UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

Tesis previa a la obtención del Grado de Ingeniero en Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial

TEMA:

"ESTUDIO GEOLÓGICO- GEOTÉCNICO DEL TÚNEL DE ACCESO A CASA DE MÁQUINAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS - SAN FRANCISCO"

DIRECTOR: Ing. Jorge Michael Valarezo Riofrío Mg. Sc.

AUTOR: Christian Alexander Jiménez Estrella

LOJA – ECUADOR

2016

CERTIFICACIÓN

Ing. Jorge Michael Valarezo Riofrío. Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

C E R T I F I C A:

Que, el presente trabajo de investigación: "ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DEL TÚNEL DE ACCESO A CASA DE MÁQUINAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS - SAN FRANCISCO", del señor egresado Christian Alexander Jiménez Estrella, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial; ha sido dirigida y supervisada por el suscrito, trabajo que luego de la revisión final, y por cumplir con las Normas Generales para la Graduación del Nivel de Pregrado, en la Universidad Nacional de Loja, autorizo su presentación para los fines correspondientes.

Ing. Jorge Michael Valarezo Riofrío. Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo **CHRISTIAN ALEXANDER JIMÉNEZ ESTRELLA** declaro ser el autor del trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por contenidos de la misma

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

Firma:……

Cédula: 1104187149

Fecha: 25 de Enero del 2016.

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo CHRISTIAN ALEXANDER JIMÉNEZ ESTRELLA, declaro ser el autor de la tesis titulada: "**ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DEL TÚNEL DE ACCESO A CASA DE MÁQUINAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS SAN FRANCISCO**", como requisito para optar al grado de **INGENIERO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad Nacional de Loja, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, veinte y cinco del mes de enero del dos mil dieciséis.

Firma:……
Autor: CHRISTIAN ALEXANDER JIMÉNEZ ESTRELLA.
Cédula: 1104187149.
Dirección: Loja. Barrio La Tebaida (Calles España entre Chile y Argentina).
Correo Electrónico: cajimenez.geologia@gmail.com.
Teléfono: 072563706. **Celular:** 0989926003.

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Jorge Michael Valarezo Riofrío, Mg. Sc.
Tribunal de Grado: Ing. Jimmy Stalin Paladines, Mg. Sc.
Ing. José Francisco Ochoa Alfaro, Mg. Sc.
Ing. Jorge Enrique Gahona Pacheco, Mg. Sc.

DEDICATORIA

Con mucho cariño quiero dedicar este trabajo a mi familia quienes han sido el pilar fundamental para cumplir con todas las metas que me he propuesto; con infinito amor a mi hija Dulce Lizbeth razón de mi existencia y anhelo de superación; a mis padres Washington y Mónica que supieron encaminarme por un camino de rectitud y superación. A mis hermanos Adrián, Bryan y en especial a Ivonne (+) que guía mi camino y me ayuda a ser una mejor persona.

CHRISTIAN ALEXANDER

AGRADECIMIENTO

Mi reconocimiento imperecedero a las Autoridades y Docentes de la Universidad Nacional de Loja, en el Nivel de Pregrado, por la oportunidad que me dieron de poder cursar con satisfacción esta carrera; de manera especial al Ing. Michael Valarezo Riofrío, Director de Tesis por su colaboración académica y profesional desinteresada en la dirección y asesoramiento del presente trabajo.

Al personal del Proyecto Hidroeléctrico Minas San Francisco., en especial al Ing. Hugo Ochoa por la ayuda y colaboración brindada para llegar a una feliz culminación del trabajo propuesto; a mi familia, compañeros y a todas las personas que de una u otra manera me brindaron su contingente para la realización de esta investigación.

CHRISTIAN ALEXANDER

TABLA DE CONTENIDOS

PORTADA…….... i

CERTIFICACIÓN……. ii

AUTORÍA……. iii

CARTA DE AUTORIZACIÓN…… iv

DEDICATORIA…… v

AGRADECIMIENTO……... vi

1. TÍTULO……... 1

2. RESUMEN……... 2

SUMMARY……. 4

3. INTRODUCCIÓN……... 6

4. REVISIÓN DE LITERATURA……... 9

4.1. Geología……... 9

4.2. Rocas Ígneas o Eruptivas……. 9

4.3. Rocas Sedimentarias o Estratificadas…….. 10

4.4. Rocas Metamórficas……. 10

4.5. Geomorfología……. 10

4.6. Geología Estructural…… 11

4.7. Hidrogeología……... 12

4.8. Geotecnia……. 12

5. MATERIALES Y MÉTODOS…… 17

5.1. Materiales y equipos…… 17

5.2. Metodología…….. 17

6. RESULTADOS…… 23

6.1. Descripción General del Proyecto…… 23

6.2. Estudio Geológico-Geotécnico…… 40

6.3. Medidas de Estabilización y Control……... 65

7. DISCUSIÓN…… 74

8. CONCLUSIONES……... 76

9. RECOMENDACIONES…….. 77

10. BIBLIOGRAFÍA……. 78

ANEXOS……... 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación Geomecánica de Bieniasky, 1989……..... 20

Tabla 2. Correlación por orientación de discontinuidades. Bieniasky, 1989…… 21

Tabla 3. Clasificación del macizo rocoso. Bieniasky, 1989…….. 21

Tabla 4. Sostenimiento eventual en el túnel de acceso a Casa de Máquinas del proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco……... 23

Tabla 5. Coordenadas de ubicación del proyecto…….. 23

Tabla 6. Áreas restituidas por Aeromapa Esc 1:5000…… 34

Tabla 7. Estaciones hidrométricas ubicadas en diferentes sectores del proyecto hidroeléctrico……. 34

Tabla 8. Caudales diarios y mensuales del río Jubones D.J. Minas (1963-2006)……. 35

Tabla 9. Caudales mensuales (m3/seg) con probabilidad de excedencia río Jubones D.J. Minas (1963-2006)…… 36

Tabla 10. Caudales mínimos en estaciones hidrométricas…… 37

Tabla 11. Valores climáticos característicos del proyecto Minas San Francisco……. 38

Tabla 12. Población por sexo de los cantones: Santa Isabel, Pucará, Saraguro…… 39

Tabla 13. Comunidades beneficiadas por el proyecto Minas San Francisco…… 39

Tabla 14. Abscisa de cada una de las muestras recogidas en el túnel de acceso…….. 40

Tabla 15. Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 1+518,00 a 1+200,00 del túnel de acceso…….. 46

Tabla 16. Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 1+518,00 a 1+200,00 del túnel de acceso……. 46

Tabla 17. Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 1+200,00 a 0+900,00 del

túnel de acceso…….. 48

Tabla 18. Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 1+200,00 a 0+900,00 del túnel de acceso……. 48

Tabla 19. Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+900,00 a 0+600,00 del túnel de acceso…….. 50

Tabla 20. Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+600,00 a 0+300,00 del túnel de acceso……. 50

Tabla 21. Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+900,00 a 0+600,00 del túnel de acceso…….. 52

Tabla 22. Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+600,00 a 0+300,00 del túnel de acceso……. 52

Tabla 23. Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+300,00 a 0+000,00 del túnel de acceso…….. 54

Tabla 24. Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+300,00 a 0+000,00 del túnel de acceso……. 54

Tabla 25. Estructuras principales, secundarias y esporádicas del túnel de acceso a Casa de Máquinas…….. 56

Tabla 26. Características de las estructuras definidas……... 56

Tabla 27. Agua freática en el túnel de acceso a Casa de Máquinas…….. 57

Tabla 28. Datos obtenidos producto del mapeo geológico realizado en la abscisa 0+000,00…… 61

Tabla 29. Distancias y porcentajes de los tipos de roca túnel de acceso a Casa de Máquinas…….. 62

Tabla 30. Especificaciones técnicas para pernos inyectados del proyecto hidroeléctrico

Minas San Francisco……. 68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del proyecto Minas San Francisco…… 24

Figura 2. Columna estratigráfica de la zona del proyecto Minas San Francisco…… 30

Figura 3. Caudales diarios y mensuales del río Jubones D.J. Minas (1963-2006)…… 36

Figura 4. Variación estacional del río Jubones D.J. Minas (1963-2006)…….. 37

Figura 5. Estereograma de los sistemas estructurales dominantes…… 47

Figura 6. Diagrama de rosetas……... 47

Figura 7. Estereograma de los sistemas estructurales dominantes…… 49

Figura 8. Diagrama de rosetas……... 49

Figura 9. Estereograma de los sistemas estructurales dominantes…… 51

Figura 10. Diagrama de rosetas……. 51

Figura 11. Estereograma de los sistemas estructurales dominantes…….. 53

Figura 12. Diagrama de rosetas……. 53

Figura 13. Estereograma de los sistemas estructurales dominantes…….. 55

Figura 14. Diagrama de rosetas……. 55

Figura 15. Porcentajes del agua freática en el túnel de acceso…….. 57

Figura 16. Frontón en el túnel de acceso a Casa de Máquinas…….. 59

Figura 17. Porcentajes del tipo de roca en el túnel de acceso……... 62

Figura 18. Zona de falla en el túnel de acceso a Casa de Máquinas……. 63

Figura 19. Zona de inestabilidad en el túnel de acceso a Casa de Máquinas en la abscisa 0+930,00…… 64

Figura 20. Hormigón proyectado entre las abscisas 0+131,90 a 0+128,00 en el túnel de acceso a Casa de Máquinas……... 67

Figura 21. Perno Inyectado (Varilla corrugada de 3 metros)…… 69

Figura 22. Pernos Swellex (3 metros)……... 70

Figura 23. Longitud y radio de cercha reticulada utilizada en el túnel de acceso a Casa de Máquinas……..... 71

Figura 24. Cercha reticulada de acero laminado en forma de arco……... 72

Figura 25. Drenaje en bóveda en la abscisa 0+744,00 en el túnel de acceso a Casa de Máquinas (Long. 2 metros; Diámetro 1 pulgada)……. 73

1. TÍTULO

ESTUDIO GEOLÓGICO- GEOTÉCNICO DEL TÚNEL DE ACCESO A CASA DE MÁQUINAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS - SAN FRANCISCO

2. RESUMEN

El Proyecto Hidroeléctrico Minas – San Francisco está ubicado en el sur del Ecuador. Siguiendo la vía panamericana (Quito-Cuenca-Machala) se encuentra aproximadamente a 500 km. de la capital del país, atraviesa las parroquias de Pucará y San Rafael de Sharug, del Cantón Pucará (provincia del Azuay).

Hidrológicamente el Proyecto se ubica en la Cuenca del río Jubones y siguen una trayectoria paralela al mismo. El proyecto se enmarca entre las coordenadas 9'630.956.N y 668.870 E.

En función del estudio de factibilidad y diseño definitivo del Proyecto Hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco (Agosto 2011) las principales obras componentes del aprovechamiento Hidroeléctrico son:

1. Un cierre en el río Jubones con una **Presa de tipo Gravedad** prevista en hormigón rodillado, en el sitio denominado San Francisco, de 54 m de altura medida desde la cota actual del fondo río.

2. La estructura de cierre tiene como un elemento importante de control y de regulación del embalse y del material sólido depositado en el embalse, **el Desagüe de Fondo**.

3. **Obra de toma** ubicada en la margen derecha del río Jubones que se conecta directamente a la entrada de la cámara de compuerta y al túnel de carga.

4. Para viabilizar la construcción de la presa, se requiere así mismo de la construcción del **Túnel de Desvío**. Esta conducción se desarrolla a lo largo de la margen izquierda del río Jubones.

5. **Túnel de Conducción** o de baja presión, se desarrolla a lo largo de la margen derecha del río Jubones con 13,9 km de longitud y se diseña para un caudal de 65,0 m^3/s.

6. Una **Chimenea de Equilibrio**, vertical, de sección transversal horizontal circular, de altura total igual a 68 m con orificio restringido al pie, hasta el perfil del terreno natural en el sector de Gramalote.

7. La **Tubería de Presión**, que será construida subterránea y blindada, con un diámetro igual a 3,77 m y una longitud total de 566,4 m.

8. La **Casa de Máquinas San Francisco**, que se ubica subterránea o en caverna, en el sector de Gramalote. Está posicionada en la cota 281,32 m s.n.m. El piso principal se ubica en la cota 291,90 m s.n.m. Adicionalmente, se dispondrá de una caverna separada para alojar los transformadores. La Subestación Eléctrica será ubicada al exterior, en el mismo sector de Gramalote, y conectada a los transformadores a través un pozo de cables.

9. El **Canal de Descarga**, para flujo a gravedad o con superficie libre, que será construido subterráneo.

El proyecto se encuentra ubicado en la cuenca media del río Jubones, geológicamente descansa sobre el Grupo Saraguro redefinido por Dunkley & Gaibor, 1997, como una secuencia de rocas volcánicas subaéreas, calco-alcalinas, intermedias a ácidas, de edad Eoceno medio tardío a Mioceno temprano.

SUMMARY

The hydroelectric project Minas - San Francisco is located in southern Ecuador. Following the Panamerican Highway (Quito-Cuenca-Machala) is approximately 500 km. of the capital, through the parishes of Pucara and San Rafael de Sharug, the pucará canton (province of Azuay).

Hydrologically the project is located in the basin of river Jubones and follow a path parallel thereto. The project falls between 668,870 9'630.956.N coordinates and E.

Depending on the feasibility study and final design alternative Minas Hydroelectric Project San Francisco (August 2011) the main components of the hydroelectric works are:

1. A close Jubones in the river with a gravity dam under rolled concrete type in the place called San Francisco, 54 m in height measured from the current level of the river bottom.

2. The closure structure is an important element of control and regulation of the reservoir and solid material deposited in the reservoir, the bottom outlet.

3. Work of socket located on the right bank of river Jubones that connects directly to the input of the sluice chamber and the charge tunnel.

4. To enable the construction of the dam, thus it requires the construction of diversion tunnel. This drive is developed along the left bank of the river Jubones.

5. Tunnel Driving or low pressure develops along the right bank of river Jubones 13.9 km in length and is designed for a flow rate of 65.0 m^3 / s.

6. A surge tank, vertical, horizontal circular cross section, total height equal to 68 m at the foot restricted orifice to the profile of the natural terrain in the area of Gramalote.

7. The pressure pipe, which will be built underground and reinforced with a diameter equal

to 3.77 m and a total length of 566.4 m.

8. The Powerhouse San Francisco, it located underground or cave in the field of Gramalote. It is positioned at elevation 281.32 m s.n.m. The main floor is located at elevation 291.90 m asl Additionally, there will be a separate transformer cavern to house. The electrical substation will be located abroad, in the same sector Gramalote and connected to the transformers through a pit of cables.

9. The discharge channel for gravity flow or free surface, which will be built underground.

The project is located in the middle reaches of the river Jubones geologically rests on the Saraguro Group redefined by Dunkley & Gaibor, 1997, as a sequence of subaerial volcanic rocks, calc-alkaline intermediate to acidic, of late middle Eocene to Miocene early.

3. INTRODUCCIÓN

La AIER (Agencia Internacional de Energías Renovables) (2013) manifiesta que "solo el 12,9% de la energía en el mundo es alternativa" (pág. 1), lo que da a entender que la población mundial sigue a expensas de la quema de combustibles fósiles para el diario vivir. La AIER describe "que el desarrollo del sector de la energía renovable es inevitable, ya que deberá desempeñar un papel fundamental en la sostenibilidad para el próximo milenio" (pág. 2).

Además se tiene dos grandes razones por las cuales debemos instaurar los recursos naturales como fuentes de energía limpia, y estas son: aprovechar aquellos recursos que parecen inagotables, como la fuerza del agua y con esto reducir la emisión de gases de efecto invernadero. "Nuestro país aún depende de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía y pese a esto el 12% de la población no tiene un acceso constante a ella, es por esto que se debe enfatizar en la construcción de centrales eléctricas ya que serán la base para suplir la creciente demanda de potencia, generada por el desarrollo dinámico del país. (Diario HOY, Nov del año 2012, pág. 26).

La Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo (2012) declara que en nuestro país el 47% de la energía generada es energía limpia. "Transformar la matriz productiva es uno de los retos más ambiciosos, el que permitirá al Ecuador superar el actual modelo de generación de riquezas: concentrador, excluyente y basado en recursos naturales, por un modelo democrático, incluyente y fundamentado en el conocimiento y las capacidades de las y los ecuatorianos. Se han identificado 14 sectores productivos para el proceso de cambio de la matriz productiva del Ecuador, y entre estos uno de los más importantes es el de Energías Renovables." (pág. 14)

El Proyecto Hidroeléctrico Minas – San Francisco ubicado al límite sur-occidental de la Provincia del Azuay aportará con 275 MW anuales al sistema interconectado nacional. Geológicamente descansa sobre el Grupo Saraguro redefinido por Dunkley & Gaibor, 1997, como una secuencia de rocas volcánicas subaéreas, calco-alcalinas, intermedias a ácidas, de edad Eoceno medio tardío a Mioceno temprano.

Según el Informe de Enerjubones (2010), el proyecto Hidroeléctrico cuenta con los siguientes antecedentes de ejecución. En 1976 se realiza el Estudio de Factibilidad a cargo de HIDROSERVICE –ASTEC; en el año 2007, se realiza la actualización de la factibilidad de ejecución a través de la Universidad de Cuenca. En el año 2008, se conforma la Empresa Generadora Enerjubones (Gobiernos Provinciales de Azuay y El Oro). De mayo a noviembre del 2009, se complementa los estudios de factibilidad y el nuevo esquema-firma del contrato complementario; para en noviembre del mismo año, el diseño definitivo y ejecución del proyecto.

En este contexto, el proyecto hidroeléctrico Minas-San Francisco se constituyó entre los seis (6) proyectos hidroeléctricos prioritarios para ejecución inmediata en el Ecuador. Todos estos antecedentes y lineamientos ha permitido generar la necesidad del presente trabajo investigativo de tercer nivel; el cual trata de alguna manera de colaborar en el análisis geológico-geotécnico del túnel de acceso a casa de máquinas del Proyecto, permitiendo la colocación de un sostenimiento o ándeme adecuado a las exigencias y normas de seguridad nacional e internacional.

Los objetivos que se plantean en la presente investigación técnica relacionan el obtener, procesar y evaluar la información geológica – geotécnica en el túnel de acceso a la casa de máquinas **T1**, mediante una secuencia metodológica ordenada en el cumplimiento de los siguientes objetivos:

a) Objetivo general

1. Realizar el estudio Geológico-Geotécnico del Túnel de Acceso a Casa de Máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Minas - San Francisco.

b) Objetivos específicos

1. Identificar y describir la geología del túnel de acceso a casa de máquinas del proyecto hidroeléctrico Minas - San Francisco.
2. Realizar el estudio geológico estructural del túnel de acceso a casa de máquinas en sus

1518.510 metros de longitud.

3. Determinar las propiedades geotécnicas del macizo rocoso con el fin de plantear la estabilización eventual del túnel de acceso a Casa de Máquinas.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Geología

Duque (2003), manifiesta que la geología es la ciencia que estudia el planeta Tierra en su conjunto, que describe los materiales que la forman para averiguar su historia y su evolución; e intenta comprender la causa y generación de los fenómenos endógenos y exógenos. La unidad de tiempo en geología es el millón de años. (pág. 56)

En la actualidad las ciencias geológicas están adquiriendo mayor importancia para enfrentar la escasez de materias primas y energéticas y los problemas ambientales.

4.2. Rocas ígneas o eruptivas

Adiego (2008) afirma que las rocas ígneas "son aquellas que se han formado por la cristalización y solidificación del magma procedente del manto. Las rocas ígneas pueden aparecer en superficie de dos maneras distintas: por una solidificación lenta o por una solidificación rápida. Las rocas ígneas de solidificación lenta se llaman rocas plutónicas o rocas hipoabisales. Se presentan en grandes vetas compactas. Aparecen en superficie porque el magma se cuela por una grieta, pero no llega a explotar como un volcán, sino que se enfría. Posteriormente la erosión desentierra la grieta dejando a la vista el magma solidificado. Las rocas ígneas de solidificación rápida son las rocas volcánicas y piroclásticas. Salen a la superficie incandescentes y allí se enfrían." (pág. 17)

Las rocas ígneas son de gran importancia geológicamente hablando puesto que sus minerales dan información sobre la composición del manto terrestre y poseen en circunstancias especiales importantes depósitos minerales como tungsteno, estaño y uranio. Su composición principal son los silicatos.

Teniendo en cuenta estos datos es posible tener una idea más clara del origen y del tipo de roca que tenemos en el proyecto hidroeléctrico.

4.3. Rocas sedimentarias o estratificadas

Adiego (2008) manifiesta que rocas sedimentarias "son aquellas que se forman por la acumulación de materiales procedentes de otras rocas, o de seres vivos. Se depositan en capas, unas sobre otras. A medida que se acumulan capas las rocas se compactan, pierden agua, se hacen más pequeños los poros y expulsan aire, hasta quedar como una roca compacta, desapareciendo los elementos sueltos que la dieron origen. A este proceso se le llama diagénesis. " (pág. 51)

Este tipo de rocas son las más abundantes en el planeta tierra, adquieren las características de acuerdo como se realice la sedimentación. Además se hallan dispuestas formando capas o estratos.

4.4. Rocas metamórficas

Adiego (2008) exclama que rocas metamórficas "son aquellas que, debido al aumento de la presión y el calor interno de la Tierra, se han recristalizado, han incluido minerales nuevos y han cambiado totalmente su naturaleza. Es a este proceso al que llamamos metamorfismo. Este fenómeno se puede producir por tres causas: por el contacto con el magma (metamorfismo de contacto), por las tensiones entre dos rocas en una falla, que terminan puliendo parte de la roca (metamorfismo dinámico), y por la presión de grandes masas de rocas, como las existentes en una montaña (metamorfismo regional). (pág. 68)

4.5. Geomorfología

En el año 2000 Dávila dice que la "geomorfología es el estudio científico de la forma del terreno y de los paisajes. El término suele aplicarse a los orígenes y a la morfología dinámica de las superficies de la Tierra, pero abarca también la morfología del fondo marino y el análisis de terrenos extraterrestres." (pág. 14)

La geomorfología es el estudio del aspecto geológico del terreno visible. Los factores

más importantes que determinan la forma del terreno son: el clima, las precipitaciones, las escorrentías, el viento y la dinámica ejercida por el planeta tierra. Factores muy importantes que se debe tener en cuenta al momento de analizar la geomorfología de un sector.

4.6. Geología estructural

Duque (2003) expresa que "en un principio, a los geólogos estructurales les interesaba especialmente el análisis de las deformaciones de los estratos sedimentarios, ahora estudian más las de las rocas en general. Comparando las distintas características de estructuras, se puede llegar a una clasificación de tipos relacionados. La geología estructural comparativa, que se ocupa de los grandes rasgos externos, contrasta con las aproximaciones teóricas y experimentales que emplean el estudio microscópico de granos minerales de rocas deformadas. Las principales estructuras geológicas que se reconocen son:

1. Fallas geológicas.- Son fracturas que separan bloques con movimiento relativo entre ellos. Según este movimiento se clasifican genéticamente como:

a) Fallas de salto en dirección.- Son en general sub-verticales, y separan bloques que se desplazan lateralmente. Según sea el sentido relativo de desplazamiento se dividen en dextrosas (el bloque se mueve hacia la derecha) o sinestrosas (el bloque se mueve hacia la izquierda), tomando como criterio el bloque del observador y deslizando el contrario.
b) Fallas de salto en buzamiento.- Separan bloques que se desplazan verticalmente. Dentro de las fallas de salto en buzamiento podemos encontrar, fallas normales o directas cuando el bloque superior se mueve hacia abajo. Son fallas generalmente asociadas a extensión. Y fallas inversas cuando el bloque superior se mueve hacia arriba. al contrario que las anteriores se asocian a compresión, con el consiguiente acortamiento del sistema. Dentro de la clasificación de falla normal e inversa podemos encontrar las de alto y bajo ángulo. A las fallas inversas de bajo ángulo se les llama

también cabalgamiento.

2. Diaclasas.- Son fracturas no visibles a simple vista. La diferencia entre falla y diaclasa reside en la escala de observación, ya que una falla a escala local puede resultar una diaclasa a escala regional. Un buen criterio es la búsqueda de los ornamentos típicos de una diaclasa como son la estructura plumosa, las nervaduras y la orla.
3. Pliegues.- Son estructuras de deformación producto generalmente de esfuerzos compresivos. Se producen cuando las rocas se pliegan en condiciones de presión y temperatura altas, lo que les confiere la ductilidad necesaria para que se generen los pliegues.
4. Foliaciones.- Estructuras planares formadas por la alineación de minerales en planos preferenciales a través de la roca. Se producen a elevadas presiones y temperaturas." (pág. 16-17)

Permitirá describir principalmente las estructuras (diaclasas) principales J1 y secundarias J2 en el túnel de acceso. Se debe tener en cuenta que las discontinuidades son el condicionante principal para la interpretación geomecánica de un macizo rocoso, puesto que a mayor cantidad de estructuras menor será su clasificación.

4.7. Hidrogeología

Dávila (2000) manifiesta que la "hidrogeología es una rama de las ciencias geológicas que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su origen, su circulación, sus condicionamientos geológicos, su interacción con los suelos, rocas y humedales (freatogénicos); su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas) y su captación." (pág. 8)

4.8. Geotecnia

Strina (2002) señala que "el término geotecnia hace alusión al conjunto de reconocimientos y ensayos realizados al terreno y a la interpretación de los datos obtenidos

en los mismos, que permiten caracterizar los diversos suelos presentes en la zona de estudio y sus propiedades, en función de los objetivos y características del proyecto. (pág. 5)

4.8.1. Métodos de reconocimiento del subsuelo

Los métodos o sistemas que se puede utilizar en el reconocimiento del suelo son: los métodos indirectos o geofísicos y los métodos directos.

1. Los métodos indirectos están basados en la medida de una característica física de los materiales que comprenden el suelo por medio de aparatos sofisticados dispuestos en la superficie del suelo o a muy poca profundidad. Estos métodos determinan por ejemplo la resistividad eléctrica o la velocidad de propagación de las ondas sísmicas.
2. Los métodos directos tratan de recuperar una muestra de terreno para su análisis, o bien miden resistencia y/o la deformación de los terrenos.

Los métodos indirectos son mucho más baratos que los directos; sin embargo nunca se debe cambiar los métodos directos por los indirectos, ya que estos son de complemento. Los ensayos directos son los siguientes:

4.8.1.1. Sondeos mecánicos a rotación

Sondear o perforar es la técnica que se emplea para hacer un agujero en la tierra o en una construcción. Si la herramienta va haciendo el agujero golpeando contra el fondo de él, se dice que es un sondeo de Percusión. Si lo hace sin golpear, sino girando sobre el fondo, se dice que es un sondeo a Rotación.

4.8.1.2. Ensayos de penetración

El penetrómetro; es un aparato capaz de introducir un utensilio (generalmente de forma cónica) en el suelo, realizado preferentemente por hincado (golpeo por empuje. En cada caso se mide la resistencia a la penetración a lo largo del recorrido. Existen dos tipos de

penetrómetro: el penetrómetro elástico y el penetrómetro dinámico. Este ensayo permite determinar las propiedades geotécnicas de los materiales existentes en los sitios de construcción tanto para el túnel como en la casa de máquinas.

4.8.1.3. Ensayos de mecánica de suelos y mecánica de rocas

El fin principal de los ensayos de laboratorio en este orden, es la interpretación geológica – geotecnia. Los ensayos de identificación y caracterización de suelos; así como, los destinados a las características físico-resistentes de los materiales, fueron desarrollados sistemáticamente en los niveles de factibilidad y pre – factibilidad del proyecto. Los ensayos considerados en el orden de importancia inmediata, son:

1. Ensayos de identificación.- Los ensayos básicos para caracterizar un suelo son llamados ensayos de identificación los cuales son:

a) Humedad: es la cantidad de agua contenida en un material. Está dada por la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{\mathrm{Wh} - \mathrm{Ws}}{\mathrm{Ws}}; \frac{\text{Peso muestra húmeda} - \text{Peso muestra seca}}{\text{Peso muestra seca}}$$

b) Granulometría: desde el punto de vista de la mecánica de suelos, un material heterogéneo se considera bien graduado, y sus propiedades mecánicas ofrecen mayor calidad. Un material homogéneo se considera mal graduado, sus propiedades mecánicas son deficientes.

c) Límites de Atterberg: miden la cohesión del terreno y su contenido de humedad, para ello se forman pequeños cilindros de espesor con el suelo. Siguiendo estos procedimientos se definen tres límites: límite líquido, límite plástico y límite de retracción o contracción.

Estos ensayos son fundamentales a fin de determinar las características de un suelo

(roca) determinado y su tipo (grava, arena o arcilla) y a partir de ellos se orientará el informe geotécnico aplicando el método adecuado en cada caso.

2. Resistencia a la compresión simple RCS.- Llamado también resistencia uniaxial. El objeto de este ensayo es determinar el máximo esfuerzo que soporta la roca o suelo (probeta cilíndrica), a una carga axial. El ensayo de compresión simple se realiza sin confinamiento lateral, y sin drenaje, es decir es un ensayo rápido en el que no se deja que el agua de los poros salga al exterior.

$$6c = \frac{\mathrm{Fc}}{\mathrm{A}}; \frac{Fuerza\ compresiva\ aplicada}{Area\ de\ aplicación}$$

3. Ensayos a corte directo.- Este ensayo consiste esquemáticamente romper una pastilla de suelo por medio de esfuerzos tangenciales. El ensayo de corte directo es un procedimiento utilizado para determinar las componentes del esfuerzo de corte de un suelo, es decir, la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.
4. Ensayo triaxial de Suelo. ASTM D 2850.- Es el ensayo que mayor información proporciona, puesto que permite conocer los dos parámetros intrínsecos más importantes del suelo: cohesión y ángulo de fricción. Con ello se define perfectamente la capacidad portante del suelo. Este ensayo sin embargo no se suele hacer debido a su alto precio y, sobretodo, al tiempo empleado en la realización del mismo que puede provocar retrasos a la hora de emitir un informe.

La Resistencia al Esfuerzo Cortante de un suelo (τf), en Función de los esfuerzos totales, se determina utilizando la Ley de Coulomb:

$$\tau f = c + \sigma . \tan \varphi$$

El estudio geológico-geotécnico debe contener todos los datos relevantes para la correcta ejecución del proyecto y se elabora en base a ensayos de campo y de laboratorio adecuados al tipo de proyecto, incluyendo las recomendaciones propias en función de la

naturaleza de las actuaciones.

Todo ello hace que sea necesario establecer las directrices para determinar la necesidad y aplicación de los estudios geotécnicos en la redacción de los proyectos a ser ejecutados.

5. MATERIALES Y METODOLOGÍA

5.1. Materiales y equipos

Los materiales que se utilizaron para la realización de este trabajo de investigación fueron:

1. Brújula Brunton y estructural
2. Flexómetro y Cinta de 30 metros
3. Libreta de Campo
4. Martillo Geológico o piqueta
5. Cámara Fotográfica
6. Carta Geológica Saraguro Esc. 1:100 000
7. Perfil Geológico-Geomecánico del proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco Esc. 1:10000
8. Martillo de Schmidt
9. Recipientes para envasar las muestras alteradas
10. Equipos de oficina en general

5.2. Metodología

La metodología empleada para la realización de este trabajo investigativo fue la siguiente:

1. Metodología para el primer objetivo específico

a) Identificar y describir la geología del túnel de acceso a Casa de Máquinas del proyecto hidroeléctrico Minas - San Francisco.

Mediante el Método de Observación Científica y con la ayuda de la Carta Geológica Saraguro Esc. 1-100000 así como del perfil Geológico-Geomecánico del proyecto

hidroeléctrico Minas San Francisco Esc. 1:1000 se identificó y describió la litología existente en el Túnel de Acceso a Casa de Máquinas del mencionado proyecto. Esto se lo realizó recogiendo muestras de las paredes (hastiales) del túnel cada 50 metros. Se analizaron minuciosamente las muestras de roca teniendo en cuenta los siguientes parámetros.

1. Origen
2. Tonalidad
3. Textura y estructura
4. Componentes (mineral y matriz)
5. Densidad
6. Porosidad

Una vez analizados todos estos parámetros se identifica y describe el tipo de roca encontrado en el túnel.

2. Metodología para el segundo objetivo específico

a) Realizar el estudio geológico estructural del túnel de acceso a Casa de Máquinas en sus 1518.510 metros de longitud.

Una vez obtenida la descripción litológica se procedió a la utilización del Método Empírico Analítico. Este método ayudó a distinguir y cuantificar las estructuras geológicas (fallas, diaclasas, estrías de fricción, discontinuidades con rellenos, contactos litológicos, zonas de cizalla).

A cada estructura presente en el túnel de acceso se le tomó el Dip (buzamiento) y el dip direction (dirección del buzamiento) con la finalidad de establecer mediante el diagrama de rosetas las estructuras predominantes (principales), secundarias y esporádicas con sus respectivas características (orientación, relleno, alteración, rugosidad, abertura y persistencia).

Los pasos que siguieron para el análisis geológico-estructural del túnel de Acceso a Casa

de Máquinas fueron los siguientes:

1. Descripción litológica
2. Descripción de discontinuidades

a) RQD (Numero de discontinuidades por cada metro)
b) Separación entre diaclasas
c) Rugosidad
d) Continuidad (longitud)
e) Relleno
f) Grado de alteración

3. Agua freática

Una vez obtenidas las ponderaciones se procedió a sacar un valor llamado RMR (rock mass rating) que no es más que una clasificación de las rocas 'in situ' y estimar el tiempo de mantenimiento.

También conocida como clasificación geomecánica de Bieniawski, fue presentado por el Ingeniero Bieniawski en 1973 y modificada sucesivamente en 1976, 1979, 1984 y 1989

Tabla 1. *Clasificación geomecánica de Bieniawski, 1989.*

1	**Resistencia de la roca sana**	**Ensayo de un punto**	**>100 Kg/cm²**	**40-80 Kg/cm²**	**20-40 Kg/cm²**	**10-20 Kg/cm²**	**Compresión simple (Kg/cm²)**		
		C. simple	**>2500 Kg/cm²**	**1000-2500 Kg/cm²**	**500-1000 Kg/cm²**	**500-250 Kg/cm²**	**500-250**	**10-50**	**<10**
		Valoración	**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD Valoración		90-100% 20	75-90% 17	50-75% 10	25-50%	<25% 5		
3	Separación entre diaclasas Valoración		>2 m. 20	0.6-2 m. 15	0.2-0.6m 10	0.6-0.02m 8	<0.06 m. 5		
4	Estados de las diaclasas		E-1 Muy rugosas. Discontinuas. Sin separaciones, bordes sanos y duros	E-2 Ligeramente rugosas, abertura <1mm. Bordes duros	E-3 Ligeramente rugosas. Abertura <1mm. Bordes blandos	E-4 Espejos de falla con relleno <5mm o abiertas 1-5mm. Diaclasas continuas	E-5 Relleno blando >5mm. o abertura >5mm. Diaclasas continuas		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua freática	Caudal por 10m. de túnel. Presión de agua Tensión principal Estado general	Nulo Litros/min 0 Seco	<10 Litros/min 0-0.1 Líquido-húmedo	10-25 Litros/min 0.01-0.2 Húmedo	25-125 Litros/min 0.2-0.5 Goteando	>125 Litros/min >0.5 Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

Fuente. Duque, Gonzalo. (2003). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.

Teniendo en cuenta estos resultados se realizó una correlación por la orientación de las discontinuidades teniendo en cuenta el tipo de construcción civil que se pretende realizar.

Tabla 2. *Correlación por orientación de discontinuidades. Bieniawski, 1989.*

Dirección y Buzamiento		Muy Favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy Desfavorables
Valoración para:	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente. Duque, Gonzalo. (2003). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.

Una vez obtenido este valor de corrección se procedió a restar del valor RMR (rock mass rating) y se obtiene una calidad o clasificación del macizo rocoso.

Tabla 3. *Clasificación del macizo rocoso. Bieniawski, 1989.*

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Mediana	Mala	Muy Mala
Valoración	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Fuente. Duque, Gonzalo. (2003). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.

3. Metodología para el tercer objetivo específico

a) Determinar las propiedades geotécnicas del macizo rocoso con el fin de la estabilización eventual del túnel de acceso a Casa de Máquinas

Una vez obtenida la clasificación del macizo rocoso, se procede a la implementación del sostenimiento eventual del túnel de acceso a Casa de Máquinas teniendo en cuenta lo siguiente.

La implementación del sostenimiento sea temporal (en construcción) o permanente (entrega de obra); relacionara las variables geológicas – geotécnicas y el diseño constructivo impuesto por la compañía constructora del proyecto hidroeléctrico Minas-San Francisco (Ver Tabla siguiente).

Tabla 4. *Sostenimiento eventual en túnel de acceso a Casa de Máquinas del proyecto hidroeléctrico Minas-San Francisco. 2011. (Véase Anexo 3).*

Tipo*	Medidas de Estabilización*
I	5 cm de hormigón lanzado con fibra + pernos esporádicos (swellex o inyectado)
II	10 cm de hormigón lanzado con fibra + pernos radiales separación de cada anillo 2m. (swellex o inyectado)
III A	10 cm de hormigón lanzado con fibra + pernos radiales separación de cada anillo 1.5m. (swellex o inyectado)
III B	20 cm. De hormigón lanzado con fibra + Cercha reticular + malla electro soldada. + Forepoling (ocasionales). Separación de cada cercha 1.5m.
IV	40 cm. De hormigón lanzado con fibra + Cercha rígida + malla electro soldada. + Forepoling + micro pilotes (ocasionales). Separación de cada cercha 1m.
V	40 cm. De hormigón lanzado con fibra + Cercha rígida + malla electro soldada. + Forepoling + micro pilotes. Separación de cada cercha 1m.

Fuente. Astec Geodata**.** (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño Definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

*****Según el diseño definitivo del proyecto Hidroeléctrico Minas-San Francisco 2011. Véase Anexo 1 sección a).

6. RESULTADOS

6.1. Descripción general del área de estudio

6.1.1. Acceso

El proyecto hidroeléctrico Minas – San Francisco está ubicado en el sur del Ecuador; aproximadamente a 92 km de la ciudad de Cuenca (01h30min) siguiendo la vía Girón-Pasaje que es de primer orden. Véase Figura Nº1.

6.1.2. Ubicación administrativa

El mencionado proyecto está en el límite sur-occidental de la provincia del Azuay, atraviesa las parroquias de Pucará y San Rafael de Sharug, del cantón Pucará. Véase figura N° 1. Ubicación del proyecto hidroeléctrico. Véase Figura Nº1.

6.1.3. Localización geográfica

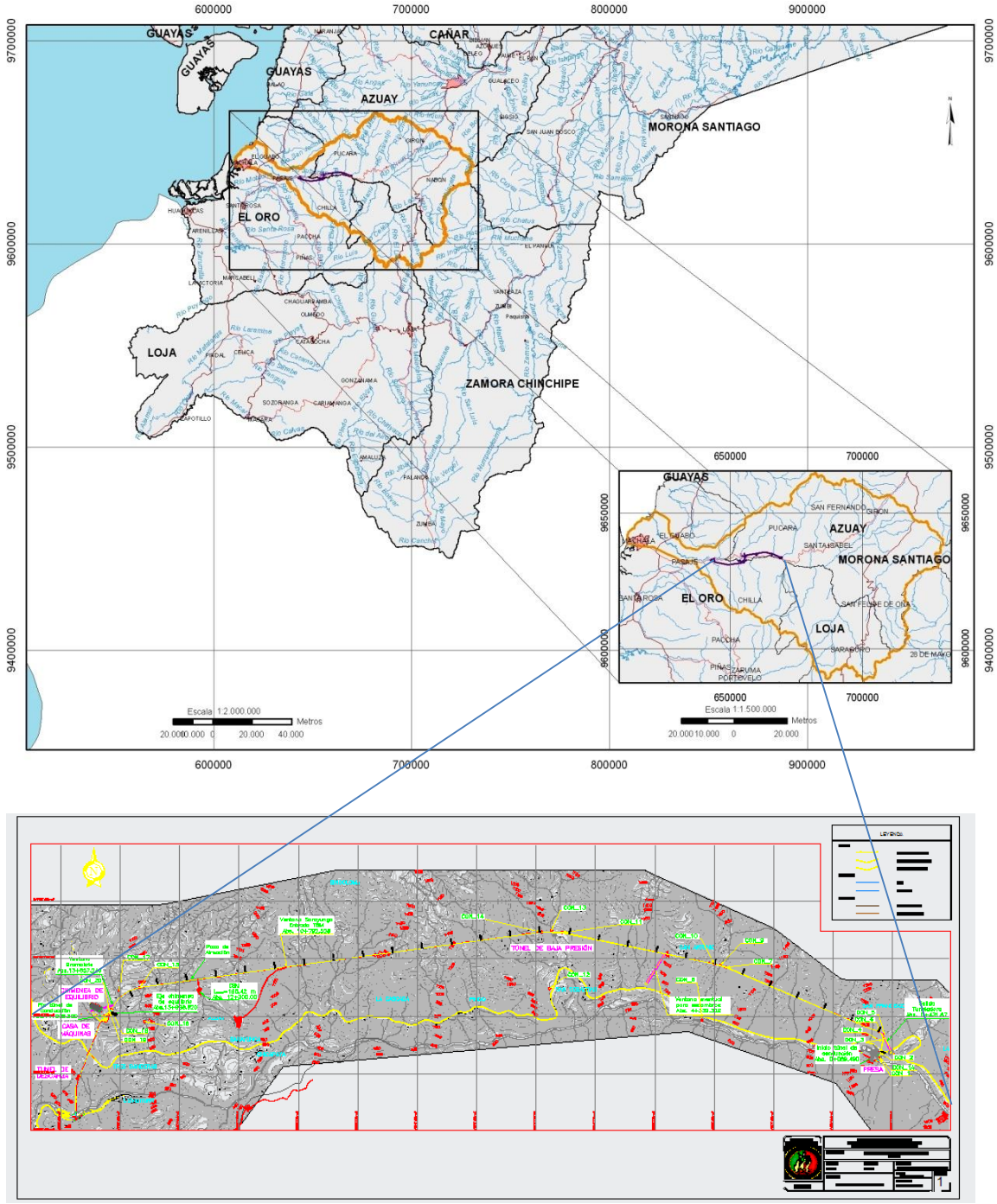
El proyecto hidroeléctrico Minas – San Francisco se enmarca entre las siguientes coordenadas.

Tabla 5. *Coordenadas de ubicación del proyecto*

Proyecto Hidroeléctrico	Coordenadas	Coordenadas
	E	N
Minas-San Francisco	**Entre** 678 000,00	9 629 500,00
	678.000,00	9 639 000,00
	Y 655 258,05	9 632 724,30
	655 258,05	9 639 000,00

Fuente. Elaboración Propia teniendo como base el Astec Geodata**.** (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño Definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

Figura 1. *Ubicación del proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco*



FUENTE: Elaboración Propia

6.1.4. Topografía

La compañía Astec-Geodata (AGA) contrató los servicios de Aeromapa Cía. Ltda. para restituir las áreas de los proyectos hidroeléctricos Minas-San Francisco y La Unión, a escala 1:5 000, para efectuar la restitución **expeditiva** se desarrolló en base a la siguiente información existente:

a) Fotografía aérea disponible a escala 1:60 000 de los años 1986 y 1989. Se utilizan los puntos aerotriangulados que dispone el Instituto Geográfico Militar del Ecuador -IGM- para controlar las fotos, dicho control fue establecido para obtenerse la cartografía 1:50 000, y por tanto los errores que se pueden tener en cotas de las curvas de nivel están alrededor de +/-10 m. De acuerdo a la Tabla 6 se puede ver cuáles son las áreas restituidas a Esc. 1:5 000:

Tabla 6. *Áreas restituidas por Aeromapa a Esc. 1:5 000*

Código	Ubicación del Área	Área restituida (Ha)	Fecha Restitución
1	Proyecto Minas-San Francisco y La Unión	9.081,55	Noviembre-2009; solicitado AGA
2	Promas	1.090,08	Año 2007, solicitado por PROMAS
3	Cola de Embalse Minas-San Francisco	308,60	Marzo-2010, solicitado AGA
4	Parte superior del Río San Francisco	26,74	Marzo-2010, solicitado AGA
5	Completar área del Río Jubones en la zona del río Vivar	745,40	Marzo-2010, solicitado Enerjubones
6	Sarayunga, zona del deslizamiento	1.929,36	Abril-2010, solicitado AGA

Fuente. Elaboración Propia teniendo como base Astec Geodata**.** (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño Definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

El área total restituida es de 13.181,73 hectáreas, las que abarcan la mayor información posible para el estudio de factibilidad de los proyectos hidroeléctricos Minas-San Francisco y La Unión.

En el sector del río Vivar, se ubica el portal de acceso al túnel de ingreso a la Casa de Máquinas. Para este efecto se realizó los trabajos de levantamiento topográfico a Esc. 1:1000 de acuerdo a las siguiente área: 20,45 ha y restitución aerofotogramétrica a Esc. 1:5000. Véase Anexo 2.

6.1.5. Geología regional

La Región Andina o Sierra Ecuatoriana está dividida en dos zonas paralelas, geológicamente distintas con rumbo NE. Rocas metamórficas subyacen a la Cordillera Oriental, mientras que rocas volcánicas y sedimentarias subsidiarias del Cretácico al Paleoceno comprenden la masa de la Cordillera Occidental.

Según Tenesaca (2011) los volcánicos del Neógeno cubren parte de las dos cordilleras y rellenan los valles interandinos, que actúan como línea divisoria tanto al norte como al centro del Ecuador. Al sur la distinción morfológica es obviamente menor, pero geológicamente evidente; sin embargo, la parte suroeste del país es muy diferente, teniendo un basamento metamórfico Pre-Mesozoico que está sobre-puesto por volcánicos y sedimentarios del Cretácico.

Dentro del proyecto Hidroeléctrico Minas-San Francisco podemos distinguir:

1. Formación Uchucay (Mu), está confinada al área de Santa Isabel, normalmente sobreyace al Grupo Ayancay con una fuerte inconformidad angular (DGGM, 1973). Comprende conglomerados amarillos y capas de boulders, con una asociación muy mezclada de clastos localmente derivados. Su máximo espesor es probablemente 100 m. Se asumía que era del Pleistoceno, pero una nueva edad de trazas de fisión da 9.4 ± 0.8 Ma (Mioceno tardío) (Hungerbühler, 1997).

2. Grupo Ayancay (Ma), forma parte de la secuencia sedimentaria de la cuenca de Cuenca

y está confinado por el sistema de fallas Girón y el Cinturón Gañarín. Es de origen fluvial y está compuesto predominantemente de areniscas, lutitas verdes y rojas y limolitas, con escasas tobas, capas de carbón y conglomerados (Pratt, et all., 1997).

Descansa inconformemente sobre el Grupo Saraguro y está sobreyacido por las Formaciones Turi (al Norte) y Uchucay (al Sur). Su edad es Mioceno Medio (18-10 Ma), (Hungerbühler, 1997). Afloran rocas de este grupo en el sector de Yuluc y Minas al sur del río Jubones.

3. La Formación Santa Isabel (MS), dataciones realizadas para las rocas de esta formación le determinan una edad 18.4 +0.8 ma., por lo tanto correspondería al Mioceno Inferior.

Consta de una serie de brechas andesíticas y aglomerados volcánicos en medio de una matriz tobácea. Hacia el flanco norte de este filo de dirección E-W, que sirve de divisoria entre las subcuencas del Río Jubones y Quebrada Chillayacu, se observan mantos de lavas andesíticas que yacen discordantes sobre los bancos de riolitas que se localizan en niveles más bajos. Además se menciona la presencia de Volcanosedimentos indiferenciados (conglomerados y lutitas) con un estrato de 10 a 12m de potencia que se intercalan dentro la formación Santa Isabel en el sector de Unión de Tamacado.

4. El Grupo Saraguro (Baldock, 1982) es redefinido por Dunkley & Gaibor, 1997, como una secuencia de rocas volcánicas subaéreas, calco-alcalinas, intermedias a ácidas, de edad Eoceno medio tardío a Mioceno temprano. De acuerdo a dataciones realizadas se establece que las rocas más antiguas del grupo Saraguro tienen una edad de 38 Ma.

El grupo descansa inconformemente sobre, o está fallado contra, la Unidad Pallatanga y las rocas metamórficas. Predominan composiciones andesíticas a dacíticas, pero también son comunes rocas riolíticas.

Comprende una secuencia volcánica y volcanosedimentaria, constituida en su mayor parte por tobas andesíticas de cristales (ignimbritas), tobas líticas, tobas y brechas riolíticas y Volcanosedimentos interestratificados de composición también riolítica, en el que destacan otras unidades litológicas de similar edad, que están intercaladas en diferentes

niveles, cuyas rocas han sido identificadas en el presente estudio.

5. Unidad Yunguilla (Ky), Secuencia de abanico turbíditico marino de al menos 2000 m de espesor que yace en contacto discordante sobre la Unidad Pallatanga. Ocupa consistentemente una posición estructural en el margen oriental de la Cordillera Occidental, inmediatamente adyacente a la zona de Falla Calacalí - Pallatanga.

Litologías típicas son limolitas masivas gris obscuras y areniscas cuarzo feldespáticas fino granulares con limolitas y lutitas físiles. Cuarzo arenitas de grano medio a grueso están presentes pero no son comunes; también puede encontrarse abundante cuarzo estriado que indica un aporte metamórfico. Fauna foraminífera indica una edad Maastrichtiense. (Thalmann, 1946). Estas rocas se presentan en el río Quera y en la quebrada Muyuyacu cerca de su confluencia al río Jubones.

6. Unidad Pallatanga (Kpa), es una secuencia de rocas máficas y ultramáficas de afinidad oceánica expuestas en una serie de lajas tectónicas a lo largo del borde oriental de la Cordillera Occidental; comprenden basaltos, micro gabros, tobas, areniscas volcánicas, peridotitas, websteritas y escasas lavas en almohadillas, todas fuertemente tectonizadas, en contacto fallado con las turbiditas de Yunguilla.

Específicamente en la zona de interés, estas rocas pueden ser encontradas a lo largo del sistema de fallas Jubones. Geoquímicamente, la unidad está formada por basaltos oceánicos toleíticos de afinidad MORB. Por correlación y por evidencias fósiles puede ser catalogada como de edad Jurásico a Cretácico Inferior (Wood, 1997). La Unidad Pallatanga se interpreta como alóctona; muy probablemente es una secuencia ofiolítica incompleta y desmembrada, que representa fragmentos de piso oceánico acrecionados al continente sudamericano en el Cretácico superior.

Se han encontrado afloramientos entre Quera y Casacay en la margen derecha del Río Jubones.

7. Rocas Metamórficas, estas rocas también denominadas Grupo Tahuín, deben su nombre a su afloramiento típico en la Cordillera de Tahuín, en las elevaciones más

altas de la parte occidental de la Provincia de El Oro, al sur del Río Naranjo/Arenillas.

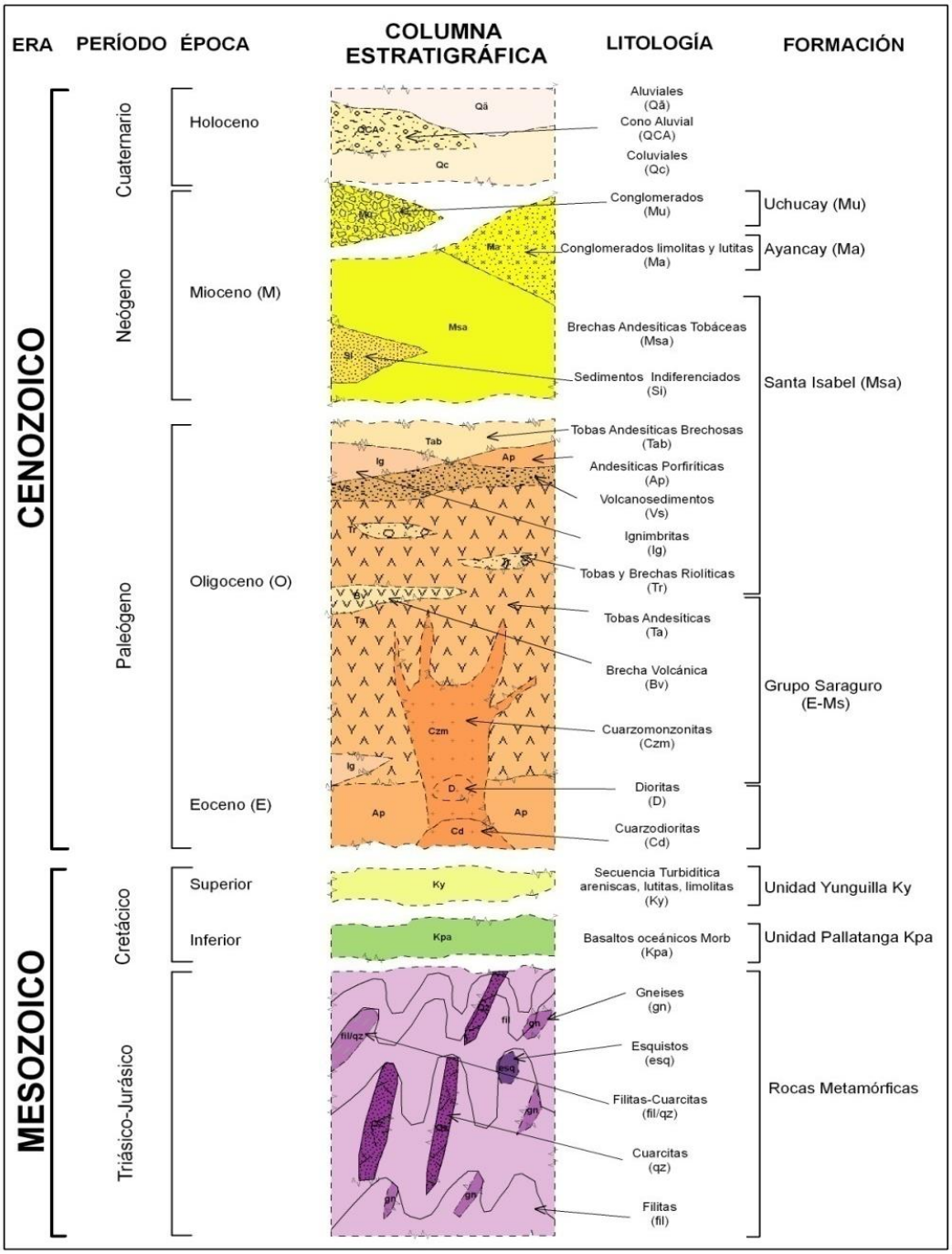
Está formada esencialmente por rocas pelíticas y cuarzo feldespáticas que de Sur a Norte van desde no metamórficas hasta la facies de granulita en una serie de facies de baja presión. Forma un cinturón con dirección E-W, de hasta 25 Km de ancho, que puede trazarse, en forma continua, por casi 80 Km, desde la frontera con el Perú en el occidente hacia el este dentro del área de El Cisne (Aspden et al., 1995). Comprende las unidades El Tigre, La Victoria, La Bocana y Limón Playa y está intruido por los plutones La Florida, El Prado y Marcabelí. Su edad se considera Paleozoica (Feininger, 1978) y la del metamorfismo de más alto grado varía entre 207±6 y 220 ± 6 Ma (Aspden et al., 1995). Dentro del área del proyecto se destaca las rocas metamórficas de la parte sur del Río Jubones, entre los poblados Casacay-Pitahiña- Limón-Río Cune, consta de un paquete de gneis, filitas y cuarcitas, pertenecientes a este grupo.

8. Depósitos Cuaternarios (Q), comprenden depósitos recientes conformados por: depósitos de derrumbes antiguos, coluviales y aluviales.

9. Depósitos de Derrumbe, constituyen derrumbes antiguos cuyos materiales se han depositado en sectores bajos donde la morfología del terreno cambia de pendientes fuertes moderada o plana. Constan de bloques de composición toba andesítica, riolítica de dimensiones variables, en mayor cantidad 1 a 5m de diámetro abarcados en matriz grava-arena-limo y se destacan eventualmente bloques de mayor dimensión 5 a 20m., en matriz limo arcillosa. La matriz se encuentra en su mayor parte consolidada y compacta. (Ver Anexo 3).

Se destacan sectores de derrumbe importantes como los ubicados hacia cotas altas sobre la vía principal en los sectores de Santa Martha y Sarayunga, donde se evidencia los sectores de escarpe en forma de anfiteatro. Véase Figura 2.

Figura 2. *Columna estratigráfica de la zona del proyecto Minas San Francisco*



FUENTE: Astec Geodata. (2010). *Estudio de factibilidad proyecto Minas alternativa San Francisco. Informe de geología evento 2, parte II escala 1:500*. Quito-Ecuador.

6.1.6. Geología local

El túnel de acceso a Casa de Máquinas del proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco se encuentra ubicado en el barrio Vivar en donde se ha identificado el siguiente manto litológico.

1. Andesita porfirítica. (Ap). En el sector del río Vivar, cerca de la confluencia con el río Jubones, se observan mantos masivos de lava andesítica de color gris ligeramente alterada, considerados como los niveles más bajos donde afloran rocas de esta clase. Estas lavas andesíticas presentan textura porfirítica donde se evidencia más claramente el flujo, destacándose la presencia de fenocristales de plagioclasa anhedrales y subhedrales, matriz color gris y textura masiva.

2. Ignimbritas. (Ig). Se localizan en ambos márgenes del Río Jubones comprende tobas andesíticas de cristales, con textura porfirítica inalterada, en donde se destacan minerales principales como fenocristales de plagioclasa tipo intermedia, hornblenda y piroxenos, además de calcita, magnetita, clorita, epidota y matriz con presencia de vidrio (30 a 40%) que le da el carácter de ignimbrita.

3. Toba andesítica (Ta). Comprende una secuencia de similar composición que las ignimbritas, pero con un porcentaje menor de vidrio ligeramente alterado.

En el sector de Vivar, sobre la vía principal, aflora la toba con matriz de cristales y líticos compuestos por toba café marrón, toba fina y líticos silicificados.

La presencia de líticos se hace más notoria hacia niveles superiores, donde estos son incluso de mayor tamaño (5 a 10cm).

4. Brecha volcánica andesítica (Bv). Cuya matriz tiene composición similar a la de la toba andesítica, con clastos subangulares y subredondeados, cuya disposición es un tanto caótica.

5. Cinerita (Ci). Son depósitos de ceniza volcánica con tamaño de grano inferior a 2mm, de color violeta a purpura, consolidados y litificados, que se encuentran estratificados, en niveles centimétricos y métricos.

6. Riolitas (Tr). Hacia la parte alta en la margen izquierda del Río Jubones aproximadamente sobre la cota 1 400 m s.n.m. se observan grandes afloramientos rocosos que por lo general forman pendientes abruptas con taludes subverticales de más de 100m de altura. Se encuentran conformados por riolitas de textura afanítica, masiva, color crema claro donde se observa ligera estratificación y esporádicos líticos 1 a 3cm de similar composición.

Se considera como la parte superior del paquete de tobas riolíticas que se encuentran estratificadas en cotas más bajas formando los Volcanosedimentos al sur del Río Jubones.

7. Coluviales (QC). Constituyen depósitos de diferente magnitud ubicados en la parte baja de zonas de ladera, donde la topografía se torna más suave. Consta de coluvios consolidados a poco consolidados con matriz generalmente fina de tipo limo arenoso con clastos variados entre 0.2 a 0.5m., al parecer en ciertos sectores se mezclan con depósitos de derrumbe que por lo general han aportado con bloques grandes 1 a 5m de diámetro.

8. Aluviales (QA). En la zona del proyecto, las terrazas aluviales en ambas márgenes del río Jubones son poco extensas, dada la morfología del terreno con laderas con pendientes fuertes, lo que no permite la formación de terrazas de mayor dimensión. Los bloques son de tamaño métrico, hasta gravas, siendo bajas en contenido de arena. Estos aluviales están mezclados con coluviales y depósitos de derrumbe.

Contiene bloques entre 0.5 a 4m de diámetro y menores en una matriz de grava, arena, limo, cuyo contenido es inferior a 20%. Ver Anexo 3.

6.1.7. Geología estructural

La zona situada al sur del río Jubones, se encuentra en un estado compresivo y en algunos segmentos de la falla Girón (Pratt, et al. 1997), produciendo cabalgamientos de las unidades Saraguro (Eoceno) y Sacapalca sobre rocas del grupo Ayancay (18-10Ma) y Uchucay (9.4Ma). Debido a esta compresión de los bloques al sur del río Jubones, una conjugación de esfuerzos ha originado un predominio de la orientación de las discontinuidades menores en sentido E-W, es decir paralelas al trazado original del esquema Minas-San Francisco. Por otro lado, también se debe colegir que mientras más se aleja de la zona de mayor esfuerzo (Huancabamba), en dirección norte, se tendrá una disminución de esta tendencia compresiva. El principal rasgo estructural lo constituye la falla regional Jubones que tiene un trazo E-W y por su dinámica podría ser la que genera otras estructuras menores (fracturas y fallas) que afectan principalmente a las rocas metamórficas en la parte sur del río Jubones y afluentes menores del río Casacay (Loma Pitaloma).

La Falla Jubones que corre en dirección Este – Oeste es considerada "inactiva". Dicha falla es anastomosada, con presencia de una amplia zona milonitizada con movimiento inverso, además, constituye una zona de sutura – cizallamiento poniendo en contacto a dos terrenos de distinto origen, al Sur las rocas continentales metamórficas (Grupo Tahuín), y al Norte el terreno alóctono oceánico acrecionado a la placa sudamericana desde el cretácico inferior en comportamiento inverso (BGS-CODIGEM, 1997). El sistema de fallas Jubones al ser considerado inactivo, no es fuente de generación de sismos que puedan afectar al proyecto.

Otras estructuras menores constituyen las fallas y lineamientos con dirección N-S y NNW-SSW que desplazan a las fallas más antiguas, que funcionan en un régimen compresivo y que por su geometría pueden ser transcurrentes - inversas.

a) Sector Río Vivar. Hacia el Oeste del puente del río Vivar, sobre la carretera principal y sobre la coordenada 653.904E, 9´634.870N, 456m se presenta una zona de cizallamiento, donde convergen tres fallas pequeñas separadas entre 4 a 5m, con las

siguientes direcciones: 345/75, 152/85 y 270/68 (strike/dip), con ancho entre 15 a 50 cm. Consiste de material arcilloso, arenoso de consistencia suave y resistencia baja. En conjunto constituye un sector inestable donde rocas intermedias entre estas fallas se encuentran bastante meteorizadas y consiste de tobas andesíticas poco consistentes de tipo arenoso. Esta zona abarca un ancho de 20m y parece constituir el paso de una estructura que corre paralela al río Vivar en dirección SSE-NNW.

6.1.8. Clima e hidrología

Se presenta a continuación las características físicas de la cuenca del río Jubones hasta los sitios de interés del aprovechamiento y la ubicación de las estaciones hidrométricas empleadas:

Tabla 7. *Estaciones hidrométricas ubicadas en diferentes sectores del proyecto hidroeléctrico*

Código	Estación	Tipo	X UTM (WGS 84)	Y UTM (WGS 84)	Altitud (m s.n.m.)	Institución
H528	Río Jubones D.J. Minas	LM	679 714	9 629 950	926	INECEL
H529	Río Jubones D.J. San Francisco	LG	665 949	9 633 868	709	INAMHI
H530	Río Jubones en Uzhcurrumi	LM	654 552	9 632 364	304	INAMHI
H534	Río San Francisco A.J. Jubones	LG	669 161	9 633 356	773	INAMHI

FUENTE: Astec Geodata. (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

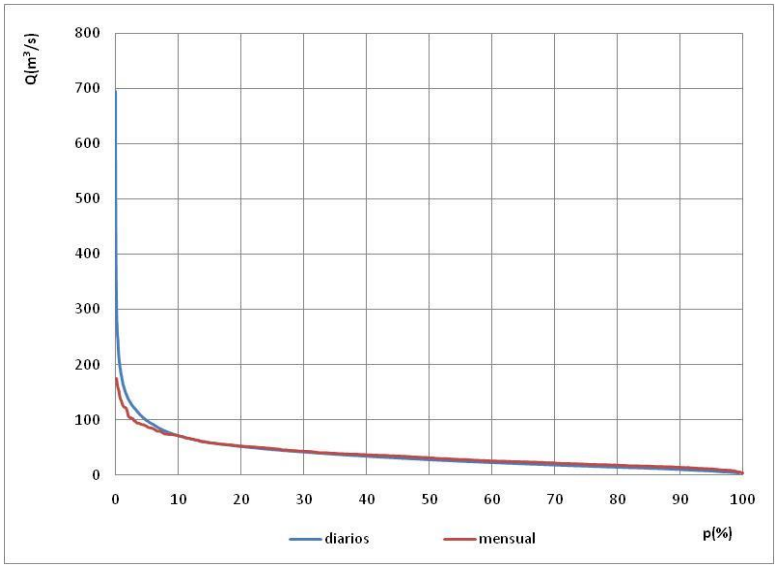
En la siguiente tabla se presentan los caudales diarios y mensuales con probabilidad de excedencia del río Jubones D.J. Minas, y en la figura 3, la representación gráfica.

Tabla 8. *Caudales diarios y mensuales del río Jubones D.J. Minas (1963-2006)*

Probabilidad (%)	Astec - Geodata Caudal diario (m^3/s)	Astec - Geodata Caudal mensual (m^3/s)
0	694,43	174,39
5	99,09	88,55
10	72,05	71,43
15	59,31	58,93
20	52,20	52,90
25	46,62	48,52
30	42,32	43,69
35	38,13	39,88
40	34,64	37,28
45	31,40	34,91
50	28,33	31,65
55	25,69	28,73
60	23,25	26,03
65	20,96	24,48
70	18,74	22,47
75	16,69	20,23
80	14,84	18,53
85	12,84	16,74
90	10,66	14,56
95	7,88	11,71
100	3,00	4,38
Q (medio)	**37,82**	**37,90**

FUENTE: Astec Geodata. (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión. Quito-Ecuador.*

Figura N° 3. *Caudales diarios y mensuales del río Jubones D.J. Minas (1963 – 2006).*



FUENTE: Elaboración Propia.

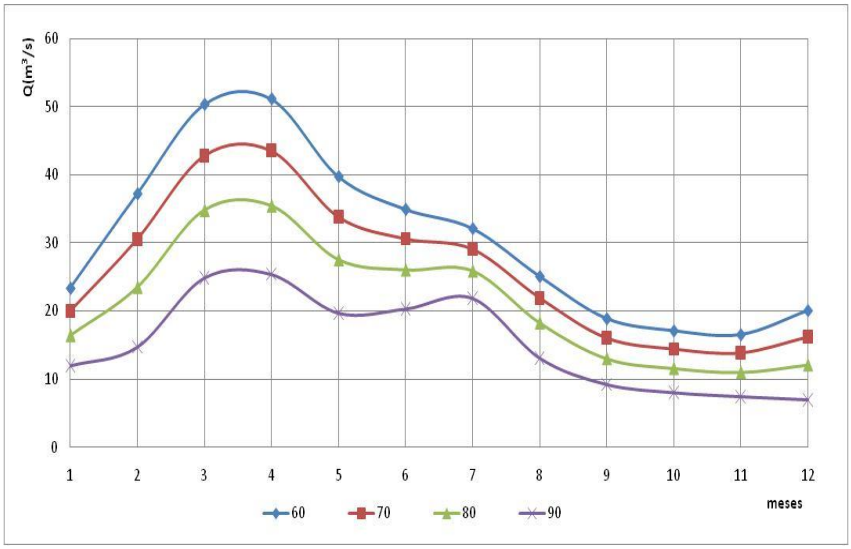
En la siguiente tabla se incluye la variabilidad estacional para la estación río Jubones D.J. Minas y en la Figura 4, las curvas correspondientes.

Tabla 9. *Caudales mensuales (m³/s) con probabilidad de excedencia río Jubones D.J. Minas (1963-2006).*

Probabilidad (%)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
10	50,09	90,10	110,1	111,6	86,79	69,27	56,15	42,98	41,58	38,4	37,93	50,87
20	40,82	71,76	89,42	90,66	70,48	57,37	47,82	37,85	33,71	31	30,51	40,19
40	30,58	51,52	66,53	67,52	52,47	44,23	38,62	31,00	25,02	22,8	22,32	28,40
50	26,81	44,06	58,09	58,99	45,84	39,39	35,23	28,05	21,82	19,8	19,30	24,06
70	19,99	30,56	42,82	43,55	33,83	30,63	29,10	21,94	16,03	14,4	13,84	16,20
90	11,98	14,72	24,89	25,43	19,74	20,34	21,90	13,12	9,23	8,03	7,43	6,97
Media	**29,03**	**48,44**	**63,04**	**64,00**	**49,73**	**42,23**	**37,22**	**28,05**	**23,70**	**21,6**	**21,08**	**26,61**

FUENTE: Astec Geodata. (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

Figura N° 4. Variación estacional - río Jubones D.J. Minas (1963 – 2006)



FUENTE: Astec Geodata. (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

En la siguiente tabla se muestran los caudales mínimos mensuales y sus respectivos caudales específicos para las estaciones de interés del río Jubones, tomados de la curva de duración general, con probabilidades de excedencia del 80 y 90 % de excedencia.

Tabla 10. *Caudales mínimos en las estaciones hidrométricas*

Estación hidrométrica	Área (km^2)	Probabilidad de excedencia 80 %		Probabilidad de excedencia 90 %	
		Caudal (m^3/s)	Caudal específico ($l/s/km^2$)	Caudal (m^3/s)	Caudal específico ($l/s/km^2$)
Río Jubones D.J. Minas	2 764,3	14,8	5,37	10,7	3,86

FUENTE: Astec Geodata. (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

La caracterización del clima se sustenta en los registros históricos de 20 estaciones climáticas distribuidas en la cuenca de drenaje del río Jubones. Los parámetros climáticos principales dados para los sitios del proyecto se muestran a continuación:

Tabla 11. *Valores climáticos característicos del proyecto Minas San Francisco*

Variable Climática	Presa San Francisco	Descarga San Francisco – Uzhcurrumi
Precipitación anual media, (mm)	820	690
Temperatura media, (°C)	22,7	23,9
Temperatura máxima absoluta, (°C)	35,7	36,9
Temperatura mínima absoluta, (°C)	9,3	13,1
Humedad relativa, (%)	76	84
Nubosidad, (octas)	5	6
Evaporación, (mm)	226,4	68,4

FUENTE: Astec Geodata. (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

6.1.9. Población

En escala cantonal el proyecto hidroeléctrico se encuentra vinculado directamente con los cantones de Santa Isabel y Pucará, en la provincia del Azuay, y el cantón Saraguro en la Provincia de Loja. Véase Tabla 12.

Tabla 12. *Población por sexo de los cantones: Santa Isabel, Pucará y Saraguro.*

Cantón	Hombre	Mujer	Total
Santa Isabel	8680	9335	18015
Pucará	10571	9811	20382
Saraguro	13012	15017	28029

Fuente. Elaboración propia en base a los *Análisis de Alternativas desde el punto de vista ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco*. 2010.

Las comunidades insertas y beneficiadas directamente de los distintos componentes del proyecto hidroeléctrico son las siguientes:

Tabla 13. *Comunidades beneficiadas del proyecto Minas San Francisco.2011*

Provincia	Cantón	Parroquia	Barrio	Población estimada
Azuay	Pucará	Pucará	Vivar	25
Azuay	Santa Isabel	Jubones	Jubones	142
Azuay	Santa Isabel	Santa Isabel	Minas de Huascachaca	25
Azuay	Santa Isabel	Santa Isabel	Pilches	17

Fuente. Astec Geodata, (2008). *Propuesta técnica, sobre no 1, tomo 2. Completación del estudio de factibilidad y diseño definitivo proyecto hidroeléctrico Minas y estudio de factibilidad y diseño definitivo proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

6.2. Estudio geológico – geotécnico

6.2.1. Descripción geológica

Se obtuvo un total de 30 muestras procedentes del hastial y frontón del túnel de acceso a Casa de Máquinas con el fin de identificar la secuencia litológica existente en nuestro frente de estudio. Dichas muestras se encuentran en las siguientes abscisas (Ver Anexo 4).

Tabla 14. *Abscisa de cada una de las muestras recogidas en el túnel de acceso*

Túnel de Acceso			
Muestra Nº	**Abscisa Aproximada**	**Muestra Nº**	**Abscisa Aproximada**
Muestra 1 (M1)	1+510 metros	Muestra 16 (M16)	0+750 metros
Muestra 2 (M2)	1+460 metros	Muestra 17 (M17)	0+701 metros
Muestra 3 (M3)	1+400 metros	Muestra 18 (M18)	0+650 metros
Muestra 4 (M4)	1+351 metros	Muestra 19 (M19)	0+600 metros
Muestra 5 (M5)	1+300 metros	Muestra 20 (M20)	0+551 metros
Muestra 6 (M6)	1+251 metros	Muestra 21 (M21)	0+500 metros
Muestra 7 (M7)	1+200 metros	Muestra 22 (M22)	0+450 metros
Muestra 8 (M8)	1+151 metros	Muestra 23 (M23)	0+402 metros
Muestra 9 (M9)	1+100 metros	Muestra 24 (M24)	0+351 metros
Muestra 10 (M10)	1+050 metros	Muestra 25 (M25)	0+300 metros
Muestra 11M (M11)	1+001 metros	Muestra 26 (M26)	0+252 metros
Muestra 12 (M12)	0+950 metros	Muestra 27 (M27)	0+200 metros
Muestra 13 (M13)	0+898 metros	Muestra 28 (M28)	0+151 metros
Muestra 14 (M14)	0+849 metros	Muestra 29 (M29)	0+101 metros
Muestra 15 (M15)	0+800 metros	Muestra 30 (M30)	0+000 metros

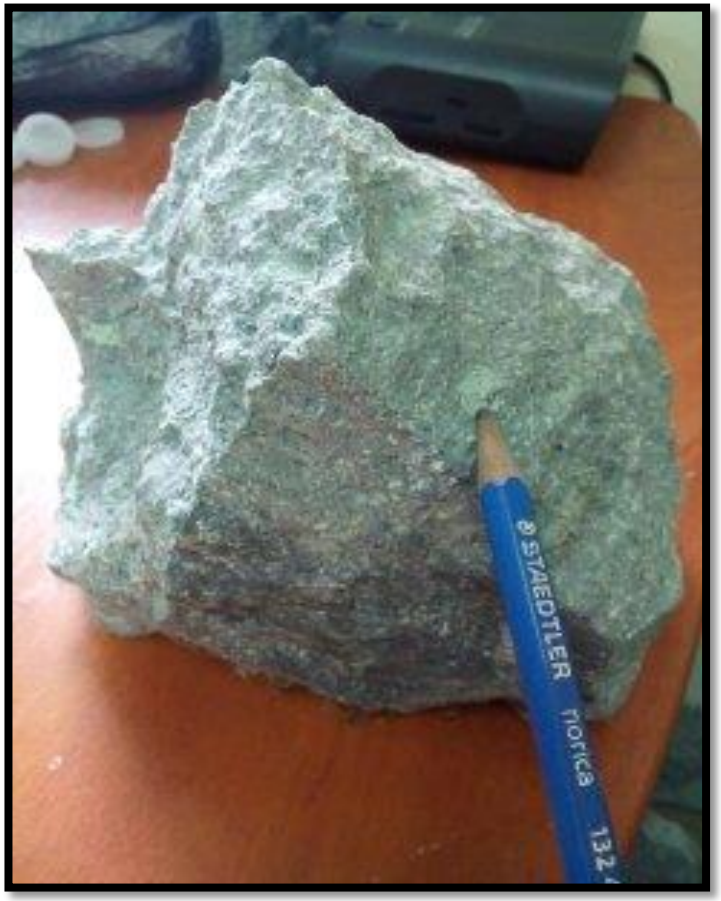
Se ha identificado la siguiente litología en el túnel de Acceso a Casa de Máquinas. Véase Anexo 5.

Ficha Nº 1. *Descripción de la Andesita de la formación Saraguro*

DENOMINACIÓN	Andesita
ORIGEN	Volcánica, extrusiva
TONALIDAD	Gris verdosa clara
TEXTURA Y ESTRUCTURA	Porfirítica, fenocristales finos a medios, matriz afanítica.
AMBIENTE	Se forma a partir de coladas de volcanes andesíticos. A menudo estos volcanes están asociados con zonas de subducción.
TAMAÑO DE GRANO	Fino (<1mm)
MINERALOGÍA	Mineral: compuesta por un 80 % aproximadamente, presenta Plagioclasa y Piroxenos. Matriz: compuesta por un 20 % aproximadamente, presenta Plagioclasas, Vidrio volcánico y Piroxenos.
DENSIDAD (gr/cm³)	2.5 – 2.8
POROSIDAD (%)	2 - 5
OTRAS PROPIEDADES	Roca poco abrasiva. Presenta una resistencia a la compresión entre 1500 a 2500 Kg/cm².

Fuente. Elaboración propia

Ficha Nº2. *Descripción de la Toba Andesítica con fragmentos líticos de la formación Saraguro*

DENOMINACIÓN	Toba andesítica con fragmentos líticos	
ORIGEN	Volcánica, extrusiva	
TONALIDAD	Gris verdosa clara	
TEXTURA Y ESTRUCTURA	Eutaxítica. Bandeamiento de la matriz vítrea	
AMBIENTE	Se forma a partir de coladas de volcanes andesíticos. A menudo estos volcanes están asociados con zonas de subducción.	
TAMAÑO DE GRANO	Fino (<1mm)	
MINERALOGÍA	Mineral: compuesta por un 70 % aproximadamente, presenta Plagioclasa y Piroxenos. Matriz: Presenta un 30% de líticos sumado a Piroxeno, Plagioclasa y Vidrio.	
DENSIDAD (gr/cm³)	2.5 – 2.8	
POROSIDAD (%)	2 - 5	
OTRAS PROPIEDADES	Roca poco abrasiva. Presenta una resistencia a la compresión entre 1500 a 2500 Kg/cm².	

Fuente. Elaboración propia

Ficha Nº3. *Descripción de la Toba Andesítica de la formación Saraguro*

DENOMINACIÓN	Toba andesítica
ORIGEN	Volcánica, extrusiva
TONALIDAD	Gris verdosa clara a gris parda clara
TEXTURA Y ESTRUCTURA	Eutaxítica. Bandeamiento de la matriz vítrea. Presenta fragmentos angulosos y subangulosos menores a 1cm.
AMBIENTE	Se forma a partir de coladas de volcanes andesíticos. A menudo estos volcanes están asociados con zonas de subducción.
TAMAÑO DE GRANO	Fino (<1mm)
MINERALOGÍA	Mineral: compuesta por un 40 %: presenta Plagioclasa, Magnetita, Biotita, Líticos Volcánicos, Hornblenda. Matriz: Vítrea, compuesta por un 60 %
DENSIDAD (gr/cm³)	2.5 – 2.8
POROSIDAD (%)	2 - 5
OTRAS PROPIEDADES	Roca poco abrasiva. Presenta una resistencia a la compresión entre 1500 a 2500 Kg/cm².

Fuente. Elaboración propia

Ficha Nº4. *Descripción del Aglomerado volcánico de la formación Saraguro*

DENOMINACIÓN	Aglomerado volcánico
ORIGEN	Volcánica, extrusiva
TONALIDAD	Verde intermedio con fragmentos de verde claro
TEXTURA Y ESTRUCTURA	Brechosa fragmentos angulares y subangulares de hasta 3 cm. suspendidos en matriz afanítica
AMBIENTE	Generalmente se acumula en los cráteres volcánicos o en sus flancos. El aglomerado consiste en fragmentos de lava y bloques de roca encajante que han sido englobados durante la actividad volcánica y que han sido expedidos con la lava a través de la chimenea volcánica
TAMAÑO DE GRANO	Grueso
MINERALOGÍA	Mineral: compuesta por un 60 % aproximadamente: presenta Plagioclasa, Cuarzo y Clorita. 40% de líticos aproximadamente, estos se encuentran medianamente alterados.
DENSIDAD (gr/cm³)	2.0 – 2.7
POROSIDAD (%)	2 - 4
OTRAS PROPIEDADES	Roca poco abrasiva. Presenta una resistencia a la compresión entre 2000 a 2500 Kg/cm².

Fuente. Elaboración propia

Ficha Nº5. *Descripción de la Toba riolítica de la formación Saraguro*

DENOMINACIÓN	Toba riolítica	
ORIGEN	Volcánica, extrusiva	
TONALIDAD	Café grisáceo oscuro	
TEXTURA Y ESTRUCTURA	Masiva, Afanítica	
AMBIENTE	Salen de los volcanes con explosiones violentas por el enfriamiento de una lava viscosa. Estas lavas pueden taponar las chimeneas y aumentar la presión de los gases.	
TAMAÑO DE GRANO	Fino (<1mm)	
MINERALOGÍA	Mineral: compuesta por un 50 %: presenta Cuarzo, Biotita y Feldespatos Matriz: Reemplazada por arcilla, carbonatos y cuarzo, compuesta por un 50 %	
DENSIDAD (gr/cm³)	2.4 – 2.6	
POROSIDAD (%)	4 - 6	
OTRAS PROPIEDADES	Roca abrasiva. Presenta una resistencia a la compresión entre 1400 a 2600 Kg/cm².	

Fuente. Elaboración propia

6.2.2. Agrietamiento

Para la interpretación de los sistemas geológicos de control estructural en acceso a Casa de Máquinas se utilizaron los datos estructurales IN SITU del túnel de acceso entre las abscisas 1+518,00 a 1+200,00 (Véase Anexo 6 Tabla 31), de esta forma se obtuvieron los sistemas estructurales dominantes reales que se muestran a continuación:

Tabla 15. *Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 1+518,00 a 1+200,00 del túnel de acceso*

Estructura	Símbolo	Orientación Estructural	
		Azimut Buz./Buz.	Rumbo/Buzamiento
Discontinuidad principal	J1	242 / 60	N 28 W / 60SW
Discontinuidad principal	J2	136 / 46	N 46 E / 46 SE

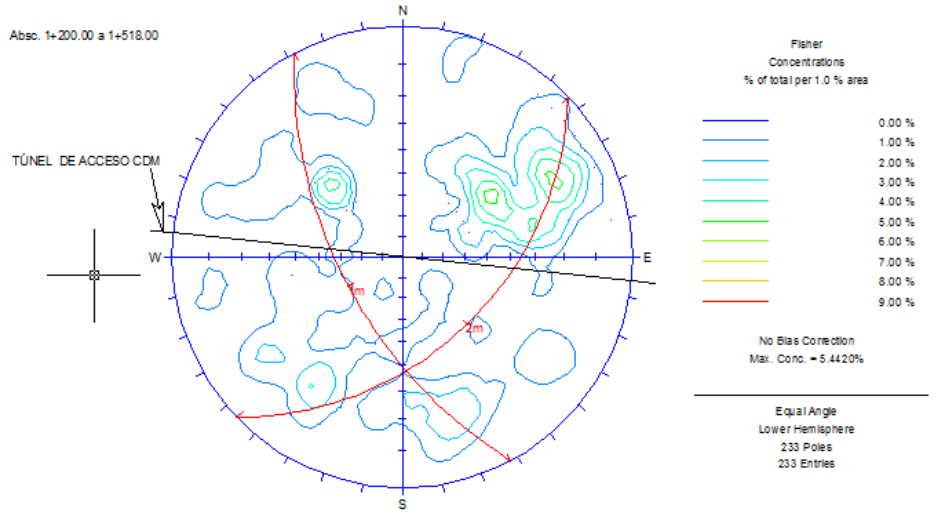
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 16. *Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 1+518,00 a 1+200,00 del túnel de acceso*

Características	
Discontinuidad	**Rasgo Distintivo**
Discontinuidad principal J1	Plana rugosa, relleno arcilloso blando menor 1mm. ligeramente alterado
Discontinuidad principal J2	Plana rugosa, relleno arcilloso blando menor 2mm. moderadamente alterado

Fuente. Elaboración propia.

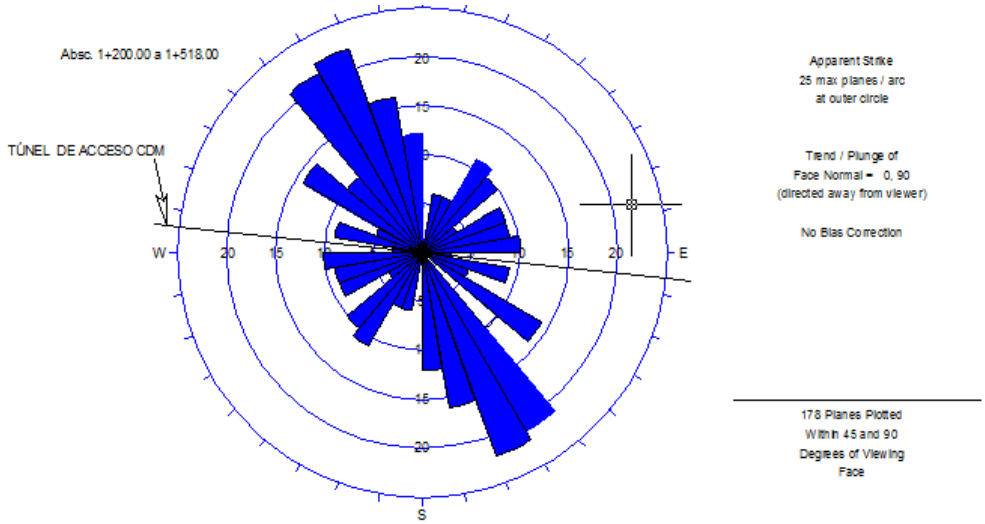
Figura 5. *Estereograma de los sistemas estructurales dominantes*



Discontinuidades preferenciales: J1 60/242, J2 46/136

Fuente. Elaboración propia.

Figura 6. *Diagrama de rosetas*



Fuente. Elaboración propia.

Para la interpretación de los sistemas geológicos de control estructural en acceso a Casa de Máquinas se utilizaron los datos estructurales IN SITU del túnel de acceso entre las abscisas 1+200,00 a 0+900,00 (Véase Anexo 6 Tabla 32), de esta forma se obtuvieron los sistemas estructurales dominantes reales que se muestran a continuación:

Tabla 17. *Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 1+200,00 a 0+900,00 del túnel de acceso*

Estructura	Símbolo	Orientación Estructural	
		Azimut Buz./Buz.	Rumbo/Buzamiento
Discontinuidad principal	J1	340 / 60	N 70 E / 60NW
Discontinuidad principal	J2	239 / 64	N 59 W / 64SW
Discontinuidad principal	J3	44 / 36	N 44 E / 36E

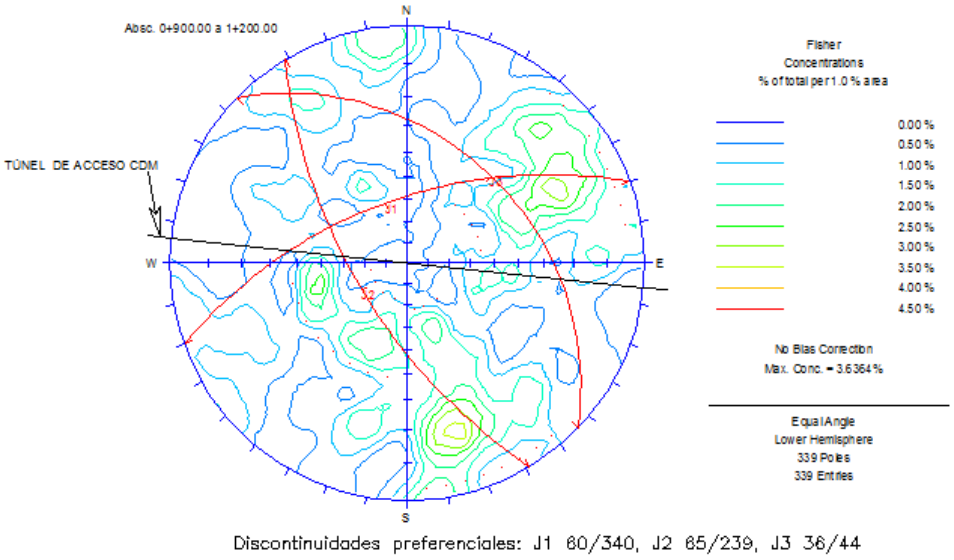
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 18. *Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 1+200,00 a 0+900,00 del túnel de acceso*

Características	
Discontinuidad	**Rasgo Distintivo**
Discontinuidad principal J1	Plana rugosa, sellada inalterada
Discontinuidad principal J2	Plana rugosa, sellada inalterada
Discontinuidad principal J3	Ondulada rugosa, sellada inalterada

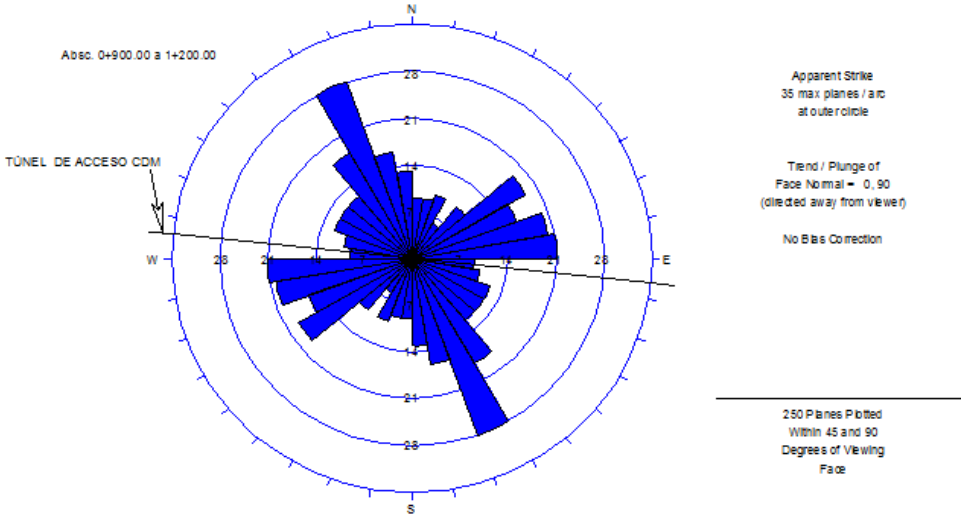
Fuente. Elaboración propia.

Figura 7. *Estereograma de los sistemas estructurales dominantes*



Fuente. Elaboración propia.

Figura 8. *Diagrama de rosetas*



Fuente. Elaboración propia

Para la interpretación de los sistemas geológicos de control estructural en acceso a Casa de Máquinas se utilizaron los datos estructurales IN SITU del túnel de acceso entre las abscisas 0+900,00 a 0+600,00 (Véase Anexo 6 Tabla 33), de esta forma se obtuvieron los sistemas estructurales dominantes reales que se muestran a continuación:

Tabla 19. *Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+900,00 a 0+600,00 del túnel de acceso*

Estructura	Símbolo	Orientación Estructural	
		Azimut Buz./Buz.	Rumbo/Buzamiento
Discontinuidad principal	J1	323 / 55	N 53 E / 55NW
Discontinuidad principal	J2	106 / 64	N 16 E / 64SW
Discontinuidad principal	J3	54 / 56	N 36 E / 56E
Discontinuidad secundaria	J4	236 / 54	N 34 W / 54SW

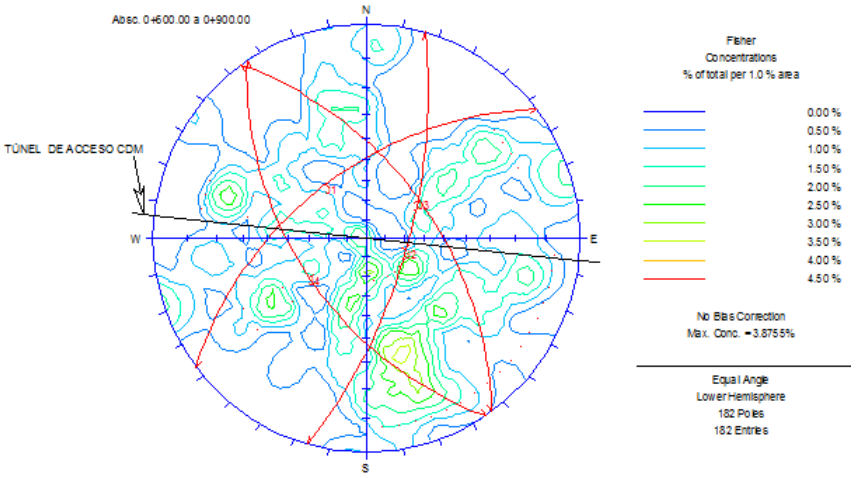
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 20. *Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+900,00 a 0+600,00 del túnel de acceso*

Características	
Discontinuidad	**Rasgo Distintivo**
Discontinuidad principal J1	Ondulada rugosa, sellada inalterada
Discontinuidad principal J2	Ondulada rugosa, sellada inalterada
Discontinuidad principal J3	Ondulada rugosa, sellada inalterada
Discontinuidad secundaria J4	Plana rugosa, rellenas de carbonatos duros 1-5 mm ligeramente alteradas (vetillas)

Fuente. Elaboración propia.

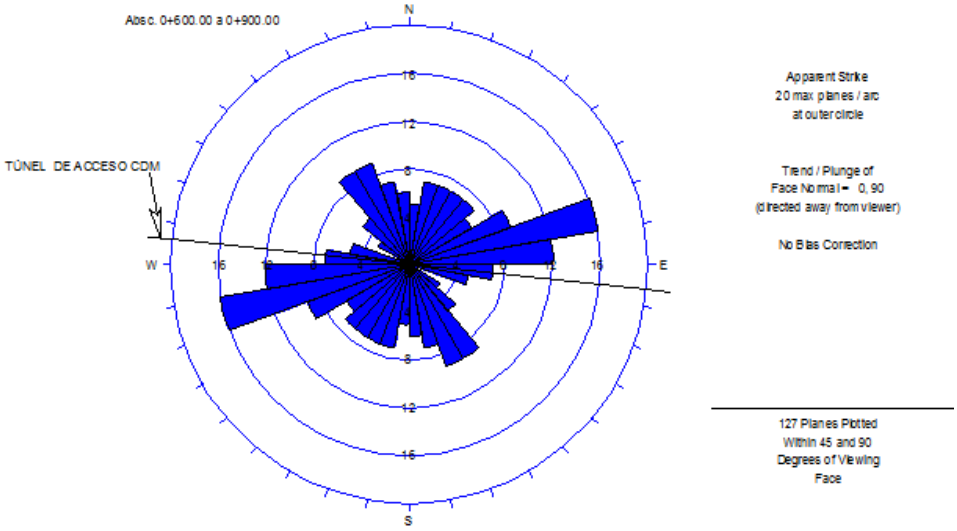
Figura 9. *Estereograma de los sistemas estructurales dominantes*



Discontinuidades preferenciales: J1 55/323, J2 68/106, J3 56/54, J4 54/236

Fuente. Elaboración propia

Figura 10. *Diagrama de rosetas*



Fuente. Elaboración propia

Para la interpretación de los sistemas geológicos de control estructural en acceso a Casa de Máquinas se utilizaron los datos estructurales IN SITU del túnel de acceso entre las abscisas 0+600,00 a 0+300,00 (Véase Anexo 6 Tabla 34), de esta forma se obtuvieron los sistemas estructurales dominantes reales que se muestran a continuación:

Tabla 21. *Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+600,00 a 0+300,00 del túnel de acceso*

Estructura	Símbolo	Orientación Estructural	
		Azimut Buz./Buz.	Rumbo/Buzamiento
Discontinuidad principal	J1	309 / 67	N 62 E / 67NW
Discontinuidad principal	J2	253 / 60	N 17 W / 60 SW

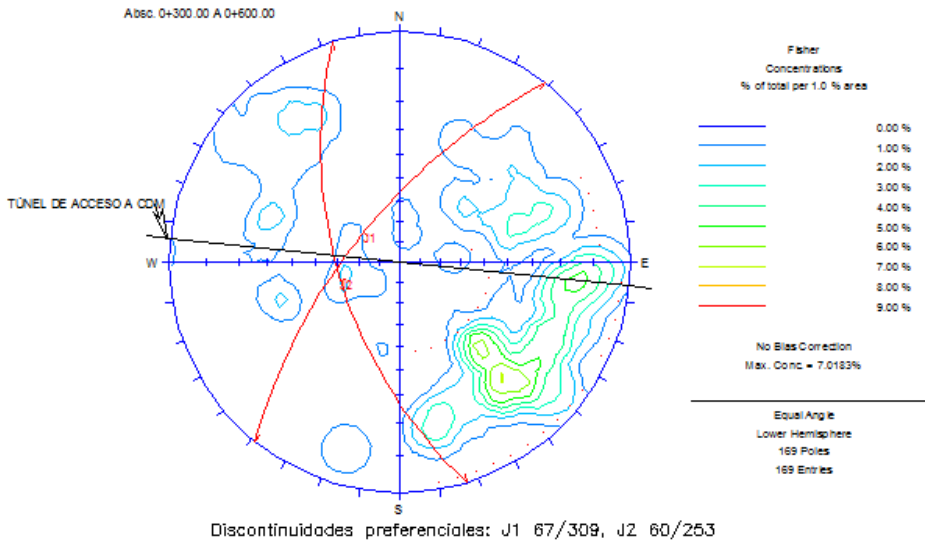
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 22. *Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+600,00 a 0+300,00 del túnel de acceso*

Características	
Discontinuidad	**Rasgo Distintivo**
Discontinuidad principal J1	Ondulada rugosa, sellada inalterada
Discontinuidad principal J2	Ondulada rugosa, sellada inalterada

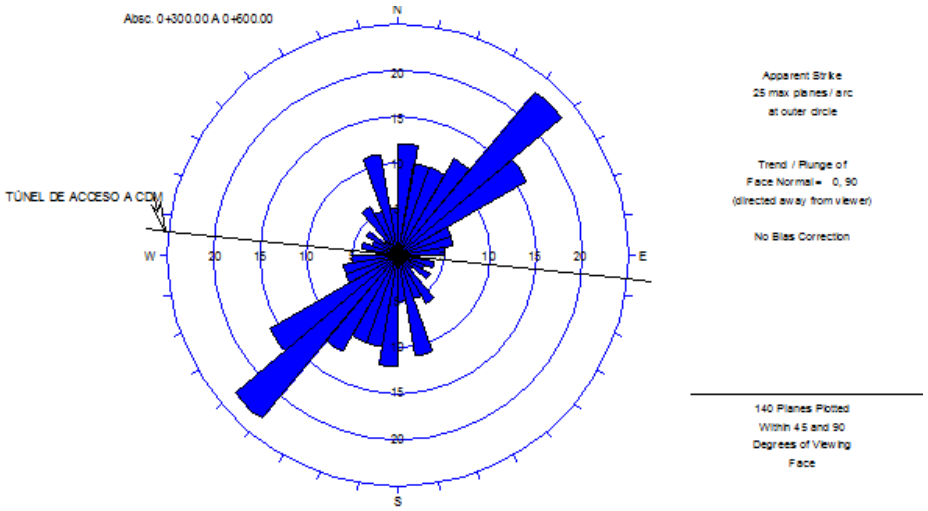
Fuente. Elaboración propia.

Figura 11. *Estereograma de los sistemas estructurales dominantes*



Fuente. Elaboración propia

Figura 12. *Diagrama de rosetas*



Fuente. Elaboración propia

Para la interpretación de los sistemas geológicos de control estructural en acceso a Casa de Máquinas se utilizaron los datos estructurales IN SITU del túnel de acceso entre las abscisas 0+300,00 a 0+000,00 (Véase Anexo 6 Tabla 35), de esta forma se obtuvieron los sistemas estructurales dominantes reales que se muestran a continuación:

Tabla 23. *Sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+300,00 a 0+000,00 del túnel de acceso*

Estructura	Símbolo	Orientación Estructural	
		Azimut Buz./Buz.	Rumbo/Buzamiento
Discontinuidad principal	J1	315 / 68	N 45 E / 68NW
Discontinuidad principal	J2	145 / 75	N 35 E / 75SE
Discontinuidad principal	J3	257 / 35	N 13 W / 35SW
Discontinuidad secundaria	J4	103 / 21	N 77 E / 21NE

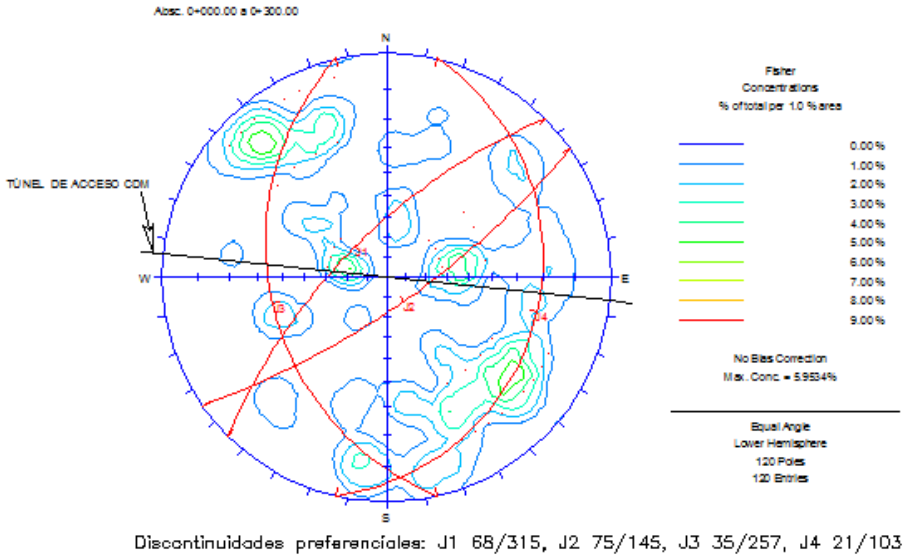
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 24. *Características de los sistemas estructurales dominantes entre las abscisas 0+300,00 a 0+000,00 del túnel de acceso*

Características	
Discontinuidad	**Rasgo Distintivo**
Discontinuidad principal J1	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Discontinuidad principal J2	Ondulada rugosa, sellada inalterada
Discontinuidad principal J3	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Discontinuidad secundaria J4	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada

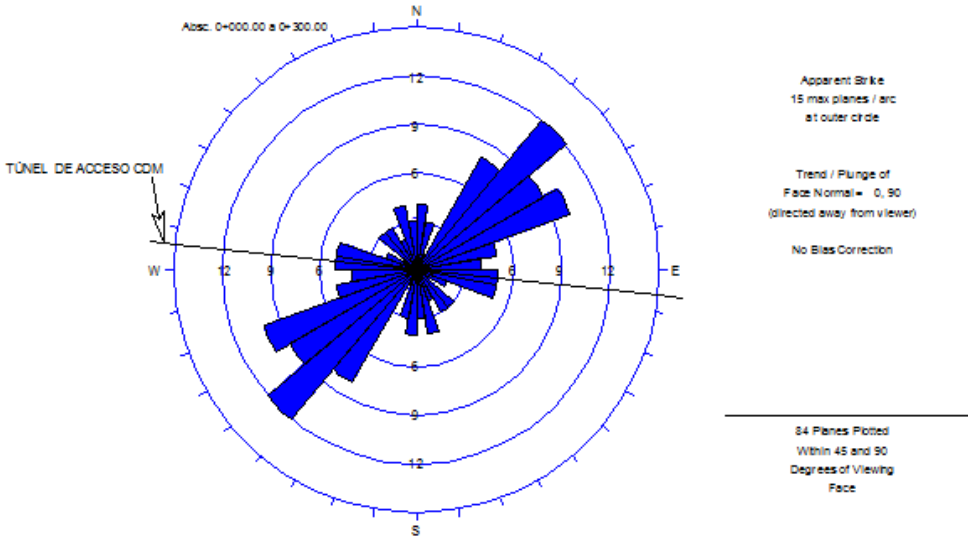
Fuente. Elaboración propia.

Figura 13. *Estereograma de los sistemas estructurales dominantes*



Fuente. Elaboración propia

Figura 14. *Diagrama de rosetas*



Fuente. Elaboración propia

Tabla 25. *Estructuras principales, secundarias y esporádicas del túnel de acceso a Casa de Máquinas.*

Estructuras definidas mediantes datos del túnel de acceso a Casa de Máquinas			
Estructura	**Símbolo**	**Orientación Estructural**	
		Azimut Buz./Buz.	**Rumbo/Buzamiento**
Discontinuidad principal	J1	315 / 68	N 45 E / 68NW
Discontinuidad principal	J2	253 / 60	N 17 W / 60SW
Discontinuidad secundaria	J3	145 / 64	N 35 E / 64SE
Discontinuidad secundaria	J4	54 / 56	N 54 E / 56E
Discontinuidad esporádica	J5	103 / 21	N 77 E / 21SE

Fuente. Elaboración propia

Tabla 26. *Características de las estructuras definidas*

Características	
Discontinuidad	**Rasgo Distintivo**
Discontinuidad principal J1	Ondulada rugosa, sellada de inalterada a ligeramente alterada
Discontinuidad principal J2	Ondulada rugosa, sellada inalterada
Discontinuidad principal J3	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Discontinuidad secundaria J4	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Discontinuidad secundaria J5	Plana rugosa, presenta rellanos arcillosos blandos 1-5 mm ligeramente alterados

Fuente. Elaboración propia

6.2.3. Interpretación de la hidrogeología

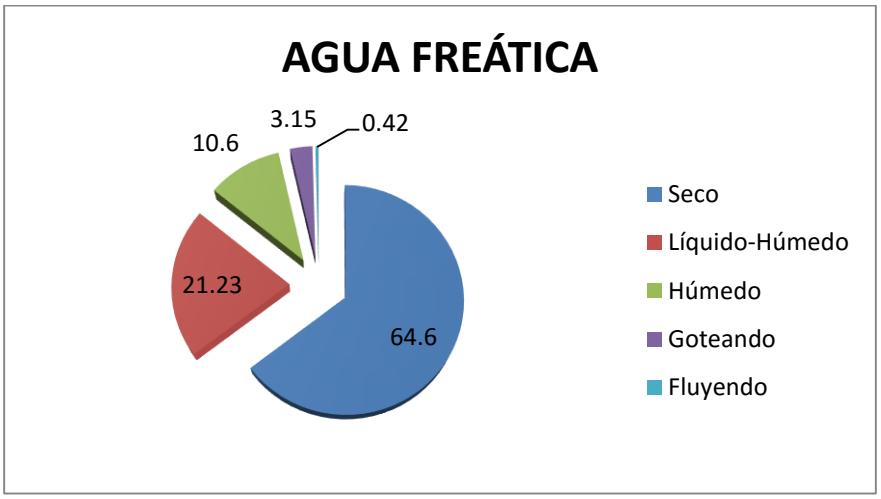
De acuerdo a los mapeos geológicos realizados en el túnel de acceso se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 27. *Agua freática en el túnel de acceso a Casa de Máquinas*

Agua Freática			
Estado *	**Intervalo caudal***	**Distancia acumulada del intervalo de caudal**	**Porcentaje**
	lit/min	**m**	**%**
Seco	0	980.59	64.60
Líquido-Húmedo	>10	322.03	21.23
Húmedo	10-25	161.03	10.60
Goteando	25-125	47.85	3.15
Fluyendo	< 125	6.50	0.42
	TOTAL	**1518**	**100**

Fuente. Elaboración propia

Figura 15. *Porcentajes del agua freática en el túnel de acceso*



Fuente. Elaboración propia

De acuerdo a los datos obtenidos en el campo se puede concluir lo siguiente: el 64.40%

del túnel, es decir 980.59 m, no presenta agua (seco); el 21.23% del túnel (es decir 322.03 m), presenta agua y posee una caudal > 10 lit/min. El 10.60% del túnel, es decir 161.03 m. presenta agua y posee un caudal que oscila entre 10-25 lit/min. El 3.15% del túnel, es decir 47.85 m. presenta agua y posee una caudal que oscila entre 25-125 lit/min., el 0.42% del túnel, es decir 6.50 m. presenta agua y posee un caudal < 125 lit/min

6.2.4. Caracterización del macizo rocoso

Se realizó la caracterización del macizo rocoso en la abscisa 0+000,00 obteniendo los siguientes resultados.

6.2.4.1. Litología

Litológicamente corresponde a un *aglomerado volcánico* con clastos angulosos y subangulosos entre 5-20 cm de diámetro. Presenta una tonalidad abigarrada.

6.2.4.2. Agrietamiento

Presenta discontinuidades onduladas rugosas selladas, de continuidad media (3-10m), perpendiculares al eje del túnel. Existen dos sistemas de diaclasas (J1 y J2). No existe la presencia de agua.

6.2.4.3. Valoración del macizo rocoso

Los datos obtenidos en el mapeo Geológico-Geotécnico son:

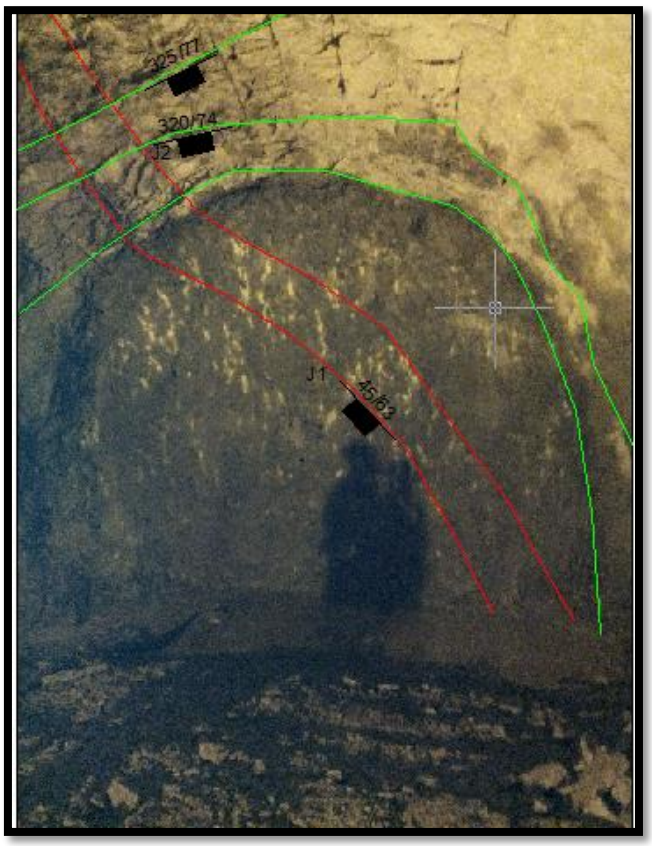
Tabla 28. *Datos obtenidos producto del mapeo geológico realizado en la abscisa 0+000,00*

Valoración de Macizo:		Calidad de la Roca
RMR	88	Muy Bueno
Q	100	Muy Bueno

Fuente. Elaboración propia

Lo que indica que tenemos un macizo rocoso Muy Bueno Tipo I, la medida especificada como sostenimiento eventual es el lanzado de una capa de hormigón con fibra de acero de 5 cm. de espesor. Véase Tabla 4.

Figura 16. *Frontón del túnel de acceso a Casa de Máquinas. Abscisa 0+000.00*



Fuente. Elaboración propia

En donde:

El primer valor corresponde a la dirección del buzamiento

El segundo valor corresponde al buzamiento

45 / 63	
Dirección del Buzamiento (Dip Direction)	Buzamiento (Dip)

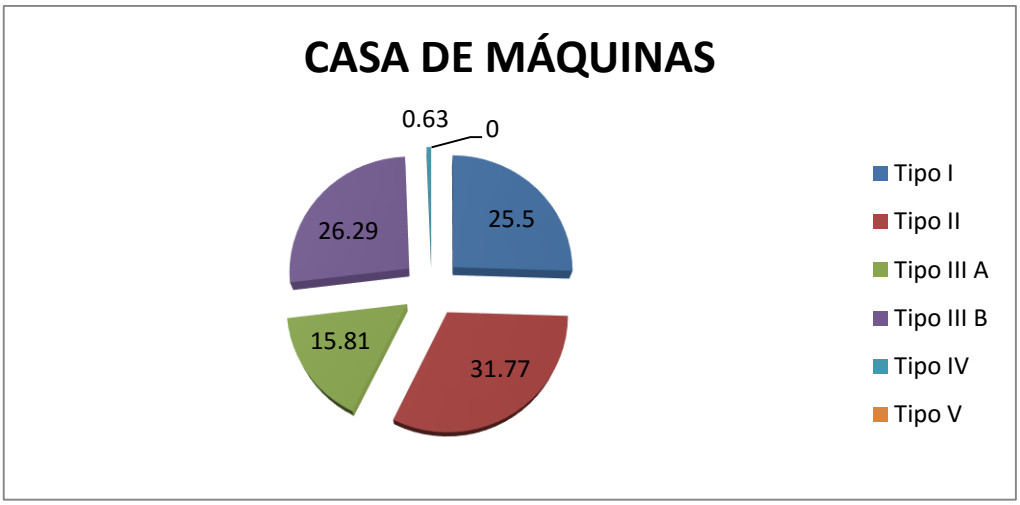
En la siguiente tabla se indica el porcentaje y la distancia porcentual de cada tipo de sostenimiento en el túnel de Acceso a Casa de Máquinas. Véase Anexo 5.

Tabla 29. *Distancias y porcentajes de los tipos de roca en el túnel de acceso a Casa de Máquinas.*

Casa de Máquinas		
Tipo de Roca	**Distancia total acumulada**	**Porcentaje**
	m	**%**
Tipo I	387.08	25.50
Tipo II	482.33	31.77
Tipo III A	240	15.81
Tipo III B	399.02	26.29
Tipo IV	9.57	0.63
Tipo V	0	0
TOTAL	**1518**	**100**

Fuente. Elaboración propia

Figura 17. *Porcentajes del tipo de roca en el túnel de acceso*



Fuente. Elaboración propia

De acuerdo a los datos obtenidos en el campo se puede concluir lo siguiente: el 25.50% del

túnel, es decir 387.08m es de Tipo I, el 31.77% del túnel, es decir 482.33 m. es de tipo II, el 15.81% del túnel, es decir 240 m. es de Tipo III A, el 26.29% del túnel, es decir 399.02 m. s de tipo III B, el 0.63% del túnel, es decir 9.57 m. es de tipo IV, no existe roca Tipo V.

6.2.5. Zonas de inestabilidad

Se ha identificado dos zonas que poseen mayor grado de inestabilidad.

a) La primera ubicada entre las abscisas 1+154.80 a 1+149.70 ya que posee las siguientes características. Véase Anexo 5.

Figura 18. *Zona de falla en el túnel de acceso a Casa de Máquinas. Abscisa 1+149,70*

Fuente. Elaboración propia

1. Existe una zona de falla caracterizada por tener roca triturada moderadamente meteorizada con relleno milonítico de entre 10-200 mm.
2. Posee un caudal de infiltración mayor a 125 lit/min.
3. La roca existente (Toba Andesítica) se encuentra moderadamente fracturada (6-10

fracturas/metro).

4. Existen acuñamientos inestables y desprendimientos en bóveda de bloques centimétricos (10-40 cm aprox.), puesto que existen varios sistemas de discontinuidades que cortan entre sí.
5. Al existir gran cantidad de agua aumenta la inestabilidad del macizo rocoso, puesto que ésta lava los rellenos existentes en las juntas lo que origina que los bloques existentes en bóveda y hastiales posean tengan mayor probabilidad de caída.

b) La segunda zona de inestabilidad se encuentra ubicada entre las abscisas 0+939.50 a 0+930.50 ya que posee las siguientes características. Véase Anexo 5.

Figura 19. *Zona de inestabilidad el túnel de acceso a Casa de Máquinas. Abscisa 0+930.50*

Fuente. Elaboración propia

1. Posee un caudal de infiltración mayor a 125 lit/min.
2. La roca existente (Toba Andesítica) es de baja competencia (25-50 MPa), además se encuentra moderadamente fracturada (6-10 fracturas/metro) y moderadamente meteorizada.

3. Las paredes de roca son planas lisas, presentan óxidos de hierro y rellenos arcillosos (5-20mm).
4. Posee inyecciones carbonáticas blandas (2-10mm), estos carbonatos se encuentran medianamente meteorizados.
5. Existen acuñamientos y desprendimientos de bloques centimétricos (5-30 cm aprox.), en bóveda puesto que existen varios sistemas de discontinuidades los mismos que cortan entre sí.
6. Al existir gran cantidad de agua aumenta la inestabilidad del macizo rocoso, puesto que ésta lava los rellenos existentes en las juntas lo que origina que los bloques existentes en bóveda y hastiales posean tengan mayor probabilidad de caída.

6.3. Medidas de estabilización y control

6.3.1. Introducción

Según González (2002) el sostenimiento proporciona al túnel, el principal elemento de estabilización, cumpliendo los siguientes objetivos:

1. Evitar que el terreno pierda sus propiedades resistentes.
2. Evitar el desprendimiento de cuñas o zonas sueltas del terreno por el proceso de excavación.
3. Limitar las deformaciones en la cavidad creada.
4. Controlar las filtraciones y proteger las rocas frente a la meteorización.
5. Proporcionar seguridad a las personas e instalaciones.

Para alcanzar estos objetivos se debe instalar el sostenimiento tan pronto como sea posible. A este sostenimiento de tipo inmediato se lo denomina Sostenimiento Primario. Es posible que la excavación precise de elementos de sostenimiento adicionales para tratar de reforzar el terreno en zonas débiles, en cuyo caso se denomina Sostenimiento Secundario.

Una vez estabilizada la excavación y finalizada la instalación de los sostenimientos, los túneles se cubren de una capa de hormigón, llamada Revestimiento, cuyas funciones son

contribuir a la estabilidad a largo plazo del túnel, mejorar su estética, albergar servicios y conducciones y disminuir la fricción del aire o el agua, entre otras.

6.3.2. Elementos necesarios para un sostenimiento eventual

6.3.2.1. Hormigón proyectado

El hormigón proyectado, también llamado gunita tiene dos finalidades principales: sellar la superficie de la roca, cerrando las juntas, y evitar la descompresión y alteración de la roca.

La dosificación del hormigón lanzado en el proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco para obras subterráneas es la siguiente: aproximadamente 500-600 Kg de cemento, una relación en peso agua-cemento de aproximadamente 0.35-0.40 y aditivo acelerarte en cantidad necesaria para obtener la resistencia a la compresión requerida, pero en cada caso no superior a 6% por peso del cemento. El contenido de fibras metálicas debe ser del orden de 30 kg/m³. El anillo de hormigón proyectado adquiere una resistencia de 50 kp/cm^2 a las 8 horas y 280 kp/cm^2 a los 28 días, y trabaja resistiendo las cargas que le trasmite la roca al deformarse, evitando también la caída de pequeñas cuñas o bloques de roca. Véase Anexo 1 sección b).

Antes de efectuar el lanzado de la gunita mediante el robot lanzador (CIFA) se debe lavar la roca para que haya una mayor adherencia del hormigón. El hormigón lanzado será aplicado en una o más capas hasta alcanzar el espesor requerido, de modo que no se produzca ningún desprendimiento del material ya colocado. El volumen de hormigón proyectado en el túnel de acceso depende de la clase de roca existente (Véase tabla 3) y del sostenimiento adecuado para esta clase de roca (Véase tabla 4).

Los terrenos donde se aplicará el hormigón están constituidos en la mayoría por rocas friables, y por lo tanto se deberá prestar especial atención al proceso de aplicación de manera que la velocidad del chorro no desaloje el material en situ.

Figura 20. *Hormigón proyectado entre las abscisas 0+131.90 a 0+128.00 del túnel de acceso a Casa de Máquinas*

Fuente. Elaboración propia

6.3.2.2. Malla electrosoldada

La malla electrosoldada o mallazo está formada por una parrilla de barras corrugadas unidas mediante electrosoldadura, y se utiliza como refuerzo del hormigón, proyectado por su facilidad de adaptación a la forma del túnel. Generalmente se usan mallazos de diámetros de 4, 5 ó 6 mm con separaciones comprendidas entre 10 y 20 centímetros.

En sustitución del mallazo se pueden emplear fibras de acero que se incorporan a la dosificación del hormigón; consisten en alambres de acero de 0,5 mm de diámetro y 30 mm de longitud, utilizados en una proporción del orden de 40 a 50 kg de fibras por m^3 de hormigón; cuando se emplea este sistema el espesor de la gunita no debe ser inferior a 6 cm. Véase Anexo 1 sección c.

6.3.2.3. Bulones o pernos

Los bulones consisten en barras de acero de 20 a 40 mm de sección y longitudes variables, normalmente entre 3 y 6 m, que se instalan en el terreno previa perforación del taladro correspondiente. Admiten cargas del orden de 10 a 25 t.

Los bulones más utilizados son los constituidos por barras corrugadas, ancladas en toda su longitud con resina o cemento (Pernos Inyectados). Véase Anexo 1 sección d).

Después de la fabricación, los pernos tendrán que poseer las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 30. *Especificaciones técnicas para pernos inyectados en el proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco*

Propiedad	Valor
Diámetro de la Barra	25 mm
Límite mínimo de fluencia	17 kN
Carga mínima de rotura	22 kN

Fuente. Elaboración propia

La mezcla de inyección para la instalación y fijación de los pernos estará constituida por cemento Pórtland y agua en una relación de 0.38 a 0.40 y se usará aditivo expansor semejante a INTRAPLAST producido por la firma Sika (o un material equivalente aprobado) en cantidad del 1% en peso del cemento.

La cantidad de pernos depende de la clase de roca existente (Véase tabla 3) y del sostenimiento adecuado para esta clase de roca (véase tabla 4).

Figura 21. *Perno inyectado (Varilla corrugada de 3 metros)*

Fuente. Elaboración propia

Otros tipos de bulones son los de fricción, colocados mediante hinchado por agua a presión (Swellex) y de resina de poliéster armada con fibras de vidrio. Véase Anexo 1 sección e).

Figura 22. *Perno swellex (3 metros)*

Fuente. Elaboración propia

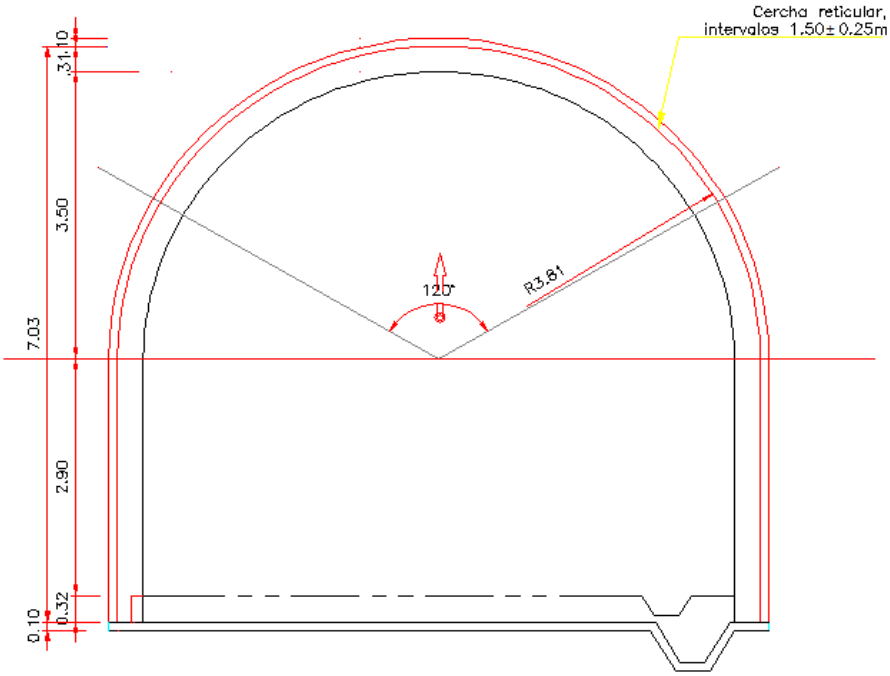
Por su forma de actuar los bulones pueden ser activos o pasivos. Los primeros funcionan como un anclaje, tienen un fuste libre, y la cabeza (parte que sobresale de la excavación) se sujeta mediante una placa y una rosca, aplicándoles una tensión entre 5 y 15 toneladas. El bulón pasivo se adhiere a la roca en toda su longitud y no se le aplica tensión. Los bulones ejercen dos efectos sobre la excavación: cosen las discontinuidades del macizo rocoso, impidiendo los deslizamientos, caídas de cuñas y aportan al terreno un efecto de confinamiento.

6.3.2.4. Cerchas

Las cerchas son perfiles de acero laminados en forma de arco que ejercen una función resistente cuando trabajan en contacto con el terreno por tanto se han de colocar en contacto con el mismo a lo largo de toda su longitud y firmemente apoyadas en el suelo. Las cargas de

trabajo son generalmente bajas, del orden de 3-6 t/m^2, con espaciados entre 0,75 y 1,50 m cuando los empujes del terreno no son muy elevados. Véase Anexo 1 sección f).

Figura 23. *Longitud y radio de cercha reticular utilizada en el túnel de acceso*



Fuente. Elaboración propia

Figura 24. *Cerchas reticulares de acero laminado en forma de arco*

Fuente. Elaboración propia

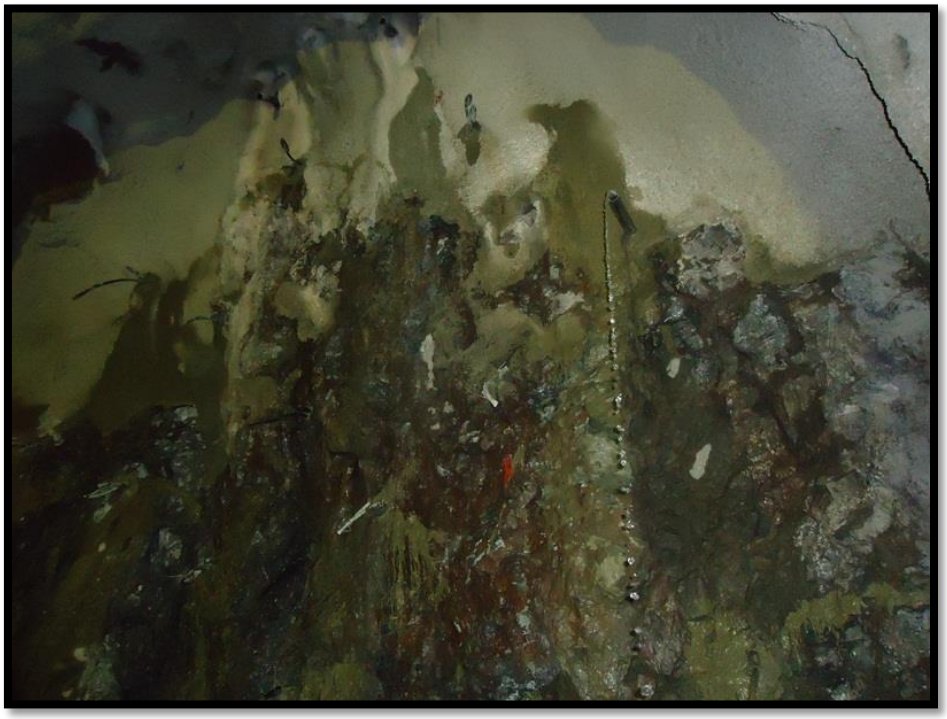
6.3.2.5. Drenajes

Utilizados principalmente para la captación de filtraciones. Consta de un tubo ranurado con orificios inyectado a la pared del túnel.

Los tubos a través de hormigones de revestimientos serán de acero con diámetro de 50 mm (2”) y espesor no inferior de 4 mm. Estos tubos estarán firmemente fijados al encofrado para evitar posibles desplazamientos durante el vaciado del hormigón.

Los tubos para inyectar terrenos sueltos o roca muy blanda podrán ser de acero o de fibra de vidrio, tendrán un diámetro interior no inferior de 30 mm y un espesor tal para soportar una presión hasta 25 bar. Estos tubos serán equipados con válvulas específicas para poder inyectar el terreno por medio de dos obturadores. Las válvulas tendrán un intervalo, a lo largo de los tubos, entre 50 y 100 cm. La longitud del drenaje depende principalmente del caudal que se necesita encausar. Véase Anexo 1 sección g).

Figura 25. *Drenaje en bóveda en la abscisa 0+744.00 del túnel de acceso a Casa de Máquinas. (Long. 2 metros; Diámetro 1 pulgada)*



Fuente. Elaboración propia

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del presente estudio permitieron identificar la litología existente en el túnel de acceso, clasificar geotécnicamente el macizo rocoso e identificar las zonas de inestabilidad encontradas en los 1518,00 metros del túnel de Casa de Máquinas del proyecto hidroeléctrico Minas-San Francisco.

En relación a la litología existente en el túnel de acceso, se muestreó el túnel cada 100 metros obteniendo una muestra fresca de los hastiales, se procedió a codificar e identificar sus características físicas y mineralógicas; este estudio estableció lo siguiente: se encontraron cinco tipos de rocas volcánicas extrusivas en su mayoría de composición intermedia de textura afanítica; andesitas, tobas andesíticas, tobas andesíticas con fragmentos líticos, tobas riolíticas y aglomerado volcánico. En general, la roca se encuentra de sana a ligeramente alterada presenta poco diaclasamiento (1-5 fracturas/metro).

En relación a las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, se describió y cuantificó cada dos a tres avances (6-9 metros aproximadamente) las estructuras presentes en el macizo rocoso. A cada estructura presente en el túnel se le tomó el buzamiento y su dirección; así como sus características distintivas (rugosidad, alteración, relleno, persistencia, abertura) con la finalidad de establecer las estructuras que generan mayor inestabilidad. Una vez obtenidas estas características se procede a parametrizar el macizo rocoso obteniendo un valor llamado RMR establecido por Bieniawski, 1989, que no es más que establecer un tipo de macizo rocoso de acuerdo a su valor RMR. El túnel de acceso a Casa de Máquinas del proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco consta de los siguientes tipos de macizo rocoso: el 25.50% del túnel, es decir 387.08m. es de Tipo I, el 31.77% del túnel, es decir 482.33 m. es de tipo II, el 15.81% del túnel, o sea 240 m. es de Tipo III A, el 26.29% del túnel, es decir 399.02 m. s de tipo III B, el 0.63% del túnel, es decir 9.57 m. es de tipo IV, no existe roca Tipo V.

En relación a la existencia de zonas de inestabilidad, este estudio estableció lo siguiente: existen dos zonas de inestabilidad; la primera es una zona de falla en la abscisa 1+149,70, presenta un relleno milonítico de entre 10-200mm., así como roca triturada moderadamente alterada. Presenta gran cantidad de agua (<125 lit/min) y existen caídas de bloques puesto que se cortan las diaclasas en bóveda.

La segunda zona de inestabilidad se encuentra ubicada entre la abscisa 0+939,00 debido a

que la roca existente es de baja competencia (25-50MPa), se encuentra moderadamente fracturada (6-10 fracturas/metro) moderadamente meteorizada y sus diaclasas presentan paredes lisas pulidas con rellenos arcilloso oxidados >20mm., lo que origina inestabilidad y caída de bloques en bóveda. Además presenta gran cantidad de agua (<125 lit/min).

8. CONCLUSIONES

Luego de concluido el trabajo investigativo realizado en el túnel de Acceso a Casa de Máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Minas San Francisco, puedo concluir en lo siguiente:

1. El túnel de Acceso a Casa de Máquinas en sus 1518.510 m de longitud presenta un manto volcánico extrusivo, siendo sus mayores exponentes las andesitas, tobas (andesíticas y riolíticas) y aglomerados volcánicos.

2. De acuerdo al mapeo geológico realizado en el túnel de acceso se identificó dos sistemas de discontinuidades principales, estas poseen una dirección (315 / 68) y NW (253/60), además existen dos sistemas de diaclasas secundarias, estas poseen una dirección (145 / 64) y NW 54(/60) y un sistema de discontinuidades esporádico que posee una dirección (103 / 21).

3. Existen dos zonas de mayor inestabilidad: la primera ubicada en la abscisa 1+149.70 caracterizada por contar con roca triturada y un con relleno milonítico de entre 10-200mm. y la segunda ubicada en la abscisa 0+930.50 caracterizada por ser una roca de baja competencia (25-50 MPa), además se encuentra moderadamente fracturada (6-10 fracturas por metro) y moderadamente meteorizada, posee inyecciones carbonáticas que presentan planos lisos y pulidos.

4. La clasificación geotécnica de la roca en el túnel de acceso a Casa de Máquinas de acuerdo a la clasificación establecida por Bieniawski 1989 presenta la siguiente distribución: 25.5% de Tipo I (calidad Muy Buena), 31.77% de Tipo II (calidad Buena), 15.81% de Tipo IIIA (calidad Media), 26.29% de Tipo IIIB (calidad Media), 0.63% de Tipo IV (calidad Mala) y 0% de Tipo V (calidad Muy Mala).

5. Respecto a las condiciones hidrogeológicas, la excavación se desarrolla principalmente en roca seca, con zonas muy localizadas de goteos y escurrimientos.

9. RECOMENDACIONES

1. A la hora de realizar el mapeo geológico se debe contar con todos los implementos necesarios para valoración y siguiente clasificación de macizo rocoso.

2. Se debe mapear el túnel después de cada avance para indicar el sostenimiento que se debe colocar con el fin de precautelar el bienestar de trabajadores y evitar sobreexcavaciones producto de la caída de bloques y/o descompresión de la roca.

3. Tener una base sólida de geología estructural para saber interpretar y describir las distintas estructuras geológicas existentes en el macizo.

4. A la hora de realizar el mapeo geológico tener cuidado con la conformación de cuñas y posible caída de bloques, puesto que esto es un condicionante a la hora de clasificar el macizo.

5. Tomarse el tiempo que sea necesario para la valoración y por consiguiente clasificación del macizo rocoso.

10. BIBLIOGRAFÍA

Libros y Documentos

Adiego, Pedro. (2008). C*lasificación de rocas*. Madrid-España.

Aguilar, Juan. (2008). *Caracterización geotécnica y estructural de la rampa de exploración y del túnel de drenaje, mina Chuquicamata.* Santiago de Chile.

Astec Geodata. (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico Minas alternativa San Francisco y estudio de factibilidad y diseño definitivo del proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

Astec Geodata, (2008). *Propuesta técnica, sobre no 1, tomo 2. Completación del estudio de factibilidad y diseño definitivo proyecto hidroeléctrico Minas y estudio de factibilidad y diseño definitivo proyecto hidroeléctrico La Unión.* Quito-Ecuador.

Astec Geodata. (2010). *Estudio de factibilidad proyecto Minas alternativa San Francisco. Informe de geología evento 2, parte II escala 1:500*. Quito-Ecuador.

Astec Geodata (2011). *Estudio de factibilidad proyecto Minas alternativa San Francisco. Especificaciones técnicas constructivas y detalle de obras civiles. Tomo II.* Quito-Ecuador.

Dávila, Jorge. (2000). *Diccionario geológico*. Lima-Perú. Tercera edición.

Duque, Gonzalo. (2003). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.

Duque, Pablo. (2000). *Breve léxico estratigráfico del Ecuador, sistema de información geográfica y minera* (sim). Quito.

González, Luis. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid-España.

Sagaseta, César. (2010) *Introducción a la geotecnia.* Universidad de Cantabria.

Sainz, Jorge. (2006) *Curso de geotecnia*. España: Grupo Inzamac.

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2012) *Transformación de la matriz productiva*: Quito-Ecuador. 1ra. edición.

Strina, Ernesto. (2002). *Introducción a la ingeniería geotécnica*. Madrid-España.

Tenesaca, Martha. (2011) Tesis de grado: *diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Cañar*. *R*iobamba-Ecuador.

Páginas Web

http://es.wikipedia.org/wiki/Geolog%C3%ADa_estructural

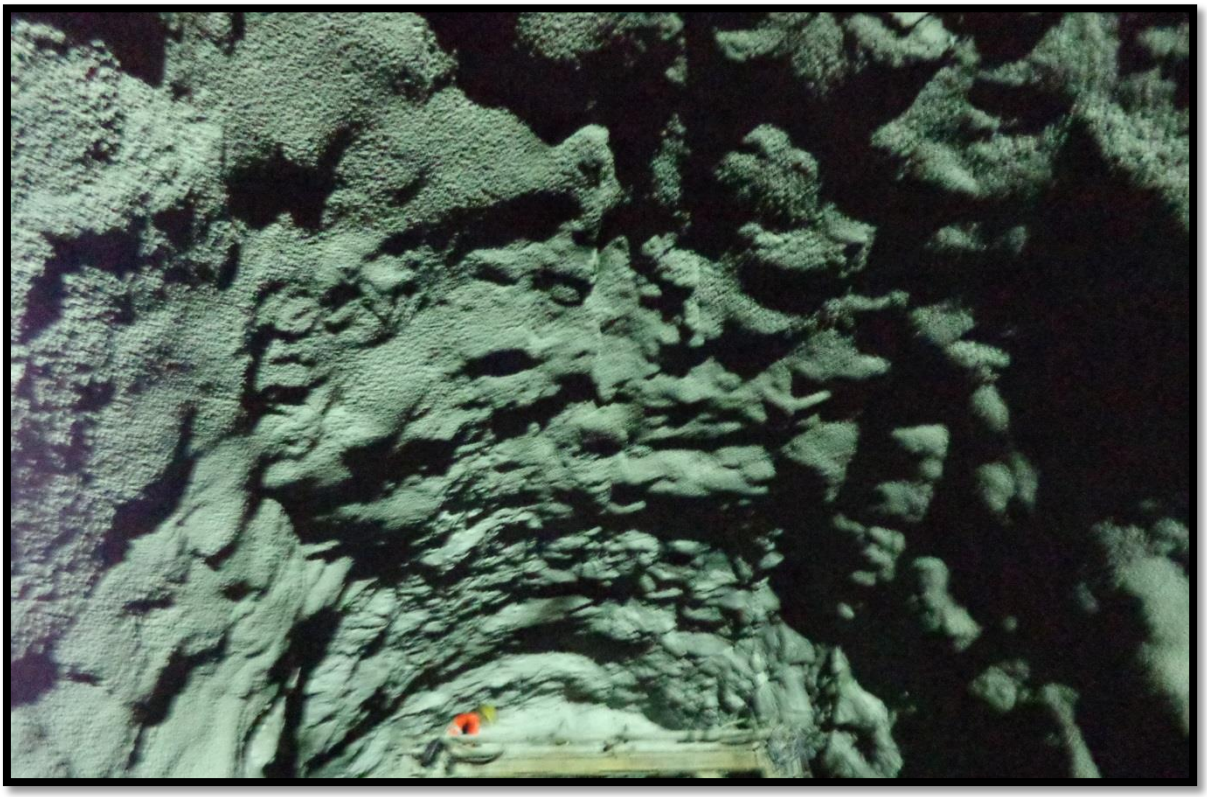
ANEXOS

ANEXO 1

FOTOGRAFÍAS

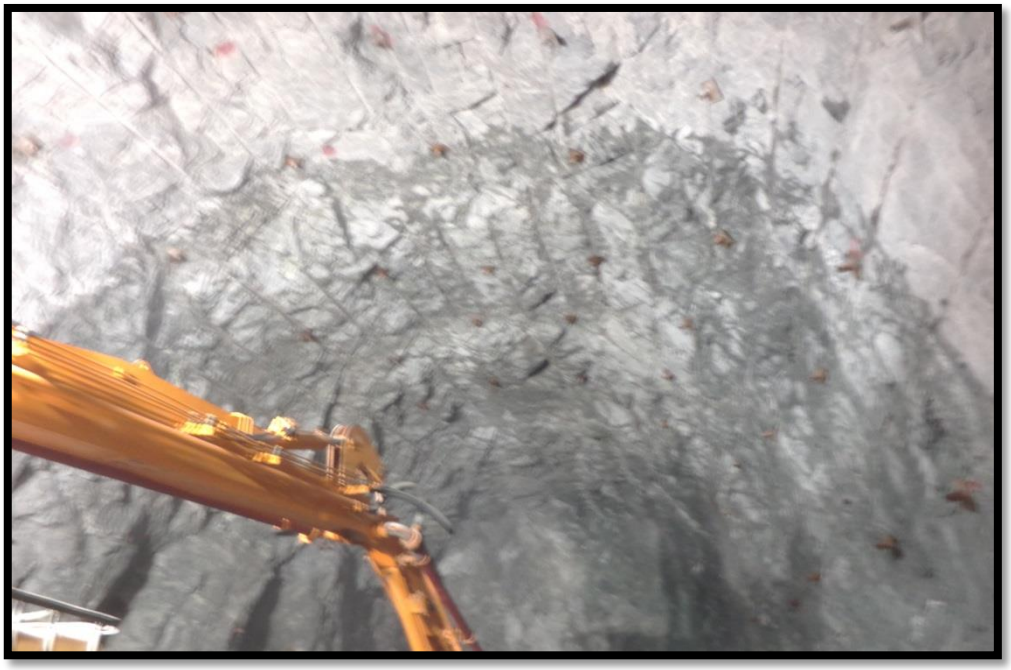
a) Fotografías de sostenientes eventuales en túneles

Fotografías del sostenimiento en roca Tipo I

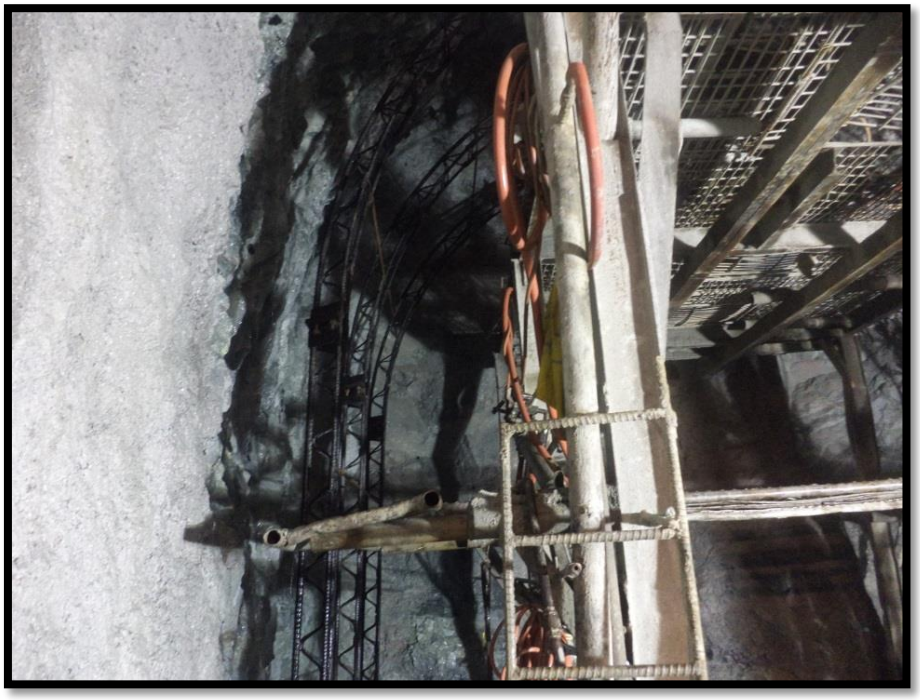


Fotografía del sostenimiento en roca Tipo II

Fotografías del sostenimiento en roca Tipo IIIA

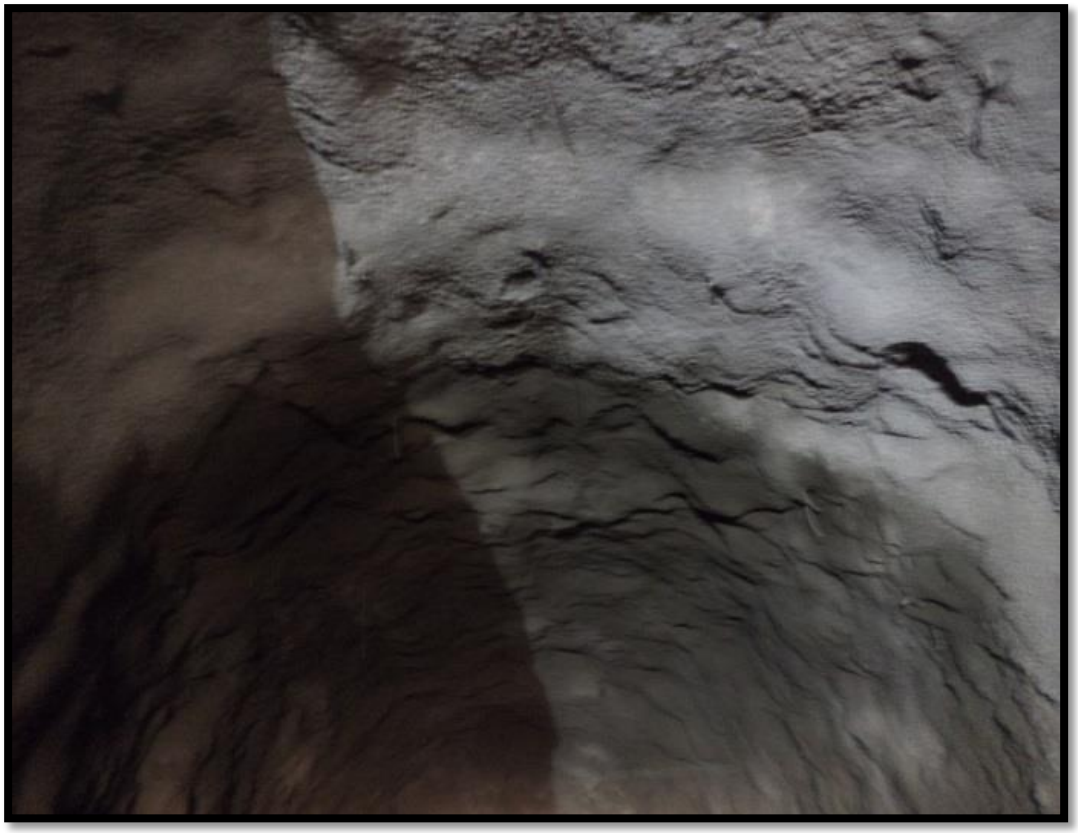


Fotografías del sostenimiento en roca Tipo IIIB

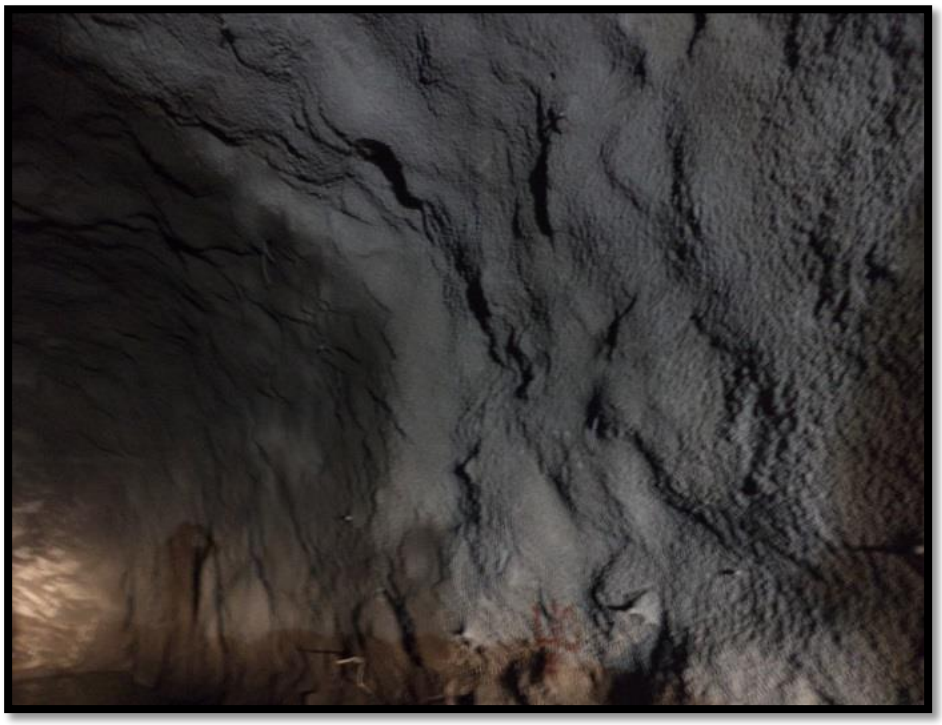


b) Fotografías del hormigón proyectado en el túnel de acceso a Casa de Máquinas

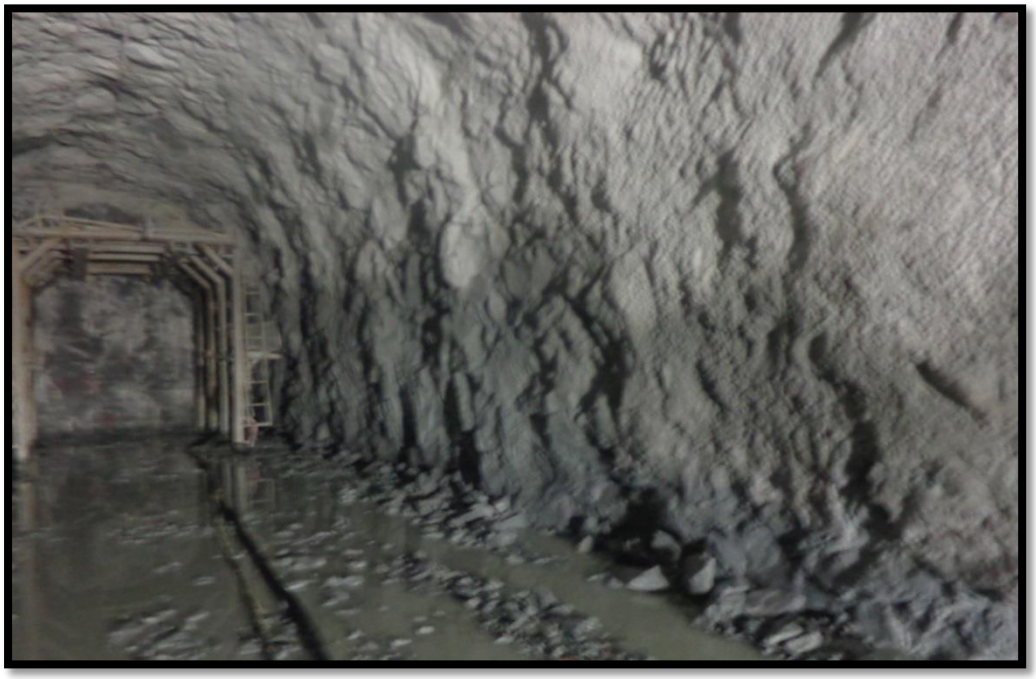
Hormigón proyectado en bóveda entre las abscisas 0+019.50 a 0+010.00.



Hormigón proyectado en hastial izquierdo entre las abscisas 0+019.50 a 0+010.00.

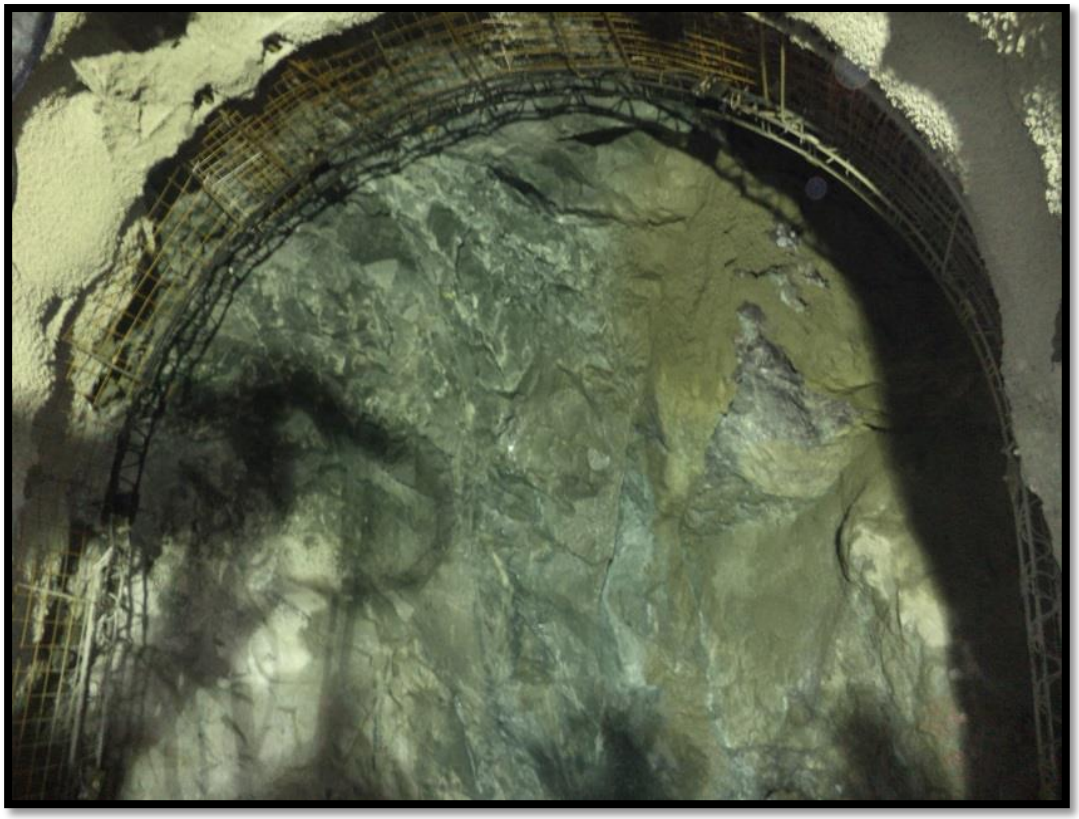


Hormigón proyectado entre las abscisas 0+480.00 a 0+461.00

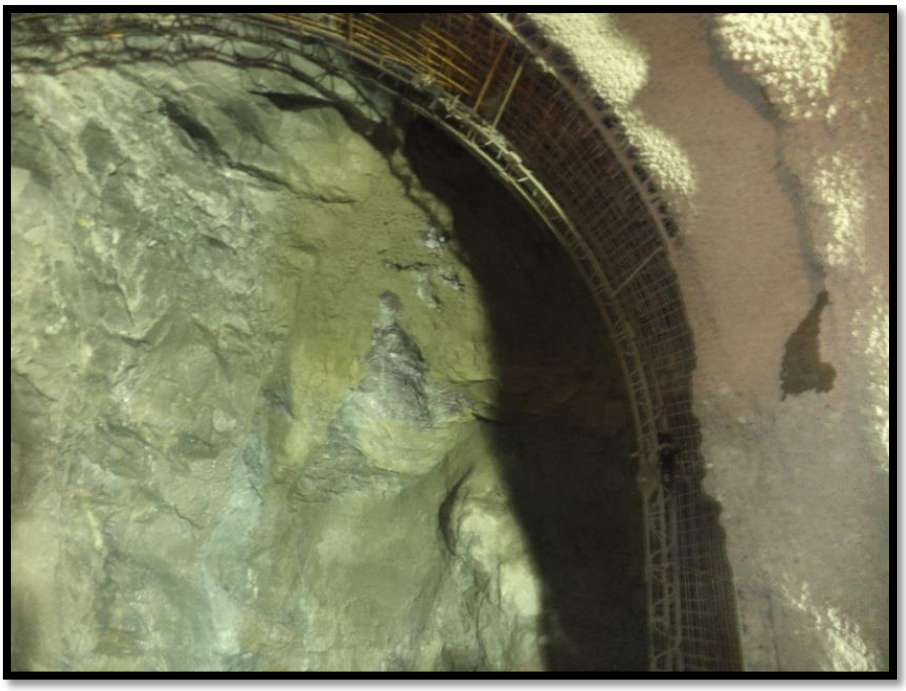


c) Fotografías de la malla electrosoldada colocada en el túnel de acceso a Casa de Máquinas

Malla electrosoldada colocada entre las abscisas 0+854.50 a 0+853.50



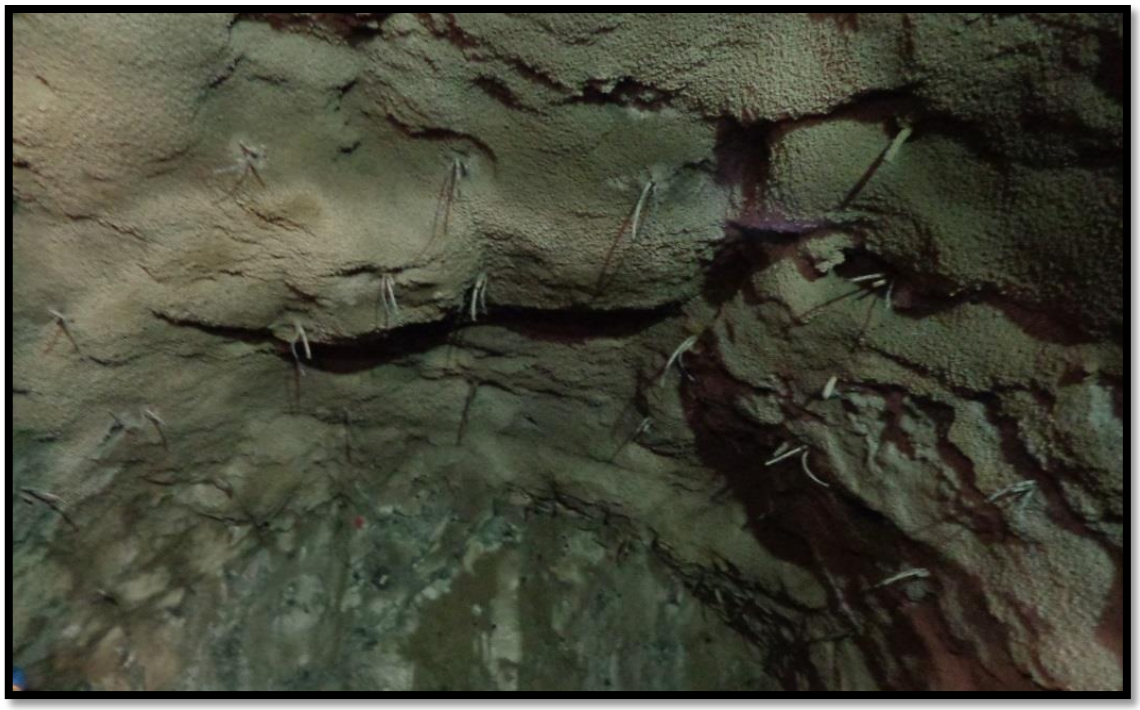
Malla electrosoldada colocada entre la bóveda y el hastial izquierdo del túnel de acceso entre las abscisas 0+853.50 a 0+852.50



Malla electrosoldada colocada en bóveda entre las abscisas 0+852.50 a 0+850.50

d) Fotografías de pernos inyectados colocados en el túnel de acceso a Casa de Máquinas

Pernos inyectados en bóveda entre las abscisas 0+128.00 a 0+122.50



Perno inyectado en hastial derecho en la abscisa 0+131.00

Perno inyectado en hastial izquierdo en la abscisa 0+520.50

e) Fotografías de pernos swellex colocados en el túnel de acceso a Casa de Máquinas

Entre las abscisas 0+064.00.00 a 0+060.50

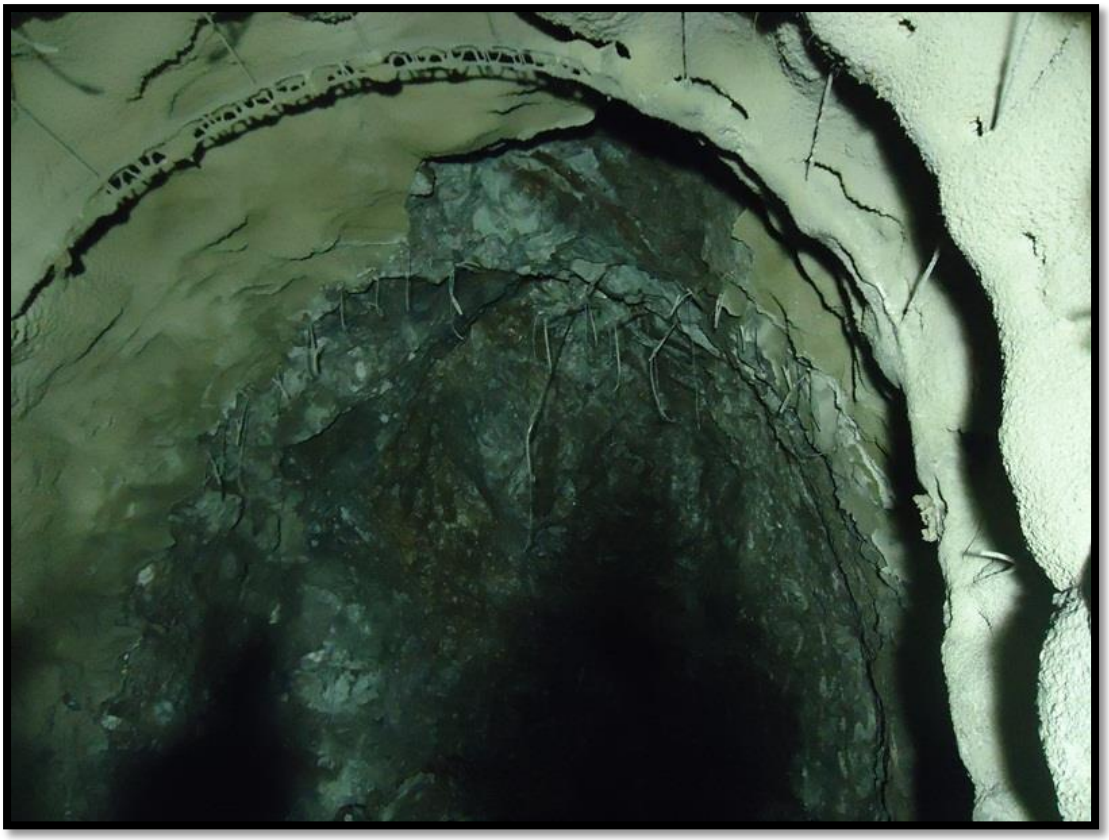
Colocación de pernos swellex entre las abscisas 0+133.00 a 0+140.50

Pernos swellex en bóveda entre las abscisas 0+168.00 a 0+150.00

f) Fotografías de cerchas reticulares colocadas en el túnel de acceso a Casa de Máquinas

Cerchas colocadas entre las abscisas 1+277.00 a 1+265.00

Cerchas colocadas entre las abscisas 1+201.80 a 1+199.00



g) Fotografías de drenes colocados en los puntos de agua encontrados en el túnel de acceso a Casa de Máquinas

Dren colocado en la abscisa 0+348.00 en hastial izquierdo. (Long. 2 metros; Diámetro 1 pulgada)

ANEXO 2

ANEXO 3

ANEXO 4

ANEXO 5

ANEXO 6

TABLAS

Tabla 31. Descripción de las estructuras geológicas entre las abscisas 1+518.00 a 1+200.00

Estructura	Dip	Dip direction	Características
Planchón	68	110	Plana rugosa, relleno arcilloso blando menor a 1 mm
Diaclasa	89	178	Plana rugosa, relleno arcilloso duro menor a 1 mm
Diaclasa	72	305	Plana rugosa, relleno arcilloso duro menor a 1 mm
Diaclasa	86	155	Plana rugosa, relleno arcilloso duro menor a 1 mm
Diaclasa	18	80	Plana rugosa, relleno arcilloso duro menor a 1 mm
Diaclasa	46	230	Plana rugosa, relleno arcilloso blando menor a 1 mm
Diaclasa	73	338	Plana rugosa, relleno arcilloso duro menor a 1 mm
Diaclasa	70	252	Plana rugosa, relleno arcilloso duro menor a 1 mm
Diaclasa	74	86	Plana rugosa, relleno arcilloso duro menor a 1 mm
Diaclasa	64	340	Plana rugosa oxidada ligeramente alterada
Diaclasa	62	14	Plana rugosa oxidada ligeramente alterada
Diaclasa	64	4	Plana rugosa oxidada ligeramente alterada
Diaclasa	78	155	Plana rugosa oxidada ligeramente alterada
Diaclasa	66	257	Plana rugosa oxidada ligeramente alterada
Diaclasa	42	70	Plana rugosa oxidada ligeramente alterada
Diaclasa	58	356	Plana rugosa oxidada ligeramente alterada
Diaclasa	66	356	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	66	341	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	65	354	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	60	56	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	59	282	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	73	143	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	43	92	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	29	312	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	77	245	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	20	37	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	18	320	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	62	279	Ondulada rugosa, ligeramente alterada
Diaclasa	85	309	Ondulada rugosa, ligeramente alterada
Diaclasa	65	300	Ondulada rugosa, ligeramente alterada
Diaclasa	77	240	Ondulada rugosa, ligeramente alterada

Diaclasa	55	220	Ondulada rugosa, ligeramente alterada
Diaclasa	50	240	Ondulada rugosa, ligeramente alterada
Diaclasa	74	225	Ondulada rugosa, ligeramente alterada
Diaclasa	59	30	Ondulada rugosa, ligeramente alterada
Diaclasa	68	250	Plana rugosa, moderadamente alterada
Diaclasa	41	360	Plana rugosa, moderadamente alterada
Diaclasa	75	25	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm moderadamente alterada
Diaclasa	69	314	Plana rugosa, relleno blando arcilloso menor a 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	74	302	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm moderadamente alterada
Diaclasa	49	206	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm moderadamente alterada
Diaclasa	43	3	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm moderadamente alterada
Diaclasa	55	88	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm moderadamente alterada
Diaclasa	52	82	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm moderadamente alterada
Diaclasa	51	25	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm moderadamente alterada
Diaclasa	76	108	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	72	56	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	28	78	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	79	350	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	54	256	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	30	97	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	50	31	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	47	130	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente

			alterada
Diaclasa	58	255	Plana lisa, relleno blando arcilloso de hasta 1 mm ligeramente alterada
Diaclasa	16	23	Plana rugosa, con relleno blando arcilloso de hasta 5 mm
Cizalla	46	50	Plana rugosa, con relleno blando arcilloso de hasta 5 mm
Cizalla	22	24	Plana rugosa, con relleno blando arcilloso de hasta 5 mm
Cizalla	10	82	Plana rugosa, con relleno blando de hasta 5 mm moderadamente alterado
Cizalla	54	123	Plana rugosa, con relleno blando de hasta 5 mm moderadamente alterado
Cizalla	35	90	Plana rugosa, con relleno blando de hasta 5 mm moderadamente alterado
Cizalla	65	210	Plana rugosa, con relleno blando arcilloso y grafito de hasta 5 mm moderadamente alterado
Cizalla	77	223	Plana rugosa, con relleno blando de hasta 5 mm moderadamente alterado
Cizalla	35	345	Ondulada rugosa, con rellenos arcillosos menores a 5 mm moderadamente alterados
Diaclasa	25	238	Ondulada rugosa, con rellenos arcillosos menores a 5 mm moderadamente alterados
Diaclasa	35	34	Ondulada rugosa, con rellenos arcillosos menores a 5 mm moderadamente alterados
Diaclasa	20	215	Ondulada rugosa, con rellenos arcillosos menores a 5 mm moderadamente alterados
Diaclasa	83	227	Ondulada estriada, sellada moderadamente alterada
Diaclasa	52	215	Ondulada estriada, sellada moderadamente alterada
Diaclasa	45	135	Ondulada estriada, sellada moderadamente alterada
Diaclasa	60	235	Ondulada estriada, sellada moderadamente alterada
Diaclasa	55	215	Ondulada estriada, sellada moderadamente alterada
Diaclasa	45	135	Ondulada estriada, sellada moderadamente alterada
Diaclasa	50	225	Ondulada estriada, relleno duro menor a 5 mm moderadamente alterada
Diaclasa	30	290	Ondulada estriada, relleno duro menor a 5 mm moderadamente alterada
Diaclasa	30	125	Ondulada estriada, relleno duro menor a 5 mm moderadamente alterada

Diaclasa	35	120	Ondulada estriada, relleno duro menor a 5 mm moderadamente alterada
Diaclasa	25	125	Ondulada estriada, relleno duro menor a 5 mm moderadamente alterada
Diaclasa	55	135	Plana rugosa, relleno blando menor a 5 mm moderadamente alterada
Diaclasa	48	305	Plana rugosa, relleno blando menor a 5 mm moderadamente alterada
Diaclasa	34	60	Plana rugosa, relleno blando menor a 5 mm moderadamente alterada
Diaclasa	72	241	Plana rugosa, relleno blando menor a 5 mm moderadamente alterada
Diaclasa	68	330	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	48	305	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	68	330	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	53	140	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	72	244	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	34	60	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	88	230	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	70	130	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	65	125	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	55	45	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	43	215	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	71	125	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	71	340	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente

			alterada
Diaclasa	73	113	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	66	235	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	76	240	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	66	38	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	84	105	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	32	260	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	84	105	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	54	245	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	25	220	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	65	170	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	72	315	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	19	290	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	76	330	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	32	325	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	66	350	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	88	15	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	68	252	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	80	295	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada

Diaclasa	54	172	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	75	51	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada
Diaclasa	52	320	Plana rugosa, relleno blando menor a 2 mm moderadamente alterada

Fuente. Elaboración propia en base a los mapeos realizados entre las abscisas 1+518.00 – 1+200.00

Tabla 32. Descripción de las estructuras geológicas entre las abscisas 1+200.00 a 0+900.00

Estructura	Dip	Dip direction	Características
Diaclasa	70	301	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	62	182	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	41	29	Plana rugosa, sellada.
Vetillas	30	252	Carbonato duro
Diaclasa	38	152	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	56	57	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	70	53	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	32	345	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	46	274	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	43	14	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	47	310	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	86	140	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	30	128	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	47	236	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	51	3	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	67	310	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	60	222	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	90	180	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	43	270	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	43	145	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	85	65	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Cizalla	72	244	
Diaclasa	90	355	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	28	95	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	45	273	Plana rugosa, rellenos duros de carbonatos mayores a 5 mm
Diaclasa	76	346	Plana rugosa, rellenos duros de carbonatos mayores a 5 mm
Diaclasa	45	80	Plana rugosa, rellenos duros de carbonatos mayores a 5 mm
Diaclasa	39	63	Plana rugosa, rellenos duros de carbonatos mayores a 5 mm
Diaclasa	66	240	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	85	185	Plana rugosa, sellada.

Diaclasa	45	80	Plana rugosa, sellada.
Cizalla	90	255	Plana rugosa, rellenos duros de carbonatos mayores a 5 mm
Cizalla	45	8	Plana rugosa, rellenos arcillosos y arenosos menores a 5 mm
Cizalla	32	10	Plana rugosa, rellenos arcillosos y arenosos menores a 5 mm
Cizalla	76	287	Plana rugosa, rellenos arcillosos y arenosos menores a 5 mm
Diaclasa	76	271	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	34	81	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	62	189	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	36	305	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato
Diaclasa	49	335	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato
Diaclasa	45	21	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	77	152	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	26	265	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato
Cizalla	85	20	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Cizalla	70	311	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Cizalla	45	335	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Cizalla	75	148	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Cizalla	36	262	Ondulada rugosa, relleno carbonatado con óxido de hierro de 1 a 5 mm
Cizalla	36	84	Ondulada rugosa, relleno carbonatado con óxido de hierro de 1 a 5 mm
Diaclasa	31	32	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	46	12	Ondulada rugosa, sellada
Cizalla	56	261	Ondulada rugosa, relleno carbonatado con óxido de hierro de 1 a 5 mm
Diaclasa	86	326	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	65	281	Ondulada rugosa, sellada
Cizalla	76	75	Plana rugosa, relleno arcilloso menor a 5 mm
Cizalla	70	35	Plana rugosa, relleno arcilloso menor a 5 mm
Espejo de falla	76	336	
Diaclasa	70	150	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	30	284	Plana rugosa, sellada.

Diaclasa	19	310	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	30	25	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	36	307	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	80	219	Ondulada rugosa, sellada
Cizalla	76	273	Ondulada rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	46	40	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	16	186	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	88	170	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	85	299	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	88	170	Plana rugosa, sellada.
Cizalla	35	51	Plana rugosa, relleno arcilloso menor a 5 mm
Diaclasa	72	290	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	70	222	Plana rugosa, sellada.
Cizalla	58	297	Plana rugosa, relleno arcilloso menor a 5 mm
Planchón	82	167	
Diaclasa	42	295	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	52	250	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	48	350	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	69	235	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	45	80	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	65	10	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	57	5	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	87	238	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	60	35	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	47	208	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	64	241	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	53	246	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	41	16	Plana rugosa, sellada.
Cizalla	52	21	Plana rugosa, relleno blando arcilloso menor a 5 mm
Diaclasa	83	242	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	36	284	Plana rugosa, sellada.
Cizalla	27	113	Plana rugosa, relleno blando arcilloso menor a 5 mm
Diaclasa	84	34	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	78	232	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	35	331	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	47	285	Ondulada rugosa, sellada

Diaclasa	42	276	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	40	20	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	65	135	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	50	60	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	35	150	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	35	220	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	30	338	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	50	232	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	53	245	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	20	50	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	70	115	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	72	110	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	85	130	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	64	251	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	20	25	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	25	20	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	80	182	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	55	280	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	85	358	Plana rugosa, sellada.
Diaclasa	55	280	Plana rugosa, sellada.

Fuente. Elaboración propia en base a los mapeos realizados entre las abscisas 1+200.00 – 0+900.00

Tabla 33. Descripción de las estructuras geológicas entre las abscisas 0+900.00 a 0+600.00

Estructura	Dip	Dip dirección	Características
Diaclasa	34	20	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	55	225	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	30	130	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	70	270	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	60	180	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	70	120	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	50	240	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	43	295	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	40	260	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	40	105	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	25	230	Plana rugosa, relleno carbonatado mayor a 5 mm
Diaclasa	50	160	Plana rugosa, relleno carbonatado mayor a 5 mm
Diaclasa	60	310	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	20	195	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	60	330	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	80	245	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	40	126	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	34	5	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	81	281	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	80	352	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	85	260	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	33	355	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	55	270	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	55	290	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	53	347	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	20	115	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	65	140	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	27	258	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	55	240	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	15	346	Plana rugosa, relleno carbonatado mayor a 5 mm
Diaclasa	66	175	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	15	346	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	64	178	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	55	240	Plana rugosa, sellada

Diaclasa	60	170	Plana rugosa, relleno carbonatado menor a 5 mm
Diaclasa	20	350	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	70	165	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	42	20	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	35	64	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	57	140	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	36	17	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato
Diaclasa	51	317	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato
Diaclasa	87	304	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato
Diaclasa	30	60	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	75	164	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	42	234	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	62	12	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	42	234	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	62	12	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	53	150	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	50	184	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 m.
Diaclasa	67	302	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	50	12	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	67	302	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	65	160	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	50	12	Plana rugosa, rellenos duros de carbonato menor a 5 mm
Cizalla	70	340	Plana rugosa, relleno blando de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	52	311	Ondulada rugosa, rellenos blando de carbonato menor a 5 mm
Cizalla	65	342	Plana rugosa, relleno blando de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	70	358	Plana rugosa, sellada
Cizalla	4	90	Plana rugosa, relleno blando de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	70	358	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	65	350	Plana rugosa, vetillas de carbonato duro menor a 5 mm
Cizalla	4	90	Plana rugosa, relleno blando de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	83	330	Plana rugosa, vetillas de carbonato duro menor a 5 mm
Cizalla	4	90	Plana rugosa, relleno blando de carbonato menor a 5 mm
Diaclasa	83	236	Ondulada rugosa, vetillas de carbonato duro
Diaclasa	32	296	Ondulada rugosa, vetillas de carbonato duro
Diaclasa	44	170	Ondulada rugosa, vetillas de carbonato duro

Cizalla	85	68	Ondulada rugosa, rellenos carbonatado de 1 a 5 mm
Cizalla	87	72	Ondulada rugosa, rellenos carbonatado de 1 a 5 mm
Diaclasa	32	178	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	35	63	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	50	163	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	77	356	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	54	227	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	60	335	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	72	290	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	62	338	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	74	335	Ondulada rugosa, sellada
Planchón	60	160	

Fuente. Elaboración propia en base a los mapeos realizados entre las abscisas 0+900.00 – 0+600.00

Tabla 34. Descripción de las estructuras geológicas entre las abscisas 0+600.00 a 0+300.00

Estructura	Dip	Dip direction	Características
Diaclasa	62	320	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	70	155	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	70	150	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	48	266	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	72	252	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	70	320	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	70	170	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	67	310	Ondulada rugosa, sellada
Cizalla	65	302	Ondulada rugosa, relleno carbonatado de 5 a 10 mm
Diaclasa	52	308	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	63	250	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	67	255	Ondulada rugosa, sellada
Cizalla	55	314	Ondulada rugosa, relleno carbonatado de 5 a 10 mm
Diaclasa	62	256	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	76	290	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	80	285	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	76	250	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	70	275	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	55	260	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	70	320	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	80	218	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	82	310	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	87	316	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	60	105	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	70	315	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	84	276	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	82	275	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	68	288	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	68	290	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	54	310	Ondulada rugosa, relleno carbonatado duro de 1 a 2 mm
Diaclasa	56	315	Ondulada rugosa, relleno carbonatado duro de 1 a 2 mm
Diaclasa	52	322	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	56	315	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	60	112	Plana rugosa, sellada

Diaclasa	65	314	Ondulada rugosa, relleno carbonatado duro de 1 a 2 mm
Diaclasa	58	117	Plana rugosa, sellada
Cizalla	79	276	Ondulada rugosa, relleno carbonatado de 5 a 10 mm
Diaclasa	63	97	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	56	72	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	61	210	Ondulada rugosa, relleno carbonatado menor a 2 mm
Diaclasa	69	126	Ondulada rugosa, relleno carbonatado menor a 2 mm
Diaclasa	49	318	Plana rugosa, sellada
Diaclasa	58	316	Ondulada rugosa, relleno carbonatado menor a 2 mm
Diaclasa	74	312	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	76	340	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	70	200	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	68	308	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	76	330	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	70	300	Ondulada rugosa, sellada
Diaclasa	72	272	Ondulada rugosa, sellada

Fuente. Elaboración propia en base a los mapeos realizados entre las abscisas 0+600.00 – 0+300.00

Tabla 35. Descripción de las estructuras geológicas entre las abscisas 0+300.00 a 0+000.00

Estructura	Dip	Dip direction	Características
Diaclasa	80	136	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	74	245	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	34	180	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	67	313	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	58	315	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	62	307	Plana rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	28	36	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	36	124	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	40	278	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	68	310	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	77	138	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	75	132	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	64	97	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	58	350	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	68	335	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	74	142	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	58	182	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	68	235	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	38	280	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	78	270	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	44	60	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	64	282	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	40	260	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	34	262	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	75	310	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	75	316	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	76	312	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	62	276	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	60	262	Plana rugosa, presenta pátinas de oxidación, ligeramente alterada
Diaclasa	72	300	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	40	248	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	76	12	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	80	6	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada

Diaclasa	40	260	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	38	185	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	25	110	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Vetillas	86	125	Rellenas de carbonatos duros
Diaclasa	63	320	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	50	328	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	35	325	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	62	17	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	60	15	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	25	200	Ondulada rugosa, sellada ligeramente alterada
Diaclasa	47	153	Plana rugosa sellada, sin alteración
Diaclasa	68	143	Plana rugosa sellada, sin alteración
Diaclasa	81	131	Plana rugosa sellada, sin alteración
Diaclasa	28	247	Plana rugosa sellada, sin alteración
Vetillas	73	230	Irregular con relleno cac03 + lamina de arcilla
Diaclasa	68	200	Plana rugosa sellada, sin alteración
Diaclasa	70	274	Plana lisa, con abertura milimétrica y ligera alteración
Vetillas	62	145	Plana ligeramente rugosa, sin alteración y abertura milimétrica
Diaclasa	75	338	Plana rugosa con superficies de alteración
Vetillas	72	41	Plana rugosa con relleno CaCO3
Diaclasa	25	200	Plana rugosa sellada, sin alteración

Fuente. Elaboración propia en base a los mapeos realizados entre las abscisas 0+300.00 – 0+000.00