



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Geológica

“RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE LA
MALAQUITA MEDIANTE LA ELECTRODEPOSICIÓN EN EL
CASERIO EL TINGO, DISTRITO DE HUALGAYOC,
CAJAMARCA-2020”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autores:

Jherald James Briones Castañeda

Nancy Noemí Linares Chilón

Asesor:

Ing. Mg. Miguel Ricardo Portilla Castañeda

Cajamarca - Perú

2020

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a Dios, a nuestros padres y familiares por enseñarnos a crecer y creer en nosotros mismos, también a nuestros docentes, por su apoyo y guía, por ser las bases que nos ayudaron a llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTO

A nuestra alma mater, Universidad Privada del Norte por habernos aceptado ser parte de ella y por los años invertidos en nuestra formación profesional, así como también a los diferentes docentes de la Escuela de Ingeniería Geológica por sus conocimientos impartidos desde el inicio de nuestros estudios superiores.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Realidad problemática.....	11
1.2 Formulación del problema.....	15
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo general.....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 Hipótesis.....	15
1.4.1 Hipótesis general.....	15
1.4.1 Hipótesis específicas.....	16
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	16
2.1 Tipo de Investigación.....	16
2.2 Población y muestra.....	16
2.3 Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	17
2.4 Procedimiento.....	18
RESULTADOS	19
3.1 Aspectos generales.....	19
3.1.1 Ubicación.....	19
3.1.2 Accesibilidad.....	20
3.1.3 Clima y vegetación.....	21
3.2 Geología.....	22
3.2.1 Geomorfología.....	22
3.2.2 Estratigrafía.....	24
3.2.3 Depósitos cuaternarios.....	28
3.2.4 Geología Estructural.....	30
3.3 Metalogenia.....	32
3.3.1 Cobre.....	34

3.3.2 Malaquita.....	35
3.4 Toma de Muestras de Malaquita.....	36
3.4.1 Depósito Cerro Jesús.....	36
3.4.2 Estaciones de Muestreo.....	37
3.5 Proceso de Electrodeposición.....	39
3.5.1 Hidrometalurgia.....	39
3.6 Análisis mediante la electrodeposición.....	41
3.6.1 Análisis de la muestra M-01.....	42
3.6.2 Análisis de la muestra M-02.....	44
3.6.3 Análisis de la muestra M-03.....	46
3.7 Análisis de recuperación.....	48
3.7.1 Cálculo de Tonelaje y Valor Económico de la Reserva.....	50
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS.....	55
ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Coordenadas UTM-WGS84 de los vértices de la zona de estudio..... 21
Tabla 2	Ruta a la zona de estudio. 22
Tabla 3	Propiedades Físico-Químicas del cobre. 35
Tabla 4	Propiedades Físico-Químicas de la malaquita..... 36
Tabla 5	Coordenadas UTM-WGS84 de la Estación N° 01. 38
Tabla 6	Coordenadas UTM-WGS84 de la Estación N° 2. 38
Tabla 7	Coordenadas UTM-WGS84 de la Estación N° 03. 39
Tabla 8	Resultados del Análisis Químico de las muestras. 50
Tabla 9	Datos de parámetros y materiales utilizados. 50
Tabla 10	Resultados del Proceso de Electrólisis. 50
Tabla 11	Recuperación de cobre (%), en función de la Ley..... 51
Tabla 12	Recuperación de cobre (gr), en función de la Ley.....51
Tabla 13	Promedio de recuperación (%) de cobre de las muestras analizadas.51

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Ubicación geográfica de la zona de estudio. Fuente: Google Earth (2020).	21
<i>Figura 2.</i> Accesibilidad a la zona de estudio. Fuente: Google Earth (2020).	22
<i>Figura 3.</i> Vegetación de la zona de estudio. Fuente: Propia (2020).	23
<i>Figura 4.</i> Planicie al costado del Río Hualgayoc. Fuente: Propia (2020).	24
<i>Figura 5.</i> Lomadas al margen izquierdo de la zona de estudio. Fuente: Propia (2020).	24
<i>Figura 6.</i> Zona de laderas a lo largo del Río Hualgayoc. Fuente: Propia (2020).	25
<i>Figura 7.</i> Escarpe ubicado al sur de Hualgayoc. Fuente: Propia (2020).	25
<i>Figura 8.</i> Fm. Inca, la cual infrayace a la Fm. Chúlec. Fuente: Propia (2020).	26
<i>Figura 9.</i> Rocas calizas de color marrón intercaladas con lutitas calcáreas. Fuente: Propia (2020).	27
<i>Figura 10.</i> Se observa estratos de calizas bituminosas. Fuente: Propia (2020).	28
<i>Figura 11.</i> Calizas gris azuladas con presencia de venillas de calcita. Fuente: Propia (2020).	28
<i>Figura 12.</i> Dacitas del intrusivo Cerro Jesús. A (roca alterada por fluidos hidrotermales). B (roca de textura porfirítica con presencia de óxidos). Fuente: Propia (2020).	29
<i>Figura 13.</i> Depósito aluvial, el cual presenta cantos heterogéneos de forma estratiforme. Fuente: Propia (2020).	30
<i>Figura 14.</i> Depósito coluvial compuesto por fragmentos gruesos y angulares el cual está asociado a masas inestables. Fuente: Propia (2020).	31
<i>Figura 15.</i> Vista del anticlinal ubicado en el cerro Negritos. Fuente: Propia (2020).	32
<i>Figura 16.</i> Falla normal ubicada en el intrusivo diorítico del proyecto cerro corona. Fuente: Propia (2020).	32
<i>Figura 17.</i> Dalclasas ubicada en el cerro Negritos. Fuente: Propia (2020).	33
<i>Figura 18.</i> Limonita, Calcopirita y afloramiento de Malaquita en el intrusivo del cerro Jesús.	34
<i>Figura 19.</i> Yacimiento tipo pórfido (cerro Jesús). Fuente: Propia (2020).	37
<i>Figura 20.</i> Yacimiento tipo pórfido (cerro Jesús). Fuente: Propia (2020).	37
<i>Figura 21.</i> Muestra de malaquita obtenida en la estación N° 01. Fuente: Propia (2020). ..	38
<i>Figura 22.</i> Muestra de malaquita obtenida en la estación N° 02. Fuente: Propia (2020). ..	39
<i>Figura 23.</i> Muestra de malaquita obtenida en la estación N° 03. Fuente: Propia (2020). ..	39
<i>Figura 24.</i> Elementos que intervienen en un proceso de electrodeposición. Fuente: Propia (2020).	40
<i>Figura 25.</i> Diagrama de bloques con las etapas a seguir para realizar el Proceso de Electrólisis. Fuente: Propia (2020).	41
<i>Figura 26.</i> Chancado, secado y tamizado del mineral.	42
<i>Figura 27.</i> Lixiviación del mineral.	42
<i>Figura 28.</i> Toma del peso de la muestra, ánodo y cátodo. Fuente: Propia (2020).	43
<i>Figura 29.</i> Aplicación de solvente (H ₂ SO ₄) a la muestra de malaquita. Fuente: Propia.	43
<i>Figura 30.</i> Proceso de electrólisis para la M-01. Fuente: Propia (2020).	44
<i>Figura 31.</i> Secado del ánodo, cátodo y papel filtro obtenidos después de la electrólisis. Luego se procede a tomar el peso de los mismos. Fuente: Propia (2020).	44
<i>Figura 32.</i> Tabla de resultados para la M-01. Fuente: Propia (2020). Fuente: Propia (2020).	45

<i>Figura 33.</i> Toma del peso de la muestra, ánodo y cátodo. Fuente: Propia (2020).....	45
<i>Figura 34.</i> Aplicación de solvente (H_2SO_4) a la muestra de malaquita. Fuente: Propia. ...	46
<i>Figura 35.</i> Proceso de electrólisis para la M-02. Fuente: Propia (2020).....	46
<i>Figura 36.</i> Secado del ánodo, cátodo y papel filtro obtenidos después de la electrólisis. Luego se procede a tomar el peso de los mismos. Fuente: Propia (2020).....	47
<i>Figura 37.</i> Tabla de resultados para la M-02. Fuente: Propia (2020).	47
<i>Figura 38.</i> Toma del peso de la muestra, ánodo y cátodo. Fuente: Propia (2020).....	48
<i>Figura 39.</i> Aplicación de solvente (H_2SO_4) a la muestra de malaquita. Fuente: Propia. ...	48
<i>Figura 40.</i> Proceso de electrólisis para la M-03. Fuente: Propia (2020).....	48
<i>Figura 41.</i> Secado del ánodo, cátodo y papel filtro obtenidos después de la electrólisis. Luego se procede a tomar el peso de los mismos. Fuente: Propia (2020).....	49
<i>Figura 42.</i> Tabla de resultados para la M-03. Fuente: Propia (2020).....	49
<i>Figura 43.</i> Precio del Cu en $\phi US\$/lb$ en el mes de Noviembre del 2020. Fuente: Portal Minero.	53
<i>Figura 44.</i> Reconocimiento y toma de datos geológicos de la zona de estudio.....	61
<i>Figura 45.</i> Recolección de muestras mediante el método de astillado.	61
<i>Figura 46.</i> Afloramiento de malaquita en las paredes de los socavones presentes en la zona de estudio.....	62
<i>Figura 47.</i> Afloramiento de malaquita en las paredes de los socavones presentes en la zona de estudio.....	62
<i>Figura 48.</i> Calcopirita, Limonita, y formación de carbonatos en la zona de estudio.....	62
<i>Figura 49.</i> Muestra M-01y M-02 antes de ser trituradas.	63
<i>Figura 50.</i> Realizando pruebas para obtener una mayor recuperación de cobre.	63
<i>Figura 51.</i> Análisis mediante el Proceso de Electrólisis de la M-01 y M-02.	63
<i>Figura 52.</i> Cátodos con contenido de cobre después del análisis mediante el Proceso de Electrólisis.	64
<i>Figura 53.</i> Depósito cerro Jesús.....	64

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación (1)	52
Ecuación (2)	53

RESUMEN

La zona de estudio se encuentra en el norte de la cordillera de los andes del Perú, en el distrito y provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca. Es un distrito minero complejo que hospeda diferentes estilos de mineralización metálica oro, cobre, plata, plomo y zinc. Por ende, se aplican diferentes métodos de extracción, en muchos casos con consecuencias negativas para el medio ambiente. Con el presente trabajo se propone un método alternativo de recuperación de minerales oxidados de cobre, para lo cual aplicaremos la electrodeposición para una buena recuperación de cobre y afable con el medio ambiente. Y con ello dando a conocer la importancia de aplicar un método para la extracción de minerales. Para ello se realizaron 03 estaciones de muestreo, de las cuales se obtuvieron 03 muestras de malaquita. Estas fueron analizadas mediante la electrodeposición tomando en cuenta parámetros como el tiempo, voltaje y granulometría. Como resultado final se obtuvo un 98 % de recuperación de Cu. También se calculó el tonelaje y valor económico de la reserva.

Palabras clave: Extracción, Electrodeposición, Cobre, Recuperación, Parámetros.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El sector minero es la columna vertebral de la economía del Perú, teniendo en cuenta que las regiones donde se realiza esta actividad extractiva se benefician con la transferencia de canon minero y el aporte directo de recursos. Siendo el cobre el mineral más exportado del país (Dammert, 2007).

La región Cajamarca es una de las regiones del Perú más importante e interesante desde el punto de vista geoeconómico; se debe principalmente a las características metalogenéticas que se encuentran asociadas a los diferentes tipos de depósitos que se han emplazado en la región (INGEMENT, 2018).

En la zona de estudio se están aplicando métodos de extracción de minerales poco afables con el medio ambiente, siendo mayor el riesgo de contaminación en épocas de lluvia. Es por ello que buscar otras alternativas de extracción es muy importante para mitigar la contaminación.

La extracción del cobre a partir de sus minerales oxidados, se ha generalizado por vía hidrometalúrgica con ácido sulfúrico por razones económicas y su gran flexibilidad en el manipuleo de materiales y equipos (Habashi, 1980). Razones suficientes para ser seleccionado; ya que los procesos pirometalúrgicos tienen costos de inversión muy altos (Herrera, 2010).

La industria minera favorece la extracción de minerales oxidados como la malaquita utilizando ácido sulfúrico y electrolisis, además se puede usar en menas con tan sólo un 0,1% de cobre, razón por la cual la extracción por estos procesos está ganando importancia, ya sean por razones económicas y su gran flexibilidad en el de materiales y equipos (Chávez Gutiérrez, 2019).

Los procesos hidrometalúrgicos como una de las alternativas de beneficio de minerales oxidados es relativamente reciente y ha tomado gran importancia debido a su capacidad para procesar mineral a precios competitivos en comparación con otros métodos de procesamiento (Herrera, 2010).

Herrera (2010) en su tesis “Estudio de la lixiviación del cobre a partir de la Malaquita mediante soluciones de ácido cítrico”, propone el uso de soluciones diluidas de ácido cítrico, por ser este un ácido biodegradable; ya que se encuentra principalmente en el zumo de limón, y en otras frutas de consumo humano por lo que asume que no debe contaminar el medio ambiente, constituyéndose entonces este reactivo en una alternativa en la extracción de cobre a partir de la malaquita por proceso hidrometalúrgico. Presenta como la conclusión más relevante en función de los objetivos trazados que la variable tiempo de lixiviación es la de mayor influencia sobre el proceso, seguido de la granulometría del mineral y concentración del ácido cítrico en la extracción del cobre a partir de la malaquita.

Lingan & Lucano (2014) en su tesis “Influencia del pH y la concentración del ácido cítrico en la lixiviación por agitación de minerales oxidados de cobre tipo Crisocola del distrito de Salpo - La Libertad”, tuvo por finalidad encontrar las variables

influyentes en la extracción de cobre. El trabajo de investigación realizado presenta dos variables: pH y concentración de ácido cítrico. El mineral de estudio fue Crisocola procedente del distrito de Salpo – La Libertad, se llegó al siguiente resultado: 90.69%, siendo éste el mayor porcentaje de extracción de cobre a una concentración de ácido cítrico 0.4 M y pH 3.0, demostrando que las dos variables de estudio influyen significativamente, y que sus interacciones también tienen diferencia significativa sobre la extracción del mineral.

Roldan (2015) en su tesis “Lixiviación Amoniacal del Mineral de Cobre Tipo Crisocola Utilizando Nitrato de Amonio”, menciona que en la investigación realizada por Bingöl y Canbazoglu (2004) en la lixiviación de minerales oxidados de cobre, la malaquita se disuelve fácilmente con ácido sulfúrico, produciendo altas recuperaciones de cobre. Una disolución muy rápida inicial con recuperación de cobre del 85% en 15 minutos y después de 60 min una recuperación del 98, 6%.

García & Guzmán (2016) en su tesis “Influencia del tamaño de partícula de crisocola, concentración de ácido sulfúrico y tiempo de agitación en la recuperación de cobre mediante lixiviación por agitación”, obtuvieron como resultado 97.51 % de extracción de cobre a un tamaño de partícula malla # 100 y concentración de ácido sulfúrico 0.5M.

Soto & Solís (2012) en su tesis “Caracterización y optimización de parámetros de SX/EW para la obtención de cobre electrolítico a nivel laboratorio”, en este trabajo se avalúo purificar una solución lixiviada de cobre a partir de calcina, para luego electro depositarla con el objetivo de caracterizar los parámetros de lixiviación y la obtención

de cobre. Para ello tuvieron como muestras sulfuros de cobre (calcopirita, pirita escalerita), de las cuales se obtuvo un porcentaje de 99,969 % de cobre electrodo.

Chávez (2019) en su tesis “Recuperación de Cobre a partir de la Malaquita Utilizando Soluciones de Tartrato Mediante Proceso de Lixiviación, Puno 2017”, propone como objetivos evaluar la influencia de soluciones de tartrato en la recuperación de cobre a partir de la malaquita en comparación al ácido sulfúrico. Como metodología se consideró 1170 g de mineral -3/8” en columnas de PVC de 4” de diámetro para cada prueba y como variables independientes tasa de riego, tiempo y concentración de tartrato según diseño experimental; Los resultados indican recuperaciones de 1.039 g de cobre por litro de solución en 5 días de proceso, 26.3% del total recuperado, y 2.909 g/l en 32 días, 73.7% del total recuperado, alcanzando 3.948 g/l en 37 días de proceso, Concluyendo que la solución de tartrato además de ser una especie biodegradable y amigable con el medio ambiente se presenta como una nueva alternativa tecnológica para el procesamiento de cobre con lixiviación selectiva.

La electrodeposición es un procedimiento electroquímico mediante el cual se logra cubrir una pieza con una fina capa de determinado metal. Para lograrlo se sumerge la pieza a cubrir en una solución electrolítica que contiene los iones del metal que formará la capa. En este procedimiento rige un proceso denominado electrólisis es un principio que procede de dos radicales, electro que hace referencia a electricidad y lisis que significa ruptura. Es uno de los principales métodos químicos de separación. El proceso consiste en aplicar energía eléctrica a través de un electrolito (sustancia iónica en solución), entre dos electrodos conductores denominados ánodo y cátodo. Cuando conectamos los electrodos a una fuente de energía (corriente eléctrica), el electrodo

que se une al polo positivo es el ánodo y el electrodo que se une al polo negativo es el cátodo. (Díaz, 2008)

Con el presente trabajo se propone un método alternativo de recuperación de minerales oxidados de cobre, para lo cual aplicaremos la electrodeposición para una buena recuperación de cobre y afable con el medio ambiente. Y con ello dando a conocer la importancia de aplicar un método para la extracción de minerales. También proveerá información para investigaciones futuras de la zona estudiada.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el resultado del análisis de la recuperación de cobre a partir de la malaquita mediante la electrodeposición en el caserío El Tingo, Distrito de Hualgayoc, Cajamarca-2020?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la cantidad de cobre recuperado a partir de la malaquita mediante la electrodeposición en el caserío El Tingo, Distrito de Hualgayoc, Cajamarca-2020.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del tiempo en la recuperación de cobre a partir de la malaquita mediante la electrodeposición en el caserío El Tingo, Distrito de Hualgayoc, Cajamarca-2020.

- Evaluar el efecto del amperaje en la recuperación de cobre a partir de la malaquita mediante la electrodeposición en el caserío El Tingo, Distrito de Hualgayoc, Cajamarca-2020.
- Determinar el tonelaje de la zona mineralizada en el caserío El Tingo, Distrito de Hualgayoc, Cajamarca-2020.
- Describir los resultados de forma detallada.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

La electrodeposición permite una recuperación mayor a 98% de cobre a partir de la malaquita.

1.4.2. Hipótesis específicas

- La recuperación de cobre mediante la electrodeposición depende de factores como el tiempo y amperaje.
- El nivel de confianza de recuperación de cobre mediante la electrodeposición será mayor a 98%.
- Existe gran cantidad de toneladas de zona mineralizada y de alta ley.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

Según el propósito el tipo de esta investigación es aplicada porque los resultados obtenidos tuvieron el propósito de resolver el problema de investigación; con un nivel explicativo porque se encontró los motivos por los cuales ocurren los hechos del fenómeno estudiado, con un enfoque cuantitativo porque se centró en el análisis y medición numérica de los datos recogidos para contestar la pregunta de investigación y con un diseño experimental porque se manipuló los parámetros para luego analizarlos. (Oblitas, 2018)

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

- La población es el área mineralizada del caserío El Tingo.
- La muestra son las 3 estaciones de muestreo de malaquita.

Materiales

Cámara fotográfica, protactor-Escala 1/5000, brújula Brunton Azimutal, GPS Navegatorio Garmin Mal 60 Cx, fluxómetro (50m) y Fluxómetro (5m), brújula, picota geológica, lupa, lápiz de dureza Carbide (Rayador), bolsas de muestreo, lapiceros y lápices, mapa topográfico, geológico y metalogenético, imagen satelital, laptop, instrumentos de laboratorio y reactivos.

Instrumentos

Fichas de observación, Ficha de registro de datos y Libreta de campo.

Métodos

Para la ejecución del trabajo se realizaron los siguientes métodos:

Análisis de información obtenida, Cartografiado Geológico, Recolección de datos y Toma de fotografías.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Técnicas

- Observación

Los instrumentos a emplear serán la ficha de observación y libreta de campo.

- Análisis documental

Los instrumentos a emplear será la ficha de registro de datos.

Análisis de Pruebas

El análisis e interpretación de datos de las pruebas serán realizados en el laboratorio de PAESFO INGENIERÍA SRL – Cajamarca, y en gabinete mediante el uso de los siguientes softwares: ArcGis 10.3 y Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint).

2.4. Procedimiento

Etapas de Gabinete

Esta etapa consistió en la recopilación de información como: búsqueda bibliográfica, investigaciones, tesis y estudios relacionados con Hidrometalurgia, asociados a factores detonantes como Proceso de Electrólisis y lixiviación.

Para conocer sobre el área de estudio usamos la plataforma del INGEMMET y el Boletín sobre Geología de los cuadrángulos de Cajamarca y Chota.

Además, descargamos imágenes satelitales del Google Earth para el plano de ubicación; también, se elaboraron los planos de la zona para usarlos en campo, empleando el software ArcGIS 10.3 y la plataforma del GEOCATMIN para descargar los shapefiles de la concesión; realizamos un plano topográfico y dos geológicos con escala en 1:15000 para el plano regional y 1:4000 para el plano local.

Etapas de Campo

La segunda etapa comprendió en realizar un cartografiado geológico, una descripción geomorfológica y una caracterización de los afloramientos. Logrando un análisis comparativo y descriptivo, permitiendo definir las condiciones mineralógicas.

Asimismo, se realizó muestreos en puntos estratégicos de zona de estudio. Específicamente se tomó 03 muestras de malaquita mediante el muestreo por astillado. El cual consiste en extraer una serie de astillas o fragmentos de todo el ancho de la veta, siguiendo una línea imaginaria que correspondería al eje de un muestreo por canales.

Etapas de laboratorio

La tercera etapa consistió en analizar las muestras tomadas en campo mediante la electrodeposición. Para lo cual se tuvo en cuenta los parámetros (tiempo, voltaje, granulometría).

Etapas Final de Gabinete

Con la información obtenida en las etapas anteriores, se procedió a analizar, procesar e interpretar. Se utilizaron softwares como: ArcGis 10.3; con los cuales se logró obtener los mapas temáticos y resultados finales. Finalmente se culminó con la elaboración de la tesis.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1 ASPECTOS GENERALES

3.1.1 UBICACIÓN

Geográfica

Geográficamente la zona de estudio se encuentra en la cordillera occidental de los andes del Perú, al norte de la ciudad de Cajamarca, en el distrito de Hualgayoc, provincia de Hualgayoc y departamento de Cajamarca. Donde destacan los principales proyectos mineros como son: Minera Gold Fields, minera San Nicolás y Colquirrumi, etc. Con coordenadas UTM: DATUM WGS84, ZONA – 17S.

Política

Políticamente se encuentra en:

- ✓ Departamento: Cajamarca
- ✓ Provincia: Hualgayoc
- ✓ Distrito: Hualgayoc

Las coordenadas de los vértices de la zona de estudio se especifican en la siguiente Tabla.

Tabla 1

Coordenadas UTM-WGS84 de los vértices de la zona de estudio.

VÉRTICE	ESTE	NORTE
V1	764000	9253000
V2	765500	9253000
V3	765500	9251500
V4	764000	9251500

Fuente: Propia (2020).



Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Fuente: Google Earth (2020).

3.1.2 ACCESIBILIDAD

El acceso a la zona de estudio se realiza desde la ciudad de Cajamarca, en el paradero a Bambamarca, ubicado en el Jr. Angamos #1121; con un tiempo aproximadamente de 2 horas en auto mediante una vía asfaltada.

Tabla 2
Ruta a la zona de estudio.

RUTA TERRESTRE	DISTANCIA(Km)	TIEMPO (h)	TIPO DE VÍA
Cajamarca - Hualgayoc	88	2	Asfaltada
Hualgayoc - Zona de Estudio	0.3	1/4	Camino de herradura

Fuente: Propia (2020).



Figura 2. Accesibilidad a la zona de estudio. Fuente: Google Earth (2020).

3.1.3 CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima de la zona de estudio es semejante al de cualquier otra parte de los Andes Peruanos, con una estación seca de abril a septiembre y la estación húmeda de octubre a marzo. Durante la estación seca, en altitudes mayores de 3600 m.s.n.m, los días son templados pero la temperatura de muchas noches baja al punto de congelación o bajo cero. Durante la estación húmeda, los días son más frescos y las noches frías.

La cobertura vegetal está caracterizada por pastos locales, de los cuales el más común es el ichu. Algunas laderas y valles muestran arbustos bajos o arboles pequeños, tales como el quinal.



Figura 3. Vegetación de la zona de estudio. Fuente: Propia (2020).

3.2 GEOLOGÍA

Las unidades geológicas fueron cartografiadas tomando como base los estándares del INGEMMET.

3.2.1 GEOMORFOLOGÍA

Geomorfológicamente la zona de estudio presenta las siguientes unidades:

Planicies

Estas geoformas están presentes en la zona y se encuentran en altitudes aproximadas que van desde 3250 m.s.n.m. hasta 3400 m.s.n.m. Corresponde a zonas cuya superficie presentan ligeras ondulaciones, la mismas que se localizan ocupando algunas partes de la zona de estudio. La pendiente dominante fluctúa entre el rango de 0° a 8°.



Figura 4. Planicie al costado del Río Hualgayoc. Fuente: Propia (2020).

Lomadas

Estas geofomas son elevaciones del terreno de similar altura que las colinas, pero con cimas más amplias, redondeadas y alargadas, y cuyas pendientes están entre 8° y 20° .

Las mismas que no deben pasar los 150 a 200 m de altura.



Figura 5. Lomadas al margen izquierdo de la zona de estudio. Fuente: Propia (2020).

Laderas

Las colinas presentes en el área mapeada son igualmente elevaciones naturales del terreno, las mismas que presentan un desnivel inferior a 300 m, cuyas laderas se inclinan en promedio con valores están entre los 20° a 50° de pendiente. Estas

geoformas corresponden a zonas que se distribuyen de manera dispersa en casi toda la zona mapeada.



Figura 6. Zona de laderas a lo largo del Río Hualgayoc. Fuente: Propia (2020).

Escarpes

Son sectores de topografía muy accidentada conformada por laderas montañosas moderadamente ramificadas estructuralmente plegadas donde aún se conservan rasgos de las estructuras originales a pesar de haber sido afectadas por procesos de denudación (anticlinal). La pendiente dominante corresponde al rango mayor al 50°.



Figura 7. Escarpe ubicado al sur de Hualgayoc. Fuente: Propia (2020).

3.2.2 ESTRATIGRAFÍA

El distrito minero está compuesto, por la secuencia de rocas sedimentarias clásticas y calcáreas del Cretáceo Inferior-superior (Grupo Goyllarisquizga, Formaciones Inca, Chúlec, Pariatambo y Yumagual), que fueron afectadas por los eventos compresivos de la orogenia andina (Fase Peruana, Inca, Quechua I y Quechua II).

Formación Inca (ki – in)

Esta formación infrayace a la formación Chúlec. Consta de la intercalación de areniscas calcáreas, lutitas ferruginosas dando en superficie un matiz amarillento. En los contactos con el intrusivo dacítico y los diferentes sills presentes en la zona por lo que es difícil diferenciarlas de las rocas ígneas.



Figura 8. Fm. Inca, la cual infrayace a la Fm. Chúlec. Fuente: Propia (2020).

Formación Chulec (ki – chu)

Su mayor exposición se da a lo largo de la carretera, desde el campamento de Colquirrumi hasta el caserío de Apan Bajo. Esta formación tiene aproximadamente 300-350 m de calizas nodulares y margas de color marrón crema, intercaladas con

niveles delgados de lutitas calcáreas, los estratos varían en su potencia desde 20 – 80 cm de grosor. Los sedimentos que componen esta formación son altamente blandos.



Figura 9. Rocas calizas de color marrón intercaladas con lutitas calcáreas. Fuente: Propia (2020).

Formación Pariatambo (ki – pa)

Esta formación aflora en las partes más altas del distrito de Hualgayoc, la misma que se puede observar a lo largo del anticlinal de Los Negritos. Tiene aproximadamente entre 200 – 300 m de espesor. Presenta niveles delgados a medios de calizas bituminosas de color gris oscuro, intercalado con niveles delgados de lutitas negras, su estratificación es rítmica y en general las capas más masivas están intemperizadas en un color gris claro, mientras que las interestratificaciones de lutitas y calizas arcillosas, que son de color gris a negro, afloran en pequeños estratos debido a que se desintegran con facilidad formando suelos los cuales están cubiertos por vegetación. Las mismas que son más resistentes que las calizas de la formación Chúlec.



Figura 10. Se observa estratos de calizas bituminosas. Fuente: Propia (2020).

Formación Yumagual (ks – yu)

La mayor exposición de esta formación se da hacia la zona sur del distrito, en la carretera del paso Coymolache. En la zona se pudo observar calizas puras, calizas nodulares grises azuladas intercaladas con margas, así mismo la presencia de venillas de calcita debido a la cercanía con un cuerpo caliente que vuelve en disolución a las calizas formándolas y distribuyéndolas irregularmente, dichas calizas se pudieron notar con una potencia que oscila entre 400 - 500 m.



Figura 11. Calizas gris azuladas con presencia de venillas de calcita. Fuente: Propia (2020).

Rocas Intrusivas

El intrusivo que se encuentra expuesto en el Cerro Jesús y el Socavón Real, está compuesto básicamente por rocas dacíticas de color blanco, pardo amarillento o gris, las mismas que presentan una textura porfirítica. Toda esta roca ha sido alterada por fluidos hidrotermales, por lo que los minerales ferromagnesianos han sido alterados a sericita o arcilla y la matriz silicificada o sericitizada.

Al microscopio esta roca consiste en un 80 – 85 % de sericita, arcilla y cuarzo secundario y 15 % de fenocristales de cuarzo. Basándonos en el tipo de feldespatos de las rocas más frescas y en comparación con otras rocas intrusivas del distrito, se estima que el intrusivo del Cerro Jesús es un pórfido granodiorítico, llegando en ciertos lugares a monzonita y en otros a latita de cuarzo.

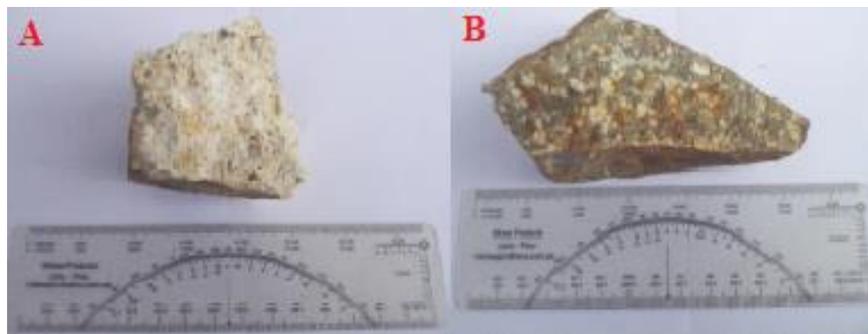


Figura 12. Dacitas del intrusivo Cerro Jesús. A (roca alterada por fluidos hidrotermales). B (roca de textura porfirítica con presencia de óxidos). Fuente: Propia (2020).

3.2.3 DEPÓSITOS CUATERNARIOS

Estos depósitos están presentes en las márgenes del cañón del río Hualgayoc, así como también en las laderas de los cerros José y María presentes en la subcuenca.

Depósitos Aluviales (Qh – al)

Estos materiales han sido transportados y depositados por el río Hualgayoc. Presentan cantos subredondeados los cuales están distribuidos con una cierta clasificación granulométrica, esto debido al tamaño de los granos, desde los fragmentos más gruesos hasta los más finos como son: arenas, arcillas y limos de diferentes coloraciones debido a la contaminación de sustancias minerales disueltas por los flujos de agua, así como por la lixiviación de los minerales extraídos en la zona, los mismos que se encuentran en la margen SW de río Hualgayoc.



Figura 13. Depósito aluvial, el cual presenta cantos heterogéneos de forma estratiforme. Fuente: Propia (2020).

Depósitos Coluviales

Estos depósitos están asociados a masas inestables y están compuestos principalmente por fragmentos angulares gruesos y heterogéneos, debido al poco transporte que estos han tenido, los mismos que presentan un color negruzco a amarillento, y estos fragmentos están sostenidos por una matriz de composición variable con presencia de arenas, arcillas y limos y distintas cantidades.



Figura 14. Depósito coluvial compuesto por fragmentos gruesos y angulares el cual está asociado a masas inestables. Fuente: Propia (2020).

3.2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Estructuralmente el área estudiada ha sido afectada por esfuerzos compresivos de la orogenia andina (Fase Peruana, Inca, Quechua I y Quechua II) generando pliegues y fallas de orientación andina NW-SE (Anticlinal Negritos, Bambamarca y Apan y sinclinal Moran), fallas trasandina NE-SW (Fallas Tingo y Hualgayoc) y fallas tensionales de orientación N-S y E-W, que conjugadas facilitaron el ascenso de magmas calcoalcalinos.

Pliegues

El pliegue principal que se puede observar en el área mapeada es el anticlinal que está ubicado en el Cerro los Negritos y se lo puede apreciar aflorando nuevamente en el Caserío de Pilacones, el cual es un pliegue asimétrico y monoclinal. El mismo que está formado sobre el Grupo Goyllarisquizga del Cretáceo Inferior.

Esta estructura presenta un buzamiento de 7° en el flanco SW que va desde la margen izquierda del río Hualgayoc y un buzamiento de 40° en el flanco NE, que va hasta el Caserío de la Tahona Alta.



Figura 15. Vista del anticlinal ubicado en el cerro Negritos. Fuente: Propia (2020).

Fallas

Estas estructuras las podemos observar principalmente en las rocas sedimentarias presentes en el área de estudio, así como también algunas estructuras están presentes en el intrusivo diorítico del proyecto cerro corona cuyas direcciones principales son: $N73^{\circ} 65^{\circ}SW$ $N130^{\circ} 77^{\circ}$ $N290^{\circ} 60^{\circ}$ $N125^{\circ} 86^{\circ}$ $N225^{\circ} 61^{\circ}$.



Figura 16. Falla normal ubicada en el intrusivo diorítico del proyecto cerro corona. Fuente: Propia (2020).

Dialclasas

Estas discontinuidades menores por lo general presentan espaciamientos de 10 cm a 40 cm, aperturas menores a 1 mm, paredes ligeras a moderadamente rugosas, rellenos de carbonatos y óxidos con espesores generalmente menores de 5 mm, en ciertos casos algo mayores llegando hasta 2 cm, moderadamente intemperizadas, y condiciones de agua subterránea de secas a húmedas.



Figura 17. Dalclasas ubicada en el cerro Negritos. Fuente: Propia (2020).

3.3 METALOGENIA

El Distrito Minero Hualgayoc es un yacimiento muy complejo. La mayor ocurrencia de depósitos minerales del distrito, aparentemente, está ligada a la reactivación magmática post fase Quechua I (17 Ma). Este evento reactivó las fallas existentes y tuvieron lugar múltiples pulsos de intrusión, vulcanismo y de actividad hidrotermal, con el desarrollo de los depósitos de Cerro Corona 14.4 - 13.3 Ma, Quijote, Cerro las Gordas 12.7 Ma, Cerro Jesús 14.3 - 10.3 Ma, Cerro San José 13 Ma, Los Mantos - Lola 13.4 Ma, Tajo el Zorro, Titán y finalmente Tantahuatay 12.6 - 12.4 Ma. (Roncal, 2018)

Los estilos de mineralización comunes son: stockwork y diseminado en depósito tipo pórfido, diseminado en skarn, vetas y mantos de reemplazamiento en depósitos epitermales de intermedia y alta sulfuración en forma diseminada. (Roncal, 2018).



Figura 18. Limonita, Calcopirita y afloramiento de Malaquita en el intrusivo del cerro Jesús.

Fuente: Propia (2020).

3.3.1 COBRE

Elemento químico con número atómico 29 y se representa con el símbolo químico Cu. Considerado como un metal de transición.

El mineral de cobre se presenta en pórfidos, en las grandes cadenas montañosas y pueden distinguirse tres zonas:

- Zona lixiviada u oxidada con una ley de cobre inferior al 0,5%.
- Zona de sulfuros secundarios con leyes de cobre entre 1-5%.
- Zona de sulfuros primarios con una ley del 1%.

Propiedades Físico-Químicas del cobre

Tabla 3
Propiedades Físico-Químicas del cobre.

COBRE	
Color	Rojizo
Brillo	Metálico
Dureza	2,5 - 3
Raya	Rojizo
Resistividad Eléctrica	0.28 °C cm/w
Conductividad Eléctrica	8.6 W/cm °C
Capacidad Calorífica Específica	6.8 J/ cm ² °C
Electronegatividad	1.9
Punto de Ebullición	2595 °C
Punto de fusión	1083 °C
Densidad	8.96 g/cm ³

Fuente: (Fenoll, 2001)

3.3.2 MALAQUITA

Es un mineral con fórmula química $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ de la clase de los carbonatos con un intenso color verde. Regularmente se encuentra en forma botroidal (globular) y es un mineral secundario en la zona de oxidación de los depósitos de cobre. (Fenoll, 2001)

Génesis

la malaquita es un mineral secundario, que se forma predominantemente en la zona de alteración superficial de los yacimientos de cobre debido a la precipitación del compuesto a partir de aguas ricas en carbonato de calcio e iones de cobre, estos últimos derivados de la alteración y disolución de sulfuros y óxido de cobre. (Fenoll, 2001)

La importancia de este mineral está dada por la presencia, en abundancia de cobre.

Este mineral se forma a partir de alteraciones superficiales en las zonas de presencia

de cobre, debido a la precipitación de aguas ricas en carbonato de calcio y con presencia de iones de cobre que aparecen como resultado de alteraciones y disolución de sulfuros y óxidos de cobre. (Fenoll, 2001)

Propiedades Físico-Químicas de la malaquita

Tabla 4
Propiedades Físico-Químicas de la malaquita.

MALAQUITA	
Color	Verde
Brillo	Vítreo
Dureza	3,5 - 4
Raya	Verde claro
Peso específico	3,75 – 3,95
Densidad	3.80 g/cm ³

Fuente: (Phillips, 2002)

3.4 TOMA DE MUESTRAS DE MALAQUITA

Para la toma de muestras primero identificamos el tipo de depósito de la zona de estudio y luego elegimos un tipo de muestreo.

3.4.1 DEPÓSITO CERRO JESÚS

Tipo de depósito. Pórfido Cu-Mo ± Au

Litología. Dacita, Calizas, Riolitas.

Alteración. Argílica intermedia, fílica.

Estilo de mineralización. Este es un tipo de depósito que se encuentra en calizas emplazado en vetas, disseminado y en stockwork.



Figura 19. Yacimiento tipo pórfido (cerro Jesús). Fuente: Propia (2020).

3.4.2 ESTACIONES DE MUESTREO

Para este trabajo de investigación realizamos 03 estaciones de muestreo las cuales fueron ubicadas en zonas estratégicas. Y optamos aplicar el muestreo por astillado.



Figura 20. Yacimiento tipo pórfido (cerro Jesús). Fuente: Propia (2020).

Estación N° 01

Las coordenadas donde se sacó la muestra se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5
Coordenadas UTM-WGS84 de la Estación N° 01.

COORDENADAS UTM-WGS84	
ESTE	764172
NORTE	9252321
COTA	3689 m

Fuente: Propia (2020).



Figura 21. Muestra de malaquita obtenida en la estación N° 01. Fuente: Propia (2020).

Estación N° 02

Las coordenadas donde se sacó la muestra se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6
Coordenadas UTM-WGS84 de la Estación N° 2.

COORDENADAS UTM-WGS84	
ESTE	764436
NORTE	9252419
COTA	3868 m

Fuente: Propia (2020).



Figura 22. Muestra de malaquita obtenida en la estación N° 02. Fuente: Propia (2020).

Estación N° 03

Las coordenadas donde se sacó la muestra se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7
Coordenadas UTM-WGS84 de la Estación N° 03.

COORDENADAS UTM-WGS84	
ESTE	764729
NORTE	9252149
COTA	3597 m

Fuente: Propia (2020).



Figura 23. Muestra de malaquita obtenida en la estación N° 03. Fuente: Propia (2020).

3.5 PROCESO DE LA ELECTRODEPOSICIÓN

En la electrodeposición ocurre la liberación de electrones por los aniones en el ánodo (una oxidación) y la captura de electrones por los cationes en el cátodo (una reducción).

(Díaz, 2008)

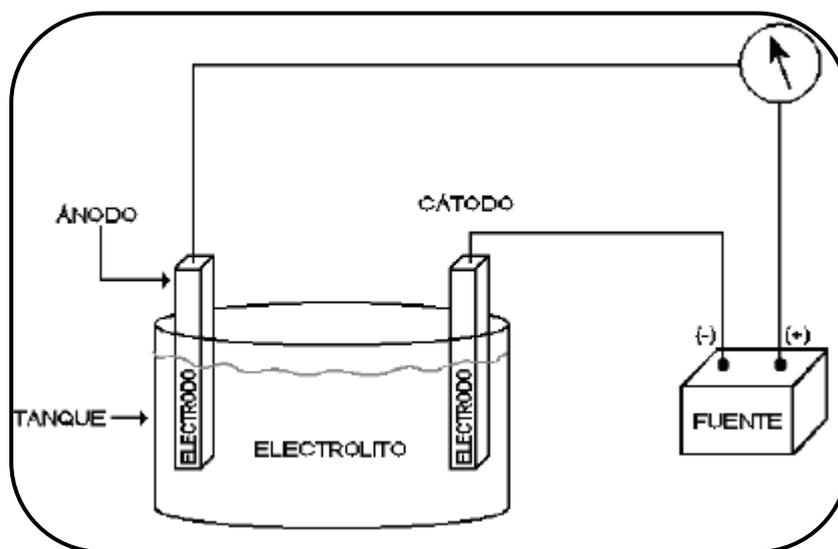


Figura 24. Elementos que intervienen en un proceso de electrodeposición. Fuente: Propia (2020).

3.5.1 Hidrometalurgia

La hidrometalurgia comprende el conjunto de métodos de obtención de cobre, a partir de los minerales oxidados. Uno de los métodos más utilizados es la lixiviación que en general consiste en tratar el mineral oxidado previamente triturado, disolviéndolo en una solución ácida llamada solvente, a través del cual, se consigue elevar la ley del mineral y posteriormente se recupera de la solución por diferentes métodos.

La disolución con ácido sulfúrico es un procedimiento que garantiza buenos resultados en la lixiviación de la mayoría de los minerales oxidados (Cuprita, Malaquita, Azurita).

(Lingan & Lucano, 2014)

En este trabajo de investigación aplicaremos la electrodeposición, el cual consiste en aplicar energía eléctrica a la disolución obtenida mediante la lixiviación.

3.6 ANÁLISIS MEDIANTE LA ELECTRODEPOSICIÓN

Los análisis se realizarán a nivel de laboratorio.

Para el desarrollo de este análisis seguiremos las siguientes etapas:



Figura 25. Diagrama de bloques con las etapas a seguir para realizar el Proceso de Electrodeposición. Fuente: Propia (2020).

Los parámetros tomados en cuenta para dicho análisis son:

Tiempo: 0.30, 01 y 02 horas. Siendo el de 01 horas en el que se obtuvo mayor recuperación durante los ensayos.

Amperaje: 1.00 – 2.00 rango en el cual se obtuvo mayor recuperación.

Granulometría.: 150 μm (malla N° 100), se disuelve con mayor facilidad al aplicar la solución (H_2SO_4).

A continuación, se detallan los resultados del análisis en el laboratorio:

Chancado, secado y tamizado del mineral



Figura 26. Chancado, secado y tamizado del mineral.

Para la granulometría se consideró un tamaño de $150 \mu m$ (malla N° 100), ya que se disuelve con mayor facilidad al aplicar la solución (H_2SO_4).

Lixiviado del mineral



Figura 27. Lixiviación del mineral.

Se aplicó el solvente Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) al 5% (30ml) durante 30min para cada una de las muestras para descomponer la muestra de mineral. Ya que este garantiza una mayor recuperación de mineral.

Luego se aplicó 50 ml de agua purificada y se procedió a agitarlo durante 30 min.

3.6.1 Análisis de la muestra M-01



Figura 28. Toma del peso de la muestra, ánodo y cátodo. Fuente: Propia (2020).



Figura 29. Aplicación de solvente (H_2SO_4) a la muestra de malaquita. Fuente: Propia.



Figura 30. Proceso de electrodeposición para la M-01. Fuente: Propia (2020).



Figura 31. Secado del ánodo, cátodo y papel filtro obtenidos después de la electrodeposición. Luego se procede a tomar el peso de los mismos. Fuente: Propia (2020).

Se realizaron 03 pruebas para la M-01, obteniendo los siguientes resultados:

ANÁLISIS DE ELECTRODEPOSICIÓN - MUESTRA N° 01							
N° DE PRUEBA	TIEMPO	MASA DE MUESTRA	VOLTAJE	AMPERAJE	MASAS INICIALES	MASAS FINALES	COBRE RECUPERADO
1	0.30 horas	0.50 gr	1.5	1.35	Acero inoxidable: 12.09 g	Acero inoxidable: 12.09 g	
					Lámina de cobre: 2.52 g	Lámina de cobre: 2.5214 g	0.0014 g
					Papel filtro: 0.61 g	Papel filtro: 0.6112 g	0.0012 g
							TOTAL: 0.0026 g
2	01 horas	0.50 gr	1.5	1.41	Acero inoxidable: 11.68 g	Acero inoxidable: 11.68g	
					Lámina de cobre: 3.06 g	Lámina de cobre: 3.0617 g	0.0017 g
					Papel filtro: 0.80 g	Papel filtro: 0.8013 g	0.0013 g
							TOTAL: 0.0030 g
3	02 horas	0.50 gr	1.5	1.87	Acero inoxidable: 8.27 g	Acero inoxidable: 8.27 g	
					Lámina de cobre: 3.28 g	Lámina de cobre: 3.2815 g	0.0015 g
					Papel filtro: 0.77 g	Papel filtro: 0.7714 g	0.0014 g
							TOTAL: 0.0029 g

Figura 32. Tabla de resultados para la M-01. Fuente: Propia (2020). Fuente: Propia (2020).

De los resultados obtenidos podemos apreciar que para la M-01 en el tiempo de 01 horas se obtiene una mayor recuperación de Cu siendo este de 0,0030 g.

3.6.2 Análisis de la muestra M-02



Figura 33. Toma del peso de la muestra, ánodo y cátodo. Fuente: Propia (2020).



Figura 34. Aplicación de solvente (H_2SO_4) a la muestra de malaquita. Fuente: Propia.

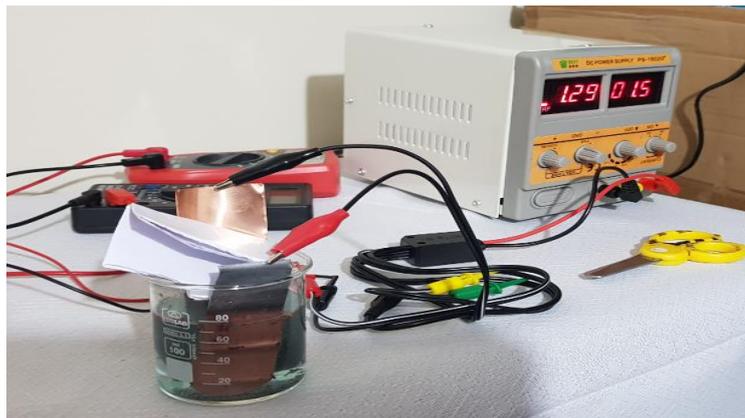


Figura 35. Proceso de electrodeposición para la M-02. Fuente: Propia (2020).



Figura 36. Secado del ánodo, cátodo y papel filtro obtenidos después de la electrodeposición. Luego se procede a tomar el peso de los mismos. Fuente: Propia (2020).

Se realizaron 03 pruebas para la M-02, obteniendo los siguientes resultados:

ANÁLISIS DE ELECTRODEPOSICIÓN - MUESTRA N° 02							
N° DE PRUEBA	TIEMPO	MASA DE MUESTRA	VOLTAJE	AMPERAJE	MASAS INICIALES	MASAS FINALES	COBRE RECUPERADO
1	0.30 horas	0.50 gr	1.5	1.35	Acero inoxidable: 11.61 g	Acero inoxidable: 11.61 g	
					Lámina de cobre: 2.88 g	Lámina de cobre: 2.8813 g	0.0013 g
					Papel filtro: 0.72 g	Papel filtro: 0.7212 g	0.0012 g
							TOTAL: 0.0025 g
2	01 horas	0.50 gr	1.5	1.96	Acero inoxidable: 11.56 g	Acero inoxidable: 11.56 g	
					Lámina de cobre: 3.11 g	Lámina de cobre: 3.1116 g	0.0016 g
					Papel filtro: 0.77 g	Papel filtro: 0.7715 g	0.0015 g
							TOTAL: 0.0031 g
3	02 horas	0.50 gr	1.5	1.87	Acero inoxidable: 8.11 g	Acero inoxidable: 8.11 g	
					Lámina de cobre: 2.59 g	Lámina de cobre: 2.5915 g	0.0015 g
					Papel filtro: 0.83 g	Papel filtro: 0.8313 g	0.0013 g
							TOTAL: 0.0028 g

Figura 37. Tabla de resultados para la M-02. Fuente: Propia (2020).

De los resultados obtenidos podemos apreciar que para la M-02 en el tiempo de 01 horas se obtiene una mayor recuperación de Cu siendo este de 0,0031 g.

3.6.3 Análisis de la muestra M-03



Figura 38. Toma del peso de la muestra, ánodo y cátodo. Fuente: Propia (2020).



Figura 39. Aplicación de solvente (H_2SO_4) a la muestra de malaquita. Fuente: Propia.



Figura 40. Proceso de electrodeposición para la M-03. Fuente: Propia (2020).



Figura 41. Secado del ánodo, cátodo y papel filtro obtenidos después de la electrodeposición. Luego se procede a tomar el peso de los mismos. Fuente: Propia (2020).

Se realizaron 03 pruebas para la M-03, obteniendo los siguientes resultados:

ANÁLISIS DE ELECTRODEPOSICIÓN - MUESTRA N° 03							
N° DE PRUEBA	TIEMPO	MASA DE MUESTRA	VOLTAJE	AMPERAJE	MASAS INICIALES	MASAS FINALES	COBRE RECUPERADO
1	0.30 horas	0.50 gr	1.5	1.35	Acero inoxidable: 12.28 g	Acero inoxidable: 12.28 g	
					Lámina de cobre: 3.08 g	Lámina de cobre: 3.0814 g	0.0014 g
					Papel filtro: 0.83 g	Papel filtro: 0.8312 g	0.0012 g
							TOTAL: 0.0026 g
2	01 horas	0.50 gr	1.5	1.96	Acero inoxidable: 7.91 g	Acero inoxidable: 7.91 g	
					Lámina de cobre: 2.60 g	Lámina de cobre: 3.6014 g	0.0014 g
					Papel filtro: 0.84 g	Papel filtro: 0.8416 g	0.0016 g
							TOTAL: 0.0030 g
3	02 horas	0.50 gr	1.5	1.87	Acero inoxidable: 8.05 g	Acero inoxidable: 8.05 g	
					Lámina de cobre: 2.31 g	Lámina de cobre: 2.3113 g	0.0013 g
					Papel filtro: 0.86 g	Papel filtro: 0.8615 g	0.0015 g
							TOTAL: 0.0028 g

Figura 42. Tabla de resultados para la M-03. Fuente: Propia (2020).

De los resultados obtenidos podemos apreciar que para la M-03 en el tiempo de 01 horas se obtiene una mayor recuperación de Cu siendo este de 0,0030 g.

3.7 ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN

Ahora, con los datos obtenidos de los análisis en el laboratorio procedemos a analizar la recuperación de cobre:

Tabla 8
Resultados del Análisis Químico de las muestras.

ANÁLISIS QUÍMICO		
Ley del Mineral	Cu (%)	Cu (g/T)
	0.62	6200

Fuente: Laboratorio PAESFO INGENIERÍA S.R.L.

Tabla 9
Datos de parámetros y materiales utilizados.

DATOS DEL ANÁLISIS	
Tiempo	0.30 h, 01h y 02 h
Masa de muestras	0.50 g
Voltaje	1.50 voltios
Amperaje	1.00 A – 2.00 A
Electrodos	Ánodo: Electrodo de acero inoxidable. Cátodo: Electrodo de cobre.

Fuente: Laboratorio PAESFO INGENIERÍA S.R.L.

Tabla 10
Resultados del Proceso de Electrodeposición.

RESULTADOS			
Tiempo	Recuperación de Cobre (%)		
	Muestra N° 01	Muestra N° 02	Muestra N° 03
0.30 h	84	81	84
01 h	97	100	97
02 h	94	90	90

Fuente: Laboratorio PAESFO INGENIERÍA S.R.L.

En base a los resultados obtenidos del laboratorio procedemos a realizar un análisis.

Calculamos los porcentajes de recuperación en función de la ley, la cual es de 0.62% que equivale a 6200 g/ Tn. Y en la muestra utilizada para los análisis de laboratorio (0.50g) equivale a 0.0031g.

Por ende 0.0031g de Cu equivale al 100% de Cu que contiene la muestra analizada.

Tabla 11
Recuperación de cobre (%), en función de la Ley.

RECUPERACIÓN DE Cu (%)			
	M-01	M-02	M-03
Cu	97	100	97

Fuente: Propia (2020).

Tabla 12
Recuperación de cobre (gr), en función de la Ley.

RECUPERACIÓN DE Cu (gr)			
	M-01	M-02	M-03
Cu	0.0030	0.0031	0.0030

Fuente: Propia (2020).

Sacamos un promedio de recuperación según los resultados de laboratorio.

Tabla 13
Promedio de recuperación (%) de cobre de las muestras analizadas.

RECUPERACIÓN DE Cu (%)
M1+M2+M3/3
98 % Cu

Fuente: Propia (2020).

Calculamos la ley final obtenida:

$$\frac{0.0031 - 0.0001}{0.0031} \times 100 = 96.8\%$$

En base a los resultados obtenidos podemos afirmar que la Electrodeposición garantiza una alta recuperación de un metal. Siendo para este caso del 96.8 % de recuperación.

3.7.1 CÁLCULO DE TONELAJE Y VALOR ECONÓMICO DE LA RESERVA

Debido a que no se realizaron estudios a detalle los datos utilizados para estos cálculos son estimados en base a los datos de campo.

Datos estimados de la reserva:

Área de la mineralización: 2698 m^2

Volumen de la mineralización: 6826.56 m^3

La densidad de la muestra de la malaquita es de: $3.8 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ o $3800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Cálculo de tonelaje

$$Tn = V \times \rho \times \frac{1Tn}{1000kg} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Tonelaje de la reserva:

$$Tn = 6826.56 \text{ m}^3 \times 3800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1Tn}{1000kg}$$

$$Tn = 25940.928 Tn$$

Cálculo de valor económico



Figura 43. Precio del Cu en ¢US\$/lb en el mes de Noviembre del 2020. Fuente: Portal Minero.

Convertimos ¢US\$ a \$:

$$100 \text{ ¢US\$} \rightarrow 1\$$$

$$331.213 \text{ ¢US\$} \rightarrow 3.312 \$$$

Hallamos el valor recuperado o valor económico:

$$\text{VR} = \text{FACTOR} \times \text{LEY} \times \text{RECUPERACIÓN} \times \text{PRECIO} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$\text{VR} = \text{FACTOR} \times \text{LEY} \times \text{RECUPERACIÓN} \times \text{PRECIO}$$

$$\text{VR} = 2204.6 \frac{\text{lb}}{\text{Tn}} \times 0.62\% \times 96.8\% \times 3.312 \frac{\$}{\text{lb}}$$

$$\text{VR} = 43.82 \frac{\$}{\text{Tn}}$$

$$\text{VR} = 25940.928 \text{ Tn} \times 43.82 \frac{\$}{\text{Tn}}$$

$$\text{VR} = 1\ 136\ 731.464 \$$$

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

La electrodeposición garantiza una alta recuperación de cobre para las muestras de malaquita analizadas. Influyendo también factores como la granulometría, tiempo y voltaje. Por lo que la hipótesis ha sido contrastada y verificada.

Las muestras están compuestas en gran cantidad por cobre y en cantidades menores de otros metales. Los cuales se ven afectados por agentes detonantes como la infiltración de agua en los materiales producto de la precipitación, alterando sus propiedades físico-químicas. La combinación de todos estos factores, influyen en la formación de un mineral.

Las muestras se analizaron en función del tiempo y voltaje. Para lo cual se tuvo en cuenta la granulometría y la solución lixivante. Se determinó que para la malaquita la electrodeposición garantiza una alta recuperación de cobre. La interacción entre tiempo y voltaje es fundamental. Se deduce que al variar el tiempo también se debe variar el voltaje para así obtener mayor recuperación de cobre.

A partir de los análisis de laboratorio se obtuvo los parámetros descritos anteriormente, los cuales nos indican que se pueden aplicar para una recuperación a gran escala con alto nivel de confiabilidad.

Chávez Gutiérrez (2019) en su tesis determinó que aplicar el ácido sulfúrico como lixiviante permite una alta velocidad de recuperación de cobre a partir de la malaquita. Concordando con los resultados obtenidos.

García & Guzmán (2016) en su tesis “Influencia del tamaño de partícula de crisocola, concentración de ácido sulfúrico y tiempo de agitación en la recuperación de cobre mediante lixiviación por agitación”, obtuvieron como resultado 97.51 % de extracción de cobre a un tamaño de partícula malla # 100 , a un tiempo de 60 min. Amperaje de 1.83 y concentración de ácido sulfúrico 0.5M. Concordando con los resultados obtenidos.

(Herrera, 2010) A concentraciones de 10g/L, 20g/L ácido cítrico y -1/4 de pulgada de mineral, se obtienen extracciones de 93,05% y 97,72% de cobre para un periodo de lixiviación de 36 días. Para las mismas concentraciones y tiempo de lixiviación, pero, para un mayor tamaño de partícula de mineral igual a -3/8”, se obtienen extracciones menores e iguales a 55,4% y 64,48% de cobre. Determinando que el tamaño de partícula influye en la recuperación de cobre a partir de la malaquita. A menor tamaño de partícula mayor recuperación y a mayor tamaño menor recuperación de cobre. Concordando con los resultados obtenidos.

Roldan (2015) en su tesis “Lixiviación Amoniacal del Mineral de Cobre Tipo Crisocola Utilizando Nitrato de Amonio”, menciona que en la investigación realizada por Bingöl y Canbazoglu (2004) en la lixiviación de minerales oxidados de cobre, la malaquita se disuelve fácilmente con ácido sulfúrico, produciendo altas recuperaciones de cobre. Una disolución muy rápida inicial con recuperación de cobre

del 85% en 15 minutos y después de 60 min una recuperación del 98,9%. Concordando con los resultados obtenidos.

La presente Investigación se realizó con el propósito de dar a conocer un método sencillo de aplicar para recuperar un metal de interés.

Las limitaciones que se presentaron para esta investigación fueron el no contar con equipos para realizar estudios de Absorción Atómica y conocer mejor las características del mineral; el costo elevado realizar Perforaciones Diamantina para obtener muestras más representativas y determinar la potencia de la zona mineralizada.

Se recomienda, realizar Estudios Geofísicos y Perforaciones Diamantina con la finalidad de determinar la potencia y el volumen de la zona mineralizada.

Realizar un Análisis Geoquímico para determinar los minerales asociados al cobre y así, poder realizar una correlación entre ellos, también, realizar un mapeo superficial a mayor detalle de áreas aledañas a la zona de estudio para poder determinar la extensión o nuevas zonas mineralizadas.

El trabajo experimental desarrollado requiere ser confirmado en lo que se refiere al análisis de los parámetros estudiados, para lo cual se sugiere llevar a cabo a pruebas a escala industrial, de tal forma que los resultados experimentales puedan ser analizados en una forma más práctica.

4.2 Conclusiones

- Mediante la electrodeposición se logró recuperar un 96.8% de Cu. Corroborando la hipótesis planteada.
- El tiempo y el amperaje influyen en la recuperación de cobre, a un tiempo de 01 horas y amperaje de 1.00 – 2.00 se alcanza una mayor recuperación de cobre.
- Realizar el estudio geológico nos permitió conocer las características litológicas, estructurales y mineralógicas de la zona de estudio, y así determinar que el potencial de malaquita es de 25940.928 Tn.
- Se caracterizó el mineral oxidado de cobre (malaquita), donde el cobre se encuentra presente con una Ley de 96.8%.
- Se logró detallar el proceso aplicado en este trabajo de investigación que permitió obtener los resultados finales.

REFERENCIAS

- Beckel, J. (2000). *EL Proceso Hidrometalúrgico de Lixiviación en Pilas y el Desarrollo de la Minería Cuprífera en Chile*. Santiago: Akal.
- Chávez Gutiérrez, E. R. (2019). Recuperación de Cobre a partir de la Malaquita Utilizando Soluciones de Tartrato Mediante Proceso de Lixiviación, Puno 2017. (*doctorado*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Dammert Lira, A. (Septiembre de 2007). Panorama de la Minería en el Perú. Lima.
- Díaz, F. (2008). *Principios de Electrodeposición*. Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Fenoll. (2001). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*. Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- García, & Guzmán. (2016). Influencia del tamaño de partícula de crisocola, concentración de ácido sulfúrico y tiempo de agitación en la recuperación de cobre mediante lixiviación por agitación. (*tesis profesional*). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- Herrera Córdova, H. C. (2010). Estudio de la lixiviación del cobre a partir de la Malaquita mediante soluciones de ácido cítrico. (*maestría*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Hidalgo Vilca, L. (2006). *Conceptos Fundamentales de Lixiviación*. Antofagasta: Taschen.
- Inocente, A. (2014). *Electrólisis Teoría y Práctica*. España: Lumbreras.
- Lingan, R., & Lucano, R. (2014). El presente trabajo titulado “Influencia del pH y la concentración del ácido cítrico en la lixiviación por agitación de minerales oxidados de cobre tipo Crisocola del distrito de Salpo - La Libertad. (*tesis profesional*). Universidad Nacional de Trujillo, La Libertad.
- Maza Idrogo, Y. (2017). Estimación de Reservas Minerales de Oro y Plata en la veta karina - Los Pircos, Santa Cruz-Cajamarca. (*tesis profesional*). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.
- Morral, F. (2018). *Metalurgia General*. España: Reverte SA.
- Oblitas, J. (2018). *Guía de Investigación Científica 2018 V(2)*. Universidad Privada del Norte.
- Pampa Chura, J. (2019). Geología y Caracterización de Minerales de las vetas, La Escondida e Isabel, Provincia de Condesuyos, Departamento de Arequipa. (*tesis profesional*). Universidad nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Paredes Caipa, J. (2019). Estudio Geológico y Evaluación Goeconómica de la Mina el Francés, Pataz - La Libertad. (*tesis profesional*). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Paredes Rivera, C. (2020). Determinación de Zonas Anómalas con Mineralización de Interés Eocnómico del proyecto Chaupec, Distrito de Cotabambas, Provincia de Cotabmbas, Departamento de Apurímac. (*tesis profesional*). Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Phillips, J. (2002). *Fundamentos de Mineralogía para Geólogos*. España: Limusa S.A.

- Restrepo Baena, O. (2008). *Metalurgia extractiva del cobre*. Universidad de Colombia, Medellín, Colombia.
- Roldan Alva, L. (2015). Lixiviación Amoniaca del Mineral de Cobre Tipo Crisocola Utilizando Nitrato de Amonio. (*tesis profesional*). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- Roncal Julcamoro, L. (2018). *Geología y Metalogenia Del Distrito Minero De Hualgayoc, Cajamarca – Perú*. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.
- Rosenqvist, T. (2010). *Fundamentos de la Metalurgia Extractiva*. Australia: Deusto.
- Ruiz, M. (2013). *Hidrometalurgia*. Concepción: Santiago-Ender Editorial.
- Siveroni Morales, J. (2015). Determinación de los Controles de Mineralización del Depósito de Alta Sulfuración Ciénaga Norte, Hualgayoc - Cajamarca. (*tesis profesional*). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.
- Soto, & Solís. (2012). Caracterización y optimización de parámetros de SX/EW para la obtención de cobre electrolítico a nivel laboratorio. (*tesis profesional*). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Valenzuela Tello, G., & Buendía Marmanillo, C. (2007). Evaluación Geológica para el Cálculo de Reservas y Estimación de Recursos Minerales del prospecto Chaupiloma 2007. (*tesis profesional*). Universidad Continental, Huancayo.

ANEXOS

ANEXOS N° 01

FOTOGRAFÍAS



Figura 44. Reconocimiento y toma de datos geológicos de la zona de estudio.



Figura 45. Recolección de muestras mediante el método de astillado.



Figura 46. Afloramiento de malaquita en las paredes de los socavones presentes en la zona de estudio.



Figura 47. Afloramiento de malaquita en las paredes de los socavones presentes en la zona de estudio.



Figura 48. Calcopirita, Limonita, y formación de carbonatos en la zona de estudio.



Figura 49. Muestra M-01y M-02 antes de ser trituradas.



Figura 50. Realizando pruebas para obtener una mayor recuperación de cobre.

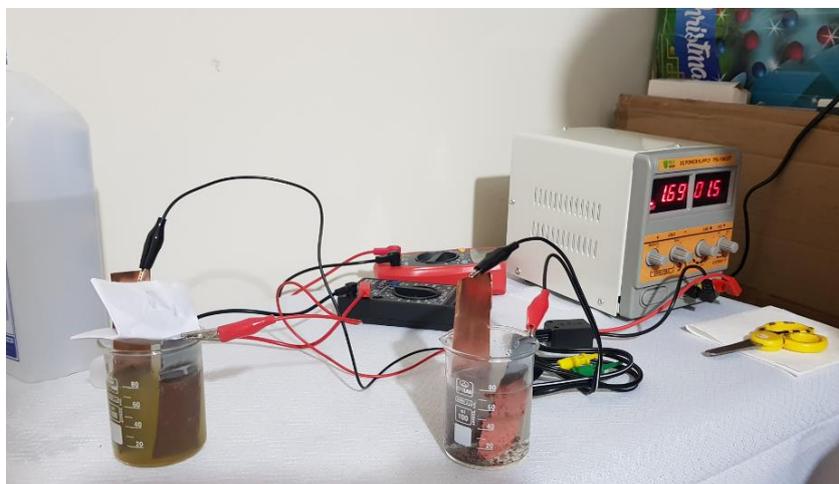


Figura 51. Análisis mediante la Electrodeposición de la M-01 y M-02.



Figura 52. Cátodos con contenido de cobre después del análisis mediante la Electrodeposición.



Figura 53. Depósito cerro Jesús.

ANEXO N° 02

PLANOS

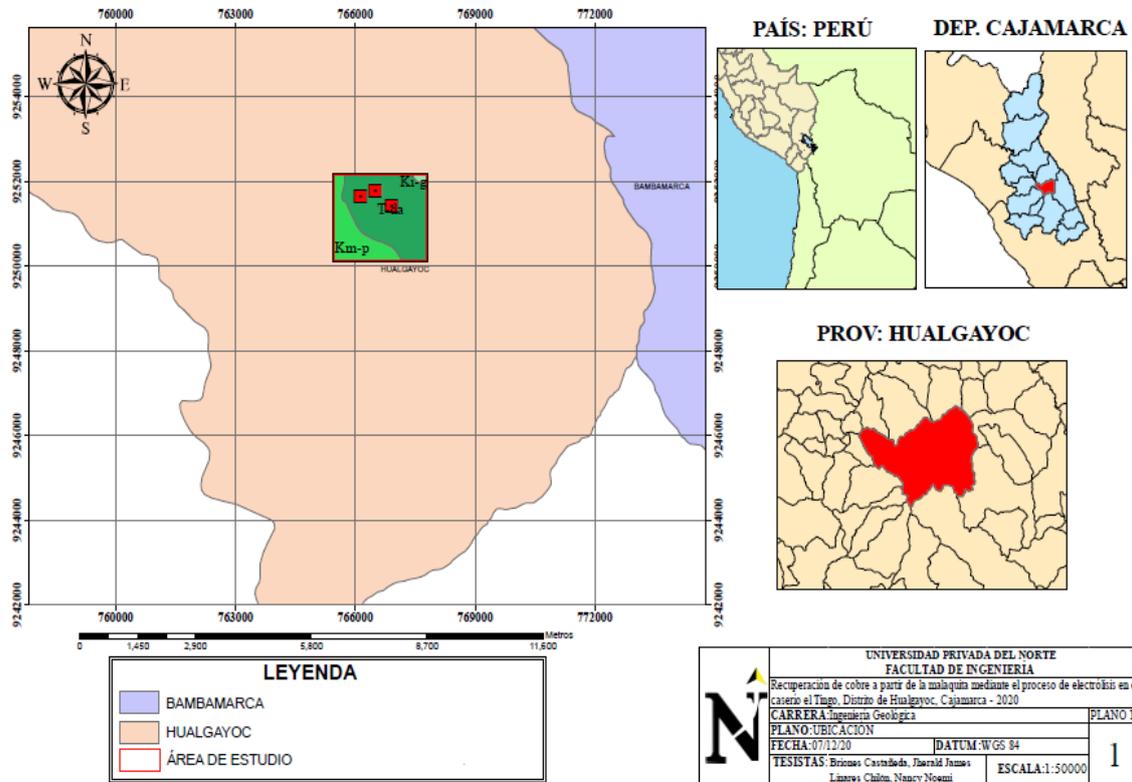
PLANO 01: UBICACIÓN

PLANO 02: ACCESIBILIDAD

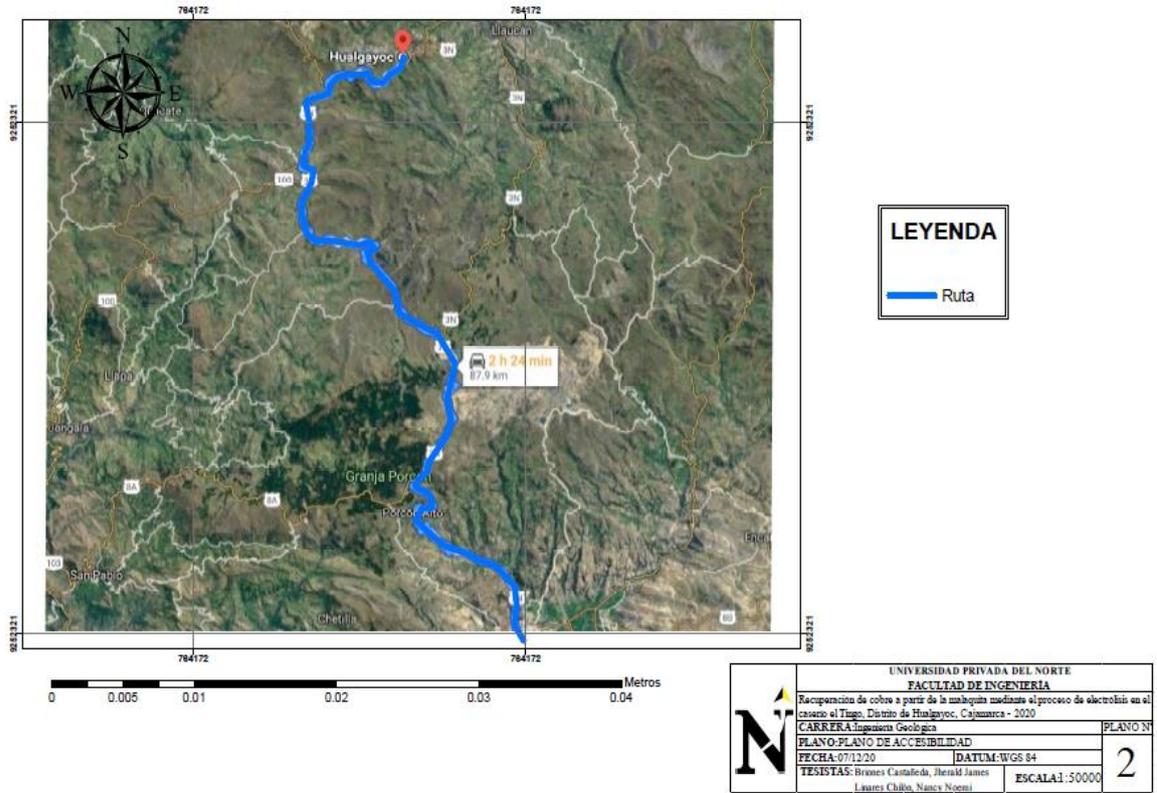
PLANO 03: TOPOGRÁFICO

PLANO 04: GEOLÓGICO

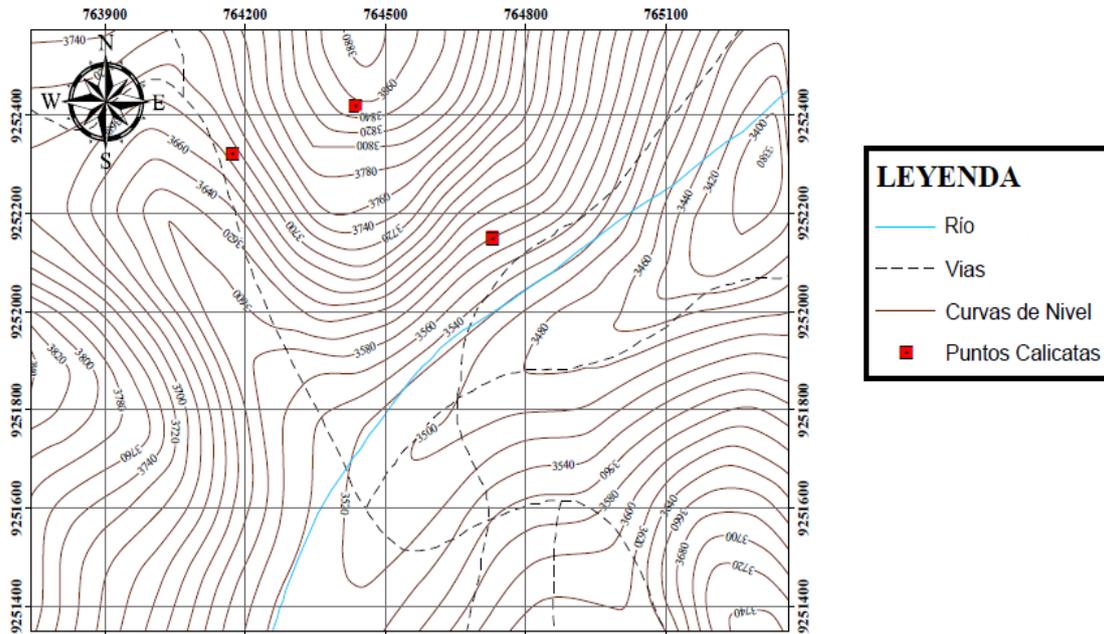
PLANO DE UBICACION DEL TINGO



PLANO DE ACCESIBILIDAD DEL TINGO



PLANO TOPOGRÁFICO DEL TINGO

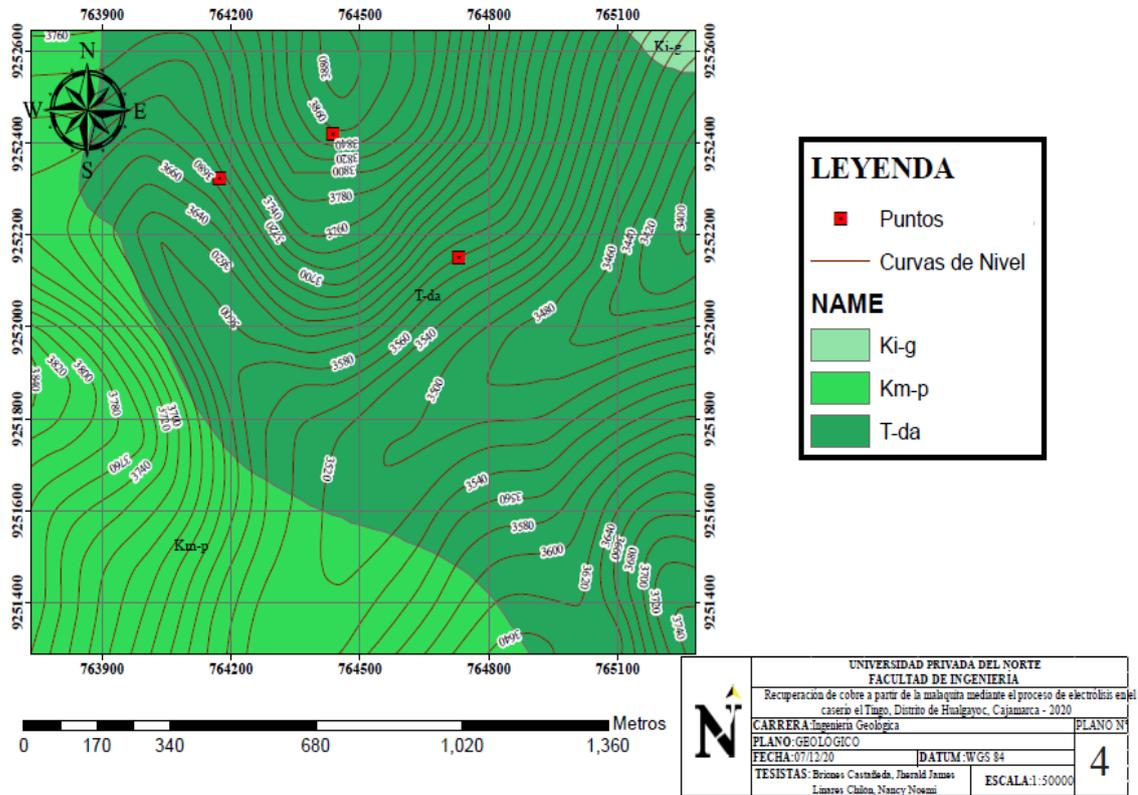


LEYENDA	
	Río
	Vias
	Curvas de Nivel
	Puntos Calicatas

0 160 320 640 960 1,280 Metros

UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE FACULTAD DE INGENIERÍA	
Recuperación de cobre a partir de la malaquita mediante el proceso de electrolisis en el caserío el Tingo, Distrito de Hualgayoc, Cajamarca - 2020	
CARRERA Ingeniería Geológica	PLANO N°
PLANO TOPOGRAFICO	
FECHA: 07/12/20	DATUM: WGS 84
TESISTAS: Briones Castañeda, Jherald James Linares Chilón, Nancy Noemí	ESCALA: 1:50000
	3

PLANO GEOLÓGICO DEL TINGO



ANEXO N° 03

RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO



PAESFO INGENIERIA S.R.L.
SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS Y SUELOS

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO Y GALVANOSPLATIA
RECUPERACIÓN DE COBRE POR ELECTRODEPOSICIÓN EN MUESTRAS
DE MALAQUITA

SOLICITANTES: NANCY NOEMÍ LINARES CHILÓN
JHERALD JAMES BRIONES CASTAÑEDA

TESIS: “RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE LA MALAQUITA MEDIANTE
LA ELECTRODEPOSICIÓN EN EL CASERÍO DEL TINGO, PROVINCIA DE
HUALGAYOC- CAJAMARCA - 2020”

MUESTRA: Entregada por las solicitantes.

FECHA: 26/10/2020

Análisis Químico		
Ley del Mineral	Cu (%)	Cu (g/T)
	0.62	6200

Atentamente:

M.Sc. Juan Carlos Flores Cerna
INGENIERO QUÍMICO
C.I.P. N° 72544
Docente Universitario UNC

Of. Lima: Av. Petit-Thouars 1183-Sta. Beatriz Cercado de Lima. Telf: 976976377.
Jr.: Antonio Raimondi N° 191, Urb. San Luis - Cajamarca - Cel.: 968907099.
Email: ing.juancarlos.1977@gmail.com/p.ingenieria@paesfo.com



PAESFO INGENIERIA S.R.L.
SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS Y SUELOS

Datos del Análisis	
Tiempo	0.30 h, 01 h y 0.2 h
Masa de muestras	0,50 g
Voltaje	1,50 voltios
Amparaje	1,00 A - 2,00 A
Electrodos	Ánodo: Electrodo de acero inoxidable Cátodo: Electrodo de Cobre

Resultados			
Tiempo	Recuperación de Cobre (%)		
	Muestra N° 01	Muestra N° 02	Muestra N° 03
0.30 h	84	81	84
01 h	97	100	97
02 h	94	90	90

Atentamente:

M.Sc. Juan Carlos Flores Cema
INGENIERO QUÍMICO
C.I.P. N° 72544
Docente Universitario UNC

Of. Lima: Av. Petit-Thouars 1183–Sta. Beatriz Cercado de Lima. Telf.: 976976377.
Jr.: Antonio Raimondi N° 191, Urb. San Luis – Cajamarca – Cel.: 968907099.
Email: ing.juancarlos.1977@gmail.com / p.ingenieria@paesfo.com