, se requiere oxidar el oro a su estado soluble y así poder lixiviarlo, garantizando la estabilidad de estas especies en el entorno químico de la lixiviación. Por lo general, para un metal M que interactúa con una disolución de iones de M^{+n} , la reacción que ocurre puede ser de oxidación o reducción según las condiciones de pH. En el caso del oro, a menudo se usa cianuro como agente oxidante para disolver el oro en su forma soluble. (Bustanza , 2019)

la reacción está dada por:



El potencial de reducción se calcula mediante la formula o ecuación de Nernst:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M]}{[M^{+n}]}$$

Donde:

R: Constante de los gases = 9.314 Joules/(K.mol)

T: Temperatura absoluta

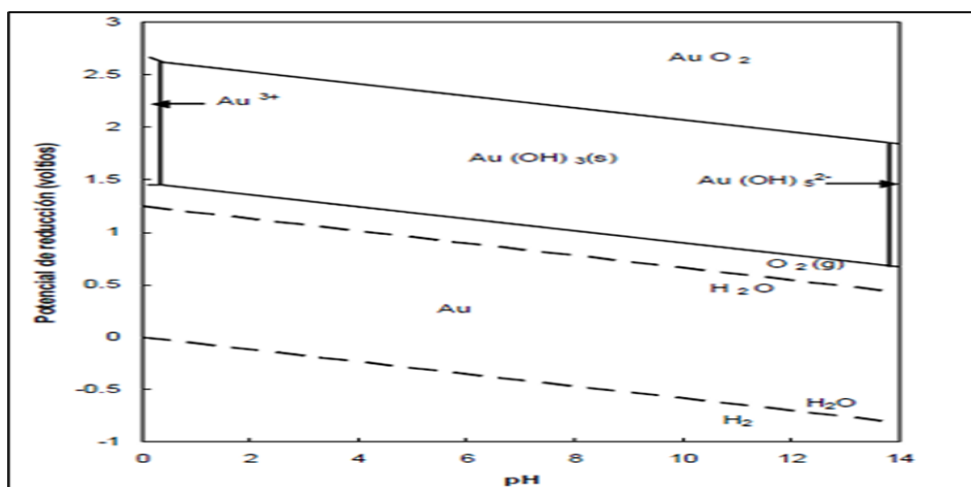
E_0 : Potencial estándar de reducción

F: Constante de Faraday

A continuación, se presenta la figura 1, diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-CN-H₂O a 25°C, bajo condiciones prácticas de operación con concentraciones de $[Au] = 10^{-4}M$ y $[CN] = 10^{-1}M$. Este diagrama ilustra las áreas donde predominan los compuestos principales en la lixiviación cianurada de oro. En el gráfico se observa el dominio del oro, en regiones de potenciales reductores en medio ácido. A medida que nos desplazamos hacia zonas de potenciales reductores en medio alcalino, el área de Au metálico disminuye hasta volverse constante. El punto de intersección se encuentra en pH = 9.2, lo ocurre debido al límite de la reacción. (Chambi V., 2010)

Figura 1

Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema agua-cianuro



Nota. (Marsden & Lain House, 2006)

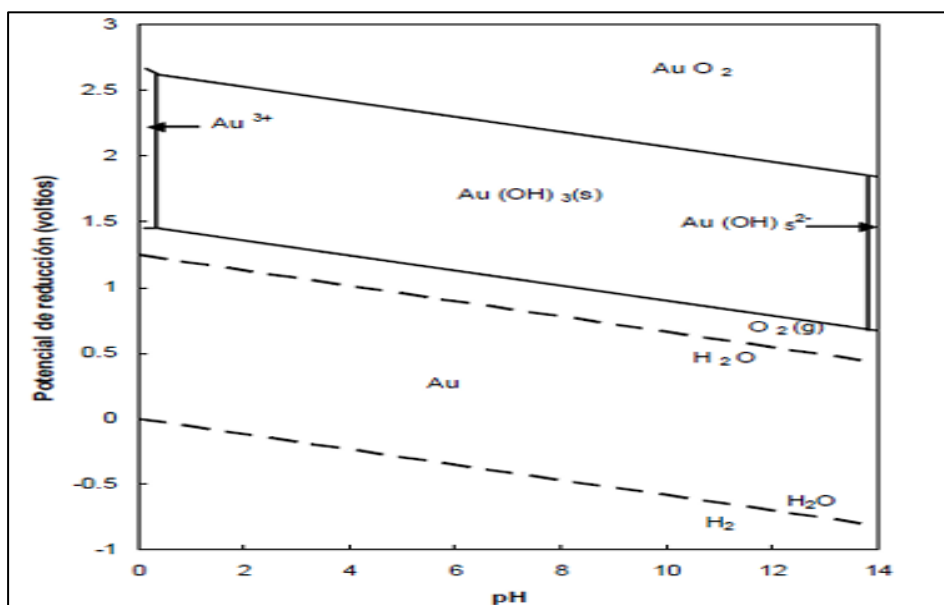
En la figura 1, se logra visualizar la evolución del HCN, con pH mayores a 9.2.

En el caso del cianuro de sodio, su estabilidad en función del pH varía. En un rango de pH mayor que cero y menor a 9, el cianuro de sodio tiene la tendencia de producir ácido cianhídrico (HCN). Esto se debe a que, en un medio ácido, el cianuro de sodio puede hidrolizarse y generar moléculas de HCN.

Es importante tener en cuenta que el HCN es un compuesto altamente tóxico y muy dañino para el medio ambiente y la salud de las personas. Por ende, en un proceso de cianuración de oro, es esencial controlar adecuadamente el pH y las concentraciones de cianuro para evitar la formación y acumulación de HCN. Esto se hace para asegurar la protección de los individuos y reducir el impacto en el medio ambiente. La figura 2 muestra que el oro metálico mantiene su estabilidad en agua para cualquier pH.

Figura 2

Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema oro-agua

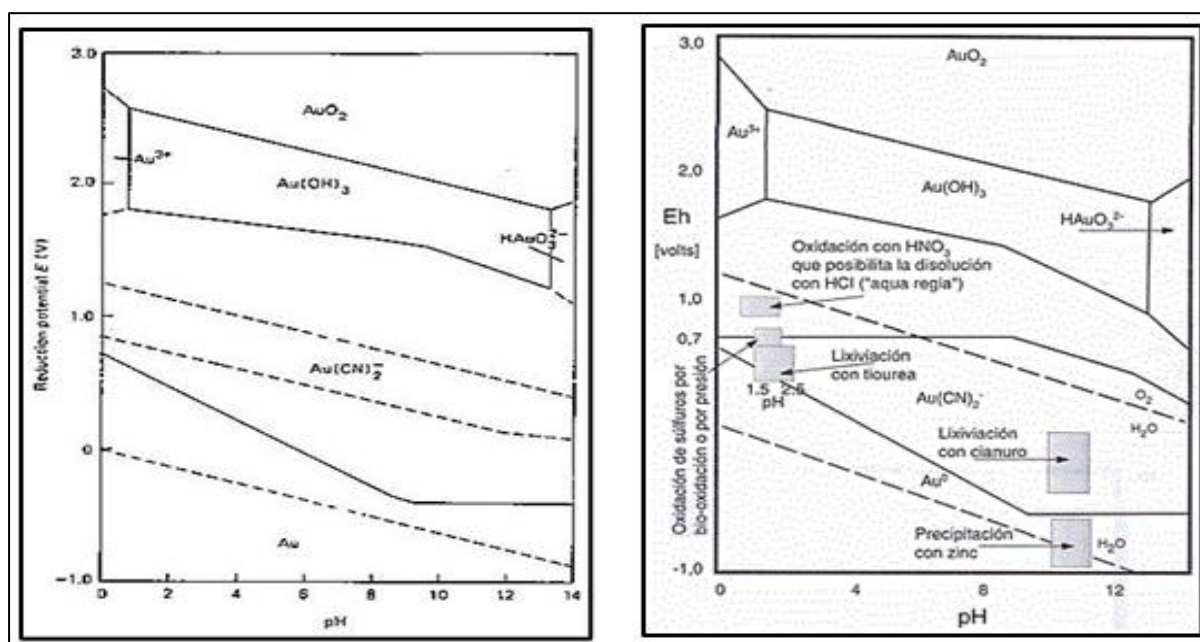


Nota. (Marsden & Lain House, 2006)

En el diagrama Eh-pH, figura 3, podemos ver que existe una amplia región en todo el rango de pH donde podría ocurrir la solubilidad del oro. Esto indica que, bajo ciertas condiciones de pH y potencial redox, los complejos de oro disueltos pueden formarse y permanecer estables en el medio acuoso.

Figura 3

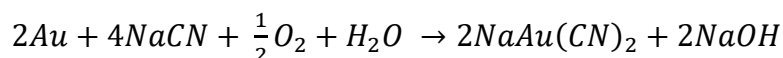
Diagrama de estabilidad Eh-pH para sistemas oro-cianuro-agua a 25°C



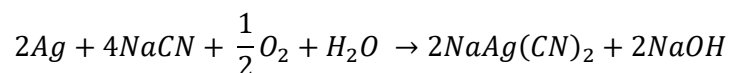
Nota. Extraído de (Bustinza, 2019).

En el figura 3, de Eh-pH de los sistemas oro – cianuro - agua, se muestra cómo ocurre la disociación del oro con el cianuro en forma de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$. Además, según el diagrama, se observa una extensa zona de solubilidad del oro en todo el espectro de pH.

Las reacciones siguientes muestran la factibilidad de extraer oro y plata mediante el proceso de cianuración. (Habashi, 1967)



$$\Delta G_{T=25^{\circ}\text{C}}^0 = -36640 \text{ cal/mol}$$



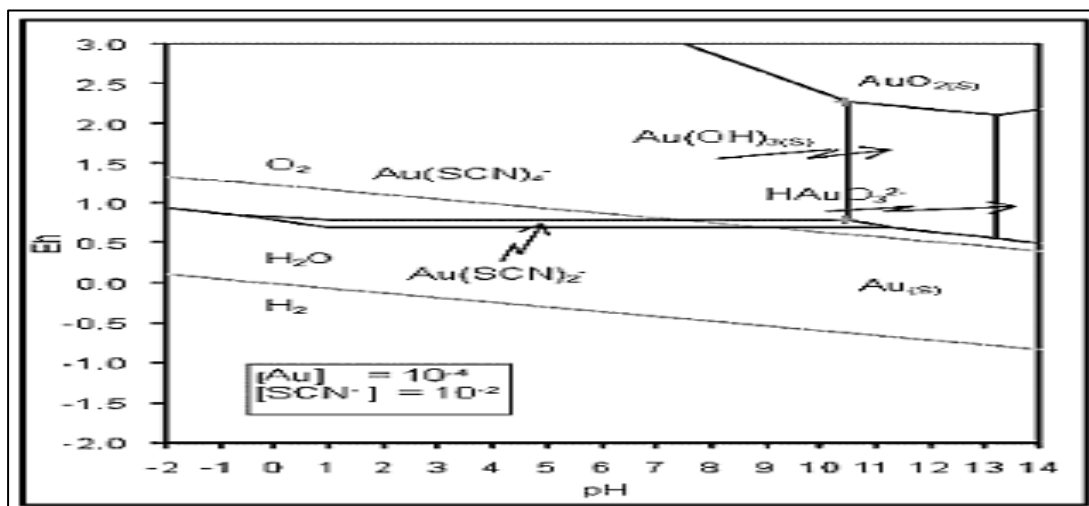
$$\Delta G_{T=25^{\circ}\text{C}}^0 = -26919 \text{ cal/mol}$$

Es cierto que la presencia de compuestos de azufre en el mineral puede dificultar la recuperación de oro y plata por cianuración. Es particularmente complicado llevar a cabo el proceso de cianuración cuando hay azufre presente, a no ser que sea posible separar el azufre añadiendo sales de plomo u otro elemento oxidante o mediante la reducción del pH a menos de 8. Sin embargo, cuando se baja el pH a estos valores, la presencia de ácido cianhídrico (HCN) aumenta según la expresión química relevante.



Figura 4

Diagrama Eh-pH sistema Au-SCN-agua a 25°C



Nota. Extraído de (Bustinza, 2019)

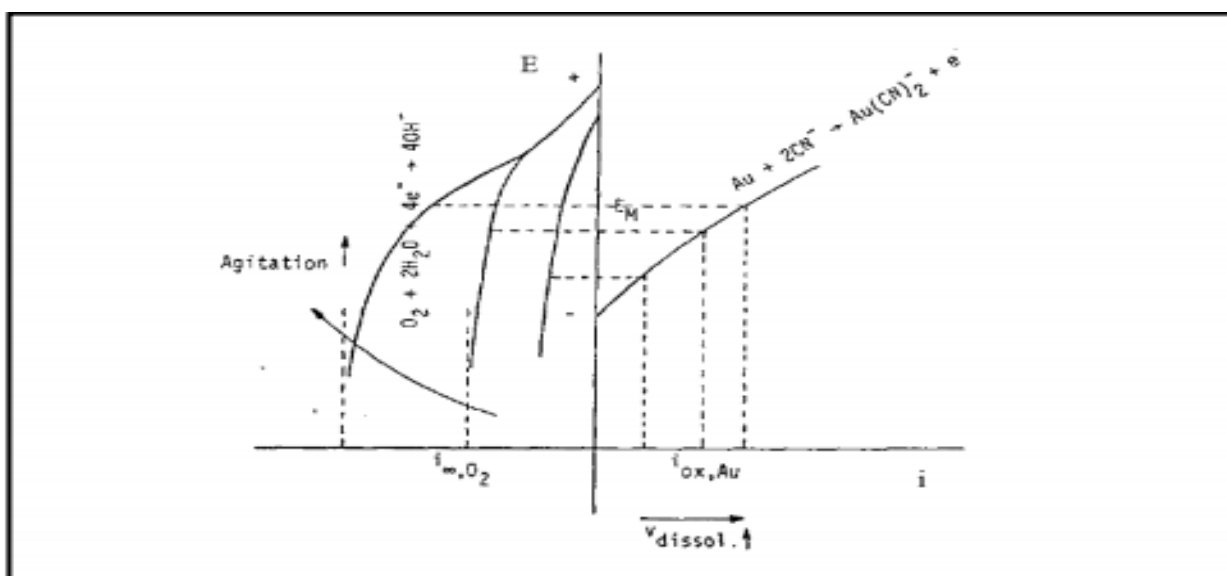
En la figura 4 se visualiza una opción muy difícil de separar el oro en presencia de sulfuros.

2.2.4. Cinética química de la cianuración

La cinética de una solución cianurada de oro, se puede ver de la mejor manera con la ayuda de las curvas de polarización. Lo cual se aprecia en la figura 5.

Figura 5

Interpretación de la cinética de cianuración de oro por el intermedio de las curvas de polarización



Nota. Extraído de (Caceres, 1989, pág. 9)

Por tanto, Cáceres (1989), afirma que una concentración suficiente de cianuro, controla la velocidad de disolución del oro mediante la difusión del oxígeno disuelto hacia las partículas del oro. Entonces las condiciones que permite catalizar la reacción de reducción del oxígeno disuelto sobre el oro, como: temperatura, pH, agitación, etc., son los que favorecen la disolución del oro del mineral.

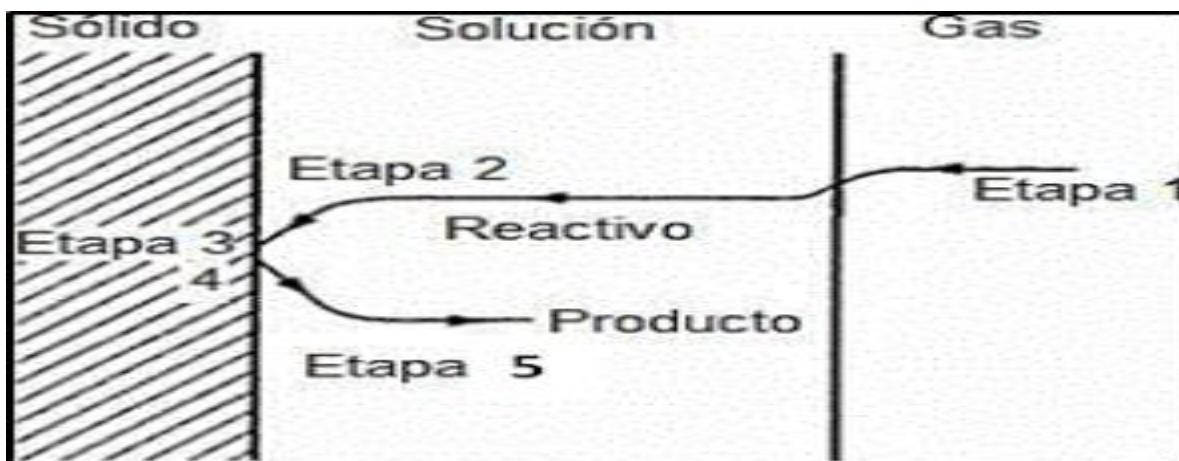
Para Cáceres (1989), “una reacción fisicoquímica en donde se encuentra una fase sólida y líquida, se tiene las siguientes etapas; difusión de los reactantes desde la solución hasta la interfase sólido – líquido y su subsecuente disolución, transporte de masa de especies reactivas por la capa

límite solución–sólido a la superficie del sólido, difusión de masa de especies que reaccionan a través de la capa límite en el lecho de la solución”.

La velocidad en una reacción heterogénea es importante, debido a que controla la velocidad de transporte de masa de la especie reactiva individual. En la siguiente figura se muestra un modelo de reacción simple; donde indica que, si la velocidad de reacción es controlada por las etapas 1, 2 o 4 indica que la reacción es controlada por el transporte de masa y si la etapa 3 es la controlante, entonces la reacción es controlada por la reacción química, tal como se observa en la figura 6. (Marsden & Lain House, 2006, pág. 22)

Figura 6

Representación esquemática de las etapas de una reacción química heterogénea

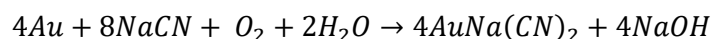


Nota. Según (Marsden & Lain House, 2006)

En las reacciones heterogéneas, el transporte de masa se realiza a través de una capa límite. Es la etapa más determinante en una reacción química, porque permite acelerar la velocidad de reacción. Sin embargo, en los procesos de extracción de oro la etapa de reacción química no es tan determinante, por tanto, el transporte de masa es la etapa que a menudo limita la reacción. (Marsden & Lain House, 2006, pág. 22)

2.2.5. *mecanismos de cianuración*

La reacción propuesta por Elsner en 1846, que plantea la disolución del oro a nivel global utilizando una solución acuosa de cianuro en presencia de oxígeno, es conocida como la reacción de Elsner. Esta se representa mediante la siguiente ecuación química:



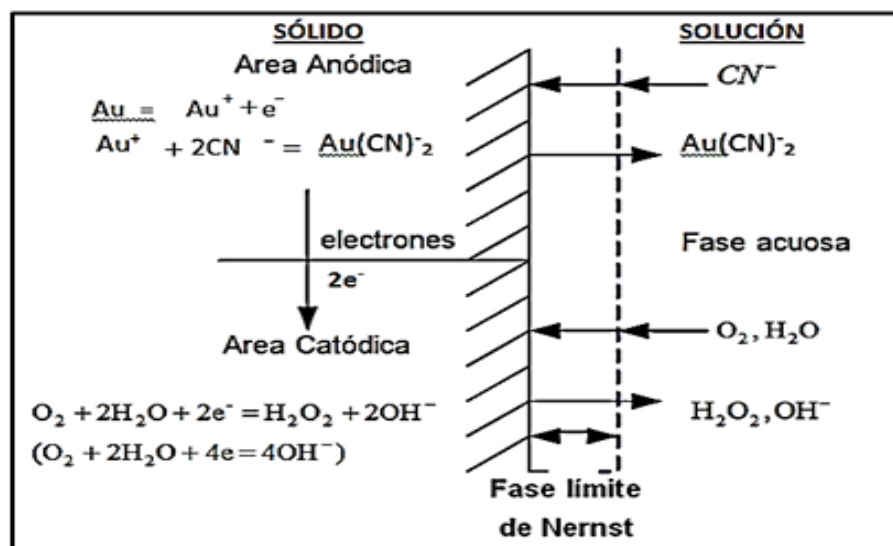
La disolución del oro en presencia de cianuro y oxígeno corresponde a una reacción heterogénea que involucra tres fases distintas. Estas fases son:

1. Fase sólida: El oro se encuentra en forma sólida en el mineral o el material que se está tratando.
2. Fase líquida: El cianuro y el agua forman una solución acuosa que permite la disolución del oro.
3. Fase gaseosa: El oxígeno gaseoso es necesario para llevar a cabo la oxidación del oro y permitir su disolución en la solución acuosa de cianuro.

El proceso de cianuración se compone de múltiples etapas que se desarrollan de forma secuencial para permitir la conversión de reactantes a productos. Estas etapas incluyen la incorporación de oxígeno en la solución y el traslado tanto del cianuro como del oxígeno hacia la superficie del mineral, la difusión de los reactantes en el mineral, la absorción de cianuro y oxígeno en la superficie del oro, la reacción electroquímica, la desorción de los productos de la superficie del oro y el transporte de los productos lejos del mineral, tal como la figura 7 nos ilustra. Cada etapa es importante para garantizar la eficacia del proceso de cianuración y la recuperación del oro. (Bustinza , 2019)

Figura 7

Disolución de oro



Nota. Imagen extraída de (Marsden & House, 2006).

Se observa que la superficie del oro entra en contacto con una solución de cianuro que contiene oxígeno, se crea una celda de corrosión localizada.

Por lo tanto, según Rojas Reyes (2003), “los siguientes pasos pueden considerarse como principales para la lixiviación o disolución del oro; absorción o disolución del oxígeno en la solución, transporte del cianuro y oxígeno disuelto a la interfase sólido-líquido, absorción de los reactantes (CN^- y O_2) en la superficie sólida, reacción de disolución de carácter electroquímico, desorción de los complejos solubles de oro-cianuro, plata-cianuro y otros productos de reacción desde la fase sólida, transporte de los productos desorbidos desde la zona de reacción a la solución”.

Se ha observado que la velocidad de lixiviación del metal, cuando se encuentran presentes un reactivo oxidante y un reactivo reductor, exhibe una característica cinética singular que transita de un régimen a otro. (Bustinza, 2019. Pág.22).

2.2.6. Cianuración de oro en pilas de lixiviación

El proceso de cianuración en pilas de lixiviación consiste en aplicar una solución cianurada que se filtra lentamente a través de minerales auríferos, generalmente dispuestos en pilas de lixiviación. Estas pilas están formadas por minerales valiosos, previamente triturados de manera uniforme y aglomerados, que se colocan sobre superficies impermeabilizadas diseñadas para recolectar las soluciones ricas en oro. Durante el proceso, una solución diluida de cianuro se rocía sobre la pila, permitiendo que percole y disuelva los metales preciosos finamente dispersos en el material. La solución enriquecida en oro fluye hacia una base permeable con una ligera inclinación, facilitando su recolección y traslado a un tanque de almacenamiento, desde donde se incorpora al circuito de procesamiento. (Vélez, 2020).

Para llevar a cabo la lixiviación en pilas, es fundamental cumplir con ciertas condiciones de construcción, las cuales deben considerar los siguientes aspectos:

Preparación del mineral en pilas de lixiviación

La preparación del mineral es muy importante en la lixiviación de oro en pilas, el material debe ser triturado si los análisis mineralógicos así lo indican, de tal forma se obtiene una granulometría óptima para una lixiviación eficiente. Por lo general, se emplean granulometrías entre -1/4" y -3/4" (6.35 mm - 19 mm). La determinación del tamaño de partícula óptimo para la lixiviación en pila depende del tipo de mineral a tratar, por lo que es necesario realizar varias pruebas para definir el tamaño adecuado. Si el mineral es poroso y altamente permeable, puede ser suficiente utilizar una granulometría "run-of-mine" (sin clasificar) para una lixiviación efectiva. (Vélez, 2020).

Pila y capa impermeabilizada en pilas de lixiviación

El diseño tanto de las pilas de lixiviación, como de las capas impermeabilizadas debe considerar una combinación de diversos factores. Estos incluyen el tipo de mineral a tratar y su origen, la lixivabilidad, las particularidades geológicas del mineral, es esencial seleccionar sistemas de revestimiento que aseguren una contención adecuada. Estos sistemas de revestimiento de capas impermeabilizadas suelen incluir combinaciones de membranas sintéticas, revestimientos naturales o modificados, y revestimientos compuestos tanto naturales como sintéticos. (Vélez, 2020).

Según Vélez (2020), en su trabajo de investigación menciona: “que existen tres métodos básicos para la construcción y operación de pilas y capas impermeabilizadas: las pilas de expansión permanente, la capa impermeabilizada reutilizable y la lixiviación en tipo valle. Las pilas y sus capas impermeabilizadas deben diseñarse como estructuras estables que contengan tanto el material sólido como el lixiviado. Cada uno de estos tres tipos de construcción requiere tener en cuenta criterios específicos de diseño y operación”.

Colocación del mineral en pilas de lixiviación

Este proceso puede llevarse a cabo por distintos métodos, principalmente según la característica del mineral. Procedimientos que abarcan la descarga del mineral y su posterior nivelación con maquinaria pesada y el transporte fajas transportadoras al lugar de lixiviación. Para la construcción de las pilas de lixiviación, se deben tomar criterios como la compactación del área, evitar la pérdida de material mediante la segregación de partículas. Además, se debe proteger el revestimiento. A menudo, las opciones para la instalación de pilas son limitadas debido a factores como la distancia de transporte, el estado del terreno o la topografía. (Vélez, 2020).

Aplicación de la solución en las pilas de lixiviación

La solución de lixiviación se conduce hacia las pilas mediante tubos metálicos o PVC. La aplicación de la solución lixivante se da mediante aspersores o riego por goteo. La distribución uniforme del lixivante es el principal requisito. La aplicación de la solución lixivante habitual debe ser de manera constante con valores fijos y debe ser controlado cada hora. El flujo de la solución dentro de las pilas es principalmente vertical, desde la superficie hasta la base. (Vélez, 2020).

Recolección de PLS en pilas de lixiviación

Las soluciones ricas de provenientes de la lixiviación en pilas son recolectadas por medio de tuberías y/o por capas de elevada permeabilidad para la recolección. Estas tuberías contribuyen a prevenir el incremento de la presión del agua libre en la capa impermeabilizada, lo que ayuda a disminuir las pérdidas debido a la filtración. Las tuberías de drenaje suelen estar unidas a un sistema de tuberías que lleva a un pozo cargado de solución rica, o pueden ser llevadas a través de canaletas o zanjas que recolectan solución del metal valioso. (Vélez, 2020).

Obtención del metal a partir del proceso de lixiviación de oro en pilas

La obtención de los elementos valiosos se lleva a través del proceso Merrill-Crowe que consiste en precipitar el oro con zinc en polvo o mediante el proceso de adsorción (carbón activado). Además, etapas como la refinación son contempladas. Para la lixiviación de cobre, se recurre a la extracción con disolventes (SX) y posteriormente a la electrodeposición (EW) para conseguir los metales. La creación de procedimientos para la recuperación de metales va más allá de estas directrices. (Vélez, 2020).

2.2.7. *Extracción de oro a partir de soluciones cianuradas*

La extracción de oro de una solución cianurada ha sido empleada desde el siglo XX. Entre las técnicas empleadas se incluyen el proceso de Merrill Crowe, el proceso de adsorción (carbón activado) y la extracción por solventes. Al principio, el método más común para recuperar oro en soluciones diluidas (líquido-sólido) era la precipitación con zinc. Sin embargo, con el tiempo, algunas plantas comenzaron a utilizar la recuperación de oro a través de carbón activado, especialmente en soluciones con concentraciones muy bajas de oro (menos de 1 ppm o mg/l Au) y en aquellas con alta contaminación. (Caceres, 1989)

2.2.8. *Método Merrill Crowe.*

Según Diez Canseco (1978), quien menciona que en el año de 1890 se introdujo el proceso de cementación con zinc para la precipitación de oro y plata a partir de soluciones de cianuro, coincidiendo con la implementación del proceso de cianuración.

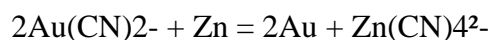
El primer método de cementación consistía en aplicar una solución de cianuro con oro sobre una capa de láminas de zinc. Sin embargo, resultó ser muy ineficaz debido a la baja velocidad de reacción, ya que el zinc se pasivaba rápidamente, lo que impedía la deposición de oro. Tras esta primera experiencia, se optimizó el proceso de precipitación con zinc mediante la adición de una sal de plomo, usualmente nitrato de plomo. Esta adición favoreció la formación de una aleación plomo-zinc en la superficie de las láminas, evitando la pasivación del zinc y permitiendo la posterior deposición del oro.

Posteriormente, se realizaron más mejoras. La primera consistió en sustituir las láminas de zinc por polvo de zinc, lo que aumentó considerablemente la superficie específica para la precipitación y aceleró la reacción. La eliminación del oxígeno en las soluciones auríferas, con el

objetivo de mantener concentraciones inferiores a 1 ppm, permitió reducir notablemente la oxidación del zinc, lo que incrementó la eficiencia del proceso. El siguiente paso fue el uso de soluciones clarificadas, lo que llevó al desarrollo del proceso de precipitación Merrill-Crowe, denominado así en honor a los dos hombres responsables de la evolución final de este proceso ampliamente adoptado. (Diez Canseco, 1978)

2.2.8.1. Descripción del proceso de Merrill Crowe

Según Caceres (1989), la química del proceso de precipitación con zinc se fundamenta en la mayor nobleza del oro y la plata en comparación con el zinc. Esto implica que el oro y la plata tienen una mayor tendencia a reducirse a sus estados nativos (Au^0 y Ag^0) a partir de la solución de cianuro. La reacción global del proceso de cementación puede expresarse de la siguiente forma:



Durante la precipitación del oro, el zinc reacciona con el cianuro formando un complejo de cianuro de zinc. Mantener un pH elevado, cercano a 10, favorece la recuperación de metales preciosos y reduce la precipitación de cobre presente en la solución. Hacia finales de los años 70, se llevaron a cabo investigaciones detalladas sobre la cinética y los mecanismos involucrados en la precipitación del oro. Actualmente, la precipitación con zinc continúa siendo el método más empleado para la recuperación de oro, y comprende cuatro etapas principales:

- Se clarifica la solución.
- Se elimina la disolución del oxígeno.
- Adición de zinc y sales de plomo.
- Recuperación del precipitado de oro.

Una vez que el oro ha sido precipitado mediante el proceso de cementación con zinc, se somete a un proceso de fundición. Durante esta etapa, se eliminan impurezas y se recuperan los metales preciosos en su forma pura. (Caceres, 1989)

2.2.8.2. Características de la solución para una precipitación efectiva

Según Vargas Gallardo (1990), “existen tres componentes principales de la solución que pueden afectar la eficiencia del proceso de precipitación con zinc: los sólidos suspendidos, el oxígeno disuelto y los iones metálicos interferentes”.

La presencia de sólidos suspendidos puede disminuir la eficacia del proceso, por lo que la clarificación, es decir, la eliminación de estos sólidos de la solución, es fundamental para lograr una precipitación óptima. La experiencia ha demostrado que el uso de una capa filtrante previa durante la clarificación mejora significativamente los resultados operacionales. Además, cuando este método de Merrill Crowe se combina con la eliminación parcial del oxígeno disuelto, que ocurre al ingresar la solución en la torre de vacío, se logra una desoxigenación completa. La clarificación y la desaireación simultánea permiten un uso más eficiente del vacío disponible.

Para asegurar una precipitación completa y eficiente de los metales en soluciones de cianuración, es esencial que, después de la clarificación, se elimine el oxígeno disuelto. Incluso pequeñas cantidades de oxígeno disuelto pueden afectar negativamente el proceso de precipitación al pasivar la superficie de zinc. La desaireación al vacío es el método más eficaz para remover el oxígeno disuelto, ya que además elimina el dióxido de carbono, el cual podría formar carbonato de calcio y obstruir los filtros debido a la acumulación de precipitados.

Cuando el zinc metálico se descompone en soluciones de cianuro alcalinas, se genera hidrógeno. Si el oxígeno disuelto ha sido eliminado de manera efectiva, generalmente mediante

desaireación al vacío, el hidrógeno reacciona con el oxígeno residual. Esto ayuda a minimizar el uso de cianuro y zinc, además de reducir la generación de productos no deseados.

Se ha comprobado que ciertos iones metálicos afectan negativamente la cementación del zinc, siendo los iones de antimonio y arsénico los más problemáticos, cuya presencia, incluso en concentraciones tan bajas como 1 ppm, puede reducir la tasa de cementación hasta en un 20%. Para eliminarlos, la solución puede tratarse con sulfuro de sodio y luego filtrarse, lo que permite precipitar los sulfuros de antimonio y arsénico en forma insoluble. No obstante, este proceso también conlleva la pérdida total de la plata presente en la solución.

La existencia de cobre en las soluciones cianuradas generalmente incrementa el uso de cianuro y reduce la eficacia de la precipitación, ya que puede provocar la pasivación del zinc cuando su concentración supera ciertos límites. No obstante, el uso de zinc en polvo permite una renovación continua de su superficie, lo que facilita la precipitación completa del oro y la plata.

Según Marsden & Lain House (2006), El proceso de cementación con zinc en polvo, conocido como el proceso Merrill Crowe, actualmente se emplea actualmente en las principales mineras que extraen oro. Este método resulta más eficiente en operaciones mineras donde la relación entre plata y oro es alta (entre 5:1 y 20:1). Una de las ventajas del proceso Merrill Crowe, una vez alcanzado la estabilidad en el proceso, se requiere un número reducido de personas para la operación y el mantenimiento, ya que solo se necesitan realizar tareas de operación de válvulas y medición de instrumentos.

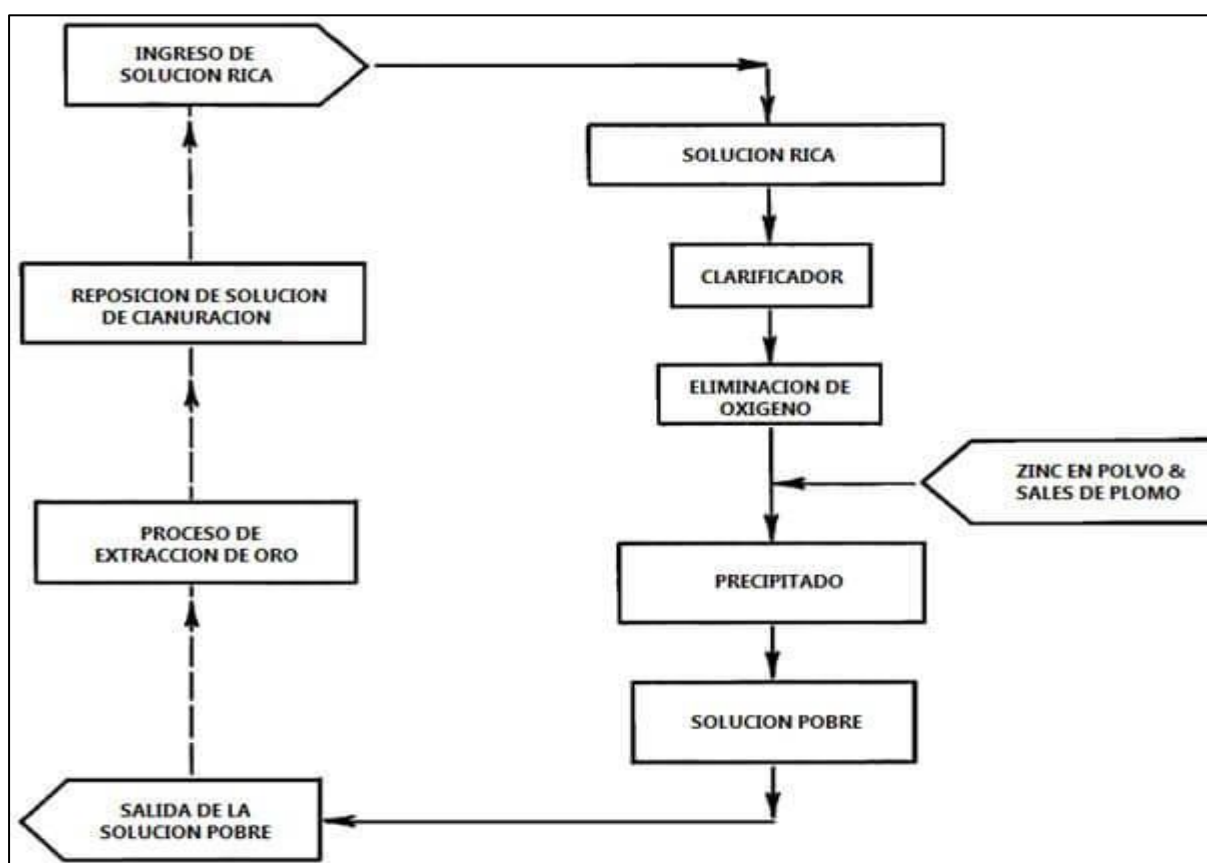
No obstante, el procedimiento tiene ciertos inconvenientes. La solución rica requiere un tratamiento (clarificación y desaireación) previo a la precipitación, y un pretratamiento deficiente puede impactar de manera adversa en la exitosa precipitación. Otras limitaciones se vinculan con

la dependencia y sensibilidad del proceso a la composición de la solución rica. Los niveles reducidos de oro en la solución suelen incrementar el uso de zinc, ya que este se utiliza principalmente para precipitar otros metales antes de que el oro y la plata sean recuperados. Además, los iones interferentes, como el arsénico y el antimonio, pueden causar problemas y llevar a considerar otros métodos de recuperación. (Marsden & Lain House, 2006).

En la figura 8, se muestra el diagrama de flujo del método de Merrill Crowe, en la que se muestran todo el procedimiento hasta la obtención del producto final.

Figura 8

Diagrama de flujo de una planta de precipitación Merrill-Crowe.



Nota. Extraído de Habashi (1967)

2.2.9. Método adsorción – desorción

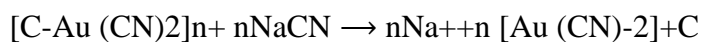
2.2.9.1. Adsorción de oro con carbón activado

Según Vargas (1990), “la adsorción es el proceso mediante el cual un átomo o molécula de una sustancia se adhiere a la superficie de un sólido o a la interfaz entre dos fluidos, debido a la presencia de fuerzas de atracción intermoleculares en puntos específicos del sólido, conocidos como centros activos. El proceso opuesto se llama desorción”.

Ecuación de adsorción de oro con carbón activado:



Y para la **desorción del oro (Au) en carbón activado**:



En la figura 9, se muestra la terminología utilizada para describir el proceso. El sólido que absorbe las moléculas se llama adsorbente, la sustancia que se adsorbe se llama adsorbtivo, y la sustancia que queda adherida a la superficie es el adsorbato. La adsorción es un proceso exotérmico, ya que implica una reducción en la energía cinética de las moléculas de adsorbtivo. (Vargas, 1990)

Figura 9

Terminología del proceso de adsorción y desorción en corriente alterna.



Nota. Obtenido de (Mac Laurin, 1895)

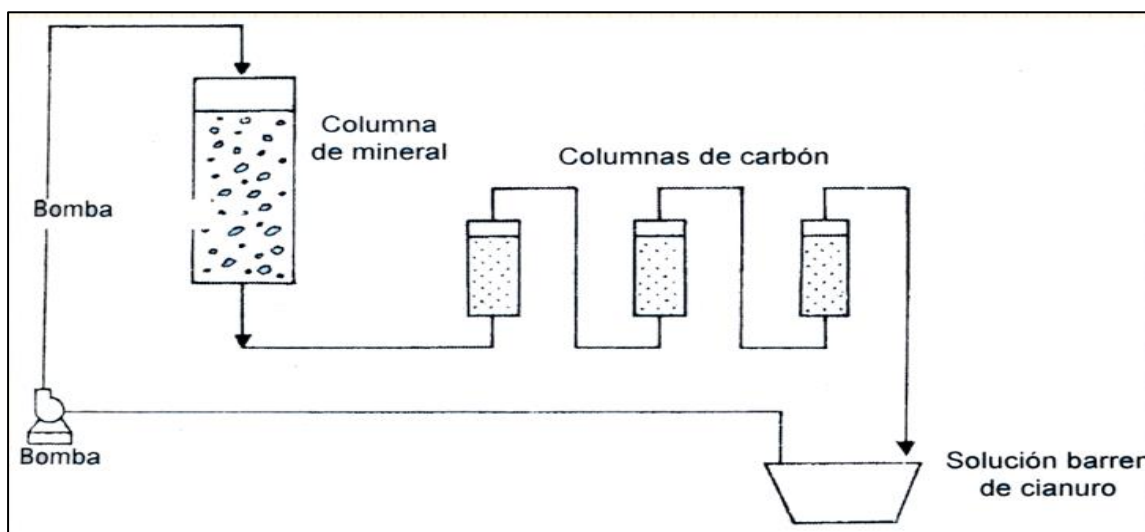
2.2.9.2. Métodos de adsorción con carbón activado

Proceso de Carbón en Columna (CIC)

la solución resultante de la lixiviación se genera en la mayoría de los procesos de lixiviación en pilas que tratan minerales con baja ley de oro y, por lo general, no contiene sólidos en suspensión. de minerales con baja concentración de oro y generalmente está libre de sólidos suspendidos. En estos procesos, la solución rica (licor lixiviado clarificado) se recircula a través de columnas llenas de carbón activado, en un flujo de contracorriente, tal como nos muestra la figura 10. (Rojas, 2003)

Figura 10

Lixiviación en columna nivel laboratorio.



Nota. Extraído de (Rojas, 2003)

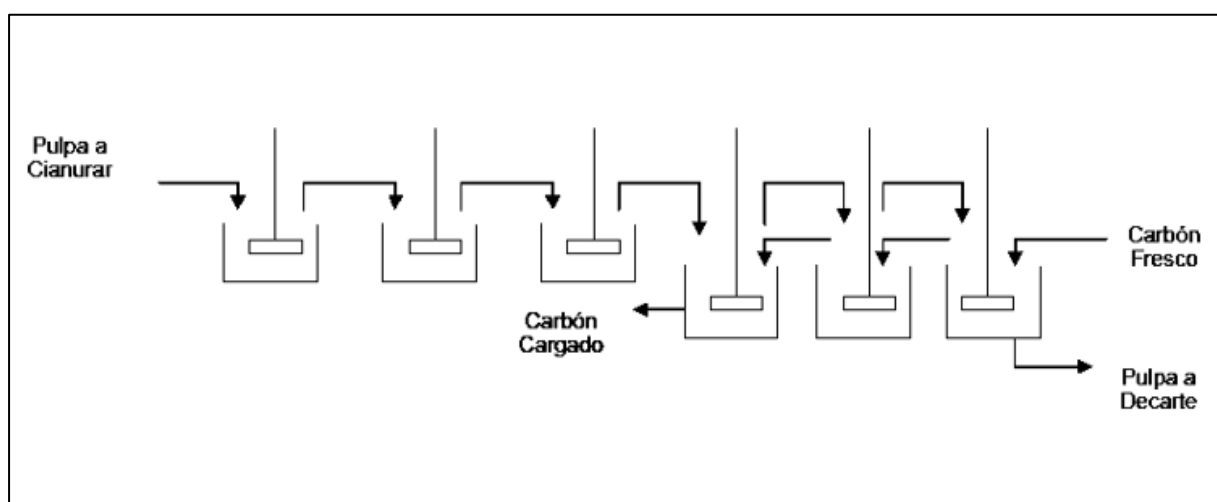
Proceso de Carbón en Pulpa (CIP)

El proceso consiste principalmente en adsorber los iones complejos de oro, $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, directamente desde la pulpa cianurada utilizando carbón activado. Una vez que el oro se disuelve mediante el proceso de cianuración, luego de la molienda del mineral, el carbón permanece suspendido en la pulpa gracias a la agitación mecánica y al aporte de aire. La pulpa se transfiere

de un tanque a otro por acción de la gravedad o mediante un sistema de puente aéreo, mientras que el carbón activado es retenido por un tamiz. El movimiento del carbón se realiza en dirección opuesta al flujo de la pulpa, y su recolección se lleva a cabo según la producción diaria estimada, como se ilustra en la figura 11. Una vez que el carbón alcanza una carga adecuada, se lava en cernidores y se dirige al circuito de desorción del carbón. (Vargas, 1990)

Figura 11

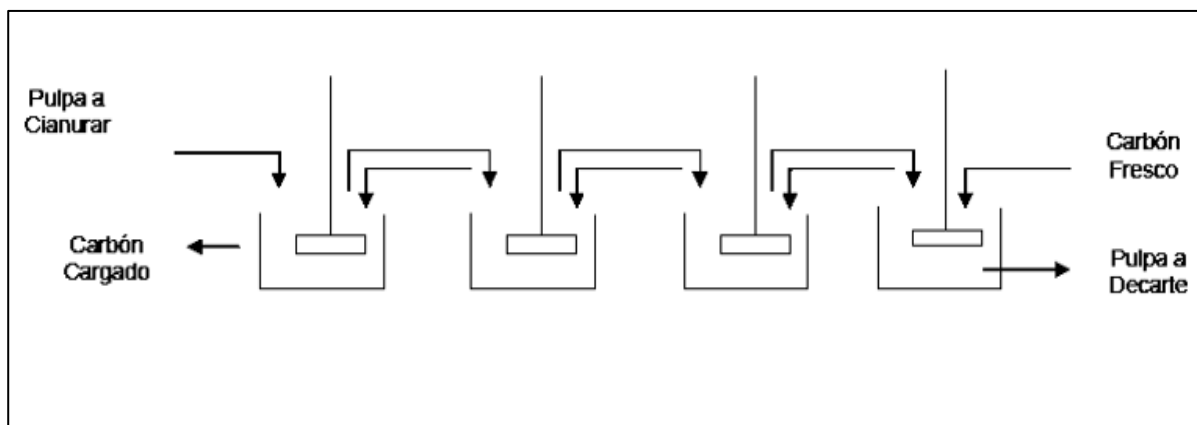
Carbón en pulpa



Nota. Obtenido de (Rojas, 2003)

Proceso de Carbón en el lixiviado (CIL)

El proceso de carbón en lixiviación es una variante relativamente reciente del proceso de carbón en pulpa. En este caso, la lixiviación del oro en forma de cianuro y la adsorción de los iones $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ sobre el carbón activado ocurren simultáneamente en el mismo tanque. Como resultado, la cantidad de tanques utilizados para la lixiviación se reduce o, en algunos casos, se eliminan por completo. En la figura 12 se visualiza el proceso del carbón cargado en lixiviación. (Vargas, 1990)

Figura 12*Carbón en lixiviación.*

Nota. Extraído de (Rojas, 2003)

2.2.10. Desorción de oro con carbón activado

Según Marsden & Lain House (2006), “el proceso de desorción es un fenómeno de transferencia de masa opuesto a la adsorción. Es decir, la sustancia adsorbida en el carbón es extraída mediante una solución que fluye a través del lecho de carbón cargado en un reactor especialmente diseñado para este fin”.

2.2.11. Electroquímica.

La electroquímica según Chang (2006), indica que, “es la rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química, los procesos electroquímicos son reacciones redox (oxidación - reducción), en donde la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad o la energía eléctrica se aprovecha para inducir una reacción química. En las reacciones redox se transfieren electrones de una sustancia a otra”.

2.2.12. Principios electroquímicos

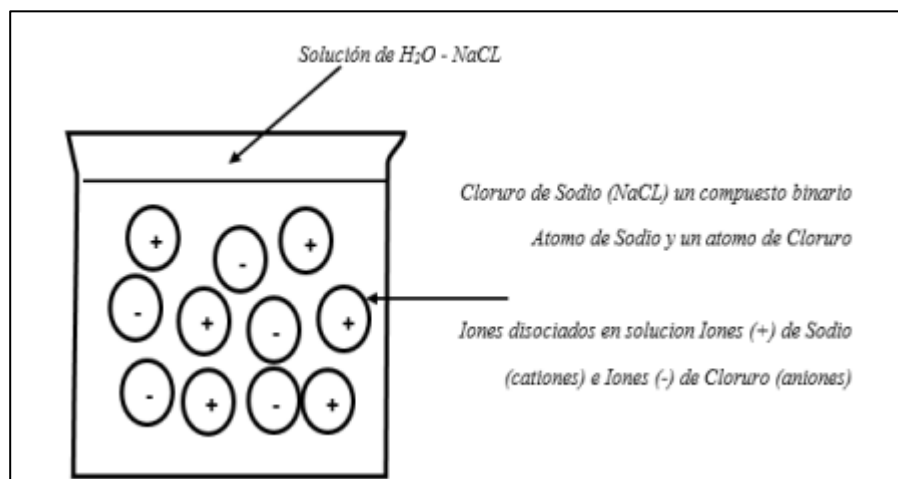
2.2.12.1. Ionización

El químico S.A. Arrhenius (1887), propuso que, en ciertas soluciones, una mayor fuerza aplicada podía detener el flujo de partículas. A través de sus estudios, demostró que las soluciones con conductividad eléctrica presentaban un desequilibrio neto. A partir de esta observación, concluyó que, además de las moléculas, en dichas soluciones existían otras partículas cargadas, a las que llamó "iones", retomando el término de Faraday.

Un ejemplo práctico de esta teoría es la disolución de NaCl (cloruro de sodio) en agua. En este proceso, el sodio (Na^+) se separa formando cationes con una carga de +1, mientras que el cloro, en forma de ion cloruro (Cl^-), se convierte en un anión con carga -1, tal como se observa en la figura 13.

Figura 13

Iones disociados en una solución.



Nota: obtenido de (Zegarra, 2018)

La ionización es siempre reversible. Los iones pueden eliminarse en forma de sólido o gas, o reemplazarse introduciendo un tipo de ion en solución para liberar otro en forma sólida. Un ejemplo clásico es cuando se sumerge un trozo del metal cobre puro a la solución preparada con ácido nítrico que contiene plata (iones). En esta reacción, el cobre comienza a separarse, liberando ion cobre dentro del electrolito. En tanto, los iones de plata se depositan sobre el cobre restante como cristales de plata metálica. Este proceso se llama intercambio iónico, ocurre sin la intervención de una corriente eléctrica externa y se basa en las diferencias de potencial entre los iones involucrados. (Zegarra, 2018)

2.2.12.2. Potencial eléctrico estándar

Al momento de que un ion posee contacto con otro ion de mayor carga negativa, este se neutraliza convirtiéndose al estado metálico. Cada metal sustituirá los iones de otro metal en una solución que sea más noble (o más positiva eléctricamente) que su propio metal. Por ejemplo, los iones de zinc (a -0.76 volts) sustituirán a los de cadmio (a -0.40 volts), ya que los iones de cadmio tienen una mayor capacidad de positivo que los de zinc. (Zegarra, 2018)

Este es el mecanismo que provoca la precipitación del oro por disolución preparada con sulfato ferroso y agua regia. El potencial eléctrico de hierro es $-0.44V$, mientras que el oro posee el potencial eléctrico de $+1.36V$.

En la figura 14 y figura 15, se muestran los potenciales eléctricos estándar de algunos elementos metálicos en soluciones con concentración o actividad habituales de iones metálicos, fundamentado en hidrógeno de voltaje cero. (Zegarra, 2018)

Figura 14

Potencial estándar de elementos en soluciones acidas.

Oxidante + ne ⁻ ⇌ Reductor	E ^o [V]
1. F ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2F ⁻	2,87
2. SiO ₄ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ 2 SO ₄ ²⁻	2,01
3. Co ³⁺ + e ⁻ ⇌ Co ²⁺	1,82
4. Pb ⁴⁺ + 2e ⁻ ⇌ Pb ²⁺	1,80
5. H ₂ O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ 2 H ₂ O	1,77
6. NiO ₂ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ni ²⁺ + 2H ₂ O	1,70
7. MnO ₄ ⁻ + 4H ⁺ + 3e ⁻ ⇌ MnO ₂ + 2H ₂ O	1,69
8. PbO ₂ + SO ₄ ²⁻ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ PbSO ₄ + 2H ₂ O	1,69
9. Au ³⁺ + e ⁻ ⇌ Au	1,68
10. 2 HClO + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cl ₂ + 2 H ₂ O	1,63
11. NaBiO ₃ + 6H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ Bi ³⁺ + Na ⁺ + 3H ₂ O	1,60
12. MnO ₄ ⁻ + 8H ⁺ + 5e ⁻ ⇌ Mn ²⁺ + 4H ₂ O	1,51
13. Au ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Au	1,50
14. ClO ₂ + 6H ⁺ + 5e ⁻ ⇌ ½ O ₂ + 3H ₂ O	1,47
15. BrO ₃ ⁻ + 6H ⁺ + 6e ⁻ ⇌ Br ⁻ + 3H ₂ O	1,44
16. Cl ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2Cl ⁻	1,36
17. Cr ₂ O ₇ ²⁻ + 14H ⁺ + 6e ⁻ ⇌ 2Cr ³⁺ + 7H ₂ O	1,33
18. Au ³⁺ + 2e ⁻ ⇌ Au ⁺	1,29
19. MnO ₂ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ Mn ²⁺ + 2H ₂ O	1,23
20. O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ ⇌ 2H ₂ O	1,23
21. Pt ³⁺ + 2e ⁻ ⇌ Pt	1,20
22. IO ₃ ⁻ + 6H ⁺ + 5e ⁻ ⇌ ½ I ₂ + 3H ₂ O	1,20
23. ClO ₄ ⁻ + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ ClO ₃ ⁻ + H ₂ O	1,19
24. Br ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2Br ⁻	1,08
25. AuCl ₄ ⁻ + 3e ⁻ ⇌ Au + 4Cl ⁻	1,00
26. Pd ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Pd	0,99
27. NO ₃ ⁻ + 4H ⁺ + 3e ⁻ ⇌ NO + 2H ₂ O	0,96
28. NO ₃ ⁻ + 3H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ HNO ₂ + H ₂ O	0,94
29. 2Hg ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Hg ₂ ²⁺	0,92
30. Hg ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Hg	0,86
31. Ag ⁺ + e ⁻ ⇌ Ag	0,80
32. Hg ₂ ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ 2Hg	0,79
33. Fe ³⁺ + e ⁻ ⇌ Fe ²⁺	0,77
34. SbCl ₆ ⁻ + 2e ⁻ ⇌ SbCl ₄ ⁻ + 2Cl ⁻	0,75
35. O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂ O ₂	0,68
36. PtCl ₆ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ PtCl ₄ ²⁻ + 2Cl ⁻	0,68
37. I ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2I ⁻	0,54
38. Cu ⁺ + e ⁻ ⇌ Cu	0,52
39. S ₂ O ₈ ²⁻ + 6H ⁺ + 4e ⁻ ⇌ 2S + 3H ₂ O	0,46
40. SO ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ ⇌ S + 2H ₂ O	0,45
41. 2SO ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ ⇌ S ₂ O ₄ ²⁻ + H ₂ O	0,43
42. Cu ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cu	0,34
43. SO ₄ ²⁻ + 8H ⁺ + 6e ⁻ ⇌ S + 4H ₂ O	0,34
44. Hg ₂ Cl ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2Hg + 2Cl ⁻	0,27
45. AgCl + e ⁻ ⇌ Ag + Cl ⁻	0,22
46. SO ₄ ²⁻ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ SO ₂ + 2H ₂ O	0,20
47. SO ₄ ²⁻ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂ SO ₃ + H ₂ O	0,17
48. Cu ²⁺ + e ⁻ ⇌ Cu ⁺	0,15
49. Sn ⁴⁺ + 2e ⁻ ⇌ Sn ²⁺	0,15
50. S + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂ S	0,14
51. SO ₄ ²⁻ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ 2SO ₂ + 2H ₂ O	0,12
52. AgBr + e ⁻ ⇌ Ag + Br ⁻	0,10
53. S ₂ O ₈ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ 2S ₂ O ₄ ²⁻	0,08
54. 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂	0,00
55. Fe ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Fe	-0,04
56. Pb ⁴⁺ + 2e ⁻ ⇌ Pb	-0,13
57. Sn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Sn	-0,14
58. AgI + e ⁻ ⇌ Ag + I ⁻	-0,15
59. Ni ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ni	-0,25
60. H ₃ PO ₄ + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂ PO ₄ + H ₂ O	-0,28
61. Co ³⁺ + 2e ⁻ ⇌ Co	-0,28
62. PbSO ₄ + 2e ⁻ ⇌ Pb + SO ₄ ²⁻	-0,36
63. Se + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂ Se	-0,40
64. Cd ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cd	-0,40
65. Cr ³⁺ + e ⁻ ⇌ Cr ²⁺	-0,41
66. Fe ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Fe	-0,44
67. Cr ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Cr	-0,74
68. Zn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Zn	-0,76
69. Cr ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cr	-0,91
70. ZnS + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ Zn + H ₂ S	-0,96
71. FeS + 2e ⁻ ⇌ Fe + S ²⁻	-1,01
72. Mn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Mn	-1,18
73. CdS + 2e ⁻ ⇌ Cd + S ²⁻	-1,21
74. ZnS + 2e ⁻ ⇌ Zn + S ²⁻	-1,44
75. Al ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Al	-1,66
76. Mg ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Mg	-2,37
77. Na ⁺ + e ⁻ ⇌ Na	-2,71
78. Ca ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ca	-2,87
79. Sr ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Sr	-2,89
80. Ba ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ba	-2,90
81. Rb ⁺ + e ⁻ ⇌ Rb	-2,92
82. K ⁺ + e ⁻ ⇌ K	-2,93
83. Li ⁺ + e ⁻ ⇌ Li	-3,05

Nota. Extraído de (Zegarra, 2018)

Figura 15

Potencial estándar de elementos en solución básica.

Oxidante + ne ⁻ ⇌ Reductor	E ^o _r [V]
1. ClO ⁻ + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ Cl ⁻ + 2OH ⁻	0,89
2. H ₂ O ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2OH ⁻	0,88
3. ClO ₂ ⁻ + 3H ₂ O + 6e ⁻ ⇌ Cl ⁻ + 6OH ⁻	0,62
4. MnO ₄ ⁻ + 2H ₂ O + 3e ⁻ ⇌ MnO ₂ + 4OH ⁻	0,59
5. MnO ₄ ⁻ + e ⁻ ⇌ MnO ₄ ²⁻	0,56
6. NiO ₂ + 2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ Ni(OH) ₂ + 2OH ⁻	0,49
7. IO ⁻ + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ I ⁻ + 2OH ⁻	0,49
8. Ag ₂ CrO ₄ + 2e ⁻ ⇌ 2Ag + CrO ₄ ²⁻	0,45
9. O ₂ + 2H ₂ O + 4e ⁻ ⇌ 4OH ⁻	0,40
10. ClO ₃ ⁻ + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ ClO ₂ ⁻ + 2OH ⁻	0,36
11. Ag ₂ O + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ 2Ag + 2OH ⁻	0,34
12. IO ₃ ⁻ + 3H ₂ O + 6e ⁻ ⇌ I ⁻ + 6OH ⁻	0,29
13. 2NO ₂ ⁻ + 3H ₂ O + 4e ⁻ ⇌ N ₂ O + 6OH ⁻	0,15
14. N ₂ H ₄ + 2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ 2NH ₃ + 2OH ⁻	0,10
15. Co(NH ₃) ₆ ³⁺ + e ⁻ ⇌ Co(NH ₃) ₆ ²⁺	0,10
16. HgO + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ Hg + 2OH ⁻	0,10
17. SiO ₄ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ 2SiO ₃ ²⁻	0,08
18. NO ₃ ⁻ + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ NO ₂ ⁻ + 2OH ⁻	0,01
19. MnO ₂ + 2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ Mn(OH) ₂ + 2OH ⁻	- 0,05
20. O ₂ + 2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ H ₂ O ₂ + 2OH ⁻	- 0,076
21. CrO ₄ ²⁻ + 4H ₂ O + 3e ⁻ ⇌ Cr(OH) ₃ + 5OH ⁻	- 0,12
22. CrO ₄ ²⁻ + 4H ₂ O + 3e ⁻ ⇌ Cr(OH) ₄ ⁻ + 4OH ⁻	- 0,12
23. Cu(OH) ₂ + 2e ⁻ ⇌ Cu + 2OH ⁻	- 0,22
24. Ag(CN) ₂ ⁻ + e ⁻ ⇌ Ag + 2CN ⁻	- 0,31
25. Hg(CN) ₄ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ Hg + 4CN ⁻	- 0,37
26. S + 2e ⁻ ⇌ S ²⁻	- 0,48
27. Fe(OH) ₃ + e ⁻ ⇌ Fe(OH) ₂ + OH ⁻	- 0,56
28. Cd(NH ₃) ₆ ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cd + 4NH ₃	- 0,59
29. Au(CN) ₂ ⁻ + e ⁻ ⇌ Au + 2CN ⁻	- 0,60
30. CoCO ₃ + 2e ⁻ ⇌ Co + CO ₃ ²⁻	- 0,64
31. Ni(OH) ₂ + 2e ⁻ ⇌ Ni + 2OH ⁻	- 0,688
32. Ag ₂ S + 2e ⁻ ⇌ 2Ag + S ²⁻	- 0,69
33. Fe(OH) ₃ + 3e ⁻ ⇌ Fe + 3OH ⁻	- 0,77
34. CuS + 2e ⁻ ⇌ Cu + S ²⁻	- 0,76
35. 2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ H ₂ + 2OH ⁻	- 0,826
36. 2NO ₂ ⁻ + 2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ N ₂ O ₄ + 4OH ⁻	- 0,85
37. Fe(OH) ₃ + 2e ⁻ ⇌ Fe + 2OH ⁻	- 0,88
38. Se + 2e ⁻ ⇌ Se ²⁻	- 0,92
39. SO ₄ ²⁻ + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ SO ₃ ²⁻ + 2OH ⁻	- 0,93
40. SnS + 2e ⁻ ⇌ Sn + S ²⁻	- 0,94
41. PbS + 2e ⁻ ⇌ Pb + S ²⁻	- 0,95
42. FeS + 2e ⁻ ⇌ Fe + S ²⁻	- 1,01
43. Cd(CN) ₄ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ Cd + 4CN ⁻	- 1,03
44. Zn(NH ₃) ₆ ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Zn + 4NH ₃	- 1,03
45. ZnCO ₃ + 2e ⁻ ⇌ Zn + CO ₃ ²⁻	- 1,06
46. Cr(OH) ₃ + e ⁻ ⇌ Cr(OH) ₂ + OH ⁻	- 1,10
47. N ₂ + 4H ₂ O + 4e ⁻ ⇌ N ₂ H ₄ + 4OH ⁻	- 1,15
48. CdS + 2e ⁻ ⇌ Cd + S ²⁻	- 1,21
49. Zn(OH) ₄ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ Zn + 4OH ⁻	- 1,22
50. Zn(OH) ₂ + 2e ⁻ ⇌ Zn + 2OH ⁻	- 1,25
51. Zn(CN) ₄ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ Zn + 4CN ⁻	- 1,26
52. Cr(OH) ₃ + 3e ⁻ ⇌ Cr + 3OH ⁻	- 1,30
53. ZnS + 2e ⁻ ⇌ Zn + S ²⁻	- 1,44
54. MnCO ₃ + 2e ⁻ ⇌ Mn + CO ₃ ²⁻	- 1,48
55. Mn(OH) ₃ + 2e ⁻ ⇌ Mn + 2OH ⁻	- 1,55
56. SiO ₂ ²⁻ + 3H ₂ O + 4e ⁻ ⇌ Si + 6OH ⁻	- 1,70
57. U(OH) ₃ + 3e ⁻ ⇌ U + 3OH ⁻	- 2,17
58. Al(OH) ₃ ⁻ + 3e ⁻ ⇌ Al + 4OH ⁻	- 2,35
59. Th(OH) ₄ + 4e ⁻ ⇌ Th + 4 OH ⁻	- 2,48
60. Sc(OH) ₃ + 3e ⁻ ⇌ Sc + 3OH ⁻	- 2,60

61. Mg(OH) ₂ + 2e ⁻ ⇌ Mg + 2OH ⁻	- 2,69
62. La(OH) ₃ + 3e ⁻ ⇌ La + 3OH ⁻	- 2,90
63. Ca(OH) ₂ + 2e ⁻ ⇌ Ca + 2OH ⁻	- 3,03

Nota. Extraído de (Zegarra, 2018)

2.2.12.3. Leyes electroquímicas

Durante la mitad de periodo XIX. Faraday determinó una correlación de energía eléctrica circulante sobre la materia extraída. Sus estudios llevo a establecer sobre leyes electrolíticas.

- El volumen al descomponer electroquímicamente generada por los ánodos y cátodos se relaciona directamente con la cantidad de electricidad (coulombios) que circula por el circuito.
- Las proporciones de distintas sustancias generadas por el mismo volumen en energía eléctrica es proporcional a la masa correspondientes.

Un equivalente electroquímico de la sustancia o un conjunto de partículas representa la cantidad de la masa del dicho elemento que se liberan al pasar un coulombio a la energía eléctrica por un electrólito.

Por definición, un coulombio eléctrico libera 0.00111800 gramo de Ag en disolución del cloruro de sodio. Que se divide el equivalente la masa del metal con el equivalente electroquímico, se descubre:

$$107.88/0.00111800 = 96494 \text{ coulomb.}$$

Este valor eléctrico se conoce como Faraday (F). Se considera que corresponde a un valor de 96500 coulomb, es decir, 26.8 amperios por hora. En tanto, un Faraday que pasa por el conductor electrolítico, cada electrodo liberará 1 equivalente gramo de algún compuesto. Si se pasa un Faraday por una solución que incluye a los electrólitos, entonces el valor en distintos productos extraídos por un electrodo, se conoce como equivalentes en una unidad.

Los términos prácticos requieren en superiores al valor de Faraday para extraer del gramo equivalente en un compuesto. El resultado no quiere decir a la violación al postulado de Faraday, al contrario, da razones, en la ocurrencia de alteración electrolítica en una reacción, la pérdida mecánica del resultado de la electrólisis y la aparición de nuevas reacciones. (Morales , 2003)

2.2.12.4. Conducción electrolítica

La conducción electrolítica, donde los iones llevan la carga, no sucederá a no ser que los iones del electrolito sean capaces de moverse de manera autónoma. Por lo tanto, se muestra principalmente la conducción electrolítica a través de sales y en soluciones acuosas de electrolitos. En tanto, la energía al fluir por un conductor electrolítico necesita que la transformación química siga la traslación de electrones.

Una electrólisis ocurre al inyectar la electricidad externa sobre electrolito que contiene cationes y aniones. El electrolito es el nombre de la solución.

En el proceso de refinación y extracción, frecuentemente se utiliza el término `Solución preñada` para aludir a una solución que contiene iones metálicos y otros elementos.

2.2.13. Leyes de Faraday

La ley de Faraday es el principio básico que rige los procesos de electrólisis. A través de su ecuación, es posible determinar la cantidad de metal que se ha corroído o depositado de manera uniforme sobre otro material durante un proceso electroquímico en un tiempo determinado. Esta ley se describe en los siguientes enunciados (Del Castillo, 2008).

2.2.13.1. Primera ley de Faraday

La masa de una sustancia depositada o liberada en un electrodo durante un proceso de electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de carga eléctrica que pasa a través del electrolito. (Cáceres, 1989).

$$m = Z \times Q$$

Donde:

m: masa de la sustancia depositada o liberada (en gramos).

Z: equivalente electroquímico de la sustancia, que depende de su peso equivalente y del tipo de reacción.

Q: cantidad de carga eléctrica (en culombios), que se calcula como:

$$Q = I \times t$$

Donde I es la corriente eléctrica (ampere) y t el tiempo (segundo).

Esta ley implica que cuanto mayor sea la cantidad de carga eléctrica que fluye por el circuito, mayor será la cantidad de sustancia que se libera o deposita en los electrodos. El equivalente electroquímico (Z) depende del material y de la reacción química involucrada.

2.2.13.2. Segunda ley de Faraday.

Según Cáceres (1989), Esta ley nos demuestra que el valor de elementos liberados por la misma cantidad de electricidad, son proporcionales a sus pesos equivalentes. Esta dada en la siguiente ecuación:

$$mf = \frac{M \times I \times t}{nF}$$

donde:

mf = metal depositado (g).

M= Masa molar de la sustancia (g/mol).

n = Número de electrones intercambiados en la reacción de oxidación-reducción.

F = 96500 (Coulomb/equivalente).

I = intensidad de corriente (A).

t = tiempo (s).

2.2.14. Equivalente electroquímico

De acuerdo a (Domic Mihovilovic, 2001), el equivalente electroquímico se da cuando circula una corriente de un amperio en un segundo para depositar cierta cantidad de sustancia y esta dada por la siguiente expresión:

$$EEQ = \frac{M}{nF}$$

En donde:

EEQ = g/colombios

M = peso atómico (gramos)

n= valencia

F = constante de Faraday (96500 culombios)

2.2.15. Eficiencia de corriente

De acuerdo con la ley de Faraday, la eficiencia de corriente se define como el cociente entre la masa realmente depositada en un proceso y la masa teórica esperada.

La eficiencia de corriente se expresa mediante el siguiente formula:

$$EC(\%) = \frac{m_R}{m_F} \times 100$$

En donde:

EC = eficiencia de corriente

m_R = masa depositada realmente

m_F = masa teórica

2.2.16. Celdas electroquímicas

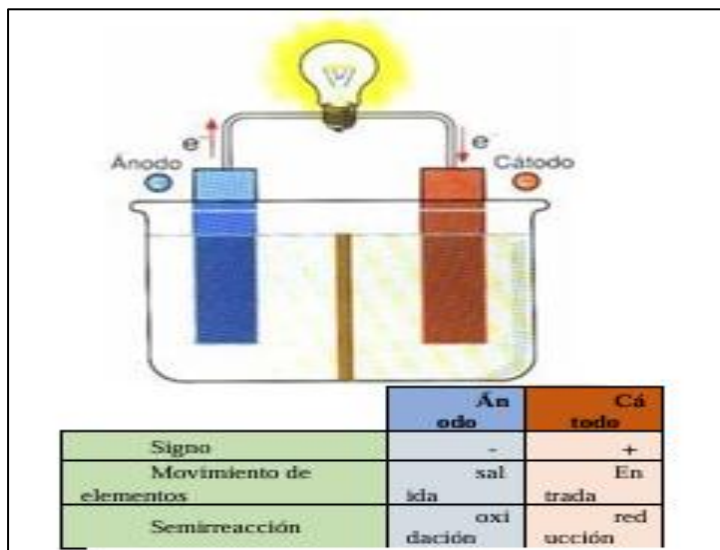
Una celda es un dispositivo diseñado para realizar reacciones químicas de oxidación y reducción. Está compuesta por un electrolito que contiene iones, dos electrodos (ánodo y cátodo) y una conexión eléctrica que une ambos electrodos.

2.2.16.1. Celda galvánica.

celda galvánica es un dispositivo que transforma energía química en energía eléctrica mediante una reacción química espontánea. Esto ocurre porque un metal, más activo, actúa como ánodo, mientras que otro, más noble, funciona como cátodo, de acuerdo con la serie galvánica. Al conectarse eléctricamente, se genera un flujo de electrones desde el cátodo hacia el ánodo, produciendo un potencial eléctrico que puede medirse de manera experimental. (Campo, 2015).

Figura 16

Celda galvánica



Nota. Extraída de (Campo, 2015)

Como se observa en la figura 16, se requieren de ciertos requisitos para que ocurra un proceso de corrosión en una celda voltaica, y son los siguientes:

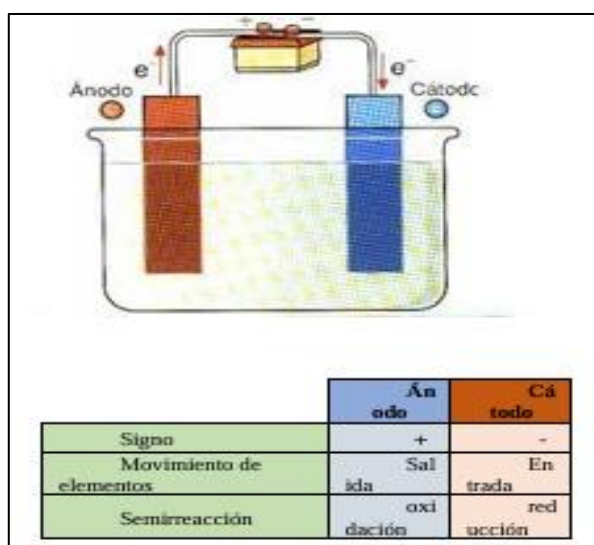
- Dos superficies con distinto potencial electrónico
- Una de ellas, que constituye al ánodo de la reacción, al ceder electrones sufrirá la corrosión. En donde ocurren las reacciones de oxidación, que se lleva a cabo en el polo negativo.
- El cátodo es el electrodo que recibe los electrones liberados por el ánodo. En esta área tiene lugar la reacción de reducción y corresponde al polo positivo.
- El electrolito es un conductor de iones que contiene los elementos propios del medio corrosivo. Es dentro de esta solución donde se lleva a cabo el transporte de materia.

- Una conexión eléctricamente conductora entre el ánodo y el cátodo, para que sea posible el transporte de carga. (Campo, 2015).

2.2.16.2. Celda electrolítica.

Figura 17

Celda electrolítica.



Nota. Imagen extraída de (Campo, 2015)

Las celdas electrolíticas, figura 17, no funcionan de manera espontánea, por lo que requieren la aplicación de un potencial eléctrico externo. Al suministrar esta energía, se obliga a que una corriente eléctrica atraviese la celda, lo que permite que ocurran reacciones químicas de óxido-reducción en las superficies de sus electrodos. Uno de los procesos más comunes que se lleva a cabo en estas celdas es el depósito electroquímico de metales como cobre, níquel o zinc. Es relevante destacar que, en este caso, el ánodo tiene carga positiva y el cátodo carga negativa, a diferencia de lo que ocurre en las celdas galvánicas.

Las partes que conforman una celda electrolítica, según Campo (2015), son:

- Electrolito. Al igual que en las celdas galvánicas, se necesita de un conductor iónico.
- Ánodo. En este tipo de celdas, el ánodo posee el polo positivo y aquí se lleva a cabo la oxidación de la especie electroquímica.
- Cátodo. Éste es el polo negativo y en él se produce la reducción de la especie electroquímica.
- Fuente de energía. Es quien aplica la energía necesaria para poder invertir el sentido natural de la corriente, dando lugar a una reacción química opuesta a la que se produce espontáneamente en la pila.

Hoy en día, este proceso tiene una gran relevancia económica, ya que permite aprovechar recursos lixiviables, como el oro, el cobre, la plata, entre otros, cuyo procesamiento por otros métodos sería económicamente inviable. A continuación, en la figura se presenta una lista de los metales que se recuperan de forma comercial mediante electrodeposición, junto con las características del electrolito y el cátodo empleados en cada caso.

2.2.17. Electrometalurgia

la electrometalurgia es parte de la rama de metalurgia que utiliza la energía eléctrica para el tratamiento de la extracción y refinado de metales, denominado como el proceso electrolítico que se encarga del estudio de fenómenos de transferencia de electrones e iones (reacciones de oxidación - reducción). (Morales , 2003)

según Caceres (1989), La electrometalurgia utiliza procesos electroquímicos para extraer, purificar y transformar metales. A través de la electricidad, se generan reacciones de oxidación-

reducción (redox) que permiten la transferencia de electrones entre los electrodos. En este proceso, la reducción ocurre en el cátodo, mientras que la oxidación tiene lugar en el ánodo. Las aplicaciones de la electrometalurgia dependen del tipo de electrólisis empleada, la cual puede realizarse en una sal fundida o en una solución acuosa dentro de una celda electrolítica. Los procesos electrometalúrgicos se clasifican según el tipo de depósito que se obtiene, de la siguiente manera:

- **Electroobtención:** También conocida como electrowinning, es un proceso metalúrgico basado en la electrólisis, utilizado para recuperar metales desde soluciones que contienen sus iones. Este método es ampliamente empleado en la industria para la producción de metales de alta pureza, reduciendo la necesidad de procesos de refinación adicionales.
- **Electro refinación:** Es un proceso metalúrgico basado en la electrólisis, utilizado para purificar metales a partir de materiales impuros. A través de este método, se logra obtener metales con un alto grado de pureza, lo que es esencial para diversas aplicaciones industriales, especialmente en la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos. El electro refinación se lleva a cabo en una celda electrolítica, donde se coloca un ánodo de metal impuro y un cátodo de metal puro dentro de una solución electrolítica que contiene los iones del metal a purificar.
- **Galvanoplastia:** Es un proceso electroquímico utilizado para recubrir un metal con una capa delgada de otro metal mediante electrólisis. Su objetivo principal es proteger contra la corrosión, mejorar la apariencia estética o proporcionar propiedades específicas, como mayor dureza o conductividad.

- **Electro conformado:** Es un proceso de manufactura basado en la electrodeposición controlada de metal sobre un molde o sustrato conductor. A través de este método, se pueden fabricar piezas metálicas con formas precisas y complejas, logrando un alto grado de detalle y precisión dimensional. Se distingue de la galvanoplastia, ya que en el electro conformado el recubrimiento metálico se separa del molde, formando una estructura completamente independiente.

2.2.18. Electrodeposición de oro

Según Marsden & House, (2006). Se comprende que una reacción de reducción catódica se genera aplicando el diferencial potencial eléctrico a los ánodos y cátodos introducidos en un electrolito acuosa. Para lo cual el voltaje aplicado debe superar al potencial del electrodo reversible y también permitirá una baja del voltaje en consecuencia a la resistencia del electrolito, la cantidad excedida del voltaje se denomina voltaje sobre potencial y está representada en la siguiente ecuación:

$$\eta = E_{aplicado} - E_{reversible}$$

La reacción de oxidación y reducción es paralela en el ánodo - cátodo, mayormente la oxidación de agua a oxígeno.

Si un ion metálico (M^{Z+}) aplica la electro-reducción, el voltaje de la celda esta dado por:

$$V = E \frac{O_2}{H_2O} + E \frac{M^{Z+}}{M} + n_a + n_c + iR$$

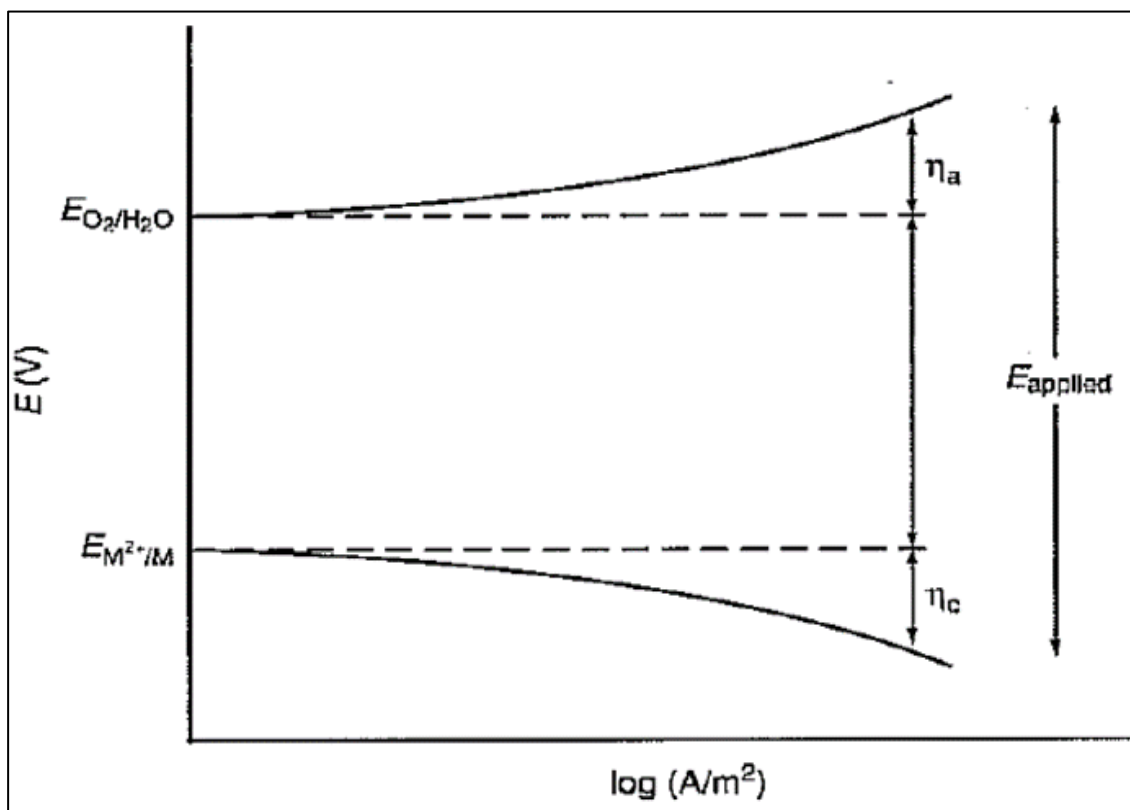
En donde:

- n_a = sobrepotencial anódico
- n_c = sobrepotencial catódico

- iR =caída de potencial (conductividad en la solución)

Figura 18

Representación esquemática de requerimientos de un sistema de celda simple.

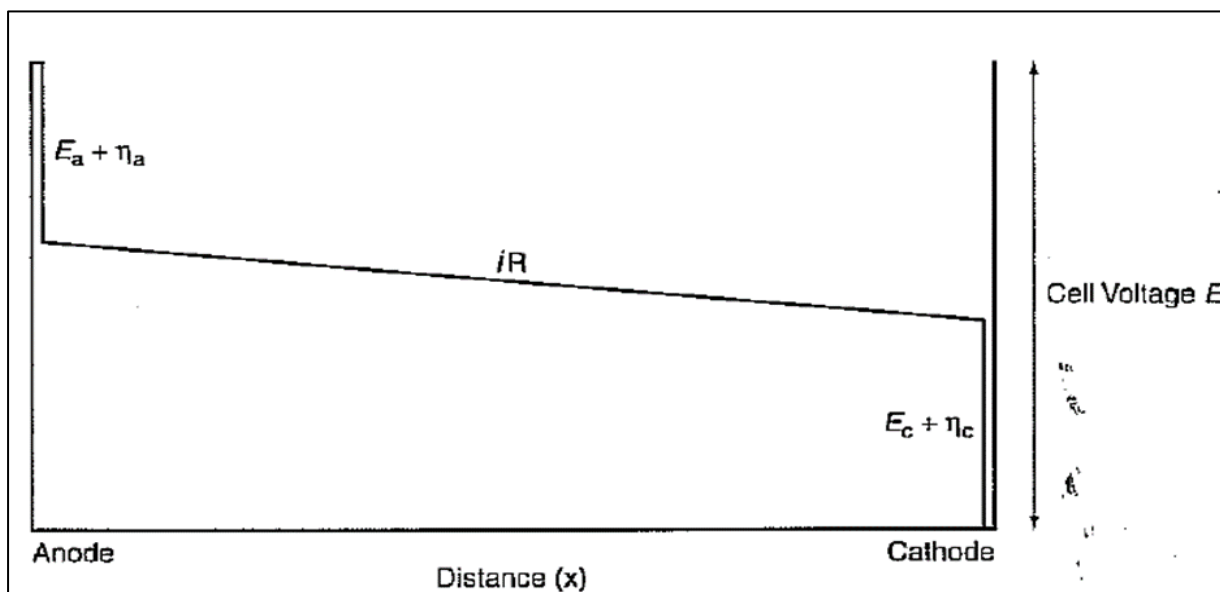


Nota. Extraído del (Marsden & House, 2006)

Según Marsden y House (2006), el comportamiento del potencial en una celda electroquímica varía en función de la densidad de corriente aplicada. La Figura 18 muestra cómo el potencial de equilibrio (E_{eq}) se ve afectado por el sobrepotencial anódico (η_a) y catódico (η_c), generando una desviación respecto al potencial estándar. Esta relación sigue un comportamiento logarítmico característico de los sistemas electroquímicos, lo que concuerda con la ecuación de Butler-Volmer, la cual describe la cinética de transferencia de carga en los electrodos.

Figura 19

Esquemática de la caída de potencial a través de una celda electrolítica.



Nota. Obtenido de (Marsden & Lain House, 2006)

En una celda electrolítica, la caída de potencial a lo largo del sistema está determinada por diversos factores, como la resistencia interna y los sobrepotenciales de activación y concentración. En la figura 19, se observa que la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo se ve afectada por una caída óhmica (iR), la cual es producto de la resistencia del electrolito y los materiales de los electrodos. Esta caída de potencial es un factor limitante en la eficiencia de los procesos electroquímicos y debe minimizarse mediante un diseño adecuado de la celda y el uso de electrolitos con alta conductividad. (Marsden & House, 2006).

La velocidad de transferencia del electrón en el proceso está dada por la ecuación de Butler-Volmer:

$$i = i_0 e^{\left(-anF\frac{\eta}{RT}\right)} - e^{\left((1-a)\left(nF\frac{\eta}{RT}\right)\right)}$$

Donde:

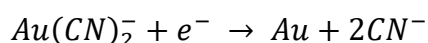
- I = Densidad de corriente neta (A/m^2).

- I_0 = Densidad de corriente de intercambio (A/m^2), representa la corriente cuando no hay sobrepotencial.
- e = Base del logaritmo natural (~ 2.718).
- α = Coeficiente de transferencia de carga (varía entre 0 y 1, típicamente 0.5).
- n = Número de electrones involucrados en la reacción.
- F = Constante de Faraday (96,485 C/mol).
- η = Sobrepotencial (diferencia entre el potencial aplicado y el potencial de equilibrio, en voltios).
- R = Constante de los gases (8.314 J/(mol·K)).
- T = Temperatura en kelvins (K).

2.2.19. Reacciones químicas durante la electrodeposición de oro

2.2.19.1 Reducción catódica de oro

La recuperación de oro mediante un proceso electrolítico es una técnica ampliamente utilizada en la metalurgia extractiva y en la refinación de metales preciosos. Este método se basa en la reducción electroquímica del complejo de oro-cianuro presente en una solución alcalina, permitiendo la deposición del oro en un cátodo.



En este proceso, los iones $Au(CN)_2^-$, se reducen en la superficie del cátodo, liberando iones de **cianuro libre** (CN^-) en la solución.

Se tiene:

$$E_{rev} = -0.60 + 0.118 \log a_{CN^-} + 0.059 \log a_{Au(CN)_2^-}$$

Donde:

- E_{rev} es el potencial de equilibrio (en volts).
- a_{CN^-} es la actividad de los iones de cianuro en la solución.

- $a_{\text{Au}(\text{CN})_2^-}$ es la actividad del complejo de oro-cianuro.

El oro se deposita en potenciales bajos, aproximadamente -0.7 V, pero estos valores pueden variar en función de las condiciones de la solución, incluyendo:

Conductividad: Influye en la eficiencia del proceso de reducción.

Concentración de iones $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y CN^- : Afecta la cinética de la reacción y el potencial de deposición.

Temperatura: Puede modificar la solubilidad y la movilidad iónica, impactando la eficiencia del proceso.

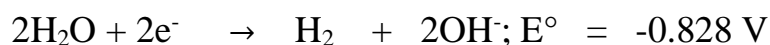
Dependiendo de estas variables, el potencial de deposición del oro varía entre -0.7 V y -1.1 V, lo que resalta la importancia del control preciso de los parámetros de operación en la celda electrolítica.

2.2.19.2. Reducción del oxígeno y agua.

Según (Morales , 2003). Nos indica que, por intermedio de oxidación del agua, el oxígeno se genera naturalmente en el ánodo y esta suele migrar al cátodo en donde se regresa al agua por la reacción de reducción como sigue:



La reducción de oxígeno necesita un 50% de la corriente del cátodo y la reducción de agua a hidrógeno esta expresado por la reacción:



Por tanto, según lo analizado nos indica que al reducir agua como el oxígeno por el cátodo aumenta al pH del electrolito.

2.2.19.3. Reacciones anódicas.

Según Marsden & Lain House (2006), la reacción más relevante en medios alcalinos cianurados es la oxidación del agua, que genera oxígeno molecular de acuerdo con la siguiente ecuación:



El potencial de equilibrio de esta reacción está dado por la ecuación de Nernst:

$$E_{\text{rev}} = 1.228 + 0.015 \log p\text{O}_2 - 0.059 \text{ pH (V)}$$

Donde:

- **E_{rev}** es el potencial de equilibrio de la reacción (V).
- **pO₂** es la presión parcial de oxígeno en la solución.
- **pH** es la concentración de iones hidrógeno en la solución.

Según esta ecuación, el pH de la solución disminuye cerca del ánodo, lo que puede generar efectos indeseables en el sistema, como cambios en la solubilidad de los compuestos presentes y alteraciones en la eficiencia del proceso.

El cianuro presente en la solución también puede sufrir una reacción de oxidación en el ánodo, transformándose en cianato (CNO⁻) de acuerdo con la siguiente ecuación:



Esta reacción tiene un potencial estándar de oxidación de:

$$E^{\circ} = - 0.97 \text{ V}$$

La conversión de cianuro a cianato es importante, ya que reduce la toxicidad del cianuro libre en la solución, lo que puede contribuir a la seguridad del proceso y disminuir los impactos ambientales.

En condiciones de pH elevado, el cianato puede experimentar una hidrólisis lenta, dando lugar a la formación de amoníaco (NH₃) y dióxido de carbono (CO₂), según la reacción:



Este proceso es relativamente lento, pero cuando ocurre en celdas electrolíticas, se puede percibir un fuerte olor a amoníaco, lo que indica la descomposición del cianuro en el sistema.

2.2.20. Cinética de reacción durante la electrodeposición de oro

El oro se deposita por electrólisis en un rango de potenciales entre -0.85 V y -1.0 V, dependiendo de las condiciones del electrolito. Cuando el potencial es menos negativo, la cinética de deposición está limitada por el transporte de masa del complejo aurocianuro hacia el cátodo, por lo que una precipitación eficiente del oro se logra cuando la deposición es controlada por la transferencia de masa. La velocidad del proceso está influenciada por factores como la temperatura de la solución, que afecta la movilidad iónica; el pH del electrolito, que influye en la estabilidad del complejo Au(CN); la concentración de cianuro, necesaria para evitar precipitaciones indeseadas; la conductividad de la solución, que optimiza el flujo de corriente; y el área superficial del cátodo, que influye en la uniformidad del depósito metálico. Un control preciso de estos

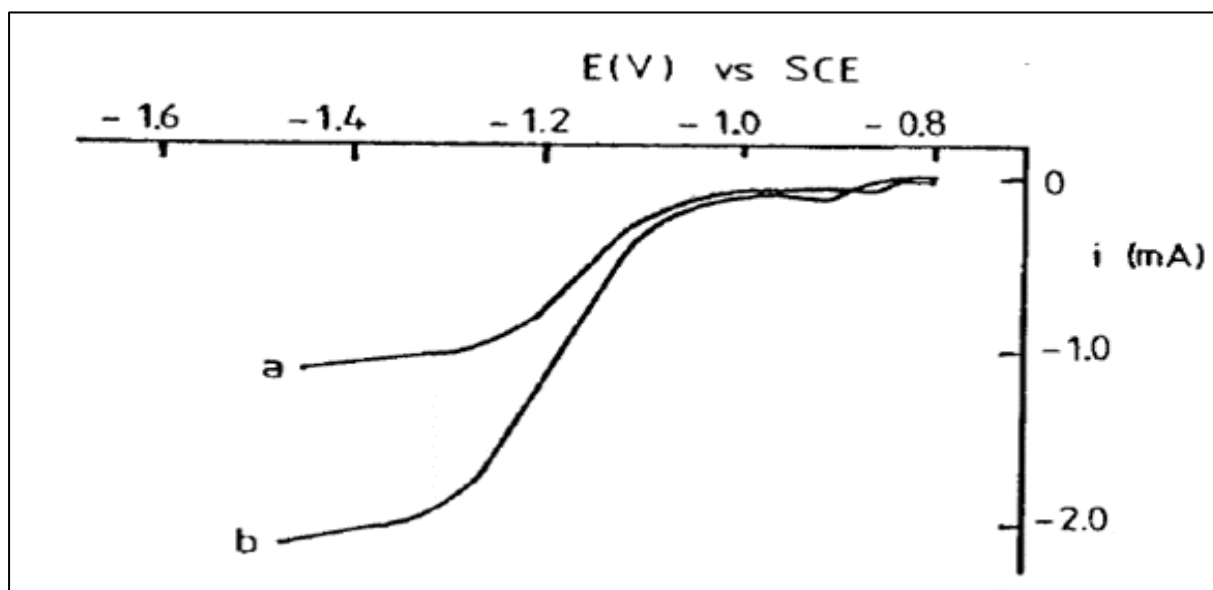
parámetros permite mejorar la eficiencia y calidad del proceso de electrodeposición del oro. (Morales , 2003)

Concentración de oro

La concentración de oro desempeña un papel fundamental en la velocidad de deposición, como se observa en las curvas de corriente-potencial. La figura 20 muestra que, al duplicar la concentración de oro, la corriente limitante también se duplica. Esto indica una relación directa entre la cantidad de oro en solución y la tasa de deposición, lo que sugiere que el proceso está controlado por la disponibilidad del metal en el medio electrolítico. (Marsden & Lain House, 2006).

Figura 20

Curva corriente – potencial mostrando el efecto de concentración de oro.



Nota. Extraído del (Marsden & Lain House, 2006)

Hidrodinámica del electrolito

Un mejor transporte de masa de las especies de la solución depende un alto grado de mezcla en el electrolito y en consecuencia la velocidad de deposición del oro. La hidrodinámica está determinada por la estructura del electrodo, de su configuración y diseño de la celda, como también del flujo del caudal en la solución. (Marsden & Lain House, 2006)

Temperatura

Según Morales, (2003). A altas temperaturas el electrolito tiene varios beneficios en electro depositar al oro como:

- Se incrementa la difusión en la solución de cianuro con oro.
- Aumento de conductividad
- Se reduce el oxígeno en el cátodo.

Área superficial del cátodo.

Para una eficiencia de la electrodeposición el área superficial del cátodo es de una importancia ya que maximiza la eficiencia de la celda, incrementa la velocidad de reducción de agua y oxígeno en el cátodo, cantidad de oro depositado aumenta. (Marsden & Lain House, 2006)

Voltaje de celda

La aplicación del voltaje y la corriente en una celda electroquímica depende en gran medida de su diseño y de las características de la solución electrolítica. Para lograr una recuperación eficiente del oro, es fundamental considerar factores como el pH, la conductividad, la temperatura y las concentraciones iónicas. En celdas utilizadas a nivel industrial, el voltaje de operación suele encontrarse en un rango de 2 a 4 V. (Marsden & House, 2006).

Corriente de la celda y eficiencia de corriente

A medida que la corriente aplicada aumenta, la velocidad de deposición del oro también se incrementa. Sin embargo, el exceso de electricidad se consume en reacciones secundarias, como la reducción del hidrógeno, el agua, el oxígeno y otros metales presentes en la solución. En aplicaciones industriales, la corriente utilizada suele oscilar entre 200 y 800 A, mientras que la eficiencia de corriente es aproximadamente del 2.8%, dependiendo de la configuración de la celda. (Morales , 2003)

Densidad de corriente

La densidad de corriente se define como la cantidad de corriente eléctrica aplicada por unidad de área, generalmente expresada en amperios por decímetro cuadrado (A/dm²). Este parámetro es fundamental en los procesos de electrodeposición, ya que permite determinar la corriente óptima en función del área de la pieza a recubrir y del tipo de baño electrolítico empleado. Con esta información, y mediante tablas de referencia, es posible calcular tanto el peso de la capa depositada como el tiempo necesario para alcanzar un espesor específico en el recubrimiento (Panchi, 2009).

Donde:

$$i = \frac{I}{A}$$

i= Densidad de corriente, A/dm²

I= Corriente eléctrica, A

A= Área de la superficie, dm²

Conductividad de la solución.

La conductividad de la solución es un factor clave en la reducción del potencial dentro de la celda electroquímica. Una mayor conductividad favorece el flujo de corriente, lo que disminuye las pérdidas de energía eléctrica en la solución. Para optimizar la conductividad, se suelen añadir electrolitos como el hidróxido de sodio (NaOH), que mejora la eficiencia del proceso electroquímico al reducir la resistencia interna del sistema (Marsden & House, 2006).

pH.

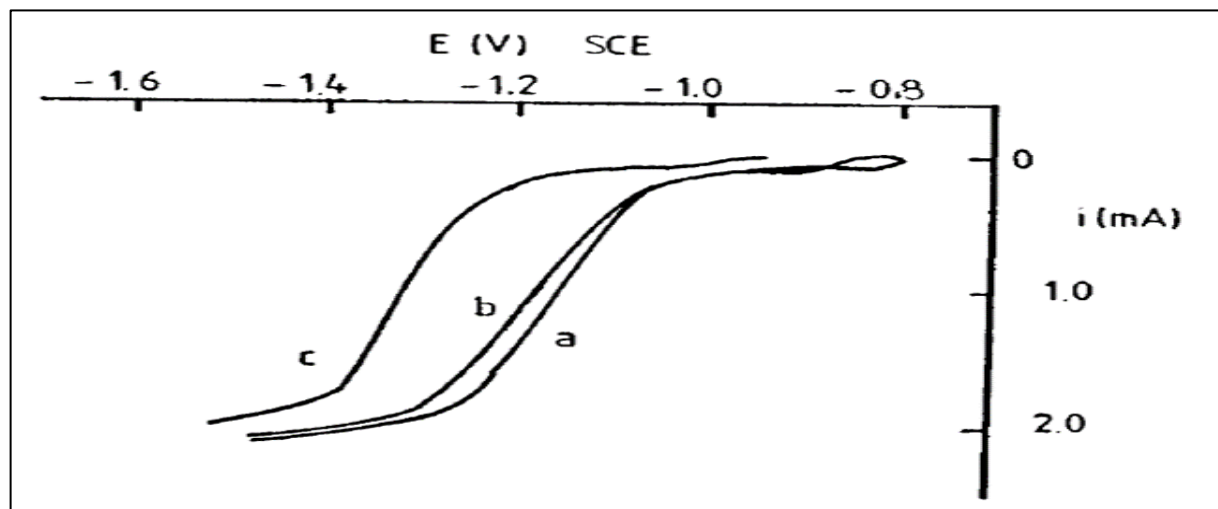
El control de pH es de suma importancia en una celda para la estabilidad del electrodo y esta va depender mucho del material de fabricación de ánodo y cátodo. Cuando las celdas comerciales usan ánodos de acero inoxidable en la cual se corroe en un pH de 12.5. para eficiencia de deposición el pH tiende a ser alcalino. (Marsden & Lain House, 2006)

Concentración de cianuro.

La concentración de cianuro influye significativamente en la curva de corriente-potencial durante el proceso de electrodeposición del oro. Como se observa en la figura 21, un potencial de 0.2 V puede provocar un incremento de hasta diez veces en la concentración de oro disponible para la deposición. Por ejemplo, al aumentar la concentración de NaCN de 5 g/L a 50 g/L, favorece la solubilización del oro y se modifica la cinética del proceso, lo que impacta la eficiencia del recubrimiento.

Figura 21

curva corriente – potencial mostrando el efecto de concentración de cianuro.



Nota. Obtenido del (Marsden & Lain House, 2006)

Efecto de otras especies en la solución

En los electrolitos de oro, suelen estar presentes iones de sulfuro en bajas concentraciones. Estos iones son oxidados en el ánodo, formando polisulfuros, los cuales se desplazan hacia el cátodo. En esta zona, los polisulfuros reaccionan con los depósitos de oro, generando complejos estables que pueden afectar la eficiencia y uniformidad del recubrimiento. (Morales , 2003)

2.2.21. Electrolisis

La electrólisis es un proceso electroquímico que ocurre cuando se aplica una corriente eléctrica a un electrolito que contiene electrodos. Durante este proceso, el metal puede disolverse desde los ánodos, o bien, el oxígeno liberarse en su superficie. Simultáneamente, en los cátodos, el metal se deposita o el hidrógeno se reduce, dependiendo de las condiciones del sistema y la naturaleza del electrolito. (Domic Mihovilovic, 2001).

2.2.22. Tipos de celda de electrodeposición

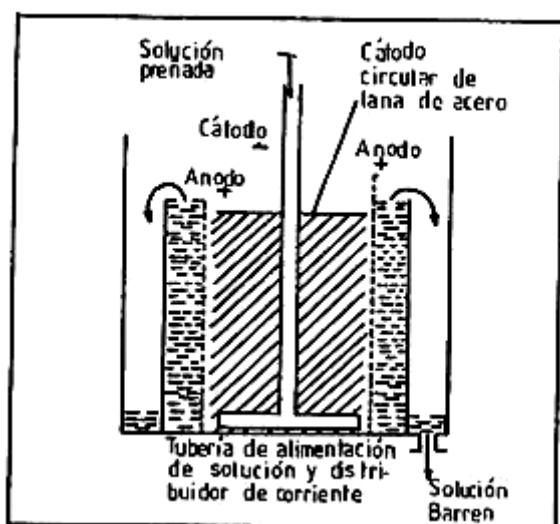
En la recuperación electrolítica de oro a partir de soluciones cianuradas (electrowinning), se han empleado principalmente cuatro tipos de celdas: la celda AARL, la celda Zadra, la celda de grafito NIM y la celda con lana de acero (MINTEK). Cada una de estas celdas presenta características y eficiencias distintas, dependiendo de las condiciones operativas y los requerimientos del proceso. (Marsden & House, 2006).

2.2.22.1. Celda ZADRA

Este tipo de celda se compone de un cátodo circular desmontable con compartimentos llenos de lana de acero, situado en el interior del ánodo circular con malla de acero inoxidable, tal como se visualiza en la figura 22. El electrolito es bombeado hacia el interior de la celda por la base, por un conducto y el electrolito fluirá en dirección horizontal, pasando la lana de acero que comparte con el ánodo, al final desborda en la parte superior. (Tomala, 1998)

Figura 22

Tipo de celda Zadra



Nota. extraído de (Tomala, 1998)

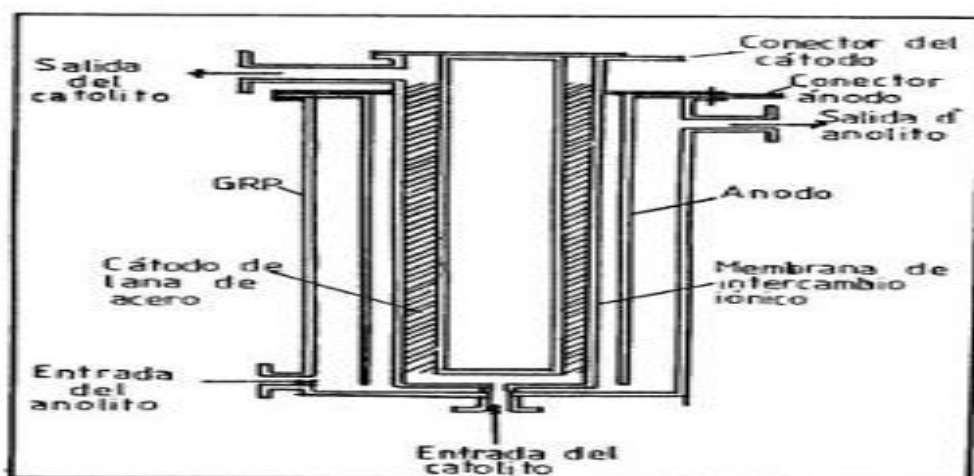
2.2.22.2. Celda AARL

La celda Anglo American Research Laboratory (AARL) es una mejora del diseño de la celda Zadra, con modificaciones en la distribución de los electrodos y el uso de una membrana catiónica Du Pont "Nafion". En esta configuración, los electrodos están separados por la membrana, lo que permite un mejor control del proceso electroquímico, como se muestra en la figura 23.

El electrolito utilizado en esta celda es una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración entre el 10 % y el 20 %. La membrana catiónica es expansible y opera a una temperatura de 850 °C, aumentando significativamente su volumen cuando se humedece, lo que influye en su rendimiento y estabilidad dentro del sistema.

Figura 23

Esquema de celda electrolítica AARL.



Nota. Obtenido (Tomala, 1998)

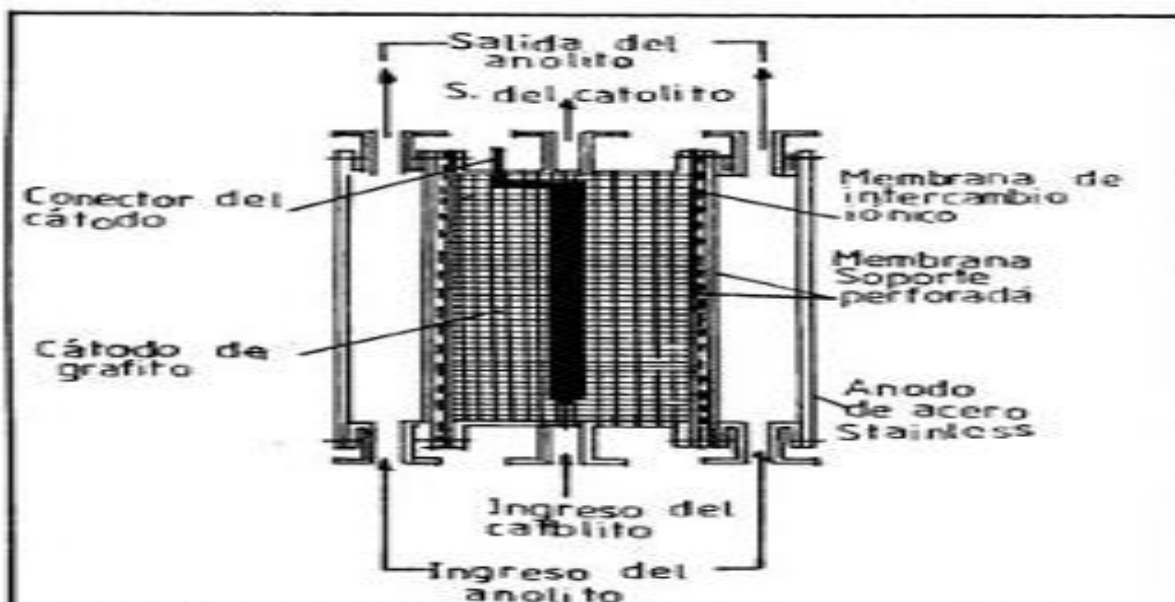
2.2.22.3. Celda de GRAFITO NIM

En la figura 24, se ilustra la celda de grafito NIM, que posee un diseño tipo sándwich, en el cual un cátodo rectangular se encuentra ubicado en el centro, rodeado por compartimientos

rellenos de gránulos de grafito. Estos compartimientos están separados del ánodo mediante membranas catiónicas, ubicadas en el lado opuesto. Esta configuración permite mejorar la eficiencia del proceso electroquímico al optimizar la distribución de corriente y minimizar la interferencia de reacciones secundarias. (Marsden & House, 2006).

Figura 24

Esquema de celda de grafito NIM.



Nota. Extraído de (Tomala, 1998)

El contacto eléctrico con el compartimiento del cátodo se realiza mediante un rodillo de acero presionado sobre la cama de grafito. Al catolito lo bombean desde la interior celda que expulsa por un orificio de la parte superior. El anolito está compuesto por una solución al 10 % de soda cáustica, que se recircula de manera continua a través de cada compartimiento del ánodo. Estas celdas generalmente operan de manera cíclica. La etapa primaria, el oro presenta diluido que transfiere al cátodo, produciendo un residuo. Una vez que se ha cargado suficiente oro, se invierte la polarización de la celda, el oro se extrae de los ánodos de grafito de la solución con cianuro de potasio como hidróxido de potasio. En la siguiente etapa, se deposita sobre láminas de metal inicial

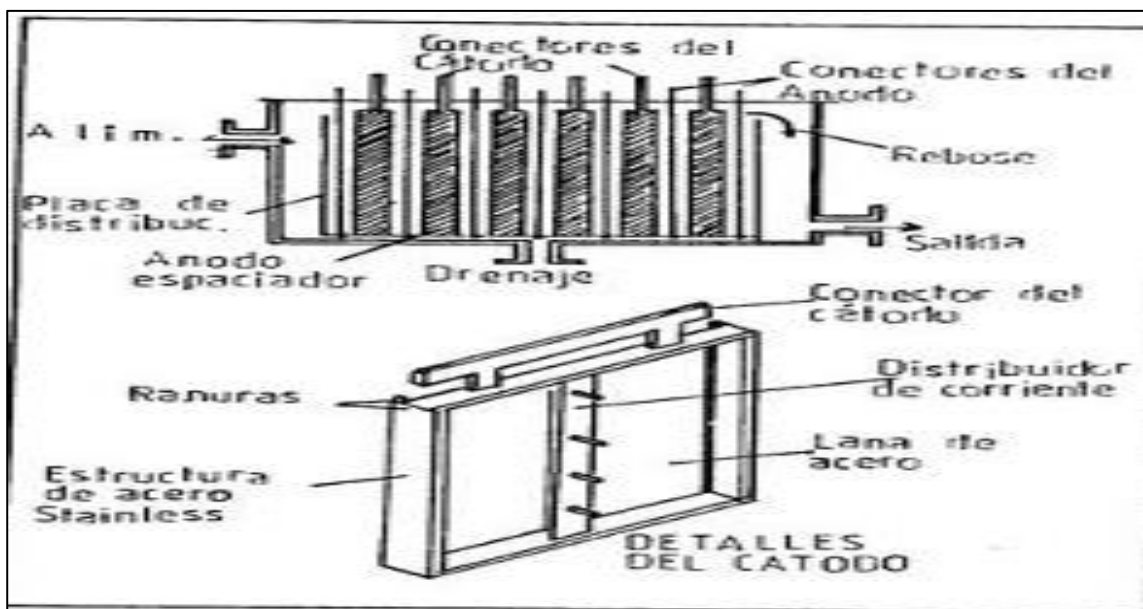
a partir de esta solución, de las cuales puede ser recuperado mecánicamente. Esta tercera etapa se lleva a cabo en una pequeña celda de recubrimiento y normalmente se realiza al mismo tiempo al de otras etapas.

2.2.22.4. Celda de lana de acero MINTEK

La celda diseñada por Mintek (Paúl, 1983) está compuesta por un tanque rectangular de acero inoxidable que contiene 6 cátodos tipo canasta y 7 ánodos. El cátodo está fabricado en polipropileno rellenos, entre 500 y 1000 gramos de lana de acero. En tanto, el ánodo está hecho de acero inoxidable tipo #316. El electrolito fluye de un extremo del ánodo, atravesando alternadamente a los electrodos hasta llegar al otro extremo, como se observa en la figura 25.

Figura 25

Esquema de la celda de lana de acero MINTEK.



Nota. Obtenido del (Tomala, 1998)

2.2.23. Rectificador de corriente

Un rectificador de corriente transforma la corriente alterna a corriente continua. Para Panchi (2009), un rectificador de corriente está formado por:

- Un transformador principal de corriente, que transforma la corriente eléctrica alterna de 110, 220 o 380 voltios de tensión en corriente alterna de baja tensión de 2, 4, 6, 8, 12, ... voltios.
- Células rectificadoras, que tienen por misión transformar la corriente alterna a baja tensión regulada, en corriente continua a baja tensión regulada. La calidad de la corriente continua dependerá del diseño del rectificador.
- Los aparatos de medida: amperímetro y voltímetro. Es importante que estos elementos tengan una amplia escala de lectura, y una precisión tal que nos de seguridad de los datos obtenidos.
- Los dispositivos de mando y protección. El mando se efectuará por medio de un botón pulsador de mando, que por intermedio de un fusible permita a la corriente eléctrica llegar al transformador.
- Las pletinas y cableado. Todos estos elementos deben estar correctamente aislados y conectados.

CAPÍTULO III

3. HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis General*

El método de electrodeposición directa logra recuperar más del 85% del oro de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación, lo que resalta la eficacia y viabilidad de este método en la extracción del metal precioso de la planta Nueva Bonanza- Caraveli- Arequipa.

3.1.2. *Hipótesis Específica*

- El potencial eléctrico requerido es de 3 V, lo que permite lograr la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación.
- La recuperación de oro es mejor al incrementar el tiempo de electrodeposición directa de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación, hasta alcanzar un tiempo ideal en el que se maximiza la eficiencia del proceso.
- La concentración óptima de oro para lograr la recuperación por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación en la planta nueva Bonanza es de 72.30 mg/L de oro.

3.2. Variables e indicadores

3.2.1. Variable Dependiente

PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE ORO

3.2.2. Variables Independientes

- ✓ Potencial eléctrico.
- ✓ Tiempo de electrodeposición.
- ✓ Concentración de oro.

3.2.3. Indicadores

- Nivel de alcalinidad (pH)
- Tipo y dimensiones del cátodo.
- Concentración de cianuro de sodio.
- Potencial catódico.

3.2.4. Operacionalización de variables

Tabla 3

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Dimensión	Rango/ Niveles	Indicador	Unidad	Instrumento de medición
VARIABLE DEPENDIENTE						
RECUPERACIÓN DE ORO	Es la cantidad de oro recuperado en relación con la cantidad total de oro presente en la concentración de la solución.	cálculo de la cantidad de recuperación de oro	70 - 95	Porcentaje	%	<ul style="list-style-type: none"> • Balance metalúrgico (Excel) • Análisis químico por absorción atómica.
VARIABLES INDEPENDIENTES						
Potencial eléctrico	Es una magnitud escalar que mide la energía potencial por unidad de carga en un punto específico de un campo eléctrico; representa el trabajo necesario para mover una carga.	El voltaje se cuantifica utilizando un multímetro.	2.3V – 3.0V	Voltaje	v	Multímetro
Tiempo de electrodeposición.	Es el periodo en el que se aplica una corriente eléctrica a una solución que contiene un metal, con el fin de depositarlo sobre una superficie conductora.	Se controla el tiempo de electrodeposición mediante un cronometro.	1.5hr – 2.5hr	Horas	hr	Cronometro
Concentración de oro	Se refiere a la cantidad de oro presente en una solución diluida.	Se expresa en unidades de miligramos por litro	12.65 – 72.30	Miligramos/litro	Mg/L	Análisis químico

Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGÍA

4.1. Ámbito del estudio

La localización del estudio de la planta Nueva Bonanza SMRL se encuentra en la quebrada Seca: Ático - Caravelí - Arequipa, a una altitud de los 2,400 metros sobre el nivel del mar.

La accesibilidad desde la ciudad de Arequipa, ubicada a 317 kilómetros de distancia. Desde Ático, se continúa por una carretera de aproximadamente 40 kilómetros hasta llegar al cruce de acceso a la planta, como se muestra en la figura 26.

Figura 26

Localización de la planta Nueva Bonanza



Nota. Obtenido de Googlemaps. Ubicación de la mina Nueva Bonanza.

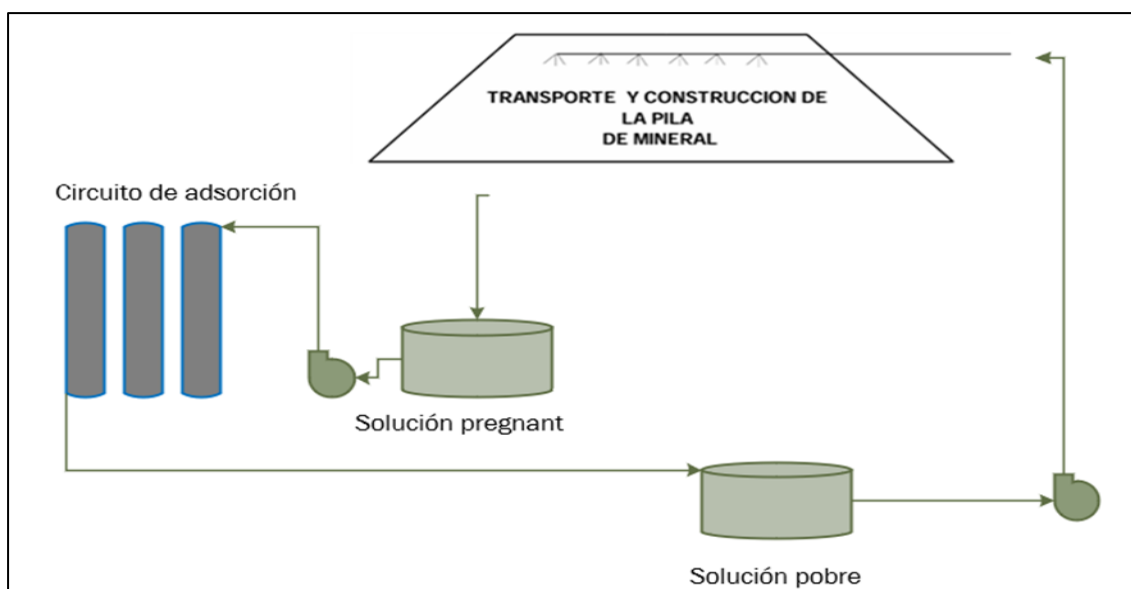
Procedimiento del proceso de la planta

Las características mineralógicas de la zona están dominadas principalmente por minerales auríferos, que provienen de diversos niveles de explotación. Estos minerales son procesados por la misma empresa, en colaboración con micro contratistas y mineros artesanales. El oro se presenta en forma de finos granos, con contenidos metálicos que varían entre 1 g/t y 22 g/t; sin embargo, en algunos casos se pueden encontrar con leyes superiores.

La recepción del mineral se lleva a cabo por lotes, conforme a su llegada a la planta, y posteriormente se prepara para la lixiviación en pilas, las cuales varían en capacidad según el tonelaje de cada lote. Durante este proceso, se monitorean y ajustan parámetros operativos clave, como la concentración de cianuro y el pH, para maximizar la eficiencia en la extracción del metal. En la figura 27, se observa el diagrama de flujo de todo lo mencionado anteriormente.

Figura 27

Diagrama de flujo de la planta de lixiviación en pilas.



Nota. Circuito de lixiviación en pilas de la planta Nueva Bonanza.

4.2. Tipo de Investigación

Este trabajo de investigación es de carácter tecnológico y experimental. Se fundamenta en conocimientos teóricos para su aplicación práctica y el desarrollo de pruebas metalúrgicas para la recuperación de oro por electrodeposición.

Según Arias Odón (2017), “la investigación tecnológica se caracteriza por la búsqueda y adquisición de nuevos conocimientos prácticos y aplicables en el diseño, fabricación o avance de productos y servicios innovadores, así como la creación de nuevos materiales, prototipos, maquinaria o procesos que ayuden a la resolución de problemas, satisfacción de necesidades y mejora de la calidad de vida de la sociedad”. (p.72).

La investigación experimental “se caracteriza por la manipulación de la variable independiente por parte del investigador, quien aplica diversos tratamientos o estímulos para alterar la realidad con el fin de observar los efectos resultantes sobre la variable dependiente. Este enfoque permite establecer una relación causa-efecto.” (Arias Odón, 2017, p. 26)

4.3. Nivel de investigación

El estudio tiene un nivel de investigación explicativo, en donde se examinan las interacciones entre las variables, lo que permite comprender en detalle cómo cada una influye en el porcentaje de extracción de oro. Además, se lleva a cabo un análisis predictivo utilizando herramientas estadísticas y matemáticas para anticipar el comportamiento del proceso en distintas condiciones. (Hernandez Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

Nivel Explicativo: Este tipo de estudios buscan establecer relaciones de causalidad. Sin embargo, la estadística por sí sola no es suficiente para alcanzar sus objetivos, lo que lleva a la

incorporación del concepto de “criterios de causalidad”. En este contexto, el experimento se considera el criterio más relevante, aunque no es imprescindible para llegar a conclusiones. Desde una perspectiva analítica, estos estudios describen el comportamiento de una variable dependiente en función de variables independientes, pero requieren un control riguroso. El propósito del control es eliminar asociaciones aleatorias, casuales o espurias, y distinguir las de relaciones causales genuinas, algo que no es posible lograr en los estudios relacionales.

4.4. Método de investigación

La metodología que se aplicará en este proyecto de investigación consiste en:

a. **Análisis y síntesis:** Fase en la que se examinan tanto los conocimientos teóricos como empíricos que el investigador poseerá durante la investigación, y se realiza una síntesis para identificar posibles soluciones.

b. **Inducción y deducción:** Incluye la recolección de información confiable y antecedentes de estudios similares, con el fin de establecer relaciones entre nuestro trabajo y otros previos, lo que permitirá obtener conclusiones.

c. **Experimental y estadístico:** En esta etapa se realizarán pruebas en laboratorio, seguidas de un análisis basado en métodos estadísticos.

La ejecución y el progreso de este proyecto de investigación siguió un enfoque experimental. Esto implica llevar a cabo pruebas experimentales según el método científico, dentro de los procesos hidrometalúrgicos de cianuración y electrodeposición, con el propósito de extraer oro. (Hernandez Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

CAUSA — EFECTO

Donde:

X: variable independiente, la cual es manipulada.

Y: variable dependiente.

4.5. Diseño de investigación

La investigación se realiza mediante un diseño experimental, ya que busca obtener resultados a través del control, el muestreo y la observación de las variables estudiadas. En el proceso experimental, se manipulan diversas variables independientes con el propósito de regular su aumento o disminución y analizar los efectos resultantes.

El presente estudio empleará un diseño factorial (2^k), lo que nos permitirá identificar la relación entre las variables dependientes (porcentaje de recuperación de oro) e independientes (potencial eléctrico, tiempo de electrodeposición y concentración de oro).

a) Variable dependiente

- porcentaje de recuperación

b) Variable independiente

- Potencial eléctrico
- Tiempo de electrodeposición.
- Concentración de oro|

El diseño factorial se realiza con tres variables para analizar el porcentaje de recuperación del oro. $N = 2^K$

Donde: N= número de experimentos

K= número de variables

Entonces, de acuerdo con la formula, se tiene: $N=2^3=8$. Este valor indica que se deben realizar 8 pruebas y 3 pruebas para evaluar el efecto de la curvatura

Tabla 4

Niveles de las variables

Variables	Mínimos	Máximos
Potencial eléctrico	-1	1
Tiempo de electrodeposición	-1	1
Concentración de oro	-1	1

Nota. Obtenido de (Marsden & Lain House, 2006)

Tabla 5

Matriz del diseño factorial para la recuperación de oro.

N°	potencial eléctrico	Tiempo de electrodeposición	Concentración de oro	% de recuperación de oro (Y)
1	-1	-1	-1	Y ₁
2	1	-1	-1	Y ₂
3	-1	1	-1	Y ₃
4	1	1	-1	Y ₄
5	-1	-1	1	Y ₅
6	1	-1	1	Y ₆
7	-1	1	1	Y ₇
8	1	1	1	Y ₈
9	0	0	0	Y ₉
10	0	0	0	Y ₁₀
11	0	0	0	Y ₁₁

Nota. Obtenido del (Marsden & Lain House, 2006)

4.6. Población y muestra

4.6.1. Población de estudio

El presente trabajo de investigación estará constituido con las soluciones cianuradas del mineral aurífero de la planta Nueva Bonanza, provincia de Caraveli, departamentos de Arequipa.

4.6.2. Muestra de estudio

Para llevar a cabo los experimentos de las pruebas del proyecto de investigación, se emplearon 70 litros de solución cianurada de oro.

4.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.7.1. Técnicas de recolección de datos

- La técnica más adecuada para la recolección de datos es la observación sistemática, que permitirá analizar y estudiar los diversos documentos que contienen información relacionada con el tema de investigación.
- Se realizaron pruebas metalúrgicas en el laboratorio, donde se controlaron las distintas variables independientes, logrando así recuperar oro de manera óptima por electrodeposición de soluciones cianuradas.
- Se realizó la recopilación exhaustiva de información bibliográfica.
- Los resultados serán verificados mediante reporte de análisis químico de laboratorios certificados.

4.7.2. Instrumentos de recolección de datos

- Se utilizaron fuentes como bibliografía, catálogos, artículos científicos, tesis y revistas, entre otros.
- Para analizar los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio, se utilizó el software MINITAB 19.

4.8. Validez y confiabilidad de instrumentos

Para llevar a cabo las pruebas metalúrgicas del presente trabajo de investigación, se diseñó y se construyó todo el circuito de electrodeposición. La experimentación con equipos propios se desarrolló en los laboratorios de Electrometalurgia e Hidrometalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

4.9. Viabilidad

Se dispone de los medios y recursos esenciales para llevar a cabo las pruebas experimentales de recuperación de oro por electrodeposición.

4.10. Plan de análisis de datos

En este estudio se utilizaron métodos de recopilación de datos anteriores del diseño experimental, y posteriormente se realizó un análisis estadístico:

- Vínculo bibliográfico.
- Observación durante el estudio para entender los datos.
- Conformidad con los resultados obtenidos.

CAPITULO V

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1. Desarrollo del proyecto de investigación

Para iniciar las pruebas experimentales, se llevó a cabo un análisis preliminar, a partir del cual se desarrolló un programa para la fabricación de la celda de electrodeposición. El procedimiento experimental consta de los siguientes pasos:

- Determinación de las dimensiones del equipo.
- Diseño de los planos utilizando el programa SolidWorks.
- Selección de los materiales y herramientas necesarias para la fabricación.
- Montaje de las piezas de la celda.
- Ensamblaje final del circuito operativo.

5.2. Proceso de construcción de la celda de electrodeposición

5.2.1. *Determinación de los parámetros de diseño de la celda*

Desde un enfoque crítico de un análisis previo y considerando la flexibilidad en su uso, se propone crear una celda de tipo rectangular por su diseño y construcción simple. Esta celda incluirá electrodos de ánodo y cátodo, así como una varilla de cobre para garantizar una distribución uniforme de energía eléctrica, lo que facilitará el intercambio iónico del metal. En tanto se fijan las siguientes características principales para su diseño:

- Volumen de la celda

- Geometría de la celda
- Caudal de la solución

Las referencias mencionadas constituyen la base de la celda y son requisitos esenciales para garantizar su funcionalidad según el diseño. Además, se deben considerar las siguientes condiciones:

- Facilidad de manejo, operación y mantenimiento.
- Sencillez de uso en laboratorios y entornos industriales.
- Versatilidad para adaptarse a diversos procesos de electro síntesis.
- Fiabilidad operativa garantizada, considerando espacio y tiempo de funcionamiento.

5.2.2. Cálculo de las dimensiones del diseño de la celda.

Diseño de la celda

La celda tendrá las siguientes medidas:

- Largo = 30 cm
- Ancho = 15 cm
- Altura = 15 cm

Volumen de la celda

$$V = l \times a \times h$$

En donde:

V= volumen

l=largo

a=ancho

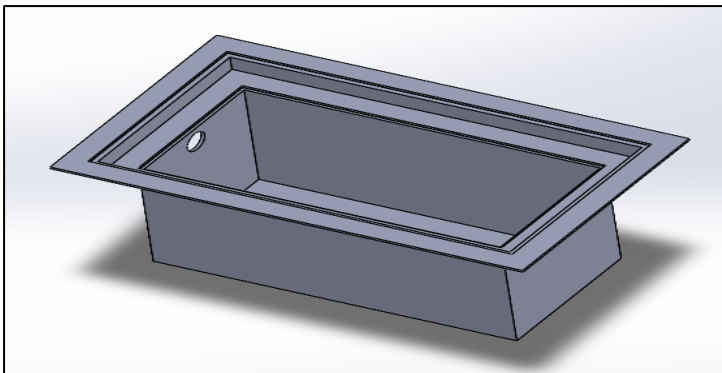
h=altura

$$V = 30\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$$

$$V = 6750\text{cm}^3$$

Figura 28

Diseño de la celda electrolítica.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks)

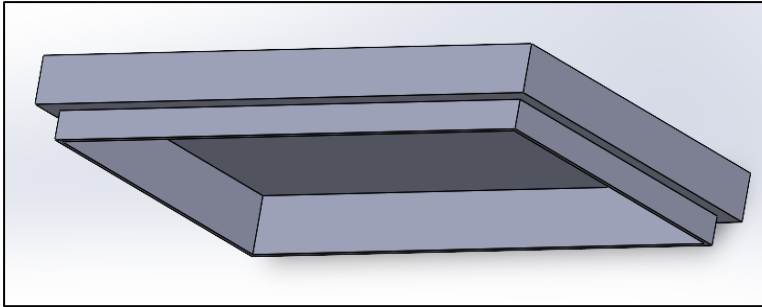
Diseño de la tapa de la celda

La tapa tendrá las siguientes medidas

- Largo= 35 cm
- Ancho = 20 cm
- Espesor = 0.3cm
- Tendrá una dobléz de 3 cm

Figura 29

Diseño de la tapa de la celda



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks)

Diseño del ánodo

El ánodo tendrá las siguientes medidas

- Largo = 12 cm
- Ancho = 12 cm
- Espesor = 0.3 cm

Área del ánodo

$$A = l \times a$$

En donde:

A = área

l= largo

a= ancho

$$A = 12\text{cm} \times 12\text{cm} = 144\text{cm}^2$$

Volumen del ánodo

$$V = l \times a \times e$$

En donde:

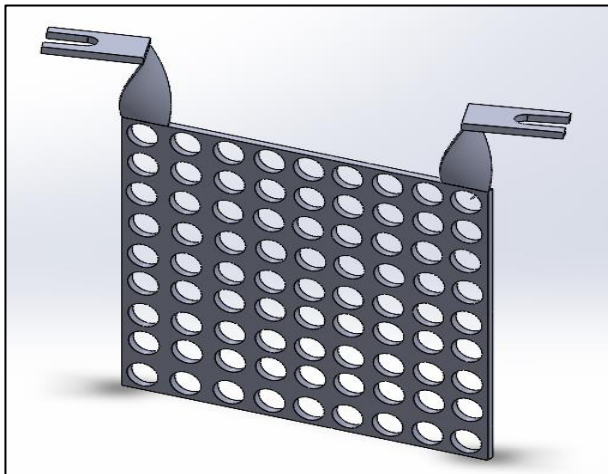
- V = volumen
- L = largo
- A = ancho
- E = espesor

$$V = 12\text{cm} \times 12\text{cm} \times 0.3\text{cm}$$

$$V = 43.2\text{cm}^3$$

Figura 30

Diseño de ánodo



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks).

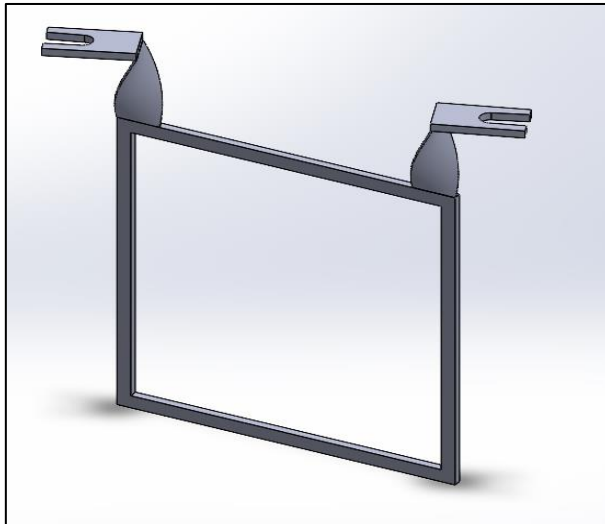
Diseño del cátodo

Dimensiones del cátodo

- Largo: 12 cm
- Altura: 12 cm
- Espesor: 0.3 cm

Figura 31

Diseño del cátodo.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks)

Diseño de tanque barren

Dimensiones

- Altura: 12cm
- Diámetro: 10cm
- Radio: 5cm

Área

$$A = \pi r^2$$

En donde

A = área

r= radio

$$A = \pi(5cm)^2$$

$$A = 78.54cm^2$$

Volumen

$$V = \pi r^2 h$$

Donde:

h= altura

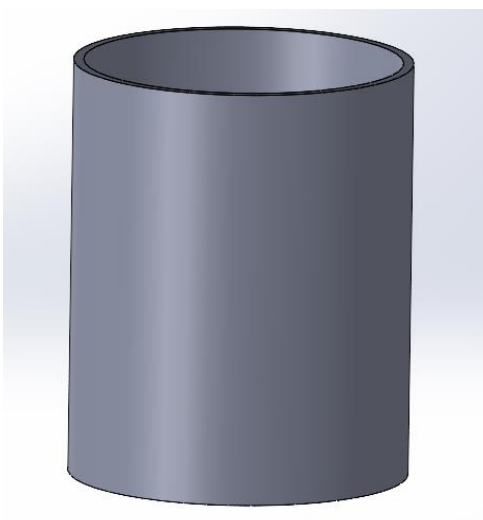
r = radio

$$V = 3.1415 \times 5cm^2 \times 12cm$$

$$V = 188.5cm^3$$

Figura 32

Diseño del tanque barren.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks).

Diseño de la varilla

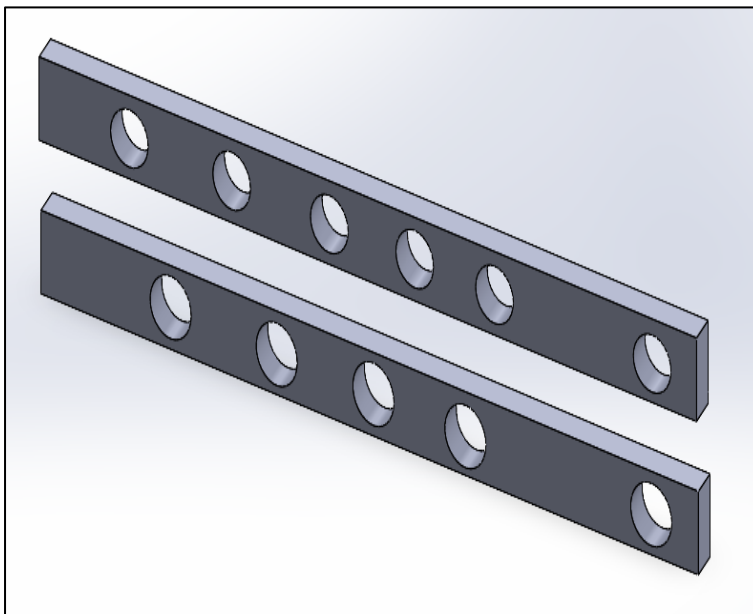
Dimensiones

- Largo: 30 cm
- Ancho: 2.5 cm
- Espesor: 1 cm

Se le harán agujeros

Figura 33

Diseño de varillas

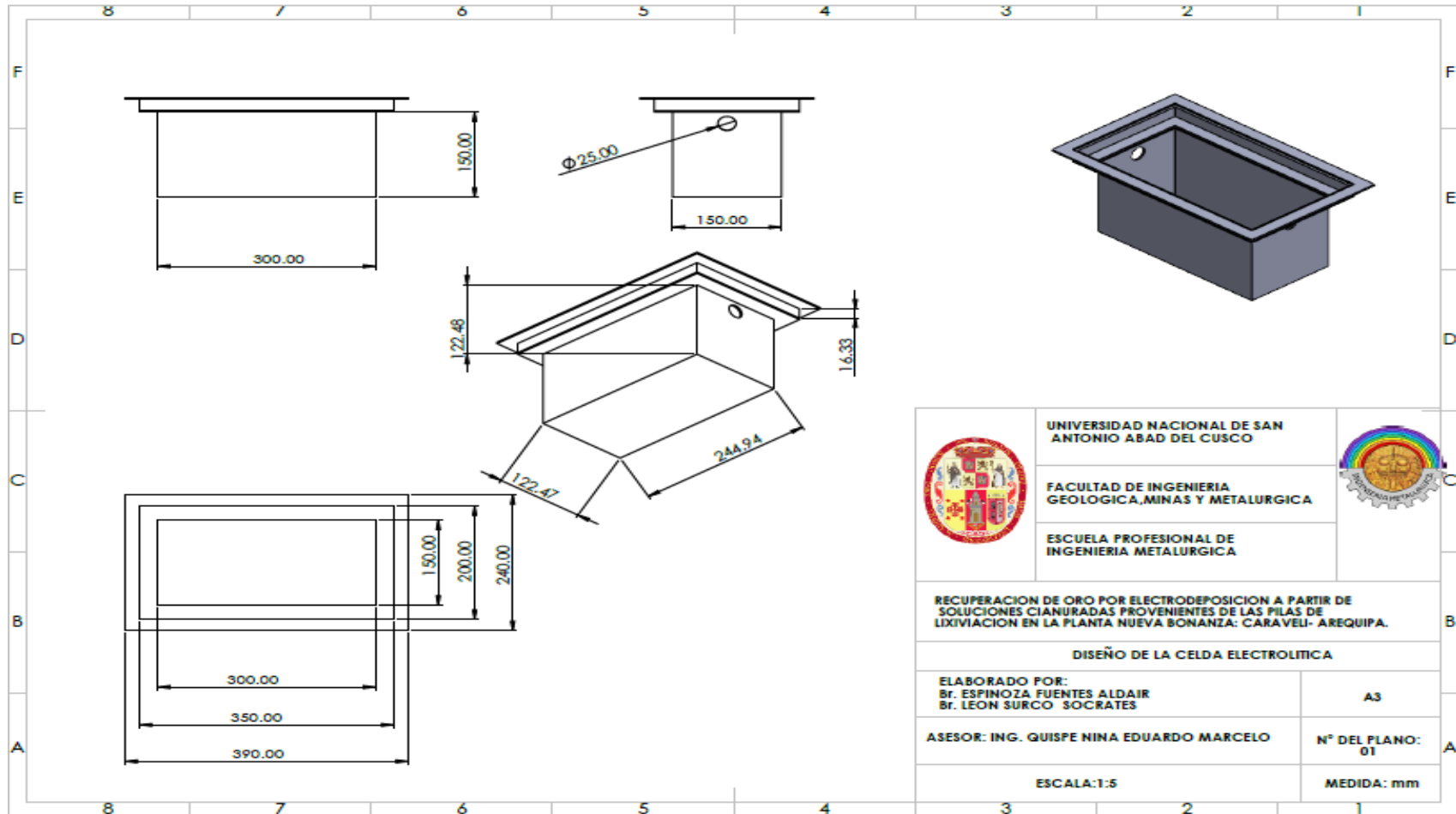


Nota. Elaboración propia (software SolidWorks).

1.1.1. Diseño de planos digitales mediante el uso del programa SolidWorks

Figura 34

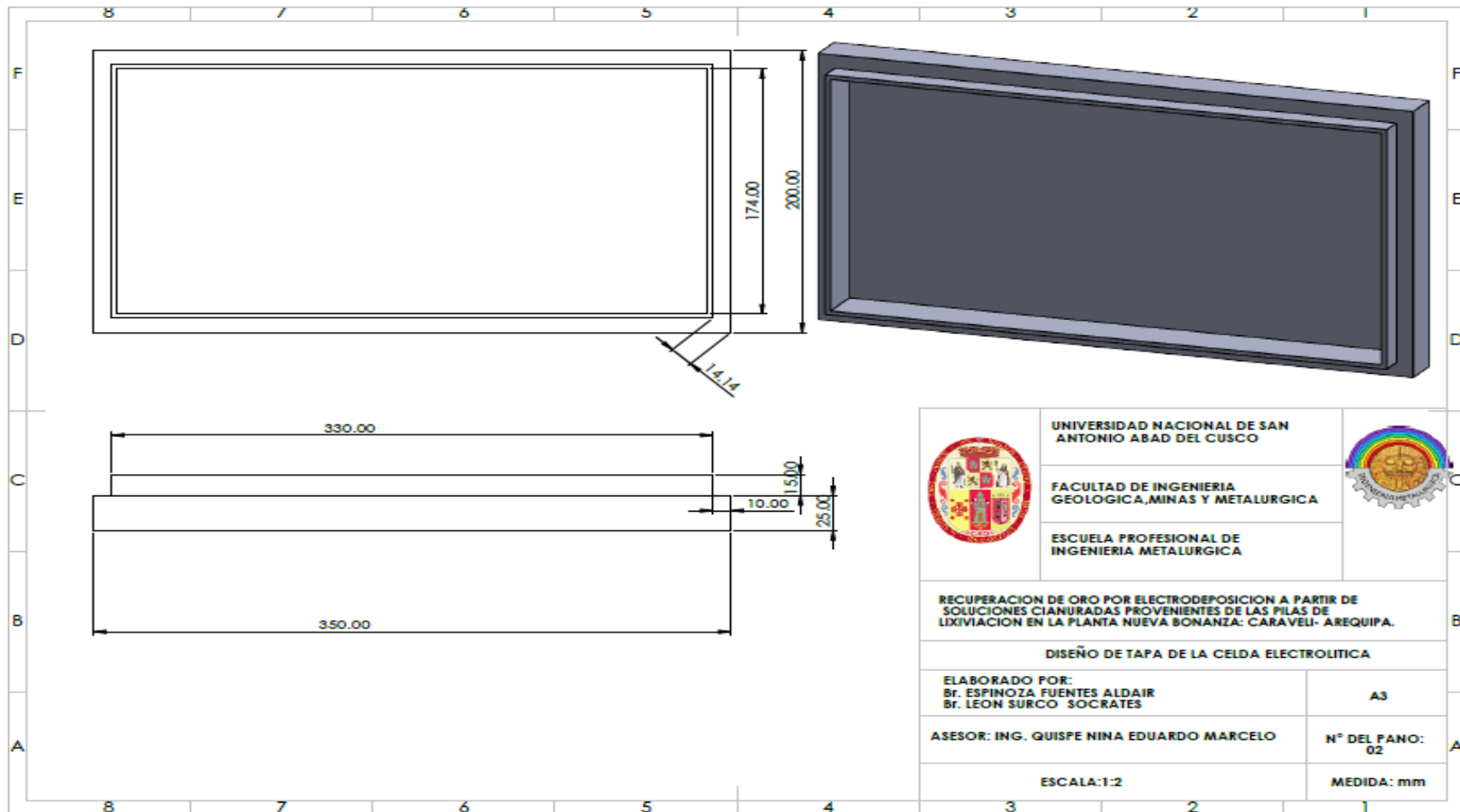
Plano de diseño de la celda electrolítica.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks)

Figura 35

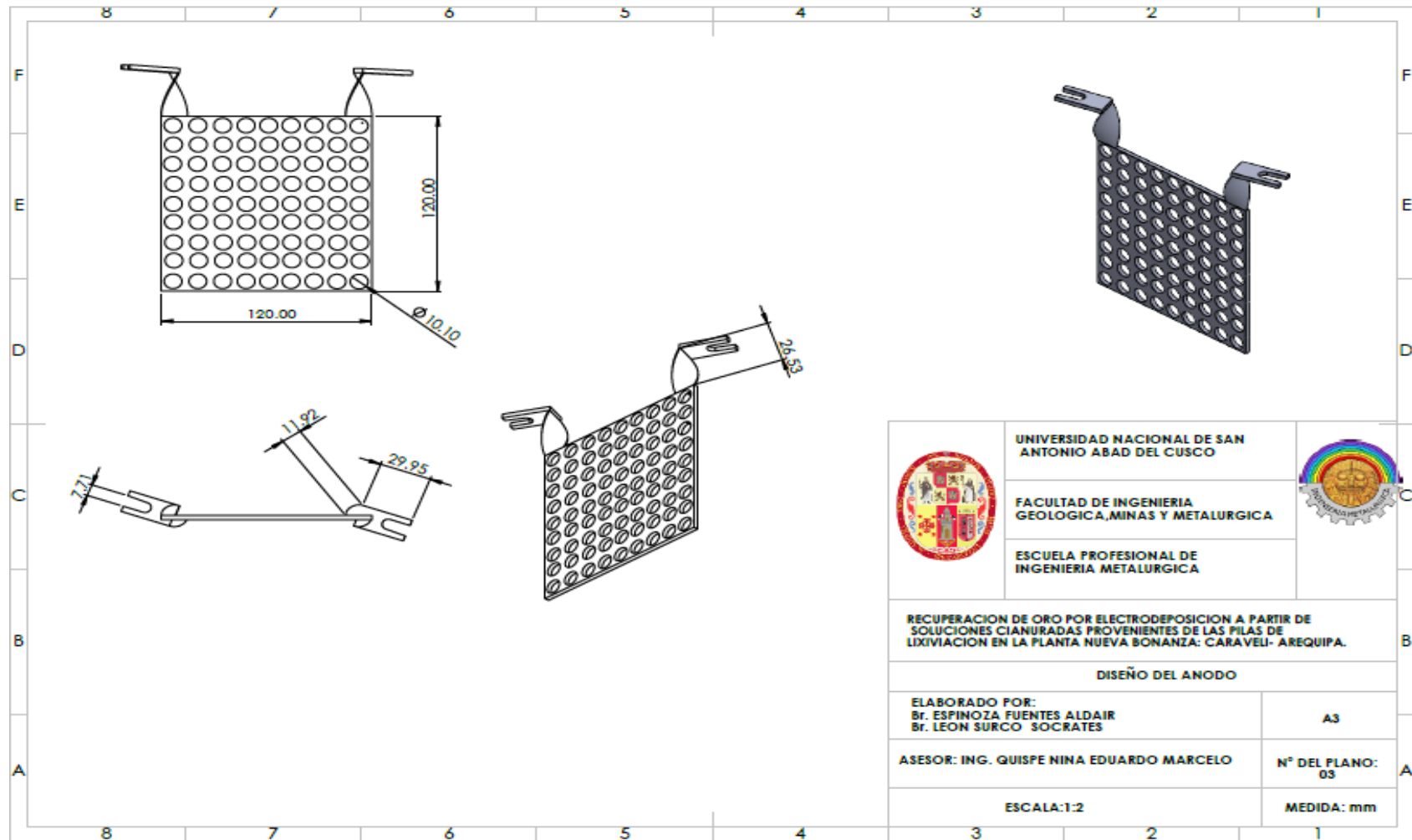
Plano de diseño de la tapa de la celda electrolítica.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks).

Figura 36

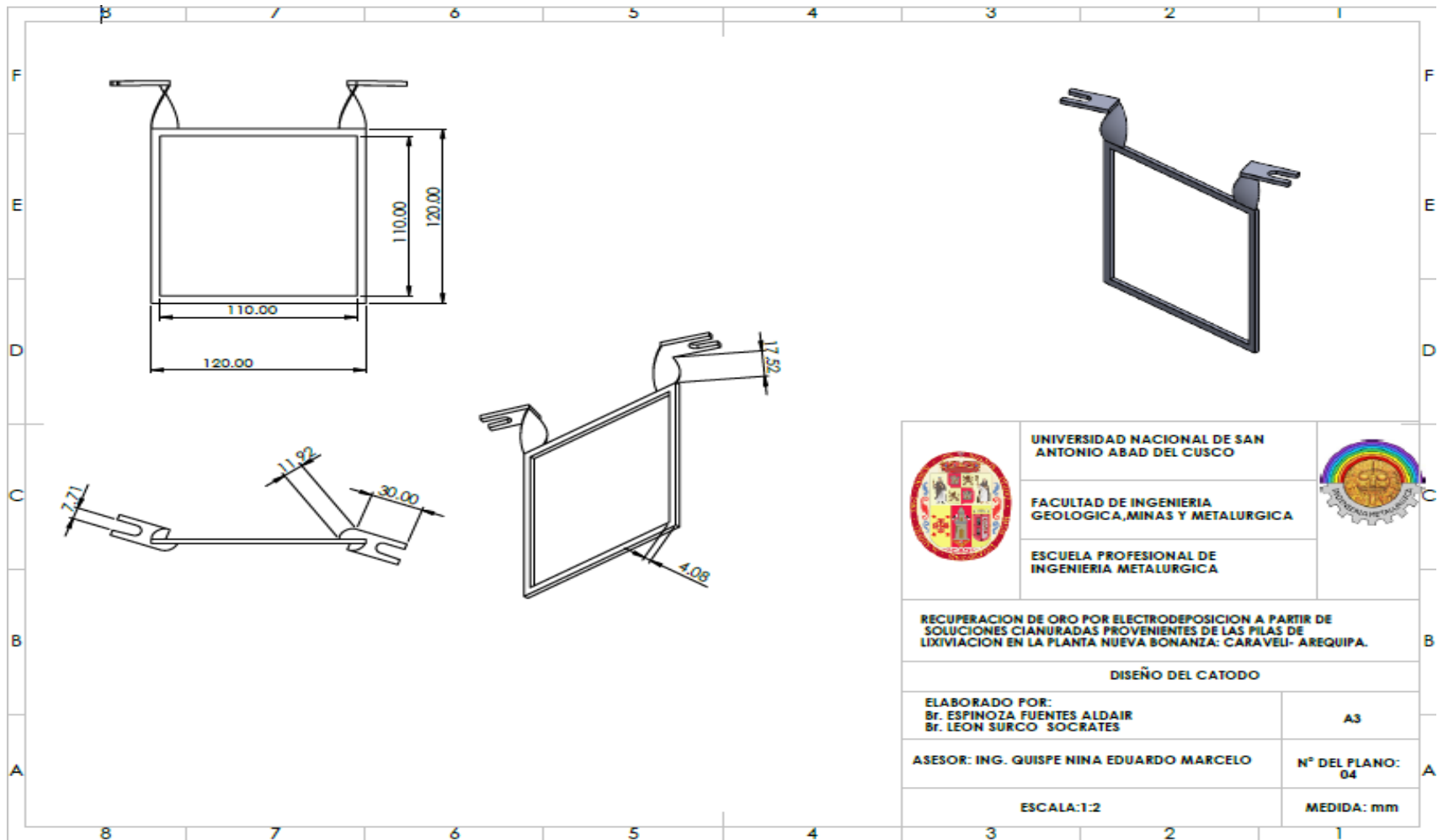
Plano de diseño del ánodo.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks)

Figura 37

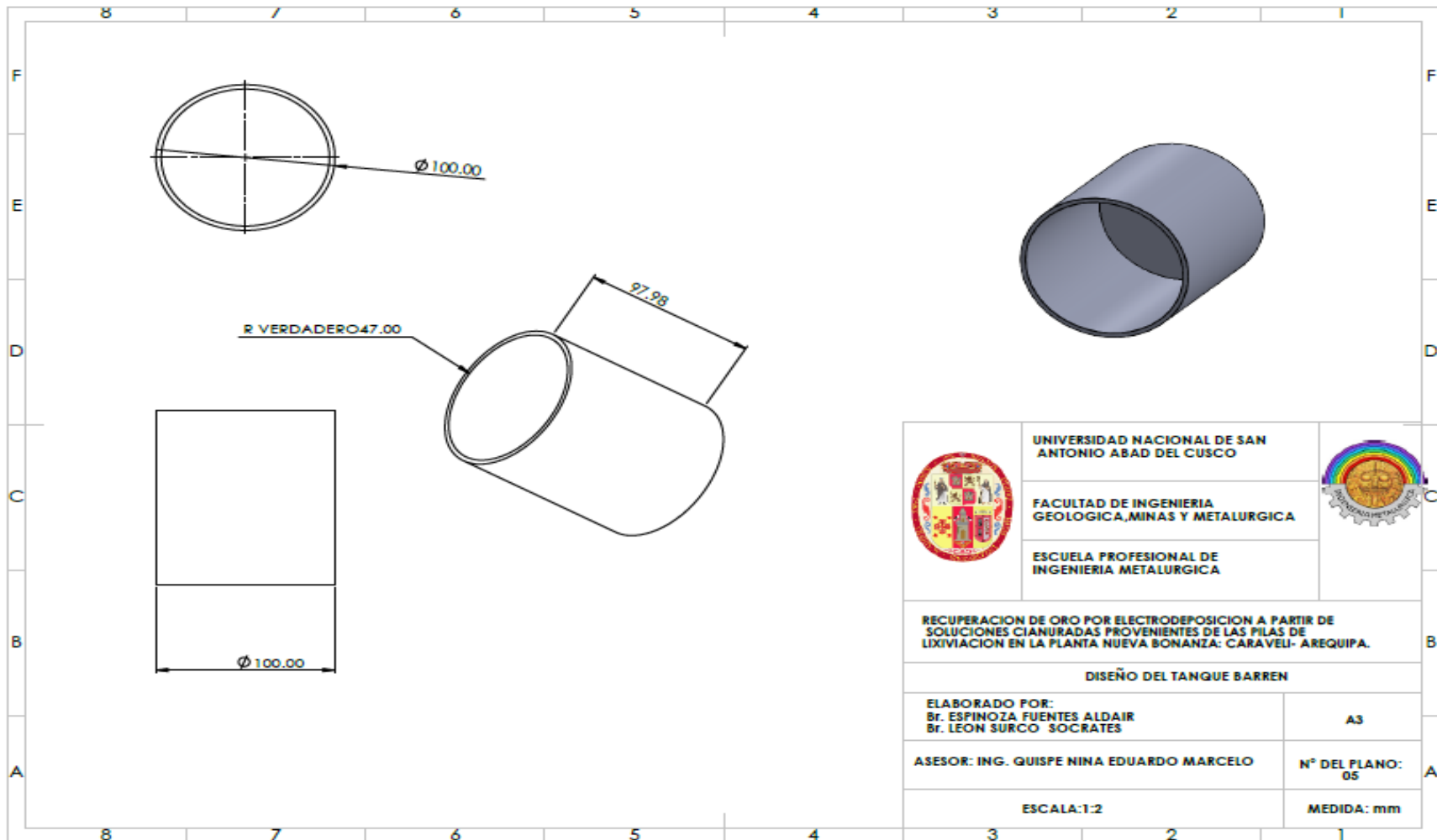
Plano de diseño del cátodo.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks).

Figura 38

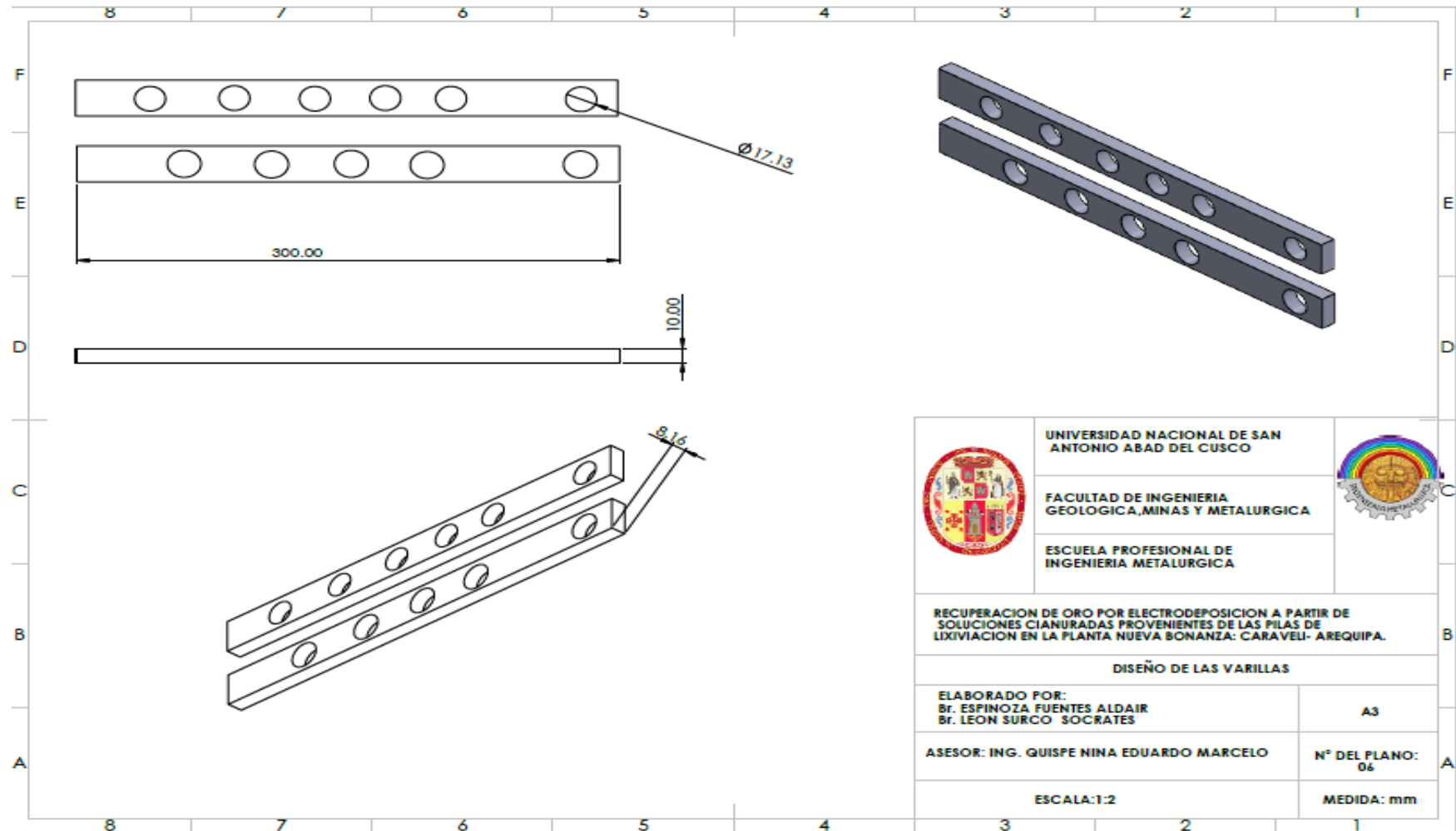
Plano de diseño del tanque barren.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks).

Figura 39

Plano de diseño de las varillas.



Nota. Elaboración propia (software SolidWorks)

5.2.3. Elección de materiales para la fabricación de la celda.

La selección de los materiales se basa principalmente en su función y su idoneidad para un proceso de electrodeposición. Generalmente, estos materiales están expuestos a reactivos con alta reactividad, lo que puede generar variaciones de temperatura. Por lo tanto, la elección de materiales adecuados es crucial para garantizar su resistencia, como se mencionó anteriormente. En este contexto, se opta por los siguientes materiales:

- Aceros inoxidable del tipo ASTM 304L para construir la celda
- Aceros inoxidable del tipo ASTM 316L para los electrodos (ánodo y cátodo)

5.2.4. Montaje final de la celda de electrodeposición.

Equipos y materiales

- | | |
|--|-----------------------|
| • Plancha de acero inoxidable
ASTM 316L | • Disco de corte |
| • Plancha de acero inoxidable
ASTM 304L | • Flexómetro |
| • Esmeril | • Varilla de cobre |
| • Máquina de soldar tig | • Pernos |
| • Taladro | • Taladro |
| • Soporte universal | • Tubos de PVC |
| • Brocas de ½" | • Pegamentos para PVC |
| | • Pernos |
| | • Tuercas |

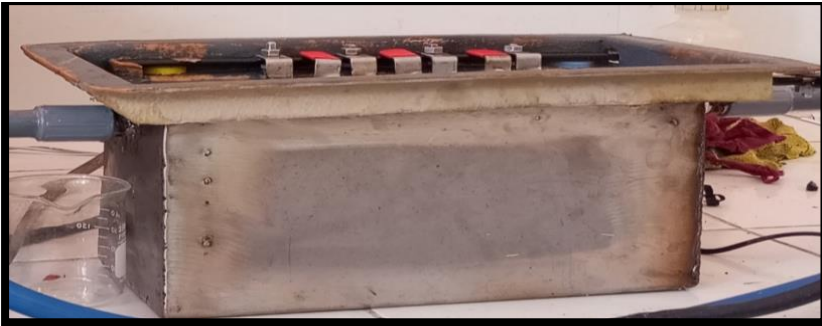
Procedimiento

La elaboración de la celda y sus componentes se llevó a cabo en un taller mecánico industrial, siguiendo rigurosamente los planos de diseño.

- Se tomaron las medidas exactas de las planchas de acero inoxidable para su corte.
- Las piezas se ensamblaron mediante soldadura.

Figura 40

Celda ensamblada.



Nota. Fotografía propia

Figura 41

Ánodo ensamblado.



Nota. Fotografía propia

Figura 42

Cátodo ensamblado

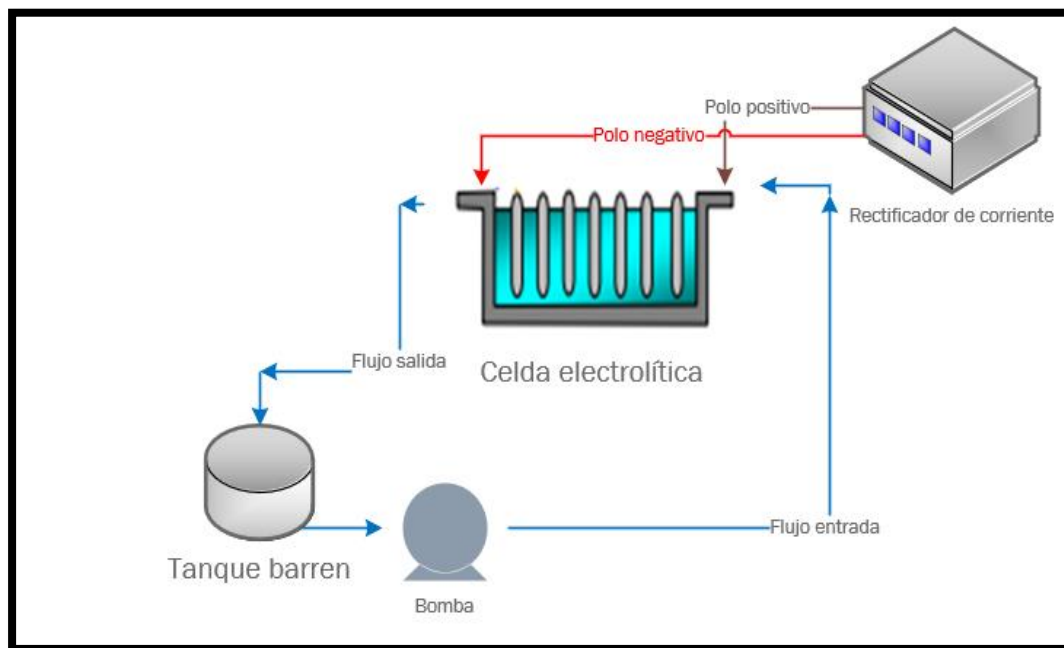


Nota. Fotografía propia

5.2.5. Colocación de la celda en el circuito operativo del proceso.

Figura 43

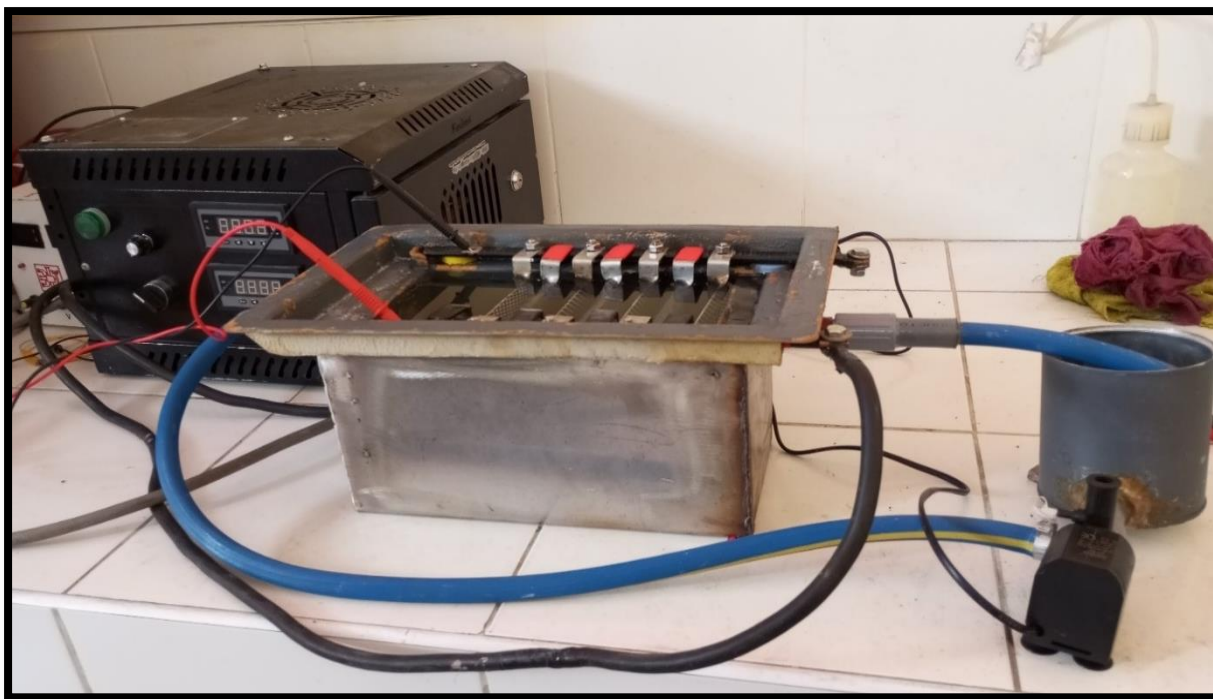
Diagrama de flujo de circuito de electrodeposición.



Nota. Elaboración propia del diagrama del flujo a base del diseño.

Figura 44

Circuito armado



Nota. Fotografía propia del circuito completo de electrodeposición.

5.3. Pruebas experimentales

5.3.1. Procedimiento experimental de electrodeposición

Equipos, herramientas y reactivos

Equipos

- Celda electrolítica
- Rectificador de corriente
- Bomba
- Multímetro y balanza de precisión digital.

Herramientas

- Recipientes (cubeta, balde y jarra)
- Tijera
- Vaso precipitado
- pHmetro
- soporte universal
- varilla de cobre
- llave 12

Reactivos

- soda caustica
- cianuro de sodio
- nitrato de plata
- ioduro de potasio

Proceso de Electrodeposición:

1. **Preparación de la solución:** Se ajustan las condiciones necesarias para el proceso, comenzando con la medición del pH, que debe ser alcalino, entre 12 y 13. Esto garantiza la efectividad de la actividad iónica en la celda electrolítica y previene la pasivación de los ánodos.

Figura 45

Acondicionamiento de la solución cianurada.



Nota. Fotografía propia.

2. **Titulación de la solución:** Se titula la solución mediante el método volumétrico para determinar la concentración de cianuro, que debe estar al 0.3%.
3. **Preparación de los cátodos:** Se teje la lana de acero en los cátodos. Para ello, se pesa la lana en una balanza de precisión, de acuerdo con el volumen requerido del cátodo que es de 43.2 cm^3 , y la lana necesaria es de 1.26 g para un cátodo.

Figura 46

Cátodo con enmallado de la lana de acero y pesaje de la lana



Nota. Fotografía propia.

4. **Colocación de los electrodos:** Se insertan las varillas de cobre, ánodos y cátodos en la celda electrolítica, asegurándolos con los pernos correspondientes.

Figura 47

Cátodos y ánodos en la celda.



Nota. Fotografía propia.

5. **Inspección del armado:** Se realiza una revisión para asegurar que no haya contacto entre los polos, evitando así posibles choques eléctricos.

Figura 48

Diseño completo del circuito.



Nota. Fotografía propia

6. **Alimentación de la solución:** Se introduce la solución en la celda electrolítica y en el tanque de barrenado.
7. **Circulación de la solución:** Se enciende la bomba y se espera a que la solución circule correctamente en el circuito.
8. **Activación del rectificador:** Una vez que el circuito esté en plena circulación, se enciende el rectificador de corriente. La corriente fluye de los ánodos (polo positivo) hacia los cátodos (polo negativo), arrastrando los iones metálicos para su precipitación en los cátodos.

Figura 49

Circuito de electrodeposición en funcionamiento.



Nota. Fotografía propia.

9. **Tiempo de electrodeposición:** Se establece un tiempo determinado para la electrodeposición, durante el cual ocurren las reacciones de oxidación y reducción, permitiendo que el oro se deposite en los cátodos en forma de cemento de oro. Una vez alcanzado el tiempo estipulado, se apagan el rectificador de corriente y la bomba, concluyendo así el proceso de electrodeposición.

Reducción del oro en el cátodo: $\text{Au}(\text{CN})_2^- + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Au} + 2\text{CN}^-$

Oxidación en el ánodo: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Figura 50

Reacciones presentes en la solución.



Nota. Fotografía propia.

10. Análisis de la muestra: Se extrae una muestra representativa de la celda para su análisis.

11. Cosecha del precipitado: Para proceder con la cosecha, se aflojan los pernos de los electrodos, se retira la lana del cátodo y se lava. También se extrae el precipitado almacenado en el interior de la celda.

Figura 51

Cosecha del cemento de oro presente en el cátodo.



Nota. Fotografía propia.

12. **Producto final:** El producto final de la electrodeposición es el **cemento de oro**, que pasa a la siguiente etapa del proceso: la refinación.

Figura 52

Producto final



Nota. Fotografía propia.

5.3.2. *Cálculos realizados*

Determinación del caudal

$$Q = \frac{V}{t}$$

En donde: Q= caudal

V= volumen

T= tiempo

$$Q = \frac{8 \text{ litros}}{1 \text{ minuto}}$$

$$Q = 8 \text{ litros/minuto}$$

Tiempo de residencia de la solución en la celda electrolítica

$$t = \frac{V}{Q}$$

Datos: capacidad de la celda es de 6.75 litros

flujo del caudal es de 8 L/min

$$t = \frac{6.75 \text{ litros}}{8 \text{ litros/min}}$$

$$t = 0.84 \text{ minutos}$$

Preparación de soda caustica

Datos: pH inicial de la solución = 11

Se toma una muestra de 100 ml de una solución y se agrega soda cáustica hasta alcanzar un pH de 12. La cantidad de soda cáustica necesaria para esta muestra de 100 ml es de 0.2 gramos.

Ahora, si deseamos extrapolar esta cantidad de soda cáustica a una solución de 7 litros, podemos calcular la cantidad total de soda que se necesitaría para alcanzar el mismo pH.

Calculo

1. Cantidad de soda cáustica para 100 ml:

Se requieren 0.2 gramos de soda cáustica para una muestra de 100 ml.

2. Proporción para 7 litros (7000 ml):

La cantidad de soda cáustica necesaria para 7000 ml es proporcional a la cantidad usada para 100 ml. Entonces, usamos una regla de tres para determinar la cantidad total:

$$\text{cantidad de soda para } 7000\text{ml} = \frac{7000 \text{ ml} \times 0.2\text{g}}{100 \text{ ml}} = 14 \text{ gramos}$$

Por lo tanto, se necesitarán 14 gramos de soda cáustica para alcanzar un pH de 12 en 7 litros de solución.

Cálculo de fuerza de cianuro

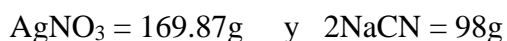
Se ha utilizado una concentración de 4.330g/L de nitrato de plata y como indicador a ioduro de potasio al 5%

El procedimiento consiste en tomar una muestra de 10 ml y añadir 2 a 3 gotas del indicador, colocar la muestra debajo de la bureta y girar la perilla suavemente hasta conseguir un flujo suave, ir agitando continuamente hasta observar el cambio de color a nube amarillenta. Una vez producido en cambio de color se corta el flujo de nitrato de plata para luego anotar el gasto.

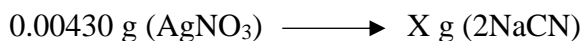
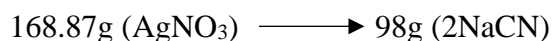
Para determinar la concentración de cianuro en porcentaje se utiliza la siguiente formula:



Peso molecular



La concentración de trabajo es de 4.330 g/L, lo que significa que en 1 mililitro de solución habrá 0.00430 g de AgNO₃. A partir de los datos obtenidos previamente, se puede establecer la siguiente relación:



$$X = 98g * 0.0043/168.87$$

$$X = 0.00249g \text{ NaCN}$$

Lo cual nos indica que para cada 1 ml de solución de AgNO_3 (0.00430g) reaccionara con 0.00249 de NaCN.

$$\text{Como se sabe que: } C_1 * V_2 = C_1 * V_2$$

(Concentración de NaCN) (volumen de NaCN) = (concentración de AgNO_3) (volumen de AgNO_3)

El factor se calcula al sustituir los valores dados en la ecuación, utilizando una muestra de 10 ml

$$\text{NaCN g/ml} = \frac{(0.00249g) \times (V_{\text{gasto ml}})}{10 \text{ ml}}$$

$$\text{NaCN g/ml} = 0.000249 * V_{\text{gasto}}$$

$$\text{NaCN (\%)} = 0.000249 * V_{\text{gasto}} * 100$$

$$\text{NaCN (\%)} = 0.0249 * V_{\text{gasto AgNO}_3}$$

El gasto de titulante es de 12 ml, y la concentración de cianuro es la siguiente:

$$\text{NaCN (\%)} = 0.0249 * 12$$

$$\text{NaCN (\%)} = 0.29\%$$

Cantidad de lana requerida

Se sabe que:

$$0.0269 \text{ g (lana de acero)} \longrightarrow 1 \text{ cm}^3 \text{ (cátodo)}$$

$$X \text{ g (lana de acero)} \longrightarrow 43.2 \text{ cm}^3 \text{ (cátodo)}$$

$$X = \frac{0.0269 \text{ g} \times 43.2 \text{ cm}^3}{1 \text{ cm}^3}$$

$$X = 1.162 \text{ g}$$

Para un cátodo se requiere 1.162 g de lana de acero

5.3.3. Resultados

Cálculo del metal depositado en la lana de acero:

El cálculo de la cantidad de oro depositado sobre la lana de acero se realiza mediante la medición de las diferencias de masa antes y después del proceso de electrodeposición. El procedimiento es el siguiente:

1. **Preparación y pesaje inicial:** Antes de iniciar el proceso de electrodeposición, se pesa con precisión la lana de acero seca utilizando una balanza. Este es el peso inicial de la lana de acero (m_1).
2. **Electrodeposición:** se realiza el proceso de electrodeposición, asegurando el control de las variables que pueden afectar la cantidad de oro depositado
3. **Pesaje final:** Una vez concluido el proceso de electrodeposición, se seca cuidadosamente la lana de acero y luego se pesa nuevamente la lana de acero con el metal depositado (m_2).
4. **Cálculo de la cantidad de oro depositado:** La cantidad de oro depositado sobre la lana de acero se obtiene por la diferencia de masas:

$$\text{Cantidad de oro depositado} = m_2 - m_1$$

Donde:

- m_2 es el peso final de la lana de acero (con el oro depositado).
- m_1 es el peso inicial de la lana de acero (sin el oro depositado).

Siguiendo el cálculo anterior, un cátodo requiere **1.16 g** de lana de acero. Como en el proceso se ha trabajado con **3 cátodos**, la cantidad total de lana de acero requerida es:

$$1.16 \text{ g} \times 3 = 3.48 \text{ g (o 3480 mg)}$$

Por lo tanto, en cada prueba se requiere **3.48 g (o 3480 mg)** de lana de acero.

Para la prueba 1:

- Peso 1: = 3480 mg
- Peso 2: = 3542.72 mg

La cantidad de oro depositado se calcula como la diferencia entre el peso 2 y el peso 1:

$$\text{Cantidad de oro depositado} = 3542.72 \text{ mg} - 3480 \text{ mg} = 62.72 \text{ mg}$$

Por lo tanto, la cantidad de oro depositado en la lana de acero es de 62.72 mg.

Figura 53

Pesaje inicial y final de la lana de acero



Nota. Fotografía propia.

De la misma manera, el cálculo se realiza para todas las pruebas, y se muestra en la siguiente tabla 6.

Tabla 6

Resultados del metal depositado en la lana de acero.

N°	NOMBRE	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Metal depositado (mg)
1	Prueba n° 01	3480	3542.72	62.72
2	Prueba n° 02	3480	3544	64.4
3	Prueba n° 03	3480	3549.3	69.30
4	Prueba n° 04	3480	3553.9	73.99
5	Prueba n° 05	3480	3928.63	448.63
6	Prueba n° 06	3480	3939.3	459.34
7	Prueba n° 07	3480	3954.2	474.25
8	Prueba n° 08	3480	3959.4	479.43
9	Prueba n° 09	3480	3748.7	272.41
10	Prueba n° 10	3480	3748.7	268.77
11	Prueba n° 11	3480	3750.8	270.87

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 7, se presentan los resultados del ripio, obtenidos a través del análisis químico realizado en el laboratorio.

Tabla 7

Resultados obtenidos del análisis de laboratorio.

N°	NOMBRE	LEY (mg/l)
1	Prueba n° 01	3.69
2	Prueba n° 02	3.45
3	Prueba n° 03	2.75
4	Prueba n° 04	2.08
5	Prueba n° 05	8.21
6	Prueba n° 06	6.68
7	Prueba n° 07	4.97
8	Prueba n° 08	3.82
9	Prueba n° 09	3.56
10	Prueba n° 10	4.10
11	Prueba n° 11	3.78

Nota. Elaboración propia.

Con los datos obtenidos previamente sobre el metal depositado, así como los resultados del laboratorio relacionados con la ley del ripio y la ley de cabeza (12.65 mg/l, 42.475 mg/l y 72.30 mg/l), se procede a calcular el porcentaje de recuperación.

$$\%recuperacion = \frac{cantidad\ de\ oro\ depositado}{cantidad\ de\ oro\ inicialmente\ presente} \times 100\%$$

En la tabla 8, se presentan los porcentajes de recuperación correspondientes a cada prueba realizada. La figura 54, nos muestra un gráfico del porcentaje de recuperación que se desarrolló en laboratorio.

Tabla 8

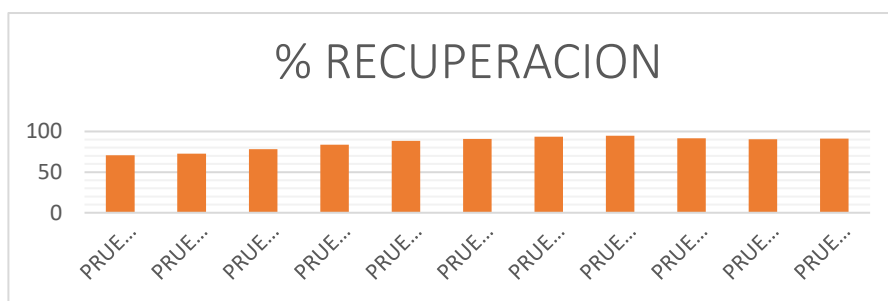
% de recuperación de las pruebas realizadas en el laboratorio.

N°	NOMBRE	% RECUPERACION
1	PRUEBA N° 01	70.83
2	PRUEBA N° 02	72.70
3	PRUEBA N° 03	78.26
4	PRUEBA N° 04	83.55
5	PRUEBA N° 05	88.65
6	PRUEBA N° 06	90.76
7	PRUEBA N° 07	93.70
8	PRUEBA N° 08	94.72
9	PRUEBA N° 09	91.61
10	PRUEBA N° 10	90.40
11	PRUEBA N° 11	91.10

Nota. Elaboración propia.

Figura 54

% de recuperación



Nota. Elaboración propia.

CAPITULO VI

6. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

6.1. Diseño factorial 2³

El propósito de la utilización del diseño factorial es entender el impacto de las tres variables en dos niveles de cada factor y su respuesta de calidad. En otras palabras, consiste en estudiar la relación entre los factores y la respuesta. Los ensayos del proceso de electrodeposición de oro nos facilitarán la recopilación de datos, se llevaron a cabo 08 pruebas metalúrgicas combinadas y 03 pruebas intermedias (puntos centrales). En la tabla 9, se presentan las variables evaluadas durante el procedimiento, señalando sus valores mínimo y máximo.

Tabla 9

Valores mínimos y máximos

	Variables	Nivel	Nivel	Nivel
		Inferior (-)	Intermedio (0)	Superior (+)
A	Voltaje (V)	2.3	2.65	3.0
B	Tiempo de electrodeposición (hr)	1.5	2.5	2.0
C	Concentración de oro (mg/l)	12.65	42.475	72.30

Nota. Elaboración propia

La tabla 10, presenta la organización del diseño factorial (donde se realiza una única prueba en los extremos y tres pruebas en el centro). La matriz codificada en escala incluye las columnas (X1, X2 y X3), las cuales se relacionan con los 3 factores estudiados expresados en escala natural (A, B y C). También se nota que han sido organizadas en la secuencia estándar, cada una de ellas. La columna comienza con el signo -, y los signos - y + se intercambian. Por supuesto, la reacción del diseño se ve afectada por los propósitos del experimento de recuperar oro por electrodeposición y se completa la columna % de recuperación con los datos del experimento final.

Tabla 10*Organización de diseño experimental*

Columnas	Escala codificada			Escala natural		
	X1	X2	X3	A	B	C
	Voltaje	Tiempo	Concentración de Au	(-)	(0)	(+)
P-1	-1	-1	-1	2.3	1.5	12.65
P-2	1	-1	-1	3.0	1.5	12.65
P-3	-1	1	-1	2.3	2.5	12.65
P-4	1	1	-1	3.0	2.5	12.65
P-5	-1	-1	1	2.3	1.5	72.30
P-6	1	-1	1	3.0	1.5	72.30
P-7	-1	1	1	2.3	2.5	72.30
P-8	1	1	1	3.0	2.5	72.30
P-9	0	0	0	2.65	2	42.475
P-10	0	0	0	2.65	2	42.475
P-11	0	0	0	2.65	2	42.475

Nota. Elaboración propia

6.2. Resultados de las pruebas metalúrgicas

Tabla 11*Organización de diseño experimental con resultado.*

Columnas	Escala codificada			Escala natural			Respuesta
	X1	X2	X3	A	B	C	(Y)
	Voltaje	Tiempo	Concentración de Au	(-)	(0)	(+)	%R Au
P-1	-1	-1	-1	2.3	1.5	12.65	70.83
P-2	1	-1	-1	3.0	1.5	12.65	72.70
P-3	-1	1	-1	2.3	2.5	12.65	78.26
P-4	1	1	-1	3.0	2.5	12.65	83.55
P-5	-1	-1	1	2.3	1.5	72.30	88.65
P-6	1	-1	1	3.0	1.5	72.30	90.76
P-7	-1	1	1	2.3	2.5	72.30	93.70
P-8	1	1	1	3.0	2.5	72.30	94.72
P-9	0	0	0	2.65	2	42.475	91.61
P-10	0	0	0	2.65	2	42.475	90.40
P-11	0	0	0	2.65	2	42.475	91.10

Nota. Elaboración propia

PRUEBA N° 01**Tabla 12***Condiciones iniciales para la prueba n° 01*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
Ph	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	10.5 amperios
Densidad de corriente	0.07 A / cm ²
Potencial eléctrico	2.3 Voltios
Tiempo	1.5 horas
Concentración de Au en solución	12.65 mg/L

Nota. Elaboración propia**Tabla 13***Balance metalúrgico de la prueba N° 01*

Prueba n°01				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	12.65	88.55	100
Solución residual	7	3.69	25.83	29.17
Producto depositado			62.72	70.83

Nota. Elaboración propia

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{62.72 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 3.18 \times 10^{-4} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{3.18 \times 10^{-4} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 2017.49 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{62.72}{88.55} \times 100$$

$$EC(\%) = 70.83$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energia} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energia} = \frac{2.3 \times 10.5 \times 1.5}{62.72}$$

$$\text{consumo de energia} = 0.56 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 02**Tabla 14***Condiciones iniciales para la prueba N°02*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8 litros/ minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	15.2 amperios
Densidad de corriente	0.11 A /cm ²
Potencial eléctrico	3.0 Voltios
Tiempo	1.5 horas
Concentración de Au en la solución	12.65 mg/L

Nota. Elaboración propia.**Tabla 15***Balance metalúrgico de la prueba N°02*

Prueba n°02				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	12.65	88.55	100
Solución residual	7	3.45	24.15	27.27
Producto depositado			64.4	72.73

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{64.40 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 3.27 \times 10^{-4} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{3.27 \times 10^{-4} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 2071.53 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{64.40}{88.55} \times 100$$

$$EC(\%) = 72.73$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energía} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energía} = \frac{3 \times 15.2 \times 1.5}{64.4}$$

$$\text{consumo de energía} = 1.06 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 03**Tabla 16***Condiciones iniciales para la prueba N° 03*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
Ph	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	11.5 amperios
Densidad de corriente	0.08 A / cm ²
Potencial eléctrico	2.3 V
Tiempo	2.5 h
Concentración de Au en solución	12.65 mg/L

Nota. Elaboración propia**Tabla 17***Balance metalúrgico de la prueba N°03*

Prueba n°03				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	12.65	88.55	100
Solución residual	7	2.75	19.25	21.74
Producto depositado			69.30	78.26

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{69.30 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 3.52 \times 10^{-4} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{3.52 \times 10^{-4} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 2229.15 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{69.30}{88.55} \times 100$$

$$EC(\%) = 78.26$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energía} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energía} = \frac{2.3 \times 11.5 \times 2.5}{69.30}$$

$$\text{consumo de energía} = 0.95 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 04**Tabla 18***Condiciones iniciales para la prueba N°04*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	16.5 amperios
Densidad de corriente	0.12 A / cm ²
Potencial eléctrico	3.0 V
Tiempo	2.5 h
Concentración de Au en solución	12.65 mg/L

Nota. Elaboración propia.**Tabla 19***Balance metalúrgico de la prueba N°04*

Prueba n°04				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	12.65	88.55	100
Solución residual	7	2.08	14.56	16.44
Producto depositado			73.99	83.56

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{73.99 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 3.76 \times 10^{-4} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{3.76 \times 10^{-4} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 2380.01 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{73.99}{88.55} \times 100$$

$$EC(\%) = 88.56$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energía} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energía} = \frac{3.0 \times 16.5 \times 2.5}{73.99}$$

$$\text{consumo de energía} = 1.67 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 05**Tabla 20***Condiciones iniciales para la prueba N°05*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	10.8 amperios
Densidad de corriente	0.08 A / cm ²
Potencial eléctrico	2.3 V
Tiempo	1.5 h
Concentración de Au en solución	72.30 mg/L

Nota. Elaboración propia.**Tabla 21***Balance metalúrgico de la prueba N°05*

Prueba n°05				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	72.30	506.10	100
Solución residual	7	8.21	57.47	11.36
Producto depositado			448.63	88.64

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{448.63 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 2.28 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{2.28 \times 10^{-3} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 14447.98 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{448.63}{506.10} \times 100$$

$$EC(\%) = 88.64$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energía} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energía} = \frac{2.3 \times 10.8 \times 1.5}{448.63}$$

$$\text{consumo de energía} = 0.083 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 06**Tabla 22***Condiciones iniciales para la prueba N°06*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	15.8 amperios
Densidad de corriente	0.11 A / cm ²
Potencial eléctrico	3.0 V
Tiempo	1.5 h
Concentración de Au en solución	72.30 mg/L

Nota. Elaboración propia.**Tabla 23***Balance metalúrgico de la prueba N°06*

Prueba n°06				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	72.30	506.10	100
Solución residual	7	6.68	46.76	9.24
Producto depositado			459.34	90.76

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{459.34 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 2.33 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{2.33 \times 10^{-3} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 14775.44 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{459.34}{506.10} \times 100$$

$$EC(\%) = 90.76$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energia} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energia} = \frac{3.0 \times 15.8 \times 1.5}{459.34}$$

$$\text{consumo de energia} = 0.15 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 07**Tabla 24***Condiciones iniciales para la prueba N°07*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	10.5 amperios
Densidad de corriente	0.07 A / cm ²
Potencial eléctrico	2.3 V
Tiempo	2.5
Concentración de Au en solución	72.30

Nota. Elaboración propia.**Tabla 25***Balance metalúrgico de la prueba N°07*

Prueba n°07				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	72.30	506.10	100
Solución residual	7	4.97	31.85	6.29
Producto depositado			474.25	93.71

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{474.25 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 2.41 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{2.41 \times 10^{-3} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 15255.04 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{474.25}{506.10} \times 100$$

$$EC(\%) = 93.71$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energia} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energia} = \frac{2.3 \times 10.5 \times 2.5}{474.25}$$

$$\text{consumo de energia} = 0.13 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 08**Tabla 26***Condiciones iniciales para la prueba N°08*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	17.4 amperios
Densidad de corriente	0.12 A / cm ²
Potencial eléctrico	3.0 V
Tiempo	2.5 h
Concentración de Au en solución	72.30 mg/L

Nota. Elaboración propia.**Tabla 27***Balance metalúrgico de la prueba N°08*

Prueba n°08				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	72.30	506.10	100
Solución residual	7	3.81	26.67	5.27
Producto depositado			479.43	94.73

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal (g/mol)}}$$

$$n = \frac{479.43 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 2.43 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{2.43 \times 10^{-3} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 15421.67 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{479.43}{506.10} \times 100$$

$$EC(\%) = 94.72$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energia} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energia} = \frac{3.0 \times 17.4 \times 2.5}{479.43}$$

$$\text{consumo de energia} = 0.27 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 09**Tabla 28***Condiciones iniciales para la prueba N°09*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	12.5 amperios
Densidad de corriente	0.09 A / cm ²
Potencial eléctrico	2.65 V
Tiempo	2 h
Concentración de Au en solución	42.475 mg/L

Nota. Elaboración propia.**Tabla 29***Balance metalúrgico de la prueba N°09*

Prueba n°09				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	42.475	297.33	100
Solución residual	7	3.56	24.92	8.38
Producto depositado			272.41	91.62

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{272.41 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 1.38 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{1.38 \times 10^{-3} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 8762.52 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{272.41}{297.33} \times 100$$

$$EC(\%) = 91.62$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energia} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energia} = \frac{2.65 \times 12.5 \times 2}{272.41}$$

$$\text{consumo de energia} = 0.24 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 10**Tabla 30***Condiciones iniciales para la prueba N°10*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	13.2 amperios
Densidad de corriente	0.09 A / cm ²
Potencial eléctrico	2.65 V
Tiempo	2 h
Concentración de Au en solución	42.475 mg/L

Nota. Elaboración propia.**Tabla 31***Balance metalúrgico de la prueba N°10*

Prueba n°10				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	42.475	297.33	100
Solución residual	7	4.10	28.56	9.61
Producto depositado			268.77	90.39

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{268.77 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 1.36 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{1.36 \times 10^{-3} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 8645.44 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{268.77}{297.33} \times 100$$

$$EC(\%) = 90.39$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energia} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energia} = \frac{2.65 \times 13.2 \times 2}{268.77}$$

$$\text{consumo de energia} = 0.26 \text{ Wh/mg}$$

PRUEBA N° 11**Tabla 32***Condiciones iniciales para la prueba N°11*

CARACTERISTICAS	CANTIDAD
Capacidad de la celda	6.75 litros
Caudal de recirculación	8litros/minuto
Temperatura	25°C
Fuerza de cianuro	0.3%
Peso de lana de acero	1.173 gramos
pH	12
Área catódica	144 cm ²
Intensidad de corriente	11.9 amperios
Densidad de corriente	0.082 A / cm ²
Potencial eléctrico	2.65 V
Tiempo	2 h
Concentración de Au en solución	42.475 mg/L

Nota. Elaboración propia.**Tabla 33***Balance metalúrgico de la prueba N°11*

Prueba n°11				
Concepto	Volumen (litros)	Ley mg/L	Contenido metálico (mg)	Porcentaje de recuperación (%)
Solución rica	7	42.475	297.33	100
Solución residual	7	3.78	26.46	8.89
Producto depositado			270.87	91.11

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de moles depositados

$$n = \frac{\text{masa del metal depositado}(g)}{\text{masa molar del metal}(g/mol)}$$

$$n = \frac{270.87 \times 0.001g}{197g/mol}$$

$$n = 1.37 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

Cantidad de electricidad (carga) involucrada en el proceso

$$Q = \frac{n(\text{numero de moles}) \times M(\text{masa molar}) \times f(\text{constante de faraday})}{z(\text{numero de electrones})}$$

$$Q = \frac{1.37 \times 10^{-3} \text{ moles} \times 197g/mol \times 96500C/mol}{3e}$$

$$Q = 8712.98 \text{ Culombios}$$

Eficiencia de corriente

$$EC(\%) = \frac{mR}{mf} \times 100$$

$$EC(\%) = \frac{270.87}{297.33} \times 100$$

$$EC(\%) = 91.10$$

Consumo de energía

$$\text{consumo de energía} = \frac{\text{voltaje} \times \text{intensidad} \times \text{tiempo}}{\text{masa real depositado}}$$

$$\text{consumo de energía} = \frac{2.65 \times 11.6 \times 2}{270.87}$$

$$\text{consumo de energía} = 0.23 \text{ Wh/mg}$$

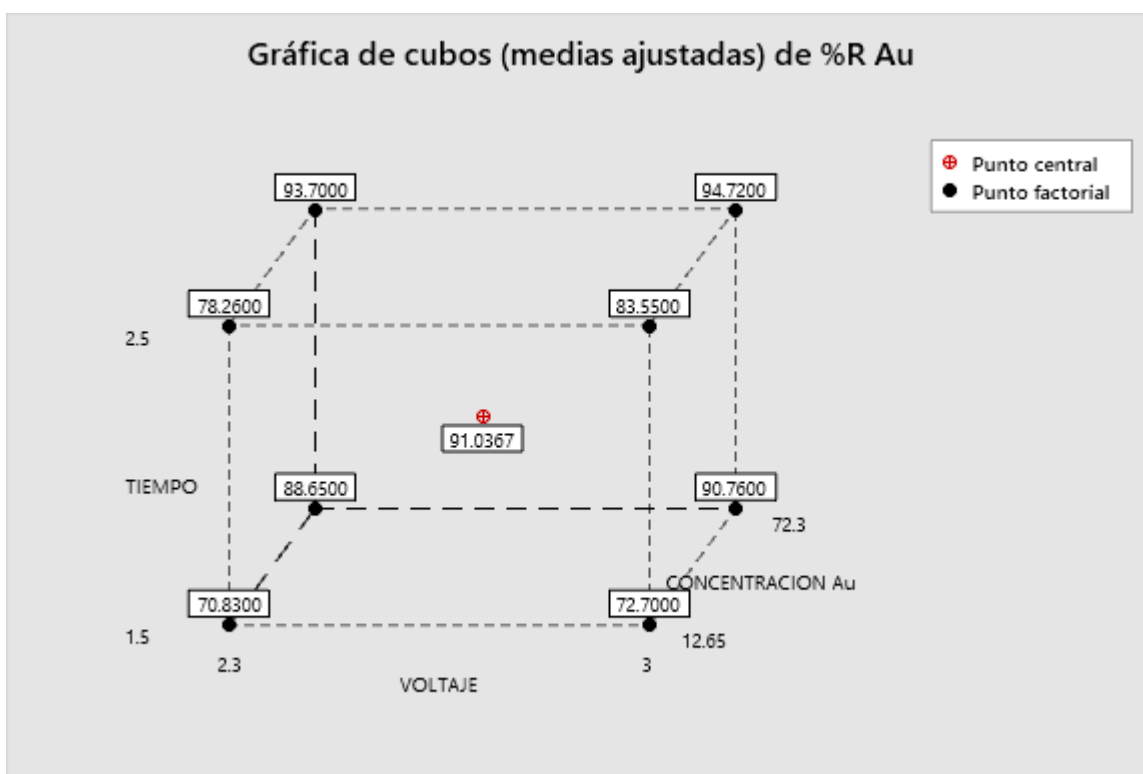
6.3. Análisis y discusión

La utilización de informes gráficos estadísticos nos facilita una visión más nítida y sencilla del análisis de los impactos de cada factor. Para elaborar estos gráficos a partir de los resultados obtenidos en las pruebas metalúrgicas, se empleó el software Minitab.

6.3.1. Representación geométrica de las combinaciones

Figura 55

Grafica de cubos de la recuperación de oro



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

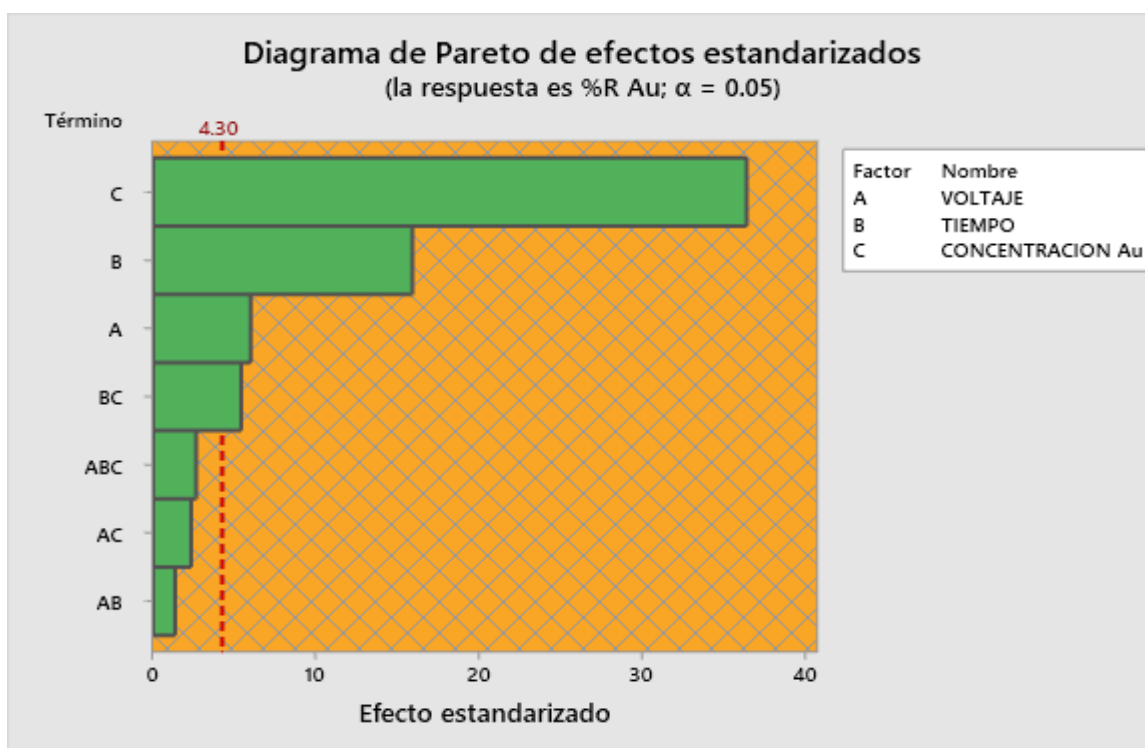
La figura 55, nos ilustra las medias ajustadas a la recuperación, en las que las tres variables interactúan con sus valores máximos y mínimos. Visualizándose que para la interacción de los tres valores mínimos de cada variable se logra una menor recuperación de oro, y para la interacción de los valores máximos de cada variable se logra una recuperación de 94.72% de oro.

6.3.2. Diagrama de Pareto de efectos en la recuperación

El gráfico de Pareto nos facilita establecer el nivel de magnitud y su correspondiente importancia debido a los efectos que suceden con las variables. Las barras horizontales que superan la línea de referencia punteada señalan que posee relevancia.

Figura 56

Diagrama de Pareto



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

El valor de 4.30 que nos muestra la figura 56, representa el valor estadístico de Durbin-Watson, un test estadístico que se emplea para establecer la existencia de correlación en los residuos de un análisis de regresión. Cuyo valor indica la significancia de cada variable de estudio y las interacciones de cada variable. En otras palabras, si en el diagrama de Pareto, la barra de alguna variable o interacción supera el indicador, quiere decir que es significativa e impacta en el experimento, por lo que se deduce que:

La concentración de oro es muy significativa y es más relevante que el resto de las variables, seguida del tiempo de electrodeposición, el voltaje y la interacción de las variables de concentración de Au y tiempo de electrodeposición también son significativas en menor grado y que influyen en las pruebas metalúrgicas, mientras la interrelación de los tres factores tiene un papel crucial en nuestro fenómeno de investigación.

6.3.3. Gráfica de residuos para % de Au.

Figura 57

Gráfica de residuos



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

Se emplea el gráfico de probabilidad normal para determinar si el residuo vs el porcentaje en un estudio de regresión se reparte de manera normal. La ilustración 57, indica que se distribuyen de una manera normal ya que se muestra una línea recta ascendente. Se emplea un histograma con la finalidad de establecer si la información es asimétrica o presenta valores atípicos. En esta situación cuenta con tres valores, por lo que no se observa puntos suficientes para identificar la simetría entre los datos o estimaciones irregulares.

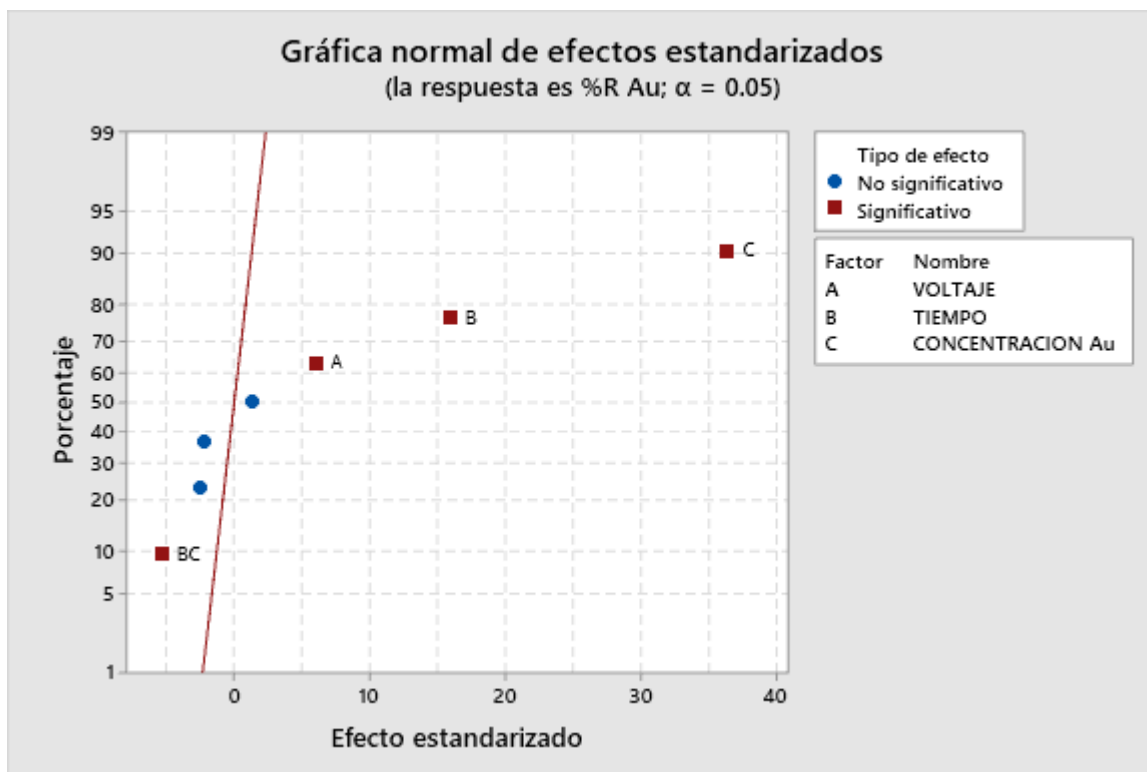
La gráfica de residuos frente al valor ajustado revela la distribución de los puntos de manera aleatoria, sin alejarse significativamente de la línea trazada por el cero, por tanto, en el modelo no se identifican valores atípicos.

Por otro lado, la gráfica de residuos frente al orden de observación indica que cada residuo es autónomo, y no presentan ninguna inclinación con respecto al orden temporal. Lo cual sugiere, que no se pueda obtener exactamente el mismo resultado en el proceso, a pesar de realizar las pruebas bajo las mismas condiciones operativas.

6.3.4. Gráfica normal de los efectos en la recuperación

Figura 58

Gráfica normal de efectos estandarizados



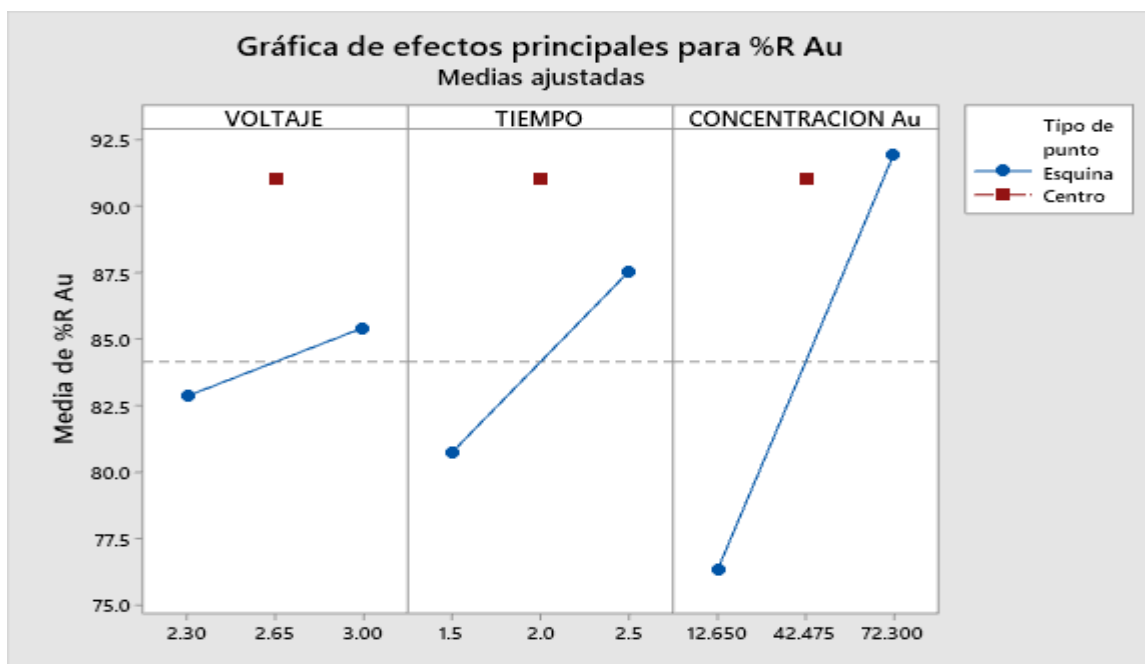
Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

De la ilustración 58, se puede inferir que las variables, así como la interacción de las variables de concentración y tiempo de electrodeposición tienen un impacto significativo en el fenómeno, mientras que el resto de interacciones no tienen mucha incidencia en las experimentaciones.

6.3.5. Análisis de los efectos principales de cada variable

Figura 59

Grafica de efectos principales



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

Se analiza grafica 59, de efectos principales para él % de recuperación de Au, en el que se evalúa tanto la dirección de cada variable y su efecto como la magnitud de cada factor, con el objetivo de identificar cuáles tienen mayor influencia en el modelo de regresión. De este análisis se concluyó que las variables estudiadas tienen mucha significancia en la investigación. La gráfica nos indica que estos factores presentan un dominio ascendente que va de izquierda a derecha,

destacando la concentración de oro como la más significativa debido a su pendiente más pronunciada, lo que indica:

Si la concentración de oro es 12.65 mg/L, la recuperación de oro es 70.83%; si la concentración de oro es 72.30 mg/L la recuperación es 94.72%

6.3.6. Análisis de varianza (ANOVA)

Figura 60

Resumen del análisis de varianza

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	714.034	89.254	241.86	0.004
Lineal	3	594.454	198.151	536.95	0.002
VOLTAJE	1	13.236	13.236	35.87	0.027
TIEMPO	1	93.093	93.093	252.26	0.004
CONCENTRACION Au	1	488.125	488.125	1322.71	0.001
Interacciones de 2 términos	3	13.450	4.483	12.15	0.077
VOLTAJE*TIEMPO	1	0.679	0.679	1.84	0.308
VOLTAJE*CONCENTRACION Au	1	2.030	2.030	5.50	0.144
TIEMPO*CONCENTRACION Au	1	10.742	10.742	29.11	0.033
Interacciones de 3 términos	1	2.543	2.543	6.89	0.120
VOLTAJE*TIEMPO*CONCENTRACION Au	1	2.543	2.543	6.89	0.120
Curvatura	1	103.588	103.588	280.70	0.004
Error	2	0.738	0.369		
Total	10	714.772			

Nota. Elaboración propia

La figura 60, muestra el análisis de regresión múltiple, realizado mediante el software estadístico, indica que las variables independientes o factores (A: voltaje, B: tiempo de electrodeposición, C: concentración de oro y B*C: tiempo*concentración) tienen un efecto significativo, ya que el valor de P (Pearson) es menor a 0.05. Sin embargo, este comportamiento no se observa en la interacción entre el resto de las variables independientes, lo que significa que dicha interacción no resulta significativa para el proceso en estudio.

Figura 61*Resumen del modelo*

Resumen del modelo			
	S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
	0.607481	99.90%	99.48% *

Nota. Elaboración propia

6.3.7. Coeficientes codificados para el modelo matemático

Figura 293*Coeficientes codificados*

Término	Efecto	EE del		Valor T	Valor p	FIV
		Coef	coef.			
Constante		84.146	0.215	391.78	0.000	
VOLTAJE	2.572	1.286	0.215	5.99	0.027	1.00
TIEMPO	6.822	3.411	0.215	15.88	0.004	1.00
CONCENTRACION Au	15.623	7.811	0.215	36.37	0.001	1.00
VOLTAJE*TIEMPO	0.582	0.291	0.215	1.36	0.308	1.00
VOLTAJE*CONCENTRACION Au	-1.008	-0.504	0.215	-2.35	0.144	1.00
TIEMPO*CONCENTRACION Au	-2.318	-1.159	0.215	-5.40	0.033	1.00
VOLTAJE*TIEMPO*CONCENTRACION Au	-1.127	-0.564	0.215	-2.62	0.120	1.00
Pt Ctral		6.890	0.411	16.75	0.004	1.00

Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

La figura 62, de coeficientes codificados presenta los efectos de las variables independientes (Voltaje, Tiempo y Concentración de Au) y sus interacciones sobre la respuesta del sistema. La Concentración de Au es la variable más influyente, con un coeficiente de 7.811 y un valor p de 0.000, indicando una relación altamente significativa. El Voltaje y el Tiempo también tienen efectos positivos significativos ($p=0.027$ y $p=0.004$, respectivamente). En cuanto a las interacciones, la combinación Tiempo * Concentración de Au muestra un efecto negativo significativo ($p=0.033$), mientras que las demás interacciones no son estadísticamente relevantes.

6.3.8. Modelo de correlación para la optimización del proceso

De acuerdo con el software estadístico, el análisis de regresión múltiple nos muestra una ecuación de regresión que se presenta de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \%R \text{ Au} = & 70.7 - 6.78 \text{ VOLTAJE} - 6.44 \text{ TIEMPO} - 0.027 \text{ CONCENTRACION Au} \\ & + 6.25 \text{ VOLTAJE} * \text{TIEMPO} \\ & + 0.1678 \text{ VOLTAJE} * \text{CONCENTRACION Au} \\ & + 0.209 \text{ TIEMPO} * \text{CONCENTRACION Au} \\ & - 0.1080 \text{ VOLTAJE} * \text{TIEMPO} * \text{CONCENTRACION Au} + 6.890 \text{ Pt Ctral} \end{aligned}$$

6.3.9. Optimización de la recuperación

Tras obtener el modelo matemático, se llevó a cabo una proyección para la optimización de esta investigación, prediciendo valores para cada factor, con el objetivo de alcanzar una máxima recuperación, los valores obtenidos se muestran en la tabla 34 y figura 63.

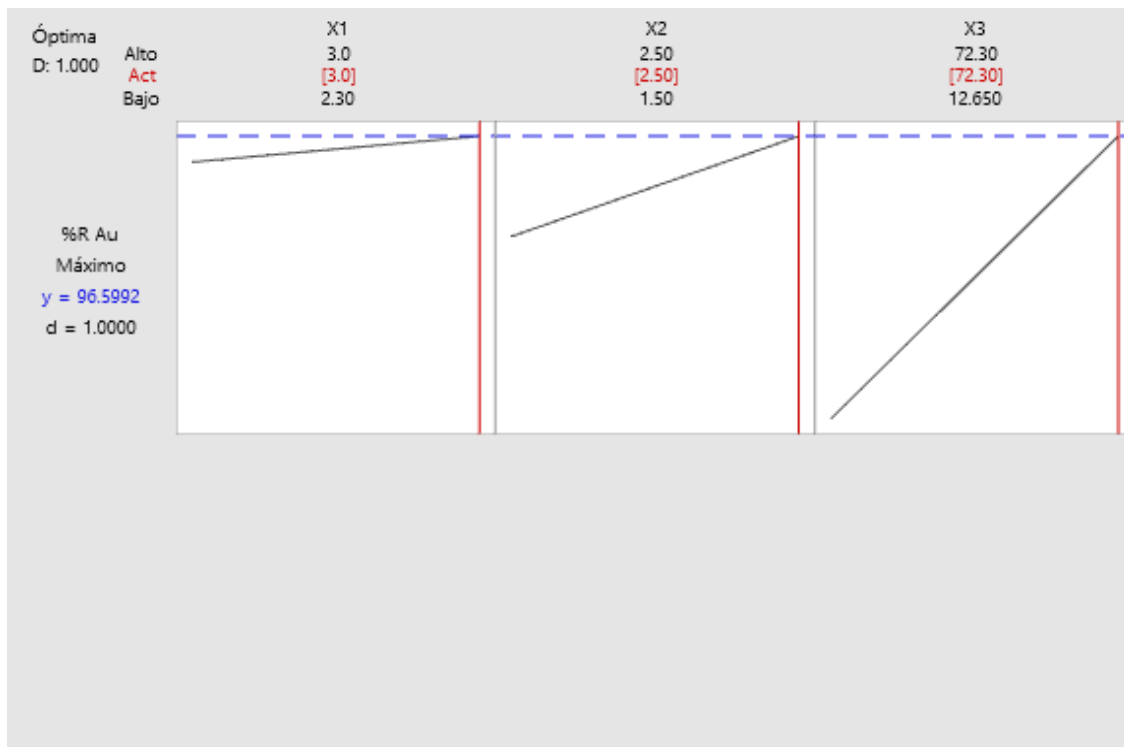
Tabla 34

Factores óptimos para recuperación de oro

VARIABLES		NIVEL SUPERIOR	NIVEL INFERIOR	OPTIMO
A	VOLTAJE (V)	3.0	2.3	3.0
B	TIEMPO DE ELECTRODEPOSICIÓN (hr)	2.5	1.5	2.5
C	CONCENTRACIÓN DE ORO (mg/L)	72.30	12.65	72.30

Figura 485

Optimización de respuesta: %RAu

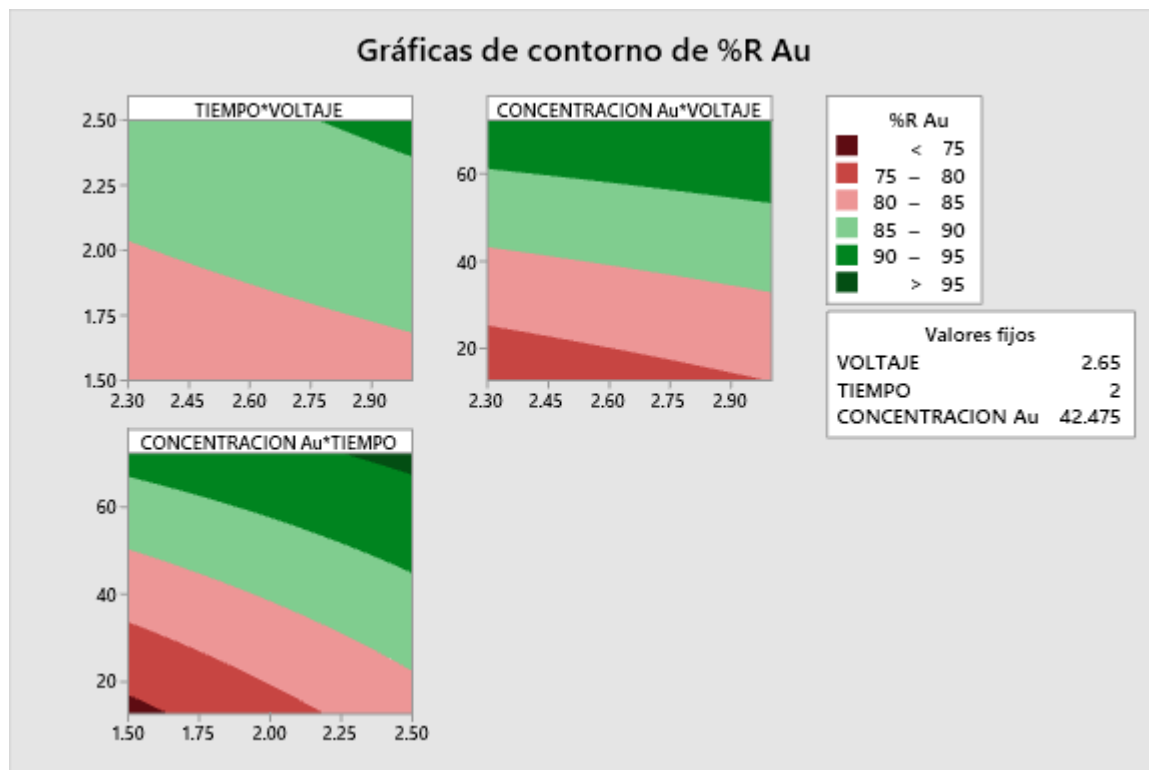


Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

6.3.10. Gráfico de superficie y contornos de respuesta (Y)

Figura 597

Gráfica de contorno en la recuperación de oro



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

El diagrama 64, se emplea para reconocer las áreas de los factores y su respuesta a través de su coloración, bajo términos específicos entre las interacciones de cada variable independiente. De la ilustración 57, el área de color rojo muestra las recuperaciones que son bajas, mientras que el color verde indica que se puede obtener recuperaciones de oro de 85% hasta 95%.

6.4. Discusión de resultados

Es importante señalar que, en las diversas pruebas realizadas según el diseño experimental, y al considerar las diferentes combinaciones de valores de las variables evaluadas, se obtuvieron resultados satisfactorios al concluir cada una de ellas. El mayor porcentaje de extracción de oro, del 94.72%, se alcanzó con un potencial eléctrico de 3.0V, un tiempo de electrodeposición de 2.5 horas y una concentración de oro de 72.30 mg/L. En contraste, el menor porcentaje de extracción fue del 70.83% en la muestra 1, con las siguientes condiciones: un voltaje de 2.3V, un tiempo de electrodeposición de 1.5 horas y una concentración de oro de 12.65 mg/L.

De acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA), el valor de P del modelo es inferior a 0.05 (0.004), lo cual señala que las variables poseen relevancia significativa. La variable con mayor influencia es la concentración de oro, ya que su valor de P es menor a 0.05. Por otro lado, las variables tiempo de electrodeposición y voltaje también son significativas, aunque en menor medida. Además, la interacción entre las variables concentración de oro y tiempo de electrodeposición es significativa, con un valor de P inferior a 0.05. Sin embargo, las interacciones de las demás variables no mencionadas anteriormente superan el valor de P, lo que sugiere que no tienen una significancia relevante.

Asimismo, se observa que el mayor porcentaje de extracción, 94.72%, se alcanzó al utilizar los valores máximos de cada variable, mientras que el porcentaje más bajo, 70.83%, se obtuvo con los valores mínimos de las variables. Por otro lado, al emplear valores intermedios, se lograron buenos resultados, con un 91.61% de recuperación.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con el objetivo general de recuperar oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas derivadas de las pilas de lixiviación, se concluye que esta técnica representa una estrategia altamente eficiente para maximizar la recuperación del metal precioso. Al mismo tiempo, optimiza el uso de recursos y reduce los costos operativos, promoviendo un manejo más sostenible de los residuos generados en el proceso de extracción, obteniendo el modelo matemático: $\%R_{Au} = 70.7 - 6.78 X_1 - 6.44 X_2 - 0.027 X_3 + 6.25 X_1X_2 + 0.1678 X_1X_3 + 0.209 X_2X_3 - 0.1080 X_1X_2X_3 + 6.890$ Punto Central.
2. Al determinar los parámetros óptimos del potencial eléctrico (X_1), se concluye que la mayor precipitación de oro se alcanza a 3.0 voltios y 17.4 amperios, con una densidad de corriente de 0.40 A/cm², logrando una recuperación del 94.72%. En cambio, la menor recuperación se obtiene a 2.3 voltios y 10.5 amperios, alcanzando solo el 70.83% de recuperación.
3. Se puede afirmar que, al determinar el tiempo óptimo (X_2), se logra una mejora en el rendimiento del proceso, garantizando una recuperación de oro. En conclusión, se establece que el tiempo eficiente para este proceso es de 2.5 horas, lo que permite alcanzar una recuperación del oro del 94.72%.
4. Establecer una concentración adecuada de oro en la solución cianurada es fundamental para maximizar la eficiencia en la extracción del oro. En este sentido, se concluye que el grado de concentración (X_3) como se indica en el modelo matemático, influye significativamente en la recuperación de oro. En la que se observa que a una concentración de oro de 72.3

mg/L y 3.0 V, se logra una recuperación de 94.72%. En cambio, a una concentración de oro de 12.65 mg/L y 2.3V, se logra una recuperación de 70.83%.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere realizar investigaciones que analicen variables clave como la temperatura de electrodeposición y el porcentaje de cianuro en la solución, con el objetivo de optimizar el proceso de electrodeposición directa.
2. Se recomienda revisar cuidadosamente el ensamblaje de los electrodos en la celda para prevenir choques eléctricos.
3. Se sugiere investigar el control de los gases generados durante la electrodeposición.
4. Se sugiere a la universidad y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, que implementen equipos en los laboratorios de electrometalurgia e hidrometalurgia para facilitar la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ballester , A. (2000). *Metalurgia extractiva: Procesos de obtencion* (Vol. Volumen II). Madrid-España: Sintesis S.A.
- Bustinza , V. (2019). *Estudio del uso de nitrato de plomo para optimizar la recuperacion de oro enn el proceso de cianuracion*. [Tesis de maestria, Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa]. repositorio Institucional UNSA.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/6de1fa10-4d00-4a9b-887f-1f8c4a6fa1f5/content>
- Caceres, G. (1989). *Fundamentos de cianuracion y precipitacion de oro y plata*. [Tesis de grado, Universidad de atacama Chile]. Repositorio Institucional UDA.
<https://repositorioacademico.uda.cl/handle/20.500.12740/16715/restricted-resource?bitstreamId=b6cc298c-cb55-4cc6-8bea-c5484668c94d>
- Campo García, G. A. (2015). *Evaluación Física y Química del Efecto de un Campo Magnético en la Electrodeposición de Ni en Acero Bajo Carbono*. [Tesis de grado, Universidad Veracruzana, Veracruz - México]. Archivo digital.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/087/47087236.pdf
- Chang, R. (2006). *Quimica general*. 6 ed. Mexico: McGraw-Hill. Interamericana.
- Chambi V., L. (2010). Recuperacion de oro y plata por el proceso electrolitico tipo Zadra. *Revista Institucional de ciencias, Tecnologica e innovacion Investig@ UMSA*, 31-49.
<http://revistasbolivianas.umsa.bo/pdf/rci/v1n1/v1n1a04.pdf>
- Cruz Ortega, S. (2016). *Evaluacion de los parametros para el diseño y construccion de una celda de elctroobtencion para recuperar oro*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno]. Repositorio academico UNA.
https://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/2994/Cruz_Ortega_Simon.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Diez Canseco, E. (1978). *Metalurgia del oro y la plata* . Lima-Peru. UNI.
- Domic Mihovilovic, E. (2001). *Lixiviacion de metales en: hidrometalurgia fundamentos, proceso y aplicaciones* . Santiago de chile. Null.
- Escobar Quispe, J. W., & Mendoza Perez, M. D. (2023). *Recuperacion de oro y plata por electrodeposicion de soluciones cianuradas de lixiviacion de minerales oxidados de baja concentracion en la zona de Rio Seco- Carabayllo*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima]. Repositorio academico UNMSM.
https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/20344/Escobar_qj.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Garcia C., M. (2020). *Estudio cinetico termodinamico de la recuperacion de oro y plata en soluciones acuosas de cianuro mediante procesos electroquimicos*. [Tesis de grado,

- Instituto Tecnológico de Saltillo, Mexico]. Repositorio UNISOM.
<https://saltillo.tecnm.mx/tecnologico/posgrado/doctoradomateriales/tesis/TESIS-DCI-2020-09.pdf>.
- Habashi, F. (1967). *Kynetics and meachanism of gold and silver dissolution in cynide solution*. Reino Unido: Montana college.
- Hernandez Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodologia de la investigacion: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mexico: McGraw Hill Interamericana Editores S.A.
- Mac Laurin, J. (1895). *Action of potassium cyanide solution on new zelaland gold and silver*. J. Chem. Soc.
- Marsden, J., & Lain House, C. (2006). *The chemistry of gold extraction*. Littleton - colorado: Ellis horwood limited.
- Morales , A. (2003). Electro- Metalurgia . *Apuntes para alumnos de Ingenieria Metalúrgica*. Aacademia.edu. <https://www.academia.edu/34341868/Electrometalurgia>
- Ojeda Villegas, S. D. (2020). *Estudio electroquimico de la electrodeposicion de oro y telurio de soluciones de cianuracion*. [Tesis de grado, Universidad Autonoma de Zacatecas, Mexico]. repositorio Institucional UAZ.
<http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/bitstream/20.500.11845/2007/1/Tesis%20SD%20Ojeda%21.pdf>.
- Pachi V., V. (2009). *Estudio del proceso de electrodeposicion de metales sobre una base polimerica*. [Tesis de grado, Escuela Politecnica Nacional, Ecuador]. Repositorio digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1391/1/CD-2112.pdf>
- Paulino A., L., & Salazar G., R. (2019). *Variables que influyen en la electrodeposicion del oro a partir de souciones cianuradas diluidas en la Empresa Ecoservicios e Ingenieria Limpia S.A.C- Puente Piedra-Lima*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Peru, Huancayo]. Repositorio academico UNCP.
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5777/T010_73476575_T.pdf?sequence=1.
- Peñate Zuniga, Y. (2004). *Desarrollo de correlaciones entre mineralogia y Extracion de oro en minerales auriferos* . Bucaramanga. UIS.
- Rojas Reyes , N. (2003). *Recuperacion de oro y plata desde residuos ferriticos mediante cianuracion* . Chile. Universidad de concepcion .
- Salcedo Lozano, A. (1987). Química. Perú. San Marcos.
- Tomala Andrade, C. E. (1998). *Análisis de un sistema de adsorcion y desorcion de oro de carbon activado y su electrodeposición*. Guayaquil. Ecuador.
- Vargas Gallardo, J. (1990). *metalurgia del oro y laa plata*. Lima-Peru. San Marcos.

- Velez Garcia, A. C. (2020). *Comparación entre el método de extracción de oro, cianuración por agitación y lixiviación por pilas en la planta de beneficio San Bartolo, Segovia Antioquia.* [Trabajo de investigación, Tecnológico de Antioquia, Colombia. Repositorio digital TDEA.
<https://dspace.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/942/Comparacion%20metodo%20oro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Zegarra Zegarra, G. E. (2018). *Optimización del proceso de desorción, electrodepositación de la planta La Joya mining S.A.C.* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/93ebad10-752c-472f-9bd6-80ab53548225/content>

ANEXOS

Matriz de consistencia

TÍTULO: “EVALUACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS PARA UNA ÓPTIMA RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES CIANURADAS EN LA ZONA DE SIJAHUI - COTABAMBAS - APURIMAC”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGIA
¿Se podrá recuperar oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación de la planta Nueva Bonanza- Caraveli – Arequipa?	Recuperar oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación de la planta Nueva Bonanza – Caraveli – Arequipa.	El método de electrodeposición directa logra recuperar más del 85% del oro de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación, lo que resalta la eficacia y viabilidad de este método en la extracción del metal precioso de la planta Nueva Bonanza- Caraveli- Arequipa.	DEPENDIENTE: RECUPERACIÓN DE ORO INDEPENDIENTES: - Potencial eléctrico. - Tiempo de electrodeposición. - Concentración de oro.	Tipo de investigación: Tecnológico - Experimental Nivel de investigación: Explicativo. Diseño: Experimental Diseño factorial 2^k Población: En esta investigación estará constituida por las soluciones cianuradas de la planta Nueva Bonanza- Caraveli- Arequipa. Muestra: 70 litros de solución cianurada de oro Técnicas de recolección de datos: -Observación, pruebas de laboratorio, análisis químico. Instrumentos de recolección de datos -Material bibliográfico, Minitab 19
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas		
<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál será el potencial eléctrico necesario para la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación? ¿Cuál será el tiempo más adecuado para lograr la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación? ¿Cuál será la concentración óptima de oro para lograr la recuperación eficiente por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación? 	<ul style="list-style-type: none"> □ Determinar el potencial eléctrico requerido para lograr la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación. □ Determinar el tiempo necesario para asegurar la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación. □ Determinar la concentración de oro que garantice la recuperación eficiente por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación. 	<ul style="list-style-type: none"> • El potencial eléctrico requerido es de 3 V, lo que permite lograr la recuperación eficiente de oro por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación. • La recuperación de oro es mejor al incrementar el tiempo de electrodeposición directa de soluciones cianuradas provenientes de las pilas de lixiviación, hasta alcanzar un tiempo ideal en el que se maximiza la eficiencia del proceso. • La concentración óptima de oro para lograr la recuperación por electrodeposición directa a partir de soluciones cianuradas de las pilas de lixiviación en la planta nueva Bonanza es de 72.30 mg/L de oro. 		

Nota. Elaboración propia

**ANEXO N° 01 REPORTE DE ANÁLISIS QUIMICO REALIZADO EN
LABORATORIOS**

	SOCIEDAD MINERA DE RESPONSABILIDAD LIMITADA “NUEVA BONANZA” QUEBRADA SECA- BONANZA- ATICO –CARAVELI-AREQUIPA LABORATORIO QUIMICO NUEVA BONANZA			
	INFORME DE ANÁLISIS QUIMICO			
A NOMBRE DE:		SOCRATES LEON SURCO		
ASUNTO:		ANÁLISIS QUIMICO DE AU		
TIPO DE MUESTRA:		SOLUCION CIANURADA		
FECHA DE ANÁLISIS:		19/09/2024		
FECHA DE REPORTE:		19/09/2024		
N°	FECHA DE ANÁLISIS	CODIGO	TIPO	LEY (MG/L)
1	19/09/2024	CBZ 01	SOLUCION CIANURADA	14.1
2	19/09/2024	CBZ 02	SOLUCION CIANURADA	80.4
3	15/09/2024	CBZ 03	SOLUCION CIANURADA	44.6


Ing. Cesar Eduardo Lucero Martínez
Reg. CIP. N° 168101
Jefe de laboratorio químico



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 28D9CD38

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00523

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002165	C-01 CAB 01	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	48,9

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico. CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA PE, 12/11/2024 11:47:21

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a"<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b"<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : C6D7AC14

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00521

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002166	C-02	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	72,3

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA PE. 12/11/2024 11:46:23

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 156CD02B5

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00470

Fecha de emisión: 11/10/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 11/10/2024
Realización: 11/10/2024

Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002172	C-03	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	12.65

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA PE. 11/10/2024 17:29:28

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a"<Valor numérico"<Limite de detección del método, "b"<Valor Numérico"<Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
via web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 5FDEFDAE

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00522

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024
Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901 Au mg/L
SS24002167	PRUEBA 1	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3,69

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA.PE. 12/11/2024 11:45:44

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a" < Valor numérico = Limite de detección del método, "b" < Valor Numérico = Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada: 35B9C254

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00528

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024

Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002173	PRUEBA 02	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3,45

..... Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426. Emisor de certificado: LLAMA.PE. 12/11/2024 11:47:21

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú,(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 1589B256

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00529

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024

Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901	
				Au	mg/L
SS24002174	PRUEBA 03	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2,75	

..... Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LUAMAPE, 12/11/2024 11:47:21

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú,(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 12DB42B6

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00530

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024

Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002175	PRUEBA 04	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2,08

..... Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico OIP 114426. Emisor de certificado: LLAMAPE. 12/11/2024 11:47:21

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú,(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 45B77CB6

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00531

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024

Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002176	PRUEBA 05	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8,21

..... Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426. Emisor de certificado: LLAMA.PE. 12/11/2024 11:47:21

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"<Valor numérico">=Limite de detección del método, ">Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : C1BA680D

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00525

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au
				mg/L
SS24002169	PRUEBA 06	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6,68

..... Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426. Emisor de certificado: LLAMAPE 12/11/2024 11:46:58

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.





Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 58B339B7

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00526

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024
Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002170	PRUEBA 7	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4,97

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426. Emisor de certificado: LLAMA.PE. 12/11/2024 11:45:20

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : B6BD589B

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00524

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002168	PRUEBA 08	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3,82

..... Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES, M.Sc., Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA, PE, 12/11/2024 11:46:11

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú,(054)443294 - (054)444582.





Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 168DB324

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00532

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024

Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(e) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002177	PRUEBA 09	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.56

..... Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 14426. Entor de certificado: LLAMAPE. 12/11/2024 11:47:21

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 2FB40921

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00527

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024
Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901	
				Au	mg/L
SS24002171	PRUEBA 10	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4	10

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLANAP, 12/11/2024 11:46:39

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú,(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada: 25DC55A56

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00533

Fecha de emisión: 12/11/2024

Página 1 de 1

Señores: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Dirección: AREQUIPA
Atención: ALDAIR ESPINOZA FUENTES
Recepción: 12/11/2024
Realización: 12/11/2024

Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24002178	PRUEBA 11	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3,78

..... Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426. Emisor de certificado: LLAMAPE, 12/11/2024 11:47:21

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.
Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú,(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web

ANEXO N° 02 FOTOGRAFÍAS TOMADAS DURANTE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Tejido de lana y armado de los cátodos y ánodos en la celda



Control del amperaje con multímetro



Rectificador de corriente

