

**PRÁCTICA EMPRESARIAL:
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LOGUEO GEOTÉCNICO
DEMPERS EN EL DESARROLLO DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO
LUGEON PARA EL CÁLCULO DE CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS EN
MACIZO ROCOSO. CASO DE APLICACIÓN: PROYECTO LA COLOSA -
CAJAMARCA, TOLIMA**

DIEGO ANDRÉS URIBE TARAZONA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2017**

**PRÁCTICA EMPRESARIAL:
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LOGUEO GEOTÉCNICO
DEMPERS EN EL DESARROLLO DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO
LUGEON PARA EL CÁLCULO DE CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS EN
MACIZO ROCOSO. CASO DE APLICACIÓN: PROYECTO LA COLOSA -
CAJAMARCA, TOLIMA**

DIEGO ANDRÉS URIBE TARAZONA

Proyecto de grado para optar al título de
GEÓLOGO

Director de proyecto (UIS):

Ing. WALTER LEONARD ANTOLINEZ QUIJANO

Director de proyecto (AGA):

Geol. CARLOS HERNÁN MEJÍA ROMERO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2017

Dedicatoria

A Dios y a mis padres.

A mis abuelos, tíos, tías y hermano.

A mis amigos y novia.

*Y a esa parte de mí,
Que siempre se niega a dar por vencido.*

Agradecimientos

A Dios por sus bendiciones y por darme la oportunidad de seguir adelante.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología por la formación personal y profesional brindada a lo largo de la carrera.

A la empresa AngloGold Ashanti por darme la oportunidad de ser parte de tan grandiosa familia durante el periodo de desarrollo de la práctica.

A mis padres y demás familiares por su esfuerzo y respaldo incondicional en todo momento.

A mis amigos y novia, por todo el apoyo brindado en el desarrollo de esta etapa tan importante de mi vida.

A mi hermano, por ponerme como ejemplo y exigirme cada vez más a ser un mejor modelo a seguir.

A esas personas que, sin tener la obligación de ayudarme cuando lo necesité, me brindaron su apoyo desinteresadamente.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. GENERALIDADES	22
2.1 LOCALIZACIÓN: ÁREA DE ESTUDIO	22
2.2 LOCALIZACIÓN: PUNTOS RELEVANTES, SECTORES COLOSA - PINOS - DIAMANTE.....	23
3. MARCO GEOLÓGICO PROYECTO LA COLOSA	26
3.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	26
3.2 GEOLOGÍA LOCAL	29
4. MARCO TEÓRICO	38
4.1 POROSIDAD	38
4.2 PERMEABILIDAD.....	40
4.3 UNIDADES HIDROGEOLOGÍCAS.....	41
4.4 LOGUEO GEOLÓGICO.....	43
4.4.1 Roca Caja	44
4.4.2 Intrusivos El Diamante	46
4.4.2.1 Intrusivo Tardío	46
4.4.3 Vetilleo	48
4.4.4 Alteración.....	50
4.5 LOGUEO GEOTÉCNICO.....	53

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

4.5.1	Parámetros a Evaluar	56
4.5.1.1	Tipo de Roca.....	56
4.5.1.3	Dureza (QSI).....	57
4.5.1.4	Designación de la Calidad de Roca (RQD).....	58
4.5.1.5	Clases de Fracturas	59
4.5.1.6	Tipos de Fracturas	60
4.5.1.7	Micro Rugosidad	61
4.5.1.8	Relleno.....	62
4.5.1.9	Tipo de Relleno (Infill Type)	63
4.5.1.10	Espesor de Relleno (Infill Thickness).....	64
4.5.1.11	Alteración de la Pared de la Discontinuidad (JWA).....	66
4.5.1.12	Total de Fracturas Naturales / Inducidas por Tipo Fracn / Fraci (0-30) (30-60) (60-90).....	66
4.5.1.13	Sets de Juntas (Sets).....	66
4.5.1.14	Matriz (Matrix)	68
4.6	EJECUCIÓN DE ENSAYOS HIDROGEOLOGÍCOS IN-SITU	70
4.6.1	Ensayo Tipo Lefranc	71
4.6.2	Ensayos Tipo LUGEON	78
5.	METODOLOGÍA	113
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	115
6.1	FALLA LA CEJA	117
6.1.1	Pozos Estudiados	117
6.1.2	Tramos de Prueba	117
6.1.2.1	COL-DDH-400: TRAMO N° 2 (165.34 – 172.47)	118
6.1.2.2	COL-DDH-433: TRAMO N° 6 (105.97 – 112.96)	120
6.1.2.3	COL-DDH-436: TRAMO N° 6 (85.05 – 95.21)	122
6.1.3	Ensayos Ejecutados	124
6.1.3.1	COL-400	124

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

6.1.3.2 COL-433	124
6.1.3.3 COL-436	125
6.1.4 Conductividad Falla La Ceja	126
6.1.5 Recopilación de Información	127
6.2 FALLA LA GUALA	129
6.2.1 Pozos Estudiados	129
6.2.2 Tramos de Prueba	129
6.2.2.1 COL-DDH-413: TRAMO N° 4 (161 – 169.7)	130
6.2.2.3 COL-DDH-434: TRAMO N° 6 (178.23 – 186.38)	134
6.2.3 Ensayos Ejecutados	136
6.2.3.1 COL-413	136
6.2.3.2 COL-423	137
6.2.3.3 COL-434	138
6.2.4 Conductividad Falla La Guala	139
6.2.5 Recopilación de Información	140
6.3 FALLA LA CRISTALINA.....	142
6.3.1 Pozos Estudiados	142
6.3.2 Tramos de Prueba	142
6.3.2.1 COL-DDH-420: TRAMO N° 7 (176.47 – 181.47)	143
6.3.2.2 COL-DDH-424: TRAMO N° 11 (83.12 – 90.12)	145
6.3.2.3 COL-DDH-425: TRAMO N° 6 (195.03 – 202.07)	147
6.3.2.4 COL-DDH-426: TRAMO N° 10 (112.8 – 119.25)	149
6.3.3 Ensayos Ejecutados	151
6.3.3.1 COL-420	151
6.3.3.2 COL-424	152
6.3.3.3 COL-425	153
6.3.3.4 COL-426	154
6.3.4 CONDUCTIVIDAD FALLA LA CRISTALINA.....	155
6.3.5 Recopilación de Información	156

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

7. CONCLUSIONES	158
8. RECOMENDACIONES.....	159
BIBLIOGRAFÍA.....	160

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación del Proyecto La Colosa	22
Figura 2. Ubicación a gran escala del Proyecto La Colosa y sus principales áreas de estudios.....	24
Figura 3. Mapa de Geológico con zonas y puntos de interés de los sectores de Pinos, Diamante y Colosa (LCP).....	25
Figura 4. Mapa de la Tectónica del Norte de los Andes, indicando los sistemas de fallas mayores (Simplificado después de Acosta et al., 2004; Cortes et al., 2006; Ingeominas, 2006)	27
Figura 5. Esquema de la distribución de unidades litológicas y sistemas de fallamiento en la Cordillera Central	29
Figura 6. Mapa de la geología local del Proyecto La Colosa	30
Figura 7. Mapa de la geología local del Proyecto La Colosa	33
Figura 8. Perfil esquemático en dirección W-E del complejo magmático intrusivo de La Colosa.....	34
Figura 9. Modelo generalizado de las zonas de Alteración y Mineralización para un sistema de pórfido.....	36
Figura 10. Porosidad Primaria y Porosidad Secundaria	39
Figura 11. a) Esquisto negro con alta fisilidad. COL101; b) Esquisto negro con foliación visible COL015.....	44
Figura 12. a) Hornfels con alteración potásica de biotita y alta deformación COL021; b) Hornfels con alteración sódico cálcica y potásica se preserva el bandeamiento COL098	45
Figura 13. Diorita porfírica LDD1 con fenocristales de plagioclasa alterados a illita y de hornblenda alterados a clorita COL306.....	46
Figura 14. Diorita porfírica LDD2 con fenocristales de plagioclasa alterados a illita y de hornblenda alterados a clorita COL306.....	47

Figura 15. Cuarzodiorita porfírica LQDD compuesta por fenocristales de plagioclasa y de horblenda alterados a clorita COL306	48
Figura 16. Tipos de Vetillas	50
Figura 17. Flujograma para Logueo Geotécnico. Proyecto La Colosa, AngloGold Ashanti	54
Figura 18. Método para medición de RQD a lo largo del núcleo de perforación	59
Figura 19. Ejemplo de fracturas naturales // (amarillo), Inducidas X (amarillo) y mecánicas X (azul).....	60
Figura 20. Ejemplos de cada tipo de SET para una mejor identificación en el pozo	67
Figura 21. Flujograma para la Ejecución de Ensayos In-Situ. Proyecto La Colosa, AngloGold Ashanti	70
Figura 22. Modelo de ensayo Lefranc de Carga Constante.....	73
Figura 23. Modelo de ejecución de Ensayo Lefranc de Carga Constante	74
Figura 24. Modelo de ensayo Lefranc de Carga Variable	76
Figura 25. Modelo de ejecución de Ensayo Lefranc de Carga Variable con Incremento de Nivel Piezométrico.....	77
Figura 26. Modelo de ejecución de Ensayo Lefranc de Carga Variable con Disminución de Nivel Piezométrico	78
Figura 27. 1.) Diseño de Instalación de Herramienta para Ensayos Lugeon con Packer Simple. 2.) Diseño de Instalación de Herramienta para Ensayos Lugeon con Packer Doble	81
Figura 28. Componentes de la Herramienta utilizada para la Ejecución de Ensayos Lugeon de Packer Doble	84
Figura 29. Componentes de la Herramienta utilizada para la Ejecución de Ensayos Lugeon de Packer Simple	84
Figura 30. Selección de las zonas de interés para el análisis de conductividad hidráulica por medio de ensayos Lugeon en el pozo COL-432	86

Figura 31. Identificación de sector de interés para evaluación de conductividad hidráulica con ensayo Lugeon. Tramo de 128 – 138 m, Pozo COL-432	86
Figura 32. Delimitación del tramo de interés para la ejecución de ensayo Lugeon. Tramo de 128 – 138 m, Pozo COL-432	87
Figura 33. Prueba de inflado de obturadores para el ensayo Lugeon en superficie.....	91
Figura 34. Formato para ejecución de Ensayos Lugeon.....	96
Figura 35. Interpretación del Flujo basado en los resultados de Q y he obtenidos en ensayos Lugeon	103
Figura 36. Interpretación de Ensayos Lugeon por Etapa de Presión Vs Valor Lugeon, basado en la clasificación de Houlsby (1976)	105
Figura 37. Interpretación de Ensayos Lugeon basada en la Pérdida de Flujo Vs Presión.....	106
Figura 38. Interpretación de Ensayos Lugeon por Pérdida de Flujo Vs Presión, basado en la clasificación de Houlsby (1976).....	108
Figura 39. Interpretación del Flujo basado en los resultados de Q y he obtenidos en ensayos Lugeon	110
Figura 40. Etapas generalizadas de la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo de grado	113
Figura 41. Mapa de localización de las principales estructuras y pozos del sector Site-11 del PLC	116
Figura 42. Tramo N° 2, Pozo COL-400, Falla La Ceja.....	118
Figura 43. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 2 del pozo COL-400.....	119
Figura 44. Tramo N° 6, Pozo COL-433, Falla La Ceja.....	120
Figura 45. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-433.....	121
Figura 46. Tramo N° 6, Pozo COL-436, Falla La Ceja.....	122

Figura 47. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-436.....	123
Figura 48. HOJA LOG pozo COL-400, Falla La Ceja	128
Figura 49. Tramo N° 4, Pozo COL-413, Falla La Guala.....	130
Figura 50. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 4 del pozo COL-413.....	131
Figura 51. Tramo N° 2, Pozo COL-423, Falla La Guala.....	132
Figura 52. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 4 del pozo COL-413.....	133
Figura 53. Tramo N° 6, Pozo COL-434, Falla La Guala.....	134
Figura 54. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-434.....	135
Figura 55. HOJA LOG pozo COL-434, Falla La Guala	141
Figura 56. Tramo N° 7, Pozo COL-420, Falla La Cristalina	143
Figura 57. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 7 del pozo COL-420.....	144
Figura 58. Tramo N° 11, Pozo COL-424, Falla La Cristalina	145
Figura 59. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 11 del pozo COL-424.....	146
Figura 60. Tramo N° 6, Pozo COL-425, Falla La Cristalina	147
Figura 61. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-425.....	148
Figura 62. Tramo N° 10, Pozo COL-426, Falla La Cristalina	149
Figura 63. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-425.....	150
Figura 64. HOJA LOG pozo COL-424, Falla La Cristalina.....	157

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen de Alteraciones	51
Tabla 2. Grado de meteorización de la roca para el proyecto la Colosa.....	57
Tabla 3. Grado de dureza de la roca	58
Tabla 4. Clasificación de fracturas según su ángulo.....	61
Tabla 5. Tipos de rugosidades.....	62
Tabla 6. Descripción del relleno de la discontinuidad, tamaño de grano y textura	63
Tabla 7. Tipo de relleno de fracturas	64
Tabla 8. Condición de apertura de la discontinuidad según el relleno	65
Tabla 9. Identificación de la alteración de la pared de la discontinuidad	66
Tabla 10. Categorías de sets de fracturas y valor para logueo geotécnico	67
Tabla 11. Identificación de los tipos de matrices.....	69
Tabla 12. Protocolo para la ejecución de ensayos Lugeon según reglamento AGA	91
Tabla 13. Sección del formato de Lugeon para los datos generales del ensayo	97
Tabla 14. Sección del formato Lugeon para los datos específicos del ensayo	99
Tabla 15. Sección del Formato Lugeon para interpretación del Ensayo.....	101
Tabla 16. Tabla de ensayos Lugeon realizados en los pozos del Site-11 para evaluación de la Conductividad Hidráulica del macizo rocoso	111
Tabla 17. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-400.....	124
Tabla 18. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-433.....	124
Tabla 19. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-436.....	125
Tabla 20. Conductividad calculada para la Falla La Ceja	126
Tabla 21. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-413.....	136
Tabla 22. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-423.....	137

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

Tabla 23. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-434.....	138
Tabla 24. Conductividad calculada para la Falla La Guala	139
Tabla 25. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-420.....	151
Tabla 26. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-424.....	152
Tabla 27. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-425.....	153
Tabla 28. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-426.....	154
Tabla 29. Conductividad calculada para la Falla La Cristalina.....	155

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LOGUEO GEOTÉCNICO DEMPERS EN EL DESARROLLO DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON PARA EL CÁLCULO DE CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS EN MACIZO ROCOSO. CASO DE APLICACIÓN: PROYECTO LA COLOSA - CAJAMARCA, TOLIMA*

AUTOR: DIEGO ANDRÉS URIBE TARAZONA**

PALABRAS CLAVE: LOGUEO GEOTÉCNICO, DEMPERS, ENSAYOS LUGEON, CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA, MACIZO ROCOSO, LA COLOSA.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo se desarrolló dentro del proyecto de exploración de oro La Colosa, a cargo de la compañía AngloGold Ashanti, el cual se encuentra ubicado en el Municipio de Cajamarca, Tolima, el cual ha generado una serie de reacciones sociales y políticas muy dispersas en el sector.

El desarrollo de este trabajo surge a raíz de la presencia de agua subterránea atravesando el macizo rocoso, lo cual hace necesario conocer el comportamiento de dicho flujo a través de la roca y la magnitud de su afectación, teniendo como objetivo el desarrollo futuro de las obras de infraestructura que van a ser llevadas a cabo en este sector, denominado por la empresa como Site-11.

En primera instancia, este documento se basa en el aprendizaje y aplicación de la metodología de Logueo Geotécnico Dempers como base para la ejecución de ensayos de permeabilidad Lugeon, los cuales van a permitir obtener los valores de las conductividades para cada una de las tres (3) estructuras principales que afectan el macizo rocoso donde se va a ubicar el Site-11.

El Logueo Geotécnico, aparte de su objetivo principal como metodología de interpretación de núcleos para la caracterización del macizo rocoso, permite identificar las zonas más afectadas por las estructuras y, así mismo, determinar los tramos sobre los cuales se van a ejecutar los ensayos Lugeon para el cálculo de la conductividad hidráulica.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Ing. MSc Walter Leonard Antolinez Quijano

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF THE DEMPERS GEOTECHNICAL LOGGING METHODOLOGY IN THE DEVELOPMENT OF LUGEON TYPE PERMEABILITY TESTS FOR THE CALCULATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN ROCK MASS. CASE OF APPLICATION: LA COLOSA PROJECT - CAJAMARCA, TOLIMA*

AUTHOR: DIEGO ANDRÉS URIBE TARAZONA**

KEY WORDS: GEOTECHNICAL LOGGING, DEMPERS, LUGEON TEST, HYDRAULIC CONDUCTIVITY, ROCK MASS, LA COLOSA.

DESCRIPTION:

This work was carried out within the La Colosa gold exploration project, a position of the company AngloGold Ashanti, which is located in the Municipality of Cajamarca, Tolima, which has generated a series of highly dispersed social and political reactions in the sector.

The development of this work arises from the presence of groundwater crossing the rock massif, which makes it necessary to know the behavior of this flow through the rock and the magnitude of its affectation, aiming at the future development of works Infrastructure which has been carried out in this sector, called by the company at Site-11.

In the first instance, this document is based on the learning and application of the Dempers Geotechnical Logging methodology as the basis for the execution of Lugeon tests, which, in order to obtain the values of the conductivities for each of the three 3) Main Structures that affect the rock massif where the Site-11 will be located.

The Geotechnical Logging, apart from its main objective as a methodology for the interpretation of colors for the characterization of the rocky massif, allows identifying the area's most affected by the structures and, as well, to determine the stretches on which the Lugeon tests for the Calculation expands of the hydraulic conductivity.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Ing. MSc Walter Leonard Antolinez Quijano.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con tradición minera. Esta actividad ha desarrollado un papel muy importante tanto en el entorno económico como social del país y, en este momento, este sector se encuentra en una etapa crítica debido a la necesidad de expansión y evolución. Este dinamismo de la actividad minera se explica, en parte, por el aumento que tuvieron los precios internacionales de minerales entre el 2010 y el 2012 y por la legislación colombiana que hizo atractiva la inversión extranjera y nacional en el sector. En esta expansión, minerales como el carbón, el oro y el níquel han hecho que el sector minero colombiano tenga un mayor reconocimiento nacional e internacional. Sin embargo, las nuevas necesidades de un sector minero cambiante junto con algunos retos en temas de coordinación entre autoridades mineras y ambientales, así como la reciente caída de los precios de los minerales (especialmente del carbón), la disminución en los niveles de inversión extranjera, los altos niveles de informalidad, la extracción ilícita de minerales, las decisiones judiciales que generan inestabilidad jurídica, la conflictividad social en las regiones y la demora en los trámites tanto mineros como ambientales, entre otros, han llevado a un estancamiento en el desarrollo de esta industria.

El Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, “Todos por un nuevo país”, plantea que “el sector minero-energético seguirá siendo uno de los motores de desarrollo del país a través de su aporte al crecimiento económico, al aparato productivo, al empleo rural y a la inversión privada”. En ese sentido, como lo enuncia el plan, Colombia debe aprovechar al máximo su potencial en recursos naturales, bajo altos estándares ambientales y sociales, articulándose con las demás políticas sectoriales, las autoridades territoriales y la sociedad civil. De esta manera, es importante que la comunidad geológica incremente su interés en el papel que puede desempeñar en esta industria, no solo en su fase exploratoria sino también en sus fases de desarrollo. De este modo, la proyección de desarrollo de esta

práctica corresponde a un enfoque específicamente en la ejecución de actividades de Hidrogeología y Geotecnia para aportar en la caracterización del macizo rocoso sobre el cual se sitúa el área designada para las obras de infraestructura del proyecto La Colosa, “Site-11”.

En el trabajo realizado por el geólogo Maurice Lugeon en el año 1933, se estudia la necesidad de conocer el consumo de agua que posee un macizo rocoso a través de sus matrices y/o discontinuidades, de esta manera se ingenia un método de prueba in-situ, basado en el logueo geotécnico, el cual es ampliamente utilizado para determinar la conductividad hidráulica en un tramo aislado de un pozo perforado.

Durante el transcurso de los seis (6) meses de duración de la práctica, comprendidos entre el 15 de enero de 2016 hasta el 15 julio de 2016, se estudiaron y aplicaron las metodologías establecidas por la compañía AngloGold Ashanti para el correcto desarrollo del logueo geotécnico, usando la Metodología Dempers, y para la ejecución de ensayos Hidrogeológicos de permeabilidad In-Situ, tipo Lugeon, para el cálculo de conductividad hidráulica en macizo rocoso, con el propósito de ser aplicados en el “Site-11” del Proyecto La Colosa (PLC), con la finalidad de conocer el comportamiento que presentan los fluidos a través de las tres (3) estructuras principales que afectan este sector (fallas: La Guala, La Cristalina y La Ceja), a partir de la interpretación de la información recolectada en campo, ya que el flujo de aguas subterráneas a través del macizo puede llegar a generar inestabilidad tectónica que puede afectar el desarrollo de las diferentes obras de infraestructura proyectadas en el sector.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar las estructuras presentes en el macizo rocoso usando la metodología de logeo Geotécnico Dempers para la ejecución de ensayos de permeabilidad Lugeon que permitan evaluar el comportamiento hidráulico en el área de Infraestructura (Site-11) del Proyecto La Colosa, AngloGold Ashanti.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- En base a la metodología de logeo geotécnico “Dempers”, realizar un análisis de los testigos de roca con el fin de reconocer evidencias que conduzcan a la identificación de las estructuras: (1) La Ceja, (2) La Guala y (3) La Cristalina.
- Realizar la selección, en base a la información obtenida, de los tramos para realizar el cálculo de la conductividad hidráulica en las estructuras principales del Site-11.
- Determinar los valores de conductividad hidráulica para cada uno de los tramos identificados para las estructuras principales que afectan el macizo rocoso en el sector del Site-11 a través de la ejecución de ensayos Lugeon.

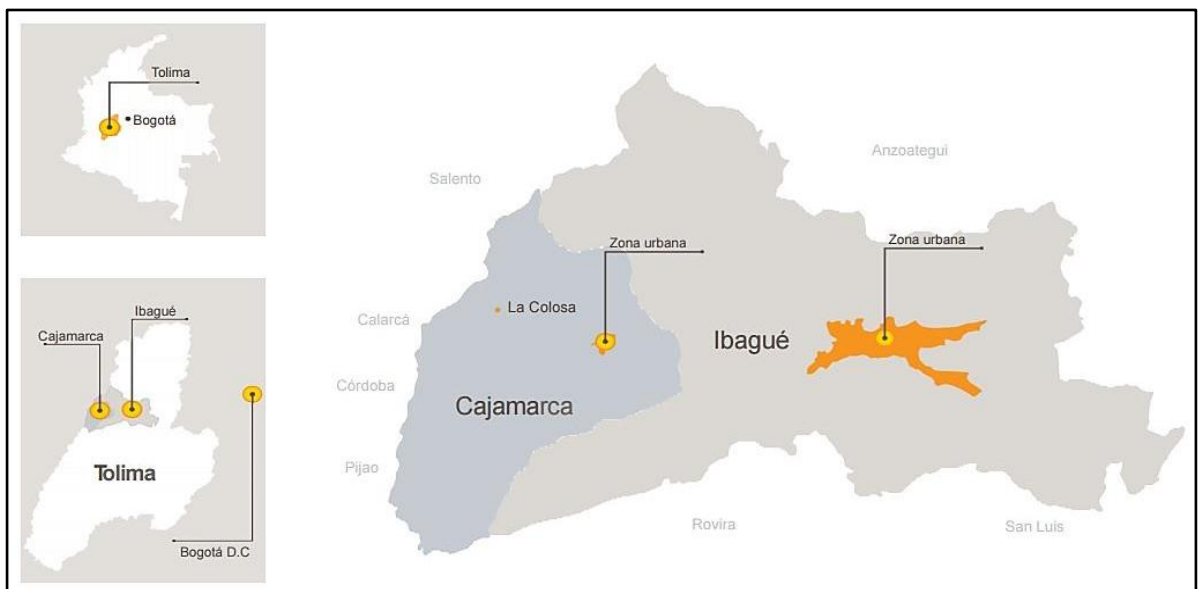
2. GENERALIDADES

En este capítulo se muestra la localización del área de estudio en la cual se desarrollaron las actividades de campo para la toma de muestras e información, partiendo desde la ubicación espacial del proyecto hasta la llegar a una escala más detallada en la cual se pueda observar la distribución de las zonas de importancia dentro del proyecto visitadas durante el transcurso de la práctica..

2.1 LOCALIZACIÓN: ÁREA DE ESTUDIO

El Proyecto de Oro La Colosa (PLC) se encuentra ubicado en el municipio de Cajamarca, situado en el flanco ESTE de la Cordillera Central, hacia el W del departamento Tolima, en límites con el Departamento del Quindío; a 14 km al NW del casco urbano de la población de Cajamarca, a 35 kilómetros de la ciudad de Ibagué y a 150 km al WSW de la ciudad de Bogotá.

Figura 1. Ubicación del Proyecto La Colosa



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti

A la zona de estudio se llega por la vía que comunica a las ciudades de Ibagué y Armenia (vía Panamericana) hasta llegar al sitio La Luisa, para luego continuar por una vía terciaria que conduce al área del proyecto.

2.2 LOCALIZACIÓN: PUNTOS RELEVANTES, SECTORES COLOSA - PINOS - DIAMANTE

Durante la primera etapa del periodo de prácticas, se realizó una serie de actividades de reconocimiento con el fin de lograr ubicar algunos puntos de referencia que son de vital importancia en los sectores de PINOS, DIAMANTE y COLOSA, los cuales permitieron conocer espacialmente la organización del Proyecto La Colosa (en adelante PLC) (Ver Figura 2).

El reconocimiento fue realizado a través de varios recorridos, los cuales se realizaban con fines varios, entre ellos el reconocimiento de sitios de importancia como algunas plataformas en funcionamiento, otras en etapa de cierre de operaciones y algunas plataformas importantes que ya habían culminado su ciclo de operación, a fin de ampliar significativamente la capacidad de ubicación dentro del proyecto, ya que la localización de dichas plataformas, gracias a su densidad en número, permite una ubicación más detallada dentro del área comprendida por el PLC.

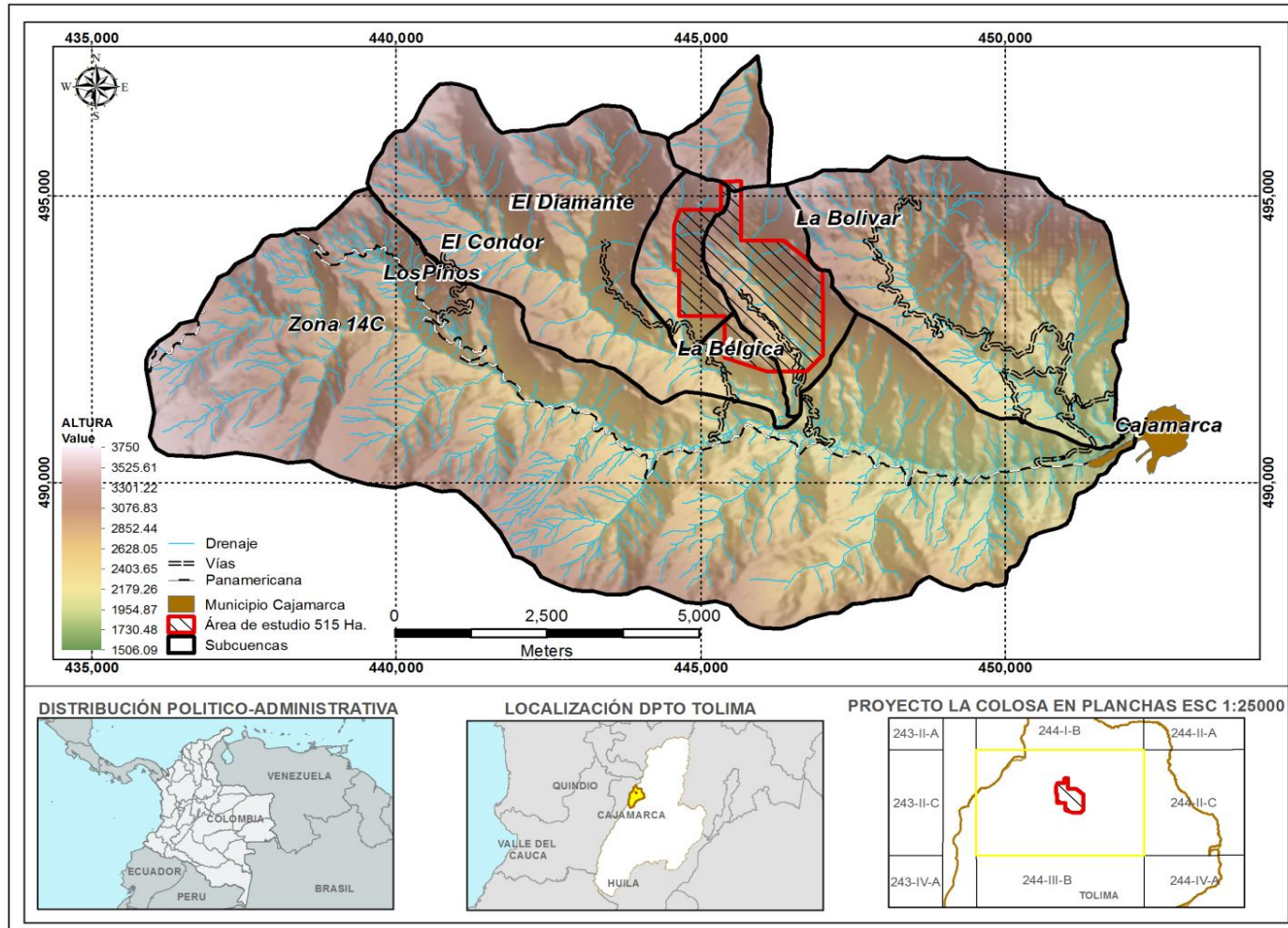
Dentro de los puntos de interés más importantes que se visitaron se encuentran algunos campamentos, bodegas, puntos de acceso, zonas de descargue, plataformas y puntos de control, entre otros, situados en las áreas destinadas para el desarrollo de los sectores del Pit y la zona de infraestructura (Site-11).

Finalmente, con el fin de mostrar dichos sectores en este trabajo, se realizó una recopilación de dichos puntos en un mapa para tener una mejor apreciación de la distribución de dicha información (Ver Figura 3).

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

Figura 2. Ubicación a gran escala del Proyecto La Colosa y sus principales áreas de estudios

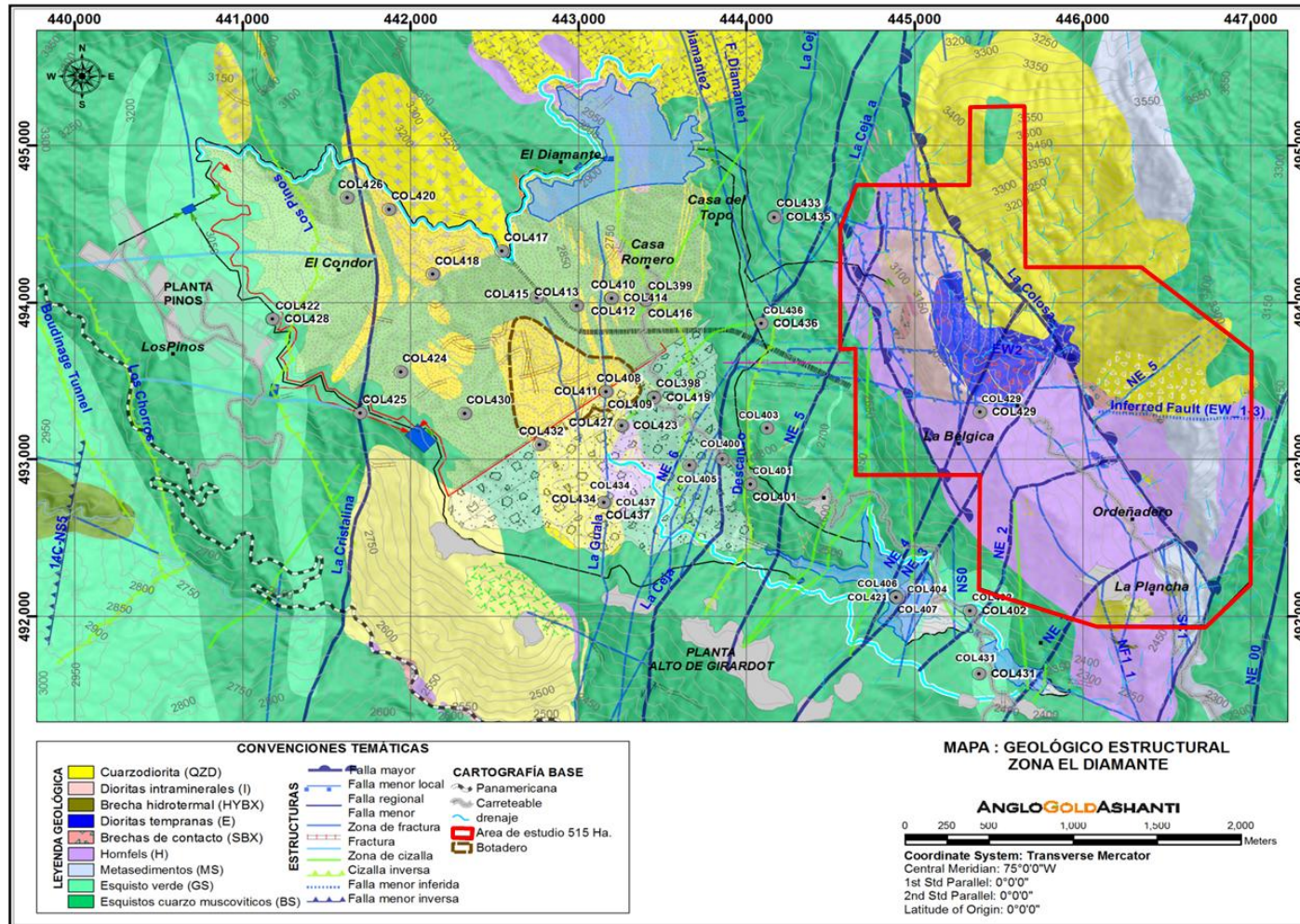


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti Colombia (modificado AGA, 2016).

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

Figura 3. Mapa de Geológico con zonas y puntos de interés de los sectores de Pinos, Diamante y Colosa (LCP)



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti Colombia (modificado AGA, 2016)

3. MARCO GEOLÓGICO PROYECTO LA COLOSA

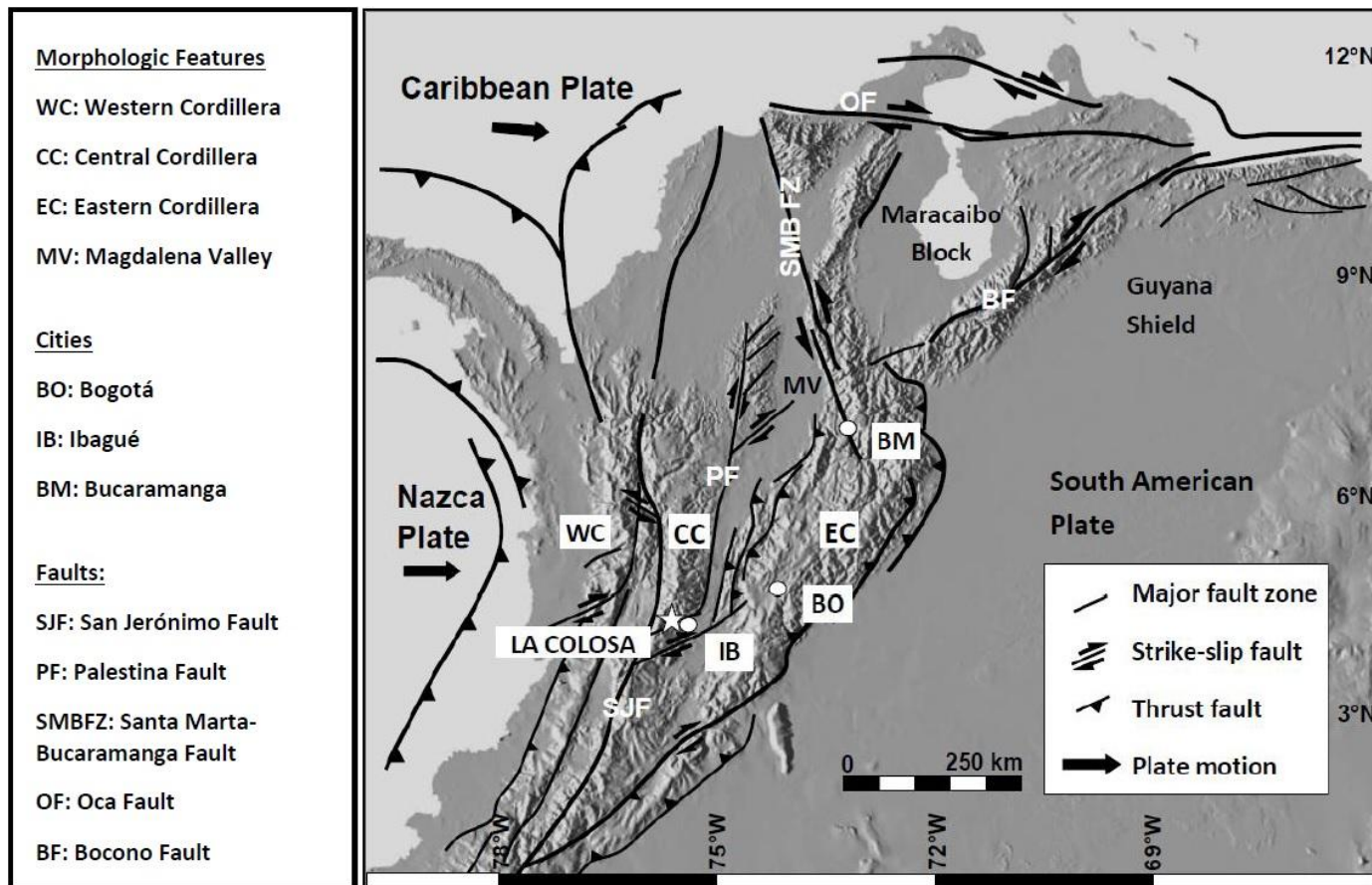
3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

El Proyecto La Colosa, basado en los estudios de Richard H. Sillitoe (Sillitoe, R., 2010; Sillitoe, R., 2000), corresponde a un depósito aurífero tipo pórfido localizado en el municipio de Cajamarca, Tolima, a aproximadamente unos 3000 m.s.n.m en el flanco oriental de la cordillera central (Ver **LOCALIZACIÓN – ÁREA DE ESTUDIO**), la cual tiene una historia compleja de colisión, acreción, fallamiento, magmatismo y subducción (McCourt et al. 1984; Aspden et al., 1987; Restrepo and Toussaint, 1988; Taboada et al., 2000; Kennan and Pindell, 2009). A gran escala, su expresión lito-tectónica y morfo-estructural son el resultado de la orogenia North-Andina y de eventos orogénicos previos a la fase de actividad de la misma (Cediel et al., 2003). (Ver Figura 4).

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

Figura 4. Mapa de la Tectónica del Norte de los Andes, indicando los sistemas de fallas mayores (Simplificado después de Acosta et al., 2004; Cortes et al., 2006; Ingeominas, 2006)



Fuente: Rock mass and structural modelling for the large open pit gold mining project in the Northern Andes: the La Colosa project, Colombia. Horner J. 2013.

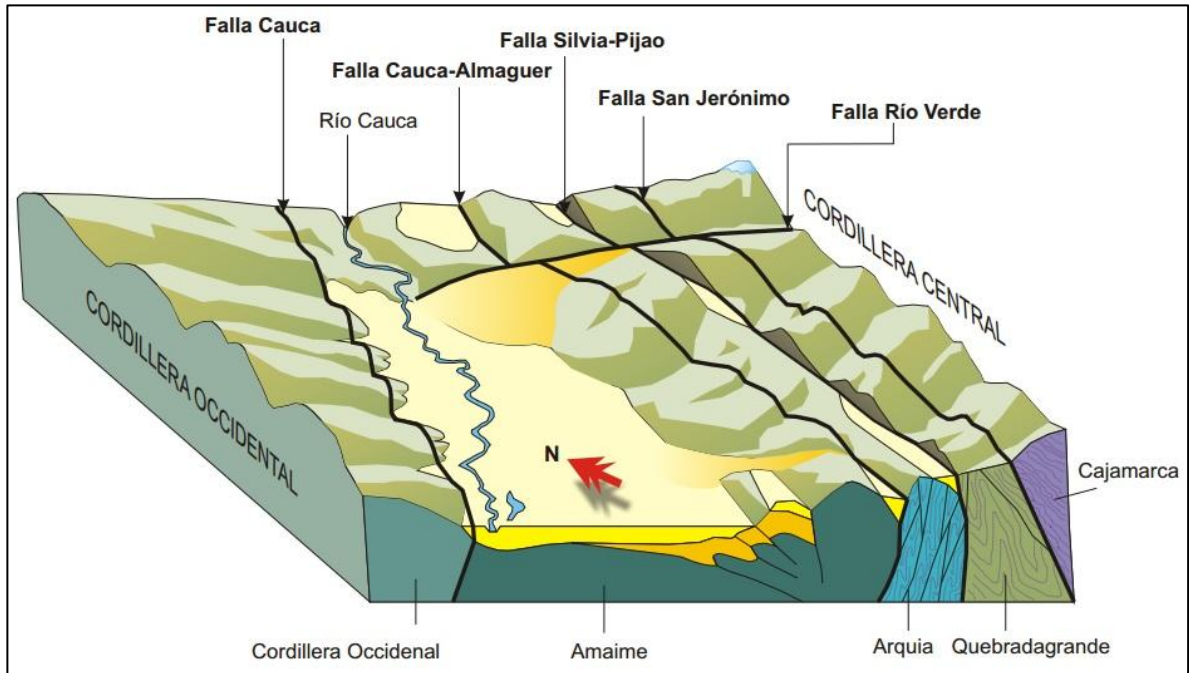
La historia geológica de la cordillera central Colombiana se remonta a la formación del Sistema Montañoso de Los Andes, el cual inicia al final de la era Mesozoica, a finales del Cretácico tardío, por medio de los eventos asociados a la colisión y subducción de la placa Nazca con la placa Sudamericana. Hacia la parte Norte de este sistema montañoso se produce una ramificación en tres (3) cordilleras, Occidental, Central y Oriental, cada una de ellas con una caracterización geológica diferente y su propia historia de formación, causada por la interacción entre las placas Sudamericana, Nazca y Caribe.

El inicio del levantamiento de la cordillera central se encuentra asociado a la fase principal de deformación Andina, provocada por la colisión del bloque de Panamá con el borde noroccidental de la placa Sudamericana. Durante la fase de deformación Andina, la Cordillera Central fue elevada más allá y las rocas más profundas fueron expuestas a lo largo de fallas laterales con tendencias N a NE.

La deformación andina estuvo acompañada por el desarrollo de un arco magmático de composición intermedia-ácida, relacionado al evento de subducción, el cual origina el desarrollo de cuerpos magmáticos a lo largo de las zonas de debilidad estructural asociadas a la tectónica desarrollada en el margen continental (Ver Figura 5).

La cordillera Central Colombiana está constituida por un basamento de rocas deformadas y metamorfoseadas, de edades Paleozoica y Mesozoica, las cuales corresponden principalmente a Esquistos Verdes, Esquistos Negros y Meta-Arenitas. La edad de la deformación dúctil y el metamorfismo regional (facies Esquistos Verdes a facies de anfibolita en algunas zonas) que da origen a estas rocas del basamento no está bien definida por los datos geocronológicos. Estas rocas han sido intruídas por una larga serie de cuerpos magmáticos a lo largo de la Era Mesozoica, los cuales ascienden a raíz de la deformación asociada a la tectónica que se desarrolla a lo largo del margen continental.

Figura 5. Esquema de la distribución de unidades litológicas y sistemas de fallamiento en la Cordillera Central



Fuente: Análisis de deformación tectónica en los piedemontes de las Cordilleras Central y Occidental Valle del Cauca, Colombia Contribuciones Paleosísmicas. Myriam C. López C. Universidad EAFIT.

Durante el desarrollo de estos eventos, se empieza a generar un sistema de fallas regionales de rumbo, de carácter Destral, las cuales presentan una tendencia NE (Sistema de fallas Palestina) y están asociadas a la formación del sistema de pórfido de La Colosa (modificado de Rock Mass And Structural Modelling For The Large Open Pit Gold Mining Project In The Northern Andes: The La Colosa Project, Colombia. Horner J. 2013).

3.2 GEOLOGÍA LOCAL

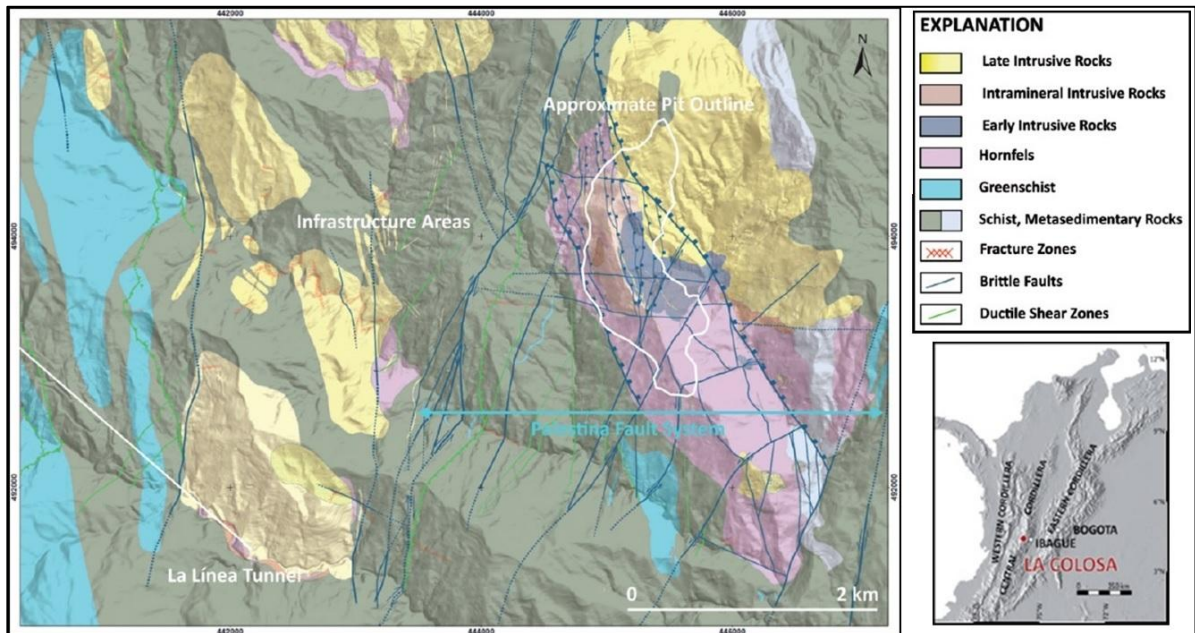
El Stock intrusivo que conforma el pórfido de oro de La Colosa se encuentra emplazado en rocas esquistosas pertenecientes al Complejo Cajamarca, el cual corresponde a una secuencia de rocas metamórficas que incluye Esquistos

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

Verdes, Esquistos Negros y rocas Meta-Areníticas, las cuales hacen parte de las rocas que conforman el basamento de la cordillera central Colombiana.

Figura 6. Mapa de la geología local del Proyecto La Colosa



Fuente: J. Horner/A. Naranjo/J. Weil · Digital data acquisition and 3D structural modelling for mining and civil engineering – the La Colosa gold mining project, Colombia. 2016.

En base a un estudio estructural realizado dentro del área, se han distinguido tres (3) importantes eventos de deformación, los cuales corresponden a dos (2) eventos de deformación dúctil y uno (1) de deformación frágil (Ver Figura 7).

El primer evento de deformación corresponde a un evento de deformación dúctil, denominado **Evento de deformación D1**, caracterizado por un plegamiento cerrado sub-vertical ligeramente inclinado al W, buzando hacia el E, los ejes de los pliegues (b1) tienen dirección N-S. Este plegamiento presenta tendencias de esquistosidad penetrativa (S1) desde el NNE hacia el NNW. Se observa la inmersión de las zonas de cizalla en dirección E y SEE. Los esfuerzos de deformación para este evento ocurren en dirección E-W y W-E. Este evento de

deformación se encuentra asociado a los esfuerzos compresivos generados por el evento de subducción junto con la acreción de terrenos hacia el margen de colisión. Durante esta etapa, también se desarrolla un metamorfismo orogénico (Metamorfismo Regional), igualmente asociado a dicha tectónica.

Posterior al evento de deformación D1, se observa un segundo evento de deformación, denominado **Evento de deformación D2**, el cual se sobrepone al **Evento de deformación D1**, está se caracteriza por la formación de pliegues abiertos con inclinación hacia el E y SE en los ejes de sus pliegues (b2), presenta esquistosidad sub-horizontal (S2). Los esfuerzos de deformación para este evento ocurren en dirección N-S y S-N.

Los eventos de deformación dúctil D1 y D2 se pueden correlacionar con la tectónica de compresión de la orogenia andina, cuando varios terrenos del Pacífico son adosados a lo largo del margen noroccidental de la placa Sudamericana formando zonas de sutura con orientación N y NE.

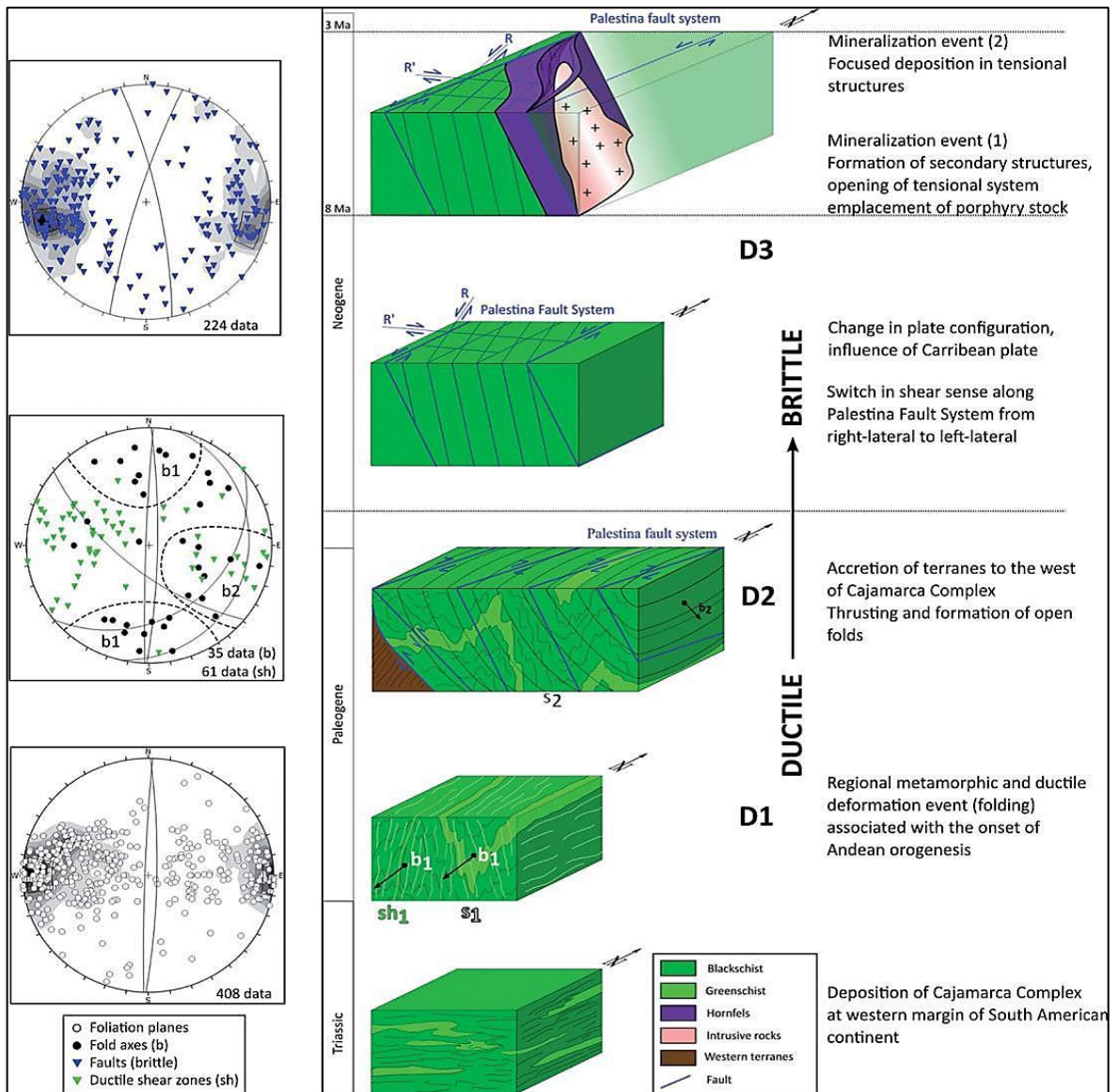
Continúa la deformación y la elevación de la Cordillera Central marcó la transición de dúctil a un ambiente frágil. Se generan zonas de fallas regionales, incluido el sistema de fallas de rumbo Palestina, con orientación NNE, se reactivaron y se produjo un cambio en el sentido de cizalla pasando de ser fallas de rumbo Dextro-Laterales a fallas de rumbo Sinestro-Laterales. El nuevo campo de tensión da origen al tercer evento de deformación, denominado Evento de deformación D3, con fuerzas de compresión cambiantes desde una dirección W-E a una dirección NW-SE, provocada por la migración hacia el este de la Placa del Caribe en el Mioceno.

El nuevo entorno tectónico causó el desarrollo de nuevas estructuras secundarias, incluyendo fallas de rumbo con orientación W a NWW, y la reactivación de las estructuras con tendencia N previamente formados dentro del sistema de fallas

Palestina. Las estructuras frágiles muestran, en general, las características extensionales que controlan el emplazamiento del complejo magmático en La Colosa.

Este fallamiento extensional frágil y fracturas (grietas de tensión) continuaron durante las diversas etapas hidrotermales y controlan la formación de vetillas (Modificado de J. Horner/A. Naranjo/J. Weil · Digital data acquisition and 3D structural modelling for mining and civil engineering – The La Colosa gold mining project, Colombia. 2016).

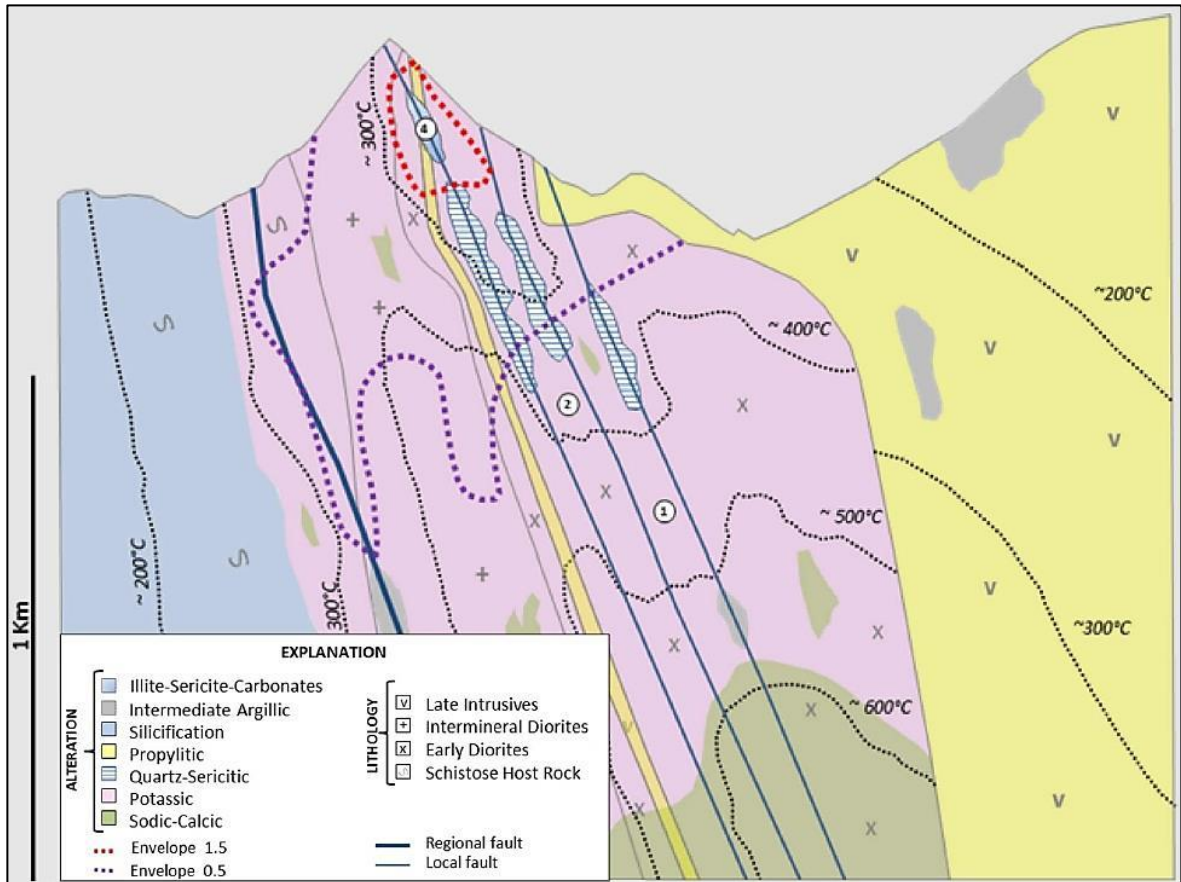
Figura 7. Mapa de la geología local del Proyecto La Colosa



Fuente: J. Horner/A. Naranjo/J. Weil · Digital data acquisition and 3D structural modelling for mining and civil engineering – the La Colosa gold mining project, Colombia. 2016.

Respecto al complejo magmático de La Colosa, se observa una inclinación hacia el E a lo largo del cuerpo intrusivo, ocasionada gracias a que las zonas de debilidad por las cuales se escapa el fluido magmático se encuentran buzando hacia esa dirección.

Figura 8. Perfil esquemático en dirección W-E del complejo magmático intrusivo de La Colosa



Fuente: J. Horner/A. Naranjo/J. Weil · Digital data acquisition and 3D structural modelling for mining and civil engineering – the La Colosa gold mining project, Colombia. 2016.

En el área del proyecto La Colosa se han identificado tres (3) pulsos magmáticos, los cuales han sido diferenciados en función del orden de emplazamiento (Ver Figura 8). Estos eventos intrusivos han sido nombrados denominados **Evento Intrusivo Temprano**, **Evento Intrusivo Intramineral**, y **Evento Intrusivo Tardío**, siendo el evento Temprano el de más alta Ley Mineral (fluido de composición Intermedia), pero el de menor tamaño, y el Tardío el de menor Ley Mineral (fluido de composición Ácida), pero el de mayor tamaño. Las rocas intrusivas que conforman el cuerpo magmático de La Colosa se producen como un centro

intrusivo complejo, así como diques tabulares que se extiende hacia fuera desde el centro. Las rocas del basamento, como ya fue mencionado, corresponden a esquistos y rocas meta-sedimentarias, desarrollado a partir de metamorfismo de contacto, al igual que la aureola de contacto en la cual la roca sufre una transformación en Hornfels. Una alteración hidrotermal posterior afectó a las rocas del basamento, así como varias rocas intrusivas. La datación radiométrica de edad ha dado edades de aproximadamente 8 Ma (dataciones por método U-Pb y K-Ar) para el complejo intrusivo.

La mineralización de oro se produce en forma diseminada y en vetillas dentro de las rocas intrusivas, así como dentro de los Hornfels adyacentes.

En el componente estructural se identificaron cuatro (4) corredores principales,

1. Corredor NW: Falla Colosa (Normal, Local) y Falla N-S1 (Normal, Local)
2. Corredor NE: Falla La Ceja (Sinestral con un componente Normal, Regional)
3. Corredor E-W: EW1, EW2, EW3, EW4, EW5.
4. Corredor N-S: Falla La Guala (Rumbo, Local) y La Cristalina (Rumbo, Local).

Respecto a la alteración hidrotermal y a la mineralización, se compara con la distribución de alteración – mineralización expuesta en el modelo desarrollado por Richard H. Sillitoe para Sistemas de Pórfidos (Sillitoe, 2000; Sillitoe, 2010; Ver Figura 9). Para el caso de La Colosa, se tienen tres (3) tipos de alteración hidrotermal, las cuales se encuentran asociadas a la actividad magmática que origina este depósito:

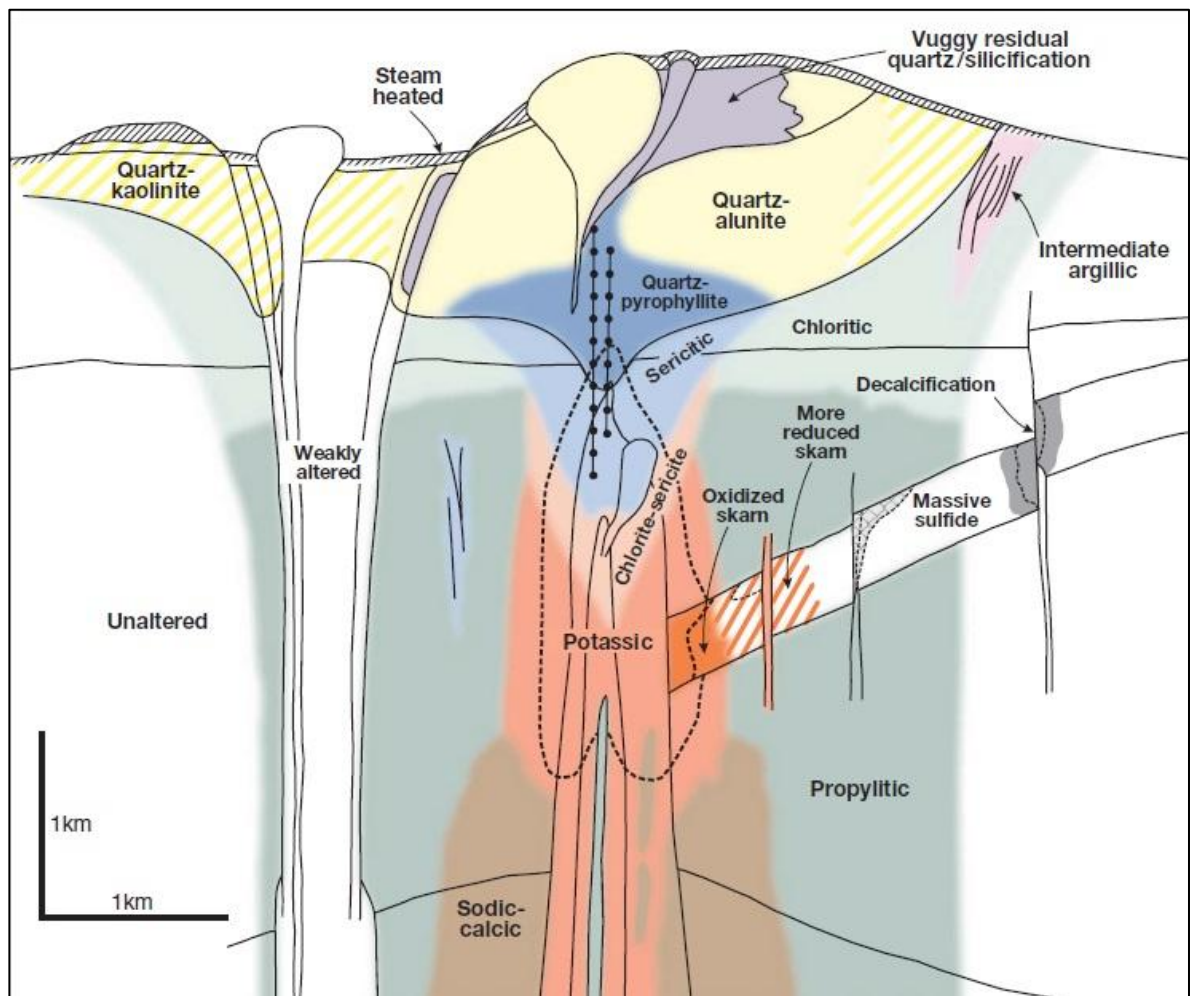
1. Alteración Potásica (principalmente biotita secundaria), que se produce como un reemplazo penetrante de minerales ferromagnesianos y de la matriz en las etapas Temprana e Intramineral del emplazamiento del pórfido en la roca.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

- Alteración Sódico-Cálcica (principalmente albita ± actinolita ± epidota), la cual está confinada en parches hacia la zona inferior de las etapas de emplazamiento Temprana e Intramineral del pórfido La Colosa.
- Alteración Propilítica (principalmente clorita ± epidota ± albita ± carbonatos) la cual está concentrada dentro de la etapa magmática Tardía. Se produce una multi-fase de silicificación dentro de las rocas metamórficas esquistosas.

Figura 9. Modelo generalizado de las zonas de Alteración y Mineralización para un sistema de pórfido



Fuente: Porphyry Copper Systems. Richard H. Sillitoe. 2010.

Seis tipos principales de vetillas se han identificado en la zona del proyecto La Colosa. Estas vetillas se encuentran concentradas dentro de los cuerpos intrusivos, así como en las rocas metamórficas. La secuencia vetilleo es (de mayor a menor): Tipo EB, tipo A, tipo B, tipo M, tipo S, tipo D, y tipo CC, con un tenor de oro que oscila entre 0,5 a 1,0 g/Ton.

Estudios preliminares en la mineralogía, los conjuntos de inclusiones fluidas y la geoquímica indican que un evento hidrotermal más joven sobrepone el evento de mineralización tipo pórfido anterior. Estas vetillas más jóvenes están conformadas por cuarzo de textura coloforme-crustiforme \pm adularia \pm oro con halos estrechas de illita \pm sericita \pm carbonatos. Los cambios de Temperatura y Salinidad en el ambiente marcan el alto grado de mineralización en esta zona (> 2 g/Ton de oro promedio), la cual es espacialmente y genéticamente controlada por un corredor estructural, de cortes de tensión, con tendencia N, cruzando el complejo magmático y extendiéndose hacia las rocas metamórficas más hacia el norte (modificado de *La Colosa Au-Porphyry Deposit, Colombia: New Insights On The Structural Control And Ore-Forming Processes In The Northern Andes*. Naranjo A., Horner J. 2015).

4. MARCO TEÓRICO

Los temas que se van a mostrar en este capítulo hacen referencia a los conceptos básicos de hidrogeología y geotecnia que van a ser necesarios para el entendimiento del desarrollo de este trabajo, ya que es importante conocer un poco sobre los aspectos que se involucran, con el fin de entrar un poco en contexto acerca de lo que se va a tratar.

Para empezar, es necesario recordar que el movimiento del agua subterránea está controlado por tres fuerzas principales: gravedad, atracción molecular y diferencias de densidad, pero estas no pueden actuar si el medio no lo permite, por este motivo se puede atribuir el control del flujo subterráneo a dos factores muy importantes que son inherentes en la roca como la porosidad y la permeabilidad (conductividad hidráulica).

4.1 POROSIDAD

La porosidad es un factor indispensable en el momento de transportar fluidos a través de la estructura de una roca y, de manera directa, es una variable importante que se debe tener en cuenta para la ejecución de ciertos tipos de ensayos hidrogeológicos.

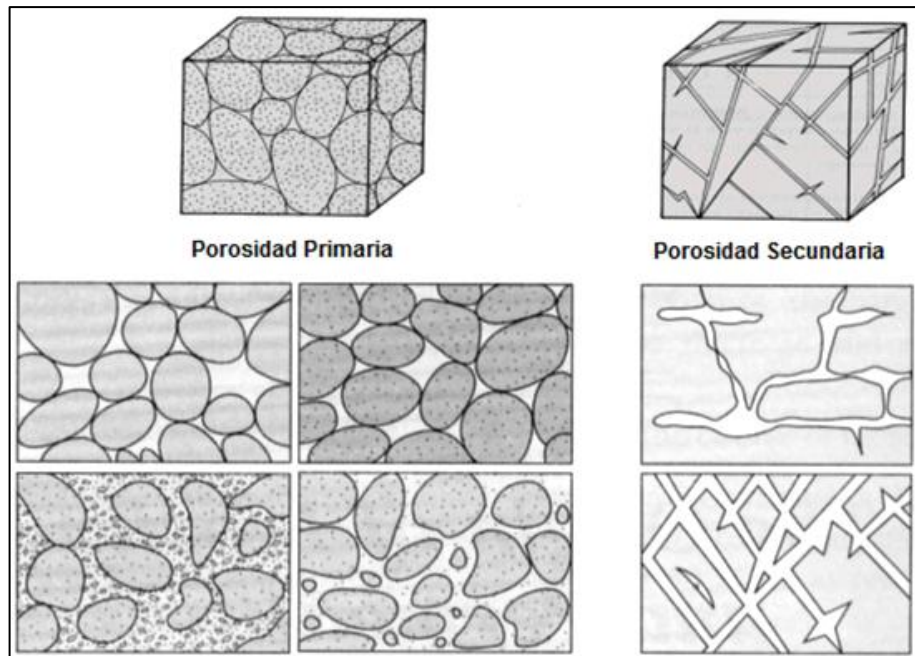
Al hablar de porosidad se hace referencia al volumen de los poros por cada unidad volumétrica de formación, es decir, la fracción del volumen total de una muestra que es ocupada por vacíos. Esta porosidad puede ser clasificada de dos maneras según su origen y según la comunicación que hay entre sus poros.

Debido a que la fuente estudiada en el PLC hace referencia a un material que no presenta poros, o si los llegase a tener no hay una intercomunicación entre ellos que haga efectivo el paso de un fluido a través de la roca, debido a que el material

estudiado corresponde a un macizo rocoso y es bien sabido que las rocas ígneas y metamórficas son materiales prácticamente impermeables y que la única forma en que estos materiales puedan permitir el paso de algún fluido a través de su estructura es por medio de fracturas, es decir, a través de una porosidad inducida. De acuerdo al factor que de origen a la porosidad que presenta el material, esta puede ser clasificada como **Porosidad Primaria o Porosidad Intergranular y en Porosidad Secundaria o Porosidad Inducida** (Ver Figura 10).

La Porosidad Primaria o Intergranular es aquella que se origina durante el proceso de deposición del material que da origen a la roca (este tipo de porosidad es propia de las rocas sedimentarias), mientras que la Porosidad Secundaria, o Inducida, es aquella que se origina por algunos procesos naturales o artificiales posteriores a la formación de la roca (esta porosidad puede ocurrir en cualquier tipo de roca).

Figura 10. Porosidad Primaria y Porosidad Secundaria



Modificado de: <http://www.artinaid.com/en/2013/04/que-es-un-acuifero/>

Para el caso de estudio, como ya fue mencionado, el área comprendida por el PLC se encuentra situada sobre un macizo rocoso, compuesto por rocas de origen ígneo y metamórfico, el tipo de porosidad que se va a trabajar es netamente porosidad secundaria, es decir porosidad dominada por fracturas y discontinuidades.

El fracturamiento de un material puede ser generado por la concentración de esfuerzos en zonas de baja plasticidad, por pérdida de volumen, por cambios de temperatura, durante deformación compresional o extensional. Estas fracturas originan un aumento en el volumen de espacios que pueden contener fluidos, lo que se traduce en un aumento en la porosidad o, en el caso de rocas impermeables, el origen de la misma.

En el área destinada por el PLC como el área para el desarrollo de obras de infraestructura (Site-11) tiene un dominio estructural muy amplio, controlado por fallas primarias como La Guala, La Ceja, La Cristalina, entre otras, las cuales proporcionan espacios que facilitan el flujo del agua subterránea a través de ella haciendo necesario el estudio de su comportamiento y la cantidad de flujo que estas pueden llegar a permitir.

Mediante estudios como el logueo geotécnico, se identifican dichas estructuras con el fin de establecer las zonas de interés para la ejecución de ensayos que permitan evaluar las conductividades hidráulicas de dichos sectores.

4.2 PERMEABILIDAD

El concepto de permeabilidad, mejor conocido como conductividad hidráulica, hace relación a la capacidad que tiene un material de transmitir un fluido o permitir su movimiento a través de su estructura.

En rocas permeables saturadas, el flujo unidimensional está gobernado por la Ley de Darcy, la cual describe, con base en experimentos ejecutados en laboratorio, las características del movimiento del agua a través de un medio poroso.

La expresión matemática que describe la Ley de Darcy corresponde a:

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot \nabla h}{L}$$

Q: Gasto, Descarga o Caudal (m³/s).

K: Coeficiente de Permeabilidad.

A: Área de la sección, en m².

∇h: Variación de altura del nivel piezométrico.

L: Distancia de recorrido.

En geotecnia es más común el uso del concepto de *conductividad hidráulica (o coeficiente de permeabilidad)*, el cual puede ser definido como la velocidad de descarga de agua en condiciones de flujo laminar a través de un área transversal unitaria de un medio permeable bajo un gradiente hidráulico unitario y en condiciones estándar de temperatura.

El coeficiente de conductividad hidráulica es proporcional a la porosidad del medio, es decir, entre más porosa sea la roca o entre más fracturas y discontinuidades tenga, mayor será la conductividad.

4.3 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Cuando una formación rocosa posee dichas características mencionadas (porosidad y conductividad hidráulica), es decir, puede almacenar y transmitir un fluido a través de su estructura, esta formación se conoce como un Acuífero.

Un acuífero hace referencia a una capa de agua que se almacena y transmite a través de un estrato rocoso permeable, saturando sus poros o fracturas permitiéndole fluir a través de él. Las profundidades a las cuales se almacenan pueden variar desde muy someros, casi superficiales, e incluso llegar a alcanzar profundidades de hasta 3 km.

Las formaciones ígneas y metamórficas por lo general no dan paso al agua debido a que son formaciones de rocas muy compactas y casi impermeables, las cuales sólo permiten el paso del agua a través de grietas o discontinuidades presentes en ellas, tal y como ocurre en el área de estudio para el Site-11 del PLC.

El comportamiento del acuífero a través de los espacios porosos de la roca dependerá de la disposición de las fracturas, la rugosidad (Roughness), el tipo de relleno (Infill Type) y del espesor del relleno (Infill Thickness), (ver **LOGUEO GEOTÉCNICO**). Si los espacios fracturados son lo suficientemente amplios y su relleno permite el flujo, el agua circulará libremente a través de ellos dirigida bajo sus propias características (capilaridad, tensión superficial) e impulsadas por la gravedad.

Los materiales hidrogeológicos se clasifican en función de su capacidad para almacenar y transmitir agua, recibiendo el nombre de:

- a) **Acuífero**: Hace referencia a una formación geológica que almacena volúmenes de agua que se mueven con facilidad a través de él (por ejemplo, arenas y gravas).
- b) **Acuitardo**: Hace referencia a una formación geológica que almacena volúmenes de agua que se mueve lenta e ineficientemente a través de ella (por ejemplo, limo, arcilla).
- c) **Acuicludo**: Hace referencia a una formación geológica que almacena agua que prácticamente no se mueve (por ejemplo, rocas compactas).

d) **Acuifugo:** Hace referencia a una formación geológica que no es capaz de almacenar agua (por ejemplo, granito inalterado).

En el área comprendida por el Proyecto La Colosa, debido a sus características hidrogeológicas, se determina que el tipo de unidad hidrogeológica que domina la parte del macizo rocoso sobre la cual se sitúa el Site-11 corresponde al tipo Acuitardo.

4.4 LOGUEO GEOLÓGICO

La metodología de Logueo Geológico que se empleó consiste en la ejecución de un Logueo Geológico Rápido, en el cual se realiza una caracterización de los diferentes parámetros geológicos que se presentan en los testigos de roca, bajo el criterio definido por Richard H. Sillitoe para Sistemas de Pórfidos (Sillitoe, R., 2010; Sillitoe, R., 2000) para un depósito tipo pórfido.

En este sistema de logueo rápido se evalúan los siguientes parámetros:

- Litologías.
- Alteraciones.
- Vetillas por metro.
- Porcentaje de sulfuros.
- Grado de meteorización.

Las litologías presentes en el PLC han sido agrupadas, según su localización geográfica, en 3 sectores (Colosa, San Antonio y Diamante), los cuales presentan diversas litologías, adicionalmente se tienen las litologías correspondientes al complejo Cajamarca, las cuales conforman la Roca Caja del sistema.

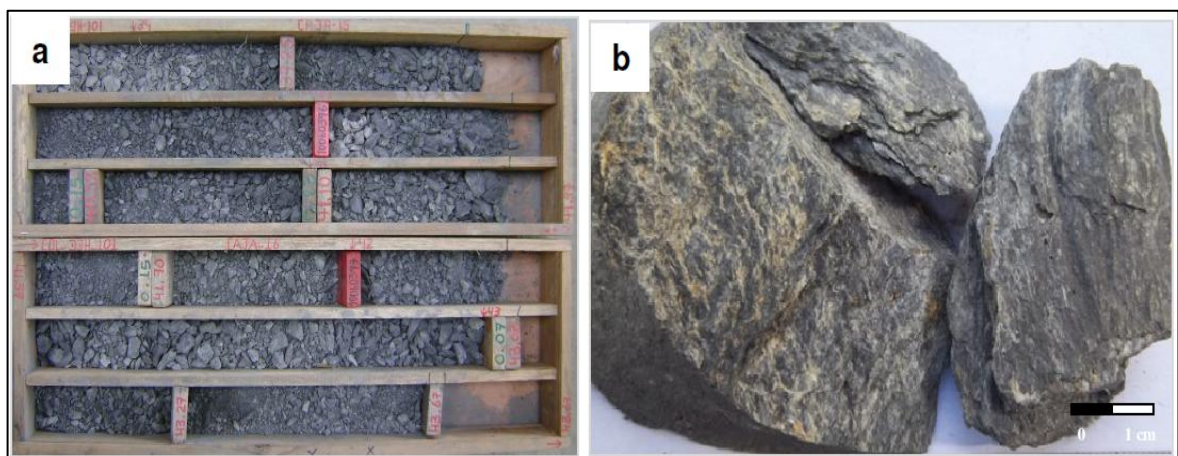
Esta metodología de logueo se realizó en las plataformas varias plataformas (como la Zk20a y Zu2a, correspondientes a los pozos 434 y 435, inclinados a 60° y 90° respectivamente), ubicadas en el sector del Site-11. Las litologías observadas corresponden principalmente a Hornfels, Esquistos Verdes, Esquistos Negros, Cuarzodiorita y Dacita, las cuales hacen parte de las litologías que conforman la Roca Caja e Intrusivos del sector Diamante.

4.4.1 Roca Caja

- ESQUISTOS (S)

Esquistos verdes y negros con alteración hidrotermal y/o silicificación muy débil a ausente. Alta fisilidad y foliación clara, baja dureza y deja huella al tacto (Ver Figura 11).

Figura 11. a) Esquisto negro con alta fisilidad. COL101; b) Esquisto negro con foliación visible COL015

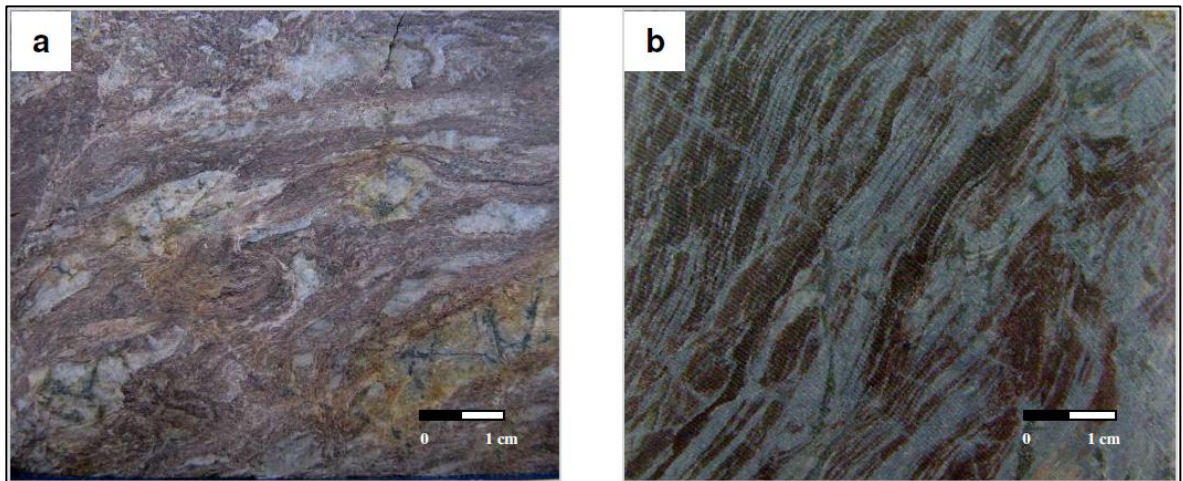


Fuente: MANUAL DE LOGUEO GEOLOGICO LCP.

- HORNFELS (H)

Hornfels con alteración hidrotermal potásica de biotita secundaria, sódico-cálcica y/o silicificación moderada a fuerte, baja fisilidad, pérdida total de la textura original de la roca o relictos de la foliación, bandeamiento, deformación y alta dureza (Ver Figura 12).

Figura 12. a) Hornfels con alteración potásica de biotita y alta deformación COL021; b) Hornfels con alteración sódico cálcica y potásica se preserva el bandeamiento COL098



Fuente: MANUAL DE LOGUEO GEOLOGICO LCP.

- METASEDIMENTOS (MTSD)

Metasedimentos que varían entre metaarenitas y metalodolitas. La alteración es débil y puede ser sericítica, sódico cálcica, potásica o silicificación. Presentan baja deformación.

Por políticas internas de confidencialidad con la empresa AngloGold Ashanti, solo se muestran las litologías correspondientes al sector de Diamante, el cual corresponde al área del Site-11.

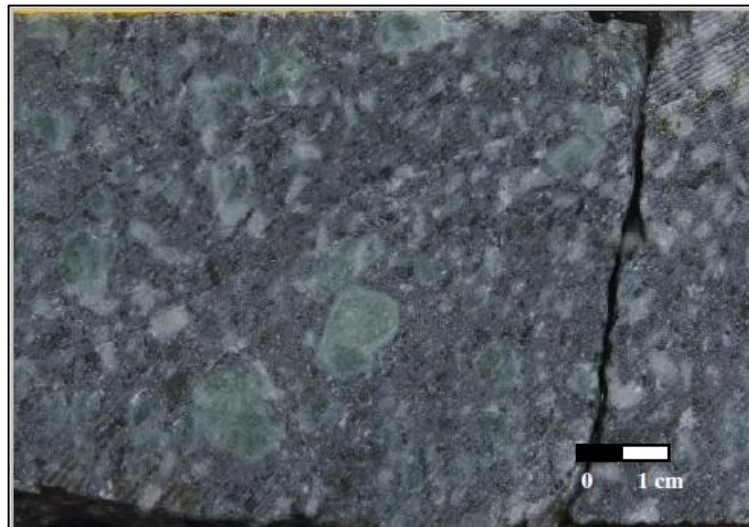
4.4.2 Intrusivos El Diamante

4.4.2.1 Intrusivo Tardío

- DIORITA TARDÍA (LDD1)

Diorita porfirítica de grano medio con 15-20 % de fenocristales de plagioclasa y hornblenda embebidos en una matriz de grano fino a afanítica. Los fenocristales de plagioclasa están alterados a illita y las hornblenda a cloritas (Ver Figura 13).

Figura 13. Diorita porfirítica LDD1 con fenocristales de plagioclasa alterados a illita y de hornblenda alterados a clorita COL306

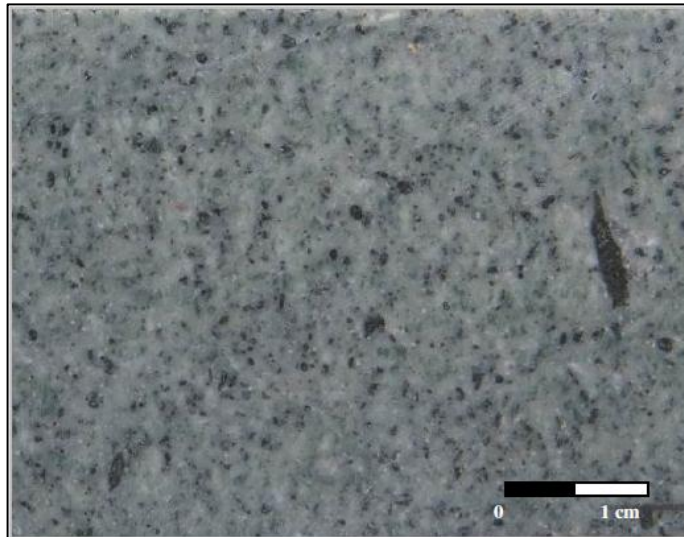


Fuente: MANUAL DE LOGUEO GEOLÓGICO LCP.

- DIORITA TARDÍA (LDD2).

Diorita porfírica de grano fino compuesta por fenocristales de plagioclasa y hornblenda embebidos en una matriz de grano muy fino a afanítica, los fenocristales de plagioclasa están alterados a illita y los de hornblenda se alteran a clorita. La asignación de números no corresponde con leyes de corte, fueron establecidos con el propósito de diferenciar los cambios texturales (Ver Figura 14).

Figura 14. Diorita porfírica LDD2 con fenocristales de plagioclasa alterados a illita y de hornblenda alterados a clorita COL306

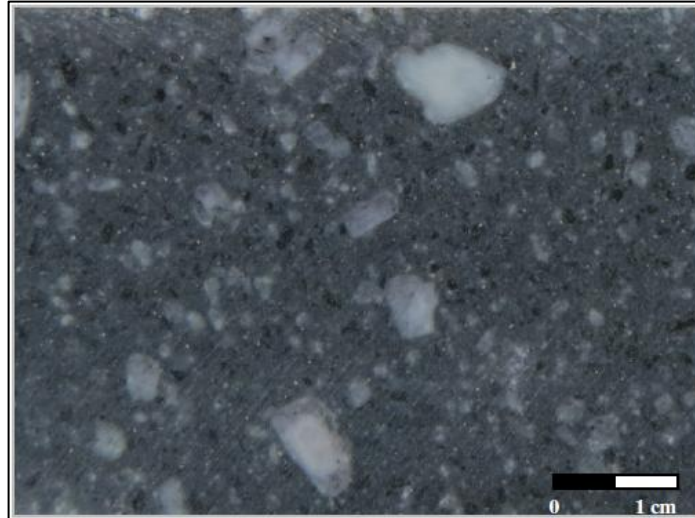


Fuente: MANUAL DE LOGUEO GEOLÓGICO LCP.

- CUARZODIORITA (LQZDD).

Cuarzodiorita porfírica de grano grueso con 10-20% de fenocristales de plagioclasa y hornblenda embebidos en una matriz de grano fino a afanítica, las hornblendas están alteradas a clorita (Ver Figura 15).

Figura 15. Cuarzodiorita porfirítica LQDD compuesta por fenocristales de plagioclasa y de hornblenda alterados a clorita COL306



Fuente: MANUAL DE LOGUEO GEOLÓGICO LCP.

4.4.3 Vetilleo. El vetilleo se describe de acuerdo a la cantidad de vetillas por metro y a los diferentes tipos de vetillas asociados al pórfido.

Veinlets/m: Se da en número de vetillas por metro. Por ejemplo si en un intervalo de dos metros se cuentan 30 vetillas la densidad de vetilleo será $30/2 = 15$ vetillas por metro.

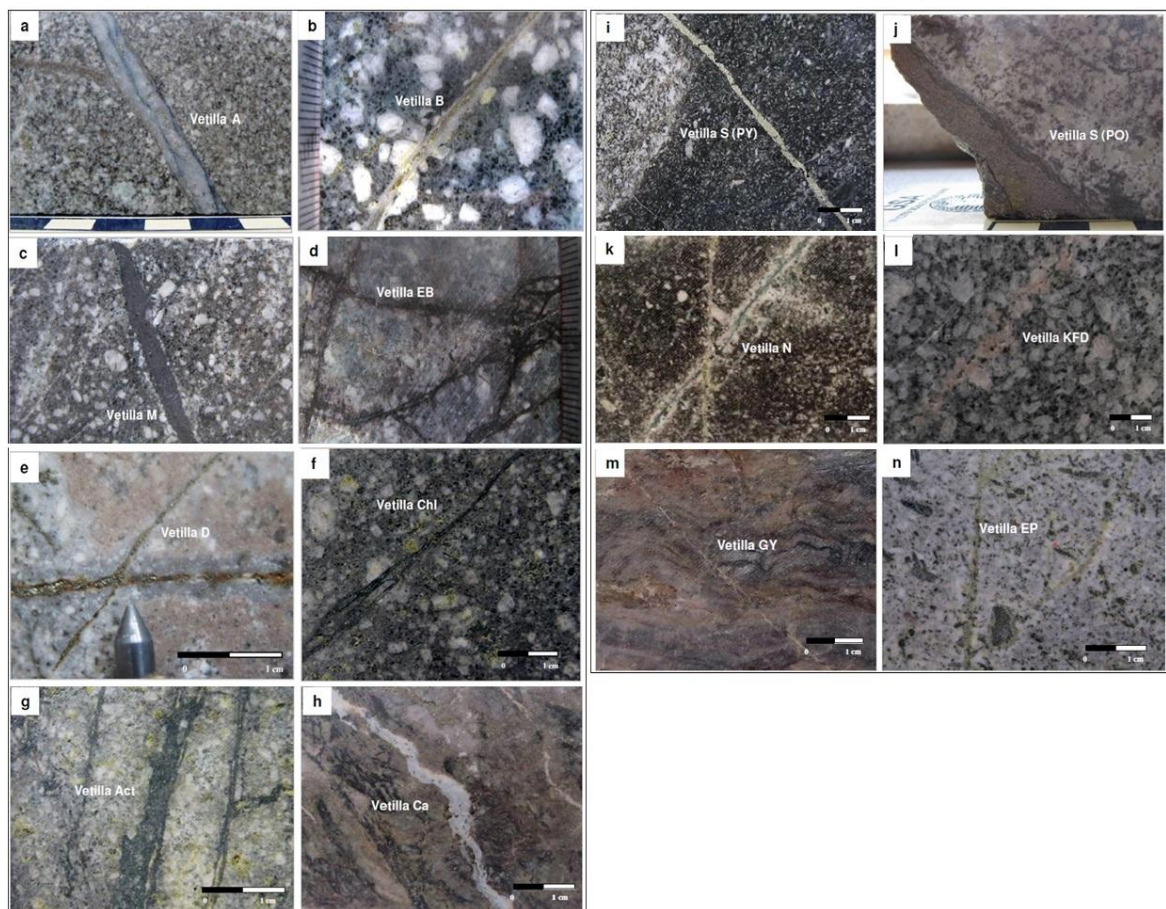
Tipos de vetillas: Se asigna un valor a cada tipo de vetilla que representa la abundancia en el intervalo con un rango de 0 a 10, siendo 10 el valor máximo para la suma de todos los tipos de vetillas (Ver Figura 16). De acuerdo al orden de la hoja de logueo las vetillas se clasifican así:

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

- **Vetillas A:** Vetillas de cuarzo vítreo-granular ocasionalmente sinuosas. Pueden contener también sulfuros y minerales ganga con o sin halo de alteración. QZ+KFD+MT+BN+PY+ CP+MO+AC
- **Vetillas B:** Igual o muy similares a las “A” pero con sutura de sulfuros, con o sin halo de alteración.
- **Vetillas M:** Constituidas principalmente por magnetita con o sin actinolita, Ej: MT+AC+KFD, al igual que MT+AB, son consideradas vetillas tipo M.
- **Vetillas de biotita (EB):** Vetillas constituidas por biotita fina, ocasionalmente se observan como “halo” en vetillas A, pero indican un evento posterior de apertura y relleno de esta estructura.
- **Vetillas D:** Compuestas principalmente por cuarzo y pirita con un halo de alteración cuarzosericítica. QZ+PY
- **Vetillas Clorita (Chl):** Son vetillas constituidas por clorita en ocasiones con centro de sulfuros, con o sin epidota.
- **Vetillas de Actinolita (Act):** Son vetillas compuestas por actinolita con o sin sulfuros, generalmente se observan rectilíneas. AC+PY
- **Vetillas de Calcita (Ca):** Vetillas constituidas principalmente por calcita. CA+QZ.
- **Vetillas de Sulfuros (S):** Son vetillas constituidas por sulfuros que pueden ser pirita, pirrotina y melnicovita en ocasiones con trazas de calcopirita y molibdeno. PY+PO+SKPY+CP+MO.
- **Vetillas N:** Se consideran vetillas N aquellas estructuras que tienen un mineral sódico como la albita y uno cálcico como la actinolita con o sin centro de sulfuros. AC+AB+EP+MT+PY y/o vetillas compuestas por albita con o sin centro de sulfuros. AB+PY
- **Otras vetillas (Ep), (Gy) y (KFD):** En otras vetillas se consideran vetillas de epidota, vetillas de yeso y vetillas de feldespato potásico, estas últimas pueden estar acompañadas de cuarzo.

Figura 16. Tipos de Vetillas. a Vetilla tipo A en E1 COL001 b Vetilla tipo B en E2 COL005 c Vetilla tipo M en EBX2 COL038 d Vetillas EB en EBX2 COL034 e Vetilla tipo D en E1 COL003 f Vetillas de Chl en IBC COL239 g Vetilla de Act en IBX COL239 h Vetillas de carbonatos en hornfels COL232 i Vetilla tipo S compuesta por PY en E3 COL002 j Vetillas tipo S compuesta por PO en E2 COL004 k Vetilla tipo N en IBX COL259 l Vetilla tipo KFD en DA COL267 m Vetilla de GY en hornfels COL179 n Vetilla tipo EP en I2 COL262



Fuente: MANUAL DE LOGUEO GEOLÓGICO LCP.

4.4.4 Alteración. Respecto a la alteración presente en la roca, se registra el resumen de las asociaciones de alteraciones de acuerdo a la abundancia de los minerales registrados (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de Alteraciones

ALTERACIÓN	DESCRIPCIÓN	ENSAMBLE	CÓDIGO DHLOGGER
Potásica	Caracterizado por biotita secundaria y feldespato potásico, aparece como relleno de vetillas, en halos de vetillas y reemplazando la matriz de la roca. Domina la biotita secundaria.	KBI±KFD	POT
Sódico-cálcica	Se presenta en parches, vetillas y halos de vetillas que contienen actinolita y albita.	AB+AC	CANA
Actinolítica (Cálcica)	Se utiliza cuando no se completa el ensamble sódico cálcico, solo se presenta AC	AC	ACT
Albitización (Sódica)	Se utiliza cuando no se completa el ensamble sódico cálcico, solo se observa AB	AB	ALB
Clorítica	La clorita se presenta como mineral retrogrado, reemplaza anfíboles y biotita.	CHL	CHL
Propilítica	La clorita se encuentra reemplazando minerales máficos, parches de albita y epidota y calcita diseminadas.	CT±EP±CA±AB±AC	PROP
Cuarzo - Sericítica	El cuarzo y la sericita se encuentran en parches y halos de vetillas D.	QZ+SE	QTZSER
Sericítica	Sericita en parches	SE	SER
Silicificación	Reemplazamiento de sílice en la roca.	SI	SI
Argílica Intermedia	Se caracteriza por la presencia de illita, esmectita y sericita. Para poder utilizar este ensamble debe estar la asociación Illita + esmectita. Esta alteración borra la textura original de la roca.	ILL+SM±SE	INTARG
Argílica-Oxidación Supérgena	Alteración en superficie de la roca, formación de arcillas y óxidos.	KA+FEOX	ARGOXSUP

ALTERACIÓN	DESCRIPCIÓN	ENSAMBLE	CÓDIGO DHLOGGER
Argílica	Alteración asociada a zonas de falla y cizalla. Se caracteriza por kaolinita que puede o no estar acompañada de sericita	KA±SE	ARG
FeOx	Oxidación supérgena y/o por fracturas en profundidad. Reemplaza FeoxSup.	FEOX	FEOX

Fuente: MANUAL DE LOGUEO GEOLÓGICO LCP.

4.5 LOGUEO GEOTÉCNICO

El logueo geotécnico comprende una de las bases más importantes para el desarrollo de esta práctica, ya que el enfoque que se desarrolla tiene como objetivo aportar información que ayude en el desarrollo del diseño de la mina y de las aéreas de infraestructura, ya que permite garantizar las condiciones del terreno sobre el cual se van a asentar dichas obras civiles.

Para el Proyecto La Colosa, la parte del estudio geotécnico determina la estabilidad del macizo rocoso sobre el cual se encuentra ubicado el proyecto, y a su vez, constituye la base para los estudios hidrogeológicos ya que, por ser un macizo rocoso, el flujo de aguas subterráneas ocurre a través de las fracturas, de esta manera, el logueo geotécnico permite determinar las zonas de interés para el enfoque de los ensayos de permeabilidad (ver **ENSAYOS DE PERMEABILIDAD IN-SITU**).

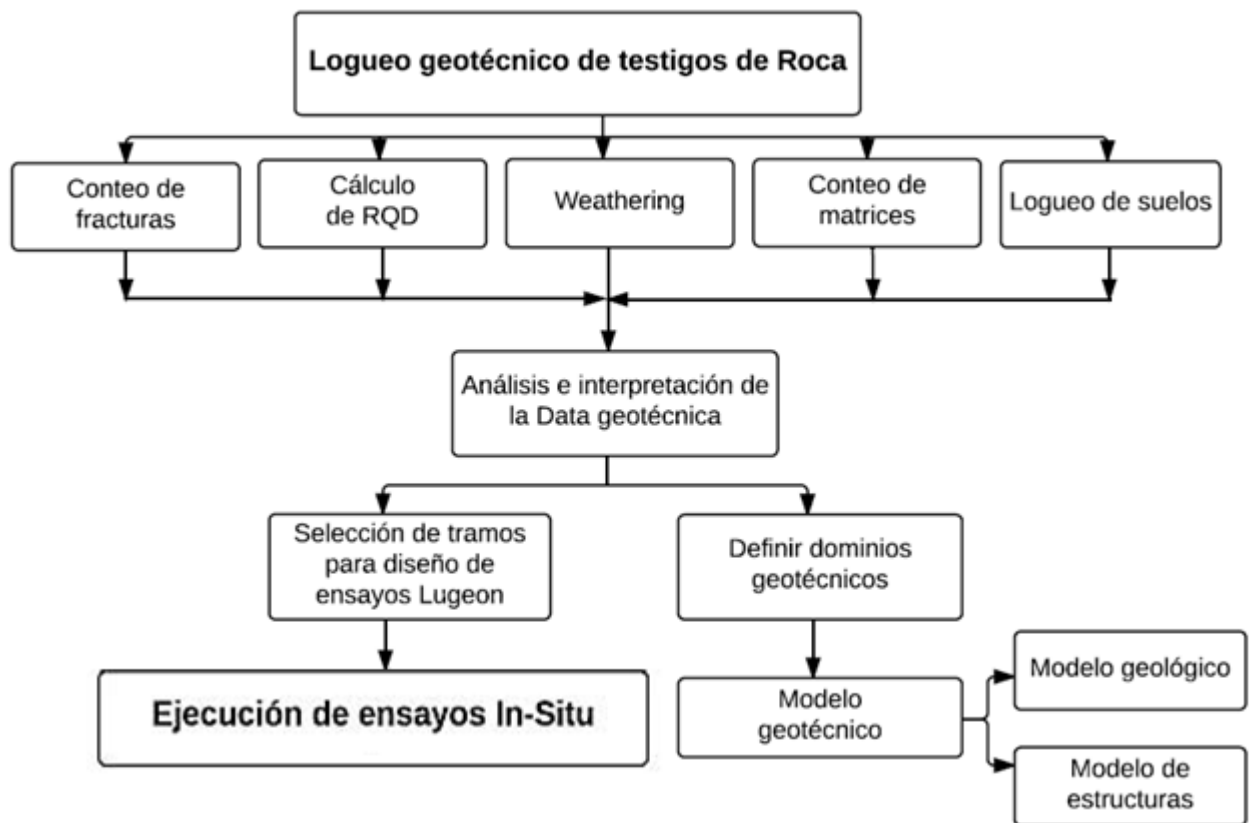
En la bodega El aceituno se realizan los estudios de logueo geotécnico detallado, cuya base se sitúa en el logueo geotécnico, el cual se rige bajo la metodología Dearman/Dempers.

Los resultados obtenidos a partir del logueo geotécnico permiten determinar los dominios geotécnicos para alimentar los modelos que se desarrollan durante la etapa de pre-factibilidad, los cuales tienen como finalidad el desarrollo de los Modelos Estructural, Geológico, Geotécnico, entre otros, sobre los cuales se van a desarrollar las siguientes etapas.

Durante el desarrollo de las prácticas, se realizó el logueo geotécnico de los testigos de roca correspondientes a los pozos que cruzan las diferentes estructuras estudiadas, con el fin de identificar los dominios geotécnicos de cada uno de los pozos y los tramos en los cuales estos cortan las zonas de interés para

el desarrollo posterior de ensayos que permitan calcular la conductividad hidráulica de dichas zonas, con el fin de aportar información que sirva de apoyo para la caracterización del macizo rocoso.

Figura 17. Flujoograma para Logueo Geotécnico. Proyecto La Colosa, AngloGold Ashanti



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

METODOLOGÍA DEARMAN / DEMPERS.

(Tomado de Manual de logueo geotécnico AGA).

La metodología DEMPERS corresponde a la metodología aplicada en el PLC para el logueo geotécnico de testigos de roca. Esta metodología está diseñada para

obtener información geológica y geotécnica aplicable no solo en minería superficial sino también en minería subterránea. Permite definir las condiciones del macizo rocoso a partir de la determinación de agrupaciones de roca (Dominios) que presentan características geotécnicas similares, las cuales tendrán un comportamiento homogéneo en el momento de realizar una excavación.

Los Dominios Geotécnicos son definidos en base a la información obtenida a partir del logueo geotécnico en intervalos que varían desde uno hasta varios metros y están determinados por la combinación de los parámetros RQD, QSI, Weathering y Litología.

El procedimiento se aplica también a los núcleos de roca recuperados en las perforaciones ejecutadas en el sector Site-11, con el propósito de conocer las condiciones geotécnicas del macizo rocoso, evaluar sus propiedades mecánicas y obtener información aplicada en el diseño de las obras de infraestructura proyectadas.

El objetivo principal del logueo geotécnico consiste en realizar una evaluación de los parámetros geotécnicos que presentan las muestras de roca obtenidas a través de las perforaciones, con el fin de realizar una interpretación que facilite el desarrollo de un modelo de dominios geotécnicos/geológicos que permitirá realizar análisis de estabilidad de taludes y aplicar estos conocimientos en el diseño de la mina.

En el PLC, la metodología propone realizar el logueo geotécnico sobre roca (no aplica para la sección de inicio de pozo, ya que el material corresponde a suelos), en intervalos de dos (2) metros, de avance para tener un buen detalle del pozo.

Lo primero que se hace en el logueo geotécnico, antes de determinar cada uno de los parámetros evaluados, es revisar el AVANCE de dos (2) metros que se va a

loguear y las PERDIDAS DE NUCLEO, ya que estas van a afectar el RQD del intervalo.






4.5.1 Parámetros a Evaluar

4.5.1.1 Tipo de Roca. Los tipos de roca para Colosa se subdividen en 3 categorías, mencionadas anteriormente en este capítulo (ver **LOGUEO GEOLÓGICO**).

- **Intrusivos:** Tempranos, Intramineral e Intrusivos tardíos.
- **Metamórfico:** Hornfels y Esquistos
- **SBX:** Brecha de contacto entre intrusivo y Hornfels

4.5.1.2 Meteorización (Weathering). El grado de meteorización de la roca se califica en una escala de uno a cinco de acuerdo a los parámetros descritos a continuación (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Grado de meteorización de la roca para el proyecto la Colosa

TERMINO	DESCRIPCION	Valor de Logueo	EJEMPLO
No meteorizado	No presenta signos de alteración a lo largo del núcleo "Roca Fresca"	1	
Suavemente Meteorizado	Roca con meteorización débil, presenta oxidación en las caras de las discontinuidades	2	
Moderadamente Meteorizado	Roca meteorizada, presenta fuerte oxidación a lo largo de las paredes y cara de las discontinuidades, presenta bloques de roca entre 10% y 95%.	3	
Altamente Meteorizado	Roca altamente meteorizada, presenta fuerte oxidación a lo largo de las paredes y cara de las discontinuidades. Contiene bloques de roca menores al 10%.	4	
Completamente Meteorizado	El núcleo conserva la estructura de la roca pero el material se encuentra totalmente meteorizado y desintegrado No contiene bloques de roca.	5	

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.3 Dureza (QSI). El QSI refleja el promedio estimado de resistencia de la roca dentro del dominio geotécnico, con rangos de QSI que van desde muy débil (1) a muy fuerte (5) (Ver Tabla 3).

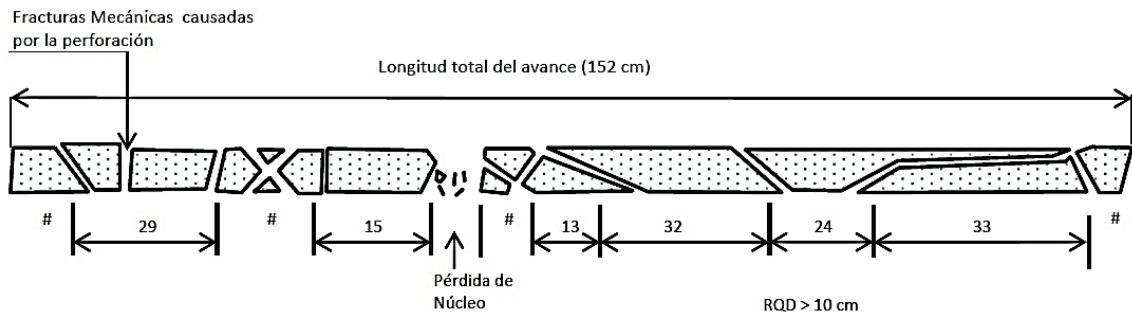
Tabla 3. Grado de dureza de la roca

QSI	Descripción	Evaluación de logueo
Extremadamente débil	El núcleo se puede romper por la mano	0.5
Muy débil	El núcleo puede ser rayado y penetrado con la uña	1
Débil	El núcleo puede ser rayado con la uña	2
Moderadamente fuerte	El núcleo puede ser rayado y penetrado con el rayador	2.5
Fuerte	El núcleo puede ser rayado y penetrado con dificultad con el rayador	3
Fuerte a muy fuerte	El núcleo puede ser rayado con el rayador	3.5
Muy fuerte	El núcleo es rayado con dificultad con el rayador	4
Muy fuerte a extremadamente fuerte	No es posible rayar el núcleo	4.5
Extremadamente fuerte	Sonido de campana entre los núcleos	5

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.4 Designación de la Calidad de Roca (RQD). Se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) entre fracturas naturales, sin tener en cuenta las fracturas mecánicas o inducidas del proceso de perforación con respecto al avance logueado (cada 2 metros). En la medición de RQD se deben excluir las zonas de matriz (Ver **Figura 18**). La recuperación se registra en cm en la hoja de logueo.

Figura 18. Método para medición de RQD a lo largo del núcleo de perforación



Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.5 Clases de Fracturas. La clasificación para las clases de fracturas se basa en el origen de esta, para ello se clasifican en tres (3) tipos (Ver Figura 19).

Naturales: Planos naturales pre-existentes de la roca los cuales se encuentran abiertos y se caracterizan por presentar algún tipo de relleno y/o oxidación entre las paredes de la roca, al intentar unir las caras de la discontinuidad estas no encajan. Este tipo de fractura se marca sobre el núcleo con dos líneas paralelas (II) de color amarillo (Figura 23) y se registran en el formato en la columna FractN.

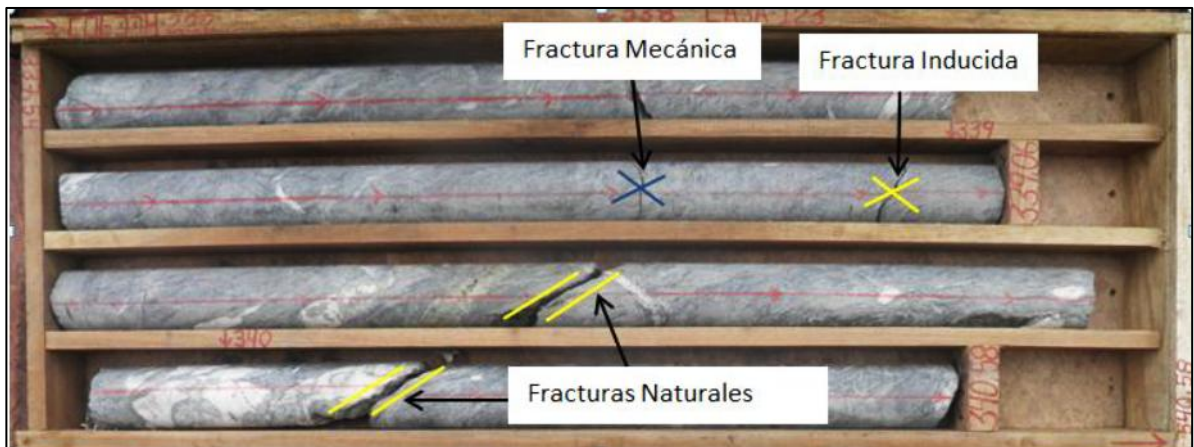
Inducidas: Fracturas que se producen durante el proceso de perforación, extracción y transporte del núcleo, las cuales se presentan a lo largo de planos de debilidad (Foliación, Vetillas, cavidades, etc.). Puede presentar buen encaje entre las caras de las discontinuidades, estas se marcan sobre el núcleo con una X de color amarillo (Figura 23) y se registra en la columna Fracl.

Mecánicas: son aquellas que se producen durante el proceso de perforación y no están relacionadas con estructuras pre existentes. Para la identificación de fracturas mecánicas se toman dos secciones de núcleo y se unen entre si las caras de la fracturas, estas presentan bordes pulidos o irregulares los cuales coinciden sin generar espacio entre ellas, además la superficie de fractura no

debería presentar ningún tipo de relleno u oxidación. Se marcan sobre el núcleo con una X de color azul (Ver Figura 19), este tipo de fracturas no se registra en el formato.

Nota: En caso de no tener certeza si las fracturas corresponden a naturales o inducidas, estas deben ser marcadas como naturales, esto con el fin de ser conservadores en el cálculo de RQD.

Figura 19. Ejemplo de fracturas naturales // (amarillo), Inducidas X (amarillo) y mecánicas X (azul)






Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.6 Tipos de Fracturas. La clasificación correspondiente para el tipo de fractura depende el ángulo de corte que está presente respecto al eje del núcleo obtenido a través del sondaje, es decir, del testigo de roca (Ver Tabla 4).

Para identificar los tipos de fractura, se debe colocar sobre la fractura el número (en color azul) al cual corresponde, en el caso de presentar evidencia de falla, se adiciona una x en la parte superior del número.

Tabla 4. Clasificación de fracturas según su ángulo

FRACTURAS	ANGULO (°)	EJEMPLO
Tipo 1	0-30	
Tipo 2	30-60	
Tipo 3	60-90	

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.










4.5.1.7 Micro Rugosidad. Este parámetro permite estimar el grado de aspereza natural y geometría presente en las discontinuidades de la roca a escala menor (Ver Tabla 5). Para identificar el tipo de rugosidad se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

- Observar la geometría del borde de la discontinuidad el cual puede ser escalonada, ondulada o plana.
- Se debe deslizar el dedo sobre el borde de la fractura en la cual se identifica si es suave, rugosa, lisa.

Se debe registrar el tipo de rugosidad de cada fractura sobre el núcleo con color rojo de acuerdo al número asignado según la clasificación. Finalmente en la casilla rugosidad del formato de logueo se registra el valor dominante de cada tipo de

fractura en los dos metros del intervalo, dando importancia a la rugosidad de las fracturas naturales.

Tabla 5. Tipos de rugosidades

MICRO JOINT ROUGHNESS			MICRO JOINT ROUGHNESS		
DESCRIPCIÓN	VALOR DE LOGUEO	EJEMPLOS	DESCRIPCIÓN	VALOR DE LOGUEO	EJEMPLOS
Pulida con estrias y plana	1		Rugoso ondulado	6	
Suave plana	2		Escalonada con estrias	7	
Rugoso plana	3		Escalonada suave	8	
Ondulado con estrias	4		Escalonada rugosa	9	
Suave ondulado	5				

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.8 Relleno. Para la identificación del relleno se toma en cuenta el valor que presente la discontinuidad (Ver Tabla 6), teniendo en cuenta las siguientes características:

1. Gouge > amplitud: Las caras de las discontinuidades no están en contacto debido al espesor del relleno de la falla. Puede tener rellenos desde pocos milímetros hasta varios centímetros.
2. Gouge < amplitud: El relleno de falla presente es de pocos milímetros el cual permite que haya contacto entre las caras de las discontinuidades.
3. La textura del relleno de la cara de la discontinuidad, al tacto puede ser suave (arcilla) o rugoso (arena).
4. Clean / surface staining: La superficie de la discontinuidad no presenta ningún relleno.

Tabla 6. Descripción del relleno de la discontinuidad, tamaño de grano y textura

Relleno	
Descripción	Valor de logueo
Gouge > amplitud	1
Gouge < amplitud	2
Suave - fino	3
Suave - medio	4
Suave - grueso	5
No suave - fino	6
No suave - medio	7
No suave - grueso	8
Limpio/superficie limpia	9

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.9 Tipo de Relleno (Infill Type). Se define el relleno dominante como el material que se ubica entre las paredes de las discontinuidades del núcleo de la roca, la identificación se realiza de acuerdo a la mineralogía u oxidación presente (Ver Tabla 7).





Tabla 7. Tipo de relleno de fracturas

Tipo de relleno	Valor de Logueo
Sulfuros	1
Ganga	2
Óxidos	3
Arcilla	4

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.10 Espesor de Relleno (Infill Thickness). La identificación del espesor del relleno se realiza uniendo las caras de las discontinuidades y observando la separación que hay entre ella como se indica en la siguiente tabla (Ver Tabla 8).

Tabla 8. Condición de apertura de la discontinuidad según el relleno

INFILL THICKNESS			
Descripción	Valor Logueado	Descripción	Ejemplos
Limpio, no hay relleno o éste es insignificante	0	Se asigna cuando la cara de la discontinuidad no presenta relleno o éste es insignificante.	
Espesor de relleno <1 mm	1	Este valor es asignado cuando al unir las caras de las discontinuidades algunos bordes coinciden perfectamente.	
Espesor de relleno <5 mm	2	Se asigna cuando al unir las caras de las discontinuidades, estas no coinciden y presentan una apertura <5mm.	
Espesor de relleno >5 mm	3	Se asigna cuando las caras de las discontinuidades no coinciden y presentan una apertura > 5mm.	
Sheared with no wall contact or thick zones of highly weathered material	4	Se asigna cuando no hay contacto entre las paredes de las discontinuidades o el material de relleno se encuentra altamente alterado	

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.11 Alteración de la Pared de la Discontinuidad (JWA). Respecto a al JWA, es necesario inspeccionar el grado de alteración que presentan las caras de la discontinuidad y compararlo respecto al del núcleo de roca (Ver Tabla 9).

La alteración en la pared de la discontinuidad se identifica removiendo el relleno de la cara y comparando su dureza con la pared del núcleo de roca con la ayuda del rayador.

Tabla 9. Identificación de la alteración de la pared de la discontinuidad

Valor	Descripción JWA	EJEMPLO
1	Dureza pared = dureza cara	
2	Dureza pared ≠ dureza cara	
3	Óxidos en la cara	

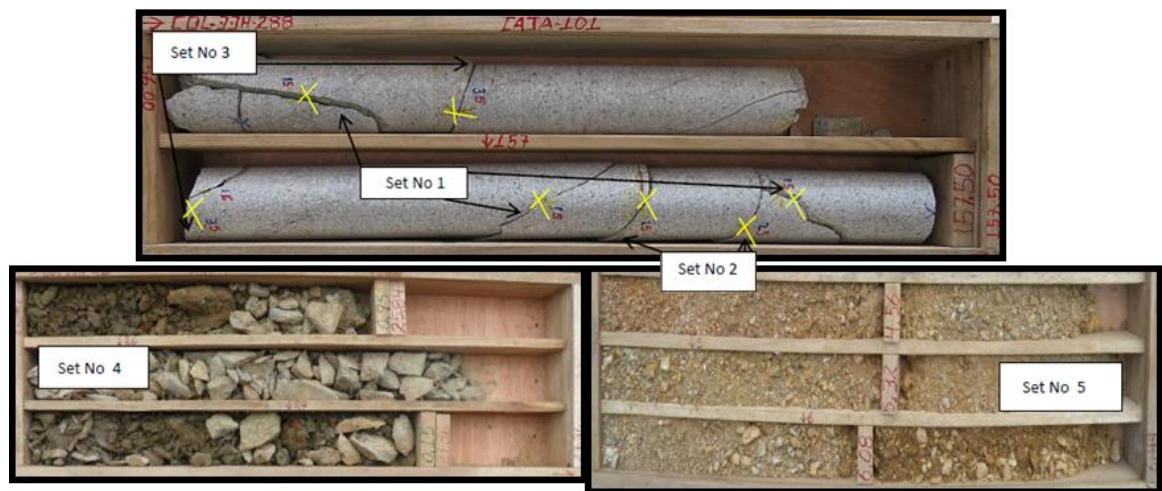
Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.12 Total de Fracturas Naturales / Inducidas por Tipo Fracn / Fraci (0-30) (30-60) (60-90). En la casilla TOTAL FRACTURES, se registra la sumatoria de discontinuidades naturales y sumatoria de discontinuidades inducidas que se observan en los dos metros de logueo.

4.5.1.13 Sets de Juntas (Sets). Este valor representa el número de grupos de discontinuidades abiertas que son intersectadas por el eje de la perforación. En

pozos orientados es posible identificar 4 sets. Para pozos no orientados es posible identificar solo 3 sets, en este caso el set 1 y 2 se toman como uno solo. Para definir un set debo tener más de dos discontinuidades por tipo de fractura (en 2 m). En el caso en que no tenga fracturas o que solo tenga una sola fractura por tipo se asignara el valor de 0.5 (masivo o pocas fracturas). El tipo random (aleatorio) será usado en sectores donde no es posible reconstruir el núcleo (Ver Figura 20; Tabla 10).

Figura 20. Ejemplos de cada tipo de SET para una mejor identificación en el pozo



Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

Tabla 10. Categorías de sets de fracturas y valor para logueo geotécnico





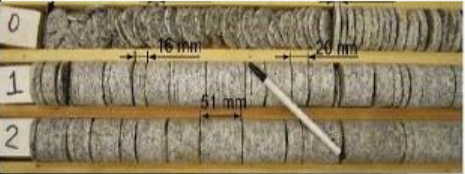

SETS	
Descripción	Valor de Logueo
Masivo o una fractura aleatoria	0.5
Un set de fracturas	1
Un set (fracturas) definido y fracturas aleatorias	1.5
Dos sets de fracturas	2

SETS	
Descripción	Valor de Logueo
Un set de juntas (fracturas) definido y fracturas aleatorias	2.5
Tres sets de fracturas	3
Un set de juntas (fracturas) definido y fracturas aleatorias	3.5
Cuatro o más sets de juntas (fracturas), fracturas aleatorias, altamente fracturado	4
Roca molida como tierra	5

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.5.1.14 Matriz (Matrix). Las matrices son descripciones adicionales usadas para destacar condiciones especiales que se presentan dentro de un dominio geotécnico (fallas, fracturas, zonas de alta mineralización, oquedades, etc.), las zonas de matrices no deben ser excluidas del cálculo de RQD. Las matrices serán descritas en la hoja de logueo con las mismas características de las fracturas definidas en el protocolo de logueo (Ver Tabla 11).

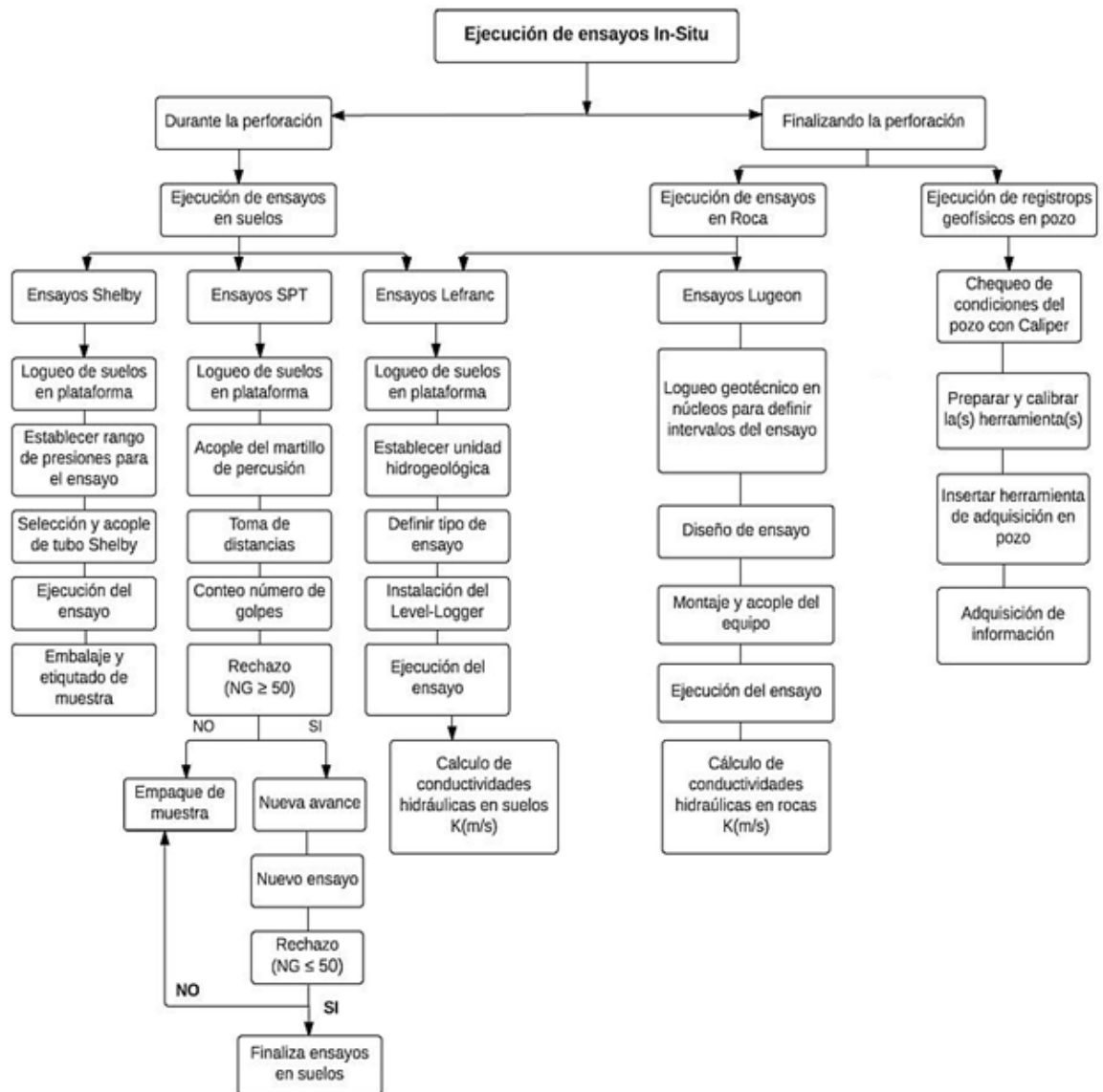
Tabla 11. Identificación de los tipos de matrices

TIPO DE MATRIZ	DESCRIPCION	EJEMPLO
M1	Zonas de debilidad con presencia de estrias- falla puntual	
M2	Zona de gouge, Cizalla- > a 2 fallas puntuales. Se caracteriza por presentar alto grado de fracturamiento y estrias de falla en las caras de las discontinuidades, debe presentar más de dos fallas puntuales	
M3	Se caracteriza por presentar alta frecuencia de fracturamiento (zonas fr >10cm)	
M4	Zonas de alta mineralización o stockwork mayores a 10 cm, pueden ser Masivas: Pirita, magnetita. Intenso Vetilleo: Vetillas de Qz, Py, Po	
M6	Disking. Se presenta por cambios de presión, los cuales generan fracturamiento repetitivo y se presenta de forma perpendicular al eje del núcleo.	
M7	Vuggy. Oquedades que se presentan por disolución, reemplazamiento o drusas (Qz, Ca, Py esquelético). Se deben incluir zonas mayores a 10cm.	

Fuente: Manual de logueo geotécnico AGA.

4.6 EJECUCIÓN DE ENSAYOS HIDROGEOLÓGICOS IN-SITU

Figura 21. Flujoograma para la Ejecución de Ensayos In-Situ. Proyecto La Colosa, AngloGold Ashanti



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

Los estudios hidrogeológicos que se adelantan en el Proyecto La Colosa a nivel conceptual y de pre-factibilidad, tienen como objetivos principales, definir las unidades hidrogeológicas que conforman el subsuelo y entender el comportamiento del flujo de agua subterránea a lo largo del área comprendida por las zonas del PIT y del Site-11, con el fin de observar las variaciones en los niveles piezométricos y flujos o filtraciones de agua durante esta etapa para tomar medidas en relación a una posible etapa de explotación.

Esta fase comprende el desarrollo de una serie de actividades mediante las cuales se lleva el registro de niveles de agua subterránea y se ejecutan ensayos hidráulicos en área que comprende la zona del PIT y de infraestructura del PLC.

Inicialmente se debe realizar un reconocimiento de cada una de las actividades de hidrogeología aplicadas al estudio realizado para el despliegue de Infraestructura en el Site-11, con el fin de entender el propósito para el cual se realizan, protocolos que se deben llevar a cabo durante su acople y ejecución, resultados obtenidos, aplicación y su importancia para el desarrollo del Proyecto La Colosa.

Entre las actividades de hidrogeología realizadas para la zona del Site-11 se encuentran:

- Montaje y ejecución de Ensayos Lefranc.
- Montaje y ejecución de Ensayos Lugeon.
- Instalación y monitoreo de piezómetros de hilo vibrátil y Casagrande.
- Identificación y monitoreo de Pozos Surgentes (Pozos Saltantes).

4.6.1 Ensayo Tipo Lefranc. El ensayo de permeabilidad in-situ tipo Lefranc, es un ensayo que se realiza en suelo, saprolito o zona de transición saprolito-roca, y es ejecutado durante la fase inicial del proceso de perforación. Estos ensayos sirven para determinar la permeabilidad de los suelos y/o material de sobrecarga o

relleno, y son muy utilizados en la Ingeniería para el diseño y construcción de una gran variedad de obras de infraestructura. Existen dos tipos de ensayos Lefranc (*Ensayo Lefranc de Carga Constante* y *Ensayo Lefranc de Carga Variable*), los cuales serán explicados más adelante en éste mismo capítulo.

Antes de ejecutar estos ensayos se deben revisar los sondeos geotécnicos y dar un seguimiento estricto de cómo se va desarrollando la perforación (chequeo del retorno de agua de perforación, presión y empuje durante el avance, etc.) llevando una clasificación de las variaciones o los cambios de material que se va presentando durante la perforación para ampliar el entendimiento sobre el comportamiento que este va presentando.

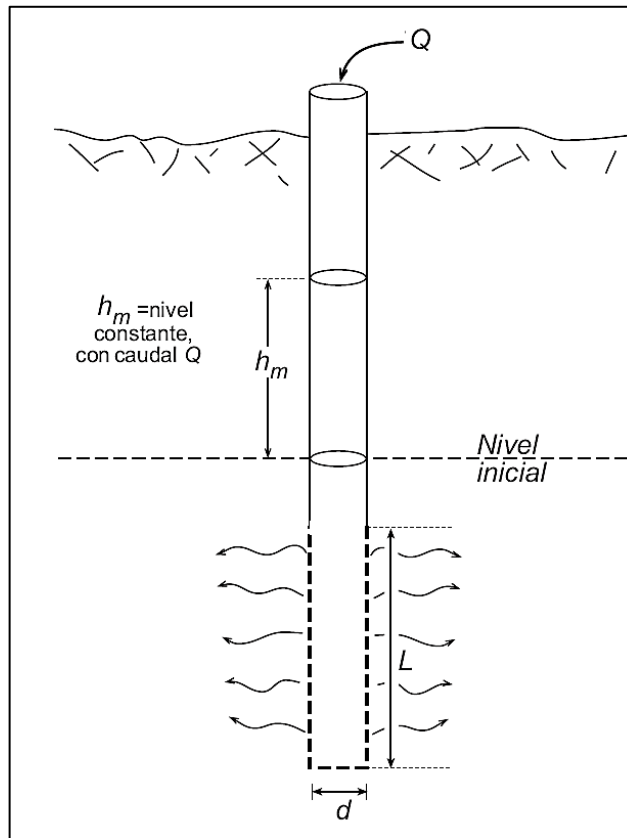
Desde el enfoque principal de este trabajo, los ensayos Lefranc no deberían ser un punto de enfoque en el estudio desarrollado, ya que estos son ensayos desarrollados para calcular conductividades hidráulicas en material correspondiente a suelo, sin embargo, debido a su importancia, se van a mencionar algunas características importantes ya que las características del suelo hacen parte de los controles de infiltración del agua en el sector.

- **ENSAYO LEFRANC DE CARGA CONSTANTE**

Este ensayo consiste en medir el caudal de agua que ingresa en un determinado tiempo al pozo (los tiempos tomados son relativos y dependen de la apreciación directa del encargado de supervisar la ejecución del ensayo), para mantener un nivel de agua constante en el interior del mismo (ver Figura 22), se puede considerar cada minuto ($T=1$ min) hasta los 15 minutos y luego se pueden tomar medidas cada 5 minutos hasta alcanzar la hora (tiempo suficiente para calcular la permeabilidad), hay que tener presente que se debe mantener, en lo posible, un nivel constante, esto debe ser controlado desde la boca del revestimiento y/o de la tubería de perforación.

Nota: Los tiempos de medida pueden variar según la necesidad del encargado de la ejecución del ensayo.

Figura 22. Modelo de ensayo Lefranc de Carga Constante



Fuente: Slug-Test, F. Javier Sánchez San Román. Dpto. Geología-Univ. Salamanca (España) (2011).

- CÁLCULO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

El cálculo de la conductividad hidráulica en un ensayo Lefranc de carga constante se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$K = \frac{Q}{C \cdot h_m}$$

K = Conductividad Hidráulica.

Q = Caudal Inyectado.

h_m = Altura del Agua dentro del sondeo, encima del nivel.

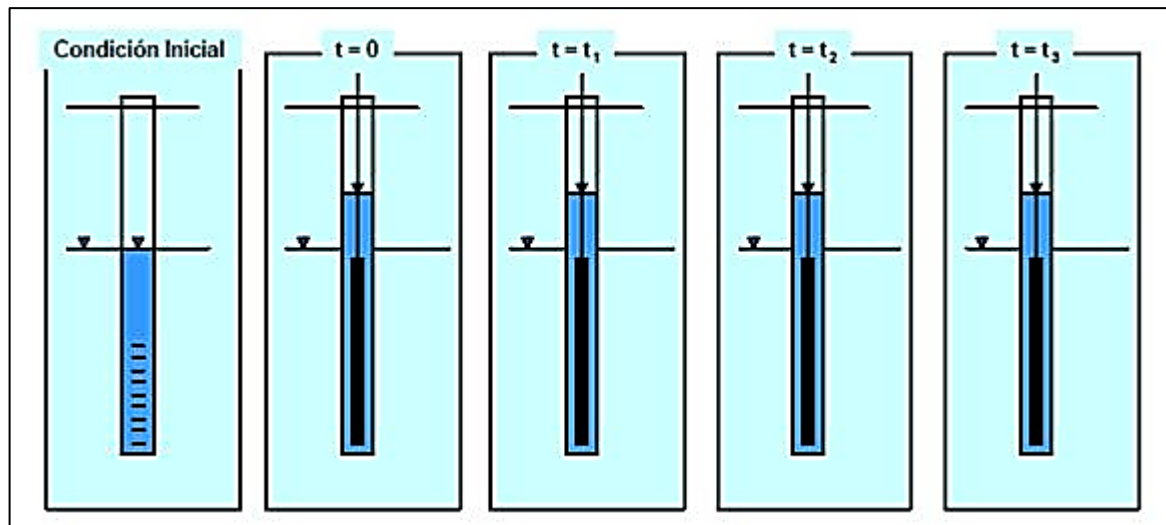
C = Factor de Infiltración.

$$C = \frac{2\pi \cdot L}{\ln(2L/d)}$$

L = Longitud de la Zona Filtrante

d = Diámetro la Zona Filtrante

Figura 23. Modelo de ejecución de Ensayo Lefranc de Carga Constante



Modificado de: <https://sites.google.com/site/lefrancsuelos/>

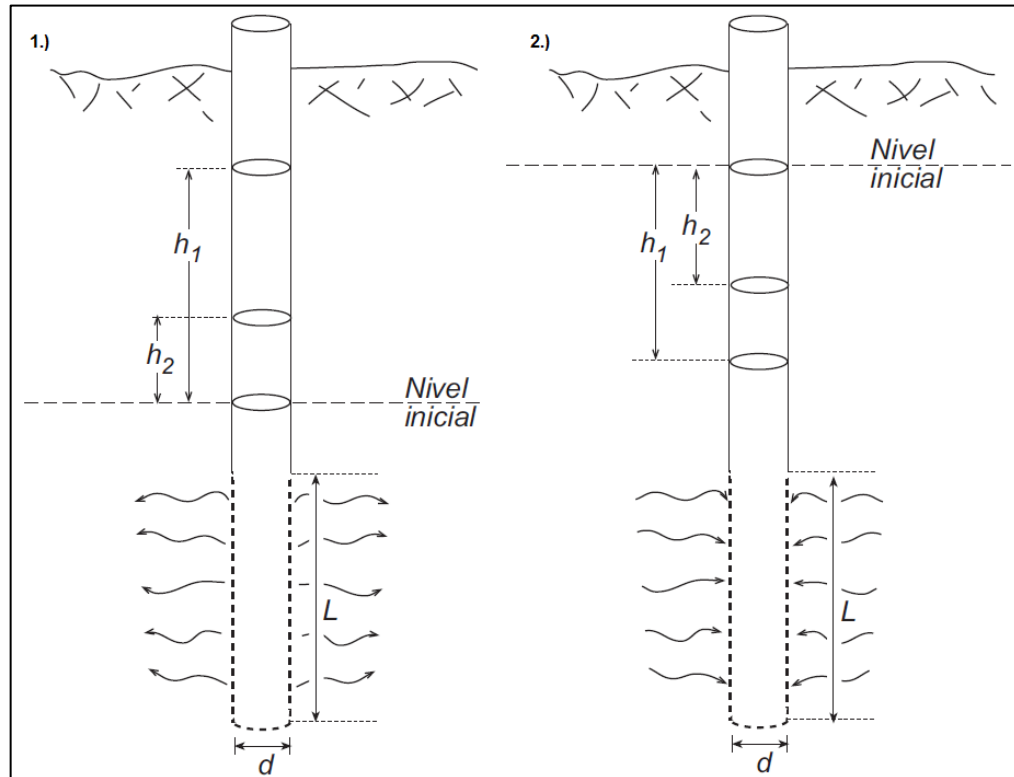
- ENSAYO LEFRANC DE CARGA VARIABLE

Este ensayo consiste en medir la variación del nivel del agua al descender de una posición inicial (Falling Rising Test), es decir, se procede a llenar el pozo, con

agua, hasta el ras de la tubería (sea revestimiento o tubería de perforación) o hasta una altura establecida, y una vez que alcanza este punto, se procede a medir el descenso en función del tiempo usando un cronometro. Es recomendable usar sensor de nivel por comodidad, ya que es probable que no se alcance a realizar medidas confiables con la sonda de nivel en caso de tener descensos rápidos (ver Figura 24).

Existe otro método para ejecutar los ensayos Lefranc de carga variable, el cual consiste en medir la variación del nivel de agua al ascender de una posición inicial, es decir, se procede a extraer una cantidad de agua que genere un cambio en el nivel, y se procede a medir el ascenso en función del tiempo. Este tipo de ensayo solo puede ser utilizado en pozos que han alcanzado el nivel freático.

Figura 24. Modelo de ensayo Lefranc de Carga Variable: 1.) Ensayo Lefranc de Carga Variable con Incremento de Nivel Piezométrico 2.) Ensayo Lefranc de Carga Variable con Disminución de Nivel Piezométrico



Fuente: Slug-Test, F. Javier Sánchez San Román. Dpto. Geología-Univ. Salamanca (España) (2011).

- CALCULO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

El cálculo de la conductividad hidráulica en un ensayo Lefranc de carga variable se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$K = \frac{d_e^2 \ln(2L/d)}{8Lt}$$

Dónde:

K = Conductividad Hidráulica.

h_1 = Altura Inicial del ensayo.

h_2 = Altura Final del ensayo.

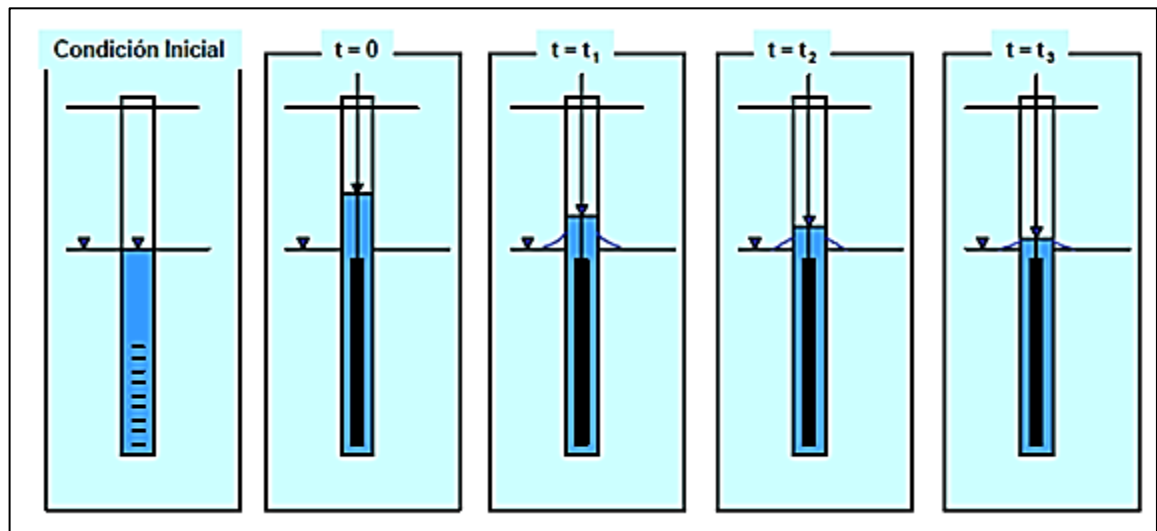
t = Tiempo transcurrido entre el cambio de nivel h_1 a h_2 .

L = Longitud de la Zona Filtrante.

d = Diámetro de la Zona Filtrante.

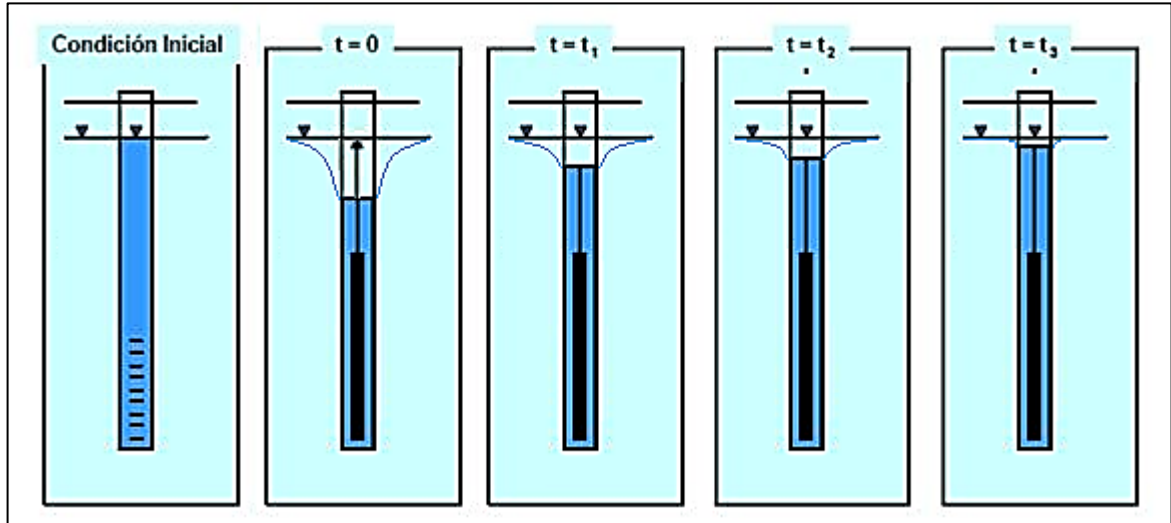
d_e = Diámetro de la Entubación (puede ser igual a d).

Figura 25. Modelo de ejecución de Ensayo Lefranc de Carga Variable con Incremento de Nivel Piezométrico



Modificado de: <https://sites.google.com/site/lefrancsuelos/>

Figura 26. Modelo de ejecución de Ensayo Lefranc de Carga Variable con Disminución de Nivel Piezométrico



Modificado de: <https://sites.google.com/site/lefrancsuelos/>

Luego de terminar los estudios de permeabilidad en suelos, se continúa con la perforación hasta llegar a la roca, en la cual se realizan también ensayos de permeabilidad in-situ. Los ensayos usados en el proyecto La Colosa para la determinación de la conductividad hidráulica en zonas fracturadas corresponden a los ensayos Lugeon, que corresponden a un tipo de prueba ejecutada con obturadores o Packers.

4.6.2 Ensayos Tipo LUGEON. Los ensayos de permeabilidad tipo Lugeon son pruebas utilizadas para determinar el coeficiente de permeabilidad in-situ en un tramo de roca por medio de la inyección de agua a un caudal y presión específica.

Comprende 5 o 6 ciclos de presión, en los cuales se mide el volumen de agua que se logra inyectar en un tramo de macizo rocoso, aislado neumáticamente, durante un lapso de tiempo determinado y manteniendo presión constante. La presión máxima del ensayo no debe exceder la presión de confinamiento de la roca para

evitar hidro-fracturamiento. El objetivo de este ensayo es cuantificar la cantidad de agua consumida debido a la porosidad secundaria adquirida por el macizo rocoso gracias a Fallas, Fracturas, Diaclasas, Meteorización, etc.

- TIPOS DE ENSAYOS

Existen tres tipos de pruebas denominadas: *Pruebas de Descarga*, *Pruebas de Recuperación (Shut-In)* y *Pruebas de Inyección (Lugeon)*.

- **Pruebas de Descarga:** Estas pruebas se deben realizar en pozos de perforación con condiciones de flujo artesianos. En estos pozos de perforación, la respuesta de la presión natural de formación es monitoreada después del equilibrado de cierre en el cual inicia la descomposición con respecto al tiempo.
- **Pruebas de Recuperación (Shut-In):** Las pruebas de recuperación o Shut-In, generalmente, son ejecutadas inmediatamente después de una prueba de descarga. El proceso de Shut-In (cierre) de presión a través del tiempo se controla y presentado contra el $\log_{10}(t/t')$, donde t es el tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba de descarga, y t' es el tiempo de inicio de la prueba de recuperación.
- **Pruebas de Inyección (Lugeon):** Los métodos de prueba de inyección, también conocidos como pruebas Lugeon, son llevadas a cabo en pozos con niveles estáticos de agua debajo de la superficie. Consisten en inyectar agua en diferentes etapas, cada una con presión específica, con el fin de registrar los valores de conductividad que presenta el medio fracturado.

Los métodos de prueba de inyección, o *Ensayos Lugeon*, son llevados a cabo en zonas fracturadas que pueden ocasionar inestabilidad de terreno, en las cuales es necesario analizar el comportamiento del sistema y hacer una evaluación, respecto al aumento y la recuperación de la inyección, ya que estos datos aportan información útil sobre el comportamiento de la roca y de las fracturas.

Cabe resaltar que, en el PLC, únicamente se han realizado *Pruebas de Inyección (Lugeon)* para el cálculo de conductividades hidráulicas en el macizo rocoso, llevando a cabo dos (2) tipos de ensayos Lugeon, definidos como:

- ENSAYO LUGEON DE PACKER SIMPLE

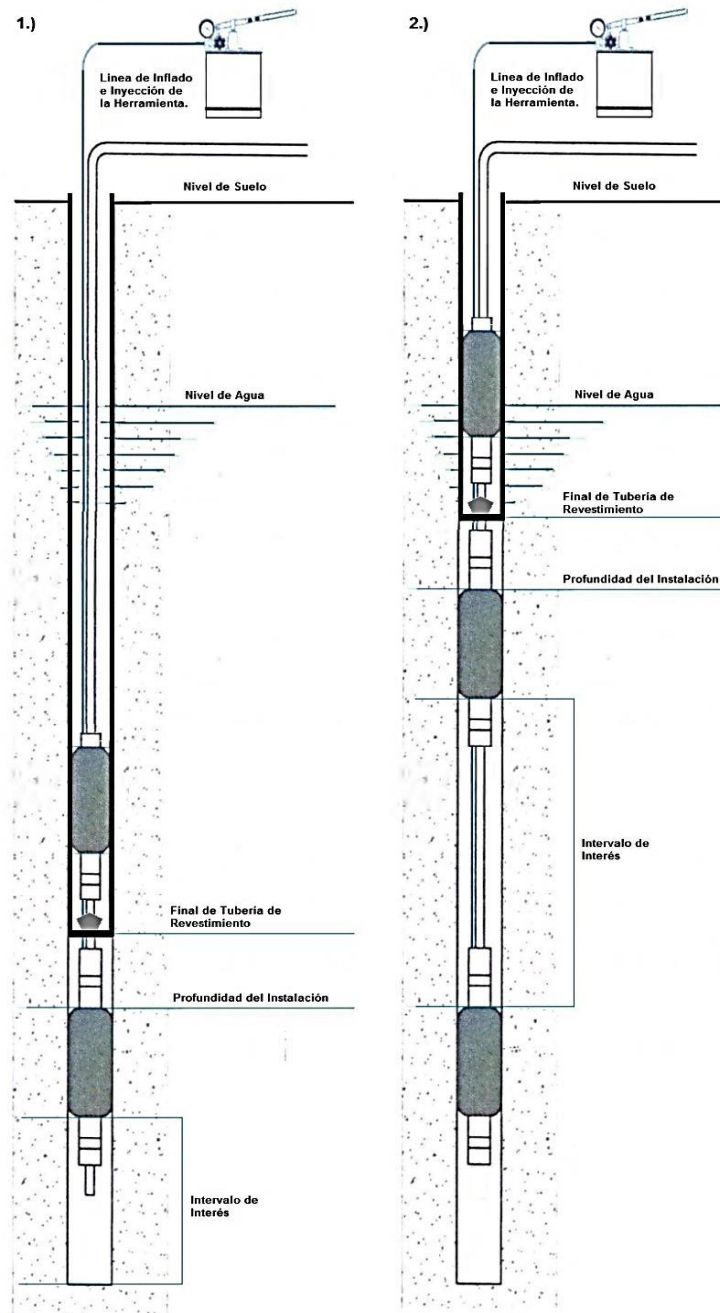
Este tipo de pruebas son realizadas contra el frente de la perforación, por tal motivo solo se usan 2 Packers (ver Figura 27 - 1), uno de ellos dentro de la tubería y otro fuera de ella. Se recomienda realizar este tipo de ensayos en simultáneo con el avance de la perforación.

- ENSAYO LUGEON DE PACKER DOBLE

En este tipo de prueba, a diferencia del ensayo simple, no se realiza contra el frente de avance sino en un tramo específico, por tal motivo es necesario utilizar 3 packers (uno dentro y dos fuera de la tubería) y un juego de flautas para cubrir la inyección de agua en el tramo de estudio (ver Figura 27 - 2). Este ensayo es usado para determinar la permeabilidad en zonas puntuales; por tal razón tienen la ventaja de poder realizarse después de perforar el pozo, a cualquier profundidad.

Para el PLC, estos ensayos son ejecutados en pozos abiertos mediante perforación diamantina, son ensamblados por partes en superficie e introducidos en el pozo mediante el uso de Wire-Line.

Figura 27. 1.) Diseño de Instalación de Herramienta para Ensayos Lugeon con Packer Simple. 2.) Diseño de Instalación de Herramienta para Ensayos Lugeon con Packer Doble



Modificado de: Standard Operating Procedures for Borehole Packer Testing. By Michael Royle, M.A.Sc.

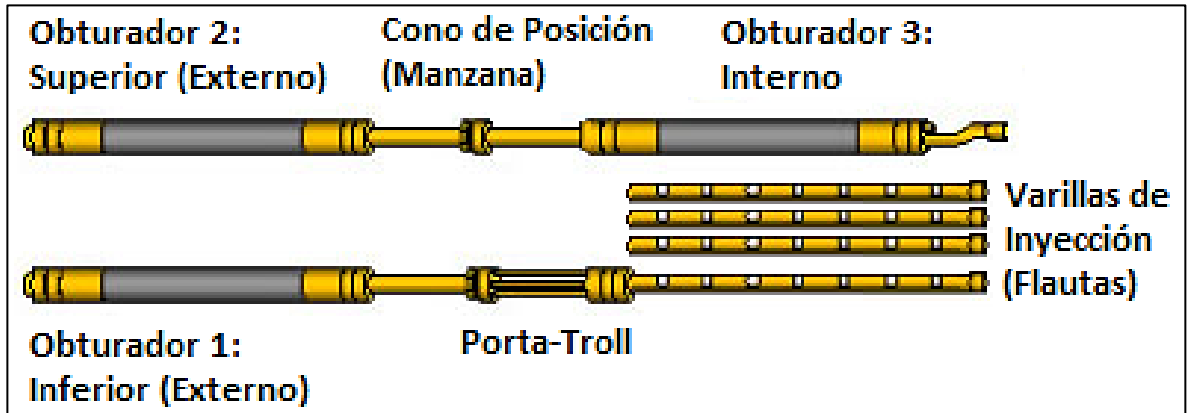
- EQUIPO PARA LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO

El equipo utilizado para la ejecución de pruebas Lugeon corresponde a (Ver Figura 28; 29):

- **Adaptador de cable Wire-Line (Lifting Bail):** Conector enroscable en la cabeza del pescante para el levantamiento e instalación del equipo Lugeon por medio del cable Wire-Line del taladro.
- **Bomba de Agua o Bomba de Lodos:** Bomba centrífuga de 4.5 HP (Potencia mínima) que garantice un flujo constante de 3.75 L/s a 120 PSI.
- **Manómetro:** Para medir presión del flujo de agua con rango entre 0 psi y 150 psi.
- **Medidor de flujo:** Medidor de flujo o medidor de volumen de agua apto para tomar medidas en litros/segundo (flujo) o litros (volumen) bajo una presión inferior a 120 PSI.
- **Mangueras de presión:** Mangueras que soporten presión de flujo de 120 psi mínimo, con diámetros compatibles con los acoples del medidor de flujo o de volumen y el equipo de perforación. La manguera que va desde la bomba de lodos al Swivel del taladro se empalma en el acople de entrada del Medidor de flujo; una manguera de presión extra se conecta entre el acople de salida del cuenta-litros y el Stuffing Box.
- **Manguera para descarga del medidor de flujo o volumétrico:** Manguera con diámetro similar a la llave de descarga del medidor y con longitud suficiente para llevar el agua hasta los tanques de almacenamiento de agua.
- **Acoples macho-macho con un extremo tipo jeep para acoplar mangueras:** revisar que las mangueras que se conectan entre la bomba de lodos – “Cuenta-litros”– Stuffing Box los tengan o sean empalmables.
- **Pipeta de nitrógeno:** Por lo general las pipetas de nitrógeno tienen un almacenamiento de 6.5 m³ a una presión de 2000psi.

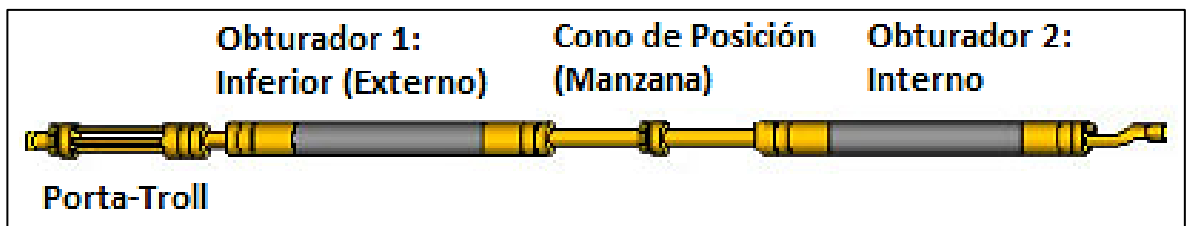
- **Manguera para inyección de nitrógeno:** Manguera de gas con diámetro 3/16" elaborada en nylon 11, con longitud suficiente para la profundidad a la que se planea realizar el ensayo.
- **4 Sellos neumáticos y 2 sellos metálicos (Pan de quesos):** Sellos insertados dentro del Stuffing Box para mitigar la fuga de agua dentro de la tubería.
- **Stuffing Box:** Swivel para el ensayo Lugeon, el cual permite la inyección de agua dentro de la tubería.
- **Obturadores (Packers):** Juego de obturadores neumáticos con diámetro específico para cada tipo de tubería. Corresponde a 1 Packer con longitud de 0.65m, el cual se instalará dentro de la tubería y 1 o 2 packers de 1m de longitud, los cuales estarán instalados fuera de la tubería, según el tipo de ensayo.
- **Regulador de presión de inflado (JetControl):** Llave con 2 manómetros, con válvula de salida, la cual permite revisar la presión de la pipeta de gas y ajustar la presión de inflado del sistema de Packer.
- **Seating Cone:** Separador entre el Packer que se localiza dentro de la tubería y el exterior de la tubería, diseñado con un diámetro mayor al sistema de Packer con el fin de situarse en la broca e impedir que el Packer situado dentro de la tubería no selle correctamente.
- **Flautas de Inyección con uniones:** Juego de flautas (tubería perforada que permite la inyección de agua) con longitud determinada para la ejecución del ensayo doble. Si el ensayo necesita el uso de más de una flauta, éstas deben pueden ser añadidas gracias a una unión de acero galvanizado.
- **Herramientas Adicionales:** Sonda para medición de Nivel Freático, Cronómetro, Flexómetro, Alicata de corte, Cinta aislante, Teflón, Llaves boca fija, etc.

Figura 28. Componentes de la Herramienta utilizada para la Ejecución de Ensayos Lugeon de Packer Doble



Modificado de: Standard Operating Procedures for Borehole Packer Testing. By Michael Royle, M.A.Sc.

Figura 29. Componentes de la Herramienta utilizada para la Ejecución de Ensayos Lugeon de Packer Simple



Modificado de: Standard Operating Procedures for Borehole Packer Testing. By Michael Royle, M.A.Sc.

- SELECCIÓN DE TRAMOS DE PRUEBA

La selección de los tramos del pozo en los cuales se van a realizar los *Ensayos Lugeon* se determina a partir del análisis del *Logueo Geotécnico* de fracturas y matrices realizado sobre los testigos que han sido recuperados durante la perforación (ver **LOGUEO GEOTÉCNICO**). En algunos casos, la selección de dichos tramos es también apoyada en la información obtenida a partir de los

registros geofísicos, dependiendo de si fueron o no ejecutados previamente en el interior del pozo. En este análisis se identifican las zonas críticas del pozo en las cuales los patrones estructurales facilitan el desplazamiento y almacenamiento de fluidos a través del macizo rocoso.

El procedimiento que se lleva a cabo para la identificación de las zonas de interés consiste en (Ver Figura 30; Figura 31; Figura 32):

1. Realizar el Logueo Geotécnico (completo) de fracturas y matrices del pozo.
2. Tomar un registro fotográfico de cada una de las cajas con los testigos de roca de pozo en estado Seco y Húmedo.
3. Seleccionar los tramos del pozo que presentan evidencias de flujo de agua.
4. Registrar la profundidad del pozo a la cual se encuentra el tramo de interés.
5. Finalmente revisar los límites del tramo de interés con el fin de encontrar los sectores sobre los cuales se puedan apoyar los obturadores sin ningún riesgo.

Durante la fase de Pre-Factibilidad del Proyecto La Colosa se realizaron ensayos Lugeon en 19 pozos de los 39 que corresponden al sector del Site-11.

Toando como ejemplo el pozo COL-432, se identificaron siete (7) tramos de interés por medio del Logueo Geotécnico, realizado en la bodega El Aceituno. Los tramos de interés deben ser identificados, señalados y delimitados, con el fin de que la información, al ser enviada al responsable de la ejecución del ensayo, sea clara y entendible para que el ensayo se desarrolle de manera efectiva en el tramo requerido.

Figura 30. Selección de las zonas de interés para el análisis de conductividad hidráulica por medio de ensayos Lugeon en el pozo COL-432



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

Figura 31. Identificación de sector de interés para evaluación de conductividad hidráulica con ensayo Lugeon. Tramo de 128 – 138 m, Pozo COL-432



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

Figura 32. Delimitación del tramo de interés para la ejecución de ensayo Lugeon.
Tramo de 128 – 138 m, Pozo COL-432



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

- DISEÑO PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO

Luego de seleccionar los tramos del pozo en los que se va a evaluar la conductividad hidráulica, se realiza el diseño para el montaje de la herramienta que se va a utilizar, para cada tramo del pozo. Este diseño puede ser realizado en oficina y verificado en plataforma por el encargado de la ejecución de la prueba, o simplemente realizado en plataforma antes de la prueba.

En este diseño se deben revisar, en orden, los siguientes aspectos:

- Profundidades de cada tramo de ensayo.
- Tipo de Ensayo Lugeon para cada tramo de estudio.
- Ubicación de los Packers respecto a la tubería.
- Cálculo de la tubería extraída para liberar la zona del ensayo.
- Número de Flautas para abarcar, en su totalidad, cada ensayo.
- Distancia de ubicación del Troll en el tramo de ensayo.

- PREPARACIÓN DEL EQUIPO PARA LA PRUEBA

Luego de tener el diseño de la herramienta para cada tramo de ensayo, se procede con la inspección y preparación de la herramienta que va a ser utilizada.

Los pasos que se deben seguir para la preparación para una prueba de compresión se describen a continuación. Es importante seguirlos en orden y de manera sistemática.

1. **Preparar el montaje de los Obturadores:** dos Packers con la parte inferior abierta para una prueba simple o tres Packers con sección de tubo perforado para una prueba doble.
2. **Revisar línea inflado:** Realizar prueba de inflado para comprobar el adecuado funcionamiento de los obturadores y conexiones, no exceder la presión.
3. **Revisar fugas en la línea de inflado:** Realizar prueba de presión para identificar fugas.
4. **Comprobar conectores:** Revisar que las conexiones estén bien hechas y los conectores en buen estado.
5. **Preparar y comprobar el sistema de alimentación de agua:** Revisar el correcto funcionamiento de las mangueras del tanque, de suministro, de la bomba, de conexión, manómetros, válvulas y medidores de flujo.
6. **Preparación del tramo de perforación:** Eliminación de lodo de perforación y otros materiales que puedan interferir con la ejecución de la prueba.
7. **Medición de nivel de agua subterránea:** Medir el nivel de agua dentro del pozo, antes de introducir el equipo.
8. **Revisión de Parámetros de ensayo:** Revisar profundidad y longitud de la zona de la prueba, profundidad de la broca de perforación, conteo de tubería y/o revestimiento, la posición de los obturadores.
9. **Realizar montaje del equipo:** Proceder con el montaje de la herramienta para la ejecución de la prueba en el interior del pozo.

- UBICACIÓN DEL EQUIPO EN EL TRAMO DE PRUEBA

El proceso de ubicación de la herramienta en el tramo de prueba asignado es muy importante ya que, de no ser preciso, puede ocasionar que el ensayo quede mal ejecutado o que las conductividades obtenidas no correspondan al tramo indicado.

El proceso llevado a cabo corresponde al siguiente:

1. Determinar la profundidad a la cual se encuentra el tramo de interés dentro del pozo, calculada previamente a partir del logueo geotécnico.
2. Revisar la profundidad en la cual se encuentra la tubería de revestimiento, en ese instante, esta profundidad es obtenida conociendo la cantidad de tubos que se han introducido en el pozo y la longitud de cada uno de ellos.
3. Calcular la distancia de desfase entre la prueba y el estado actual del pozo, este procedimiento se realiza restando la distancia actual de la tubería menos la distancia a la cual se necesita que esta quede para que no interfiera con el ensayo que se va a ejecutar.

Nota: Se sugiere inicialmente identificar la distancia a la cual se requiere la tubería, lo cual se obtiene restando la longitud del *Packer 2* al límite superior del tramo de prueba. Luego, esa distancia a la cual se necesita tener la tubería, se le resta a la distancia en la cual se encuentra actualmente y eso da como resultado la distancia de diferencia entre las dos tuberías.

4. Por último, esa diferencia entre las tuberías se divide entre la longitud que poseen los tubos, con el fin de obtener la cantidad de tubos que es necesario retirar para que, al encajar el Seating Cone en la Broca, el equipo quede ubicado en el tramo de prueba.

Luego de que ya se tiene la distancia en la cual se va a ejecutar la prueba, se procede a determinar la presión con la cual se van a inflar los obturadores.

- **CALCULO DE PRESIÓN DE INFLADO DE LOS OBTURADORES**

El cálculo de la presión del suministro de Nitrógeno con el cual se van a inflar los obturadores de la prueba debe ser realizado y revisado cuidadosamente ya que, algún fallo en el cálculo de las presiones, puede ocasionar que se exceda la presión y se estalle algún Packer o que haga falta presión y se generen zonas de By-Pass (escape de agua de la zona de presión al exterior del sistema debido a la falta de presión de algún obturador).

Cuando se inflan los obturadores en el interior de pozo, la presión de los mismos debe ser mayor a la suma de la presión hidrostática y la presión máxima de los ciclos de ejecución del ensayo.

Por lo tanto, la presión de inflado cambiará en función del equipo utilizado y la altura de la columna de agua suprayacente del obturador. Se sugiere realizar el cálculo ajustando los límites máximos de presión para estar en un rango seguro y evitar que se estalle el obturador o que haga falta y ocurra un evento de By-Pass.

El cálculo de presión de inflado de los obturadores para los ensayos Lugeon ejecutados en el PLC debe realizarse de la siguiente manera:

1. Calcular la profundidad total del ensayo, es decir la profundidad del último obturador.
2. Multiplica la profundidad total del ensayo por 1,42 psi, que corresponde al valor de la presión ejercida por una columna de agua de 1 m.
3. Al valor obtenido, sumarle 120 psi, que corresponde a la máxima presión de inyección de agua durante la prueba.
4. Por último, a ese valor obtenido se le suma el 20% de la presión promedio de prueba, que corresponde a un valor extra de presión para darle un margen de seguridad al inflado.

Figura 33. Prueba de inflado de obturadores para el ensayo Lugeon en superficie



Fuente: Standard Operating Procedures for Borehole Packer Testing. By Michael Royle, M.A.Sc.

- PROTOCOLO DE OPERACIÓN

El procedimiento llevado a cabo en el PLC para la ejecución de ensayos Lefranc se muestra en la siguiente tabla (ver Tabla 12), teniendo en cuenta, de manera general, los procesos mencionados con anterioridad en este mismo capítulo.

Tabla 12. Protocolo para la ejecución de ensayos Lugeon según reglamento AGA

No.	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
1	Reconocimiento y selección del tramo a ensayar.	Revisión de zonas de fracturamiento en testigos de perforación para la selección del tipo de ensayo y el tramo de ensayo. Se recomienda que el tramo del ensayo oscile entre 3m y 10m máximo para ensayos dobles. Los obturadores deben estar localizados en roca poco fracturada.	Geólogo
2	Levantamiento de Tubería.	Levantando la tubería del frente de perforación hasta la profundidad determinada y asegurarla en superficie.	Perforista.
3	Medida nivel freático	Realizar la medida de la profundidad del nivel de agua antes de empezar la manipulación de la tubería	Geólogo.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

No.	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
4	Lavado del pozo	Lavar el pozo desde la profundidad donde fue localizada la tubería para eliminar cualquier sucio de perforación presente en el tramo de obturación.	Perforista.
5	Conexión entre manguera de la bomba a la base del cuentalitos	Empalmar la manguera de la bomba de lodos con el Swivel del taladro entre la bomba de lodos y la boquilla de entrada de la base del medidor volumétrico de agua.	Perforista.
6	Conexión cuentalitos y Stuffing Box	Conectar manguera de presión de agua entre la boquilla de salida de la base del medidor volumétrico de agua al Stuffing box.	Perforista.
7	Conexión cuentalitos y tanques de agua	Conectar manguera entre la válvula de descarga de la base del medidor volumétrico de agua y los tanques de almacenamiento.	Perforista.
8	Conexión manómetro de presión en el cuentalitos	Se enrosca el manómetro dentro de la base del medidor volumétrico de agua. Tener cuidado en el aseguramiento del manómetro, ya que es un instrumento sensible a la mala manipulación.	Perforista asistido por Geólogo
9	Conexión del cable Wire-Line con el Adaptador de Wire-Line	Conectar el cable Wire-Line con el adaptador del equipo Lugeon (Lifting Bail). Si no se tiene el adaptador del Wire-Line del equipo Lugeon, se debe amarrar directamente al tope del Packer 1.	Perforista.
10	Conexión Packer 1 con adaptador cable Wire-Line	Conectar el extremo móvil (sector donde el Packer se recogerá o extenderá cuando se esté inflando o desinflando) del Packer 1 al Lifting Bail. Este Packer cumplirá la función de obstruir el paso de agua dentro de la tubería al tramo de obturación.	Perforista
11	Conexión entre Packer 1 y Seating Cone	Conectar extremo firme del Packer 1 al Seating Cone (Manzana de unión). El Seating Cone cumple la función de impedir que el Packer 1 se salga de la tubería.	Perforista asistido por Geólogo
12	Conexión entre Seating Cone y Packer 2.	Conectar el Seating Cone (Manzana de Unión) con el extremo firme del Packer 2. Este Packer es el sello superior del tramo de ensayo y cumple la función de evitar que el agua del tramo del ensayo se filtre por la tubería y por la perforación.	Perforista asistido por Geólogo

No.	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
		Nota: Hasta aquí es el ensamble del sistema de Packers para ensayo sencillo, los siguientes pasos complementan la instalación del sistema de Packers para ensayos dobles.	
13	Conexión entre Packer 2 y Flauta.	Conectar extremo móvil del Packer 2 a la Flauta. Por lo general la flauta es de 1.5m, por lo tanto, si es necesario que el tramo de obturación sea mayor, se debe conectar más de una flauta de la misma forma, por medio de uniones de acero galvanizado.	Perforista asistido por Geólogo
14	Conexión entre flauta y Packer 3.	Conectar la Flauta con el extremo firme del Packer 3.	Perforista asistido por Geólogo
15	Conexión de manguera de nitrógeno entre Packer 1 y 2	Conectar un tramo de manguera de nitrógeno entre Packer 1 y Packer 2, pasando por la ranura del Seating Cone y enroscando las boquillas de gas de cada uno de los packers, protegiendo la manguera con cinta aislante para evitar que la manguera de nitrógeno se corte al pasar por la broca.	Perforista asistido por Geólogo
16	Conexión de manguera de nitrógeno entre Packer 2 y 3.	Conectar tramo de manguera de nitrógeno entre Packer 2 y Packer 3, enroscando las boquillas de gas de cada uno de los packers, protegiendo la manguera con cinta aislante para evitar que la manguera de nitrógeno se corte al pasar por la broca.	Perforista asistido por Geólogo
17	Conexión entre "JetControl" y pipeta de nitrógeno	Conectar el regulador de presión "JetControl" a la pipeta de nitrógeno, asegurando un correcto sellado. Los 2 manómetros deben quedar instalados en posición vertical y las llaves de salida de gas deben estar posicionadas de tal manera que su manipulación sea sencilla.	Perforista asistido por Geólogo
18	Conexión entre "JetControl" y Packer 1.	Conectar manguera de nitrógeno entre el regulador de presión (JetControl) y el Packer 1 por dentro del Stuffing Box	Perforista asistido Geólogo
19	Revisión de fugas	Con el sistema de gas conectado, abrir la llave del "JetControl" a una presión inferior a 20psi y revisar con agua-jabón la formación de burbujas en algún sector de la línea de inflado, en especial en las	Geólogo asistido por Perforista

No.	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
		conexiones de la manguera con los packers; si se observan fugas, detenga el inflado, desinifle los packers, desconecte la sección donde existan fugas y repárela.	
20	Inserción juego de Packers en la tubería	Recoger el cable Wire-Line para introducir los Packers en el pozo. Al recoger el cable, el sistema de Packers se elevará por la torre de perforación permitiendo así la inserción de la herramienta. Si el juego de packers es demasiado extenso y supera la altura de la torre, se recomienda seccionar en 2 partes el equipo Lugeon.	Perforista asistido por Geólogo
21	Asegurar Stuffing Box con la tubería	Con el juego de packers dentro de la tubería, se asegura manualmente el Stuffing Box en el tope de la tubería en superficie.	Perforista
22	Descenso del juego de packers	Descender lentamente el juego de packers dentro de la tubería, deteniéndose promedio cada 2 metros para asegurar el cable Wire-Line con la manguera de presión con cinta aislante, hasta que llegue al frente de la tubería.	Perforista y geólogo
23	Localización del juego de packers	Una vez alcanzada la profundidad, el Seating Cone choca con la broca.	Perforista asistido por Geólogo
24	Inserción de sellos dentro del Stuffing Box	Se realiza la inserción de los sellos de la siguiente forma: introducir primero el sello metálico más grueso localizando en el centro el cable Wire-Line, luego insertar los sellos neumáticos uno a uno, introduciendo siempre el cable Wire-Line en el centro y en el orificio exterior la manguera de nitrógeno, por último, insertar el sello metálico menos pesado en el tope del Stuffing Box. Finalmente asegurar la rosca exterior parcialmente	Perforista asistido por Geólogo
25	Inflado de packers	Inflar los packers a la presión determinada por el Geólogo según la profundidad y el nivel freático presente en la perforación.	Geólogo.
26	Revisión del sistema de agua	Inyectar agua al pozo, verificando que la válvula de descarga de la base del cuentalitros esté totalmente abierta y la llave de entrada de agua del cuentalitros	Geólogo

No.	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
		cerrada. El agua retornará nuevamente a los tanques expulsando inicialmente el aire almacenado dentro del sistema, esperar hasta que el flujo de agua sea constante y no existan pulsos de agua producto de aire en el sistema.	
27	Inyección de agua	Con el flujo constante de agua, abrir la llave de entrada de agua de la base del cuentalitros y cerrar la llave de descarga del cuentalitros. Apenas se observe en el manómetro que se está elevando la presión, es necesario abrir gradualmente la llave de descarga.	Geólogo
28	Determinación presión máxima admisible	Elevar la presión del agua en el sistema, cerrando la llave de descarga y esperar que la presión aumente hasta una medida máxima de 120psi. Si el sistema no alcanza esta presión, se considerará la máxima medida como la presión máxima admisible	Geólogo
29	Ejecución del ensayo	Nivelar la presión del manómetro al valor determinado para el primer ciclo, posteriormente se toma la medida inicial de consumo de agua en litros (L) en el Formato para la ejecución de Ensayos Lugeon y se inicia el cronómetro. Se toman las medidas de consumo de agua cada 2 minutos durante 10 minutos. Al cumplir este tiempo, elevar la presión hasta la presión determinada en el ciclo 2 y tomar las medidas nuevamente. Repetir este procedimiento para cada uno de los ciclos determinados para el ensayo.	Geólogo

Fuente: PROTOCOLO OPERATIVO PARA LA ELABORACIÓN DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD IN SITU LUGEON REFERIDO EN LA NORMA ASTM D4630-96 (2008). AngloGold Ashanti.

- REGISTRO DE DATOS DEL ENSAYO

El registro de los datos obtenidos durante ejecución de ensayos Lugeon debe ser diligenciado en un formato, diseñado por AGA para este fin (Ver Figura 34).

Figura 34. Formato para ejecución de Ensayos Lugeon

Ensayo Lugeon #														
DATOS GENERALES DEL ENSAYO														
Plataforma:		Diámetro perforación:		m		RESPONSABLE _____								
Perforación:		Inclinación perforación:		grados		REVISÓ: _____								
Fecha:		Profundidad perforación:		m										
DATOS ESPECÍFICOS DEL ENSAYO														
Nivel estático medido:		(m) INCL.		Tipo de Packer:				Presión de inflado Packer (psi):						
Nivel estático real:		(m)		Limite superior tramo medido:				(m) INCL.		P max teórica		(psi):		
Altura medición s.n.t.:		(m) INCL.		Limite superior tramo real:				(m)		P max teórica segura		(psi):		
Altura medición s.n.t. real:		(m)		Limite inferior tramo:				(m) INCL.		P max		(psi):		
Altura manómetro s.n.t.:		(m)		Limite inferior tramo real:				(m)		P incrementos		(psi):		
				Longitud tramo L:				(m)						
TOMA DE DATOS DE CAMPO														
Tiempo (min)	Lectura medidor (lt)	Volumen (lt)	Flujo (lpm)	Flujo (lis)	Medición de presión (psi)	Cabeza presión h_p (m)		Tiempo (min)	Lectura medidor (lt)	Volumen (lt)	Flujo (lpm)	Flujo (lis)	Medición de presión (psi)	Cabeza presión h_p (m)
0								0						
2								2						
4								4						
6								6						
8								8						
10								10						
0								0						
2								2						
4								4						
6								6						
8								8						
10								10						
0								0						
2								2						
4								4						
6								6						
8								8						
10								10						
INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO														
Etapas	Cabeza de presión prom. h_p (m)	Flujo prom. Q (lpm)	Perdida de fricción tubo f_t (m)	Perdida de fricción fittings f_r (m)	Exceso de carga h_c (m)	K (m/s)	K (cm/s)							
1														
2														
3														
4														
5														
6														
Exceso de carga = $h_p + h_g + s_w - f_t - f_r$			Permeabilidad Promedio =											
COMENTARIOS														

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti.

El formato consta de seis (6) secciones: DATOS GENERALES DEL ENSAYO, DATOS ESPECÍFICOS DEL ENSAYO, TOMA DE DATOS DE CAMPO, INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO, GRÁFICA Y OBSERVACIONES, las cuales deben ser diligenciadas correctamente, durante el transcurso del ensayo, con la información requerida.

DATOS GENERALES DEL ENSAYO:

En esta sección del formato se anotan los datos básicos de los ensayos del ensayo, tales como:

- **ENSAYO LUGEON #:** Describir que número de ensayo es con respecto al pozo.
- **UBICACIÓN:** Escribir el sector o el área donde se encuentra ubicada la perforación.
- **PERFORACIÓN:** Corresponde al código de la perforación.
- **DIÁMETRO PERFORACIÓN:** Anotar el diámetro de la perforación (HQ o NQ o el utilizado) y su diámetro en metros (m)
- **INCLINACIÓN PERFORACIÓN:** Se escribe el ángulo de la perforación con respecto a la horizontal.
- **PROFUNDIDAD PERFORACIÓN:** Copiar la profundidad actual del frente del pozo, NO de la tubería.
- **RESPONSABLE:** Anotar el nombre del Geólogo o ingeniero a cargo del Ensayo
- **REVISÓ:** Dejar en blanco y corresponde a la revisión del ingeniero o Geólogo a cargo, posterior al ensayo.

Tabla 13. Sección del formato de Lugeon para los datos generales del ensayo

Ensayo Lugeon #		
Ubicación:	Diámetro perforación: m	RESPONSABLE
Perforación:	Inclinación perforación: grados	
Fecha:	Profundidad perforación: m	REVISÓ:

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

DATOS ESPECÍFICOS DEL ENSAYO:

En estas tablas se escriben datos puntuales del ensayo como el nivel estático del agua, tipo de Packer, límites del ensayo y presiones de inflado, entre otros:

- **SISTEMA DE AGUA:** en esta tabla se describe el nivel estático del agua en la perforación; si la perforación es vertical, el nivel estático medido es igual al nivel estático real, de lo contrario debe calcularse de la siguiente forma

$$\text{Nivel Estático Real} = (\text{Nivel Estático Medio}) \times \sin(\text{inclinación de Perforación})$$

Se debe anotar además, la altura del manómetro del medidor de flujo “cuentalitros” con respecto a la superficie del terreno.

- **PROFUNDIDADES:** En esta tabla se anota el tipo de ensayo, la longitud y los límites del tramo a ensayar. Si el pozo es vertical los límites medidos serán iguales a los reales, de lo contrario se deben hallar de la siguiente forma:

$$\text{Lim. Sup. Tramo Real}$$

$$= (\text{Lim. Sup Tramo Medio}) \times \sin(\text{inclinación de Perforación})$$

$$\text{Lim. Inf. Tramo Real} = (\text{Lim. Inf Tramo Medio}) \times \sin(\text{inclinación de Perforación})$$

Recordar que la profundidad de la tubería NO es el límite superior del ensayo, se debe sumar la longitud del Packer.

- **PRESIONES:** En esta tabla se escriben las presiones halladas previamente al ensayo, como lo son la presión de inflado de los packers, la presión máxima teórica, la presión máxima aceptada y la secuencia de incrementos de las presiones.

Tabla 14. Sección del formato Lugeon para los datos específicos del ensayo

Nivel estático medido:	(m) INCL.	Tipo de Packer:		Presión de inflado Packer (psi):	
Nivel estático real:	(m)	Límite superior tramo medido:	(m) INCL.	P max teórica (psi):	
Altura medición s.n.t.:	(m) INCL.	Límite superior tramo real:	(m)	P max teórica segura (psi):	
Altura medición s.n.t. real:	(m)	Límite inferior tramo:	(m) INCL.	P max aceptada (psi):	
Altura manómetro s.n.t.:	(m)	Límite inferior tramo real:	(m)	P incrementos (psi):	
		Longitud tramo L	(m)		

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

TOMA DE DATOS DE CAMPO:

La toma de datos durante la ejecución del ensayo Lugeon se describe de la siguiente manera:

- a. Como el sistema ya está saturado y se observa elevación de presión en el manómetro del medidor de flujo medidor volumétrico de agua; se eleva la presión haciendo uso de la llave de descarga hasta la presión inicial P1, evitando manipular la llave que lleva el agua a la perforación. Lograda la presión, se esperan aproximadamente 3 minutos mientras se estabiliza y se toma la lectura del medidor de flujo medidor volumétrico de agua en la casilla (Lectura medidor) en el tiempo t0 activando el cronómetro.
- b. Pasados 2 minutos se toma la lectura del medidor de consumo medidor volumétrico de agua (Lectura medidor) en Litros, correspondiente a dicho tiempo (t2) sin detener el cronómetro y se realiza la resta entre los volúmenes

del tiempo t_0 y del tiempo t_2 calculando así el consumo del minuto cero (0) al minuto dos (2).

$$\text{Vol. } t_2 = \text{Consumo en } t_2 - \text{Consumo en } t_0$$

Este volumen se divide por 2 y se obtiene el flujo por minuto de esta medida.

- c. Se repite el paso anterior pasados cuatro (4) minutos y se restará el volumen de dicho tiempo t_4 con el volumen encontrado a los dos (2) minutos, es decir t_2 , y de ahí se obtiene el consumo del minuto dos (2) al cuatro (4). Dicho volumen debe ser comparado con el volumen calculado del minuto cero (0) al minuto dos (2); si dichos valores son cercanos continúe tomando medidas cada dos (2) minutos hasta los diez (10) y haciendo registro de estas, comparando siempre los volúmenes; si estos volúmenes dejan de ser cercanos entre sí, siga con las medidas cada dos (2) minutos hasta que obtenga al menos cuatro (4) valores de volúmenes similares entre sí y registre los consumos en el orden que los tomó en el formato. La revisión debe hacerse también con el flujo promedio, ya que es directamente proporcional al volumen.
- d. Obtenido el registro de esta presión P1 incrementar la presión al valor P2 siguiendo el mismo procedimiento de los ítems a, b, c, y culminado el registro se continúa realizando esto hasta completar la lectura con todas las presiones calculadas.

INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO:

Con los datos obtenidos de consumo en las cinco (5) presiones, se procede a completar los datos interpretativos de la tabla inferior del formato.

Tabla 15. Sección del Formato Lugeon para interpretación del Ensayo

Etapa	Cabeza de presión prom. hp (m)	Flujo prom. (lpm) Q	Perdida de fricción tubo fp (m)	Perdida de fricción fittings ff (m)	Exceso de carga he (m)	K (m/s)	K (cm/s)
1							
2							
3							
4							
5							
Permeabilidad Promedio =							

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

$$\text{Exceso de carga} = h_p + h_g + s_w - f_p - f_f$$

- **Cabeza de presión promedio hp (m):** Consiste en multiplicar el valor de la presión de la etapa por 0.7 para convertirla en metros.

$$\text{Cabeza de Presión (Etapa } i) = P_i \times 0.7$$

- **Flujo promedio "Q":** Posterior a la toma de los datos, se determina el flujo promedio "Q" de cada presión, el cual consiste en hallar el flujo por minuto de cada valor dentro del ciclo de presión, luego promediar los 5 valores y dividirlo por 2, ya que la toma de datos se hizo cada 2 minutos.

$$\text{Flujo Prom. P1} = \frac{(\sum_{i=1}^{10} Vol. t_n)}{5} \times \frac{1}{2}$$

Para este valor, se espera que el flujo aumente al incrementar las presiones y se reduzca al disminuir presiones, aunque este comportamiento está sujeto a variaciones en casos que serán descritos posteriormente; algunos casos, el comportamiento anómalo puede producirse por hidro-fracturamiento o taponamientos en el tramo de obturación.

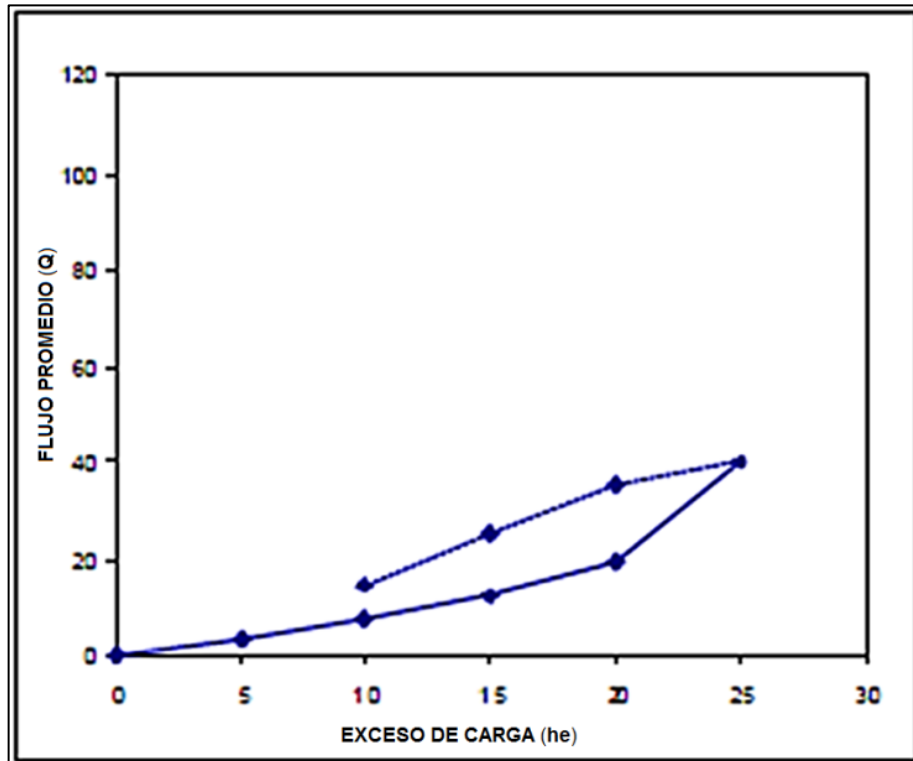
- **Exceso de Carga (he):** Al haber hallado la cabeza de presión promedio, se calcula el exceso de carga, el cual es la sumatoria entre la cabeza de presión, el nivel freático real, la altura del manómetro menos la pérdida de fricción del tubo "Fp" que es igual a (0.1m)

$$Exc. Carga (he)P1 = Cabeza de Presión 1 + NF_{Real} + h_{Manómetro} - Fp$$

GRÁFICA:

Con el valor de Flujo promedio "Q" y de Exceso de carga (he), se procede a graficar los puntos de cada presión (Exceso de Carga he (m), Flujo Q (lpm); Ver Figura 35) y se revisa la tabla con las gráficas correspondientes para la Interpretación de Ensayo Lugeon (Ver Figura 38), para identificar a cual tipo de gráfica se asemeja y si es válido el ensayo o debe repetirse.

Figura 35. Interpretación del Flujo basado en los resultados de Q y he obtenidos en ensayos Lugeon



Fuente: AngloGold Ashanti. 2016.

- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El análisis de la información obtenida a través de la ejecución de ensayos Lugeon permite conocer información útil sobre el comportamiento de la zona o tramo de ensayo.

GRÁFICA DE PRESIÓN Vs VALOR LUGEON

La interpretación de ensayos Lugeon se deriva principalmente de los trabajos realizados por Housby (1976). En su trabajo, orientado hacia el establecimiento de requisitos de inyección, Housby propuso que los valores de conductividad

hidráulica representativos deben ser seleccionados basados en el comportamiento observado en los valores calculados para las diferentes etapas de presión de los ensayos Lugeon (Ver Figura 36; Figura 38).

Houlsby (1976) clasifica las conductas típicas observadas en la práctica en cinco (5) diferentes grupos, denominados así:

1. **Flujo Laminar:** La conductividad hidráulica de la masa rocosa es independiente de la presión del agua empleada. Este comportamiento es característico de las masas de roca observando bajas conductividades hidráulicas, donde las velocidades de infiltración son relativamente pequeños (es decir, menos de cuatro Lugeon).
2. **Flujo turbulento:** La conductividad hidráulica de la masa rocosa disminuye a medida que el agua aumenta la presión. Este comportamiento es característico de las masas de roca que muestran parte abiertas a moderadamente amplia grietas.
3. **Dilatación:** conductividad hidráulica similares se observan a presiones bajas y medias; sin embargo, un valor mucho mayor se registra a la presión máxima. Este comportamiento - que a veces también observado a presiones medianas - se produce cuando el agua presión aplicada es mayor que la tensión principal mínimo de la masa rocosa, por lo tanto causando una dilatancia temporal (hidro-jacking) de las fisuras dentro de la masa de roca. Dilatancia causa un aumento en el área de sección transversal disponible para el agua fluya, y por lo tanto aumenta la conductividad hidráulica.
4. **Lavar y salida exprés:** conductividades hidráulicas aumentan a medida que se realiza la prueba, independientemente de la observaron cambios en la presión del agua. Este comportamiento indica que induce la infiltración daño permanente e irrecuperable en la masa rocosa, por lo general debido a llenuras lavan y/o movimientos de la roca permanentes.

5. **Relleno de huecos:** conductividades hidráulicas disminuyen a medida que se realiza la prueba, independientemente de la observaron cambios en la presión del agua. Este comportamiento indica que, o bien: (1) agua progresivamente rellenos discontinuidades aisladas / no persistentes, (2) la inflamación se produce en las discontinuidades, o (3) las multas fluyen lentamente en las discontinuidades construcción de una torta capa que les obstruye

Figura 36. Interpretación de Ensayos Lugeon por Etapa de Presión Vs Valor Lugeon, basado en la clasificación de Houlsby (1976)

COMPORT	ETAPAS DE PRESIÓN	PATRÓN LUGEON	DESCRIPCIÓN	REPRESENT. VALOR LUGEON
LAMINAR			Todos los valores Lugeon aproximadamente iguales independientemente de la presión del agua.	Valores Lugeon promedio para todas las etapas.
TURBULENTO			Los valores Lugeon disminuyen a medida que aumenta la presión del agua. El valor mínimo Lugeon se observa en el escenario con la presión máxima del agua.	Menor valor Lugeon correspondiente a la presión de agua más alta. (3 ^{era} etapa)
DILATANTE			Los valores Lugeon varían en proporción a las presiones de agua. El valor máximo Lugeon se observa en el escenario con la presión máxima del agua.	Valor Lugeon más bajo corresponde a las presiones de agua bajas o medias (1 ^{era} , 2 ^{da} , 4 ^{ta} , 5 ^{ta} etapa)
LAVADO			Los valores Lugeon aumentan a medida que se realiza la prueba. El relleno de las discontinuidades se va lavando progresivamente por el agua inyectada.	Aumento en el valor Lugeon, el más alto registrado (5 ^{ta} etapa)
RELLENO			Los valores Lugeon disminuyen a medida que se realiza la prueba. Las discontinuidades se llenan progresivamente o su relleno se está hinchando.	Disminución en el valor Lugeon, menor valor registrado (5 th stage)

Nota: Unidad Lugeon = litro de agua por minuto por metro de perforación inyectado a presión constante de 1 MPa (10 kgf/cm²).

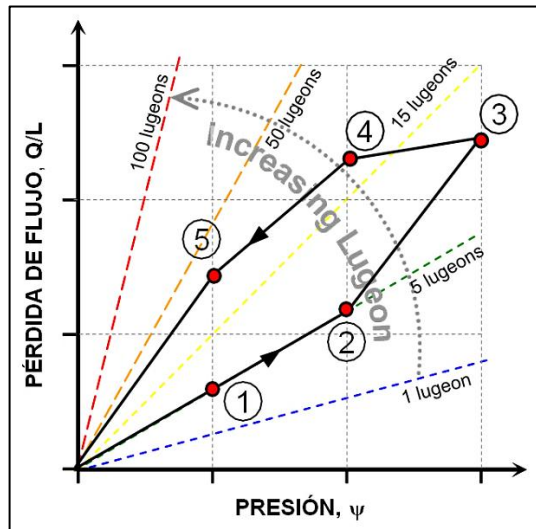
Modificado de: LUGEON TEST INTERPRETATION. Camilo Quiñones-Rozo.

GRÁFICA DE PÉRDIDA DE FLUJO (Q/L) Vs PRESIÓN (P)

Basándose en los cinco (5) grupos de clasificación definidos por Houlby (1976) para las conductas típicas de los Ensayos Lugeon, se realiza una interpretación a través del análisis de la Pérdida de Flujo respecto a la presión (Ver Figura 37).

Analizando los resultados del Ensayo Lugeon en cuanto a la pérdida de flujo frente a la presión del ensayo, se puede observar que el comportamiento típico de las gráficas se ajusta a los cinco (5) grupos de clasificación definidos por Houlby (1976) para las conductas típicas de los Ensayos Lugeon.

Figura 37. Interpretación de Ensayos Lugeon basada en la Pérdida de Flujo Vs Presión



Modificado de: LUGEON TEST INTERPRETATION. Camilo Quiñones-Rozo.

Si un conjunto de valores Lugeon, correspondientes a las cinco (5) o seis (6) etapas de la prueba, se grafican respecto a su Pérdida de Flujo y a su Presión, lo más típico es que se observe una curva de presión. La forma de esta curva

describe el comportamiento del valor Lugeon del ensayo a medida que este avanza, por tal motivo es usado para su interpretación.

Por ejemplo: Suponiendo que la Pérdida de Flujo es directamente proporcional a la presión, los valores para cada etapa del ensayo se van a ubicar sobre la misma línea recta; por otra parte, sabiendo que la pendiente de esta recta corresponde al valor Lugeon, se puede deducir que dicho valor se mantuvo constante durante toda la prueba, lo que implica que se observó un comportamiento laminar a lo largo del ensayo.

De esta forma, al realizar el análisis para el comportamiento de cada una de las gráficas resultante de los ensayos Lugeon, se puede apreciar que dicho comportamiento se puede enmarcar dentro de las categorías de comportamiento propuestas por Houlsby (1976), como se muestra a continuación (Ver Figura 38).

Figura 38. Interpretación de Ensayos Lugeon por Pérdida de Flujo Vs Presión, basado en la clasificación de Houlsby (1976)

COMPORT.	PÉRDIDA DE FLUJO Vs PATRÓN DE PRESIÓN	DESCRIPCIÓN	VALOR LUGEON REPRESENTATIVO
LAMINAR		Todos los valores Lugeon aproximadamente iguales independientemente de la presión del agua.	Valores Lugeon promedio para todas las etapas.
TURBULENTO		Los valores Lugeon disminuyen a medida que aumenta la presión del agua. El valor mínimo Lugeon se observa en el escenario con la presión máxima del agua.	Si la presión del agua observada durante la operación es desconocida, debe emplearse entonces el valor correspondiente a la presión media del agua (2ª o 4ª etapa).
DILATANTE		Los valores Lugeon varían en proporción a las presiones de agua. El valor máximo Lugeon se observa en el escenario con la presión máxima del agua.	Si la presión del agua observada durante la operación es desconocida, debe emplearse entonces el valor correspondiente ya sea a presiones de agua baja o media (1ª, 2ª, 4ª, 5ª etapa).
LAVADO		Los valores Lugeon aumentan a medida que se realiza la prueba. El relleno de las discontinuidades se va lavando progresivamente por el agua inyectada.	Valor Lugeon más alto registrado (5ª etapa).
RELLENO		Los valores Lugeon disminuyen a medida que se realiza la prueba. Las discontinuidades se llenan progresivamente o su relleno se está hinchando.	Utilizar el valor final del ensayo Lugeon (5ª etapa), ya que las discontinuidades sufren relleno y/o hinchazón. Esto se debe confirmar con la observación del núcleo de roca.

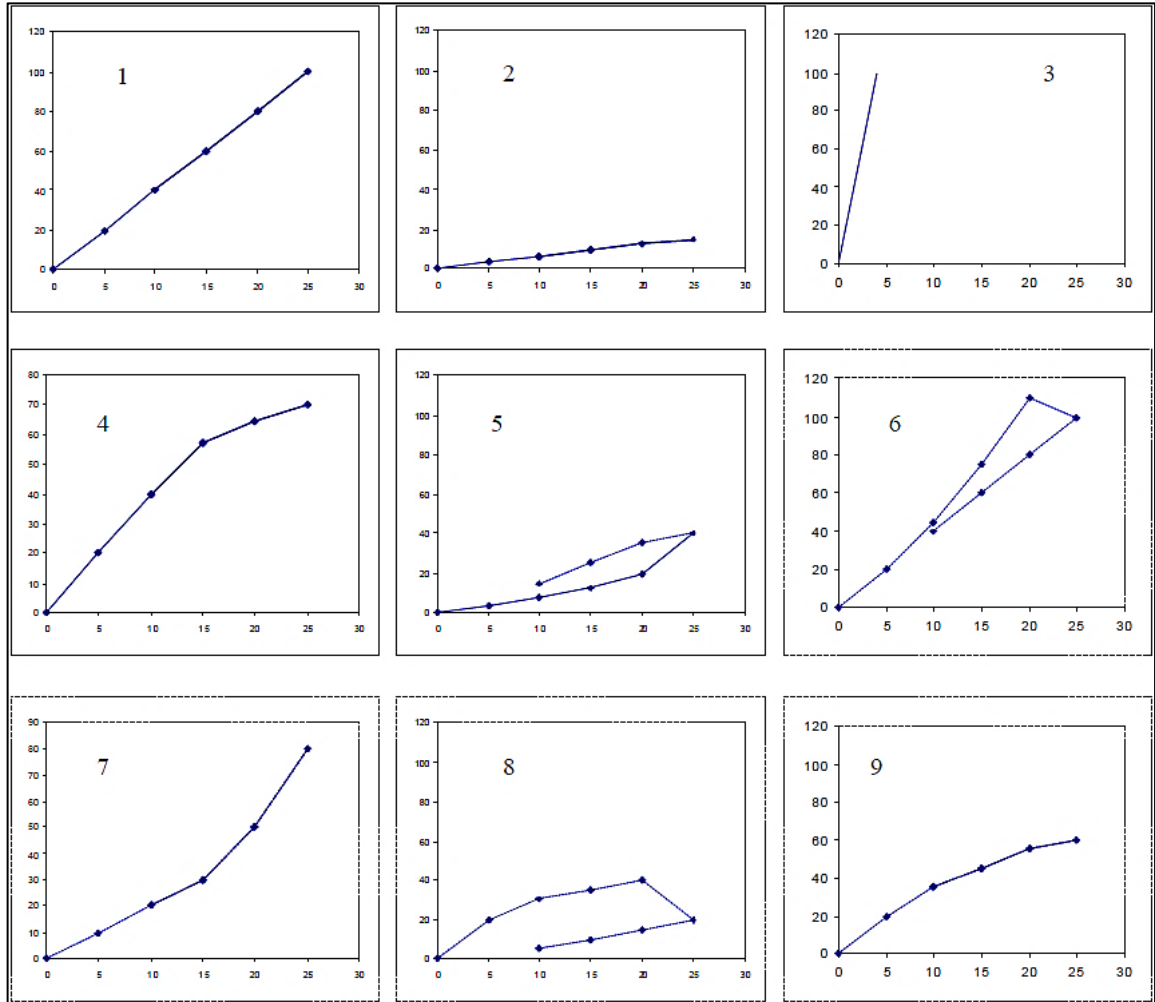
Modificado de: LUGEON TEST INTERPRETATION. Camilo Quiñones-Rozo.

Una de las características de la interpretación de datos a través de este enfoque es la posibilidad de que la interpretación sea compatible con el uso de sistemas de adquisición de datos automatizados, los cuales permiten la interpretación y el seguimiento, de la información obtenida, en tiempo real.

GRÁFICA DE FLUJO (Q) Vs EXCESO DE CARGA (he)

El formato para Ensayos Lugeon muestra los resultados en una gráfica que relaciona el flujo promedio (Q) con respecto al exceso de carga (he). Esta gráfica, según la forma que tome, representa el comportamiento del flujo de la zona fracturada, como se muestra a continuación.

Figura 39. Interpretación del Flujo basado en los resultados de Q y he obtenidos en ensayos Lugeon



Fuente: AngloGold Ashanti. 2016.

Respecto a la gráfica anterior, estos son algunos de los posibles resultados que pueden ser observados en la ejecución de ensayos Lugeon.

1. Representa el flujo laminar. Descarga proporcional a la cabeza de presión.
2. Representa Material Impermeable. Fracturas Cerradas.
3. Representa Material Muy Permeable. Fracturas Abiertas.

4. Representa alta permeabilidad con disminución en el flujo a medida que avanza el tiempo por cambio de flujo laminar a flujo turbulento o cierre de fracturas (cierre parcial).
5. Representa baja permeabilidad con aumento en el flujo a medida que avanza el tiempo debido al lavado del material de relleno en las fracturas.
6. Representa permeabilidad moderada. Al aumentar presión de inflado de Packer, se vuelve a una relación lineal entre el flujo y la cabeza de presión, indicando que había un By-Pass.
7. Representa un incremento de permeabilidad con la presión. Indica que las fracturas se abrieron por hidro-fracturamiento o se produjo By-Pass.
8. Representa un decremento de permeabilidad con presión y tiempo, indicando cierre de fracturas por transporte de material que reduce el flujo.
9. Representa permeabilidad moderada y caudal no lineal.

En el estudio hidrogeológico desarrollado en los 39 pozos correspondientes al área del Site-11 del PLC, se han ejecutado un total de 203 ensayos Lugeon en solo 21 pozos (ver Tabla 16).

Tabla 16. Tabla de ensayos Lugeon realizados en los pozos del Site-11 para evaluación de la Conductividad Hidráulica del macizo rocoso

ID POZO	Test	Total Lugeon	Total Lefranc	Total Pruebas
COL398	Lugeon	21		21
COL399	Lugeon	22		22
COL400	Lugeon	3		3
COL403	Lugeon	11		11
COL407	Lugeon	16		16
COL413	Lugeon	19		19
COL416	Lugeon	2		2
COL417	Lugeon	9		9

ID POZO	Test	Total Lugeon	Total Lefranc	Total Pruebas
COL419	Lugeon	0		0
COL420	Lugeon	21		21
COL422	Lugeon	10		10
COL423	Lugeon	1		1
COL424	Lugeon	9		9
COL425	Lugeon	8		8
COL426	Lugeon	10		10
COL430	Lugeon	8		8
COL431	Lugeon	10		10
COL432	Lugeon	7		7
COL433	Lugeon	2		2
COL434	Lugeon	9		9
COL436	Lugeon	5		5

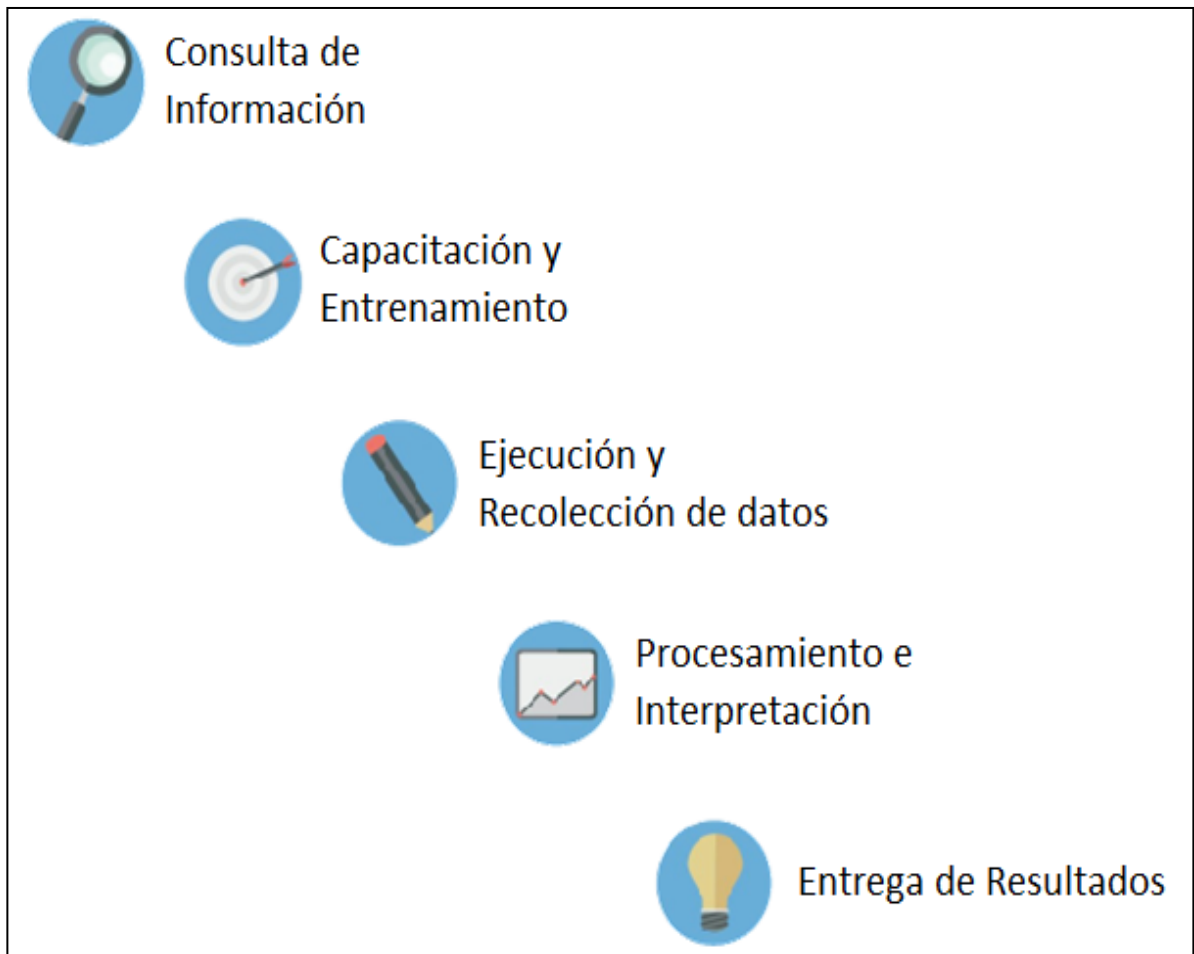
Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti. 2016.

Tomando como ejemplo uno de los pozos estudiados, en el pozo COL-432 se realizaron siete (7) ensayos, uno para cada tramo de interés, en los cuales se ejecutaron seis (6) *Ensayos Lugeon de Packer Doble* y solo un (1) *Ensayo Lugeon de Packer Simple* (ver Tabla 16).

5. METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo para el desarrollo de esta práctica fue dividida en en cinco (5) etapas muy generales, las cuales corresponden a: (1) Etapa de Consulta de Información; (2) Etapa de Capacitación y Entrenamiento; (3) Etapa de Ejecución y Recolección de Datos; (4) Etapa de Procesamiento e Interpretación; y (5) Etapa de Entrega de Resultados (Ver Figura 40).

Figura 40. Etapas generalizadas de la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo de grado



Dentro de cada una de las etapas mencionadas se desarrollaron una serie de actividades que permitieron cumplir con el objetivo de cada una de las mismas.

- *Etapa de Consulta de Información:* Durante esta etapa se revisaron los conceptos básicos para el entendimiento de cada una de las tareas que se iban a desarrollar durante el transcurso de las prácticas. Se revisaron conceptos partiendo desde lo aprendido en la universidad, hasta algunos conceptos empleados por la empresa.
- *Etapa de Capacitación y Entrenamiento:* Durante el desarrollo de esta etapa, se estudiaron detalladamente cada una de las metodologías necesarias para el desarrollo de las actividades comprendidas dentro de los objetivos de la práctica. Posteriormente, se realizaron una serie de acompañamientos con los profesionales encargados de ejecutar cada una de estas actividades, con el fin de aplicar la metodología aprendida y desarrollarla en el campo.
- *Etapa de Ejecución y Recolección de Datos:* Durante esta etapa se realizó la ejecución de los respectivos ensayos dentro de los pozos seleccionados, con el fin de obtener los datos que se iban a implementar en el desarrollo de este trabajo.
- *Etapa de Procesamiento e Interpretación:* Durante el desarrollo de esta etapa, se realizó el análisis de la información recopilada en campo, con el fin de obtener las conductividades hidráulicas para cada una de las estructuras estudiadas.
- *Etapa de Entrega de Resultados:* Finalmente, se llega a la etapa que culmina el desarrollo de las prácticas, en la cual se lleva a cabo la elaboración de los respectivos informes que presentan los resultados obtenidos durante el avance de cada una de las actividades ejecutadas en el transcurso de la práctica.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

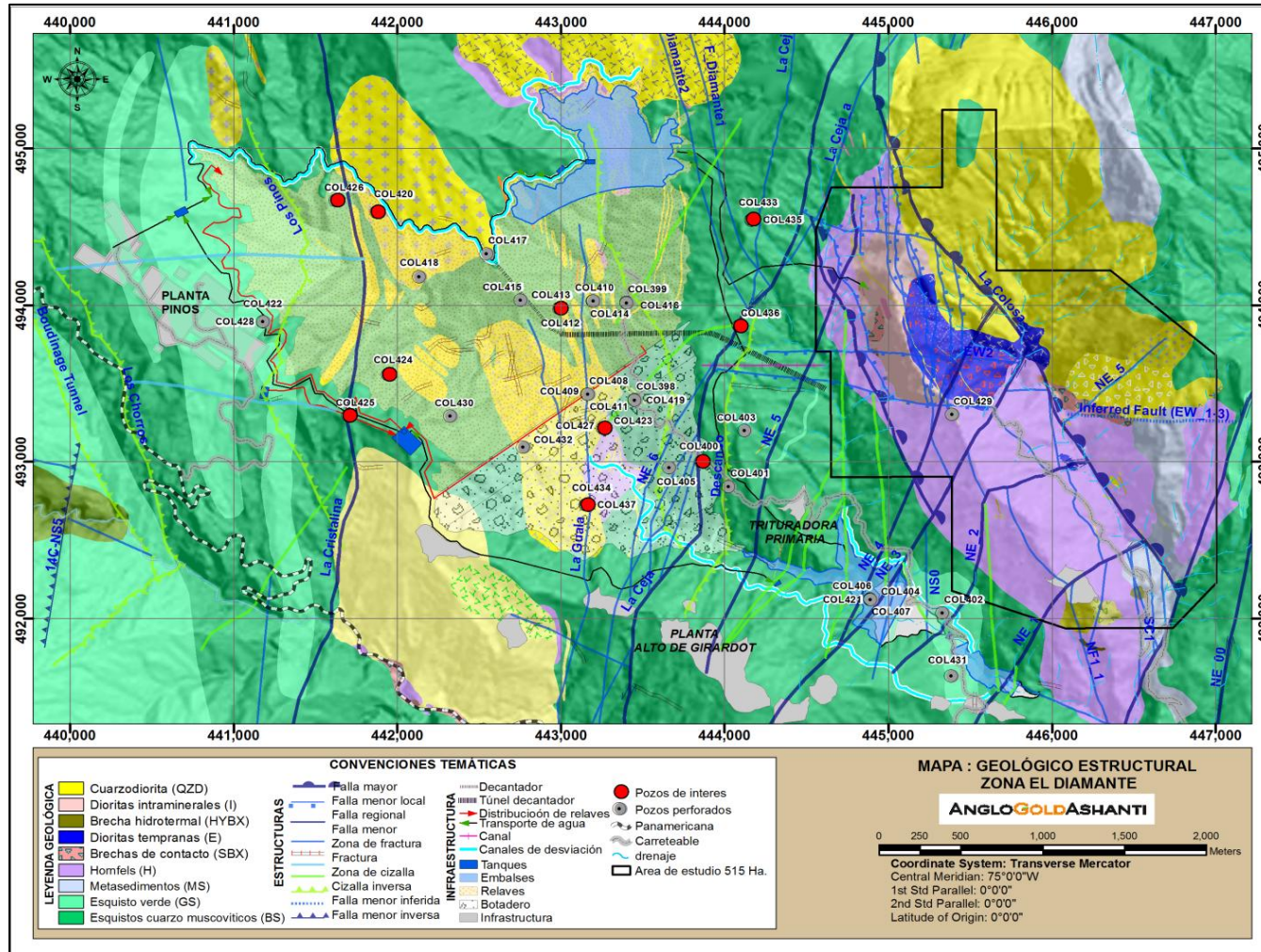
En el sector del Site-11, destinado para la ubicación de las obras de infraestructura asignadas para el desarrollo del PLC en etapas posteriores, se han identificado tres (3) estructuras principales, las cuales deben ser estudiadas con el fin de identificar el grado de afectación que pueden aportar en el desarrollo de dichas obras de ingeniería. Las estructuras han sido definidas como Falla La Ceja, Falla La Guala y Falla La Cristalina. Estas estructuras cortan el sector del Site-11 en sentido N-S y NE (ver Figura 41).

- *FALLA LA CEJA*: Esta estructura corresponde a un sistema de fallas regionales de rumbo con desplazamiento Sinistral. Se propagan en dirección NE y tienen Buzamiento de alto ángulo en dirección E. En superficie presenta una zona de daño de aproximadamente cincuenta metros (50 m), la cual corresponde a zonas de alto fracturamiento con relleno de Gouge.
- *FALLA LA CRISTALINA*: Esta estructura corresponde a una falla regional de rumbo cuyo desplazamiento no ha sido definido. Se propaga en dirección N-S y tiene un buzamiento de alto ángulo en dirección E. En superficie presenta una zona de daño de aproximadamente quince metros (15 m), la cual corresponde a zonas de alto fracturamiento con relleno de Gouge.
- *FALLA LA GUALA*: Esta estructura corresponde a una falla local de rumbo con desplazamiento Sinistral. Se propaga en dirección N-S y tiene Buzamiento de alto ángulo en dirección W. En superficie presenta una zona de daño de seis a diez metros (6 – 10 m), la cual se desarrolla muy bien mientras se propaga en litologías correspondientes a Esquistos y Hornfels, allí presenta zonas de alto fracturamiento con relleno de Gouge, pero mientras se propaga por los cuerpos intrusivos sufre un sellamiento, permitiendo que se desarrollen únicamente zonas de Slickensides (Estrías de Falla).

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

Figura 41. Mapa de localización de las principales estructuras y pozos del sector Site-11 del PLC



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.1 FALLA LA CEJA

6.1.1 Pozos Estudiados. Durante la Fase de Pre-Factibilidad desarrollada en el PLC, para el sector del Site-11, se ejecutaron 203 ensayos Lugeon en un total de 19 pozos para infraestructura, de los cuales se seleccionaron tres (3) para el cálculo de las conductividades de la Falla La Ceja (COL-400, COL-433 Y COL-436), en los cuales se ejecutaron un total de 16 ensayos Lugeon.

El pozo COL-400 tiene una profundidad de 200 m y fue perforado con una inclinación de 90°. En él se determinaron tres (3) zonas importantes para evaluar conductividades, las cuales aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

El pozo COL-433 tiene una profundidad de 203.66 m y fue perforado con una inclinación de 90°. En él se determinaron siete (7) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales cinco (5) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

El pozo COL-436 tiene una profundidad de 200 m y fue perforado con una inclinación de 90°. En él se determinaron seis (6) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales tres (3) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

6.1.2 Tramos de Prueba. Como ya se observó (ver EJECUCIÓN DE ENSAYOS HIDROGEOLÓGICOS IN-SITU, ENSAYOS LUGEON), la selección de tramos para la ejecución de ensayos de permeabilidad Lugeon es realizada a partir del Logueo Geotécnico de matrices que se realiza en la bodega El Aceituno, sobre los testigos de roca recuperados durante la perforación de cada uno de los pozos.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

6.1.2.1 COL-DDH-400: TRAMO N° 2 (165.34 – 172.47)

Figura 42. Tramo N° 2, Pozo COL-400, Falla La Ceja

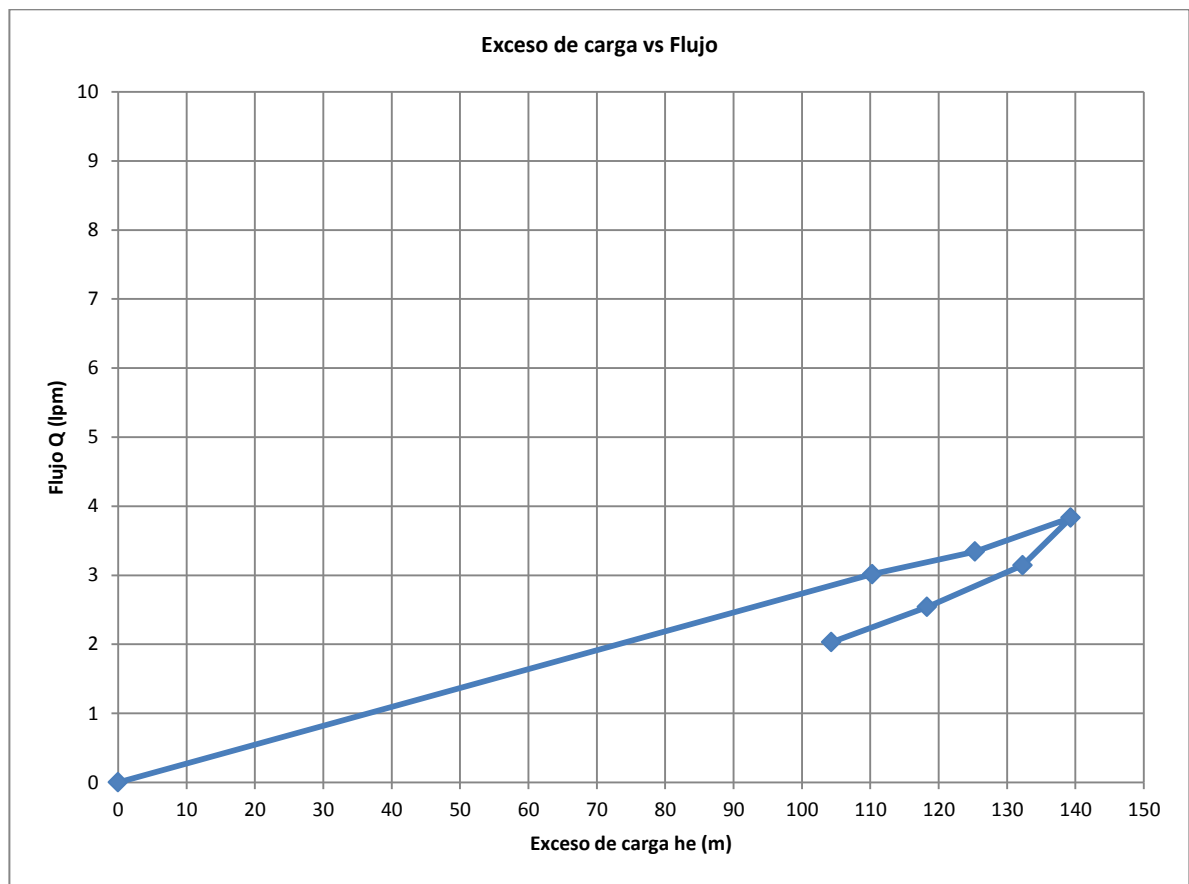


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 2 del pozo COL-400 se observa una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de 5E-08 metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 43) la cual muestra un flujo laminar durante las primeras tres (3) etapas del ensayo y un leve cierre en el medio para las siguientes tres (3) etapas.

Figura 43. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 2 del pozo COL-400



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

6.1.2.2 COL-DDH-433: TRAMO N° 6 (105.97 – 112.96)

Figura 44. Tramo N° 6, Pozo COL-433, Falla La Ceja

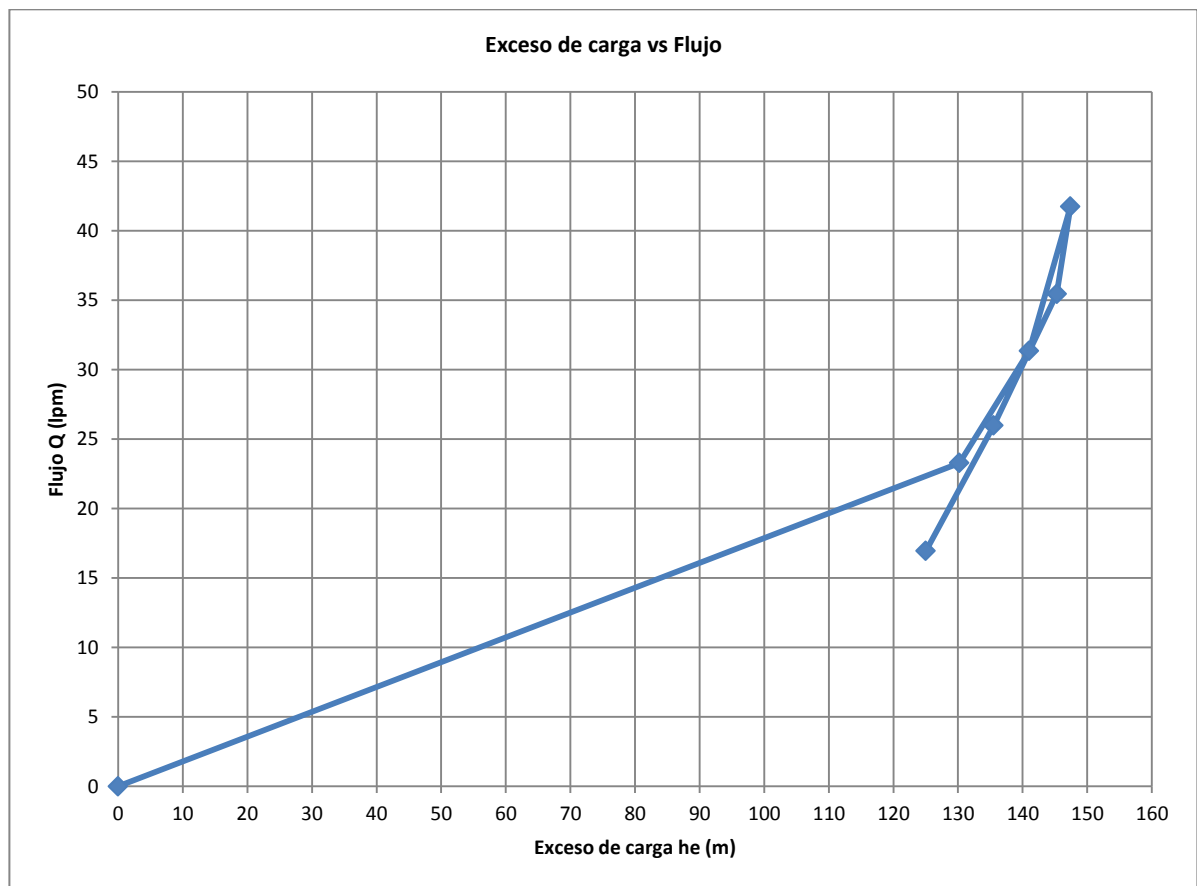


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 6 del pozo COL-433 se observa una zona de daño correspondiente al corredor de una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y algunos tramos con algo de Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de 4E-07 metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 45) la cual muestra un flujo laminar durante todo el ensayo.

Figura 45. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-433



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

6.1.2.3 COL-DDH-436: TRAMO N° 6 (85.05 – 95.21)

Figura 46. Tramo N° 6, Pozo COL-436, Falla La Ceja

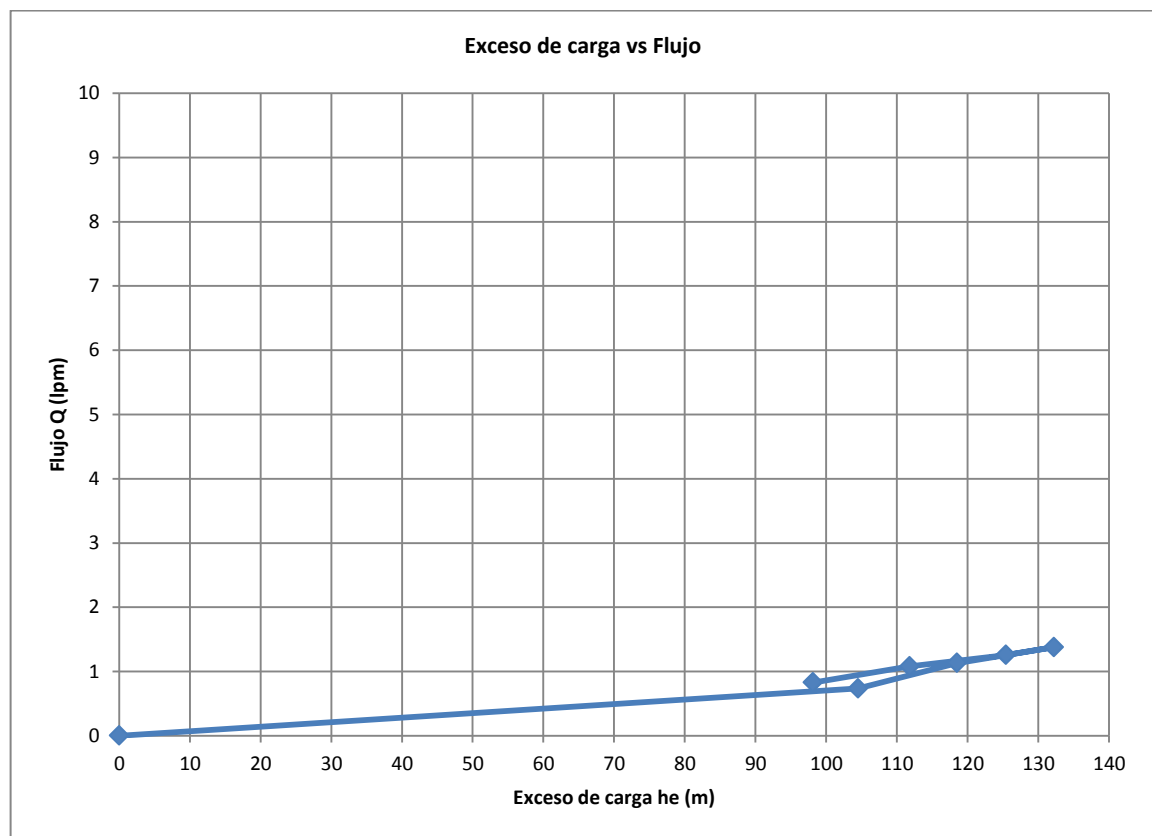


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 6 del pozo COL-436 se observa una zona de daño correspondiente al corredor de una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y algunos tramos con algo de Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de 6E-07 metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 47) la cual muestra un flujo laminar durante las primeras cuatro (4) etapas del ensayo y una leve apertura en el medio para las siguientes dos (2) etapas.

Figura 47. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-436



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.1.3 Ensayos Ejecutados. Para evaluar la conductividad hidráulica de la Falla La Ceja se evaluó en total 12 ensayos Lugeon, los cuales fueron ejecutados en los tres (3) pozos ya mencionados (Ver Tabla 17; 18; 19).

6.1.3.1 COL-400

Tabla 17. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-400

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL400	SIMPLE	Test 01	90	165.34	200	34.66	87.25	2,00E-08	OVERLAP	H
COL400	DOUBLE	Test 02	90	165.34	172.47	7.13	87.25	5,00E-08		H
COL400	SIMPLE	Test 03	90	132	200	68	90.1	1,00E-07	OVERLAP	H

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016

6.1.3.2 COL-433

Tabla 18. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-433

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL433	SIMPLE	Test 01	90	192.5	203.66	11.16	141.11	5E-06		H
COL433	SIMPLE	Test02	90	155	203.66	48.66	141.11	2E-06	OVERLAP	H
COL433	DOUBLE	Test03	90	153.9	162.4	8.5	141.11	8E-07	OVERLAP	H
COL433	DOUBLE	Test04	90	145	153.5	8.5	141.11	6E-07		H

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL433	DOUBLE	Test05	90	115	125	10	141.11	8E-07		H
COL433	DOUBLE	Test 06	90	105.97	112.96	6.99	141.11	4E-07		H
COL433	DOUBLE	Test 07	90	77.41	86.45	9.04	141.11	1E-07		H

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.1.3.3 COL-436

Tabla 19. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-436

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL436	SIMPLE	Test 01	90	190.25	200	9.75	70.2	1E-08		H
COL436	SIMPLE	Test 02	90	150.05	200	49.95	72.16	2E-07	OVERLAP	H
COL436	DOUBLE	Test 03	90	161.05	169.61	8.56	72.16	8E-07		H
COL436	DOUBLE	Test 04	90	133.05	143.21	10.16	72.11	8E-07		H
COL436	DOUBLE	Test 05	90	121.05	131.21	10.16	72.11	2E-07		H
COL436	DOUBLE	Test 06	90	85.05	95.21	10.16	71.87	6E-07		H

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.1.4 Conductividad Falla La Ceja

Tabla 20. Conductividad calculada para la Falla La Ceja

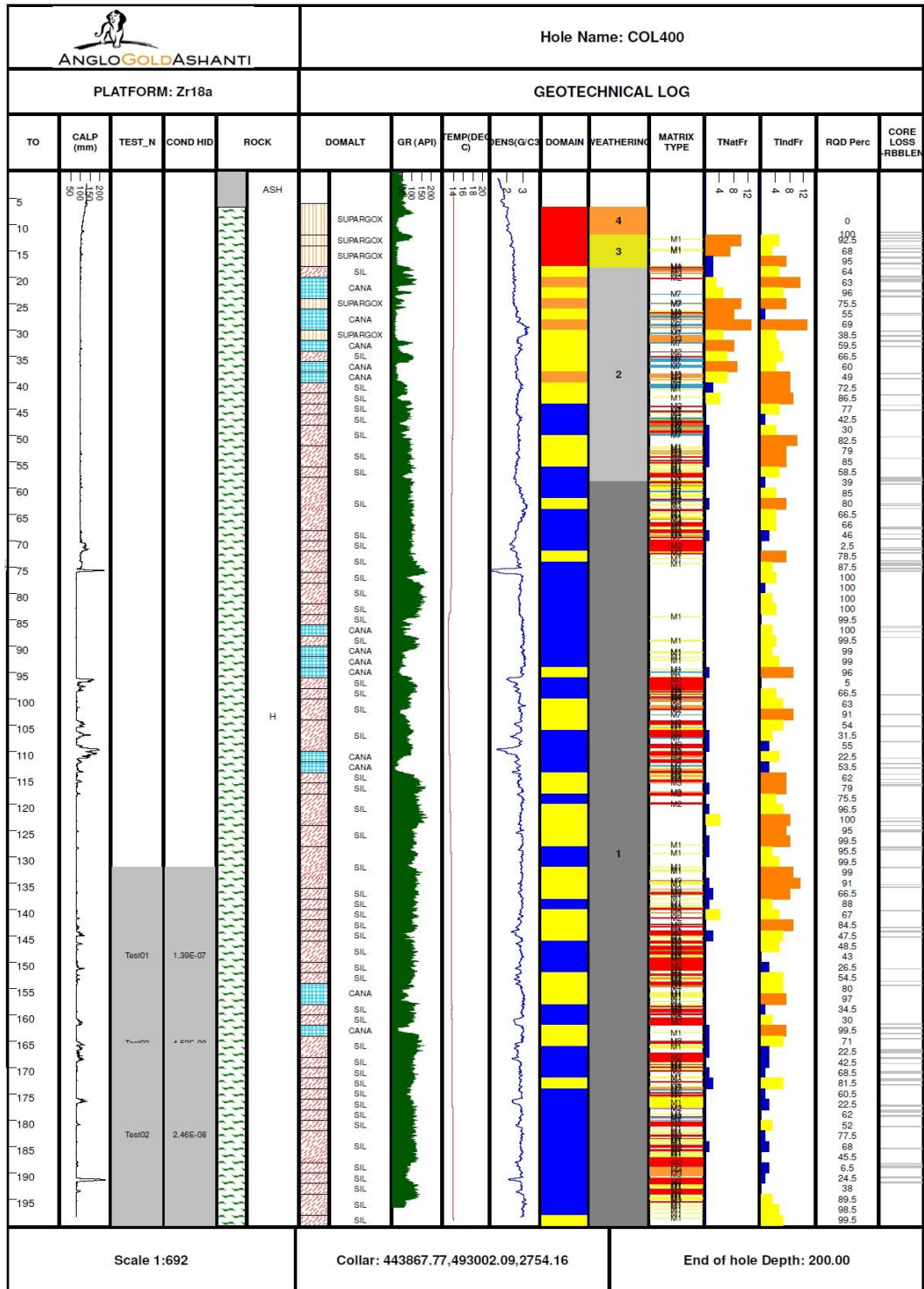
COL-400	CONDUCT	COL-433	CONDUCT	COL-436	CONDUCT	FALLA LA CEJA	CONDUCT
MIN	5E-08	MIN	4E-07	MIN	1E-08	MAX	5E-08
MAX	1E-07	MAX	1E-07	MAX	2E-07	MIN	1E-07
PROM	6E-08	PROM	3E-07	PROM	4E-07	PROM	9E-07

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.1.5 Recopilación de Información. Finalmente, luego de realizar cada uno de los ensayos Lugeon proyectados en el interior del pozo, se procede a realizar un compilado de toda la información que se ha recolectado de dicho pozo (Ensayos de Permeabilidad In-Situ, Litologías, Alteraciones, Registros Geofísicos de Pozo, Dominios Geotécnicos, Total de Fracturas, etc.) con el fin de poder interpretar las características del macizo rocoso en ese sector.

El resultado que se obtiene al compilar la información para cada uno de los pozos es llamado “HOJA LOG”. Esta hoja muestra toda la información que se ha tomado en cada uno de los estudios que han desarrollado a lo largo del pozo y permite correlacionar los análisis realizados para cada uno de ellos con el fin de obtener un análisis completo del pozo. Por ejemplo, a continuación se muestra la HOJA LOG del Pozo COL-400, para la Falla La Ceja, la cual recopila toda la información obtenida a través de los estudios realizados en él (Ver Figura 48).

Figura 48. HOJA LOG pozo COL-400, Falla La Ceja



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.2 FALLA LA GUALA

6.2.1 Pozos Estudiados. De los 203 ensayos Lugeon realizados en los 19 pozos para infraestructura, se seleccionaron tres (3) para el cálculo de las conductividades de la Falla La Guala (COL-413, COL-423 Y COL-434), en los cuales se ejecutaron un total de 34 ensayos Lugeon.

El pozo COL-413 tiene una profundidad de 200.7 m y fue perforado con una inclinación de 90°. En él se determinaron diecinueve (19) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales tres (3) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

El pozo COL-423 tiene una profundidad de 400 m y fue perforado con una inclinación de 90°. En él se determinaron seis (6) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales dos (2) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

El pozo COL-434 tiene una profundidad de 302.28 m y fue perforado con una inclinación de 60°. En él se determinaron nueve (9) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales cinco (5) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

6.2.2 Tramos de Prueba. Como ya se observó (ver **EJECUCIÓN DE ENSAYOS HIDROGEOLÓGICOS IN-SITU, ENSAYOS LUGEON**), la selección de tramos para la ejecución de ensayos de permeabilidad Lugeon es realizada a partir del Logueo Geotécnico de matrices que se realiza en la bodega El Aceituno, sobre los testigos de roca recuperados durante la perforación de cada uno de los pozos.

6.2.2.1 COL-DDH-413: TRAMO N° 4 (161 – 169.7)

Figura 49. Tramo N° 4, Pozo COL-413, Falla La Guala



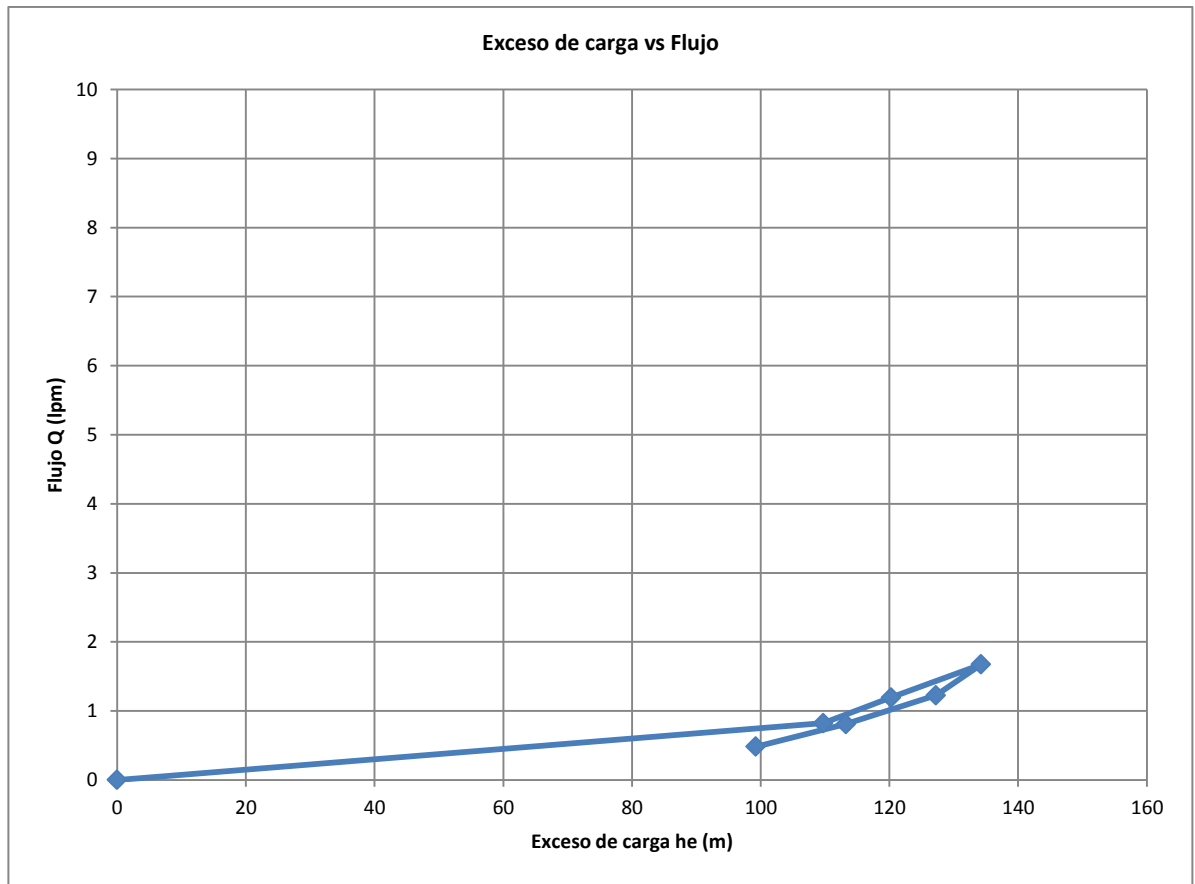
Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 4 del pozo COL-413 se observa una zona de daño correspondiente al corredor de una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y algunos tramos con algo de Gouge como relleno.

La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de $1E-08$ metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 50) la cual muestra un flujo laminar durante las primeras tres (3) etapas del ensayo y un leve cierre en el medio para las siguientes tres (3) etapas.

Figura 50. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 4 del pozo COL-413



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

6.2.2.2 COL-DDH-423: TRAMO N°2 (264.14 – 271.16)

Figura 51. Tramo N° 2, Pozo COL-423, Falla La Guala



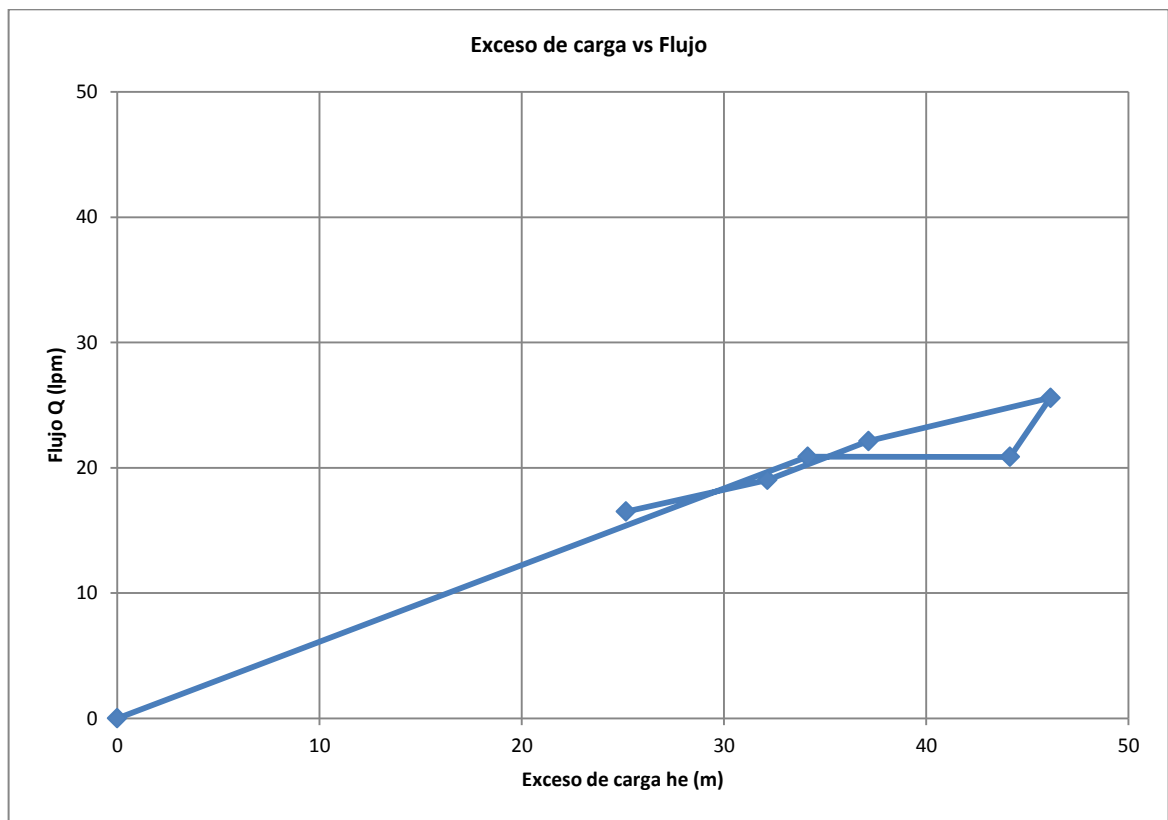
Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 2 del pozo COL-423 se observa una zona de daño correspondiente al corredor de una zona de falla con presencia de Slickensides y algunos tramos con Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este

tramo corresponde a una conductividad de $1E-06$ metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 52) la cual muestra un flujo laminar durante las primeras tres (3) etapas del ensayo y un leve cierre en el medio para la cuarta (4) etapa, gracias a la presencia de Gouge como relleno de algunas zonas fracturadas, luego recupera su flujo laminar durante las últimas dos (2) etapas.

Figura 52. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 4 del pozo COL-413

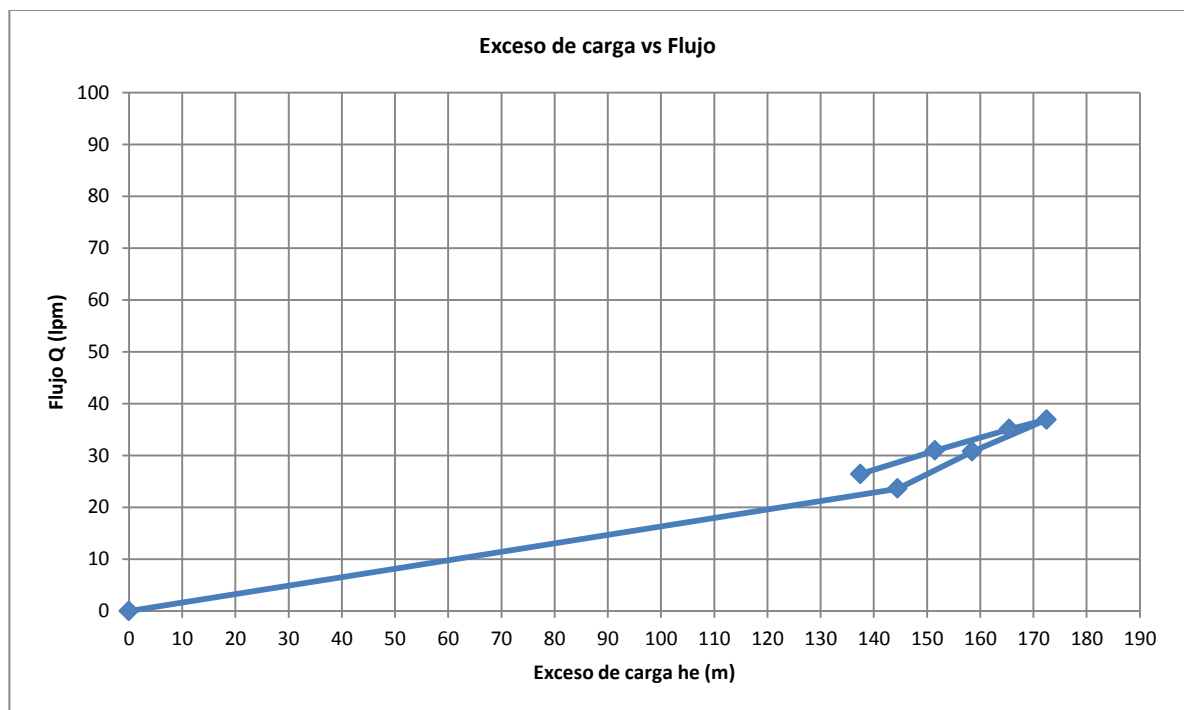


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 6 del pozo COL-434 se observa una zona de daño correspondiente al corredor de una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y algunos tramos con Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de $3E-07$ metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 54) la cual muestra un flujo laminar durante las primeras tres (3) etapas del ensayo y un flujo levemente dilatante, gracias a la carencia de relleno en las zonas fracturadas, el cual muestra una leve tendencia de apertura en las últimas tres (3) etapas del ensayo.

Figura 54. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-434



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.2.3 Ensayos Ejecutados. Para evaluar la conductividad hidráulica de la Falla La Guala se evaluaron en total 34 ensayos Lugeon, los cuales fueron ejecutados en los tres (3) pozos ya mencionados (Ver Tabla 21; 22; 23).

6.2.3.1 COL-413

Tabla 21. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-413

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL413	SIMPLE	Test 01	90	189.8	200.7	10.9	81	9E-09		LDD / H
COL413	DOUBLE	Test 02	90	181.11	189.81	8.7	84.84	8E-09	OVERLAP	H
COL413	DOUBLE	Test 03	90	172.07	180.77	8.7	84.84	9E-08		H
COL413	DOUBLE	Test 04	90	161	169.7	8.7	84.84	1E-08		H
COL413	SIMPLE	Test 05	90	148.8	200.7	51.9	84.84	1E-08	OVERLAP	LDD / H
COL413	DOUBLE	Test 06	90	138.8	147.5	8.7	84.84	1E-08		H
COL413	DOUBLE	Test 07	90	130.98	139.68	8.7	78.96	1E-08	OVERLAP	LDD2 / H
COL413	DOUBLE	Test 08	90	121.3	130	8.7	78.96	3E-07		LDD2 / H
COL413	DOUBLE	Test 09	90	110	118.7	8.7	78.96	2E-07		LQZDD / H
COL413	DOUBLE	Test 10	90	100.9	109.6	8.7	85.2	1E-11		LQZDD
COL413	DOUBLE	Test 11	90	91.8	100.5	8.7	85.2	3E-09		LQZDD
COL413	DOUBLE	Test 12	90	82.6	91.3	8.7	85.2	2E-07		LQZDD
COL413	DOUBLE	Test 13	90	73.5	82.2	8.7	85.33	5E-07		LQZDD

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL413	DOUBLE	Test 14	90	64.4	73.1	8.7	85.33	2E-07		LQZDD
COL413	DOUBLE	Test 15	90	55.3	64	8.7	85.33	3E-07		LQZDD
COL413	DOUBLE	Test 16	90	46.2	55.2	9	78.76	1E-07		LQZDD
COL413	DOUBLE	Test 17	90	37	46	9	77.08	2E-07		LQZDD
COL413	DOUBLE	Test 18	90	27.9	36.9	9	77.08	1E-06		LQZDD
COL413	DOUBLE	Test 19	90	18.8	27.8	9	77.08	2E-06		LQZDD

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.2.3.2 COL-423

Tabla 22. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-423

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL423	SIMPLE	Test 01	90	350	400	50	24.69	1E-05		LDD
COL423	DOUBLE	Test 02	90	264.14	271.16	7.02	24.69	9E-07		H
COL423	DOUBLE	Test 03	90	239.82	244.84	5.02	26.5	2E-05		LQZDD / H
COL423	DOUBLE	Test 04	90	180	189.02	9.02	26.5	5E-06		LQZDD / LDD
COL423	DOUBLE	Test 05	90	109.1	118.12	9.02	22.8	1E-05		H
COL423	DOUBLE	Test 06	90	48.3	57.32	9.02	22.8	9E-06		LDD1 / H

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.2.3.3 COL-434

Tabla 23. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-434

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL434	SIMPLE	Test 01	60	290.1	302.28	12.18	131.8	1E-07		LDD / H
COL434	SIMPLE	Test 02	60	252.2	302.28	50.08	133.37	2E-07	OVERLAP	LDD1 / H
COL434	DOUBLE	Test 03	60	243.23	251.38	8.15	133.49	5E-08		LDD1 / H
COL434	DOUBLE	Test 04	60	234.15	242.3	8.15	133.49	5E-07		H
COL434	DOUBLE	Test 05	60	194.91	203.06	8.15	133.57	7E-07		H
COL434	DOUBLE	Test 06	60	178.23	186.38	8.15	133.46	3E-07		H / DA
COL434	DOUBLE	Test 07	60	147.15	154.3	7.15	133.46	3E-07		LDD1
COL434	DOUBLE	Test 08	60	124.15	131.3	7.15	133.52	5E-09		LDD1
COL434	DOUBLE	Test 09	60	113.15	120.3	7.15	133.52	1E-09		LDD1

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.2.4 Conductividad Falla La Guala

Tabla 24. Conductividad calculada para la Falla La Guala

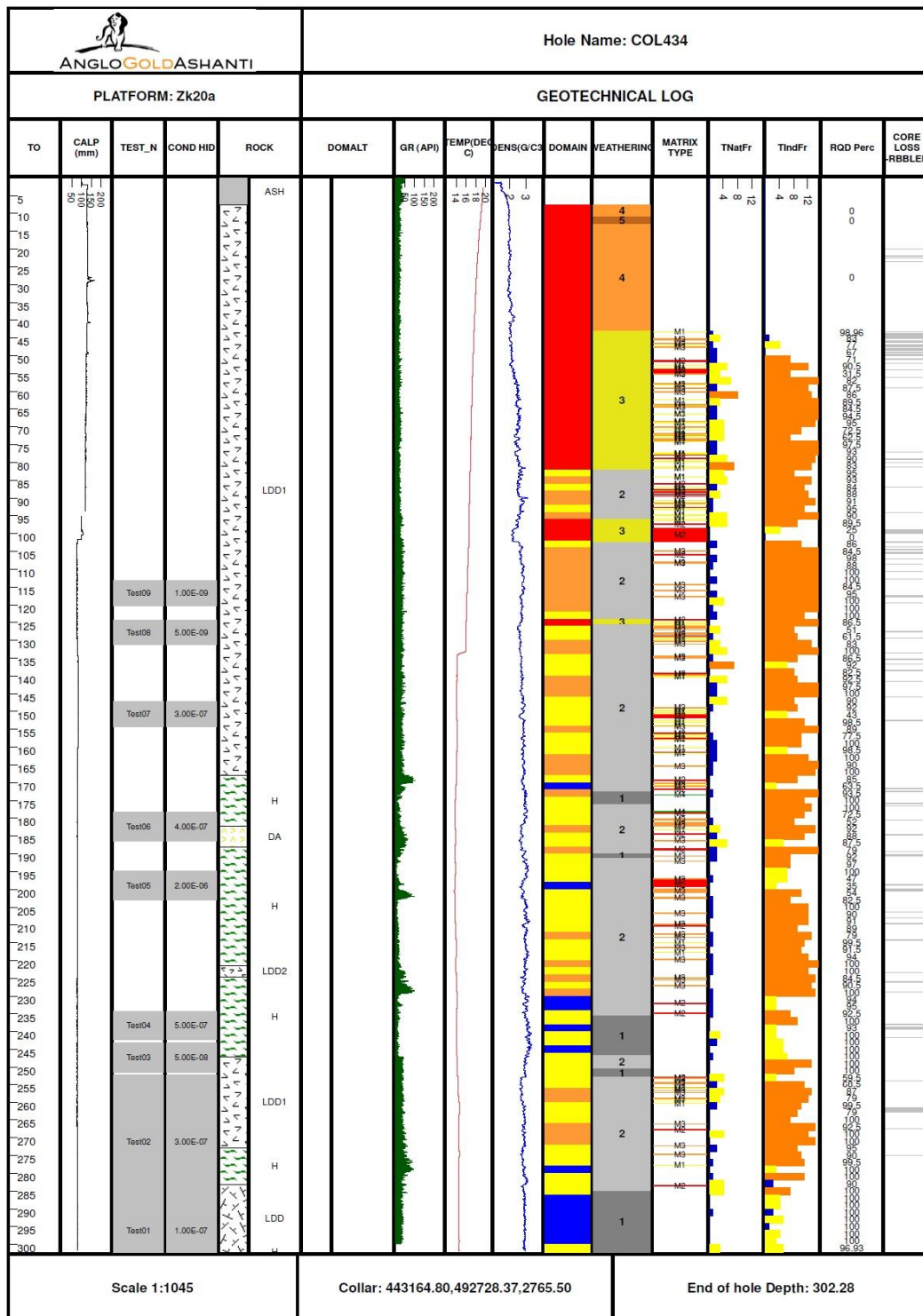
COL-413	CONDUCT	COL-423	CONDUCT	COL-434	CONDUCT	FALLA LA GUALA	CONDUCT
MIN	1E-11	MIN	9E-07	MIN	5E-09	MIN	5E-09
MAX	1E-06	MAX	1E-05	MAX	1E-07	MAX	5E-06
PROM	3E-07	PROM	9E-06	PROM	2E-07	PROM	7E-07

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.2.5 Recopilación de Información. Finalmente, luego de realizar cada uno de los ensayos Lugeon proyectados en el interior de los pozos señalados, se procede a realizar un compilado de toda la información que se ha recolectado de dichos pozos (Ensayos de Permeabilidad In-Situ, Litologías, Alteraciones, Registros Geofísicos de Pozo, Dominios Geotécnicos, Total de Fracturas, etc.) con el fin de poder interpretar las características del macizo rocoso en ese sector.

A continuación se muestra la HOJA LOG del Pozo COL-434, para la Falla La Guala, la cual recopila toda la información obtenida a través de los estudios realizados en él (Ver Figura 55).

Figura 55. HOJA LOG pozo COL-434, Falla La Guala



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.3 FALLA LA CRISTALINA

6.3.1 Pozos Estudiados. De los 203 ensayos Lugeon realizados en los 19 pozos para infraestructura, se seleccionaron cuatro (4) para el cálculo de las conductividades de la Falla La Cristalina (COL-420, COL-424, COL-425 Y COL-426), en los cuales se ejecutaron un total de 48 ensayos Lugeon.

El pozo COL-420 tiene una profundidad de 215.6 m y fue perforado con una inclinación de 55°. En él se determinaron diecinueve (19) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales cuatro (4) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

El pozo COL-424 tiene una profundidad de 225.42 m y fue perforado con una inclinación de 60°. En él se determinaron once (11) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales cinco (5) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

El pozo COL-425 tiene una profundidad de 349.48 m y fue perforado con una inclinación de 90°. En él se determinaron ocho (8) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales tres (3) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

El pozo COL-426 tiene una profundidad de 201 m y fue perforado con una inclinación de 60°. En él se determinaron diez (10) zonas importantes para evaluar conductividades, de las cuales dos (2) aportan información para calcular la conductividad de la estructura.

6.3.2 Tramos de Prueba. Como ya se observó (ver **EJECUCIÓN DE ENSAYOS HIDROGEOLÓGICOS IN-SITU, ENSAYOS LUGEON**), la selección de tramos para la ejecución de ensayos de permeabilidad Lugeon es realizada a partir del

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

Logueo Geotécnico de matrices que se realiza en la bodega El Aceituno, sobre los testigos de roca recuperados durante la perforación de cada uno de los pozos.

6.3.2.1 COL-DDH-420: TRAMO N° 7 (176.47 – 181.47)

Figura 56. Tramo N° 7, Pozo COL-420, Falla La Cristalina

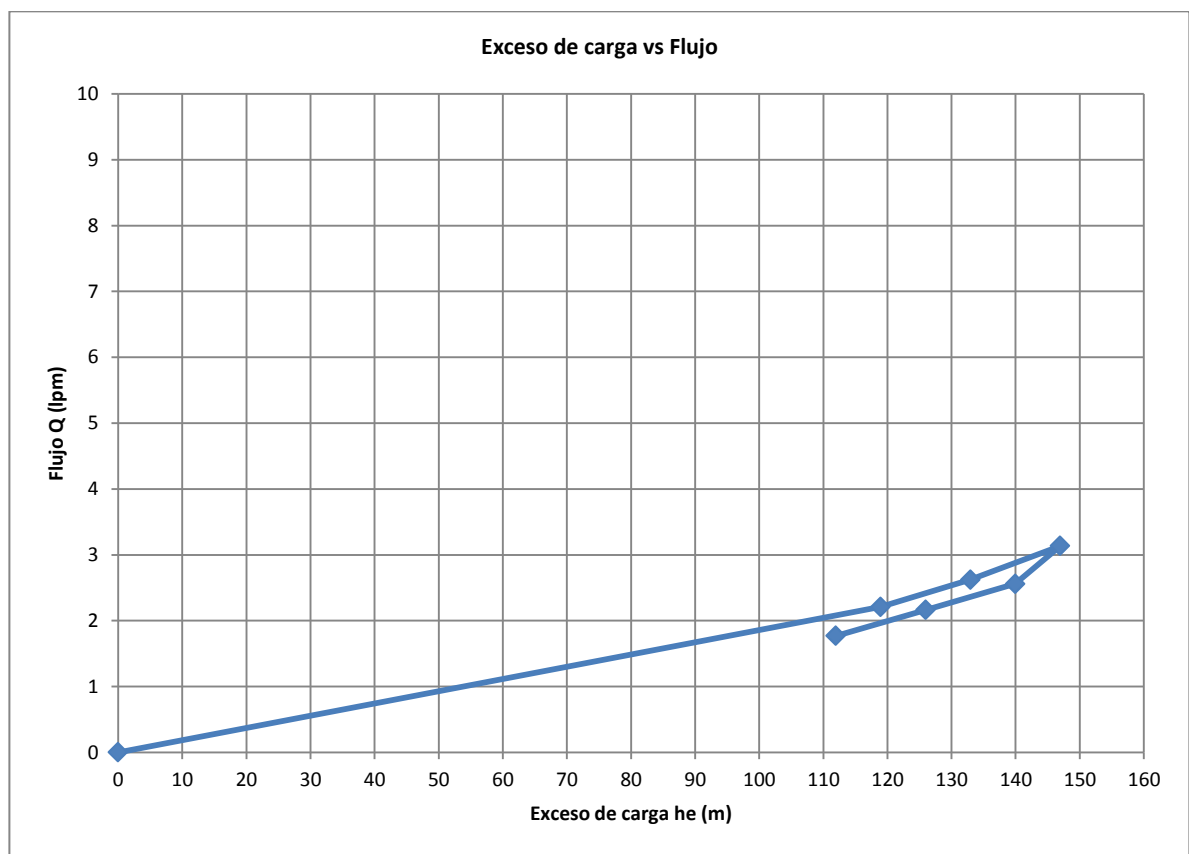


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 7 del pozo COL-420 se observa una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de 5E-08 metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 57) la cual muestra un flujo laminar durante todo el ensayo con un leve cierre en el medio para las últimas tres (3) etapas.

Figura 57. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 7 del pozo COL-420



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

6.3.2.2 COL-DDH-424: TRAMO N° 11 (83.12 – 90.12)

Figura 58. Tramo N° 11, Pozo COL-424, Falla La Cristalina

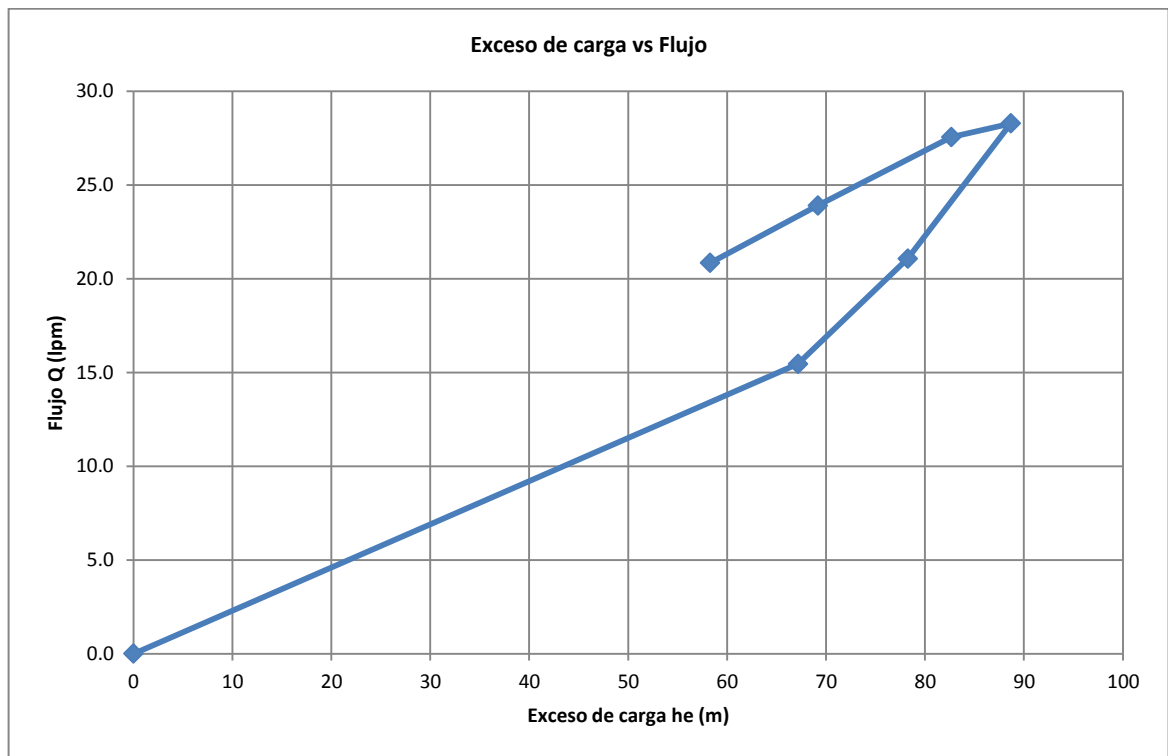


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 11 del pozo COL-424 se observa una zona de daño correspondiente al corredor de una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y algunos tramos con Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de $5.4E-07$ metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 59) la cual muestra un flujo lavado durante todo el ensayo, el cual tiende a abrir el medio a medida que se aumenta la presión sin recuperarse en las últimas tres (3) etapas del ensayo.

Figura 59. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 11 del pozo COL-424



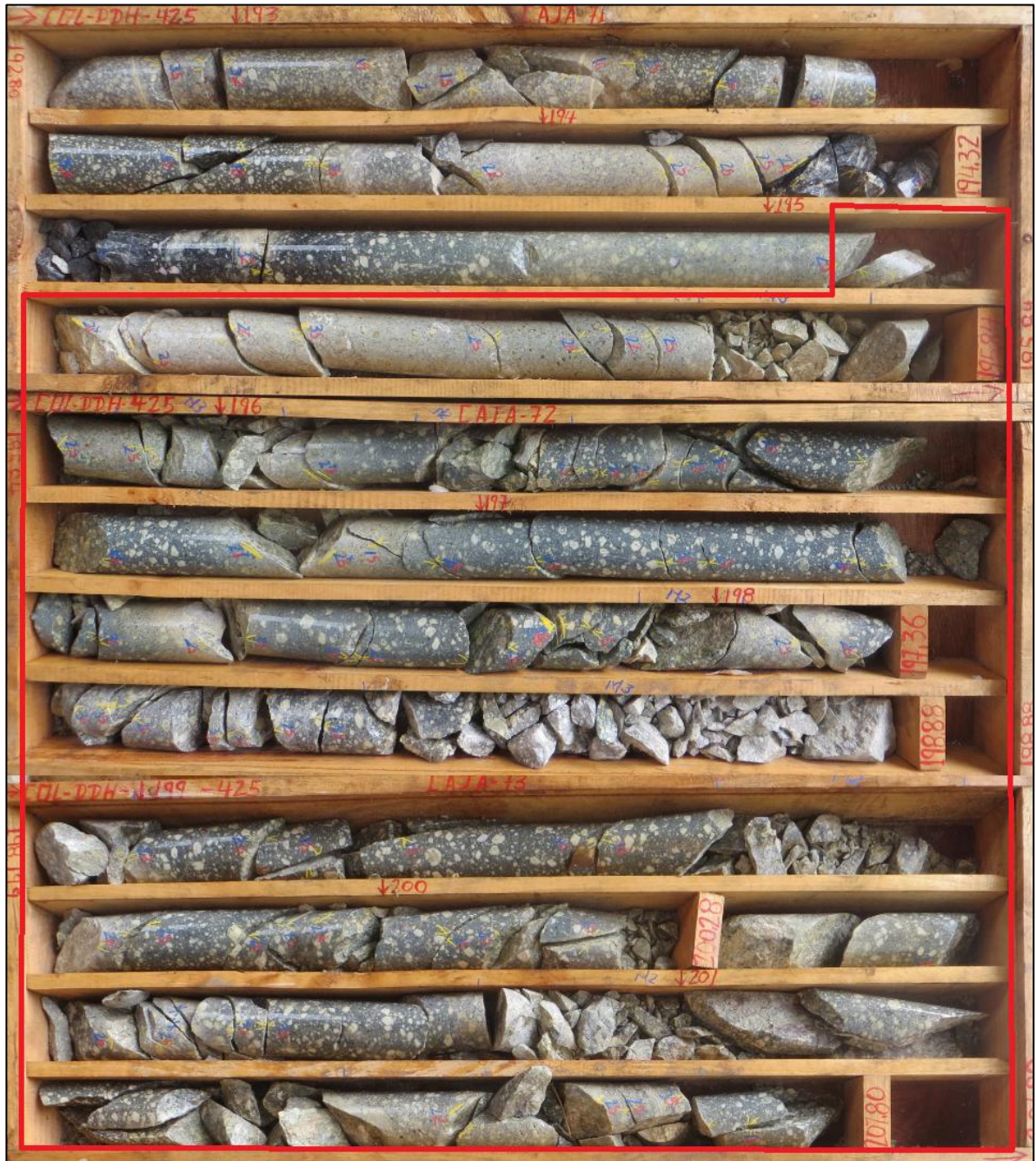
Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

6.3.2.3 COL-DDH-425: TRAMO N° 6 (195.03 – 202.07)

Figura 60. Tramo N° 6, Pozo COL-425, Falla La Cristalina

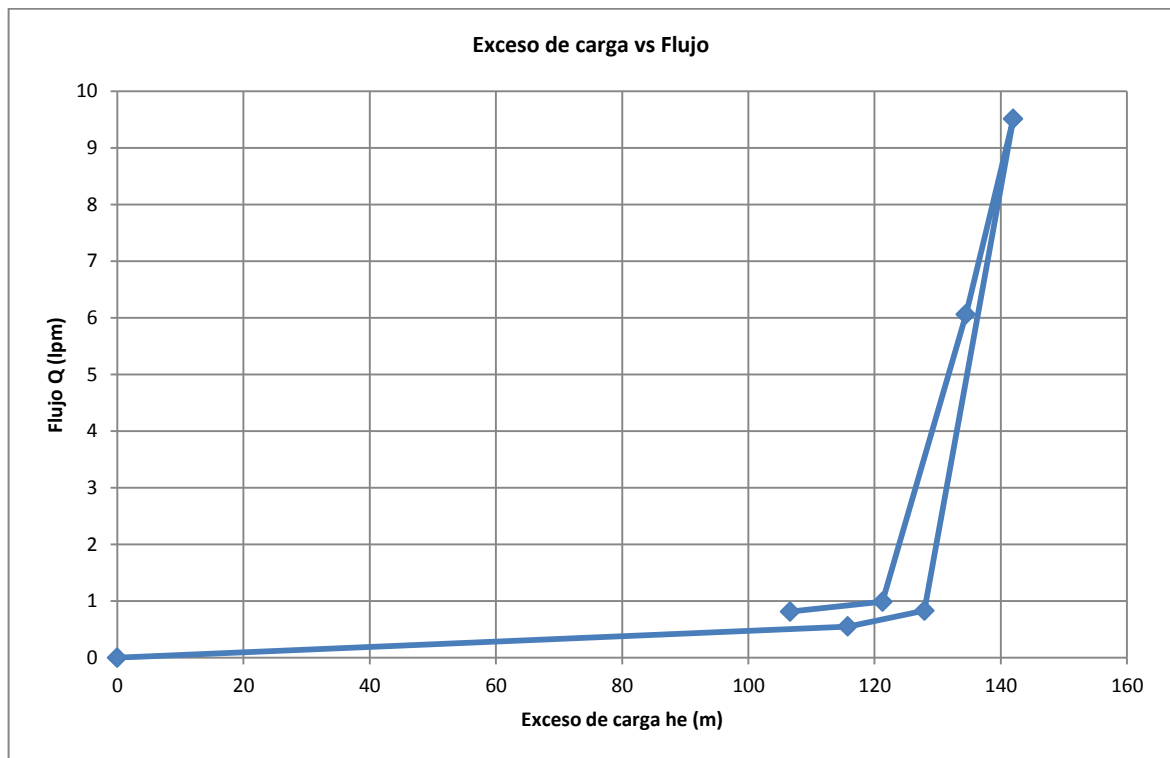


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 6 del pozo COL-425 se observa una zona de daño correspondiente al corredor de una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y algunos tramos con Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de 4.5E-08 metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 61) la cual muestra un flujo dilatante durante todo el ensayo, el cual tiende a abrir el medio a medida que se aumenta la presión y vuelve a recuperarse cuando esta disminuye en las últimas etapas del ensayo.

Figura 61. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-425



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

6.3.2.4 COL-DDH-426: TRAMO N° 10 (112.8 – 119.25)

Figura 62. Tramo N° 10, Pozo COL-426, Falla La Cristalina

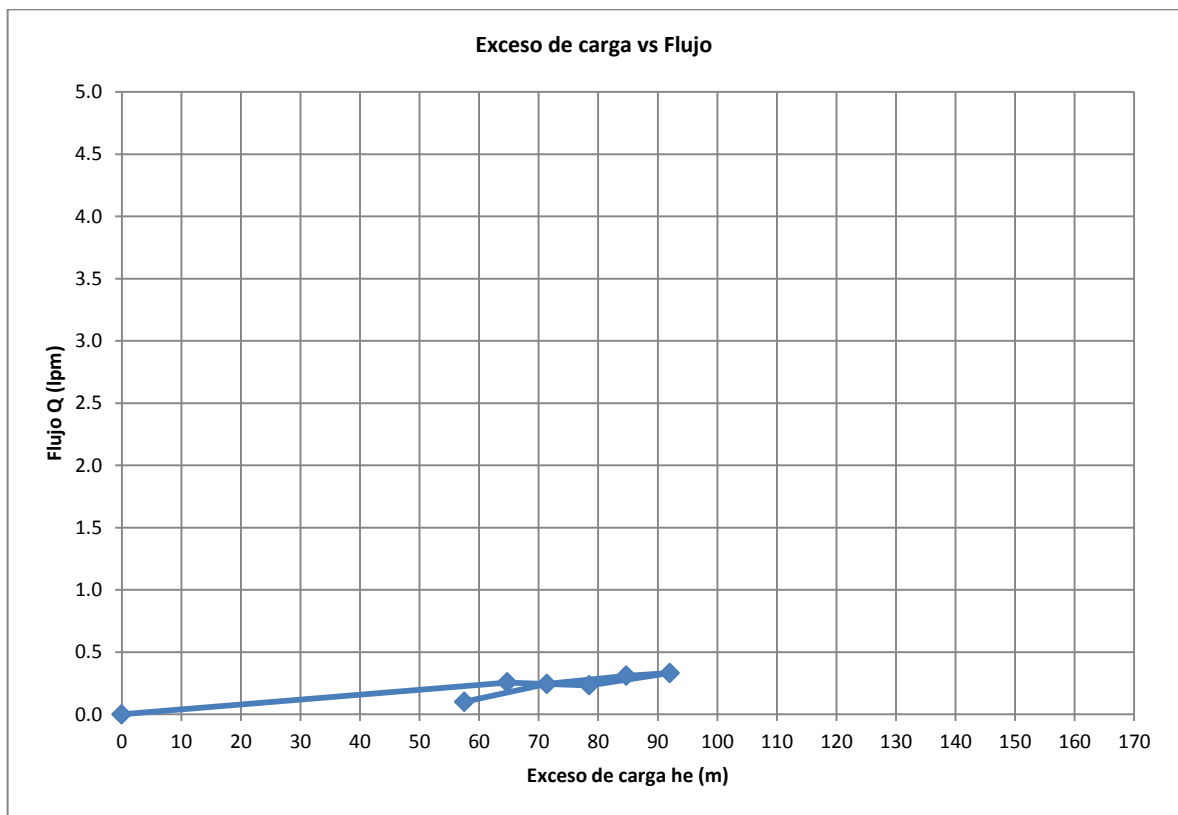


Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

En el Tramo N° 10 del pozo COL-426 se observa una zona de daño correspondiente a una zona de falla con presencia de Slickensides, zonas de alto fracturamiento y algunos tramos con algo de Gouge como relleno. La conductividad obtenida para este tramo corresponde a una conductividad de 7.2E-09 metros de columna de agua por segundo.

El comportamiento del flujo, a lo largo del intervalo de prueba, durante la inyección de agua, se ve representado en la siguiente gráfica (Ver Figura 63) la cual muestra un flujo laminar durante todo el ensayo.

Figura 63. Gráfica de Flujo Vs Exceso De Carga para el ensayo N° 6 del pozo COL-425



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.3.3 Ensayos Ejecutados. Para evaluar la conductividad hidráulica de la Falla La Cristalina se evaluaron en total 12 ensayos Lugeon, los cuales fueron ejecutados en los tres (3) pozos ya mencionados (Ver Tabla 25; 26; 27; 28).

6.3.3.1 COL-420

Tabla 24. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-420

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL420	SIMPLE	Test 01	55	207.9	215.6	7.7	108.35	4E-08		H
COL420	DOUBLE	Test 02	55	197.9	202.5	4.6	108.58	1E-11		H
COL420	DOUBLE	Test 03	55	187.9	192.5	4.6	108.58	2E-07		H
COL420	SIMPLE	Test 04	55	166.87	215.6	48.73	110.17	1E-06	OVERLAP	LQZDD / H
COL420	SIMPLE	Test 05	55	146.87	215.6	68.73	110.17	1E-06	OVERLAP	LQZDD / H
COL420	DOUBLE	Test 06	55	182.87	187.47	4.6	110.17	5E-09		H
COL420	DOUBLE	Test 07	55	176.87	181.47	4.6	110.32	5E-08		H
COL420	DOUBLE	Test 08	55	166.9	171.5	4.6	110.19	5E-07		LQZDD / H
COL420	DOUBLE	Test 09	55	161.9	166.5	4.6	110.19	8E-09		LQZDD / H
COL420	DOUBLE	Test 10	55	151.9	156.5	4.6	105.59	7E-09		LDD / H
COL420	DOUBLE	Test 11	55	141.9	146.5	4.6	105.59	2E-08		LDD
COL420	DOUBLE	Test 12	55	131.9	136.5	4.6	105.59	2E-08		LDD
COL420	DOUBLE	Test 13	55	121.9	126.5	4.6	104.54	1E-07		LDD

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL420	DOUBLE	Test 14	55	105.9	110.5	4.6	104.54	1E-08		LDD
COL420	DOUBLE	Test 15	55	100.9	105.5	4.6	104.54	8E-08		LDD
COL420	DOUBLE	Test 16	55	89.9	94.5	4.6	101.92	7E-07		LDD
COL420	DOUBLE	Test 17	55	69.9	74.85	4.95	101.92	3E-07		LDD
COL420	DOUBLE	Test 18	55	53.9	58.85	4.95	97.89	1E-06		LDD
COL420	DOUBLE	Test 19	55	31.9	36.85	4.95	97.89	2E-06		LDD

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.3.3.2 COL-424

Tabla 25. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-424

BHID	Type	Test Number	Incl. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL424	SIMPLE	Test 01	60	200	225.42	25.42	55.1	3E-07		H / BLCKSCH
COL424	SIMPLE	Test 02	60	167.07	225.42	58.35	55.76	2E-07	OVERLAP	H / BLCKSCH
COL424	DOUBLE	Test 03	60	168.07	174.67	6.6	55.76	5E-07		DA
COL424	DOUBLE	Test 04	60	135.07	139.67	4.6	58.49	8E-07		H
COL424	DOUBLE	Test 05	60	140.07	147	6.93	58.49	1E-06		H
COL424	DOUBLE	Test 06	60	123.07	130	6.93	58.49	7E-07		H
COL424	DOUBLE	Test 07	60	113.07	120	6.93	60.53	4E-07		H
COL424	DOUBLE	Test 08	60	101.07	108	6.93	60.53	2E-06		H

ANGLOGOLD ASHANTI

COLOMBIA

BHID	Type	Test Number	Incl. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL424	SIMPLE	Test 09	60	100.07	225.42	125.35	60.53	2E-07	OVERLAP	H / BLCKSCH
COL424	DOUBLE	Test 10	60	92.12	99.12	7	50.54	2E-06		H
COL424	DOUBLE	Test 11	60	83.12	90.12	7	50.54	5E-07		H

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.3.3.3 COL-425

Tabla 26. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-425

BHID	Type	Test Number	Incl. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL425	SIMPLE	Test 01	90	249.08	349.48	100.4	138.18	4E-08		G/BLCKSCH
COL425	DOUBLE	Test 02	90	238.44	245.52	7.08	138.18	2E-10		DA
COL425	DOBLE	Test 03	90	232.36	239.4	7.04	161.87	1E-11	OVERLAP	DA
COL425	DOUBLE	Test 04	90	221.02	228.1	7.08	161.81	6E-08		DA
COL425	DOUBLE	Test 05	90	205.71	212.75	7.04	87.24	6E-08		DA
COL425	DOUBLE	Test 06	90	195.03	202.07	7.04	87.97	4E-08		DA
COL425	DOUBLE	Test 07	90	156.91	163.95	7.04	87.97	4E-07		BLCKSCH
COL425	DOUBLE	Test 08	90	143.18	150.22	7.04	87.97	5E-07		G/BLCKSCH

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.3.3.4 COL-426

Tabla 27. Total de ensayos Lugeon ejecutados en el pozo COL-426

BHID	Type	Test Number	Inclinat. Of Hole	FROM	TO	Len Test Section	Water Depth	K [m/s]	DATA VALID.	Litho
COL426	SIMPLE	Test 01	60	150.3	201	50.7	28.5	4E-07	OVERLAP	GRNSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 02	60	192.3	201	8.7	28.5	4E-07		GRNSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 03	60	186.3	191.2	4.9	31.24	7E-07		GRNSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 04	60	142.3	147.23	4.93	31.24	1E-07		GRNSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 05	60	134.3	139.23	4.93	31.24	8E-09		GRNSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 06	60	101.3	106.23	4.93	33	3E-10		BLCKSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 07	60	79.3	84.23	4.93	33	5E-08		BLCKSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 08	60	55.3	60.23	4.93	37.33	3E-06		BLCKSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 09	60	46.3	51.23	4.93	37.33	3E-06		BLCKSCHIST
COL426	DOUBLE	Test 10	60	112.8	119.25	6.45	36.9	7E-09		BLCKSCHIST

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.3.4 CONDUCTIVIDAD FALLA LA CRISTALINA

Tabla 28. Conductividad calculada para la Falla La Cristalina

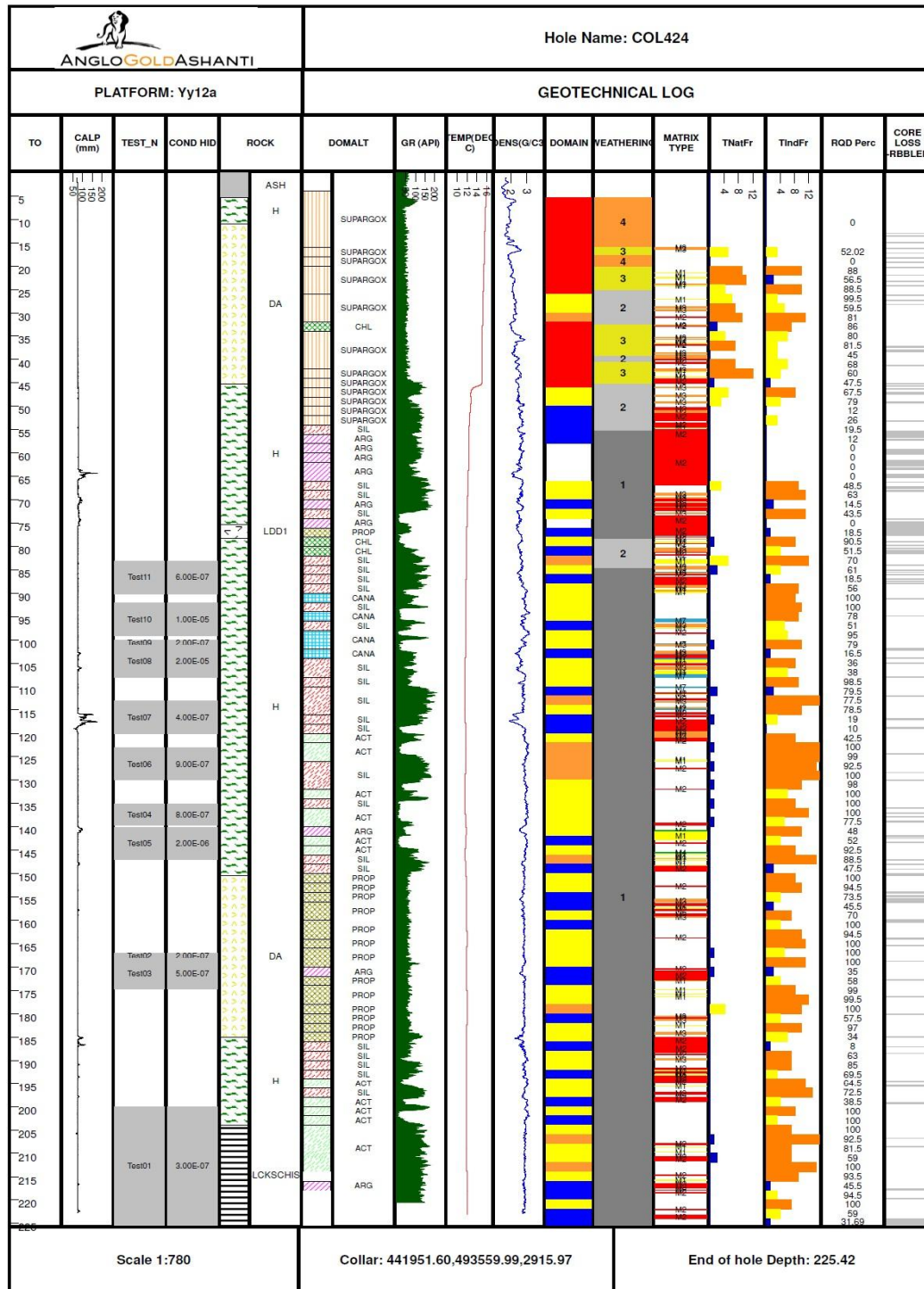
COL-420	CONDUCT	COL-424	CONDUCT	COL-425	CONDUCT	COL-426	CONDUCT	FALLA LA CRISTALINA	CONDUCT
MIN	1E-11	MIN	8E-07	MIN	1E-11	MIN	8E-09	MIN	1E-11
MAX	1E-06	MAX	1E-06	MAX	4E-07	MAX	3E-06	MAX	2E-07
PROM	4E-07	PROM	8E-07	PROM	1E-07	PROM	7E-07	PROM	2E-07

Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

6.3.5 Recopilación de Información. Finalmente, luego de realizar cada uno de los ensayos Lugeon proyectados en el interior de los pozos señalados, se procede a realizar un compilado de toda la información que se ha recolectado de dichos pozos (Ensayos de Permeabilidad In-Situ, Litologías, Alteraciones, Registros Geofísicos de Pozo, Dominios Geotécnicos, Total de Fracturas, etc.) con el fin de poder interpretar las características del macizo rocoso en ese sector.

A continuación se muestra la HOJA LOG del Pozo COL-424, para la Falla La Cristalina, la cual recopila toda la información obtenida a través de los estudios realizados en él (Ver Figura 64).

Figura 64. HOJA LOG pozo COL-424, Falla La Cristalina



Fuente: Base de datos AngloGold Ashanti, 2016.

7. CONCLUSIONES

- Se aprendió y aplicó la metodología de logueo geotécnico DEMPERS, utilizada en el PLC con el fin de determinar dominios geotécnicos para el análisis de calidad de un macizo rocoso fracturado, los cuales permitieron identificar los intervalos de interés para la realización de los ensayos Lugeon.
- Se estudió y aplicó la metodología utilizada en el PLC para la ejecución de ensayos hidrogeológicos de permeabilidad In-Situ (en roca), con el fin de calcular la conductividad hidráulica en las estructuras de un macizo rocoso fracturado. Encontrando que: (1) En la Falla la Ceja, el comportamiento hidráulico de la estructura es turbulento con tendencia a un cierre en el consumo; (2) En la Falla la Cristalina, el comportamiento hidráulico de la estructura corresponde a una tendencia al cierre en el consumo; (3) En la Falla la Guala, el comportamiento hidráulico de la estructura tiende a ser laminar presentando pequeñas variaciones en los cambios de litología.
- El aporte final de la Empresa con el estudiante radica en la experiencia recibida por el practicante acerca del funcionamiento, comportamiento y productividad laboral en el sector, desarrollando habilidades y conocimientos que enriquecen el perfil profesional que permitirán al futuro geólogo la capacidad de desempeñar actividades propias de la industria minera en Colombia.
- Respecto al aporte final del estudiante con la empresa, se contribuyó de manera proactiva y profesional con el desarrollo de la investigación realizada por la empresa en el Proyecto La Colosa, cumpliendo con las metas y funciones previstas por la misma hacia el practicante.

8. RECOMENDACIONES

- Basado en la experiencia lograda en la etapa productiva y el desarrollo del presente trabajo, se sugiere a la empresa AngloGold Ashanti la realización de un estudio de neo-tectónica en el área, para determinar el comportamiento estructural a nivel local y determinar si las estructuras presentes se encuentran activas, esto podría afectar negativamente el comportamiento del macizo rocoso para el sector del “Site-11”.
- Además, se le aconseja a la empresa la ejecución de un análisis químico en el material arcilloso contenido como relleno en las zonas de afectación, y en los corredores, de las estructuras, con el fin de entender el comportamiento que presenta el fluido a través de dichas estructuras y la reacción de la interacción material-fluido.
- De la misma manera se recomienda a la empresa el desarrollo de actividades de investigación práctica, como ensayos de bombeo, que permitan mejorar el conocimiento de las características que controlan el comportamiento de los fluidos a través del macizo rocoso.
- Se recomienda a la Universidad, mejorar el contenido de algunas asignaturas, con el propósito de transmitir un poco de conocimiento técnico aplicable a la industria como, por ejemplo, el manejo de herramientas de modelamiento, metodologías de adquisición de datos en campo, entre otros.
- A visión personal del autor, la consolidación de convenios de aprendizaje entre la empresa AngloGold Ashanti y la Universidad Industrial de Santander generaría espacios de investigación que contribuyan a la transferencia de conocimiento en entre ambas partes, contribuyendo con la formación profesional del estudiante y el desarrollo económico de la empresa.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro A., 2002. INTRODUCCIÓN AL MUESTREO MINERO, Figura IV.28. Santiago de Chile.
- AngloGold Ashanti, 2008. Protocolo Operativo Para La Elaboración De Ensayos De Permeabilidad In Situ Lugeon Referido En La Norma ASTM D4630-96. La Colosa - Cajamarca, Tolima.
- AngloGold Ashanti, 2014. Manual De Logueo Geologico AGA. La Colosa - Cajamarca, Tolima.
- AngloGold Ashanti, 2014. Protocolo Técnico Para La Elaboración De Ensayos De Permeabilidad In-Situ Lefranc Cabeza Variable. La Colosa - Cajamarca, Tolima.
- AngloGold Ashanti, 2014. Protocolo Técnico Para La Elaboración De Ensayos De Permeabilidad In-Situ Lefranc Cabeza Constante. La Colosa - Cajamarca, Tolima.
- AngloGold Ashanti, 2015. Manual De Logueo Geotécnico AGA. La Colosa - Cajamarca, Tolima.
- AngloGold Ashanti, 2015. Manual de Logueo Geotécnico AGA. Ibagué.
- AngloGold Ashanti, 2015. Manual De Procedimiento De Uso De Kenómetro, AGA. La Colosa - Cajamarca, Tolima.
- AngloGold Ashanti, 2016. Base de datos AngloGold Ashanti Colombia. Ibagué.
- AngloGold Ashanti, 2016. Base de Datos. Ibagué.
- Artinaid (2013). Qué es un Acuífero. Recuperado de:
<http://Www.Artinaid.Com/En/2013/04/Que-Es-Un-Acuifero/>
- Biología Sur (2012). Biología del Sur. Recuperado de:
<http://Www.Biologiasur.Org/Ciencias/Index.Php/Los-Sistemas-Fluidos-Terrestres-Externos/Recursos-Hidricos-Y-Gestion-Del-Agua>
- BoxMin (2016). Cajas Porta-núcleos. Recuperado de:
<http://boxminsas.com/portfolio-item/cajas-portashelby/>

- Bustillo, M.; López, C. (1996). Recursos Minerales. Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia, impacto ambiental. Entorno Gráfico S.L. (Madrid).
- Escuela de Ingeniería de Antioquia (2014). Ensayo de Permeabilidad en el Suelo Lefranc. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/lefrancsuelos/>
- GeoScienceWorld (2016). Environmental & Engineering Geoscience. Recuperado de:
<http://eeg.geoscienceworld.org/content/gseegeosci/12/2/161/F11.large.jpg>
- GeoScienceWorld (2016). Environmental & Engineering Geoscience. Recuperado de:
<http://eeg.geoscienceworld.org/content/gseegeosci/12/2/161/F11.large.jpg>
- Gobierno De Canarias, 2012. Manual Técnico Para La Ejecución De Pozos.
- Golder Associates, 2013. Procedimiento técnico de trabajo de campo, identificación y clasificación de suelos. La Colosa - Cajamarca, Tolima.
- Grupo Mineros S.A. (2016). Etapas de Explotación. Recuperado de:
<http://mineros.com.co/proyectos/etapas-de-exploracion>
- Hanna Instruments (2015). Medidor de ph/mv/°c portátil con ATC y calibración automática cast.pm. Recuperado de:
http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/marsh_funnel_viscosity.aspx
- Horner J. 2013. Rock Mass And Structural Modelling For The Large Open Pit Gold Mining Project In The Noerthern Andes: The La Colosa Project, Colombia.
- Horner J., Naranjo A., Weil J., 2016. Digital Data Acquisition and 3D Structural Modelling For Mining and Civil Engineering – The La Colosa Gold Mining Project, Colombia.
- Instruments, 2015. In-Situ Inc. Operator´S Manual: Level TROLL® 400, 500, 700, 700H.
- Javier Gil-Rodríguez, 2010. Igneous Petrology of The Colosa Gold-Rich Porphyry System (Tolima, Colombia).

- López M., 2006. Universidad EAFIT. Análisis De Deformación Tectónica En Los Piedemontes De Las Cordilleras Central Y Occidental Valle Del Cauca, Colombia Contribuciones Paleosísmicas.
- Mejia C., 2016. Summary of Progress – SITE 11. H.M. New York City. Stationery Office.
- Michael Royle, M.A.Sc., (2002). Standard Operating Procedures For Borehole Packer Testing.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2014. Explotación, Ministerio de Minas y Energía. Ibagué.
- Read J., Stacey P., 2009. Guidelines for Open Pit Slope Design. CSIRO Publishing
- Richard H. Sillitoe. 2010. Porphyry Copper Systems. Society of Economic Geologists.
- Rst Instruments (2015). Vibratin Wire Piezometer. Recuperado de: <http://Www.Rstinstruments.Com/Vibrating%20Wire%20Piezometer.Html>
- Sánchez J., 2011. Dpto. Geología-Univ. Salamanca (España). Slug-Test.
- Seguridad Minera (2013). Clasificación Geomecánica de Roca en Minería Subterránea. Recuperado de: <http://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/clasificacion-geomecanica-de-roca/>
- Solisnt. 2014. User Guide: Levelogger Series Software Version 4.
- Universidad Castilla-La Mancha (2016). Exploración Minera. Recuperado de: <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/YM14.html>
- Universidad Castilla-La Mancha (2016). Métodos de Estudio de los Yacimientos Minerales. Recuperado de: <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/YM14.html>
- Universidad Industrial de Santander (2014). Perforación y Muestreo de Suelos. Recuperado de: http://ocw.uis.edu.co/ingenieria-civil/estabilidad-de-taludes/clase11/perforacion_y_muestreo_de_suelos.pdf

- Weatherford, 2016. Informe campaña de registro geofísico de pozos. La Colosa
- Cajamarca, Tolima.