

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Modelo hidrogeológico para el diseño y ubicación de cruceros de drenaje, con
fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos –**

Lima

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autores:

Bach. Anthony Yosimar VASQUEZ SELIS

Bach. Deyvid Nequer CORDOVA CHAVEZ

Asesor:

Mg. Javier LOPEZ ALVARADO

Cerro de Pasco – Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Modelo hidrogeológico para el diseño y ubicación de cruceros de drenaje, con
fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos –**

Lima

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Favio Maximo MENA OSORIO
PRESIDENTE

Mg. Saturnino Eleuterio FLORES COAGUILA
MIEMBRO

Mg. Luis Arturo LAZO PAGAN
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 317-2025-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

“Modelo hidrogeológico para el diseño y ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos - Lima”

Apellidos y nombres de los tesistas

Bach. Anthony Yosimar VASQUEZ SELIS

Bach. Deyvid Nequer CORDOVA CHAVEZ

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. Javier López Alvarado

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería geológica

Índice de Similitud

3 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 9 de setiembre del 2025



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Edgar FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.09.2025 10:38:06 -05:00

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis con profundo amor y gratitud a nuestras familias, quienes han sido nuestro pilar fundamental con su apoyo incondicional y constante motivación, y a todos aquellos amigos y seres queridos que, con su comprensión y aliento, nos han impulsado a alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos de manera especial a la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por la formación académica de calidad y el compromiso institucional que ha sido fundamental en nuestro desarrollo profesional. La rigurosidad académica, los principios y los valores transmitidos durante nuestra etapa de formación han contribuido de manera significativa a la consolidación de los conocimientos necesarios para la elaboración de este trabajo.

De igual manera, extendemos nuestro reconocimiento a nuestras familias, por su apoyo incondicional, comprensión y confianza, que han sido un pilar esencial a lo largo de este proceso.

Finalmente, valoramos el esfuerzo, la dedicación y la disciplina que hemos asumido a lo largo de este camino, convencidos de que el compromiso personal y la perseverancia son determinantes para alcanzar los objetivos propuestos.

Anthony Yosimar, VASQUEZ SELIS

Deyvid Nequer, CÓRDOVA CHÁVEZ

RESUMEN

Este estudio desarrolló un modelo hidrogeológico con el objetivo de sustentar técnicamente el diseño y ubicación estratégica de cruceros de drenaje, con el objetivo de proteger el área mineralizada en la Unidad Minera Yauricocha, ubicada en Yauyos, Lima. El procedimiento de la investigación comenzó mediante un mapeo inicial y un análisis de topografía para definir propiedades de las rocas y ubicar los drenajes. Usando el software especializado, se creó un modelo 3D con malla de elementos finitos, lo que permitió identificar el flujo subterráneo y mejorar la planificación de drenajes en la mina. Los resultados muestran que el modelo propuesto es altamente efectivo, logrando reducir más del 95% del caudal en la zona mineralizada, con un caudal residual de apenas 0,01 m³. Este hallazgo demuestra la eficacia de los cruceros de drenaje en la mitigación de la infiltración de agua, contribuyendo a la preservación del área mineralizada y mejorando la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras. Con respecto a otras investigaciones, Salazar (2020) desarrolló un modelo para comprender el comportamiento hidrogeológico de una zona, lo que se replicó en Yauricocha al identificar las filtraciones de agua subterránea. Perdomo & Rojas (2017) estimaron el potencial de recarga de acuíferos, lo cual permitió en este estudio conocer el volumen de agua almacenado y el potencial de recarga en la zona mineralizada. Palacios (2021) estudió la dinámica de aguas subterráneas en una cuenca, lo que también se aplicó en Yauricocha para entender cómo las aguas subterráneas afectan las labores de extracción minera. En conclusión, el modelo hidrogeológico desarrollado es una herramienta eficaz para proteger el área mineralizada de la UM Yauricocha y mejorar las condiciones operativas. Se recomienda su implementación en otras áreas de la mina y en futuras expansiones mineras con problemas de infiltración de agua.

Palabras clave: Modelo, hidrogeológico, zona mineralizada, caudal, drenado

ABSTRACT

The present study addresses the development of a hydrogeological model to guide the design and strategic location of drainage crossings, with the objective of protecting the mineralized area at the Yauricocha Mining Unit, located in Yauyos, Lima. The investigation procedure started with an initial mapping and topography analysis to define rock properties and locate drainages. Using FEFLOW, a 3D model with finite element mesh was created, which allowed identifying the subway flow and improving drainage planning in the mine. The results show that the proposed model is highly effective, achieving a reduction of more than 95% of the flow in the mineralized zone, with a residual flow of only 0.01 m³. This finding demonstrates the effectiveness of drainage crossings in mitigating water infiltration, contributing to the preservation of the mineralized area and improving the safety and efficiency of mining operations. Regarding other research, Salazar (2020) developed a model to understand the hydrogeological behavior of an area, which was replicated at Yauricocha by identifying groundwater seepage. Perdomo & Rojas (2017) estimated the aquifer recharge potential, which allowed in this study to know the volume of water stored and the recharge potential in the mineralized zone. Palacios (2021) studied groundwater dynamics in a basin, which was also applied in Yauricocha to understand how groundwater affects mining extraction works. In conclusion, the hydrogeological model developed is an effective tool to protect the mineralized area of the UM Yauricocha and improve operating conditions. Its implementation is recommended in other areas of the mine and in future mine expansions with water infiltration problems.

Keywords: Model, hydrogeological, mineralized zone, flow, drainage.

INTRODUCCIÓN

El Perú experimentó un extraordinario crecimiento económico en los tres primeros años y medio de este siglo, impulsado en gran parte por los precios de los metales. Esta expansión, conocida como el boom de los minerales, se produjo en un momento de la historia en el que cambios fundamentales modificaron los paradigmas del funcionamiento de la economía. Estos cambios orientaron a Perú hacia la liberalización y la apertura económica, así como hacia un replanteamiento del papel del Estado en la economía (OSINERGMIN, 2021).

Sin embargo, uno de los principales problemas en los proyectos o trabajos en minería son las filtraciones de agua tanto superficiales como subterráneas que afectan al desarrollo de las actividades dentro del macizo rocoso.

En el caso de la UM Yauricocha, se observa que estas filtraciones representan un problema constante que afecta directamente a la zona mineralizada. La principal razón por la que no se pueden evitar o drenar estos caudales es el desconocimiento de la ubicación exacta de los flujos, lo que provoca que el problema se agrave progresivamente hasta volverse insostenible para las operaciones en la unidad.

El modelo hidrogeológico permitirá conocer las ubicaciones de las filtraciones de agua en los tajos de la UM y además de ello conocer el caudal que presentan en cada caso con el fin de diseñar una propuesta de drenaje que permite que las labores diarias se realizan con la normalidad requerida. Ibarra et al. (2019) menciona que, en consecuencia, se requiere un buen modelo hidrogeológico para caracterizar las unidades hidrogeológicas, localizar las zonas de recarga y descarga, detectar y caracterizar los flujos preferenciales entre acuíferos y definir los factores que influyen en la hidrodinámica del flujo de aguas subterráneas.

INDICE

Páginas

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema	1
1.2. Delimitación de la investigación	3
1.2.1. Delimitación espacial	3
1.2.2. Delimitación Temporal	3
1.3. Formulación del problema.....	4
1.3.1. Problema general	4
1.3.2. Problema específico.....	4
1.4. Formulación de objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Justificación de la investigación.....	5
1.6. Limitaciones de la investigación	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio	7
------------------------------------	---

2.1.1. Antecedentes internacionales	7
2.1.2. Antecedentes nacionales	11
2.2. Bases teóricas - científicas.....	14
2.2.1. Hidrogeología	14
2.2.2. Modelo Hidrogeológico.....	14
2.2.3. Identificación de las fuentes hídricas.....	16
2.2.4. Aguas Subterráneas	17
2.2.5. Recarga y Descarga de Aguas Subterráneas.....	18
2.2.6. Presencia de Agua en Macizos Rocosos.....	19
2.2.7. Modelo Geológico	20
2.2.8. Conductividad Hidráulica.....	20
2.2.9. Geología y características regionales	21
2.3. Definición de términos básicos	36
2.4. Formulación de hipótesis.....	38
2.4.1. Hipótesis general	38
2.4.2. Hipótesis específicas.....	38
2.5. Identificación de variables.....	38
2.5.1. Variable Independiente: X: Modelo Hidrogeológico para el diseño y ubicación de cruceros de drenaje.	38
2.5.2. Variable Dependiente: Y: Protección de zonas mineralizadas.	38
2.6. Definición operacional de variables e indicadores	39
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	
3.1. Tipo de investigación	40
3.2. Nivel de investigación	40

3.3. Métodos de investigación	41
3.4. Diseño de investigación.....	41
3.5. Población y muestra	42
3.5.1. Población	42
3.5.2. Muestra	42
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	42
3.6.1. Técnicas	42
3.6.2. Instrumentos	43
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	44
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	45
3.9. Tratamiento estadístico.....	47
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica	47

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	48
4.1.1. Realización del mapeo hidrogeológico en el interior de la mina	48
4.1.2. Determinación de porcentajes de humedad de paredes rocosas	50
4.1.3. Fuente principales de acumulación de agua	53
4.1.4. Método Volumétrico en tajo sub level caving.....	61
4.1.5. Planteamiento de los cruceros de drenaje.....	62
4.1.6. Plan de drenaje y bombeo.....	63
4.1.7. Ejecución de Cruceros de Drenaje.....	64
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	75
4.2.1. Digitalización del modelo hidrogeológico	75
4.2.2. Modelo Hidrogeológico Conceptual	75

4.2.3. Creación del Modelo Numérico Hidrogeológico	76
4.2.4. Zona de distribución final de aguas	91
4.3. Prueba de hipótesis	92
4.4. Discusión de resultados	95
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	
ANEXOS	

INDICE DE TABLA

	Páginas
Tabla 1. Registro de Precipitaciones.....	29
Tabla 2. Operacionalización de las variables.....	39
Tabla 3. Cuadro de Monitorio de Piezómetros de Cuerda Vibrante	52
Tabla 4. Litología asociada a valores de permeabilidad	81
Tabla 5. Data de Registro de Caudales Obtenida entre abril 2020 a noviembre 2023	90
Tabla 6. Determinación del Valor de Distribución Normal por Shapiro-Wilk.....	92
Tabla 7. Valores estadísticos de la primera prueba de Friedman.....	93
Tabla 8. Valores estadísticos de la segunda prueba de Friedman	94

INDICE DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Ejemplo de Modelo Hidrogeológico	15
Figura 2. Caso de presencia de aguas subterráneas en zona minera.....	18
Figura 3. Ejemplo de presencia de agua en un macizo rocoso	19
Figura 4. Formación Jumasha.....	22
Figura 5. Mapa con la Formación Celendín	23
Figura 6. Columna Estratigráfica de la Minera Yauricocha	24
Figura 7. Mapa Estructural de la Mina Yauricocha.....	26
Figura 8. Topografía Mina Yauricocha	28
Figura 9. Mapa Geológico de Yauyos	31
Figura 10. Estratigrafía de Yauyos	34
Figura 11. Mapa Geomorfológico de Yauricocha	35
Figura 12. Trabajos de Mapeo Hidrogeológico en el interior de la mina	49
Figura 13. Realización de ensayos de humedad en cocina	50
Figura 14. Determinación del Porcentaje de Humedad	51
Figura 15. Leyenda de Caracterización de Condiciones de Trabajo	53
Figura 16. Vista en planta del modelo de resistividad 3D, Zona saturada	56
Figura 17. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT12	57
Figura 18. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT13	57
Figura 19. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT14	57
Figura 20. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT15	58
Figura 21. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT16	58
Figura 22. Modelo Hidrogeológico con las fuentes de agua	59
Figura 23. Mapeo Hidrogeológico Superficial	60

Figura 24. Monitoreo diario del flujo en interior mina.....	61
Figura 25. Modelo de hoja de recolección de datos de monitorio de caudal.....	62
Figura 26. Flujograma de trabajo de reducción de agua del cuerpo mineralizado	63
Figura 27. Esquema de Drenaje y Bombeo de la Mina Yauricocha.....	64
Figura 28. Construcción de Perforaciones	66
Figura 29. Mapa de Ubicación del Crucero de Drenaje	73
Figura 30. Dirección de taladros de drenaje de Catas - Antacaca -Rosaura y Ant Sur	74
Figura 31. Roseta de Dirección para la perforación de crucero de drenaje	74
Figura 32. Modelo numérico digitalizado.....	76
Figura 33. Ubicación fuentes de agua en superficie (Elaboración propia).....	77
Figura 34. Dominio del modelo en FEFLOW	78
Figura 35. Malla de elementos finitos	78
Figura 36. Elementos que no cumplen el criterio	79
Figura 37. Conformación de ángulos interna de los elementos triangulares del MESH	80
Figura 38. Inserción de información topográfica.....	81
Figura 39. Integración de los datos de permeabilidad asociada al modelo en Feflow	82
Figura 40. Asignación de permeabilidad a las unidades hidrogeológicas en Leapfrog.....	82
Figura 41. Vista en Sección de la asignación de UH.....	83
Figura 42. Vista en planta de del comportamiento hídrico subterráneo generado una envolvente piezométrica alrededor del cuerpo mineralizado.....	83
Figura 43. Vista en planta de la influencia hídrica contrastado con la geología local.....	84
Figura 44. Proyección desde superficie del comportamiento hidrogeológico teniendo como dirección principal el cuerpo mineralizado de la zona de hundimiento.....	85
Figura 45. Disposición Final de Crucero de Drenaje y Taladros de Drenaje de acuerdo con la interpretación del modelo hidrogeológico	86

Figura 46. Altitudes piezométricas de la Zona estudiada	87
Figura 47. Modelo de simulación de flujo de agua subterránea de la unidad minera	88
Figura 48. Evaluación del comportamiento hidrogeológica.....	89
Figura 49. Gráfico Comparativo de Caudales entre abril 2022 a octubre 2023	90
Figura 50. Gráfico de Variación de Valores de Caudal generada por el talador 970-P5.....	93
Figura 51. Gráfico de Variación de Valores de Caudal generada por el talador 970-P0.....	94

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La industria minera ha desarrollado diversas técnicas de extracción subterránea para explotar yacimientos a gran profundidad. Entre las más utilizadas destaca la espeleología en bloque, valorada por su eficacia y bajos costos de operación. Sin embargo, el bombeo de lodo en el interior de las minas representa un riesgo importante, especialmente bajo las condiciones generadas por este método de extracción en macizos graníticos. Este proceso implica el desplazamiento repentino de agua y partículas finas desde los niveles superiores del yacimiento hacia las zonas de producción, lo que puede provocar obstrucciones en los túneles. Como resultado, la seguridad de los trabajadores se ve amenazada debido a la falta de infraestructura adecuada, maquinaria insuficiente y otros factores relacionados Gelcich, J. (2018).

Como menciona Miranda, J. (2019) que el agua y las actividades mineras están íntimamente relacionadas algunas de ellas están situadas en cuencas hidrológicas, donde los recursos mineros se explotan a menudo por debajo de la superficie del agua y la mayoría de las veces, los recursos mineros se explotan por debajo de la capa

freática local nivel freático local. En consecuencia, los lugares sirven como puntos de escorrentía o de descarga de drenaje. lugares de drenaje o de descarga de la escorrentía de las superficies y/o de las aguas subterráneas, y siempre pueden modificar el funcionamiento hidrológico o hidrogeológico de la región.

En la unidad minera Yauricocha, el problema identificado no afecta de manera uniforme a toda la mina, sino que se concentra en tajos específicos donde se aplica el método de explotación sub level caving (método de hundimiento). Este método, por su naturaleza, genera alteraciones significativas en la estabilidad del terreno. Las principales consecuencias incluyen filtraciones de agua en diversas áreas cercanas a los tajos afectados, lo que debilita las zonas de trabajo y eleva el riesgo de desmoronamientos, generando preocupación tanto para la seguridad de los trabajadores como para la continuidad operativa.

Además, las filtraciones de agua tienen un impacto directo al formar acumulaciones de lodo, que dificultan el acceso y la maniobrabilidad en las áreas de trabajo. Este lodo no solo representa un peligro físico para los trabajadores, aumentando las probabilidades de accidentes, sino que también afecta el desarrollo de las actividades al reducir la eficiencia y efectividad de las labores mineras.

A pesar de la criticidad del problema, actualmente no se cuenta con un sistema de drenaje eficiente en la Unidad Minera Yauricocha, lo que agrava la acumulación de agua en zonas de hundimiento. Este déficit se evidencia también en muchos otros contextos mineros subterráneos, tanto a nivel nacional como internacional, donde la falta de infraestructura de drenaje adecuada ha derivado en la paralización de operaciones, daños a equipos y riesgos graves para el personal. Casos documentados en minas de Chile, Canadá y Perú demuestran que, en ausencia de una planificación hídrica subterránea efectiva, los efectos del ingreso de agua pueden escalar

rápidamente a emergencias geotécnicas y productivas. La situación en Yauricocha requiere una respuesta técnica que permita no solo evacuar el agua acumulada, sino también prevenir su ingreso futuro de forma sistemática.

Asimismo, no se dispone de un modelo hidrogeológico integral y adaptado a la realidad local, que permita identificar con precisión las zonas de mayor riesgo de saturación y orientar el diseño preventivo de cruceros de drenaje. La ausencia de esta herramienta limita la capacidad de anticipar el comportamiento del flujo subterráneo y dificulta la toma de decisiones técnicas para proteger los cuerpos mineralizados más expuestos. Un modelo calibrado y validado permitiría no solo conocer el sistema acuífero en su estado actual, sino también simular escenarios de drenaje, evaluar la efectividad de intervenciones y reducir significativamente los riesgos hidrogeomecánicos asociados al método de explotación por sub level caving.

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación espacial

La zona mineralizada de la Unidad Minera Yauricocha, situada en la provincia peruana de Yauyos, en el departamento de Lima, es donde actualmente se llevó a cabo el estudio. La investigación hidrogeológica para la ubicación y diseño del crucero de drenaje se centró en esta área en particular. En la delimitación espacial se incluyeron las regiones geográficas de impacto inmediato de la Unidad Minera Yauricocha. Esto implicó mapear las zonas utilizadas para la extracción, procesamiento y disposición de residuos mineros, además de cualquier lugar cercano que pudiera ser impactado por el flujo hidrogeológico que estas operaciones producen.

1.2.2. Delimitación Temporal

La investigación se realizó durante un período específico que abarcó desde mayo del 2022 hasta diciembre del 2023. Este período fue determinado por los

tiempos de recolección de información referente a la filtración de aguas subterráneas en la zona y como poco a poco ha ido reduciéndose.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Como el modelo hidrogeológico influyó en el diseño y ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada veta Central en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima?

1.3.2. Problema específico

¿Como el modelo hidrogeológico influyó en la ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la influencia del modelo hidrogeológico en la ubicación y diseño de cruceros de drenaje para la protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Realizar el modelo hidrogeológico para el diseño de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima.
- b. Evaluar el modelo hidrogeológico para determinar la ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima.

1.5. Justificación de la investigación

La correcta definición de un modelo hidrogeológico es fundamental para la gestión del drenaje en áreas de actividad minera, ya que permite analizar el flujo subterráneo y diseñar estrategias para mitigar la infiltración de agua en la zona mineralizada. Un modelo mal definido puede generar estimaciones inexactas de los caudales de infiltración, lo que afectaría la planificación de infraestructura de drenaje y aumentaría los riesgos operacionales en la mina (Ibarra et al., 2019).

Por lo mencionado anteriormente, la presente investigación busca proporcionar una solución viable al problema de filtraciones de agua en zonas mineralizadas mediante la ubicación y diseño adecuado de cruceros de drenaje. La presencia de agua en la zona de trabajo no solo compromete la estabilidad del macizo rocoso y la conservación del mineral, sino que también representa un riesgo para la seguridad de los trabajadores al generar acumulaciones de lodo que dificultan la maniobrabilidad en las labores mineras. Por ello, esta investigación es relevante, ya que contribuirá a optimizar la gestión del drenaje en la UM Yauricocha y podrá servir como referencia para casos similares en otras unidades mineras.

1.6. Limitaciones de la investigación

El desarrollo de esta investigación presentó diversas limitaciones tanto técnicas y operativas que condicionaron el alcance y la profundidad de algunos análisis. Una de las principales restricciones fue la falta de instrumentación especializada, como sensores de presión de poros o sistemas automáticos de monitoreo piezométrico en tiempo real, lo cual obligó a depender de mediciones manuales puntuales y limitó la continuidad de los datos.

Asimismo, se identificó limitaciones presupuestarias que redujo la posibilidad de ejecutar más perforaciones exploratorias o instalar mayor cantidad de piezómetros

en zonas críticas del modelo. Esta restricción afectó la densidad espacial de datos y, en consecuencia, la calibración fina del modelo hidrogeológico.

Otra limitación fue por el tiempo disponible para la recolección de datos de campo, que se vio condicionado por la programación operativa de la mina y los horarios restringidos de acceso a zonas en producción. Además, se experimentó una limitada disponibilidad de personal técnico de apoyo, especialmente durante las campañas de monitoreo y aforo nocturnas, lo cual redujo la frecuencia y cobertura de mediciones.

Finalmente, la complejidad geológica y estructural del macizo rocoso, así como la dificultad de acceso a algunos sectores subterráneos, representaron desafíos logísticos que exigieron adaptaciones metodológicas para garantizar la viabilidad del estudio dentro de los márgenes operativos del proyecto.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Salazar (2020) en su estudio titulado "Modelo hidrogeológico de una explotación minera subterránea", buscaba desarrollar un enfoque de modelización que pudiera aplicarse a la zona minera utilizando herramientas de simulación numérica del flujo de aguas subterráneas. Esto permitiría al autor obtener una comprensión exhaustiva del comportamiento hidrogeológico de la zona y maximizar la información ya disponible para evaluar varios escenarios probables en relación con el impacto físico de la mina en el entorno hidrogeológico y los efectos del afloramiento de agua en términos de flujos piezométricos y de infiltración. El estudio se desarrolla en cinco etapas. En primer lugar, se examinan los antecedentes del caso estudiado. A continuación, se modela matemática y numéricamente el problema. Por último, se obtienen los resultados. La falla Dominador, el acuífero Pampa Buenos Aires y el complejo de fallas La Mula rodean el sector de 304 km² que el modelo describe como parte de la formación Augusta Victoria. Dentro del dominio se definen las Unidades

Hidrogeológicas 1, 2 y 3, que representan un potencial hidrogeológico bajo (10^{-9} - 10^{-3} m/d), medio (10^{-5} - 25 m/d) y alto (10 - 103 m/d), respectivamente. Los flujos de aguas subterráneas son responsables de la recarga y descarga del sistema. Además, la estación de bombeo de la mina sirve como punto de descarga, extrayendo 1685 m^3 de agua cada día. Esta investigación presenta una similitud del 90% con la investigación planteada.

Por otro lado, Perdomo, V. M., & Rojas, C. A. (2017) en su investigación denominada “Modelo Hidrogeológico Conceptual a partir de información secundaria en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá” donde objetivo de este modelo era estimar la cantidad de recursos hídricos disponibles como recarga potencial de los acuíferos, lo que ayudará a compensar los déficits producidos por las temporadas de sequía, y determinar el potencial de recarga de agua de los acuíferos. Este modelo se creó utilizando datos sobre la cubierta vegetal, tipos de suelo, pendientes del terreno, estaciones meteorológicas, sondeos de captación de agua, mapas geológicos e información geográfica. Estos datos se utilizaron para generar mapas con rasgos y cualidades relevantes, que luego se enunciaron matemáticamente para evaluar su influencia en el balance hídrico subsuperficial. Así se obtuvo un mapa de recarga potencial anual, que indicaba las zonas con más probabilidades de experimentar recarga y permitía calcular aproximadamente el volumen total anual de infiltración. A partir del análisis de la geomorfología y la geología estructural de la región, se crearon un modelo de flujo de aguas subterráneas y un modelo de superficie mediante la clasificación e identificación de las formaciones geológicas e hidrogeológicas presentes. Esta investigación presenta una similitud del 85% con a la investigación planteada.

Otro caso fue la investigación realizada por Palacios (2021) con el título de “Estudio hidrogeológico conceptual como base para determinar la influencia de la actividad minera a cielo abierto, en la dinámica de los nacimientos de agua presentes en la cuenca de la Quebrada Aguas Calientes, en la Vereda Mochuelo Bajo, Localidad de Ciudad Bolívar (Bogotá D.C. – Colombia)” donde se basó en la caracterización geológica- geofísica, hidráulica e hidrogeoquímica realizada en la zona de estudio, su objetivo principal era evaluar la dinámica de las aguas subterráneas de la región. Durante la investigación y caracterización del ecosistema se detectaron varias amenazas. Entre ellas destacan las siguientes En la región se encuentra el Parque Minero Industrial El Mochuelo, donde se extraen arcillas para la fabricación de ladrillos, arena y otros materiales de construcción. Debido a que estas operaciones mineras se están acercando a las fuentes de agua, existe la posibilidad de que tengan un impacto en la dinámica hidrogeológica que sustenta y abastece las fuentes de agua de la microcuenca Quebrada Aguas Calientes. En el transcurso de este estudio, quedó claro que las aguas subsuperficiales y los suelos interactúan en gran medida. Esta interacción se describe como un sistema abierto entre las plantas y el suelo, en el que la materia y la energía pueden moverse entre ambos. Las plantas utilizan sus tejidos, en particular sus hojas, para transferir agua del suelo al aire. Parte de este vapor de agua liberado al aire se condensa y vuelve al suelo en forma líquida para reintegrarse en el ciclo del agua debido a los gradientes de potencial hídrico que se producen en el interior y que son responsables de la transpiración, el principal mecanismo que impulsa el movimiento del agua por toda la planta. Esta investigación presenta una similitud del 85% con la investigación planteada.

Otro ejemplo se ve en la tesis de Camacho (2020) llamada “Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de la dunita de Medellín, a partir de

información secundaria” donde se implementó y validó la metodología ACPF (Agricultural Conservation Planning Framework) y se presenta un modelo hidrogeológico para el acuífero de Dunita, cerca de Medellín. En él se identifican zonas de relieve utilizando un MDE con un tamaño de celda de 12,5 x 12,5 m, en las que el agua puede acumularse y, si se dan las circunstancias, entrar y rellenar el acuífero. Numerosas geoformas kársticas, manantiales, arroyos que se convierten en subterráneos y afloran a media ladera, y otros rasgos que evolucionaron en esta unidad relacionados con flujos de agua que, además de ser transportada, puede ser almacenada y podría ser utilizada para abastecimiento futuro, han sido demostrados y cartografiados en detalle por diversos estudios. Mediante la recopilación de datos sobre las características geológicas, geomorfológicas, estructurales e hidrogeológicas, así como la realización de validaciones de campo, un modelo hidrogeológico permite conocer el potencial de un acuífero. En consecuencia, se plantean nuevas teorías para próximos estudios y se presenta una propuesta esquemática del posible comportamiento del flujo a través de esta unidad. Esta investigación presenta una similitud del 80% con la investigación planteada.

Finalmente, Trejos (2022) en su investigación denominada “Modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del río Parita, República de Panamá” se enfocó en desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual de la Cuenca del Río Parita en la Región del Arco Seco de Panamá, con el objetivo de cumplir con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y el Plan Nacional de Seguridad Hídrica. La metodología incluyó una revisión exhaustiva y depuración de la base de datos hidrogeológica disponible de las Entidades

Gubernamentales, seguida de análisis y visualización mediante herramientas de sistemas de información geográfica para la elaboración de mapas y

georreferenciación. Los resultados revelaron que variables clave como la precipitación, los caudales y la evapotranspiración potencial muestran una tendencia a la disminución con el tiempo. A través del cálculo del Balance Hídrico se pudo estimar las entradas y salidas del sistema, evidenciando que los ríos y afluentes ganan agua del acuífero. Además, se identificaron dos posibles áreas de recarga en la cuenca del Río Parita. En conclusión, este estudio proporciona un modelo conceptual detallado que contribuye al entendimiento y manejo sostenible de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Parita, crucial para abordar los desafíos de escasez de agua en las comunidades y el sector agropecuario de la Región del Arco Seco. Esta investigación presenta una similitud del 80% con la investigación planteada.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la investigación realizada por Miranda (2019) llamada “Modelo hidrogeológico conceptual para la ubicación, diseño y construcción de tapones herméticos en el **proyecto** Pariguanas unidad minera Orcopampa- Cia de minas Buenaventura S.A.A.” tuvo como objetivo la explicación del modelo hidrogeológico, así como la actividad geomecánica del macizo rocoso; esto permite la interpretación de estas especificidades para localizar, diseñar y construir tapones herméticos como cierre definitivo de la mina. La metodología planteada es de tipo descriptiva, diseño no experimental y plantea como herramientas un levantamiento topográfico y determinación de características del macizo rocoso con los métodos RMR y RQD. Además, pretende destacar lo crucial que es realizar actividades de evaluación hidrogeológica para comprender el verdadero comportamiento de las aguas subterráneas con la optimización, así como para lograr una mayor precisión en los estudios y la optimización. Teniendo en cuenta el impacto de los humedales y la escorrentía superficial, los datos recogidos para la investigación indican que las aguas

subterráneas se mueven en dirección horizontal con muy poca presencia en dirección vertical. vertical; teniendo en cuenta la escorrentía superficial y los efectos de los humedales.

Por su parte Tucto (2019) en su investigación “Evaluación hidrogeológica en las labores subterráneas, zona Catuva - Mina Raura” tuvo como objetivo evaluar las condiciones de infiltración de agua subterránea en las labores subterráneas del Complejo Catuva y caracterizar el entorno mediante el inventario de fuentes de agua y la cartografía hidrogeológica, centrándose en la cabecera de la cuenca del río Huallaga. Se llevó a cabo una investigación de campo exhaustiva, en la que se recopilaban datos hidrogeológicos, se analizaban muestras de agua, se inventariaban las fuentes de agua y se cartografiaban parámetros hidrogeológicos como la conductividad hidráulica del suelo y la permeabilidad de las rocas, utilizando herramientas especializadas. Se terminó revelando una correlación entre la presencia de agua subterránea en una mina y la permeabilidad de las rocas, sobre todo en las calizas de Jumasha. El pH neutro del agua está relacionado con la fracturación y el fallamiento. Un caudal elevado en el nivel 250 sugiere una mayor profundidad de extracción. El agua ácida debida a la pirita friable se gestiona mediante tratamiento químico. Los vertidos de aguas subterráneas suelen ser de buena calidad y afectan a lagunas y ríos.

Orihuela (2020) en su investigación “Caracterización geomecánica del macizo rocoso en áreas de afluencia de agua, con la finalidad de impermeabilizar zonas de alto tránsito, en la Unidad Minera Cobriza - Doe Run Perú – 2019” planteo como objetivo principal el determinar el estudio de la caracterización geomecánica del macizo rocoso en áreas de afluencia de agua, con la finalidad de impermeabilizar zonas de alto tránsito, en la Unidad Minera Cobriza, Doe Run Perú 2019. El estudio

utiliza un método científico, de tipo aplicativo y nivel descriptivo para investigar obras de alta incidencia hidrológica, con zonas de alto tráfico como muestra. Se concluyo que la caracterización geomecánica de las áreas de afluencia de agua se estableció a través de estaciones geomecánicas y registros históricos, normalizando el cuidado de la matriz rocosa e impermeabilizando cavidades en las obras de profundización Tj 4500, Tj 4500 Norte, Tj. 2180, y rampa 4800-zz.

Ramos (2021) en su investigación denominada “Análisis de un modelo hidrogeológico conceptual preliminar de las relaveras Colquisiri Lima- Huaral” planteo como objetivo principal el determinar la interacción hidrogeológica del acuífero denominado “Jecuan”, que tendrá con el depósito de relaves proyectada. El presente estudio tiene carácter descriptivo, ya que se encuentra apoyado por una investigación instrumental y de campo: además de ser carácter prospectivo, porque los resultados servirán en tomar medidas de prevención. El estudio revela una recarga mínima de aguas subterráneas procedentes de aguas meteóricas en las microcuencas del proyecto, pero se observa una recarga significativa del acuífero de Jecuan desde la cuenca del río Chancay. La elevación de las aguas subterráneas bajo los depósitos de estériles sugiere la existencia de filtraciones, y el análisis del flujo revela que el flujo predominante se encuentra al noroeste de estos depósitos, lo que subraya la necesidad de una gestión adecuada.

Fonseca (2019). planteo como objetivo general el evaluar y optimizar la extracción de aguas subterráneas del acuífero del río Lurín, sector Chontay, asegurando un equilibrio eficaz entre las entradas y salidas de flujo para un aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. La metodología se fundamentó en la recolección y análisis de datos hidrogeológicos en campo, permitiendo la creación de un modelo numérico geológico e hidrogeológico estacionario y transitorio. Se

proyectaron dos escenarios de extracción de flujo: uno mediante galería filtrante y otro a través de cuatro pozos, simulando así diferentes estrategias de extracción. Los resultados obtenidos mostraron la viabilidad del modelo numérico 3D con FEFLOW para el acuífero del río Lurín, sector Chontay, demostrando su capacidad para ajustarse a geometrías geológicas complejas. La calibración del modelo permitió una buena aproximación entre los datos calculados y los medidos en campo, facilitando la predicción de escenarios hidrogeológicos y proporcionando información crucial para la planificación de futuras obras de extracción de flujo. En conclusión, este estudio contribuye significativamente a mejorar la gestión y aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en la región.

2.2. Bases teóricas - científicas

2.2.1. Hidrogeología

En el contexto de la geología regional, la hidrogeología es el estudio exhaustivo de las aguas subterráneas, incluida su distribución y sus cambios espaciales y temporales. Un método alternativo consiste en examinar cómo se comporta el agua en el entorno geológico utilizando los principios de la hidráulica. Abarca la hidráulica de pozos, que consiste en perforar para extraer agua para diversos usos y gestionar el comportamiento de esa agua en el entorno en función del tipo de material perforado (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

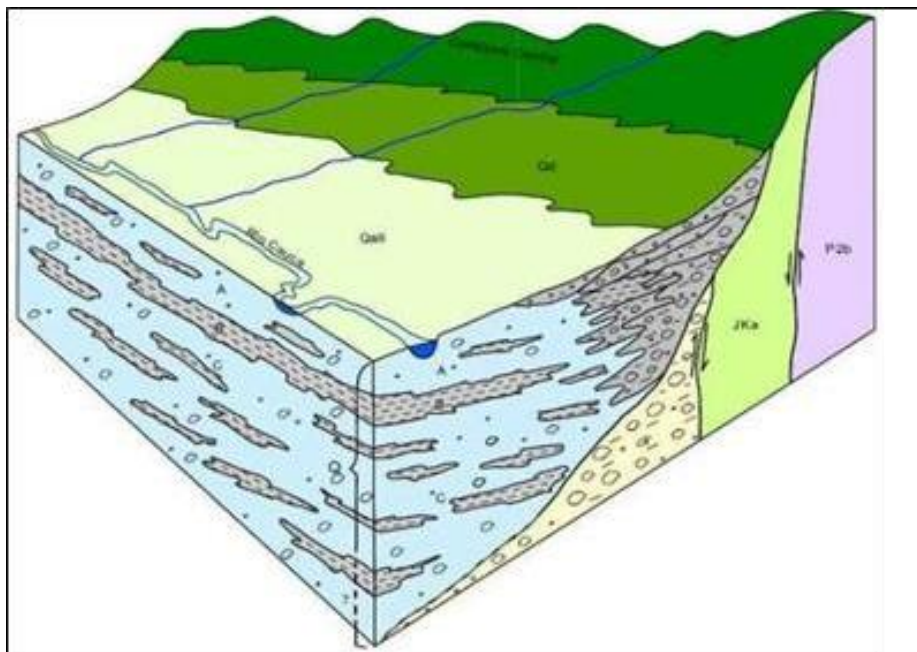
2.2.2. Modelo Hidrogeológico

Un modelo hidrogeológico se puede definir como una representación descriptiva y gráfica de un sistema acuífero que simplifica la cuestión física y el dominio incorporando una interpretación de las condiciones geológicas e hidrogeológicas, así como sus interacciones con sistemas relacionados (ríos, lagos, ecosistemas y el océano). Este modelo es una entrada fundamental e importante para

el modelo matemático que se utilizará como herramienta de gestión durante las etapas de planificación de los recursos de aguas subterráneas. Puede construirse a partir de datos primarios y secundarios preliminares de la zona de estudio Martínez (2018).

Los estudios hidrogeológicos de campo son necesarios para evaluar si un acuífero es un sistema abierto que intercambia materia y energía con el medio circundante. El modelo representa entonces los resultados de una investigación hidrogeológica fundamental realizada en un lugar concreto Godoy (2018).

Figura 1. *Ejemplo de Modelo Hidrogeológico*



Nota. Imagen obtenida de “Análisis de pruebas de bombeo mediante la prueba diagnóstica”

Por otro lado, a medida que aumenta el uso de las aguas subterráneas, se hace más vital y necesario determinar la calidad del recurso mediante la medición de parámetros distintivos y significativos que ofrezcan información precisa sobre el estado actual del agua. Sólo entonces podrán establecerse y ponerse en práctica diversas medidas para la protección del recurso y la regulación de su uso Cortes (2021).

Ramos (2021) menciona que esta representación incluye la geometría de los acuíferos, la separación de las unidades hidrogeológicas en base a su capacidad para almacenar y transferir agua, las propiedades hidráulicas de los acuíferos, la posición de los niveles piezométricos, las condiciones del flujo de agua subterránea y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, las propiedades hidroquímicas y potencialmente isotópicas, y la delimitación de las zonas de recarga, tránsito y descarga. Proporciona una visión general de los fundamentos de la dinámica y el estado de las aguas subterráneas en el subsuelo, así como de sus interacciones con las masas de agua superficiales y los aportes atmosféricos. Basándose en el examen y la interpretación de datos relacionados con la geología, la hidrología, la hidráulica, la hidroquímica y los isótopos, ofrece una comprensión de cómo se comportan los acuíferos o los sistemas acuíferos en un lugar y a una escala determinados.

2.2.3. Identificación de las fuentes hídricas

- Cavidades kársticas: Las cavidades kársticas son estructuras subterráneas originadas por el proceso de disolución de rocas solubles, tales como las calizas y dolomías. Estos espacios pueden contener grandes cantidades de agua subterránea y funcionar como vías principales para su circulación (Ravbar et al., 2023).
- Dolinas: Son hundimientos cerrados en el suelo generados por la disolución o el colapso del terreno sobre espacios subterráneos kársticos. Pueden funcionar como áreas de recarga intensiva para los acuíferos, favoreciendo la rápida infiltración de agua desde la superficie hacia las capas profundas Zafra, D., & Rincon, J. (2018).
- Tragaderos: Trata de aperturas o depresiones en la superficie donde el agua superficial se infiltra hacia el interior del terreno, alimentando las

cavidades subterráneas Beato et al., (2019).

- Lapiaces: Son formaciones superficiales creadas por la erosión del agua en rocas calizas. Se caracterizan por hendiduras, fisuras o surcos en la roca, que pueden atrapar el agua de lluvia, favoreciendo su infiltración Zafra, D., & Rincon, J. (2018).
- Poljes: Se forman por la combinación de procesos de disolución y hundimiento, y suelen ser áreas donde se acumula agua, especialmente en épocas de lluvias intensas Beato et al., (2019).

2.2.4. Aguas Subterráneas

La expresión utilizada para describir toda el agua que se almacena en los espacios porosos entre los granos minerales, en las grietas de las masas rocosas o en las estructuras kársticas bajo la superficie de la tierra. Normalmente, esta agua procede del deshielo o de precipitaciones que se filtran a través del suelo y se almacenan en las formaciones rocosas subyacentes. Los materiales bajo esta superficie dictan el comportamiento del flujo y se clasifican en dos categorías: materiales de baja conductividad (como arcillas y limos) y materiales de alta conductividad (como rocas fracturadas, gravas y arenas) que permiten un drenaje relativamente rápido Tucto (2019).

Comprender las circunstancias hidrogeológicas de los emplazamientos mineros es crucial para reducir la influencia sobre las aguas subterráneas y crear estrategias de mitigación y gestión viables y económicas. Para apoyar la elaboración de planes de gestión del agua y los residuos, se necesitan expertos en el estudio de las interacciones entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales, el flujo de las aguas subterráneas, la hidrología de los contaminantes y la hidrología de las zonas vadasas, como hidrogeólogos e hidrogeoquímicos con amplia experiencia en la

investigación de las aguas subterráneas de los emplazamientos mineros Herrera (2019).

Figura 2. *Caso de presencia de aguas subterráneas en zona minera*



Nota. Imagen extraída de la revista “Seguridad Minera”

2.2.5. Recarga y Descarga de Aguas Subterráneas

Las zonas de recarga son áreas con una serie de características únicas que favorecen la filtración del agua hasta alcanzar el nivel freático. Estas características incluyen la conductividad hidráulica de la roca, la elevación topográfica, un nivel freático profundo, un suelo ácido y poco desarrollado con poca materia orgánica, bajas concentraciones de sales y/o sodio y vegetación xerófila. Dado que las zonas de recarga de agua desempeñan un papel importante en el sistema hidrológico de una cuenca hidrográfica, cualquier cambio que se produzca en ellas puede repercutir en los acuíferos y, a su vez, en la cantidad y calidad del recurso hídrico. Las zonas de descarga, por su parte, tienen características más notorias y están situadas a una elevación topográfica inferior a la de la zona de recarga. Pueden estar representadas por un manantial o una laguna, y los suelos de estas zonas tienden a ser más salinos y alcalinos, desarrollándose en general con un mayor contenido de materia orgánica (Lara et al., 2021).

2.2.6. Presencia de Agua en Macizos Rocosos

Herrera (2019) comenta que, por lo general, el agua tiene la mayor frecuencia como agente condicionante y desencadenante de inestabilidades y otros problemas geotécnicos y geomecánicas relacionados en el ámbito de las explotaciones mineras. Por otra parte, el abanico de consecuencias adversas derivadas de la existencia de agua en el medio operacional es excepcionalmente extenso y variado. A continuación, se resumen algunas de estas consecuencias negativas que se observan con mayor frecuencia en las operaciones mineras:

- Situaciones y factores a tener en cuenta en las explotaciones mineras a cielo abierto.
- Situaciones y factores que deben tenerse en cuenta en las explotaciones mineras de interior.
- Situaciones y factores a tener en cuenta ya que el cuerpo mineral a extraer contiene agua.
- Situaciones y factores a tener en cuenta en las instalaciones de residuos.

Figura 3. *Ejemplo de presencia de agua en un macizo rocoso*



Nota. Imagen obtenida de la revista “Seguridad Minera”

2.2.7. Modelo Geológico

El modelo también actúa como guía para definir los límites potenciales y las zonas donde se pueden encontrar características similares, es decir, zonas con posibilidades de encontrar acuíferos para la extracción de recursos hídricos. El modelo geológico revela los procesos que dieron origen al tipo de roca que forma parte de la unidad geológica de interés, identificando el material y su capacidad para almacenar y transportar agua. La observación directa, cuyo objetivo es ver el objeto de estudio sin interferir ni modificar el entorno, también es necesaria para conocer la geometría y el tipo de roca. Este método se utiliza en ocasiones para completar o validar datos extraídos de fuentes secundarias, como encuestas, cuestionarios, información tomada previamente, etc (Beltrán 2019).

Martinez (2018) menciona que las aguas subterráneas suelen encontrarse en los siguientes medios geológicos: materiales sedimentarios, típicamente conglomerados y areniscas consolidados y semiconsolidados con permeabilidad y porosidad primaria (intergranular) y secundaria como resultado de la fracturación; depósitos no consolidados de gravas y arenas frecuentemente intercalados con niveles o paquetes de limos y arcillas, que suelen ser el resultado de procesos aluviales o de deposición en laderas". Aunque las rocas ígneas y metamórficas pueden ser muy impermeables, las presiones tectónicas que las han fracturado a lo largo de su historia geológica han favorecido la formación de permeabilidad secundaria, que permite la circulación y el almacenamiento de agua.

2.2.8. Conductividad Hidráulica

El caudal que atraviesa una porción vertical unitaria de un acuífero bajo el efecto de un gradiente unitario se conoce como conductividad hidráulica (Huillca 2020). Se representa por k , y tiene dimensiones:

$$\frac{L^3}{T} = L.T^{-1}$$

La porosidad efectiva, el tamaño de los poros y la interconectividad de los poros del suelo están estrechamente relacionados con la conductividad hidráulica (Huillca 2020). También influyen la densidad y la viscosidad del fluido. Su magnitud, está representada por la siguiente igualdad:

$$K = K_0 * \frac{\rho g}{\mu}$$

Donde:

K = conductividad hidráulica

K0 = permeabilidad intrínseca, específica, geométrica o coeficiente de permeabilidad del terreno

ρ = densidad o masa específica

g = aceleración de la gravedad

μ = viscosidad dinámica del fluido

La conductividad hidráulica de la roca, que permite la infiltración de las precipitaciones, es uno de los marcadores de las zonas de recarga, que se caracterizan por presentar rasgos que favorecen la infiltración del agua hasta el nivel freático. El nivel freático profundo, los suelos a menudo ácidos y poco desarrollados, los bajos niveles de materia orgánica y las bajas concentraciones de sodio y sal son las características de estas zonas (Lara et al., 2021).

2.2.9. Geología y características regionales

Geología Regional y Local

La geología de Yauricocha se caracteriza por una secuencia estratigráfica altamente compleja, dominada por rocas sedimentarias del período Cretácico, las

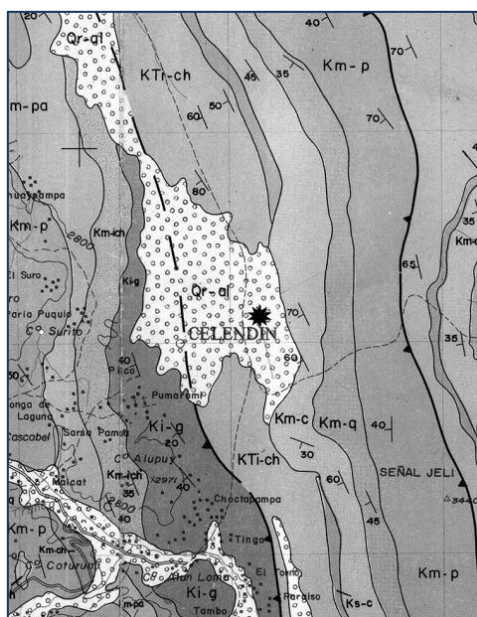
cuales fueron intruidas por masas ígneas en el Mioceno tardío. La Formación Jumasha, compuesta principalmente por calizas grises masivas, constituye la principal roca anfitriona de la mineralización. Esta formación, con un espesor superior a los 700 metros, presenta en su base entremezcladas pizarras carbonosas y lentes discontinuos de caliza marrón grisácea.

Figura 4. *Formación Jumasha*



Suprayacente a la Formación Jumasha se encuentra la Formación Celendín, del Cretácico Superior - Santoniano, con un espesor aproximado de 400 metros. Esta formación se compone de lutitas silicificadas, conocidas localmente como "France Chert", intercaladas con calizas recrystalizadas. La calidad de la roca en estas formaciones sedimentarias varía considerablemente, siendo generalmente competente en las calizas masivas de Jumasha, pero presentando zonas de fracturamiento intenso y menor competencia en las lutitas silicificadas de Celendín.

Figura 5. Mapa con la Formación Celendín



El evento geológico más significativo para la mineralización fue la intrusión de un cuerpo de cuarzo monzonita-cuarzo durante el Mioceno tardío. Este intrusivo invadió las calizas y margas de las Formaciones Jumasha y Celendín, generando zonas de skarn y metamorfismo de contacto. La calidad de la roca intrusiva es generalmente competente, aunque presenta zonas de alteración hidrotermal que pueden disminuir su resistencia.

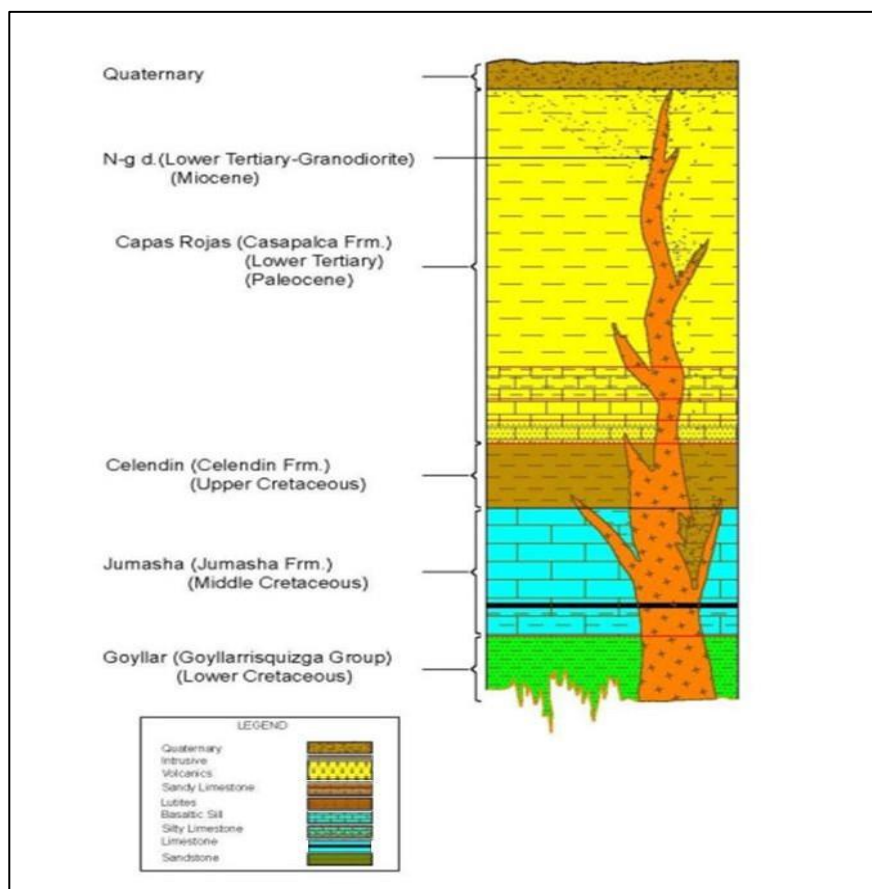
La mineralización en Yauricocha se presenta en diversos ambientes geológicos. El cuerpo Mascota, por ejemplo, se emplaza en rocas calcáreas de la Formación Jumasha y exhibe mineralización en ambientes de óxidos. Esta zona está asociada a fallas, cavernas y brechamiento, lo que resulta en una calidad de roca generalmente baja debido al intenso fracturamiento y alteración. En contraste, la Mina Central alberga depósitos de reemplazo de carbonato- sulfuro con una calidad de roca variable, mientras que en Cachi Cachi se encuentran depósitos de skarn con roca generalmente competente.

Estructuralmente, la zona está afectada por fallas regionales de orientación NW-SE y fallas transversales N-NE. La Falla Yauricocha, una estructura regional importante, controló significativamente la mineralización. Los cuerpos mineralizados están alineados a lo largo de la malla de fractura y en intersecciones de fallas, y se observa la presencia de brechas similares a tuberías en rocas altamente fracturadas.

Litología de la mina

La mina de Yauricocha, en la región limeña de Yauyos, se caracteriza por sus complejas formaciones geológicas. Sus unidades estratigráficas, que representan capas de roca, proporcionan información valiosa sobre la composición, estructura y distribución de los minerales. Cada unidad proporciona pistas sobre la historia geológica de la región y orienta las operaciones mineras.

Figura 6. *Columna Estratigráfica de la Minera Yauricocha*



(Nota. Autoría Propia)

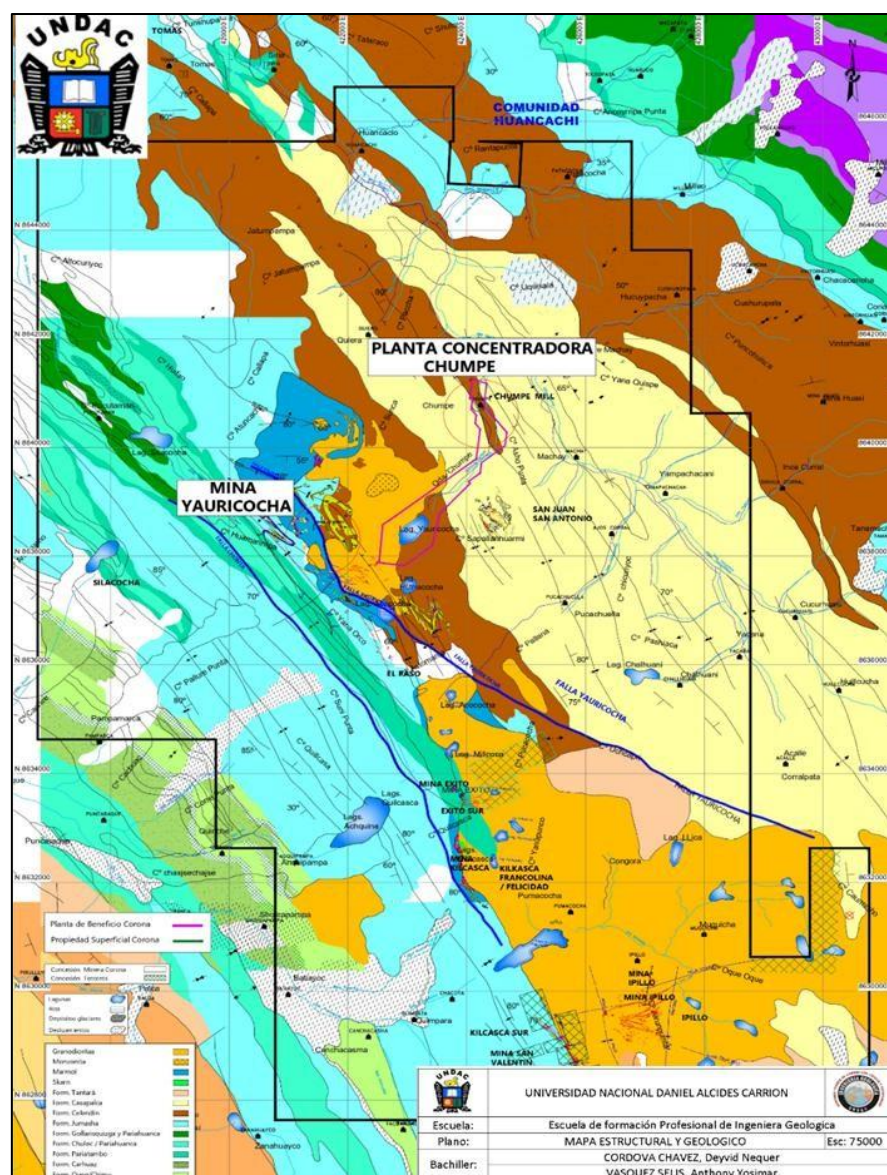
Al proporcionar un mejor conocimiento de la distribución y el comportamiento de las aguas subterráneas dentro del yacimiento mineral, este modelo hidrogeológico pretende salvaguardar la zona mineralizada. La organización de las características geológicas, como fallas y fracturas, que podrían afectar al flujo de aguas subterráneas, se describe en profundidad en el plano estructural. Para regular el nivel freático y detener la incursión de agua en la zona de extracción de minerales, también es útil identificar los lugares propensos a la acumulación de agua. Esta información se utiliza para construir sistemas de drenaje eficaces.

Aspectos estructurales

La Unidad Minera de Yauricocha, situada cerca de Yauyos, Lima, presenta un aspecto estructural complicado porque la zona alberga varias formaciones geológicas diferentes. Las fallas, que se definen por las fisuras de la roca y los movimientos a lo largo de ellas, son una característica estructural típica que puede estar presente en una explotación minera como Yauricocha. Las fallas pueden afectar a la estabilidad del terreno y a la distribución de las reservas 0minerales. Es fundamental considerar la dirección, extensión y densidad de las fracturas en el diseño y gestión de la mina, ya que estas fracturas pueden variar en tamaño, lo que influye directamente en la estabilidad estructural de las excavaciones. Las fracturas también afectan el comportamiento del flujo de aguas subterráneas, facilitando su movimiento o, en algunos casos, bloqueándolo, lo que puede tener un impacto importante en la seguridad operativa y en la eficiencia de los sistemas de drenaje. Asimismo, los pliegues en los estratos rocosos pueden alterar la forma y organización de los yacimientos, modificando las zonas de mayor concentración de mineral. Conocer la geometría precisa de estos pliegues y fracturas es esencial para planificar adecuadamente las perforaciones y evitar colapsos o movimientos imprevistos en el macizo rocoso. Además, la

interacción entre diferentes tipos de roca, como la formación de esquistos y caliza, puede influir notablemente en la mineralización y la hidrogeología de la zona. Estas variaciones litológicas determinan la capacidad de almacenamiento y flujo de agua subterránea, así como la distribución de los minerales valiosos, lo que hace que la caracterización geológica detallada sea crucial para una explotación segura y eficiente de los recursos mineros.

Figura 7. Mapa Estructural de la Mina Yauricocha



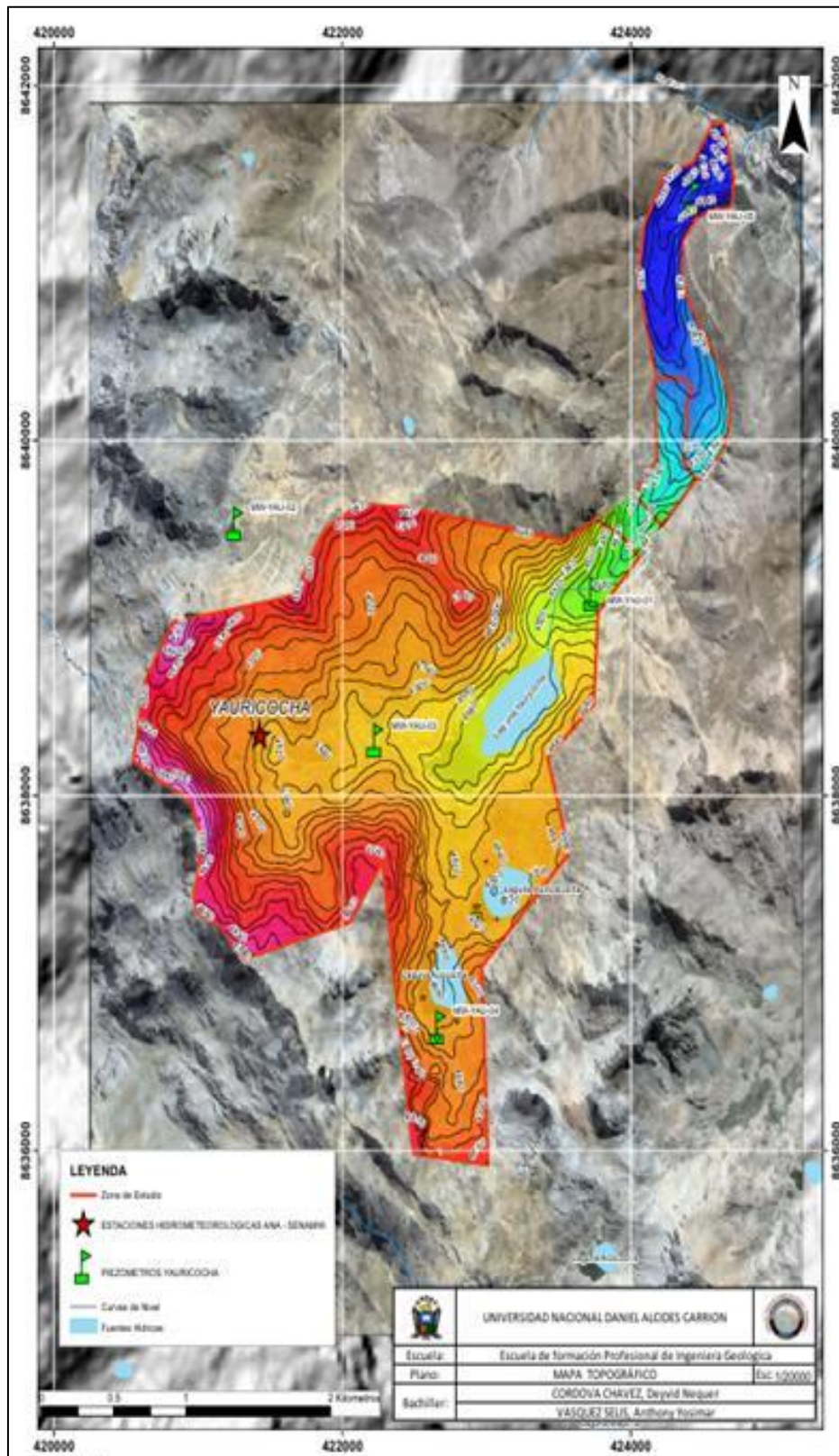
(Nota. Elaboración Propia Anexo 02)

En el mapa estructural se puede apreciar claramente la separación de la zona mineralizada entre la caliza y el intrusivo. En primer lugar, la infiltración de agua de lluvia a través de fracturas y porosidades en la caliza crea reservorios subterráneos que pueden alimentar las operaciones mineras. Además, la interacción entre el agua y los depósitos minerales puede generar procesos de lixiviación, donde el agua disuelve minerales y transporta metales valiosos hacia áreas de acumulación. Por otro lado, las intrusiones ígneas pueden actuar como barreras impermeables o generar fracturas que facilitan el movimiento del agua subterránea. Asimismo, la recarga de acuíferos desde fuentes superficiales como ríos y arroyos también contribuye significativamente a la disponibilidad de agua en la zona mineralizada. En conjunto, estas fuentes de acumulación de agua entre la caliza y las intrusiones ígneas juegan un papel crucial en el abastecimiento hídrico para las operaciones mineras en Yauricocha, destacando la complejidad y la importancia de comprender la hidrogeología en este contexto específico.

Topografía superficial

La relación entre la topografía y los flujos de agua es evidente en el desarrollo de cuencas hidrográficas. Las cuencas están delimitadas por las formas del terreno y los puntos más altos actúan como divisorias de aguas. Los caudales tienden a concentrarse en las zonas más bajas, lo que puede aumentar la velocidad del flujo y su capacidad erosiva si no se maneja correctamente.

Figura 8. Topografía Mina Yauricocha



(Nota. Elaboración Propia)

Precipitación

Las precipitaciones estacionales en la mina Yauricocha tienen una estrecha relación con las filtraciones de aguas en la zona mineralizada. Durante la temporada de lluvias, los niveles de agua en los acuíferos aumentan considerablemente, lo que puede intensificar las filtraciones hacia las áreas mineralizadas. Esto puede acelerar procesos de lixiviación, disolviendo metales presentes en el subsuelo y potencialmente afectando la calidad del agua subterránea. Por otro lado, en la estación seca, la recarga de los acuíferos disminuye, lo que puede reducir las filtraciones, pero también aumentar la concentración de sustancias disueltas en el agua. Por lo tanto, entender cómo las precipitaciones estacionales afectan las filtraciones de agua en la zona mineralizada es fundamental para gestionar adecuadamente los riesgos ambientales y operativos en la mina Yauricocha. La estación de donde se registró la información fue la estación Yauricocha la cual se encuentra a una altitud de 4,675 metros sobre el nivel del mar (msnm), ubicada en la cuenca del río Cañete, en la región de Yauyos, Lima.

Tabla 1. *Registro de Precipitaciones.*

FECHA	PRECIPITACION (MM/DIA)
dic-22	160.9
ene-23	24.9

(Nota. Elaboración Propia. Durante 24 días entre finales del 2022 e inicios del 2023 del SENAMHI)

Características hidrogeológicas regionales y locales

Características hidrogeológicas regionales

a. Estratigrafía de Yauyos

La estratigrafía de Yauyos revela una secuencia compleja que abarca diversas épocas geológicas y procesos geodinámicos. El Grupo Yauyos,

datado desde el Jurásico al Cretácico, está compuesto por una variedad de sedimentos marinos y volcánicos como areniscas, lutitas, calizas y tufas, reflejando condiciones ambientales cambiantes a lo largo del tiempo. La Formación Farrat, también del Cretácico, se distingue por sus areniscas cuarzosas y conglomerados continentales, indicativos de procesos sedimentarios terrestres. Por su parte, la Formación Pariahuanca, compuesta por calizas marinas y sedimentos clásticos continentales, aporta detalles cruciales sobre la evolución sedimentaria y ambiental en la región. Intrusiones plutónicas posteriores, como granodioritas, dioritas y gabros durante el Eoceno y Mioceno, evidencian eventos tectónicos que afectaron estas unidades previas. Los depósitos volcánicos del Mioceno al Pleistoceno, caracterizados por lavas andesíticas y dacíticas, subrayan la actividad volcánica derivada de la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana.

b. Geomorfología de Yauyos

La región de Yauyos se caracteriza por un relieve montañoso que abarca altitudes que van desde los 1,500 hasta los 5,000 metros sobre el nivel del mar. Este paisaje está dominado por la Cordillera Occidental de los Andes, que cruza la región de norte a sur, delineando profundos valles donde los ríos como el Cañete y el Rímac han excavado sus cursos. Además de los valles, se encuentran mesetas Inter montañas destacadas, como la meseta de Yauyos, que contribuyen a la diversidad geomorfológica de la zona. En las altas cumbres de la Cordillera, como en el nevado Pariacaca, se conservan glaciares, subrayando la importancia del agua glacial en el régimen hidrológico regional. Este variado relieve

almacenamiento de agua, permitiendo una rápida infiltración en las zonas de caliza y una retención limitada en áreas de baja permeabilidad.

d. Porosidad

La porosidad en Yauyos varía según el tipo de roca como por ejemplo las calizas fracturadas de la Formación Jumasha tienen una porosidad total entre 10% y 20%, aunque la porosidad efectiva suele ser menor, entre 2% y 8%, especialmente en áreas más compactas. En contraste, las lutitas y otras rocas menos permeables presentan una porosidad efectiva muy baja, generalmente inferior al 5%. Esta porosidad secundaria en las calizas favorece una mayor capacidad de almacenamiento y facilita la recarga del agua en estas zonas.

e. Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica en Yauyos refleja la capacidad del medio poroso para transmitir agua, la cual se incrementa en las calizas debido a la presencia de fracturas y procesos de disolución. Las calizas kársticas presentan conductividades hidráulicas elevadas, en un rango de 10^{-3} a 10^{-2} m/s, mientras que en las lutitas estos valores son considerablemente más bajos, entre 10^{-8} y 10^{-7} m/s. Esta alta conductividad hidráulica en las zonas de caliza permite la transmisión de grandes volúmenes de agua, lo que favorece el abastecimiento de pozos y fuentes hídricas en la región, siendo de gran relevancia para el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos.

f. Recarga

En la región de Yauyos, la recarga de acuíferos ocurre principalmente a través de la infiltración de lluvias y el deshielo en zonas de alta altitud,

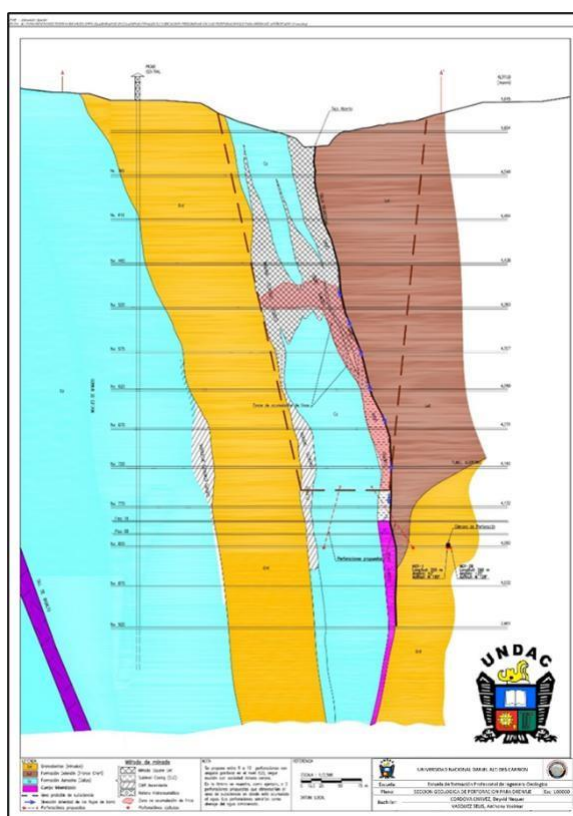
donde la precipitación es considerable. La rápida infiltración en áreas kársticas aumenta la eficiencia de la recarga. Se estima que en regiones montañosas como Yauyos, la tasa de recarga representa entre un 10% y un 15% de la precipitación anual, que puede llegar a 1200 mm en las zonas altas, lo que equivale a una recarga anual de entre 120 y 180 mm. Esta recarga está sujeta a la variabilidad climática y estacional, con incrementos notables durante la temporada de lluvias.

Características Hidrogeológicas Locales

a. Estratigrafía de Yauricocha

La columna estratigráfica de Yauricocha abarca desde el Devónico hasta el Pleistoceno, destacándose por su diversidad geológica. Comienza con la Formación Excelsior del Devónico, compuesta por pizarras, areniscas y cuarcitas marinas. Le sigue el Grupo Yauyos, que incluye sedimentos marinos y volcánicos desde el Jurásico hasta el Cretácico. La Formación Farrat del Cretácico, con areniscas cuarzosas y conglomerados, marca una transición a ambientes terrestres. Durante el Eoceno-Oligoceno, intrusiones de granodioritas y dioritas alteraron las formaciones anteriores. La Formación Chonta del Mioceno añade sedimentos continentales, mientras que las erupciones volcánicas del Mioceno al Pleistoceno generaron depósitos de lavas andesíticas y dacíticas, relacionados con la subducción de la Placa de Nazca. Finalmente, los depósitos cuaternarios incluyen sedimentos fluviales y glaciares, proporcionando una visión completa de la evolución geológica y de los recursos naturales de la región.

Figura 10. Estratigrafía de Yauyos

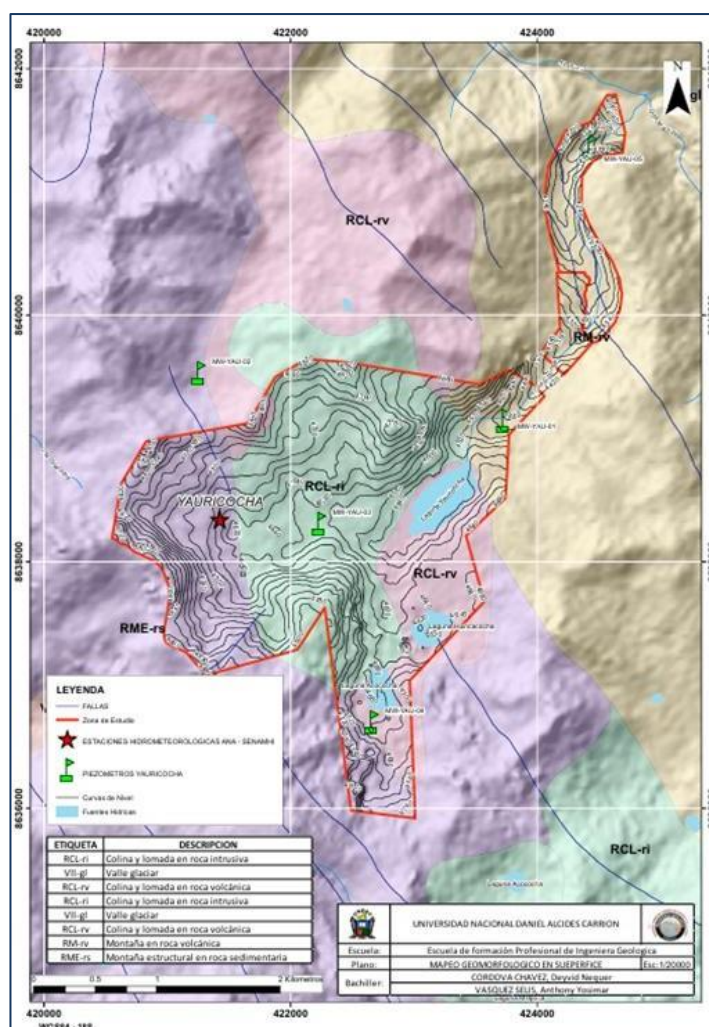


(Nota. Elaboración Propia)

b. Geomorfología de Yauricocha

El relieve de Yauricocha es predominantemente montañoso, con altitudes que oscilan entre los 3,000 y 5,000 metros sobre el nivel del mar (msnm). En esta zona destacan prominentes picos nevados, como el nevado Sara, que no solo contribuyen al paisaje imponente, sino que también influyen en el clima local y los patrones de precipitación. Los ríos, como el río Cañete, han tallado profundos valles a lo largo de los años, creando pendientes escarpadas y zonas de difícil acceso.

Figura 11. Mapa Geomorfológico de Yauricocha



(Nota. Elaboración Propia.)

c. Acuíferos y Permeabilidad

Las calizas de la Formación Jumasha en Yauricocha actúan como acuíferos altamente eficientes debido a su alta permeabilidad secundaria, que resulta de procesos geológicos como la fracturación y la disolución kárstica. Estas fracturas y cavidades, generadas por la circulación de agua a través de la roca calcárea, han incrementado significativamente la capacidad de estas calizas para almacenar y transmitir agua subterránea, favoreciendo el flujo a través de conductos y fisuras interconectadas. La disolución kárstica, en particular, ha formado espacios de almacenamiento

amplios que se comportan como canales naturales de transporte de agua, permitiendo que el acuífero responda eficientemente a la recarga de agua proveniente de las precipitaciones y deshielos en las montañas cercanas.

d. Recarga Hídrica

La recarga hídrica en Yauricocha se produce mayormente por infiltración de lluvias y deshielos, gracias a la alta altitud de la mina, situada entre 4,150 y 4,700 metros sobre el nivel del mar, donde la precipitación es considerable. Estas condiciones hacen que el flujo subterráneo siga las pendientes naturales y se vea influenciado por estructuras geológicas como fallas y fracturas, que pueden redirigir el agua hacia los túneles mineros. La transmisividad en las calizas es alta, favoreciendo el flujo de agua y aumentando el riesgo de infiltración hacia las galerías subterráneas. Las operaciones mineras a menudo impactan estas condiciones hidrogeológicas, modificando el nivel freático y afectando la calidad del agua subterránea debido al contacto con minerales expuestos y a los residuos de la extracción.

2.3. Definición de términos básicos

Aguas Subterráneas: Es una sección de una formación geológica formada por material permeable con capacidad para retener un volumen determinado de agua. Los acuíferos pueden estar formados por diversos elementos, como gravas, arenas sueltas, lavas volcánicas rotas, rocas sedimentarias porosas como fangolitas y areniscas, rocas cristalizadas, etc.

Caudal: Es la cantidad de agua que fluye a través de un río o canal en una unidad de tiempo sobre una sección transversal. El volumen de fluido que se desplaza en una unidad de tiempo se conoce como caudal en dinámica de fluidos. Suele

determinarse midiendo el volumen que se desplaza a través de un área específica en una unidad de tiempo, o caudal volumétrico. Más raramente se asocia con el caudal másico o la masa que se desplaza a través de un lugar específico en una cantidad de tiempo determinada.

Escorrentía: Cuando se supera la capacidad de evaporación e infiltración de las precipitaciones, la escorrentía es el agua que circula y se extiende por el suelo. Dado que permite principalmente la recogida de agua, una escorrentía que se extienda fácilmente por el suelo es crucial para la supervivencia humana.

Piezómetro: Pozo suficiente para realizar mediciones precisas del nivel piezométrico y/o del nivel freático; además, para controlar la calidad de las aguas subterráneas.

Porosidad: proporción entre el volumen total de una roca o sedimento y el volumen de sus huecos, estén o no conectados. El término porosidad "total" se refiere a la porosidad en este sentido. El término porosidad "total" se refiere a la porosidad en este sentido, pero la porosidad "efectiva" se utiliza con más frecuencia en hidrología. No obstante, la hidrogeología tiende a utilizar la porosidad "efectiva" con más frecuencia que la "total".

Zona de Descarga: La zona de descarga es el lugar donde el agua aflora a la superficie y representa la fase final del flujo de agua subterránea; como tal, el agua ha adquirido propiedades específicas (salinidad, temperatura, pH, OD, etc.) con una continuidad específica del flujo a lo largo del tiempo que condiciona la presencia de un suelo y una vegetación específicos en función de las variables del caso. Esto hace que la zona de descarga sea el indicador más fiable del funcionamiento de las aguas subterráneas.

Zona de Recarga: A menos que se disponga de fondos suficientes para perforar y recoger muestras del suelo y del subsuelo en determinadas circunstancias, la identificación de estas zonas es más difícil, ya que el agua se infiltra y no hay indicios en la superficie, a diferencia de lo que ocurre en las zonas de descarga. Pero hay dos indicadores a los que prestar atención: uno es la conductividad hidráulica de la roca, que podría permitir la infiltración de las precipitaciones, y el otro es la elevada topografía de la roca. La zona de recarga tiene una baja concentración de sales y/o sodio, un nivel freático profundo, un suelo ácido y mal formado y una materia orgánica mínima.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

El modelo hidrogeológico influyó significativamente en el diseño y ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima.

2.4.2. Hipótesis específicas

- El modelo hidrogeológico influyó significativamente en la ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima.
- El modelo hidrogeológico influyó significativamente en el diseño de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable Independiente: X: Modelo Hidrogeológico para el diseño y ubicación de cruceros de drenaje.

2.5.2. Variable Dependiente: Y: Protección de zonas mineralizadas.

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Tabla 2. Operacionalización de las variables

CUADRO DE OPERALIZACIÓN DE VARIABLES					
VARIABLES	CONCEPTO	DIMENSIONES	SUBDIMENSIONES	INDICADORES	TIPO DE VARIABLES
Independiente: Modelo Hidrogeológico para el diseño y ubicación de cruceros de drenaje	Es una representación conceptual y matemática del flujo subterráneo que permite simular el comportamiento del acuífero en función de sus propiedades geológicas, hidráulicas y estructurales, con el fin de orientar decisiones técnicas. (Miranda, 2019)	Características Geológicas	Geología regional y local	Tipo de roca, presencia de fallas	Nominal
			Geología Local		
			Geología Estructural		
		Parámetros Hidrogeológicos	Nivel freático, recarga/descarga, gradiente hidráulico	Nivel piezométrico (m), dirección de flujo	Cuantitativa continua
			Conductividad hidráulica	Permeabilidad obtenida por ensayo Lugeon (m/s)	Cuantitativa continua
			Ubicación y orientación de los cruceros	Número y longitud de cruceros por zona	Cuantitativa discreta
Dependiente: Protección de zonas mineralizadas	Es el efecto observable luego de aplicar el modelo hidrogeológico: menor ingreso de agua a zonas mineralizadas mediante cruceros de drenaje estratégicamente diseñados.	Comportamiento hidráulico	Caudal drenado	Diferencia entre caudal antes y después del drenaje (L/s)	Cuantitativa continua
		Eficiencia del drenaje	Tiempo de respuesta hidráulica	Días entre ejecución y estabilización	Cuantitativa discreta
		Condiciones estructurales del crucero	Dimensiones del crucero	Ancho y altura (m)	Cuantitativa continua

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es **aplicada**, dado que se utiliza el conocimiento científico y técnico disponible para desarrollar un modelo hidrogeológico que permita resolver un problema específico la presencia de agua subterránea en zonas mineralizadas de la UM Yauricocha. Este tipo de investigación busca generar soluciones prácticas y efectivas a situaciones reales del contexto minero, basándose en fundamentos teóricos previamente establecidos.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es **explicativo-descriptivo**, ya que por un lado se describen en detalle los procesos de infiltración de agua en los tajos, y por otro se explica la relación entre los factores geológico-estructurales, hidrogeológicos y la efectividad del sistema de drenaje implementado. Esta tesis se enmarca en un enfoque explicativo, en tanto que, a partir del análisis de datos recolectados entre 2022 y 2023, se concluye que la ejecución de taladros de drenaje redujo significativamente el ingreso

de agua en la zona mineralizada, como se evidencia en las tablas y gráficos presentados en los resultados.

3.3. Métodos de investigación

El método de investigación adoptado es **hipotético-deductivo**, dado que se parte de una hipótesis general basada en principios teóricos de la hidrogeología y el comportamiento del flujo subterráneo, la cual es contrastada con observaciones y datos reales recolectados en campo. Este método permite establecer una secuencia lógica desde el planteamiento de hipótesis, formuladas a partir del análisis geológico e hidrogeológico, hasta su validación mediante el modelamiento y evaluación de resultados medidos en la zona de estudio.

En este marco, se propone que la implementación de un modelo hidrogeológico bien estructurado permite reducir significativamente el ingreso de agua en cuerpos mineralizados mediante cruceros de drenaje estratégicamente diseñados. La hipótesis es comprobada a través de simulaciones, aforos, piezometría y contrastes con registros históricos. Como señala Bunge (2000), el método hipotético-deductivo permite inferir consecuencias observables a partir de supuestos teóricos, las cuales deben ser verificadas empíricamente para sostener o refutar las proposiciones iniciales.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de la investigación en esta investigación es **no experimental**, de tipo **descriptivo** y de **corte transversal**, debido que se trabaja con datos reales obtenidos del dentro de la Unidad Minera Yauricocha. No se manipulan deliberadamente las variables, sino que se observan y analizan tal como se presentan en su contexto natural, con el objetivo de describir las condiciones hidrogeológicas existentes en un periodo específico.

El estudio se centra en describir el comportamiento hidrogeológico de la zona mineralizada de la UM Yauricocha a lo largo del tiempo, evaluando las condiciones existentes y los efectos de la implementación de cruceros de drenaje, sin establecer grupos de control ni aplicar tratamientos experimentales. Este enfoque permite caracterizar las condiciones del flujo subterráneo y validar el modelo hidrogeológico desarrollado, con base en la observación directa y el análisis de datos reales recopilados entre 2022 y 2023.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población es todo el sistema hidrológico que influyen en los cuerpos mineralizados, estructuras geológicas y sectores operativos de la Unidad Minera Yauricocha donde se evidencian procesos de infiltración subterránea. Este entorno constituye el sistema físico sobre el cual se evalúa la interacción entre el flujo de agua y la infraestructura minera

3.5.2. Muestra

La muestra está integrada por cruceros de drenaje, taladros hidrogeológicos y zonas mineralizadas con afectación hídrica comprobada. La selección fue dirigida, en función de criterios técnicos e hidrogeológicos, permitiendo validar el modelo y evaluar la eficacia del diseño de drenaje en zonas críticas.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas

- Mapeo hidrogeológico subterráneo, realizado mediante observación directa en labores mineras, empleando cartografía base, brújula geológica y herramientas de exploración de campo.
- Aforos de caudal en galerías y cruceros de drenaje, con medición en turnos

diurnos y nocturnos durante el periodo 2022–2023, en paralelo a la ejecución de taladros de drenaje.

- Seguimiento de niveles piezométricos en pozos instrumentados, con registros periódicos manuales y digitales.
- Ensayos de permeabilidad tipo Lugeon, aplicados antes de la instalación de piezómetros, para caracterizar la conductividad hidráulica en zonas fracturadas.
- Análisis de registros históricos de caudal (2014–2023), integrados con datos actuales para identificar tendencias y evaluar la efectividad del sistema de drenaje.
- Modelamiento hidrogeológico conceptual y numérico, basado en simulaciones de flujo en estado transitorio utilizando software especializado.
- Procesamiento y análisis estadístico de datos hidrogeológicos, mediante hojas de cálculo y scripts automatizados en Python.

3.6.2. Instrumentos

- Redout para cuerda vibrante marca Geokkón.
- Medidor manual de nivel de agua marca Solinst.
- Equipo multiparamétrico WTW.
- Brújula geológica Brunton.
- Picota, linterna y plano cartográfico.
- Software especializado: (Leapfrog Geo / Leapfrog Hydro, ArcGIS, AutoCAD Civil 3D, FEFLOW, Microsoft Excel y Python).

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

Los instrumentos seleccionados para esta investigación fueron elegidos en función de su precisión, adaptabilidad al entorno subterráneo y capacidad para registrar variables hidrogeológicas críticas. Se validaron a través de comparaciones cruzadas entre lecturas de campo, datos históricos y registros provenientes de modelamiento numérico. La confiabilidad de los datos obtenidos se garantizó mediante procedimientos sistemáticos de mantenimiento, verificación operativa y calibración periódica, conforme a las recomendaciones del fabricante y las buenas prácticas hidrogeológicas.

La periodicidad de calibración de los instrumentos empleados fue la siguiente:

- **Piezómetros de cuerda vibrante marca Geokkón:** empleados para registrar presión de poros en profundidad. Las lecturas fueron realizadas con el equipo Readout Geokon, el cual proporciona mediciones en frecuencia (Hz). Se realizó una verificación anual del funcionamiento del readout, además de pruebas de lectura en seco y chequeo cruzado con pozos sin presión para validar la integridad de la señal.
- **Piezómetros tipo Casagrande:** la medición se realiza exclusivamente mediante sonda eléctrica de nivel marca Solinst, la cual no requiere calibración formal. Sin embargo, se sugiere verificación funcional mensual, limpiando los electrodos y comprobando el corte de señal con columna de agua conocida.
- **Equipo multiparamétrico WTW:** calibración de pH, conductividad y temperatura realizada **mensualmente** usando soluciones patrón certificadas.
- **Brújula geológica Brunton:** verificación de alineación y declinación magnética al inicio de cada campaña de mapeo (**mínimo una vez por trimestre**).

Los datos obtenidos fueron registrados en formatos estandarizados y comparados con series temporales anteriores, lo que permitió validar su consistencia y asegurar la calidad de la información utilizada en el modelamiento y análisis técnico.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

En el desarrollo de un modelo hidrogeológico para la Unidad Minera Yauricocha, se utilizarán diversas técnicas de procesamiento y análisis de datos con el fin de asegurar una caracterización precisa y efectiva del sistema de aguas subterráneas. Este enfoque permitirá diseñar cruceros de drenaje y otras medidas de control hídrico, garantizando la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras. A continuación, se detalla cada una de las técnicas y herramientas que se implementarán:

- **Simulación Hidrogeológica en 3D con FEFLOW 7.5**

El software FEFLOW versión 7.5 será central en la creación de un modelo tridimensional del flujo de aguas subterráneas, permitiendo analizar parámetros como las permeabilidades en los ejes X, Y y Z, el coeficiente de almacenamiento, y las condiciones de borde. Estos datos se complementarán con información climática histórica proporcionada por el SENAMHI, lo cual ayudará a modelar variaciones estacionales y proyectar los efectos de eventos climáticos extremos.

A través de FEFLOW, se identificaron puntos de acumulación de agua y flujos potencialmente críticos para las operaciones mineras, lo cual guiará la construcción de cruceros de drenaje en las áreas más vulnerables del yacimiento. Este modelo proporciona una base sólida para anticipar y mitigar problemas relacionados con el flujo hídrico, asegurando que los sistemas de drenaje se diseñen de forma óptima.

- **Preparación de Datos Espaciales con ArcGIS 10.5**

Previo a la simulación en FEFLOW, se utilizó ArcGIS versión 10.5 para la preparación y procesamiento de los datos espaciales. La zona de estudio se configuró en un sistema de coordenadas geodésico (WGS 84/UTM 18S) para garantizar precisión en la representación espacial del modelo. Con ArcGIS, se digitalizó los datos geoespaciales en formato SHAPE, permitiendo una integración eficiente de mapas topográficos, ubicaciones de perforaciones y registros hidrogeológicos.

Esta preparación inicial en ArcGIS garantizó que el modelo hidrogeológico tenga una base espacial exacta, imprescindible para desarrollar una representación precisa de la estructura y dinámica del flujo subterráneo en la mina.

- **Análisis Estadístico y Tratamiento de Datos Observacionales**

Para interpretar y evaluar la variabilidad en los parámetros hidrogeológicos, se realizaron análisis estadísticos detallados. Se calcularán métricas como:

- Media y desviación estándar, para evaluar la consistencia de los datos de permeabilidad y niveles de agua.
- Valores máximos y mínimos, para identificar áreas de acumulación o infiltración significativas.

Esta información se representó mediante tablas y gráficos para ofrecer una visión clara de las condiciones del sistema de aguas subterráneas. Los análisis estadísticos son fundamentales para calibrar el modelo numérico y validar los resultados, asegurando que reflejen con precisión las condiciones hidrogeológicas en Yauricocha.

3.9. Tratamiento estadístico

Aunque la geología es principalmente una ciencia observacional, los parámetros que se han utilizado para describir el objeto de estudio incluyen el rumbo y la inclinación de las estructuras mayores y menores. Se utilizaron numerosos procedimientos para la interpretación hidrogeológica como lo son el cálculo de la media, el máximo, el mínimo y la desviación estándar los cuales se presentaron en tablas y gráficos de las precipitaciones. Estas cifras eran esenciales para crear el modelo hidrogeológico y de comprender los sucesos hidrogeológicos.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

Por razones éticas y de confidencialidad profesional, los datos específicos utilizados en esta investigación no pueden ser compartidos públicamente, dado que provienen de operaciones reales de la Unidad Minera Yauricocha. No obstante, se garantiza que los resultados presentados son fidedignos, ya que fueron obtenidos mediante procedimientos rigurosos de modelamiento hidrogeológico, verificación en campo y validación estadística. Filosóficamente, el estudio se sustenta en una postura realista, asumiendo la existencia objetiva de los fenómenos hidrogeológicos; y epistémicamente adopta un enfoque hipotético-deductivo, que permitió contrastar supuestos con evidencia empírica para construir conocimiento aplicable y replicable en contextos mineros similares.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

4.1.1. Realización del mapeo hidrogeológico en el interior de la mina

La realización de los mapeos hidrogeológico en interior de mina, el jefe inmediato coordina meticulosamente las actividades de cada guardia con los trabajadores, asegurando una ejecución ordenada y segura. Cada tarea comienza con la entrega y recepción de órdenes de trabajo, documentadas y firmadas tanto por el supervisor de turno como por el trabajador correspondiente. El personal técnico se desplaza por el pique y la rampa de manera segura, utilizando señales de luz para alertar sobre la presencia de equipos pesados y respetando los refugios designados y el uso completo del equipo de protección personal (EPP). Al llegar al tajo de SLC, se registra en el cuaderno de ingreso y se deja el fotocheck para el acceso a las ventanas de explotación, preparación y avance. Además, se revisan detalladamente los cuadernos de recomendación y se coordina con el líder de tajo para la paralización de equipos en movimiento durante la inspección y recopilación de datos. Es crucial que cada trabajador complete su checklist de herramientas de gestión, evaluando riesgos

como orden y limpieza, uso adecuado del EPP, bloqueo del área de trabajo, ventilación, entre otros aspectos críticos. Se establece una coordinación estrecha con el personal responsable de cada labor, especialmente cuando se realizan trabajos como el mapeo hidrogeológico, donde se bloquea el acceso adecuadamente y se grafican detalles importantes para caracterizar las condiciones de las labores mineras. El personal está entrenado para responder ante eventos críticos como el soplo, con protocolos claros de alarma y evacuación. Finalmente, se realiza una revisión exhaustiva antes de la salida, asegurando la limpieza del área de trabajo y reportando al vigía para el registro de salida del personal de la mina. Con lo anterior se permite plasmar tanto de manera digital como en papel la condición actual de las labores con respecto al estado hidrogeológico, donde se tiene en consideración el grado de empozamiento, intensidad de goteras, caudal presente y demás rasgos tanto geológicos como propios del mismo desarrollo de la labor misma como se observa en la figura 5.

Figura 12. *Trabajos de Mapeo Hidrogeológico en el interior de la mina*



(Nota. Autoría Propia)

4.1.2. Determinación de porcentajes de humedad de paredes rocosas

Asimismo, se determinó el porcentaje de humedad presente al momento de jale del mineral tanto para advertir el aumento progresivo como la ausencia de humedad en el mineral. Como parte del proceso de hallar el porcentaje de humedad se hace uso de una cocina eléctrica, balanza gramara calibrada y bandejas de metal. Con este implemento se procede a calcular el porcentaje de humedad por medio de la siguiente formula:

$$\left(\frac{\text{Peso Humedo} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}} \right) * 100$$

Al momento de tener la humedad expresada en porcentaje compararemos la humedad máxima ya establecida en el estándar donde se tiene como 10.6 % como máximo.

Figura 13. Realización de ensayos de humedad en cocina



(Nota. Autoría Propia)

Cuando el porcentaje de humedad es mayor a 9%, como medida de seguridad se deberá de parar la extracción en la ventana y hacer reevaluaciones de las áreas competentes para minimizar el riesgo al momento de reanudar la extracción. En este caso el porcentaje de humedad fue de 3.41% lo que da a entender que hay presencia de agua en el mineral que se deberá extraer, pero sin afectar a las labores de extracción en la mina.

Figura 14. *Determinación del Porcentaje de Humedad*



(Nota. Autoría Propia)

Tras determinar el porcentaje de humedad del mineral, se inició un riguroso proceso de control piezométrico. Este método ofrecía información precisa sobre la fluctuación del nivel freático en la zona de interés. Colocando cuidadosamente estos dispositivos de medición en diversos puntos de la tierra, fue posible examinar correctamente cómo cambiaba el nivel de las aguas subterráneas en respuesta a diversas circunstancias, como las precipitaciones o la extracción de agua. Este seguimiento constante no sólo aportó información crítica para el diseño y la ejecución

de los sistemas de gestión del agua, sino que también ayudó a prever posibles problemas, como la inundación de las zonas de trabajo o la contaminación de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas.

Tabla 3. *Cuadro de Monitorio de Piezómetros de Cuerda Vibrante*

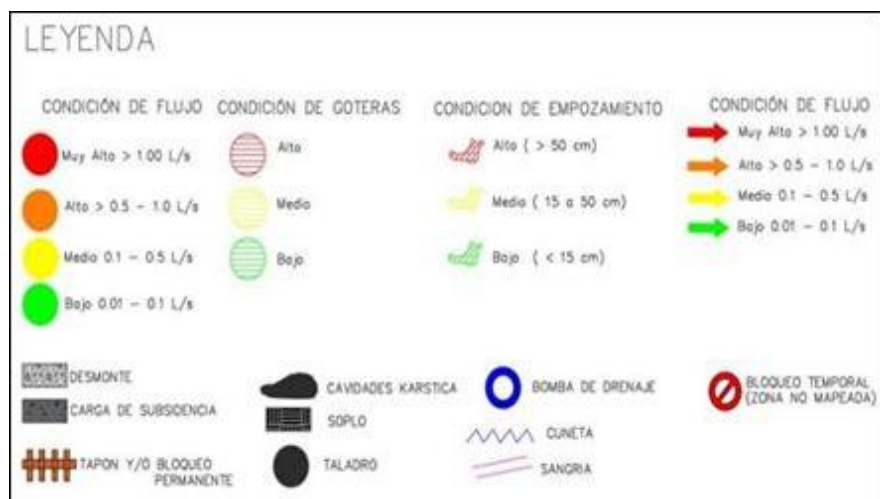
MONITOREO DE PIEZOMETROS DE CUERDA VIBRANTE							
Fecha	Hora	Sensor 3		Sensor 2		Sensor 1	
		DG	T°	DG	T°	DG	T°
2/12/2023	14:40	8642.2	7.2	8618.1	7	7503.7	7.2
3/12/2023	15:40	8641.8	7.2	8617.9	7	7503.2	7.2
4/12/2023	16:30	8642	7.1	8618.1	7	7503.6	7.1
5/12/2023	17:30	8641.8	7.2	8618	7	7503.7	7.2
7/12/2023	15:03	8641.5	7.3	8617.3	7.3	7503.5	7.3
7/12/2023	03:59	8641.7	7.2	8617.6	7	7503.7	7.2
8/12/2023	15:55	8641.5	7.2	8617.4	7.2	7503.5	7.2
8/12/2023	10:10	8642	7.1	8617.8	7	7504	7
9/12/2023	14:43	8641.3	7.3	8617.3	7.2	7503.3	7.2
9/12/2023	09:44	8642	7.1	8617.6	7	7504.1	7.2
10/12/2023	03:58	8641.5	7.2	8617.4	7.3	7503.5	7.2
10/12/2023	10:05	8641.9	7.1	8617.6	7	7504	7.2
16/12/2023	15:33	8642	7.2	8617.8	7	7504.4	7.3
16/12/2023	03:59	8642.5	7.3	8618.4	7.3	7504.4	7.2
17/12/2023	04:10	8642.5	7.3	8618.1	7.3	7504.3	7.3
18/12/2023	14:00	8641.9	7.1	8618.1	7	7504.3	7.2
18/12/2023	03:59	8641.5	7.3	8616.4	7.2	7504.3	7.2

19/12/2023	14:50	8641.7	7.1	8617.7	6.9	7504.1	7.1
20/12/2023	16:48	8641.7	7.1	8618	7	7504.1	7.2
20/12/2023	15:00	8641.3	7.3	8617.4	7.3	7504.3	7.2
21/12/2023	12:28	8641.4	7.2	8617.9	7	7504.5	7.2
22/12/2023	09:05	8641.7	7.2	8618.3	7	7504.3	7.2
22/12/2023	11:05	8641.5	7.1	8617.9	6.9	7504.2	7.2
23/12/2023	14:45	8641.6	7.2	8618	6.9	7504	7.2

(Nota. Analizado del mes de diciembre del 2023)

Como parte del mapeo hidrogeológico en interior mina se usa la siguiente leyenda para caracterizar las diferentes observaciones o condiciones presentes en las labores donde se desarrollan el mapeo hidrogeológico en interior mina.

Figura 15. Leyenda de Caracterización de Condiciones de Trabajo



(Nota. Elaboración Propia)

Posterior al mapeo se obtiene el resultado ya digitalizado de una labor en interior mina, donde se visualiza el grado de empozamiento y goteras presentes.

4.1.3. Fuente principales de acumulación de agua

El análisis hidrogeológico en la unidad minera Yauricocha permitió identificar acumulaciones de agua subterránea en formaciones rocosas cercanas,

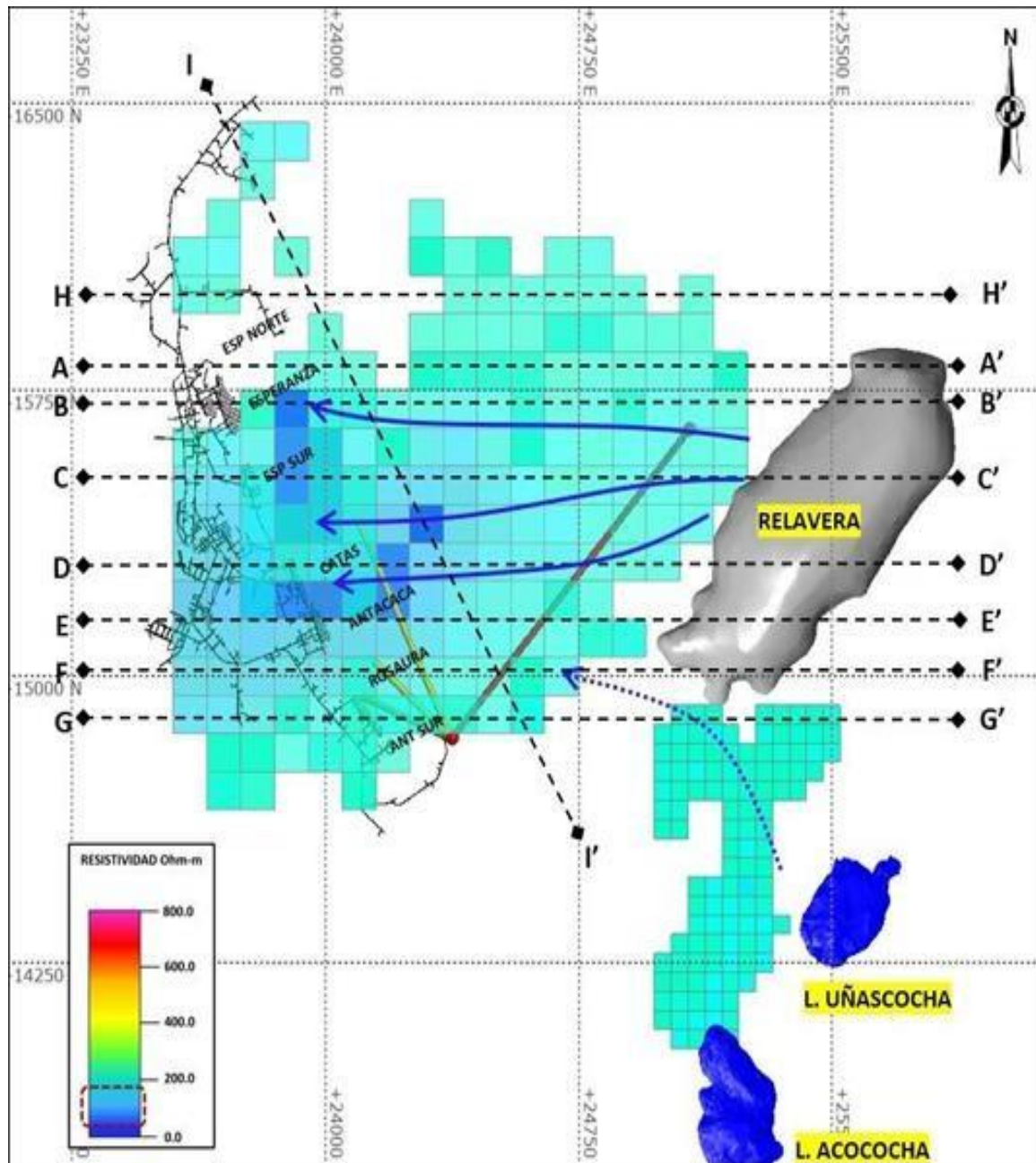
cuyo desplazamiento por efecto de la gravedad puede generar inestabilidad en el terreno. Este fenómeno contribuye a la aparición de filtraciones, saturación de materiales y posibles desprendimientos de rocas, afectando la seguridad operativa de la mina. La detección de estas acumulaciones permitió evaluar la estabilidad geotécnica del subsuelo, lo que motivó la realización de estudios detallados para comprender y mitigar los riesgos asociados a la infiltración y acumulación de agua en las zonas de explotación. A partir de estos análisis, se pueden diseñar estrategias de drenaje y medidas de mitigación para optimizar la seguridad y continuidad de las operaciones mineras.

Para caracterizar la dinámica del agua subterránea en la zona, se llevaron a cabo estudios geofísicos utilizando tomografía geoeléctrica. En casos donde no fue posible aplicar Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) o georradar, se empleó la Resistividad de Alta Resolución en dos dimensiones (R2D), una técnica que permite detectar anomalías en el subsuelo relacionadas con la presencia de agua. Los resultados de estos estudios se presentan en pseudosecciones de resistividades aparentes, las cuales permiten interpretar la variabilidad en la saturación del terreno y su influencia en la estabilidad minera. Los estudios de tomografía geoeléctrica realizados en el depósito de relaves de Yauricocha y el botadero de Chumpe revelaron importantes variaciones en la resistividad del subsuelo, lo que permitió evaluar la saturación y alteración de los materiales. Por ejemplo, en la línea LTG-1, se identificó una zona altamente conductiva con resistividades mínimas de 50 Ohm-m, lo que indica la presencia de material saturado en rocas fracturadas y de alta porosidad. En contraste, resistividades más elevadas sugieren la existencia de rocas compactas con menor permeabilidad.

Asimismo, la línea LTG-2 permitió identificar tres zonas principales de saturación, donde las resistividades más altas indicaron materiales más sanos y menos afectados por infiltraciones. En tanto, las líneas LTG-3 a LTG-18 evidenciaron variaciones en la resistividad del subsuelo, asociadas con la presencia de agua en fracturas y materiales porosos. En particular, la línea LTG- 11 mostró predominancia de resistividades bajas, lo que sugiere un alto nivel de permeabilidad, mientras que las líneas LTG-12 y LTG-13 registraron resistividades bajas en proximidad a una charca, confirmando la existencia de acumulaciones de agua superficial que pueden influir en la estabilidad del terreno.

En el intervalo entre las estaciones 300 y 400, se observaron resistividades altas que corresponden a un lecho rocoso fracturado, lo que resalta la importancia de un monitoreo continuo para prevenir riesgos en las operaciones mineras. Estos resultados proporcionan información clave para la ubicación y diseño de cruceros de drenaje, permitiendo establecer estrategias de manejo de aguas subterráneas y reducir los impactos de la infiltración en las zonas mineralizadas de la UM Yauricocha.

Figura 16. Vista en planta del modelo de resistividad 3D, Zona saturada



Se presenta el modelo de resistividad, mostrando únicamente las zonas saturadas (resistividad entre $50 \Omega \cdot m$ y $140 \Omega \cdot m$). Este modelo evidencia la presencia de una zona saturada en el margen izquierdo del depósito de relaves, considerando la perspectiva aguas arriba hacia abajo. Además, se observa cómo esta zona saturada migra hacia el oeste, acercándose a las operaciones en la mina central.

Figura 17. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT12

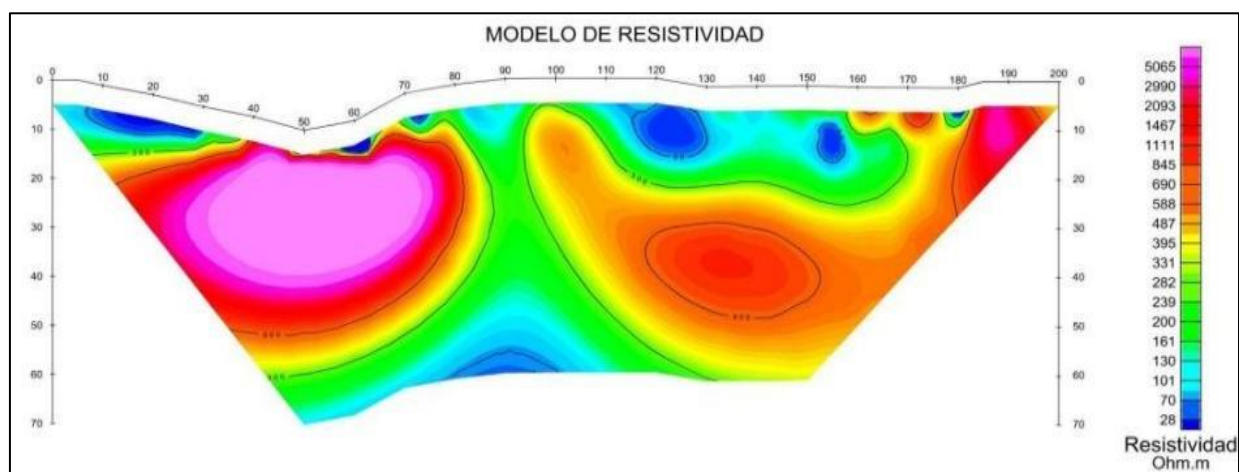


Figura 18. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT13

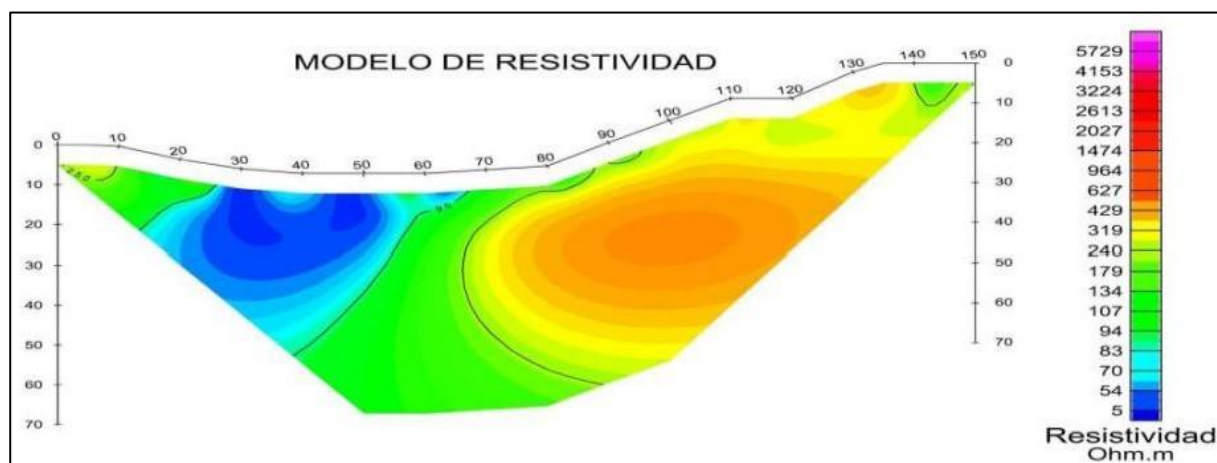


Figura 19. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT14

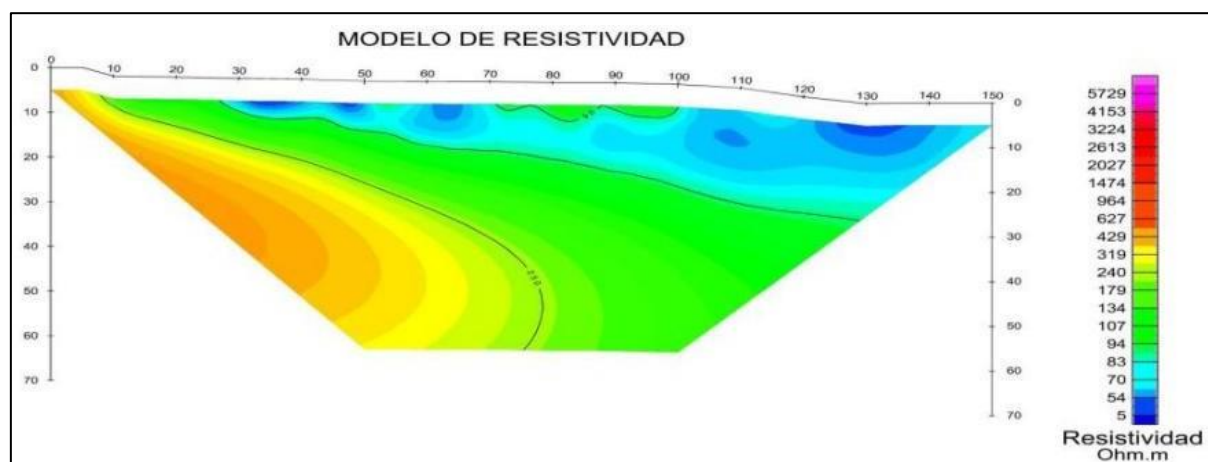


Figura 20. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT15

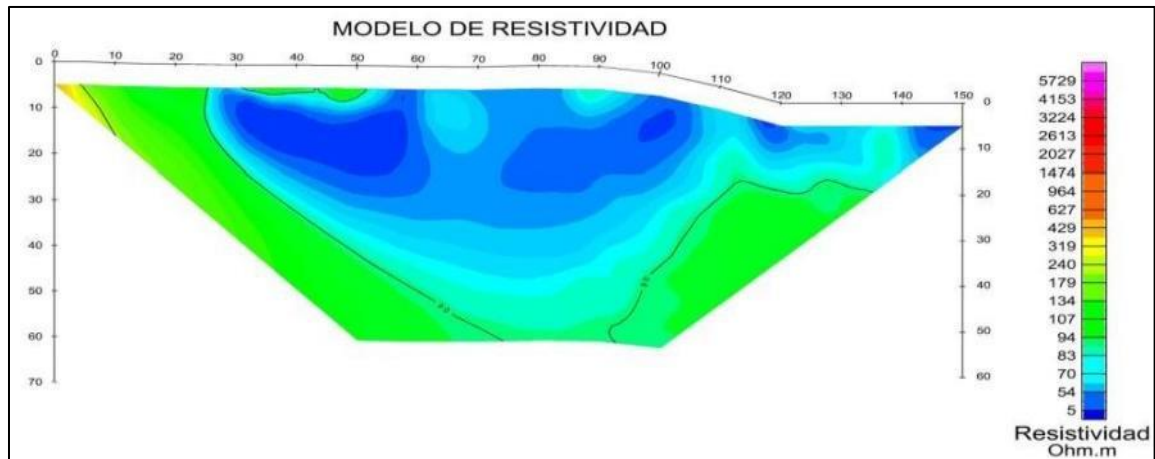
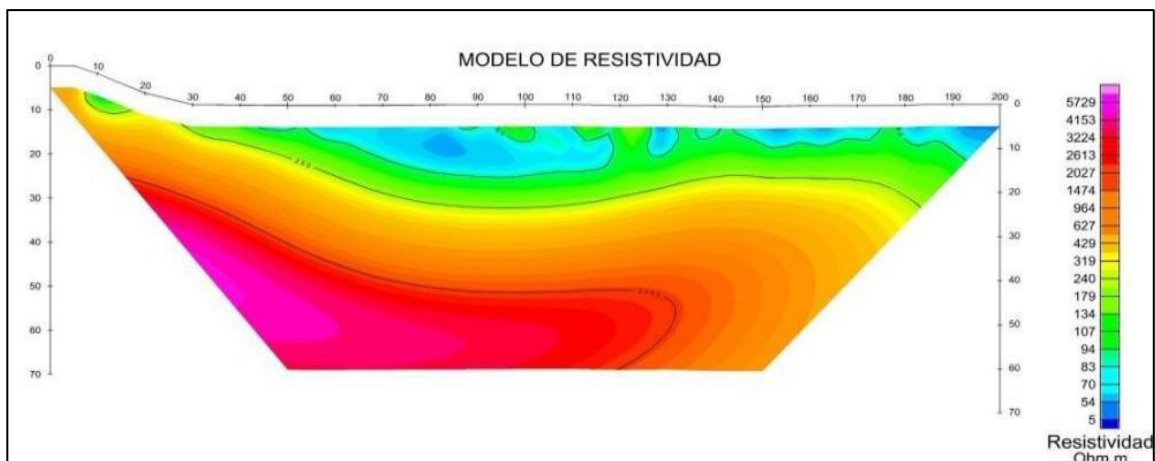


Figura 21. Línea Tomográfica Geoeléctrica LT16

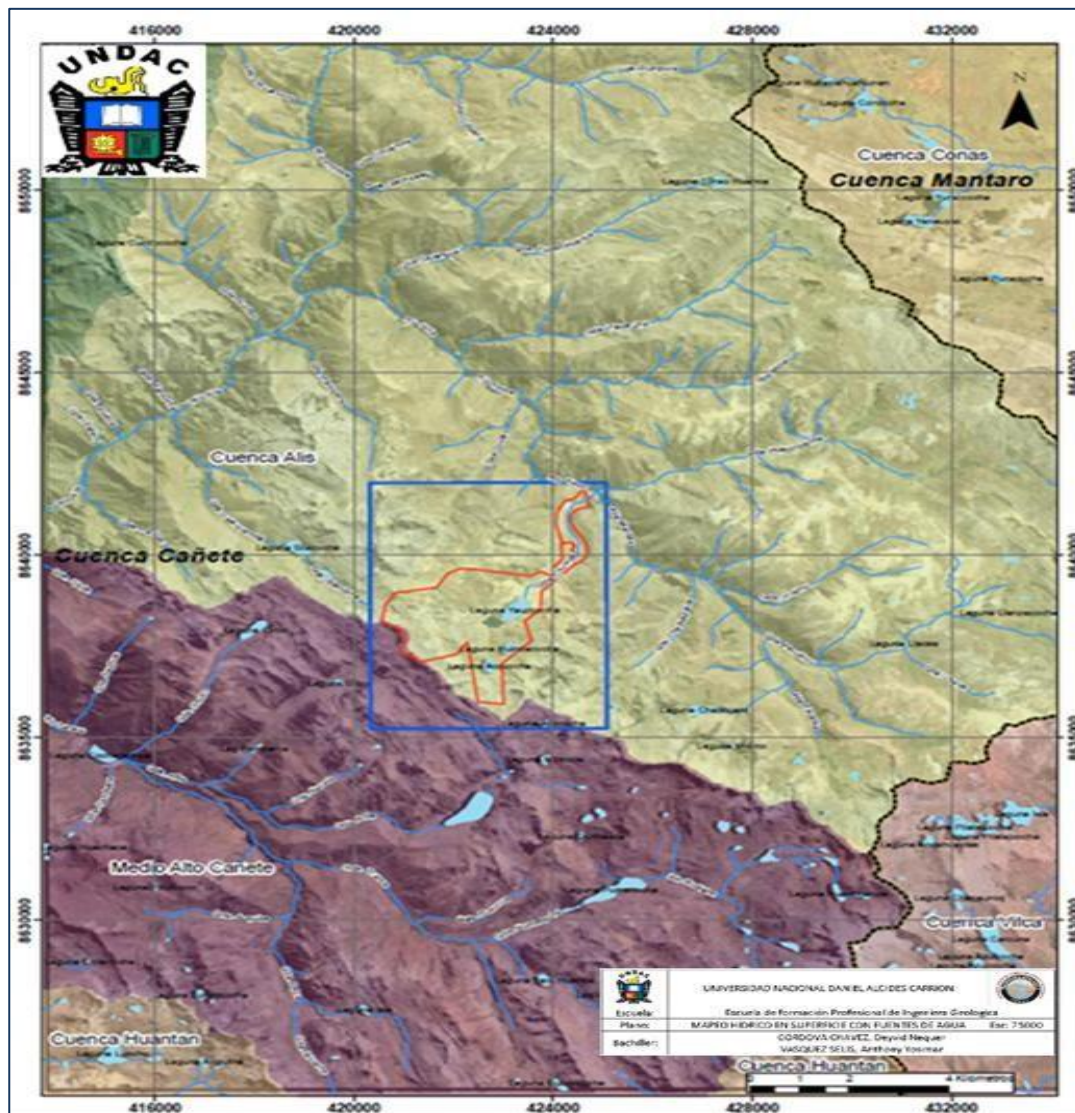


Para complementar el análisis del comportamiento del agua subterránea, se realizó un mapeo hidrogeológico superficial en la zona mineralizada de la UM Yauricocha. Este proceso permitió caracterizar las fuentes de recarga hídrica, los patrones de escorrentía, la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, así como la presencia de zonas de acumulación de agua en superficie que podrían influir en la estabilidad del terreno.

El mapeo incluyó la identificación de manantiales, filtraciones naturales y cuerpos de agua temporales formados por infiltración desde niveles superiores de la mina. Se constató que algunas de estas filtraciones estaban conectadas con fracturas en el macizo rocoso, lo que facilita el tránsito del agua hacia las zonas de explotación

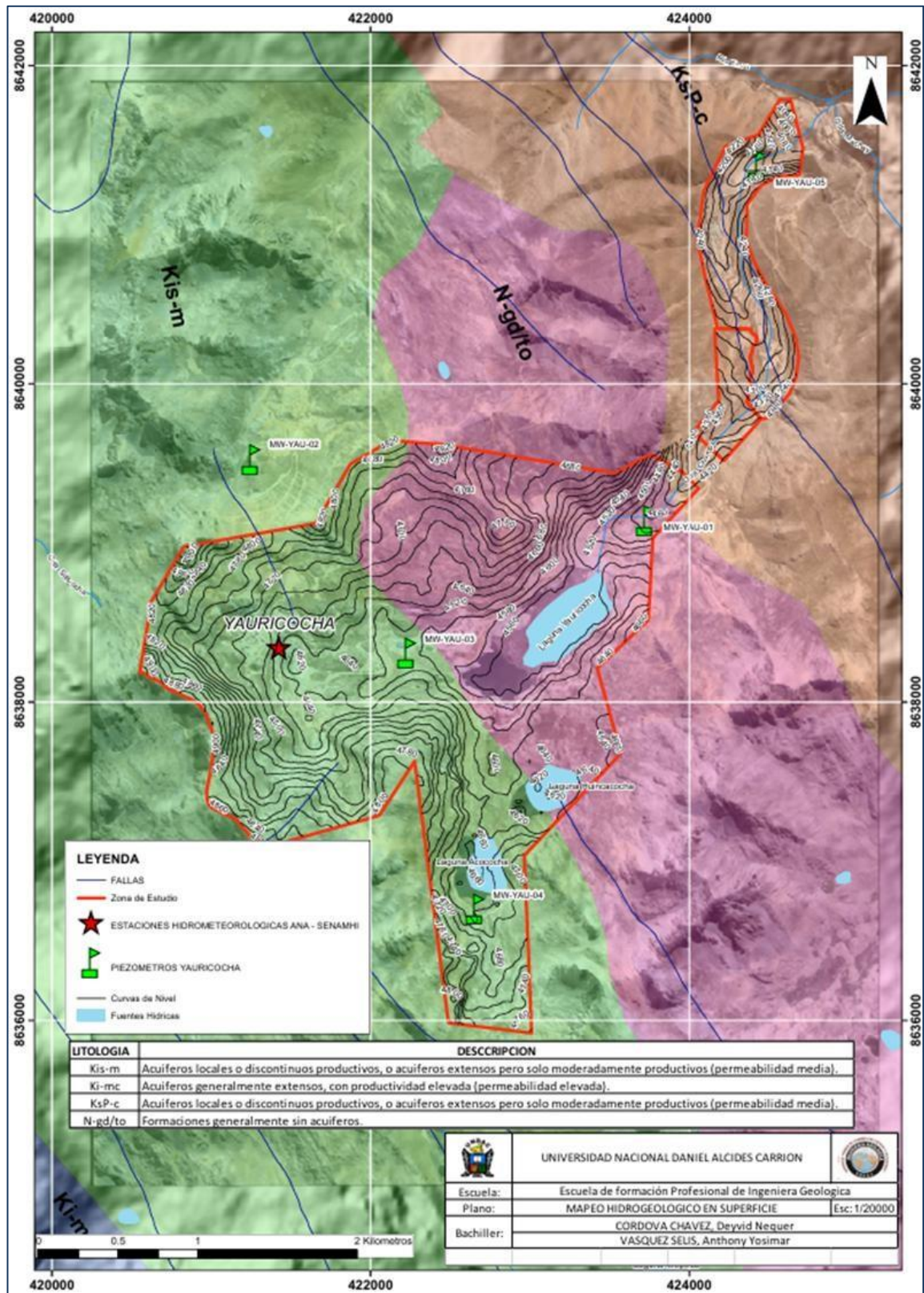
Los estudios hidrogeológicos superficiales también permitieron definir áreas de permeabilidad diferencial dentro del macizo rocoso, donde se evidenció una mayor capacidad de infiltración en materiales altamente fracturados en comparación con zonas más compactas.

Figura 22. *Modelo Hidrogeológico con las fuentes de agua*



(Nota. Autoria Propia)

Figura 23. Mapeo Hidrogeológico Superficial



Nota. Elaboración Propia

4.1.4. Método Volumétrico en tajo sub level caving

El modelo hidrogeológico implementado permite un monitoreo diario del flujo de agua que ingresa a las ventanas de explotación. Este monitoreo se realiza a través de taladros de drenaje instalados de manera preventiva, con el objetivo de controlar la acumulación de agua en las zonas superiores del método de explotación descrito anteriormente. Esta estrategia proactiva asegura un manejo efectivo de los flujos, minimizando riesgos y optimizando la operación minera.

Figura 24. *Monitoreo diario del flujo en interior mina*



Nota. Autoría Propia

Para calcular el caudal que fluye a través de las ventanas de explotación y con ello determinar de manera precisa la cantidad de agua que ingresa a las ventanas de explotación, proporcionando información crucial para la gestión efectiva de los recursos hídricos se empleó la siguiente ecuación:

$$Q=V/T$$

Donde:

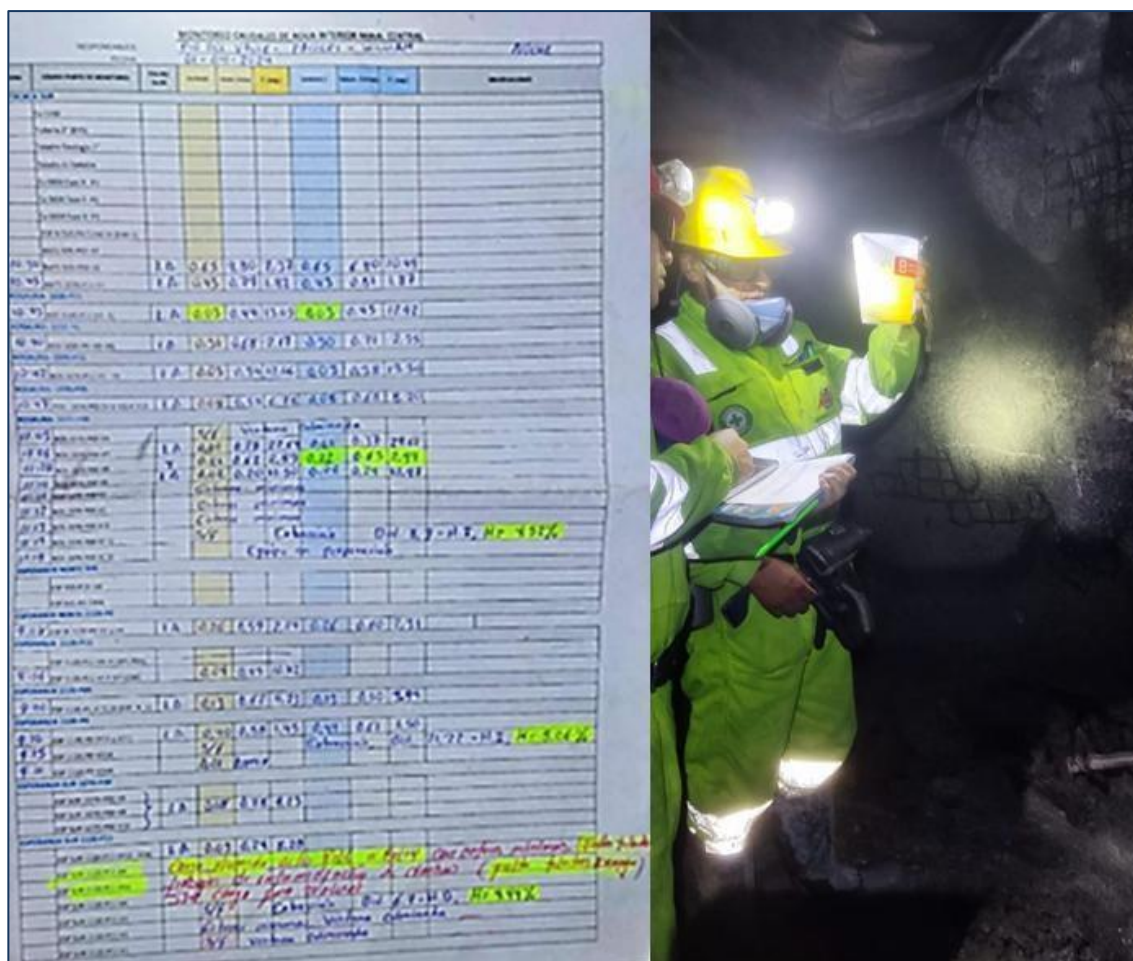
Q = Caudal

V = Volumen (L)

T = Tiempo (seg.)

La hoja de recolección de datos de monitoreo de caudal arriba puesto nos ayudara plasmar los caudales diarios de los puntos de monitoreo ya fijados en interior mina.

Figura 25. Modelo de hoja de recolección de datos de monitorio de caudal



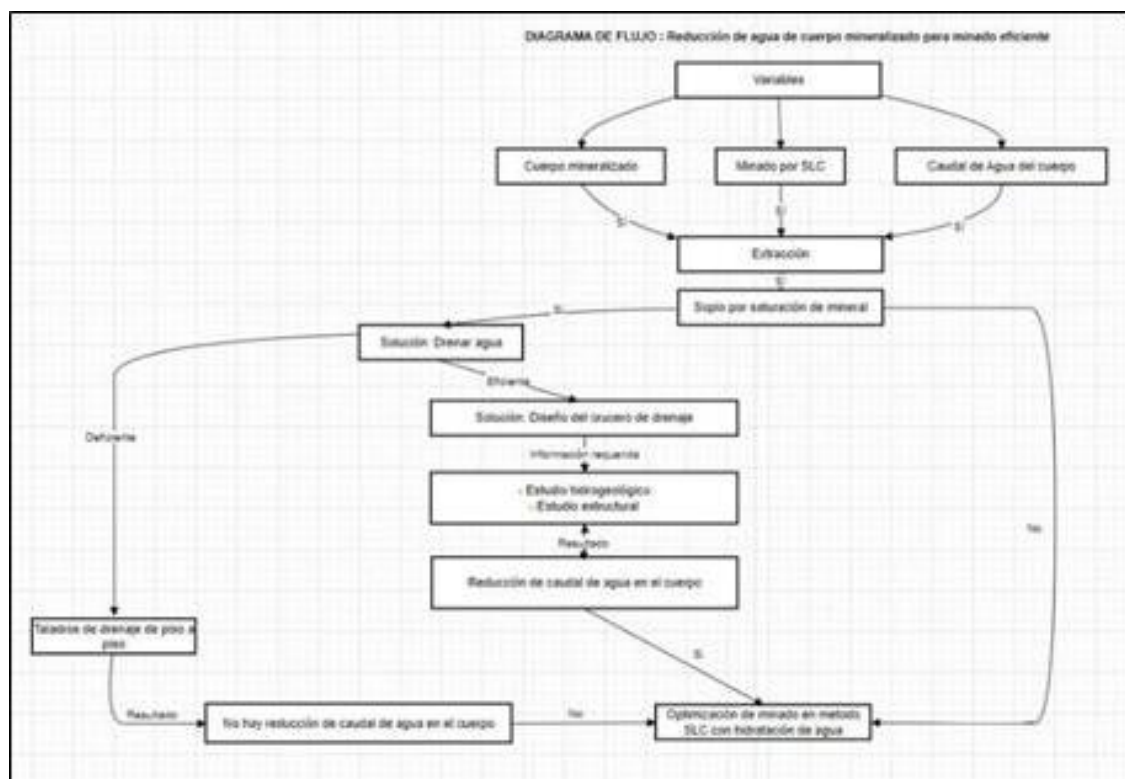
(Nota. Elaboración Propia)

4.1.5. Planteamiento de los cruceros de drenaje

En la zona mineralizada, la recopilación de datos de control del caudal fue fundamental para garantizar la seguridad y la eficacia de las operaciones y evitar

futuras inundaciones, así como para gestionar adecuadamente el agua que se acumula en la mina. La implantación de cruceros de drenaje en puntos adecuados de la mina sería un método eficaz para drenar el caudal actual. Estos pasos, contruidos especialmente para gestionar grandes cantidades de agua, permitirían canalizar el agua sobrante de forma controlada hacia zonas seguras fuera de la mina, reduciendo el peligro de inundaciones y garantizando la seguridad y eficacia continuas de las operaciones mineras. Con ello se presenta el siguiente flujograma de trabajo para la reducción de caudal presente.

Figura 26. *Flujograma de trabajo de reducción de agua del cuerpo mineralizado*



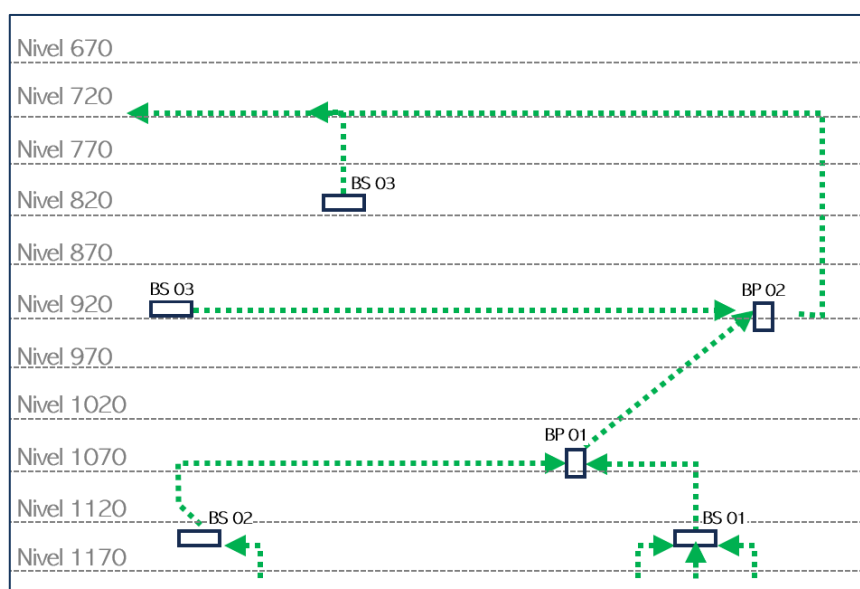
Nota. Elaboración Propia

4.1.6. Plan de drenaje y bombeo

El plan de drenaje y bombeo de la mina de Yauricocha se basa en un sofisticado sistema que controla con éxito las aguas subterráneas al tiempo que garantiza la seguridad y la continuidad de las operaciones mineras. Este sistema consiste en una red de galerías y pozos de drenaje cuidadosamente colocados para

recoger el agua subterránea que entra en la mina. Una vez recogida, el agua se lleva a la superficie mediante una serie de bombas de gran capacidad, donde se limpia y se manipula de conformidad con la normativa medioambiental y de seguridad. Además, se utilizan técnicas de monitorización continua para controlar el nivel de agua en tiempo real y modificar el sistema de bombeo según sea necesario. Esta tecnología de drenaje y bombeo no solo evita las inundaciones y proporciona un entorno de trabajo seguro, sino que también permite a la mina de Yauricocha gestionar sus recursos hídricos de forma eficiente y sostenible.

Figura 27. Esquema de Drenaje y Bombeo de la Mina Yauricocha



(Nota. Elaboración Propia)

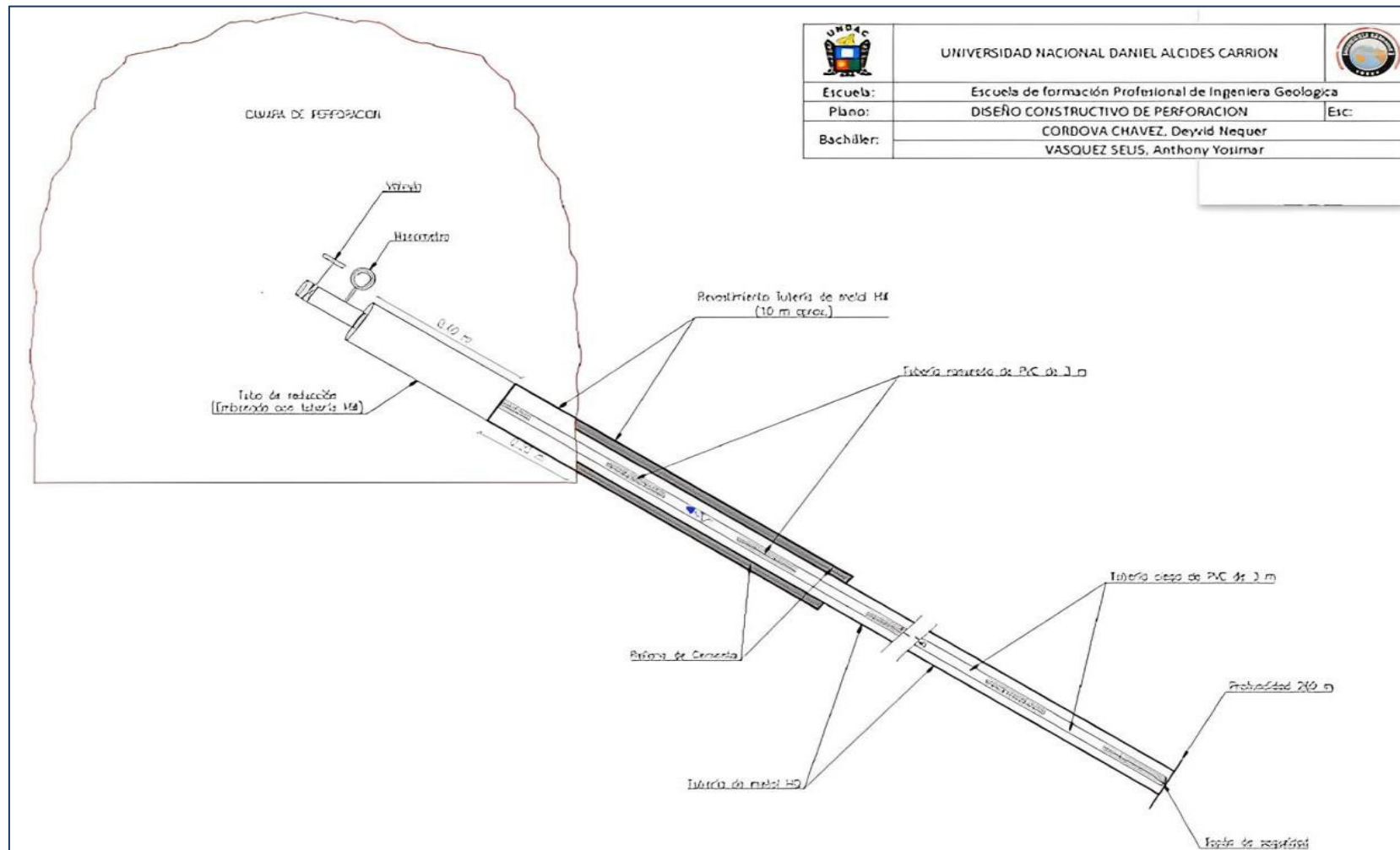
4.1.7. Ejecución de Cruceros de Drenaje

La ejecución de cruceros de drenaje en la Unidad Minera Yauricocha constituyó una fase clave en la estrategia de control y manejo de aguas subterráneas. Esta labor implicó la perforación de galerías orientadas estratégicamente hacia zonas identificadas como críticas por acumulación de presión hidráulica, con el objetivo de interceptar el flujo subterráneo y redirigirlo hacia puntos de descarga controlada.

Para ello, se emplearon equipos de perforación especializados, operados por personal técnico calificado, en cumplimiento de los estándares de seguridad minera y normativas internas de operación. Las labores fueron guiadas por el modelo hidrogeológico previamente desarrollado, el cual permitió definir la ubicación, orientación y longitud óptima de los cruceros, maximizando la eficiencia del drenaje.

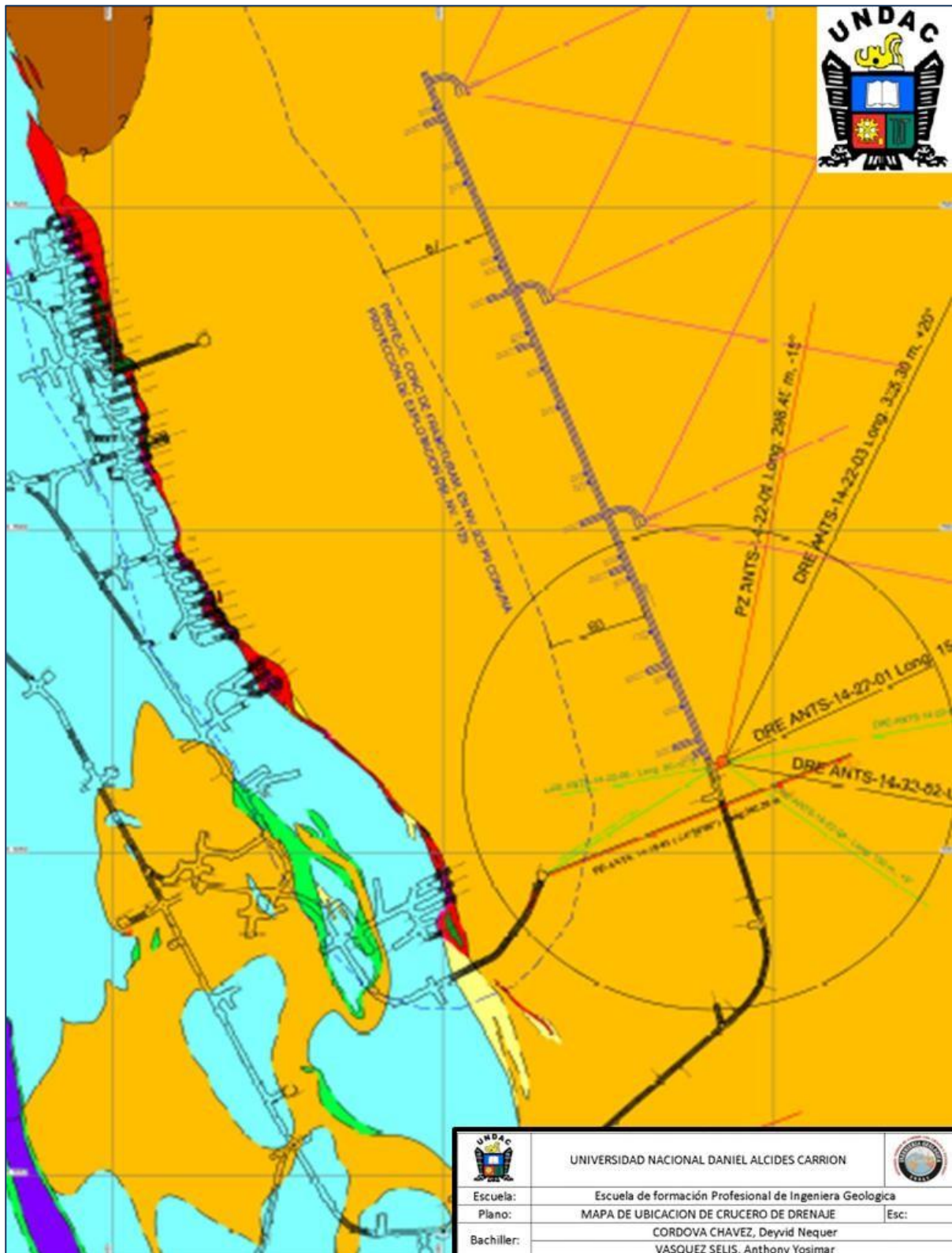
Durante el proceso, se aplicaron técnicas de sostenimiento, ventilación y monitoreo continuo, asegurando la estabilidad estructural de las galerías y la protección del personal. Una vez concluidos, los cruceros de drenaje permitieron disminuir significativamente los niveles piezométricos y los caudales no controlados en las zonas mineralizadas, contribuyendo directamente a mejorar las condiciones operativas y reducir los riesgos hidrogeomecánicos en la mina.

Figura 28. Construcción de Perforaciones



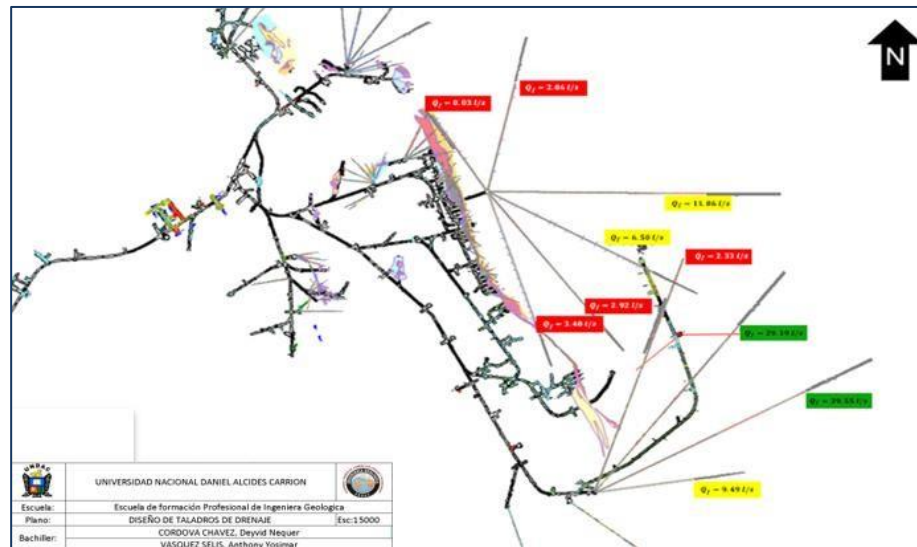
(Nota. Elaboración Propia)

Figura 29. Mapa de Ubicación del Crucero de Drenaje



(Nota. Autoría Propia)

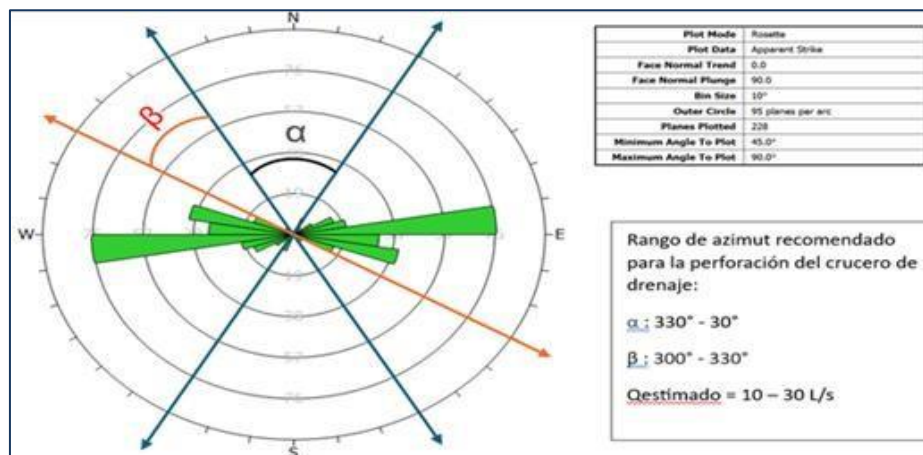
Figura 30. Dirección de taladros de drenaje de Catas - Antacaca -Rosaura y Ant Sur



(Nota. Elaboración Propia)

El uso de la roseta demostró ser una herramienta importante para detectar correctamente la dirección de perforación de los cruceros de drenaje. Al proporcionar información en tiempo real sobre la inclinación y orientación de las perforaciones, la roseta garantizó la correcta alineación de los cruceros de drenaje, mejorando su eficacia en el control del flujo de agua.

Figura 31. Roseta de Dirección para la perforación de crucero de drenaje



(Nota. Elaboración Propia)

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Digitalización del modelo hidrogeológico

La digitalización del modelo hidrogeológico permitió identificar con precisión los puntos específicos de filtración de agua en el yacimiento minero y brindó una comprensión integral de la dinámica del flujo subterráneo en la zona. Esta capacidad de localizar los puntos de entrada de agua subterránea fue esencial para implementar medidas preventivas y correctivas orientadas a controlar y mitigar infiltraciones indeseadas. Al contar con una visión detallada de cómo el agua se infiltra en el yacimiento, los ingenieros pudieron anticipar y abordar proactivamente problemas de agua, mejorando considerablemente la gestión del recurso hídrico en la mina.

Gracias a la información proporcionada por el modelo hidrogeológico digital, se diseñaron estrategias específicas de sellado y drenaje en los puntos críticos, optimizando también la ubicación y diseño de las infraestructuras de control de agua existentes. Esto no solo ayudó a reducir la intrusión de agua en las áreas de trabajo, sino que también mejoró la estabilidad general de la mina, al prevenir inundaciones y evitar el debilitamiento de las estructuras mineras.

MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

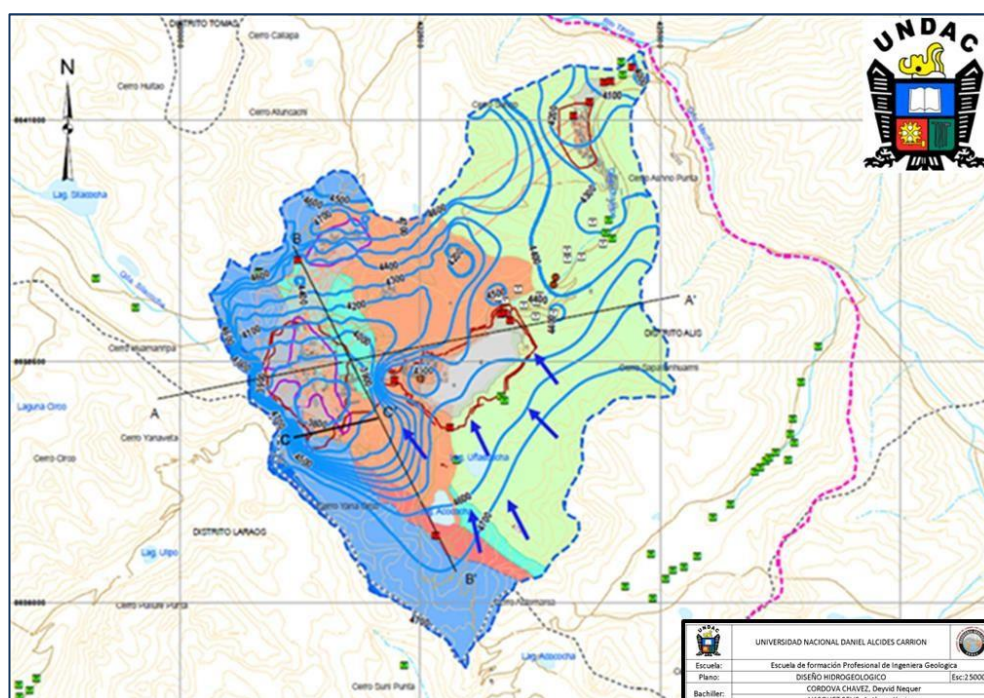
4.2.2. Modelo Hidrogeológico Conceptual

El modelamiento numérico hidrogeológico en 3D de la mina Yauricocha con el programa Feflow en la versión 7.5, nos brinda una mejor comprensión de todo el sistema hídrico y su influencia en interior mina de la zona de estudio, evaluando con diferentes escenarios el impacto hasta lamitigación de riesgos mediante la implementación de los cruceros de drenaje.

Los principales datos de ingreso que el software requiere como parte del diseño hidrogeológico son permeabilidades en los ejes X, Y, Z; coeficiente de

almacenamiento (S), condiciones de borde y precipitación histórica del SENAMHI. Los trabajos de caracterización de flujo como labores filtrantes y zonas de influencia hídrica directa relacionada con la infiltración en interior mina, se simuló escenarios hidrogeológicos en periodos de tiempo mediano y largo plazo con el fin de mantener un equilibrio en el ingreso y salida de flujo en cual este en la zona de influencia del crucero de drenaje propuesto.

Figura 32. Modelo numérico digitalizado



(Nota. Elaboración Propia)

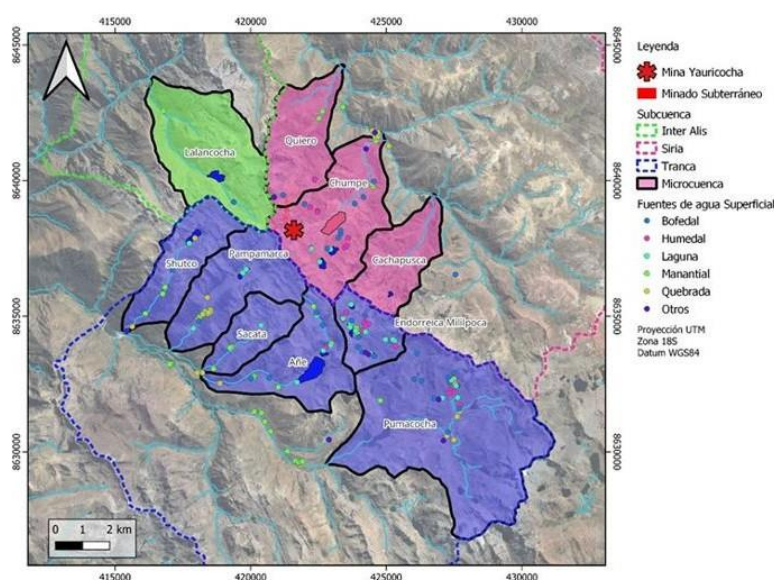
4.2.3. Creación del Modelo Numérico Hidrogeológico

Dominio del modelo

La generación del dominio en Feflow se representa por medio del Supermesh. El Supermesh es un polígono o grupo de puntos con una distribución espacial definida el cual se asemeja a una figura geométrica cerrada que puede ser convexa o cóncavo, el formato de ingreso de los datos hacia el programa previa configuración es en formato SHAPE. Para la configuración y generación inicial del dominio del modelamiento numérico se utilizó en el programa ArcGIS 10.5.

El dominio del modelo tiene una extensión de 36.1 Km². El sistema geodésico de coordenadas geográficas son WGS 84/UTM 18S – EPSG: 32718. Donde los límites con respecto al Norte es 8644249.613m y el inferior es 8634819.145m, con una distancia de separación de 9.43 km. Para los límites por el ESTE es 425252.864m y al lado OESTE es 418353.839 m con una distancia de separación de 6.899.02 km.

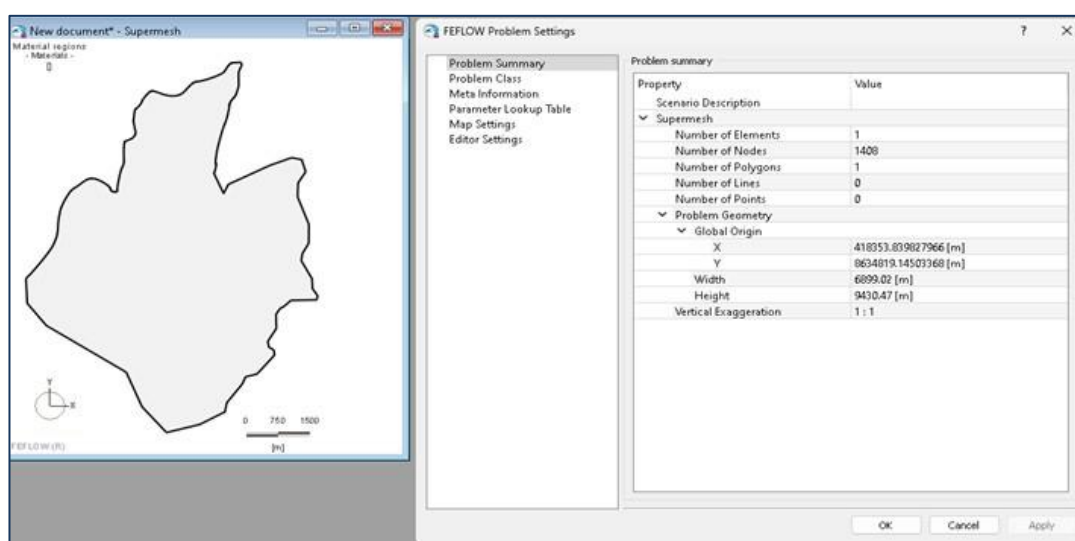
Figura 33. *Ubicación fuentes de agua en superficie (Elaboración propia)*



Actualmente, la UMY cuenta en inventario con 210 fuentes de agua superficial, la cual se subdivide en:

- a. 49 fuentes clasificadas como “Manantial”
- b. 31 fuentes clasificadas como “Humedales”
- c. 41 fuentes clasificadas como “Quebradas”
- d. 41 fuentes clasificadas como “Lagunas”
- e. 32 fuentes clasificadas como “Bofedales”
- f. 10 fuentes clasificadas como “Otros”, asociada a aguas intervenidas entrópicamente (aguas de proceso, diques, reservorios y canales)

Figura 34. Dominio del modelo en FEFLOW

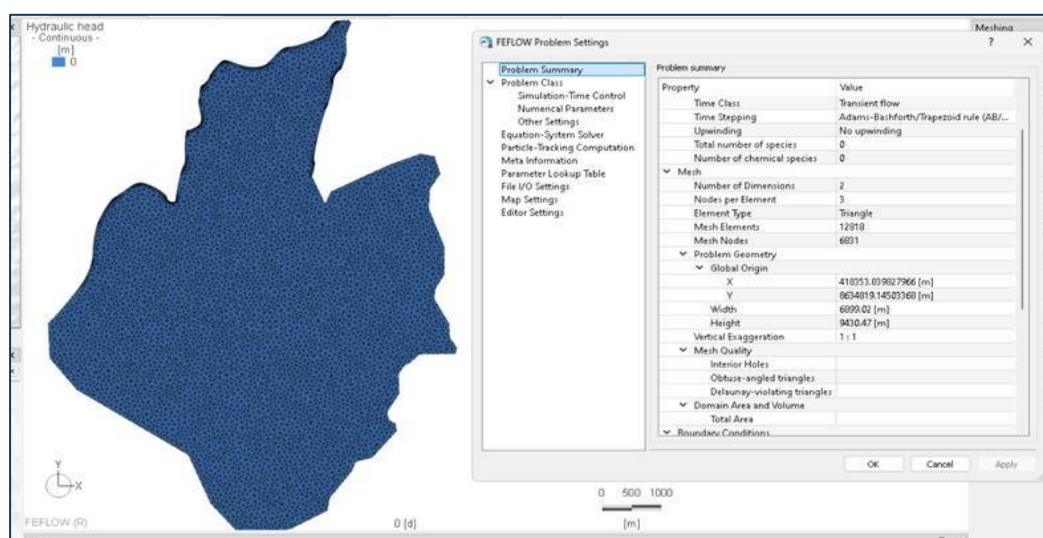


(Nota. Elaboración Propia)

Creación de malla de elementos finitos

La malla de elementos finitos nos permite definir la estructuración general para poder delimitar las zonas de mayor interés e influencia directa de flujos para observar de una mejor manera el movimiento hídrico en el subsuelo con proyección a las labores a estudiar. La forma de presentación de la malla es en 2D el cual este compuesto por nodos, elementos y vértices de los elementos.

Figura 35. Malla de elementos finitos



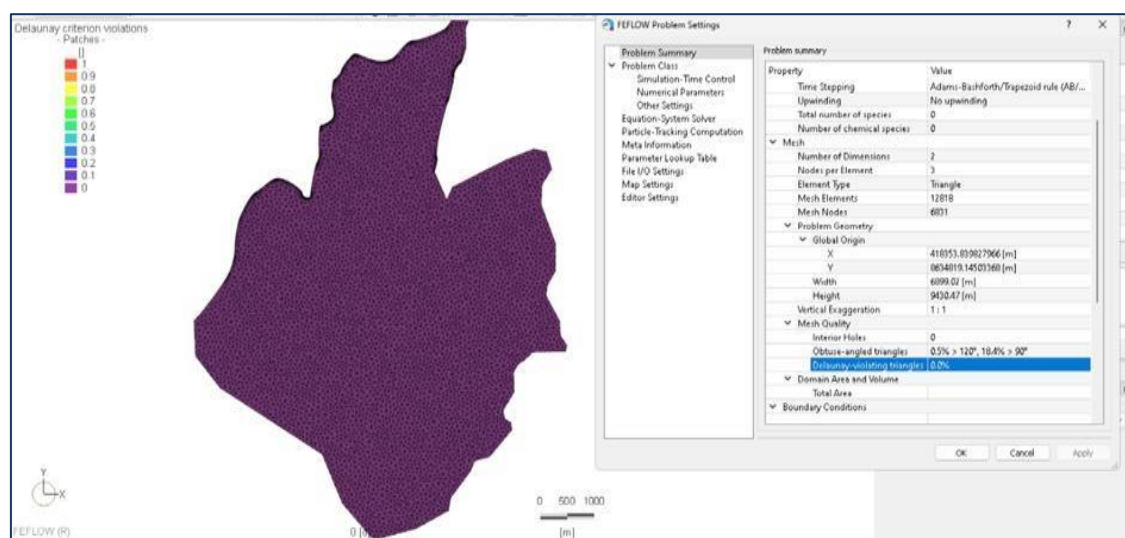
(Nota. Elaboración Propia)

El método para la configuración y generación de la malla de elementos finitos fue la de elementos prismáticos triangulares entre los que se generan desde obtusos a triángulos la forma triangular de elementos que conforma la malla de basa fundamentalmente en la flexibilidad que este tiene para ajustarse en las diferentes formas la cual adopte nuestro dominio hidrogeológico, tanto a nivel superficial como a nivel subterráneo y a su vez esta conformación de elementos triangulares en la malla asegura una mayor precisión en la representación en general de todo el modelo hidrogeológico.

Al existir muchas combinaciones en la generación de la malla de elementos finitos para nuestro modelo, se observa que de un total de 12818 elementos.

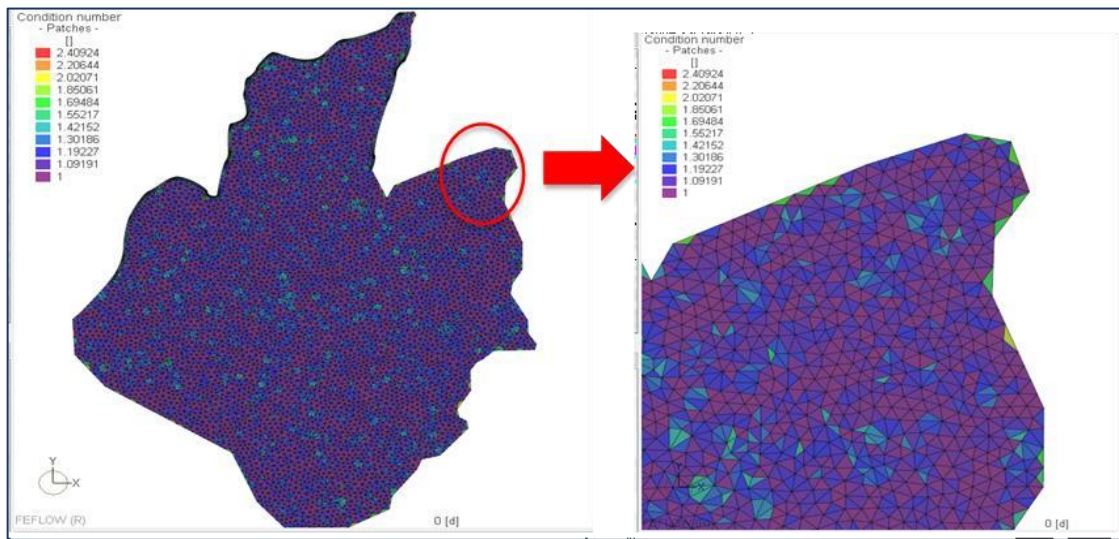
La caracterización de la malla en relación a la conformación de los ángulos internos el cual tiene cada elemento de la malla generada muestra valores bastante aceptados para el modelo ya que el valor más cercano a 0 como vemos en la figura 32 Delanuary Criterio Violations el cual analiza la conformación interna de los ángulos internos de los elementos triangulares del cual está conformado nuestra malla.

Figura 36. Elementos que no cumplen el criterio



(Nota. Elaboración Propia)

Figura 37. Conformación de ángulos interna de los elementos triangulares del MESH



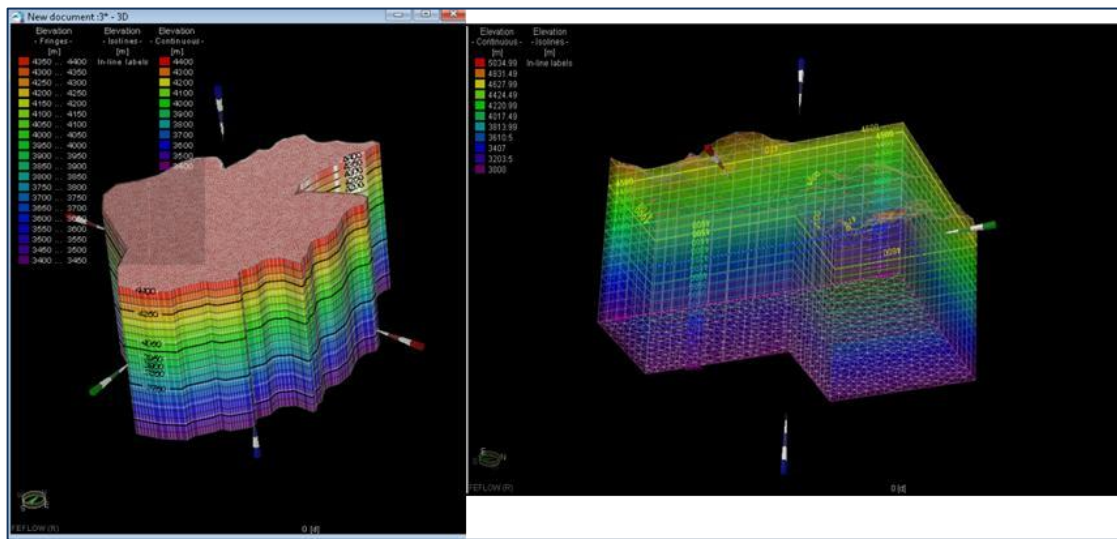
(Nota. Elaboración Propia)

Generación tridimensional de modelo hidrogeológico

Para la creación tridimensional en Feflow del modelo hidrogeológico se toma en consideración la profundidad a la que analizaremos la composición del cubo en 3d esta complementada con información topográfica y definida por unidades hidrogeológicas las cuales conformaran el modelo.

El proceso de modelado tridimensional se puede realizar de diferentes formas que van desde la asignación de capas topográficas ya creadas en los programas de Leapfrog o ArcGIS el cual definan tanto la UH como las labores de mina, todo esto con la ayuda de secciones geo eléctricas para definir con más precisión las zonas de contacto y las resistividades eléctricas en las zonas con saturación hídrica.

Figura 38. Inserción de información topográfica.



(Nota. Elaboración Propia)

Modelamiento Numérico Geológico

Al iniciar con la creación del modelo hidrogeológico tomando como base las unidades hidrogeológicas se realizaron análisis estadístico de valores de permeabilidad con los ensayos de Lugeon con resultados validados por las resistividades de los ensayos geofísicos. Teniendo resultados que se pueden relacionar directamente a la unidad hidrogeológica.

Tabla 4. Litología asociada a valores de permeabilidad

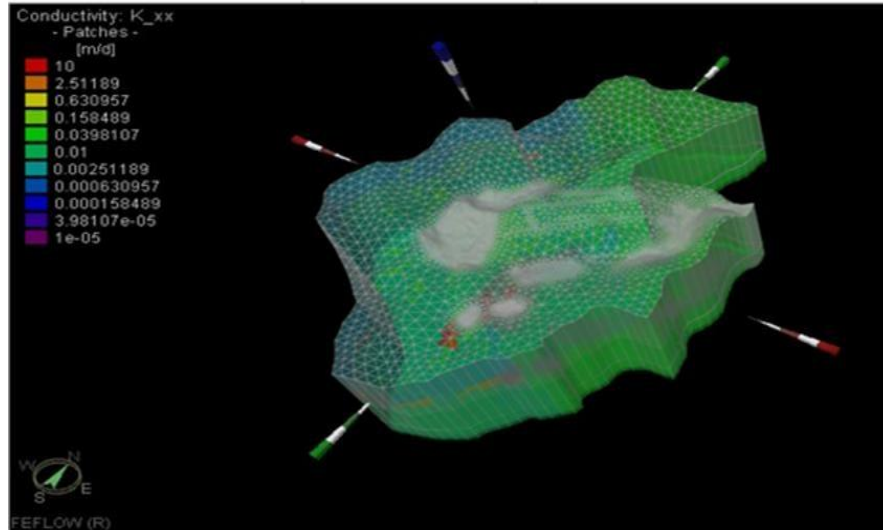
Unidad Hidrogeológica	Litología Asociada	Valores de Permeabilidad
UH – 1	Depósitos Glaciares	0.02
UH – 2	Formación Jumasha	4.92×10^{-6}
UH – 3	Formación Jumasha	3×10^{-3}
UH – 4	Formación Celendin	2.1×10^{-4}
UH - 5	Gronadorita	8.9×10^{-6}
UH - 6	Formación Santa, Formación Carhuaz	8.4×10^{-6}

(Nota. Elaboración Propia)

Estos valores de permeabilidad expresados en metros/día de la figura 34 son fijos para la integración al modelo hidrogeológico desarrollado en Feflow, asimismo

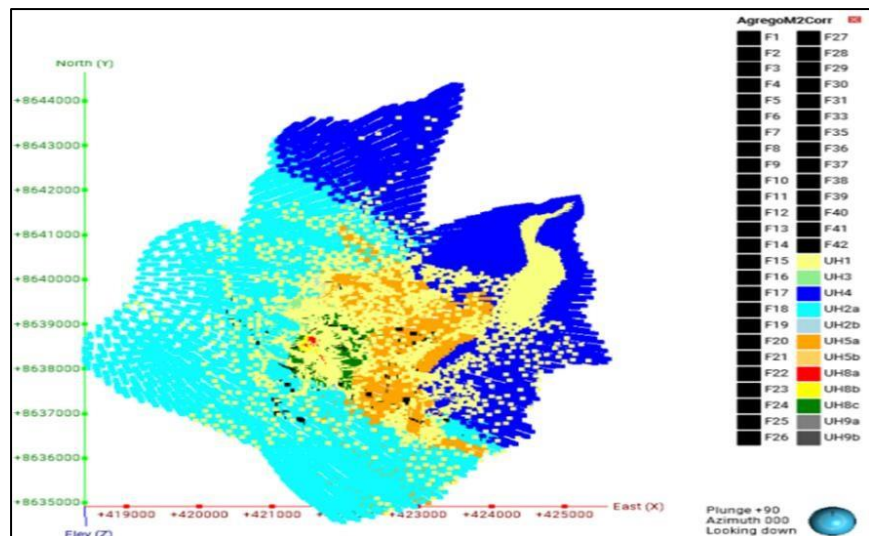
la geometría estratigráfica ya definida juega un factor importante en la elaboración de modelo hidrogeológico.

Figura 39. Integración de los datos de permeabilidad asociada al modelo en Feflow



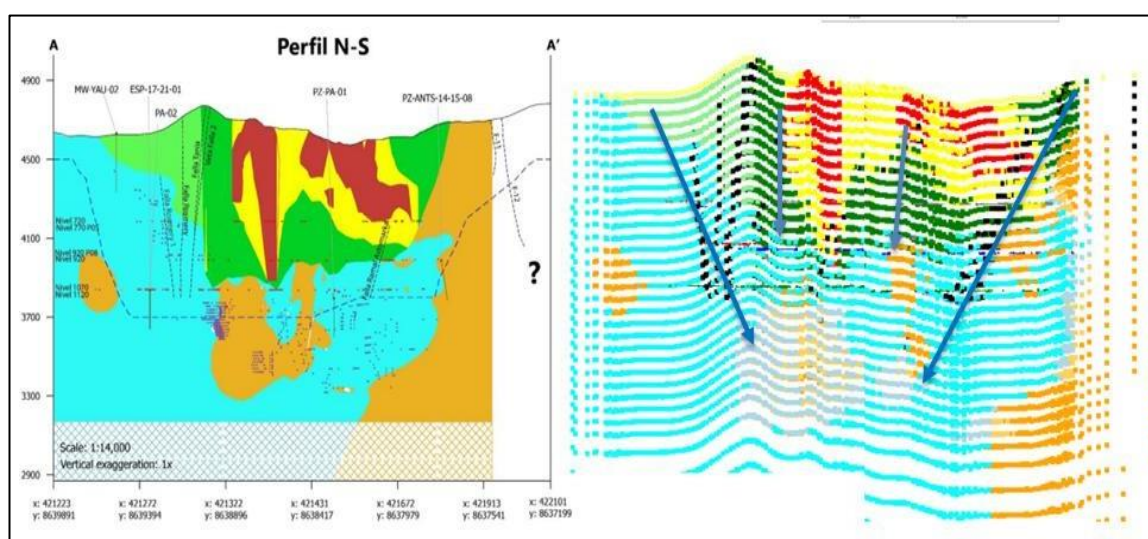
(Nota. Elaboración Propia)

Figura 40. Asignación de permeabilidad a las unidades hidrogeológicas en Leapfrog



(Nota. Elaboración Propia)

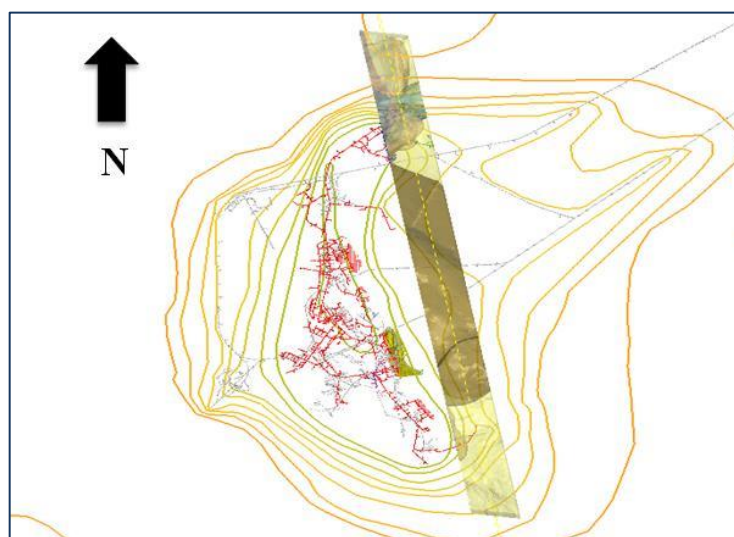
Figura 41. Vista en Sección de la asignación de UH



(Nota. Elaboración Propia)

Para la vista en sección podemos apreciar la influencia directa de las zonas de permeabilidad alta en las zonas ligadas a los cuerpos en explotación que son causadas por el proceso de hundimiento de los pisos superiores ya explotados.

Figura 42. Vista en planta de del comportamiento hídrico subterráneo generado una envolvente piezométrica alrededor del cuerpo mineralizado

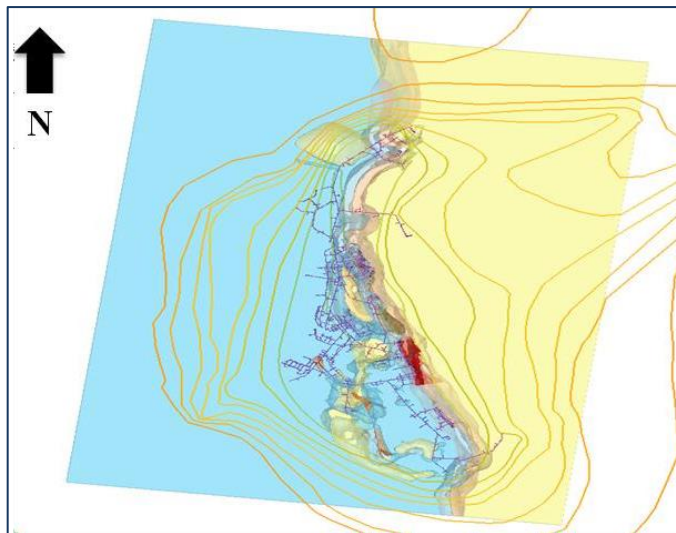


(Nota. Elaboración Propia)

Curvas equipotenciales generadas a partir de los datos piezométricos recolectados entre 2022 y 2023 en distintos niveles de la UM Yauricocha. Las hidroisoipsas delimitan una envolvente general que cubre el sistema de cuerpos

mineralizados, desde los sectores del sur hasta los del norte, revelando zonas de mayor presión hidráulica que justifican la necesidad de drenaje técnico integral.

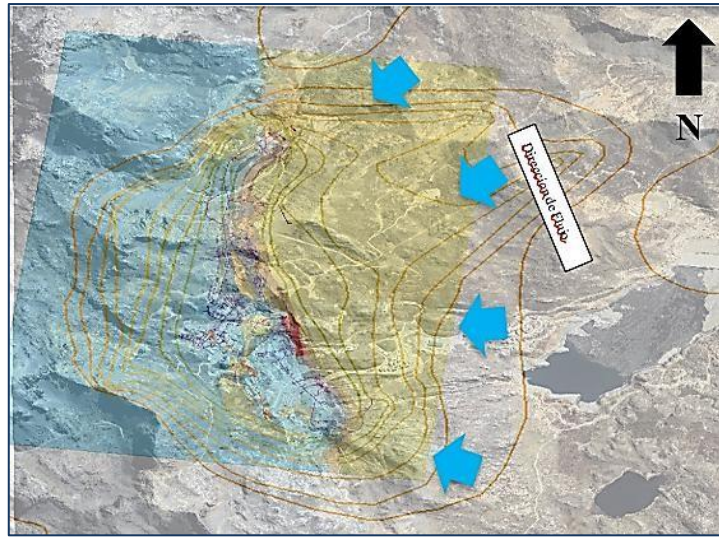
Figura 43. *Vista en planta de la influencia hídrica contrastado con la geología local*



(Nota. Elaboración Propia)

Integración de la red piezométrica con el mapa geológico del yacimiento. Se observa una migración del flujo subterráneo desde las rocas intrusivas —consideradas como acuíferos de recarga— en dirección hacia la Formación Jumasha, cuya alta permeabilidad la convierte en el principal colector de aguas subterráneas en la zona. Esta relación explica la acumulación de agua en los tajos donde se concentra la explotación de los cuerpos mineralizados.

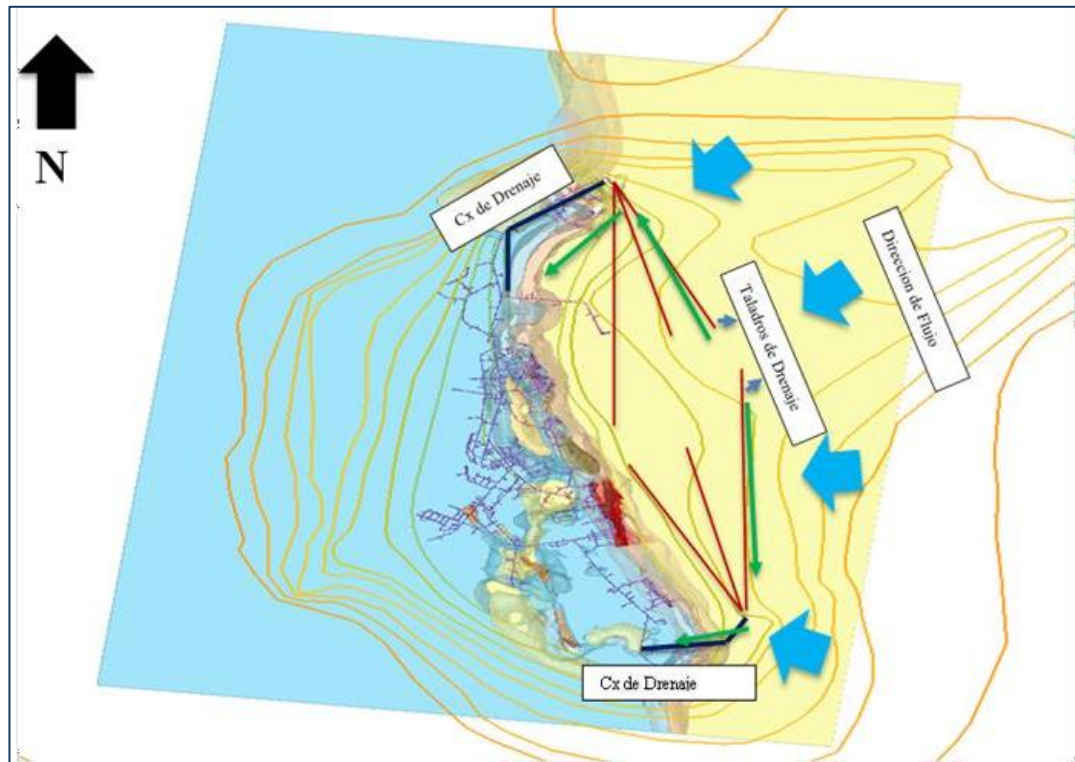
Figura 44. *Proyección desde superficie del comportamiento hidrogeológico teniendo como dirección principal el cuerpo mineralizado de la zona de hundimiento*



(Nota. Elaboración Propia)

Propuesta de ubicación técnica de cruceros de drenaje, definida con base en la convergencia de líneas de flujo, niveles de presión de poros y condiciones geomecánicas del macizo rocoso. La selección de estos puntos busca interceptar zonas de acumulación crítica de agua y facilitar la perforación posterior de taladros de drenaje con máxima eficiencia hidráulica y seguridad estructural. La posición recomendada responde al modelo hidrogeológico desarrollado y a criterios operativos del nivel 920.

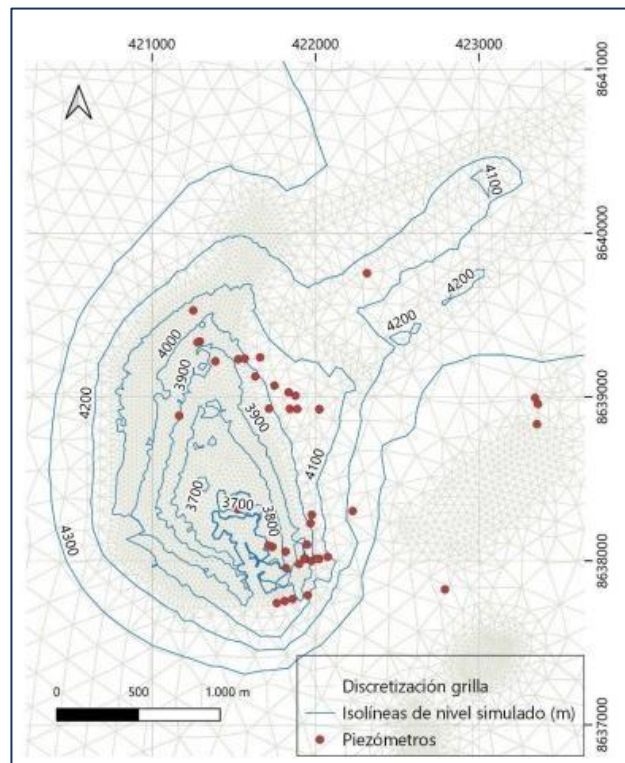
Figura 45. Disposición Final de Crucero de Drenaje y Taladros de Drenaje de acuerdo con la interpretación del modelo hidrogeológico



(Nota. Elaboración Propia)

Diseño técnico de cruceros de drenaje proyectados hacia el norte y sur de la UM Yauricocha, ambos dirigidos hacia el macizo intrusivo, identificado como la principal fuente de recarga del sistema subterráneo. El objetivo de esta configuración es generar una **barrera hidráulica efectiva** mediante taladros de drenaje instalados desde estos cruceros, interceptando el flujo ascendente antes de que alcance los cuerpos mineralizados alojados en la Formación Jumasha. La ubicación de los cruceros fue determinada en función del modelo hidrogeológico, la red de hidroisoipsas, la dirección del flujo y las condiciones geomecánicas del macizo rocoso.

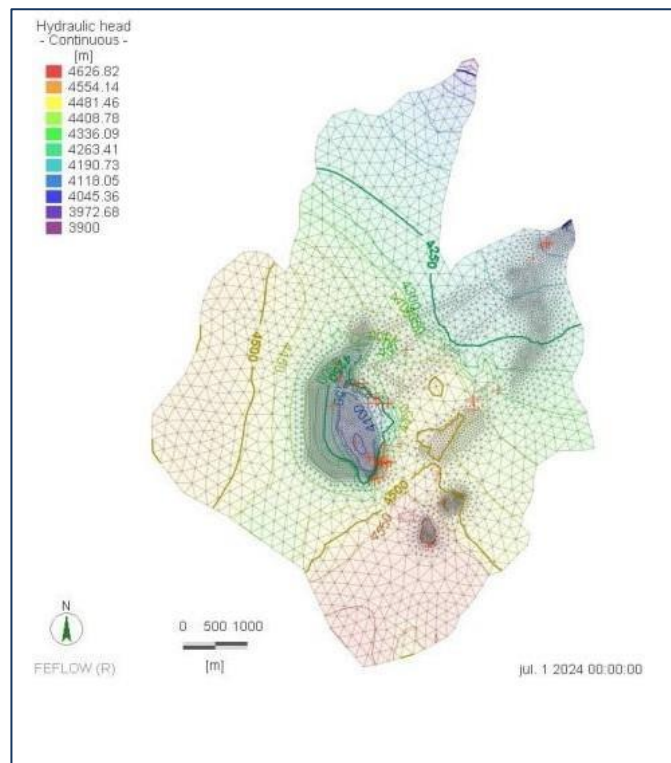
Figura 46. Altitudes piezométricas de la Zona estudiada



(Nota. Elaboración Propia)

Distribución y evolución de niveles piezométricos obtenidos a partir de instrumentos manuales y sensores instalados en distintos sectores de la mina. El análisis evidencia variaciones espaciales en la presión de poros, con zonas de sobrepresión concentradas principalmente en los contactos entre el intrusivo y la Formación Jumasha. Este comportamiento piezométrico fue clave para validar el modelo conceptual de flujo subterráneo y justificar la necesidad de drenaje en los sectores de mayor gradiente hidráulico.

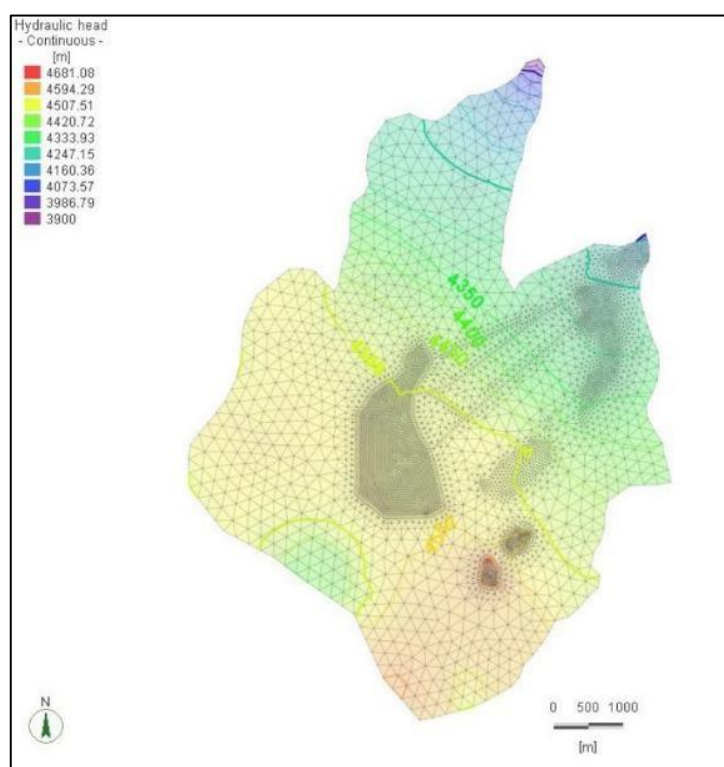
Figura 47. Modelo de simulación de flujo de agua subterránea de la unidad minera



(Nota. Elaboración Propia)

Modelo numérico tridimensional desarrollado en el software FEFLOW para simular el comportamiento del flujo subterráneo en la zona de estudio. Se muestran las trayectorias preferenciales del agua, el gradiente hidráulico y las zonas de acumulación de presión. La simulación permitió validar el modelo conceptual, proyectar escenarios de drenaje, y evaluar la efectividad del diseño de los cruceros propuestos como estrategia de control hidrogeológico en la mina.

Figura 48. *Evaluación del comportamiento hidrogeológica*



(Nota. Elaboración Propia)

La perforación de cruceros de drenaje en la mina de Yauricocha fue un procedimiento importante que, con el tiempo, restringió drásticamente el flujo de material mineralizado. Esta perforación se realizó utilizando equipos sofisticados y trabajadores profesionales para abrir canales que interceptaran el flujo de aguas subterráneas y redirigieran el material mineralizado sobrante a lugares específicos para su eliminación segura. A medida que se terminaron las perforaciones y se instalaron los puentes de drenaje, el flujo de material mineralizado se redujo gradualmente, lo que se tradujo en una mejora significativa de la gestión de los recursos y de la operatividad de la mina. Este resultado demostró la eficiencia del diseño e implementación de los cruceros de drenaje como un componente importante del plan de gestión del agua de la mina Yauricocha.

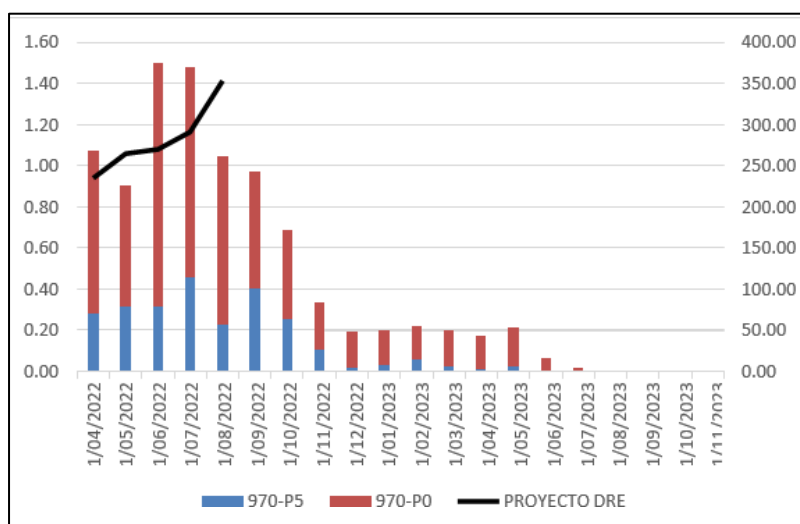
Tabla 5. Data de Registro de Caudales Obtenida entre abril 2020 a noviembre 2023

Fecha	01/04/2022	01/05/2022	01/06/2022	01/07/2022	01/08/2022	01/09/2022	01/10/2022	01/11/2022	01/12/2022	01/01/2023	01/02/2023	01/03/2023	01/04/2023	01/05/2023	01/06/2023	01/07/2023	01/08/2023	01/09/2023	01/10/2023	01/11/2023
970-P5	0.28	0.32	0.32	0.46	0.23	0.4	0.25	0.11	0.02	0.03	0.06	0.02	0.01	0.03	0	0	0	0	0	0
970-P0	0.79	0.59	1.18	1.02	0.82	0.57	0.43	0.23	0.17	0.17	0.16	0.18	0.16	0.18	0.06	0.02	0	0	0	0
PROYECTO DRE	235.04	264.64	270	291	353.31															

(Nota. Elaboración Propia)

Posterior a la recolección de caudales, se observa en el grafico comparativo que, durante la realización de los trabajos de drenado por los taladros 970-P5 y 970-P0 en la zona “Rosaura”, la cantidad de caudal presente en la zona es alta debido al mismo esfuerzo realizado para el drenado y después de esta labor se logra apreciar una disminución en la cantidad de caudal presente en la zona especificada.

Figura 49. Gráfico Comparativo de Caudales entre abril 2022 a octubre 2023



(Nota. Elaboración Propia)

La realización de los cruceros de drenaje, respaldada por el modelo hidrogeológico, desempeñó un papel crucial en la gestión efectiva del agua subterránea en la mina Yauricocha, específicamente en la zona denominada Rosaura. Al aprovechar la información detallada proporcionada por el modelo se pudieron ubicar estratégicamente los cruceros de drenaje para interceptar y desviar el volumen de agua presente en el material mineralizado de esta área específica. Esta acción no

solo contribuyó a reducir la presencia de agua en áreas de extracción, sino que también mejoró significativamente la seguridad durante las labores mineras al mitigar el riesgo de inundaciones y colapsos asociados con la acumulación de agua. Como resultado, la combinación de los cruceros de drenaje y el modelo hidrogeológico permitió una operación minera más segura y eficiente en la mina Yauricocha.

4.2.4. Zona de distribución final de aguas

La selección de una zona adecuada para la disposición final de las aguas captadas es un aspecto crítico para garantizar la sostenibilidad y eficiencia de las operaciones mineras. Este proceso requiere considerar criterios técnicos y ambientales que minimicen impactos negativos y optimicen el manejo de los recursos hídricos. Entre los factores clave se encuentran:

- **Cercanía a las fuentes de captación:** Minimizar el recorrido de las aguas captadas reduce costos y riesgos de acumulación indeseada durante el transporte.
- **Impacto ambiental mínimo:** Elegir una ubicación que permita evitar afectaciones a ecosistemas sensibles, como cuerpos de agua naturales, humedales o áreas protegidas.
- **Capacidad de almacenamiento o descarga:** Garantizar que el sitio seleccionado pueda manejar el volumen proyectado de agua residual sin riesgo de desbordes.
- **Integración con infraestructuras existentes:** Si es posible, aprovechar instalaciones como depósitos de relaves tratados, sistemas de recirculación o infraestructuras hídricas ya establecidas.

Tomando en cuenta los criterios indicados anteriormente, un depósito ubicado aguas abajo de la zona mineralizada Rosaura, diseñado como una laguna de almacenamiento artificial o una balsa de sedimentación, podría ser la solución ideal. La ubicación debería encontrarse en un área de baja permeabilidad natural, para

reducir riesgos de infiltración al subsuelo. Una opción viable podría estar en el sector sur-oeste de la UM Yauricocha, donde los gradientes topográficos faciliten el flujo por gravedad.

4.3. Prueba de hipótesis

En la elección del método estadístico Shapiro-Wilk en una investigación, se considera su capacidad para evaluar la normalidad de una muestra de datos. Este método es especialmente útil cuando se desea determinar si una muestra proviene de una población con una distribución normal, lo que es fundamental en muchos análisis estadísticos. Al aplicar el test de Shapiro-Wilk, se obtiene un valor **p** que indica la probabilidad de que los datos provengan de una distribución normal.

Tabla 6. *Determinación del Valor de Distribución Normal por Shapiro-Wilk*

Descriptivas	Taladro	
	970-P5	970-P0
Media	0.253	0.638
IC 95% de la media límite inferior	0.193	0.502
IC 95% de la media límite superior	0.312	0.774
Desviación estándar	0.159	0.364
W de Shapiro-Wilk	0.864	0.900
Valor p de Shapiro-Wilk	0.001	0.008

Nota. Elaboración Propia. El CI de la media supone que las medias muestrales siguen una distribución t con N - 1 grados de libertad.

En la primera prueba se toma de base las siguientes hipótesis:

Ha = La perforación realizada por el talado 970-P5 logra reducir el caudal presente en la zona mineralizada.

Ho = La perforación realizada por el talado 970-P5 no logra reducir el caudal presente en la zona mineralizada.

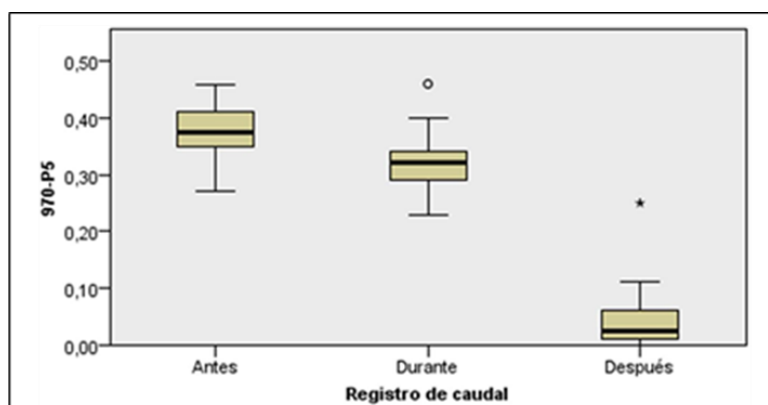
Con las hipótesis planteadas se procede a realizar la prueba de Friedman con el fin de corroborar la veracidad de 1 de las hipótesis comprobando su reducción en el siguiente cuadro y gráfico.

Tabla 7. Valores estadísticos de la primera prueba de Friedman

Estadísticos de prueba	
N	30
Chi-cuadrado	30.000
gl	1
Sig. asintótica	0.000

(Nota. Elaboración Propia)

Figura 50. Gráfico de Variación de Valores de Caudal generada por el talador 970-P5



(Nota. Elaboración Propia)

El rechazo de la hipótesis nula en el contexto del taladro 970-p5 se fundamenta en el valor de significancia asintótica obtenido, el cual fue de 0.000, siendo significativamente menor al nivel de significancia de 0.05 establecido en la prueba Friedman. Este resultado indica que existe evidencia estadística suficiente para concluir que el trabajo de perforación realizado por el taladro 970-p5 tiene un efecto significativo en la reducción del caudal de la zona mineralizada, lo que respalda el rechazo de la hipótesis nula.

En la segunda prueba se toma de base las siguientes hipótesis:

Ha = La perforación realizada por el talado 970-P0 logra reducir el caudal presente en la zona mineralizada.

Ho = La perforación realizada por el talado 970-P0 no logra reducir el caudal presente en la zona mineralizada.

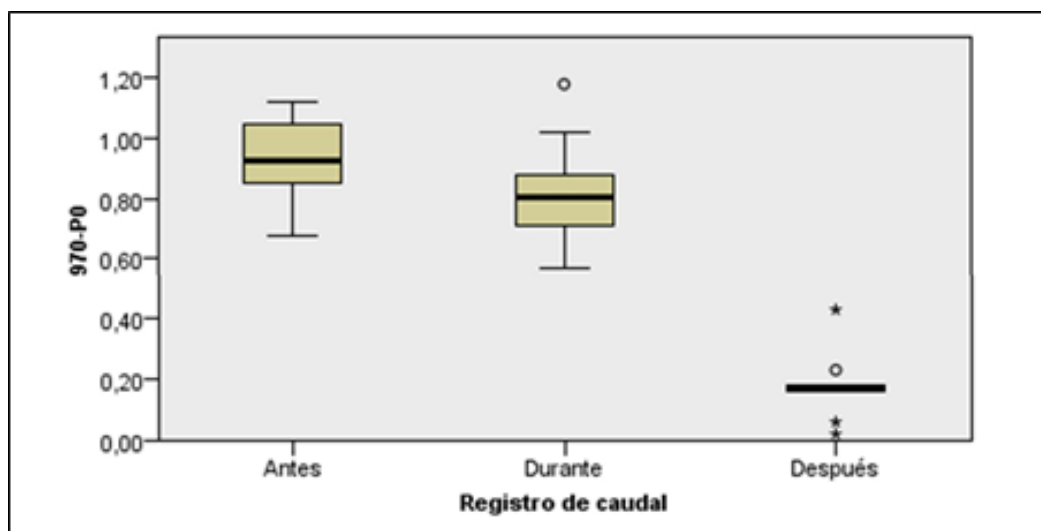
Con las hipótesis planteadas se procede a realizar la prueba de Friedman con el fin de corroborar la veracidad de 1 de las hipótesis comprobando su reducción en el siguiente cuadro y gráfico.

Tabla 8. Valores estadísticos de la segunda prueba de Friedman

Estadísticos de prueba	
N	30
Chi-cuadrado	19.200
gl	1
Sig. asintótica	0.000

Nota. Elaboración Propia

Figura 51. Gráfico de Variación de Valores de Caudal generada por el talador 970-P0



(Nota. Elaboración Propia)

El rechazo de la hipótesis nula en el contexto del taladro 970-p0 se fundamenta en el valor de significancia asintótica obtenido, el cual fue de 0.000, siendo significativamente menor al nivel de significancia de 0.05 establecido en la segunda

prueba Friedman. Este resultado indica que existe evidencia estadística suficiente para concluir que el trabajo de perforación realizado por el taladro 970-p0 tiene un efecto significativo en la reducción del caudal de la zona mineralizada, lo que respalda el rechazo de la hipótesis nula.

4.4. Discusión de resultados

Recordando que Salazar (2020) en su investigación buscó desarrollar el modelo hidrogeológico con el fin de obtener una comprensión más detallada del comportamiento hidrogeológico de la zona. Por parte de la investigación realizada se logró desarrollar detalladamente el modelo hidrogeológico de la zona mineralizada de Yauricocha conociendo su comportamiento hidrogeológico y también las zonas donde se encuentran las filtraciones de agua subterránea. Por otro lado Perdomo & Rojas (2017) necesitó estimar la cantidad de recursos hídricos disponibles en la zona para una recarga potencial de los acuíferos lo que apoyaría a compensar los déficits así como conocer el potencial de recarga de agua de los acuíferos por medio de la realización del modelo hidrogeológico. En la investigación realizada, el diseño del modelo hidrogeológico propició que se conociera a detalle el volumen de agua almacenado la zona mineralizada y a su vez conocer el potencial de recarga del mismo. A si mismo Palacios (2021) optó por estudiar la cuenca de la quebrada Aguas Calientes en Colombia con el fin de determinar la caracterización geológica, geofísica, hidráulica e hidro geoquímica para evaluar la dinámica de las aguas subterráneas de la región. En la zona mineralizada de Yauricocha se buscó con el modelo hidrogeológico el conocer el comportamiento dinámico de las aguas subterráneas y a su vez su implicancia en las dificultades de los trabajos de extracción en la mina. Finalmente, Miranda, J. (2019) planteó la explicación detallada del modelo hidrogeológico, así como la actividad geomecánica de todo el macizo rocoso con el fin de diseñar y construir tapone

herméticos para el cierre definitivo de la mina. El modelo hidrogeológico logró determinar el movimiento y dirección de la escorrentía superficial del macizo rocoso y así evitar problemas futuros de humedales. Para la investigación desarrollada se optó por diseñar cruceros de drenaje debido a que las actividades dentro de la mina aún no han concluido y por lo tanto se requiere una estrategia que permita drenar el agua superficial y mantener seguras las zonas de trabajo.

El crucero de drenaje en una mina es una infraestructura esencial para la gestión de aguas subterráneas e infiltraciones, permitiendo controlar los niveles freáticos y minimizar los riesgos de inundaciones en labores subterráneas. Su correcto diseño y ubicación dependen de un mapeo hidrogeológico detallado, que permite identificar las principales fuentes de ingreso de agua, las zonas de mayor permeabilidad del macizo rocoso y los posibles caminos de escorrentía subterránea. A través de técnicas como la tomografía geoelectrica, sondeos hidrogeológicos y análisis de resistividad, se puede evaluar la conectividad entre acuíferos y las estructuras geológicas que favorecen el flujo de agua. En el caso de la UM Yauricocha, el mapeo hidrogeológico no solo permite seleccionar la mejor ubicación del crucero de drenaje, sino que también optimiza su diseño, asegurando que las aguas sean canalizadas de manera eficiente sin comprometer la estabilidad de la mina ni la integridad de la zona mineralizada. Este enfoque integral mejora la seguridad operativa y evita interrupciones en la producción minera, mitigando riesgos de deslizamientos o colapsos asociados a la acumulación de agua en el subsuelo.

CONCLUSIONES

1. El modelo hidrogeológico permitió identificar zonas críticas de acumulación y flujo subterráneo, lo que facilitó el diseño técnico de cruceros de drenaje orientados estratégicamente hacia fuentes de infiltración.
2. La creación del modelo numérico en el programa FEFLOW fue clave para cuantificar el flujo subterráneo y simular la efectividad de los taladros de drenaje propuestos, logrando una reducción de saturación en la zona mineralizada entre el 20 al 40%.
3. El diseño de cruceros de drenaje se optimizó según las condiciones geológicas e hidrogeológicas locales, como presencia de calizas fracturadas de alta permeabilidad y zonas de skarn, garantizando una evacuación eficiente del agua.
4. La ubicación de los cruceros respondió a la distribución piezométrica y al comportamiento hidráulico simulado, priorizando áreas de mayor carga hidráulica y riesgo de saturación en labores subterráneas.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda formalizar el uso de modelos hidrogeológicos integrales, tanto conceptuales como numéricos, como parte esencial de la planificación técnica en zonas mineralizadas expuestas a saturación. Esta herramienta debe incorporarse desde las etapas de exploración avanzada y mantenerse actualizada durante todo el ciclo de vida de la operación minera. Para ello, es fundamental implementar protocolos de retroalimentación continua, integrando datos operativos como niveles piezométricos, caudales de drenaje y nueva información geológica, con el fin de recalibrar el modelo y conservar su capacidad predictiva. El uso de modelos numéricos como FEFLOW o MODFLOW ha sido validado en operaciones mineras a nivel mundial como El Teniente (Chile), Neves-Corvo (Portugal) y Olympic Dam (Australia), donde han permitido anticipar zonas críticas de acumulación y orientar sistemas de drenaje subterráneo con éxito (Bear & Cheng, 2010; Freeze & Cherry, 1979). Su implementación en Yauricocha ha demostrado resultados cuantificables (reducción >95 % del caudal), por lo cual su integración debe escalarse como parte de la estrategia corporativa de sostenibilidad y gestión del riesgo hidrogeomecánico.
2. Se recomienda reforzar las campañas de campo orientadas a la recolección de datos hidrogeológicos y geomecánicos en zonas donde se proyecten cruceros o taladros de drenaje. La información clave debe incluir ensayos de permeabilidad (Lugeon, Slug test), mediciones piezométricas, evaluación de gradientes hidráulicos, así como clasificación del macizo mediante RMR, Q y GSI. Estos datos no solo alimentan los modelos hidrogeológicos, sino que permiten determinar la factibilidad estructural de la obra, su seguridad operativa y su durabilidad. El International Society for Rock Mechanics (ISRM) y autores como Hoek & Brown (2002) y Singh (2011) enfatizan que el conocimiento conjunto de la hidrogeología y geotecnia es vital para evitar fallas en

obras subterráneas. En ese sentido, realizar un mapeo estructural y ensayos geomecánicos antes de diseñar cruceros garantiza que el diseño hidráulico sea compatible con la realidad del macizo, evitando perforaciones en zonas con mala calidad de roca o riesgo de colapso, lo que mejora la eficiencia y sostenibilidad del sistema de drenaje.

3. Se recomienda que toda decisión relacionada con la ubicación y geometría de cruceros de drenaje se base en un enfoque combinado: simulación del flujo subterráneo mediante modelos hidrogeológicos y evaluación de estabilidad estructural del macizo mediante criterios geomecánicos. Esto significa priorizar zonas de alta presión hidráulica, pero con litología y estructuras favorables que aseguren la durabilidad de la galería en el tiempo, minimizando riesgos de colapso o pérdida de funcionalidad del drenaje. Asimismo, se sugiere establecer un sistema de monitoreo posterior a la ejecución, mediante piezómetros de cuerda vibrante, sensores de presión de poros, cámaras de inspección y aforos regulares. Este monitoreo debe ser interpretado en el marco del modelo hidrogeológico, como parte de un ciclo de mejora continua. Según Kruseman & de Ridder (1994) y Hoek (2017), la integración de diseño, monitoreo y retroalimentación es fundamental para sistemas de drenaje exitosos en minería profunda, permitiendo ajustar en tiempo real las decisiones operativas y anticiparse a fenómenos de sobrepresión o falla geotécnica

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Beato, S., Poblete, M., & Marino, J. (2019). Relieve estructural y karst en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). *Investigaciones Geográficas*, 72, 75–99. <https://www.redalyc.org/journal/176/17664428008/html/>
- Bear, J., & Cheng, A. H.-D. (2010). *Modeling groundwater flow and contaminant transport*. Springer.
- Beltrán, A. (2019). DESARROLLO DE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL BASE EN EL MUNICIPIO DE PULÍ, CUNDINAMARCA. In *UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS* (Vol. 3, Issue 1).
- Bonilla, J. S. (2020). Los métodos experimentales y cuasi experimentales en el Departamento Nacional de Planeación, 2000 – 2019. *Universidad de Los Andes*, 2000–2019.
- Bunge, M. (2000). La investigación científica: su estrategia y su filosofía. Siglo XXI Editores.
- Camacho, C. (2020). *Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de la dunita de Medellín, a partir de información secundaria*.
- Castro, J. J., Gómez, L. K., & Camargo, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75), 140–174. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Cortes, L. L. (2021). *Importancia De La Implementación Del Modelo Hidrogeológico En La Conservación Y Preservación Del Agua Subterránea En Bogotá Importance of the Implementation of the Hydrogeological Model in the Conservation and Preservation of Ground Water in Bogota*. 1–24.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Fonseca, D. (2019). Modelacion hidrogeológica con felfow para extracción de flujo del acuífero del río Lurin - sector Chotay. In *Universidad Ricardo Palma*.

- Gelcich, J. (2018). *Modelación hidrogeológica para proyectos mineros de extracción por Block Caving*.
- Godoy, V. (2018). *INCERTIDUMBRE DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS EN SIMULACIONES PREDICTIVAS CON APLICACIÓN EN SUBCUENCA DEL RÍO RAPEL, REGIÓN DE COQUIMBO*.
- Gómez, A., Martínez, R., & Pérez, L. (2020). Evaluación de parámetros geológicos e hidrográficos en proyectos de desarrollo sostenible. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 25(3).
- Guevara, G. P., Verdesoto, A. E., & Castro, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *RECIMUNDO*, 21(1), 248–270. <https://doi.org/10.6018/eglobal.441711>
- Herrera, J. (2019). Drenaje y gestión del agua de mina. In *Drenaje y gestión del agua de mina*. <https://doi.org/10.20868/upm.book.70252>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2002). *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- Hoek, E. (2017). *Rocscience Guidelines for Underground Excavations in Rock*.
- Huillca, W. (2020). *Estimación de la conductividad Hidráulica en rocas Caliza sobre la base de pruebas tipo Lugeon y Slug Test: Centro y Norte del Perú*.
- Ibarra, G., Miranda, R., Puy, M., Angeles, E., & Kshirsagar, P. (2019). *Importancia de los modelos hidrogeológicos conceptuales y sus implicaciones en la gestión del agua*. 7–13.
- Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (1994). *Analysis and evaluation of pumping test data* (2nd ed.). ILRI Publication 47.
- Lara, N. X., Cushquicullma, D. F., Guiña, J. I., Espinoza, V. M., & Ati, G. M. (2021). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la

subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio. *Polo Del Conocimiento*, 6(6), 27.
<https://doi.org/10.23857/pc.v6i6.2745>

Martinez, C. (2018). Modelo hidrogeológico conceptual y matemático para el municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta. *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*, 372(2), 2499–2508.

Miranda, J. (2019). *Modelo hidrogeológico conceptual para la ubicación, diseño y construcción de tapones herméticos en el proyecto Pariguanas unidad minera Orcopampa-Cia de minas Buenaventura*. UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN.

Orihuela, B. (2020). Caracterización geomecánica del macizo rocoso en áreas de afluencia de agua, con la finalidad de impermeabilizar zonas de alto tránsito, en la Unidad Minera Cobriza - Doe Run Perú – 2019

OSINERGMIN. (2021). La industria de la minería en el Peru:20 años de contribucion al crecimiento y desarrollo economico del pais. In *Anales Científicos* (Vol. 82, Issue La industria de la Minería en el Peru).

Palacios, J. (2021). Estudio hidrogeológico conceptual como base para determinar la influencia de la actividad minera a cielo abierto, en la dinámica de los nacimientos de agua presentes en la cuenca de la Quebrada Aguas Calientes, en la Vereda Mochuelo Bajo, Localidad de Ciu. In *Universidad Antonio Nariño* (Vol. 3, Issue 2).

Perdomo, V. M., & Rojas, C. A. (2017). Modelo hidrogeológico conceptual a partir de información secundaria, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá. In *UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA* (Issue 9).

Pérez, T. (2018). El método hipotético deductivo y su posibilidad de aplicación en un caso práctico: la destitución de Fernando Lugo. *Sociedad Global*, 5(2), 11–19.

- Ramos, J. H. (2021). *Análisis de un modelo hidrogeológico conceptual preliminar de las relaveras Colquisiri Lima-Huaral*.
- Ravbar, N., Mulec, J., Mayaud, C., Blatnik, M., Kogovšek, B., & Petrič, M. (2023). A comprehensive early warning system for karst water sources contamination risk, case study of the Unica springs, SW Slovenia. *Science of The Total Environment*, 885, 163958. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163958>
- Salazar, G. (2020). *Modelo hidrogeológico de una explotación minera subterránea*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2016). ¿ Qué es la Hidrogeología ? *Mexico Gobierno de La Republica*, 2–6.
- Singh, B. (2011). *Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering*. Elsevier.
- Trejos, D. E. (2022). *Modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del rio Parita, Republica de Panama*.
- Tucto, H. (2019). Evaluación hidrogeológica en las labores subterráneas, zona Catuva - Mina Raura. In *Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión*.
- Zafra, D., & Rincon, J. (2018). Las regiones kársticas, una opción para el desarrollo sostenible en Santander, Colombia. *Universidad Industrial de Santander*, 1. 326464507_Las_regiones_karsticas_una_opcion_para_el_desarrollo_sostenible_en_Santander_Colombia

ANEXOS

REPORTE DE EVALUACIÓN GEOMECHANICA

EVALUACION GEOMECHANICA

SN 6604 Nivel 920 Antacaca Sur – Cámara Diamantina 1568 NE

Para: Augusto Zárate
Superintendente de mina (e) - SMCSA

De: Dpto Geomecánica SMCSA

Fecha: 02 de febrero 2022

1. RESUMEN

Se ha realizado la evaluación geomecánica del macizo rocoso del tope del Sub-Nivel 6604 y se ha determinado lo siguiente:

- Se ha determinado un macizo rocoso de Mala A calidad tipo IV-A con un valor de RMR ajustado entre 37-39. Se observa un terreno fracturado, con presencia de 4 familias de estructuras con rellenos arcillosos y orientaciones sub paralelas y perpendiculares al eje de la labor que forman bloques y cuñas inestables en toda la periferia de la excavación. Se tiene una matriz rocosa de resistencia a la compresión uniaxial media en una roca geológica intrusiva. Se tiene agua en condición de goteo intenso que acelera el proceso de intemperismo del macizo rocoso. Esta calidad del macizo rocosos se considera que se proyectará en la cámara diamantina 1568 NE de sección 6.0 x 6.0 metros que se ubicará a 10 metros del Sn 6604.
- De acuerdo con el modelamiento realizado en el software Unwedge se ha determinado las siguientes cuñas inestables que se muestran en la tabla inferior, y con la aplicación de los pernos helicoidales se incrementan este factor para alcanzar el mínimo requerido de 1.5. Se observa que para la cuña del techo numero 8 el factor de seguridad con el uso de pernos helicoidales de 2.1 metros el factor de seguridad se incrementa a 1.172, valor inferior a requerido de 1.5, por lo cual es imprescindible el uso de sostenimiento pesado, el cual consiste en la aplicación de shotcrete de 2" y malla electrosoldada y shotcrete sobre malla, con este tipo de soporte se garantizara la estabilidad de la excavación con un factor de seguridad mayor a 1.5.

Camara Diamantina	N° Cuña	Altura Cuña	Peso Cuña	Factor de Seguridad	
		metros	Toneladas	Sin Pernos	Con Pernos
Techo	8	3.76	5.005	0.00	1.172
Hastial Derecho	7	0.76	3.184	1.573	10.312
Hastial Izquierdo	2	0.76	3.184	0.496	7.142

- Se realizo el modelamiento en el software Phase2 y se determinó que el factor de seguridad es mayor a 1.3 utilizando el sistema de soporte indicado (sostenimiento + reforzamiento).

2. OBJETIVO

- Determinar la estabilidad y los factores de seguridad de la cámara

diamantina 1568 NE de sección 6.0 x 6.0 metros a desarrollar en el Sub-Nivel 6605, Nivel 920.

- Determinar el sistema de soporte (sostenimiento y reforzamiento) adecuado a instalar en la cámara diamantina 1568 NE

3. INFORMACION GEOMECHANICA BASICA

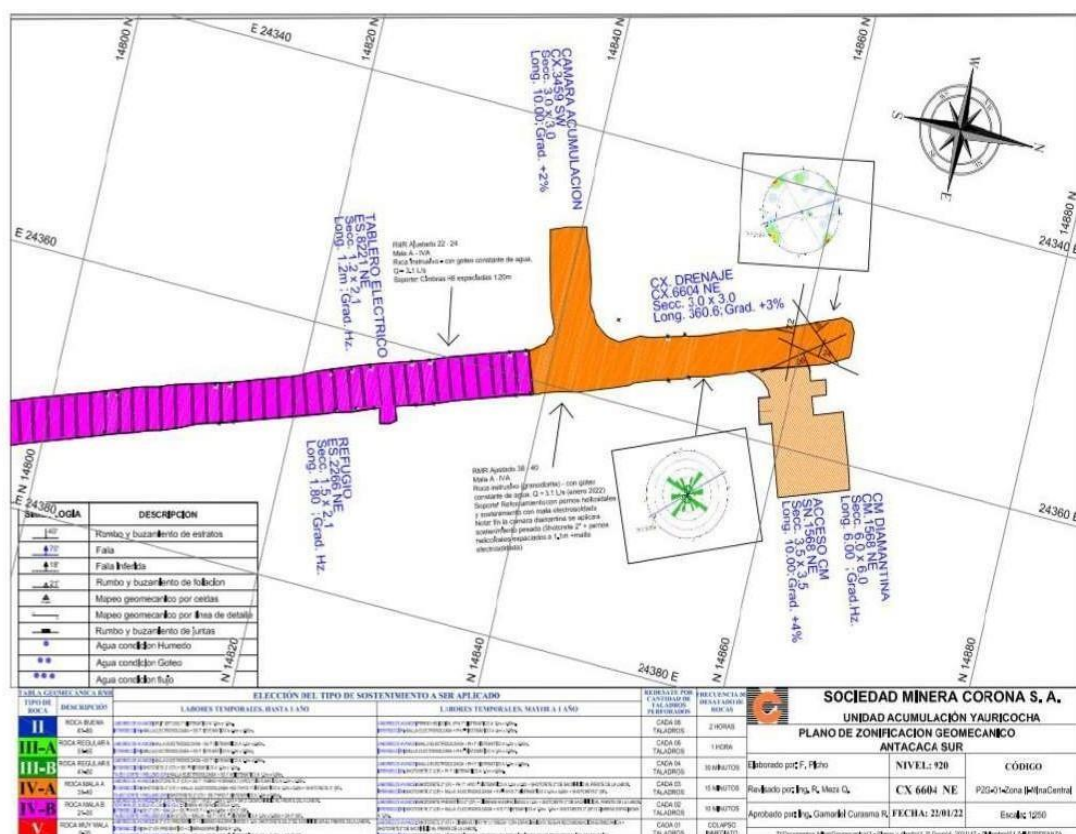
Con el objetivo de obtener toda la información necesaria para la elaboración del modelo geológico y geomecánico fueron realizados diversos trabajos de campo, recopilación de información, trabajos de gabinete y ensayos de laboratorio.

3.1 Clasificación del macizo rocoso

Se ha determinado un macizo rocoso de Mala A calidad tipo IV-A con un valor de RMR ajustado entre 37-39 tal como se muestra en el cuadro 1 inferior y en la figura 1. Se observa un terreno fracturado, con presencia de 4 familias de estructuras con rellenos arcillosos y orientaciones sub paralelas y perpendiculares al eje de la labor que forman bloques y cuñas inestables en toda la periferia de la excavación. Se tiene una matriz rocosa de resistencia a la compresión uniaxial media en una roca geológica intrusiva. Se tiene agua en condición de goteo intenso que acelera el proceso de intemperismo del macizo rocoso.

Tabla 1. Valoración del Macizo Rocosu Crucero del Sn 6604 (tope del Sn)

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (BIENIAWSKY RMR '89)															
PARAMETRO		RANGO DE VALORES									Celda 1				
R.COMPRE.UNIAJ (Mpa)		> 250	(15)	100 - 250	(12)	50 - 100	(7)	25 - 50	(4)	<25(2) <5(1) <1(0)	7				
RQD (%)		90 - 100	(20)	75 - 90	(17)	75 - 50	(13)	25 - 50	(8)	< 25	(3)	8			
ESPACIAMIENTO (m)		> 2	(20)	0.6 - 2	(15)	0.2 - 0.6	(10)	0.06 - 0.2	(8)	< 0.06	(5)	8			
CONDICION DE JUNTAS	PERSISTENCIA	< 1m long	(6)	1 - 3 m long.	(4)	3 - 10 m	(2)	10 - 20 m	(1)	>20m	(0)	2			
	APERTURA	Cerrada	(6)	<0.1 mm apert.	(5)	0.1 - 1.0 mm	(4)	1 - 5 mm	(1)	> 5 mm	(0)	4			
	RUGOSIDAD	Muy Rugoso	(6)	Rugoso	(5)	Lig. Rugoso	(3)	Lisa	(1)	Espejo de Falla	(0)	3			
	RELLENO	Limpia	(6)	Duro<5 mm	(4)	Duro>5 mm	(2)	Suave < 5 mm	(1)	Suave > 5mm	(0)	2			
	INTEMPERIZACION.	Sana	(6)	Lig. Intemp.	(5)	Mod. Intemp.	(3)	Muy Intemp.	(2)	Descompuesta	(0)	5			
AGUA SUBTERRANEA		Seco	(15)	Humedo	(10)	Mojado	(7)	Goteo	(4)	Flujo	(0)	4			
VALORACION TOTAL RMR BASICO (Suma de valoraciones 1 a 5)											RMR BAS.				
DIRECCION Y BUZAMIENTO		Muy Favorable		Favorable		Media		Desfavorable		Muy Desfavorable		43			
TUNELES		0		-2		-5		-10		-12		-5			
CLASE DE MACIZO ROCOSO											RMR AJ.				
RMR		100 - 81		80 - 61		60 - 51		50 - 41		40 - 31		30 - 21		20 - 0	38
DESCRIPCION		I MUY BUENA		II BUENA		III REGULAR A		III REGULAR B		IV A - MALA A		IV B - MALA B		IV C - MALA C	
TIPO DE MACIZO ROCOSO											Mala A				



3.2 Condición Estructural

Las características estructurales de la masa rocosa involucrada al área de estudio fueron establecidas a partir de la información registrada del laboreo minero existente. En las tabla 2 y en las figuras inferiores 1 y 2 se muestran las características de las familias de discontinuidades.

Tabla 2. Distribución de discontinuidades

Set (familia)	Buzamiento	Dirección de buzamiento	Tipo
S-01	89	309	Principal
S-02	90	54	Principal
S-03	72	178	Principal
S-04	24	279	Secundario

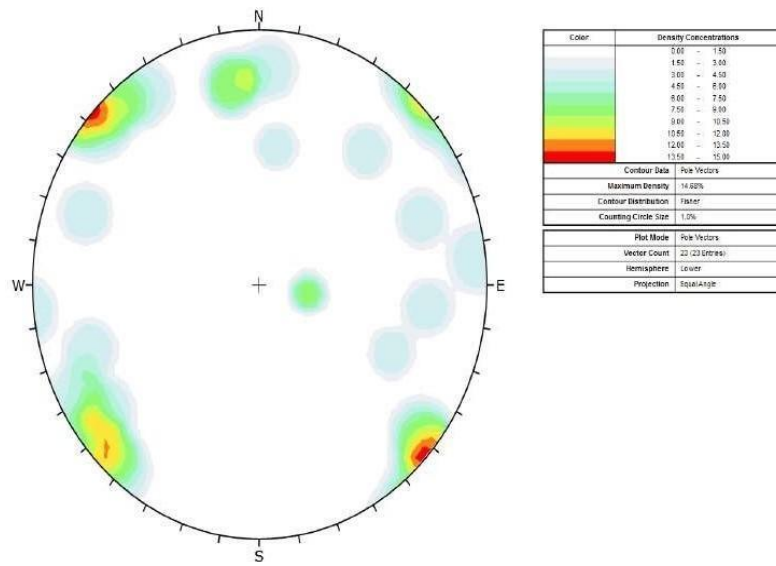


Figura 2. Diagrama estereográfico compuesto de contornos

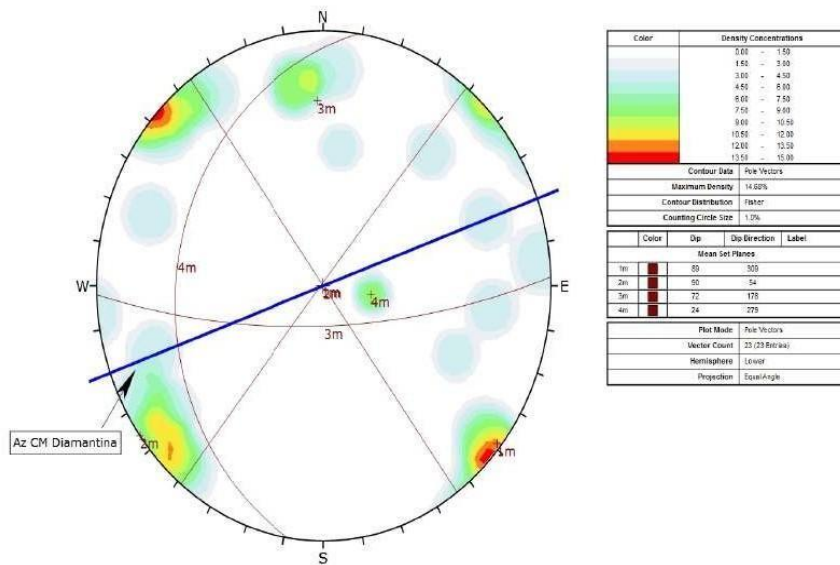


Figura 3. Diagrama estereográfico con planos principales de discontinuidades

3.4 Geología, Unidades Geotécnicas y Propiedades Físicas y mecánicas de la roca intacta.

En la siguiente tabla 3 se detallan las características geomecánicas y propiedades físicas de las diferentes unidades geotécnicas de la Zona II de la mina Yauricocha donde se ubica el Sub-Nivel 6604 y la cámara de diamantina.

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta y características de las Unidades geotécnicas mina Yauricocha. (fuente Departamento de Geomecanica Sierra Metals)

Descripción de la propiedad	Simbología	Unidades	Unidades geotécnicas						
			UG-CA	UG-CW	UG-MP	UG-MC	UG-W	UG-IN	
Calidad del macizo rocoso									
Rock Mass Rating	RMR	-		IIIB	IIIB	IVB	V	IVB	IVA
		-		50	47	25	20	25	35
Índice de Calidad Tunelera	Q	-		1.95	1.40	0.12	0.07	0.12	0.37
Índice de Resistencia Geológica	GSI	-		50	47	25	15	25	35
Propiedades físicas de la roca									
Densidad	δ	g/cc		2.70	2.65	3.50	4.00	2.60	2.65
Peso específico	PE	KN/m³		26.5	26.0	34.3	39.2	25.5	26.0
		MIN/m³		0.026	0.026	0.034	0.039	0.025	0.026
Propiedades mecánico - elásticas de la roca									
Resistencia a la compresión uniaxial	σci	MPa		65	40	20	20	40	60
Módulo de elasticidad	Ei	GPa		14	10	3	3	12	15
		MPa		14,000	10,000	2,500	2,500	12,000	15,000
Constante de Poisson	μ	-		0.25	0.32	0.35	0.35	0.28	0.25
Constante mi de la roca intacta	mi	-		10.5	9.0	19.0	19.0	25.0	15.0
Factor de disturbancia por voladura	D	-		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

3.5 Parámetros de resistencias de la masa rocosa – criterio de falla de Hoek & Brown.

En el siguiente cuadro se muestran los parámetros de las resistencia de la masa rocosa de la mina Yauricocha, proporcionado por el departamento de Geomecanica de Sierra Metals Yauricocha. Con estos parámetros de las tablas 3 y 4 los utilizaremos para el modelamiento numérico.

Tabla 4. Parámetros de resistencia de la masa rocosa – criterio de falla de Hoek & Brown. (fuente Departamento de Geomecanica Sierra Metals)

Descripción de la propiedad	Simbología	Unidades	Unidades geotécnicas					
			UG - CA	UG - CAL	UG - MP	UG - MC	UG - IA	UG - IN
Constante m_b	m_b	-	1.44	1.10	0.97	0.65	1.27	1.14
Constante S	S	-	0.0026	0.0018	0.0001	0.0000	0.0001	0.0004
Constante a	a	-	0.51	0.51	0.53	0.56	0.53	0.52

3.6 Esfuerzos in situ

Los esfuerzos in situ fueron obtenidos utilizando el concepto de carga litostática en el cual el esfuerzo vertical " σ_v " es calculado a partir del peso unitario de la roca sobre yacente " γ " y la profundidad " z " debajo de la superficie.

El esfuerzo horizontal " σ_h " es obtenido del producto del esfuerzo vertical " σ_v " y la constante " k " determinada con el criterio de Sheorey (1994).

$$\sigma_h = k * \sigma_v$$

Donde:

σ_v : Esfuerzo vertical (MPa).

k : Constante de Sheorey (1994).

σ_h : Esfuerzo horizontal (MPa).

$$k = 0.25 + 7E_h \left(0.001 + \frac{1}{z} \right)$$

Donde:

k : Constante de Sheorey (1994).

z : Profundidad de la excavación (m).

E_h : Módulo de deformación horizontal promedio de la masa rocosa (GPa).

En el siguiente cuadro se muestran los resultados del cálculo de los esfuerzos para el modelamiento numéricos de excavaciones subterráneas:

Tabla 5. Cálculos de esfuerzos

DENSIDAD DE LA ROCA		
T/m ³	m/s ²	MN/m ³
2.7	9.81	0.026
PROFUNDIDAD DE LA EXCAVACION		
Profundidad	570	metros
Modulo de Deformacion	8.0	GPa
CONDICION DE ESFUERZOS EN LA MASA ROCOSA		
ESFUERZOS "IN - SITU"		
Vertical (MPa)	Horizontal (MPa)	Constante (K)
15.10	6.10	0.40

4. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE LA EXCAVACION

4.1 Análisis de estabilidad controlada por estructuras

Tomando como base el arreglo estructural de la masa rocosa, las dimensiones de la excavación y su orientación con el uso de herramientas de cómputo se ha podido calcular la estabilidad de las cuñas formadas en el contorno de la excavación.

La herramienta de cálculo empleado es el programa Unwedge perteneciente Rocscience Inc. (2007), con el uso del programa se ha podido obtener una apreciación detallada de todas las cuñas con posibilidad de generar estabilidad en la excavación diseñada. Las cuñas más significativas ubicadas en las labores mineras diseñadas son mostradas en la siguiente tabla para la cámara de diamantina:

Tabla 6. Máximas cuñas inestables en la cámara diamantina

Camara Diamantina	N° Cuña	Altura Cuña	Peso Cuña	Factor de Seguridad Sin Pernos
		metros	Toneladas	
Techo	8	3.76	5.005	0.00
Hastial Derecho	7	0.76	3.184	1.573
Hastial Izquierdo	2	0.76	3.184	0.496

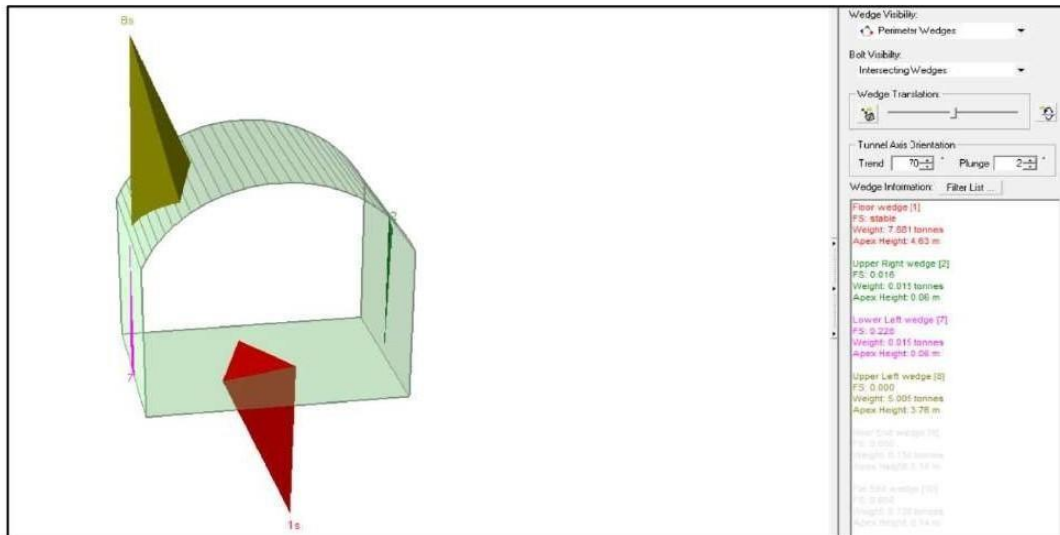


Figura 4. Cuña máxima 8 en el techo de la cámara de 5.0 toneladas y 3.76m de altura.

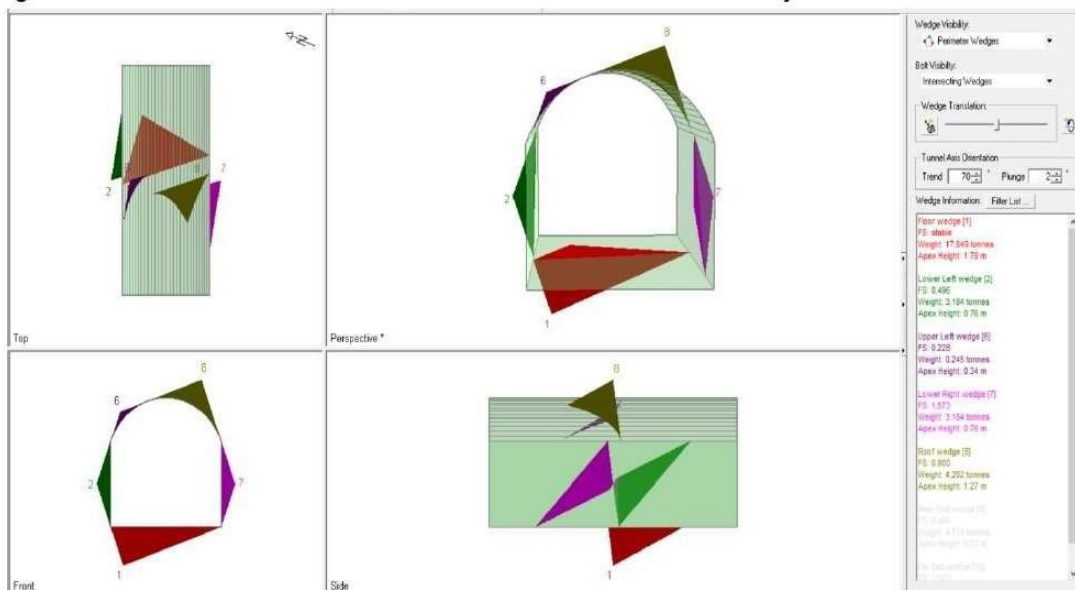


Figura 5. Cuña máximas en los hastiales, cuñas 2 y 7 respectivamente.

Input Data

General | Joint Orientations | Joint Properties

Tunnel Axis Orientation
Trend: 70.5° Plunge: 2.4°

Design Factor of Safety
Design Factor of Safety: 1.5
NOTE: used for optimization and filtering of wedges only (has no effect on the results of the analysis)

Unit Weight
Rock: 2.7 t/m3
Water: 0.981 t/m3

Seismic Force
Direction: Sliding
Seismic coefficient: 0

Figura 6. Parámetros de ingreso para el modelamiento con Unwedge.

Input Data

General | Joint Orientations | Joint Properties

Joint Properties 1

Shear Strength
Model: Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma_n' \tan \phi'$
Phi: 35° Tensile Strength: 0 t/m2
Cohesion: 0 t/m2

Water Pressure
☒ Constant: 0 t/m2
☐ Elevation: 0 m
NOTE: Elevation option should only be used for horizontal tunnels (ie. with plunge = zero)

Joint Structure
Waviness: 0°
= [average angle] - [minimum angle]

Add ... Delete Rename

Figura 7. Propiedades de las familias de discontinuidades para el modelamiento en Unwedge.

Bolt Properties

Perno Helicoidal

Name: Perno Helicoidal Color: Blue

Type: Grouted Dowel

Tensile Capacity: 14 tonnes
Plate Capacity: 10 tonnes
Bond Strength: 7 tonnes/m

Bond Length
☒ Percent of Length: 100 %
☐ Length: 0 m

☐ Use Shear Strength
Shear Strength: 2 tonnes

☒ Use Bolt Orientation Efficiency
Method: Cosine Tension/Shear

Figura 8. Propiedades de resistencia de los pernos helicoidales.

Para el cálculo de las cuñas inestables se muestra en la figura 6 la data de ingreso para el modelamiento con Unwedge, se considera un azimuth de 70° para la cámara diamantina, 2° de pendiente y un factor de seguridad mínimo de 1.5 para la cámara diamantina.

En la figura 7 se muestran las propiedades de las discontinuidades, el ángulo de fricción y la cohesión.

Una vez determinada las cuñas inestables, se procederá a modelar el trabajo de refuerzo de los pernos helicoidales, para lo cual en la figura 8 se muestran los valores de resistencia a la tracción del perno, capacidad de la placa y el valor de Bond Strength (resistencia a la adherencia) y se considera un valor de 8 T/m, según Pakalnis el valor de Bond Strength para los pernos helicoidales (rebar) es de 12-14 T/m para macizos rocosos menores a 45, según se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Valores de Bond Strength (T/m) para diferentes tipos de pernos de reforzamiento (Pakalnis, 2015)

Bolt type	Bond strength (tonnes/m)
39 mm split set weak ground (<45% RMR)	0.75-3.6
39 mm split set hard ground (>55% RMR)	2.5-5
Standard Swellex weak ground (<45% RMR)	8.1-13.8
Standard Swellex hard ground (>55% RMR)	9-15
Cable bolt weak ground (<45% RMR)	24
Cable bolt hard ground (>55% RMR)	28
#6 rebar weak ground (<45% RMR)	12-14
#6 rebar hard ground (>55% RMR)	59

Utilizando la información de las figuras 7 y 8 se procedió a modelar el reforzamiento de los pernos helicoidales en la estabilización de las cuñas inestables, en la tabla resumen 8 inferior se muestra el incremento del factor de seguridad con el uso de los pernos helicoidales de 2.1 metros espaciados a 1.1 x 0.85 metros para cada una de las cuñas inestables.

Tabla 8. Incremento del factor de seguridad con el uso de pernos helicoidales

Camara Diamantina	N° Cuña	Altura Cuña	Peso Cuña	Factor de Seguridad	
		metros	Toneladas	Sin Pernos	Con Pernos
Techo	8	3.76	5.005	0.00	1.172
Hastial Derecho	7	0.76	3.184	1.573	10.312
Hastial Izquierdo	2	0.76	3.184	0.496	7.142

Se observa que para la cuña del techo numero 8 el factor de seguridad con el uso de pernos helicoidales de 2.1 metros el factor de seguridad se incrementa a 1.172, valor inferior a requerido de 1.5, por lo cual es imprescindible el uso de sostenimiento pesado, el cual consiste en la aplicación de shotcrete de 2" y malla electrosoldada y shotcrete sobre malla, con este tipo de soporte se garantizara el la estabilidad de la excavación con un factor de seguridad mayor a 1.5. En la figura 9 se muestra el incremento del factor de seguridad de la cuña del techo con el uso de los pernos helicoidales.

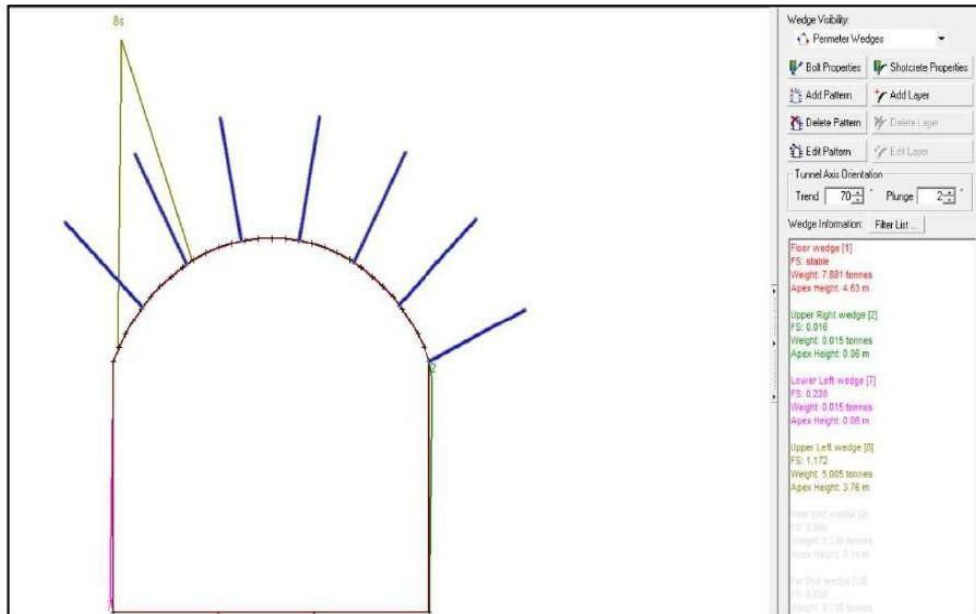


Figura 9. Modelamiento de los pernos helicoidales de 2.1 m de longitud espaciados a 1.2 x 0.85 m en la cuña 8.

En la figura 10 se muestra el modelamiento de los pernos helicoidales en la estabilización de las cuñas inestables 2 y 7 ubicadas en los hastiales. En ambos casos se supera ampliamente el factor de seguridad mínimo requerido de 1.5, esto no implica que se deje de instalar el lanzado de shotcrete y malla electrosoldada, los cuales deben ser aplicados desde la gradiente de la labor como un soporte global de toda la cámara diamantina.

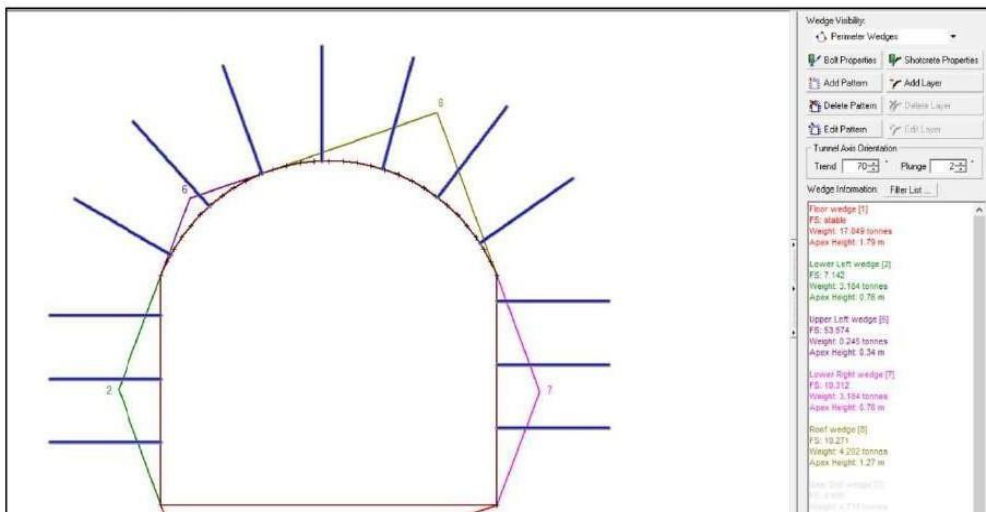


Figura 10. Modelamiento de los pernos helicoidales de 2.1 m de longitud espaciados a 1.2 x 0.85 m en las cuñas 2 y 7.

4.2 Análisis de estabilidad por esfuerzos inducidos

Phase2 es un programa de elementos finitos elastoplásticos bidimensional para calcular tensiones y desplazamientos alrededor de aberturas subterráneas, y se puede utilizar para resolver una amplia gama de problemas en minería, geotecnia y de ingeniería civil (Rocscience, 2009). Los principales supuestos en el método de análisis que vamos a realizar son:

- El macizo rocoso es isotrópico y homogéneo. La falla no está controlada por discontinuidades estructurales importantes.
- La respuesta de soporte es elástica perfectamente plástica,
- El soporte se modela como una presión interna uniforme equivalente alrededor de toda la circunferencia del túnel.
- Por lo tanto, los revestimientos de hormigón proyectado y TSL son anillos cerrados y los pernos de roca anclados mecánicamente se instalan en un
- patrón regular, que rodea completamente el túnel

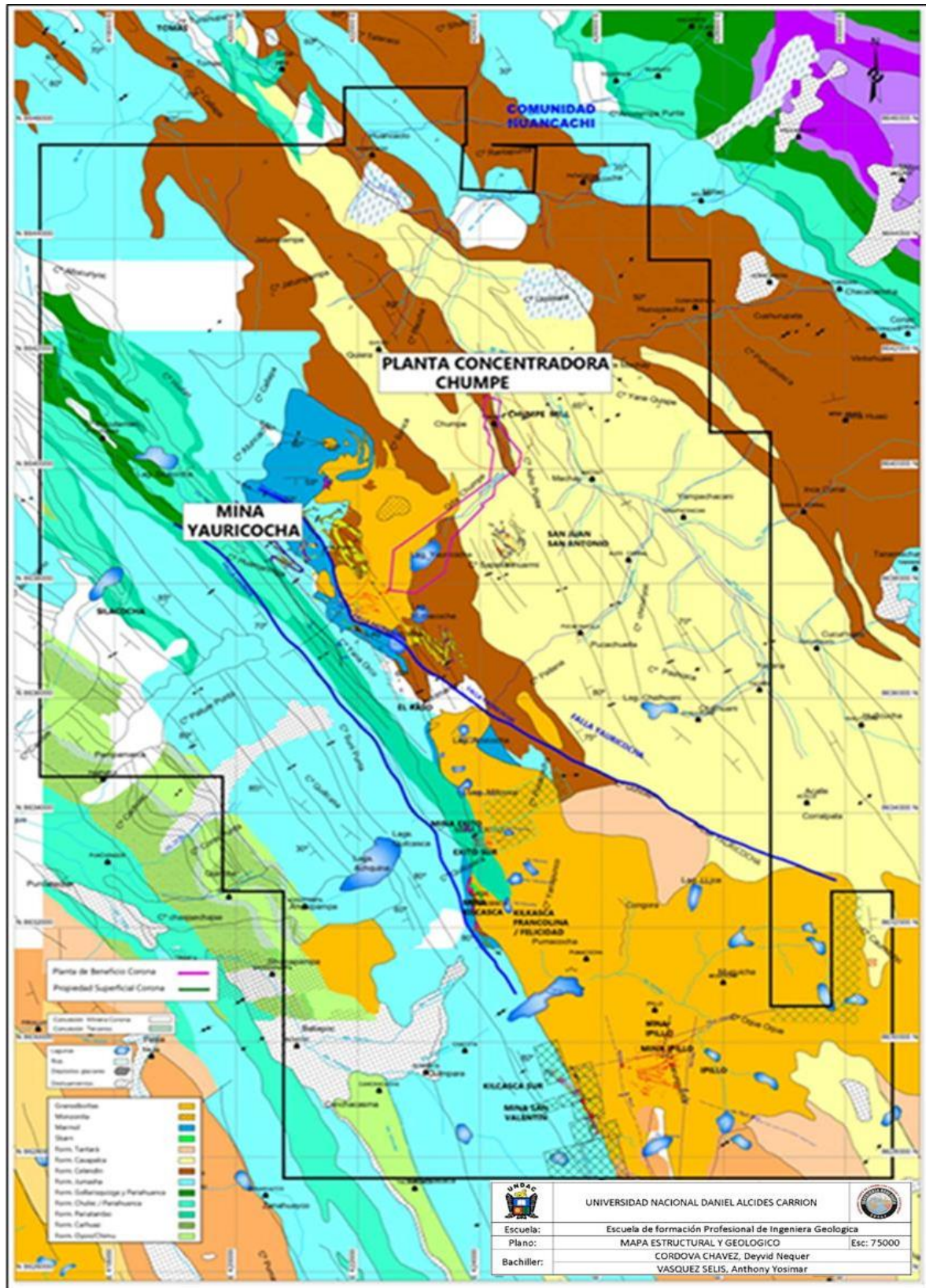
1. CONCLUSIONES

- Se ha determinado un macizo rocoso de Mala A calidad tipo IV-A con un RMR entre 34-38, con intenso fracturamiento y presencia de estructuras sub paralelas al eje de la labor que forman bloques y cuñas inestables principalmente en los hastiales de la excavación en el By Pass 5585 Nivel 1070.
- Las familias de discontinuidades sub paralelas al By Pass reducen la estabilidad de la excavación (-12) y reducen drásticamente en valor del RMR básico de 48 a un valor de RMR ajustado de 36, que es el que se utilizara para el diseño del sistema de soporte (reforzamiento y sostenimiento).
- Se requiere lanzar Shotcrete de 2" de espesor como sostenimiento + pernos helicoidales de 2.1 metros de longitud como reforzamiento espaciados a 1.2 metros.
- Con el uso de pernos helicoidales se obtiene factores de seguridad superiores a 1.25 que es el valor mínimo de diseño requerido.

2. RECOMENDACIONES

- Realizar voladura controlada y cumplir con metro avanzado – metro sostenido, cumplir con el diseño de excavación con la finalidad de evitar a zonas expuestas en la bóveda.
- Aplicar el shotcrete como primer elemento de sostenimiento, posteriormente al tiempo de fragua establecido, se procederá a la instalación de los pernos de refuerzo.
- Realizar un desate adecuado, cumplir con frecuencia de desate de rocas antes del lanzamiento del shotcrete.
- Realizar un batido adecuado de los cartuchos de cemento y resinas en la instalación del perno.
- Antes de iniciar la perforación diamantina, se tiene que colocar sostenimiento en su totalidad incluido la poza y acceso.

PLANO GEOLOGICO - ESTRUCTURAL



MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: Modelo hidrogeológico para el diseño y ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos - Lima			
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	
¿Como el modelo hidrogeológico influyó en el diseño y ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima?	Determinar la influencia del modelo hidrogeológico en la ubicación y diseño de cruceros de drenaje para la protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima.	El modelo hidrogeológico influyó significativamente en el diseño y ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima	Variable Independiente: Modelo Hidrogeológico para el diseño y ubicación de cruceros de drenaje Variable Dependiente: Protección de zonas mineralizadas
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	
¿Como el modelo hidrogeológico influyó en el diseño de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima?	Evaluar el modelo hidrogeológico para el diseño de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima	El modelo hidrogeológico influyó significativamente en el diseño de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima	
¿Como el modelo hidrogeológico influyó en la ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima	Realizar el modelo hidrogeológico para determinar la ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima	El modelo hidrogeológico influyó significativamente en la ubicación de cruceros de drenaje, con fines de protección de la zona mineralizada en la UM Yauricocha - Yauyos – Lima	