

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO Y ROCA PARA EL
DISEÑO DE POZAS SEDIMENTADORAS EN LA ZONA DE
CIÉNEGA NORTE – TANTAHUATAY, CAJAMARCA**

Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO GEÓLOGO

Presentado por:
Bach. Victor Raphael Chapilliquen Celis

Asesor:
M.Cs. Ing. José Alfredo Siveroni Morales

Perú - 2017

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización de esta tesis.

Agradezco, a Dios por concederme la vida y salud; a mis padres y hermano por su apoyo y constante esfuerzo; a todos los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica, quienes con sus sabios consejos formaron en mi persona un carácter de esfuerzo y dedicación; a la empresa J&R Servicios Múltiples Chugur S.R.L., en especial a los señores de la gerencia por facilitarme la información necesaria y a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron en el desarrollo de la tesis.

DEDICATORIA

A mis maestros:

Victor Chapilliquen I. y María Celis B., mis padres por ser mis maestros de vida y guiarme sabiamente por el camino del bien.

José Siveroni M., mi maestro de profesión por guiarme en el sendero al conocimiento de la Geología y su aplicabilidad.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTOS.....	1
DEDICATORIA.....	2
ÍNDICE.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FOTOS.....	8
LISTA DE ABREVIATURAS.....	14
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	
INTRODUCCIÓN.....	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
2.1.ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
2.1.1.ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	19
2.1.2.ANTECEDENTES NACIONALES	22
2.1.3.ANTECEDENTES LOCALES	24
2.2.BASES TEÓRICAS	24
2.2.1.ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA	24
2.2.2.CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS MATERIALES.....	25
2.2.3.CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES	25
2.2.4.MECÁNICA DE SUELOS	26
2.2.5.MECÁNICA DE ROCAS	32
2.2.6.MÉTODOS DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA	44
2.3.DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	49

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	Pág.
3.1.UBICACIÓN	52
3.1.1.GEOGRÁFICA	52
3.1.2.POLÍTICA.....	53
3.1.3.ACCESIBILIDAD	53
3.2.PROCEDIMIENTOS	64
3.2.1.METODOLOGÍA.....	65
3.2.2.DEFINICIÓN DE VARIABLES	66
3.2.3.TÉCNICAS.....	66
3.2.4.INSTRUMENTOS Y EQUIPOS	67
3.3.PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	69
3.3.1.GEOMECÁNICA.....	69
3.3.2.ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA	85
 CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 	
4.1.CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	90
4.1.1.MORRENA	92
4.1.2.SUELO RESIDUAL	93
4.1.3.BASAMENTO ROCOSO	94
4.1.4.NIVEL DE AGUA	97
4.1.5.NIVEL DE CIMENTACIÓN.....	98
4.2.CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	100
 CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 	
5.1.CONCLUSIONES.....	101
5.2.RECOMENDACIONES	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Presa de Tierra.....	20
Figura 2. Taludes y excavaciones (Talud natural).....	21
Figura 3. Proceso de resolución de los problemas de Mecánica de Suelos planteados para la Ingeniería.	22
Figura 4. Formación de suelos. (González de Vallejo, 2002).	27
Figura 5. El suelo como sistema particulado. a) Constitución de un suelo, b) Acciones sobre un suelo, c) Movimientos de partículas producidas por acciones exteriores. (González de Vallejo, 2002).	30
Figura 6. Carta de Plasticidad de Casagrande. (Braja M. Das, 2001).	32
Figura 7. Control geológico de las propiedades de la matriz rocosa y del macizo rocoso. (González de Vallejo, 2002).	33
Figura 8. Estimación del RQD a partir de testigos de sondeo. (Alejano, 2004).....	37
Figura 9. Estimación del J_v y clasificación del tamaño de bloque en función de espaciados de juntas y número de familias observadas en campo. (Alejano, 2004).	38
Figura 10. Índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturados de acuerdo a Hoek y Marinos. (Alejano, 2004).	42
Figura 11. Distribución del tendido sísmico y refracción de ondas en estratos de diferente rigidez. (HJK Ingeniería, 2016).....	44
Figura 12. Dromocrónica para los disparos directo e inverso. (HJK Ingeniería, 2016). 45	
Figura 13. Interpretación general de tipos de materiales litológicos y sus velocidades de onda P. (Arce, 2010).....	46
Figura 14. Esquema de distribución de la línea geofísica del ensayo MASW. (HJK Ingeniería, 2016).....	48
Figura 15. Esquema del Ensayo de Medición en Pozos de Ondas P y S. (Aguilar, 1992).	49
Figura 16. Columna estratigráfica de la región olmos – Trujillo. (Herrera, 2012).	60

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Símbolos de grupo clasificación SUCS incluyendo Prefijos y Sufijos.	28
Tabla 2. Símbolos de cada Tipo de Suelo Clasificación SUCS.	32
Tabla 3. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación.	34
Tabla 4. Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo.	36
Tabla 5. Valoración del RMR de Bieniawski respecto a la Resistencia a la Compresión Uniaxial.	37
Tabla 6. Clasificación de la calidad del macizo y Valoración del RMR de Bieniawski, respecto al RQD.	38
Tabla 7. Valoración del RMR de Bieniawski respecto al Espaciamiento de las Discontinuidades.	39
Tabla 8. Valoración del RMR de Bieniawski respecto a la Condición de Fractura generalizada. (González de Vallejo, 2002).	40
Tabla 9. Valoración del RMR de Bieniawski respecto a la Condición de Fractura Detallada.	40
Tabla 10. Valoración del RMR de Bieniawski respecto a la Condición de Agua.	41
Tabla 11. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR de Bieniawski.	41
Tabla 12. Valores Típicos de V_p y V_s en Suelos Saturados.	47
Tabla 13. Coordenada UTM de la zona de investigación. DATUM WGS84.	52
Tabla 14. Vías de acceso Principal al área de Ciénega Norte.	53
Tabla 15. Cuadro Precipitación Mensual.	54
Tabla 16. Clasificación de pendientes.	56
Tabla 17. Definición de Variables.	66
Tabla 18. Estaciones Geomecánicas (coordenadas obtenidas con GPS navegador).	70
Tabla 19. Familias de Discontinuidades.	71
Tabla 20. Resumen de Calicatas. Abreviaturas: Df: Nivel de fundación propuesta; Prof: Profundidad; NE: No Encontrado; ND: No Determinado.	71
Tabla 21. Resumen de Perforaciones. Abreviaturas. Prof: Profundidad.	73
Tabla 22. Resumen de Ensayos LDPT. Abreviaturas: Prof.: Profundidad.	75

Tabla 23. Resumen de Ensayos de Penetración SPT/ LPT en Perforaciones. * Se encontró rechazo al realizar los ensayos de penetración. ** Valores de NSPT obtenidos a partir de correlaciones existentes con el ensayo LPT. Abreviaturas: SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	76
Tabla 24. Resumen de Ensayos de Permeabilidad. Abreviaturas: K: Conductividad Hidráulica; SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.	77
Tabla 25. Líneas de Refracción Sísmica – Longitud de Línea Sísmica.	78
Tabla 26. Líneas de Refracción Sísmica – Ubicación. (Coordenadas en PSAD56).	78
Tabla 27. Interpretación de Resultados de Refracción Sísmica.	79
Tabla 28. Ensayos MASW/ MAM – Ubicación. (Todas las coordenadas fueron obtenidas en el Sistema Geodésico PSAD56).	79
Tabla 29. Interpretación de Resultados de Ensayos MASW/ MAM.....	80
Tabla 30. Resumen de Ensayos de Clasificación de Suelos – Calicatas. Abreviaturas: SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; LL: Límite Líquido; IP: Índice Plástico; Lím. De At: Limite de Atterberg; Clasif.: Clasificación; Prof.: Profundidad.	81
Tabla 31. Resumen de Ensayos de Clasificación de Suelos – Perforaciones. Abreviaturas: SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; LL: Límite Líquido; IP: Índice Plástico; Lím. De At: Limite de Atterberg; Clasif: Clasificación, Prof.: Profundidad...	81
Tabla 32. Resumen de Ensayos de Peso Volumétrico.....	82
Tabla 33. Resumen de Resultados de los Ensayos de Compresión Triaxiales (CU). Abreviaturas: C.H.: Contenido de humedad; C: Cohesión; ϕ : Ángulo de fricción; Prof.: Profundidad.	82
Tabla 34. Resumen de Resultados de los Ensayos de Carga Puntual – Perforaciones. Abreviaturas: Is (50): Índice de carga puntual corregido; σ_c : Resistencia a la compresión no confinada; Prof.: Profundidad.....	83
Tabla 35. Resumen de Resultados de los Ensayos de Carga Puntual - Calicatas. Abreviaturas: Is (50): Índice de carga puntual corregido; σ_c : Resistencia a la compresión no confinada; Prof.: Profundidad.....	84
Tabla 36. Sistema de clasificación RMR utilizado para la descripción de los afloramientos rocosos en el área de estudio.	94
Tabla 37. Resumen de Valores de RMR en las Perforaciones. En las perforaciones realizadas.	95
Tabla 38. Resistencia de las rocas presentes en el área de estudio.....	95

	Pág.
Tabla 39. Valoración del RMR89 y GSI del Basamento Rocoso en el área de estudio. *Los valores de RMR Básico reportados corresponden al basamento rocoso que estará en contacto con la cimentación (aproximadamente 10 m por debajo del terreno natural)..	97
Tabla 40. Resumen de Propiedades de los Materiales más importantes según las zonas geotécnicas identificadas para Análisis de Estabilidad.	97

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Nubosidad muy densa característica del clima en la zona de estudio.	55
Foto 2. La vegetación típica es el pajonal de Puna o Ichu que se extiende en toda la zona.	56
Foto 3. Valles de tipo glaciar ocasionados por la escorrentía de la laguna Campos y dan origen a suelos morrénicos.	57
Foto 4. Cadenas de cerros con pendientes promedio de 85°. De tipo muy alta. (Borkoswki, 1994).	58
Foto 5. Ladera con pendiente moderada a baja, en promedio 30° - 45°. (Borkoswki, 1994).	58
Foto 6. Según el ambiente de formación glaciar, se originó la Laguna Campos, que condiciona el tipo de materiales existentes en la zona de estudio.	59
Foto 7. Alteración Argílica presente en Tobas Andesíticas en los flancos de la zona de investigación, asociado a pequeños afloramientos.	61
Foto 8. Rocas Andesíticas características por su textura y presencia de plagioclasas. ...	62
Foto 9. Depósitos Cuaternarios de tipo morrénico a manera de bofedales inundados... 63	63
Foto 10. Familias de fracturas con orientaciones NO-SE.	63
Foto 11. Presencia de cuarzo en vetillas, rellenando algunas fracturas en tobas Andesíticas de importante potencia.	64
Foto 12. La zona de Ciénega Norte se encuentra en la ladera norte del cerro Quihuillas.	85
Foto 13. Unidad Geotécnica I - Pajonal Inundado, se presenta superficialmente con alto grado de incidencia en la zona central y en los márgenes derecho e izquierdo del sistema de pozas prospectado.	86
Foto 14. Unidad Geotécnica II - Depósito Coluvial, de características granulares y con presencia de transporte.	87

	Pág.
Foto 15. Unidad Geotécnica III - Depósito Morrénico propio de la actividad glaciar y se extiende en la zona central respecto del sistema de pozas.	87
Foto 16. Unidad Geotécnica IV - Depósito Residual, corresponde a suelos generados in situ con durezas $R < 2$, localizado en la zona central y a los flancos derecho e izquierdo del sistema de pozas.	88
Foto 17. Unidad Geotécnica V - Basamento Rocoso Dureza $\geq R2$, se presenta como promontorios Andesíticos aislados, localizados en la zona central del sistema de pozas y en el flanco izquierdo del área de investigación.....	89
Foto 18. Retiro de la cubierta orgánica donde se observan suelos tipo morrénicos de consistencia areno-limoso y areno-arcilloso, determinados con exactitud mediante los ensayos.	92
Foto 19. Suelo residual analizado mediante calicatas.	93
Foto 20. Evaluación de las propiedades de las rocas a través del análisis RQD y las condiciones GSI, en muestras obtenidas de la zona central del sistema de pozas. a) De acuerdo a las características mineralógicas de las rocas se determinó la presencia de Andesitas, b) Se evaluaron además las propiedades geomecánicas de bloques rocosos Andesíticos.	94
Foto 21. Nivel superficial del agua característico de la formación geotécnica pajonal inundado en la zona central del sistema de pozas.	98
Foto 22. Nivel de cimentación en el área de investigación, a) Deposito residual bajo la capa de material orgánico que se encuentra sobre Tobas Andesíticas; b) Retiro de cobertura vegetal con espesores que varían desde 0,10m m a 3,0 m hasta llegar a terreno de fundación.	99

ANEXOS

Lista de Planos

	Pág.
Plano 1. Ubicación Geográfica y Política.....	105
Plano 2. Accesibilidad.....	106
Plano 3. Geomorfológico de Pendientes.....	107
Plano 4. Hidrológico.....	108
Plano 5. Geológico.....	109
Plano 6. Estaciones geomecánicas y calicatas.....	110
Plano 7. Perforaciones.....	111
Plano 8. Ensayos LDPT.....	112
Plano 9. Ensayos geofísicos.....	113
Plano 10. Unidades geotécnicas.....	114

Registro Fotográfico

Foto 23. Vista Panorámica de la Zona de Investigación en el sector denominado Ciénaga Norte.....	115
Foto 24. a) Calicata TP_CN14-20; b) Calicata TP_CN14-28 – Pozas de Sedimentación.....	115
Foto 25. Ensayo LDPT_CN14-06 – Pozas de Sedimentación.....	116
Foto 26. Ensayo LDPT_CN14-19 – Pozas de Sedimentación.....	116
Foto 27. Vista del lugar donde se realizó el ensayo LS-1; se puede observar medición y marcado de la línea geofísica.....	117
Foto 28. Vista del lugar donde se realizó el sondaje sísmico MASW/MAM-1.....	117
Foto 29. Perforación geotécnica DH-14-01, caja con muestras de 0,00 a 17,50 m.....	118
Foto 30. Perforación geotécnica DH-14-01, caja con muestras de 17,50 a 34,15 m....	119
Foto 31. Perforación geotécnica DH-14-03, caja con muestras de 0,00 a 15,85 m.....	120
Foto 32. Perforación geotécnica DH-14-03, caja con muestras de 15,85 a 32,40 m....	121
Foto 33. Perforación geotécnica DH-14-04, caja con muestras de 00,00 a 16,60 m....	122
Foto 34. Perforación geotécnica DH-14-04, caja con muestras de 16,60 a 33,00 m....	123

Registro de Estaciones Geomecánicas

	Pág.
Estación Geomecánica 1.....	124
Estación Geomecánica 2.....	125
Estación Geomecánica 3.....	126
Estación Geomecánica 4.....	127
Estación Geomecánica 5.....	128

Registro de Calicatas

Calicata 1. TP_CN14 – 04.....	129
Calicata 2. TP_CN14 – 06.....	130
Calicata 3. TP_CN14 – 07.....	131
Calicata 4. TP_CN14 – 12.....	132
Calicata 5. TP_CN14 – 16.....	133
Calicata 6. TP_CN14 – 19.....	134
Calicata 7. TP_CN14 – 32.....	135
Calicata 8. TP_CN14 – 37.....	136
Calicata 9. TP_CN14 – 39.....	137

Registro de Perforaciones

Perforación 1. DH_CN-14-02.....	138
Perforación 2. DH_CN-14-03.....	141
Perforación 3. DH_CN-14-04.....	144
Perforación 4. DH_CN-14-05.....	147
Perforación 5. DH_CN-14-06.....	150

Ensayos LDPT

Ensayo LDPT 1. LDPT_CN-14-01.	153
Ensayo LDPT 2. LDPT_CN-14-02; LDPT_CN-14-03; LDPT_CN-14-04.	154
Ensayo LDPT 3. LDPT_CN-14-05; LDPT_CN-14-06; LDPT_CN-14-07.	155
Ensayo LDPT 4. LDPT_CN-14-08; LDPT_CN-14-09; LDPT_CN-14-10.	156

Ensayos de Permeabilidad

	Pág.
Ensayo de Permeabilidad 1. Prueba de Lefranc DH_CN-14-02.	157
Ensayo de Permeabilidad 2. Prueba Lefranc DH_CN-14-03.	158
Ensayo de Permeabilidad 3. Prueba del Obturador o Lugeon DH_CN-14-01.	159
Ensayo de Permeabilidad 4. Prueba del Obturador o Lugeon DH_CN-14-02.	160
Ensayo de Permeabilidad 5. Prueba del Obturador o Lugeon DH_CN-14-03.	161
Ensayo de Permeabilidad 6. Prueba del Obturador o Lugeon DH_CN-14-04.	162
Ensayo de Permeabilidad 7. Prueba del Obturador o Lugeon DH_CN-14-05.	163
Ensayo de Permeabilidad 8. Prueba del Obturador o Lugeon DH_CN-14-06.	164

Ensayos Geofísicos

Ensayo Geofísico 1. Refracción Sísmica LS-1.	165
Ensayo Geofísico 2. Refracción Sísmica LS-2.	166
Ensayo Geofísico 3. Refracción Sísmica LS-3.	167
Ensayo Geofísico 4. Refracción Sísmica LS-4.	168
Ensayo Geofísico 5. Ensayo MASW/MAM-1.	173
Ensayo Geofísico 6. Ensayo MASW/MAM-2.	174
Ensayo Geofísico 7. Ensayo MASW/MAM-3.	175

Pruebas de Laboratorio

Ensayo de Laboratorio 1. Carga Puntual TP_CN-14-04 Muestra 3.	176
Ensayo de Laboratorio 2. Análisis Granulométrico por tamizado TP_CN-14-06 Muestra 1.	177
Ensayo de Laboratorio 3. Límites de Atterberg TP_CN-14-06 Muestra 1.	178
Ensayo de Laboratorio 4. Peso Volumétrico TP_CN-14-06 Muestra 1.	179
Ensayo de Laboratorio 5. Carga Puntual TP-CN-14-07 Muestra 1.	180
Ensayo de Laboratorio 6. Carga Puntual TP_CN-14-16 Muestra 1.	181
Ensayo de Laboratorio 7. Análisis Granulométrico por Tamizado TP_CN-14-19 Muestra 2.	182
Ensayo de Laboratorio 8. Límites de Atterberg TP_CN-14-19 Muestra 2.	183
Ensayo de Laboratorio 9. Densidad Natural TP_CN-14-19 Muestra 2.	184
Ensayo de Laboratorio 10. Ensayo de Compresión Triaxial TP_CN-14-19 Muestra 2.	185

	Pág.
Ensayo de Laboratorio 11. Análisis Granulométrico por Tamizado DH_CN-14-04, SPT 01.....	188
Ensayo de Laboratorio 12. Límites de Atterberg DH_CN-14-04, SPT 01.....	189
Ensayo de Laboratorio 13. Carga Puntual DH_CN-14-02 Muestra 1.....	190
Ensayo de Laboratorio 14. Carga Puntual DH_CN-14-03 Muestra 1.....	191
Ensayo de Laboratorio 15. Carga Puntual DH_CN-14-04 Muestra 2.....	192
Ensayo de Laboratorio 16. Carga Puntual DH_CN-14-05 Muestra 1.....	193

Correcciones del número de golpes NSPT

Corrección NSPT 1. DH_CN-14-01; SPT 01 y SPT 02.....	194
Corrección NSPT 2. DH_CN-14-02; SPT 01 y SPT 02.....	195
Corrección NSPT 3. DH_CN-14-03; SPT 01, SPT 02, SPT, SPT 03 y SPT 04.....	196
Corrección NSPT 4. DH_CN-14-04; SPT 01, SPT 02 y SPT 03.....	197

LISTA DE ABREVIATURAS

DH	: Down hole. Definición en inglés para sondeos de perforación.
TP	: Trial pit, Test pit. Definición en inglés para calicatas.
CN	: Ciénega Norte.
LDPT	: Ensayo de Penetración Dinámica Ligera.
SPT	: Ensayos de Penetración Estándar.
LPT	: Ensayos de Penetración a gran Escala.
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
MASW	: Multicanal de Ondas Superficiales
MAM	: Microtrepidaciones en Arreglo Multicanal.
SEV	: Sondeos Eléctricos Verticales.
INRENA	: Instituto Nacional de Recursos Naturales.
ONERN	: Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales.
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
ITGE	: Instituto Tecnológico Geológico Minero de España.
RQD	: Rock Quality Designation. Índice de calidad de las rocas.
DIN	: Instituto Alemán de Normalización.
ASTM	: American Society for Testing and Materials.
AENOR	: Asociación Española de Normalización y Certificación.
HJK	: Consultora en Ingeniería Geotécnica.
UTM	: Sistema de Coordenadas Universal Transversal.
BISA	: Buenaventura Ingenieros Sociedad Anónima.
GP	: Grava Pobrementemente Gradada.
GC	: Grava Arcillosa.
GM	: Grava Limosa.
SC	: Arena Arcillosa.
SM	: Arena Limosa
CH	: Arcilla de Limite Líquido alto.
ML	: Limos de Límite Líquido bajo
CL	: Arcilla de Límite Líquido bajo.
MH	: Limos de Límite Líquido alto.

RESUMEN

La investigación se desarrolló en la zona de Ciénega Norte – Tantahuatay, en el sector inferior de la ladera norte del cerro Quihuillas. Morfológicamente es una ladera de baja a moderada pendiente, ligeramente disectada, donde se aprecian extensas áreas de pajonal inundado que rodean pequeños promontorios Andesíticos aislados. La caracterización geotécnica de los materiales de fundación comprende, el proceso de análisis e investigación de pruebas in situ, campo y laboratorio, con la finalidad de diseñar, construir un sistema de pozas sedimentadoras y procesos. Como parte de la investigación se efectuó la selección y recopilación de muestras representativas, que fueron sometidas a diferentes ensayos geotécnicos, que ayudaron a cualificar los suelos además de las rocas. Las características geomecánicas del suelo consisten en una predominancia de gravas, gravas arcillosas-limosas, arenas-limosas, arcillas saturadas y limos saturados (GP, GC, GM, SM, CH, ML, CL y MH), según las normas del Sistema SUCS. Las características geomecánicas del macizo rocoso arrojaron un valor RMR promedio de 45; para efectos de análisis se consideró un valor mínimo de 40, y por correlaciones de Bieniawski, una cohesión de 100 kPa así como un ángulo de fricción de 30°, teniendo como resultado un RQD de condiciones regular a malas. La zonificación geotécnica según los parámetros obtenidos se dividió en cinco (05) unidades: Pajonal Inundado, Depósito Coluvial, Depósito Morrénico, Depósito Residual, y Basamento Rocoso.

Palabras clave: mecánica de suelos, mecánica de rocas, unidades geotécnicas, calicatas, perforaciones, ensayos in situ.

ABSTRACT

The research was carried out in the area of Ciénega Norte - Tantahuatay, in the lower part of the northern slope of the Quihuillas hill. Morphologically it is a slope of low to moderate slope, slightly dissected, where are appreciated extensive areas of flooded pajonal that surround small promontories isolated Andesíticos. The geotechnical characterization of the foundation materials includes the process of analysis and investigation of in situ, field and laboratory tests, in order to design, build a set of sedimentation ponds and processes. As part of the research, the selection and collection of representative samples were carried out, which were subjected to different geotechnical tests, which helped to qualify the soils in addition to the rocks. The geomechanical characteristics of the soil consist of a predominance of gravels, clayey loamy gravels, silty sands, saturated clays and saturated silts (GP, GC, GM, SM, CH, ML, CL and MH), according to the SUCS . The geomechanical characteristics of the rocky massif yielded an average RMR value of 45; For analysis purposes a minimum value of 40 was considered, and by Bieniawski correlations, a cohesion of 100 kPa as well as a friction angle of 30 °, resulting in a RQD from regular to bad conditions. The geotechnical zoning according to the parameters obtained was divided into five (05) units: Flooded Pajonal, Water Deposit, Morrénico Reservoir, Residual Deposit, and Rocky Basement.

Keywords: soil mechanics, rock mechanics, geotechnical units, potholes, perforations, in situ tests.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La ingeniería geológica tiene sus fundamentos en la geología y en el comportamiento mecánico de los suelos y las rocas. Incluye el conocimiento de las técnicas de investigación del subsuelo, tanto mecánicas como instrumentales y geofísicas, así como los métodos de análisis y modelización del terreno. (González de Vallejo, 2002).

La determinación y cálculo de las características geotécnicas que se encuentran implícitas en las rocas y suelo dentro de la zona del proyecto mediante el uso de diversos ensayos, constituye la base principal para el desarrollo del presente estudio, motivada por la necesidad de ejecutar la construcción de pozas para la sedimentación de partículas minerales en suspensión provenientes del Pad de lixiviación y un manejo medio ambiental adecuado; en la zona de Ciénega Norte – Tantahuatay.

La caracterización del suelo y roca desde el punto de vista de la geotecnia, a través de ensayos de campo y laboratorio, brinda la siguiente información: determinación de unidades geológicas-geotécnicas, granulometría del material, plasticidad, permeabilidad, compresibilidad, resistencia al esfuerzo cortante, identificación de discontinuidades y clasificación RMR respectivamente.

El presente estudio de investigación tiene por objetivo determinar dichas características y establecer resultados cualitativos-cuantitativos: que servirán de premisas para la construcción del sistema de pozas sedimentadoras, de gran capacidad (m^3), en una determinada área. De esta manera constituye un aporte al conocimiento de la Geología y de ramas afines como la Geotecnia, Geología ambiental, Hidrogeología.

La zona de estudio se ubica entre el distrito de Chugur y Hualgayóc, provincia de Hualgayóc, en el sector denominado Ciénega Norte – Tantahuatay a 78.6 km del distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca. La investigación está comprendida entre Agosto y Noviembre del 2016.

El objetivo general para este proyecto de investigación es realizar la caracterización de suelo-rocas presentes en el área de proyecto, con el fin de construir pozas sedimentadoras aplicando análisis geotécnicos en la zona de Ciénega Norte – Tantahuatay y como específicos se tiene: Seleccionar muestras representativas para la ejecución de ensayos geotécnicos de campo y laboratorio; Determinar las características geomecánicas del suelo-roca y Analizar e interpretar los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

Este proyecto de investigación se encuentra dividido en V Capítulos, en el Capítulo I se muestra el contexto y el problema incluyendo la hipótesis, justificación o importancia de la investigación, los alcances de la investigación además de los objetivos; en el Capítulo II que corresponde al Marco Teórico se han seleccionado antecedentes para la investigación entre ellas algunos nacionales y locales. Además de las bases teóricas y definición de términos; en el Capítulo III de Materiales y Métodos, se han descrito algunas generalidades del proyecto tales como ubicación y procedimientos para la recopilación de información de campo, materiales y métodos, se manifiestan además los aspectos relacionados con la geología como: la geología local, geomorfología, hidrografía, estratigrafía, geología estructural, unidades geotécnicas, determinación de parámetros geomecánicos y la presentación de las investigaciones geotécnicas realizadas; en el Capítulo IV se procedió a analizar, discutir los resultados siguiendo el orden de los objetivos planteados; en Capítulo V se darán a conocer las conclusiones a las cuales se han llegado a si como las recomendaciones y referencias bibliográficas usadas en el proyecto de investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Lambe & Whitman (1991), en su libro “Mecánica de Suelos”, se describen los problemas que la naturaleza del suelo plantea en la ingeniería, proporciona un panorama general del comportamiento del suelo. Plantea el empleo de ensayos de laboratorio para la determinación de las características del terreno donde se va a establecer una estructura. Una masa de suelo colocada por el hombre constituye un relleno y el proceso se suele denominar relleno.

Una parte esencial de la tarea del ingeniero es cerciorarse que las propiedades del material colocado correspondan a las supuestas en el proyecto, o modificar el proyecto durante la construcción, teniendo en cuenta cualquier diferencia entre las propiedades de la obra construida y las que se consideraron en el proyecto.

A manera de ejemplo en una presa de tierra construida para crear un embalse. Las dos zonas principales de la presa son el “núcleo” o “corazón de arcilla” y el “pie” de enrocamiento o escollera: el núcleo con su arcilla impermeable hace que las filtraciones sean escasas; y el pie de bloques de roca pesados y muy permeables, proporciona una estabilidad considerable a la presa. Entre ambas zonas se coloca un “filtro de grava” para evitar el arrastre de las partículas del suelo del núcleo hacia los huecos del enrocamiento. La popularidad de las presa de tierra, en comparación con las de concreto, aumenta de manera constante por dos razones principales. En primer lugar, la presa de tierra puede resistir mejor los desplazamientos de la cimentación y de los estribos que una estructura de concreto más rígida. En segundo lugar, el costo de las obras de tierra por unidad de volumen se ha mantenido aproximadamente constante durante los últimos 50 años (el aumento del costo de la mano de obra ha sido contrarrestado por las mejoras en los

equipos de movimiento de tierras), mientras que el costo del concreto ha aumentado continuamente. Por tanto, las presas de tierra tienen cada vez más aceptación.

Los tamaños relativos de cada zona en una presa de tierra y los materiales de las mismas dependen mucho de los materiales disponibles en el lugar. En el caso de la presa de la Figura 1, los volúmenes respectivos de arcillas y roca que se extrajeron de la excavación para el embalse fueron prácticamente equivalentes a los que se usaron para la presa. De esta forma no se desperdició nada del material excavado. El único material escaso en la zona era la grava empleada para el filtro y el lecho de apoyo del enrocamiento.

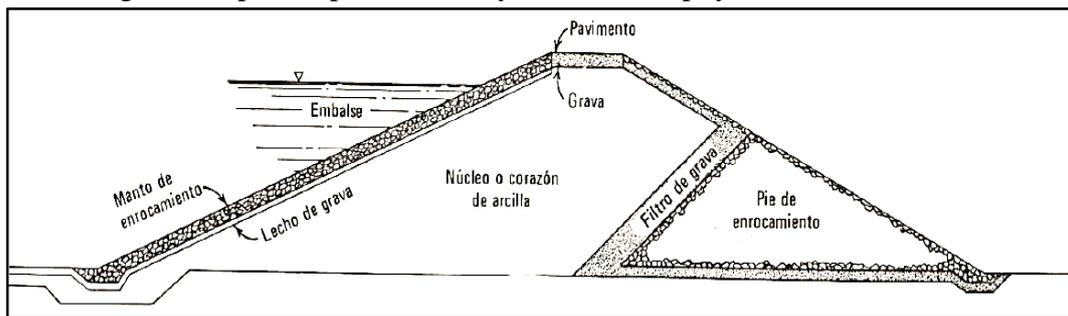


Figura 1. Presa de Tierra.

Durante el diseño y construcción de una presa de tierra se deberían tener en cuenta las cuestiones ingenieriles siguientes:

1. Las dimensiones que debería tener la presa para obtener la estructura más económica y segura.
2. El espesor mínimo seguro de las capas de grava
3. Los espesores de grava y bloques de roca que serán necesarios en el manto para limitar el hinchamiento del núcleo de arcilla a un valor admisible.
4. La humedad y método de compactación a emplearse en la colocación de la grava y arcilla.
5. Las características de resistencia y permeabilidad de la presa construida. La variación de la resistencia y la permeabilidad de la presa con el tiempo y la altura de agua en el embalse.
6. Las pérdidas por filtración que podrían producirse bajo la presa y a través de la misma.
7. Las restricciones de ser el caso, que deberían imponerse en el funcionamiento del embalse.

Cuando la superficie del terreno no es horizontal existe una componente del peso que tiende a provocar deslizamientos del suelo, como se aprecia en el diagrama de fuerza de la Fig. 2. Si, a lo largo de una superficie potencial de deslizamiento, los esfuerzos

tangenciales debidos al peso propio o a cualquier otra causa (como agua de filtración, peso de una estructura o de un terremoto) superan la resistencia al corte del suelo, se produce un deslizamiento de una parte del terreno. Existen muchos casos en los taludes naturales, terraplenes compactados y excavaciones, en los que se debe estudiar la estabilidad de un talud, comparando los esfuerzos tangenciales con la resistencia al corte a lo largo de una superficie de deslizamiento potencial, es decir, deberá efectuarse un cálculo de estabilidad.

La Fig. 2 muestra un talud natural sobre el cual se ha construido una estructura. El incremento de esfuerzos tangenciales provocado por esta y la posible disminución de la resistencia al corte del terreno por el agua infiltrada, puede ocasionar una falla del talud, el cual pudo ser estable durante muchos años de la construcción.

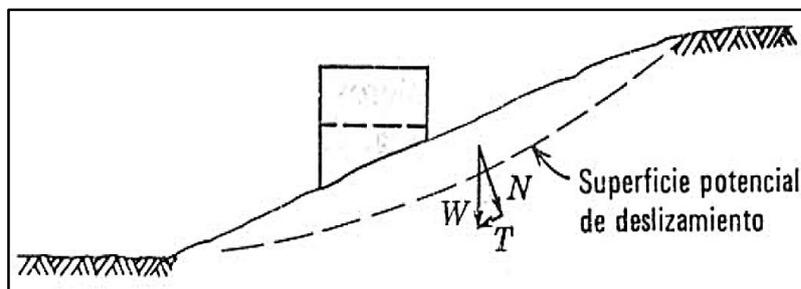


Figura 2. Taludes y excavaciones (Talud natural).

La geología es una herramienta fundamental ya que el método de formación de una masa de suelo influye en el tamaño, forma y comportamiento del mismo. La exploración ayuda a establecer los contornos de un depósito y permite realizar la selección de muestras para pruebas de laboratorio. Por lo tanto, se debe contrastar el análisis e interpretaciones in situ, comportamiento real, con el comportamiento previsto para una estructura.

Casi todos los problemas de suelos son, en alto grado, estáticamente indeterminados. Aun es más importante el hecho de que los depósitos de suelos naturales presentan cinco características que originan complicaciones:

1. Un suelo no posee una relación lineal o única de esfuerzo-deformación.
2. El comportamiento del suelo depende de la presión, tiempo y del medio físico.
3. El suelo es diferente, prácticamente, en cada lugar.
4. En casi todos los casos la masa de suelo que interviene en un problema esta bajo la superficie y no puede observarse en su totalidad, sino que se debe estudiar a partir de pequeñas muestras obtenidas en puntos localizados.

5. La mayoría de los suelos son muy susceptibles a alterarse, debido a la toma de muestras, por lo que el comportamiento medido en pruebas de laboratorio puede ser diferente del suelo in situ.

Estos factores se combinan para hacer que cada problema de suelos sea particular y, para todos los efectos prácticos, imposible de una solución exacta.

La mecánica de suelos puede proporcionar soluciones para un modelo matemático. Debido a la naturaleza y diversidad de los suelos y a las condiciones de contorno o frontera desconocidas, puede ser que el modelo matemático no represente exactamente el problema real. Al avanzar la construcción y, a medida que se adquiere más información, las propiedades del terreno y las condiciones de contorno se pueden rectificar, modificando adecuadamente la solución del problema.

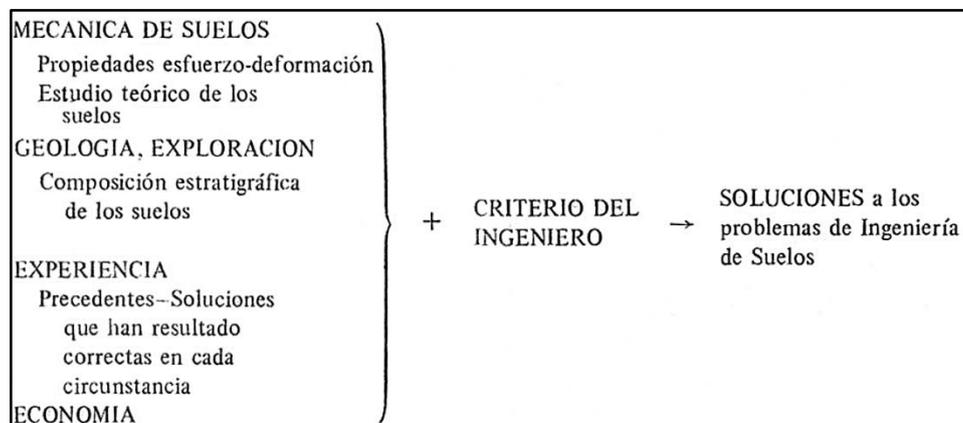


Figura 3. Proceso de resolución de los problemas de Mecánica de Suelos planteados para la Ingeniería.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Campos & Vásquez (1992), realizaron para el CISMID (Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres), un seminario taller de mecánica de suelos y exploración geotécnica-geofísica; donde se presentaron, expusieron las características de diferentes ensayos que ayudan a determinar las propiedades del suelo y roca; orientadas al estudio del terreno previo al diseño, asentamiento de una estructura y mitigación de desastres naturales en el Perú. Se mencionan:

1. Ensayo de Penetración Estándar (SPT). Según Ayala, 1992 se determinó que el método de Penetración Estándar es el más usado para la exploración de suelos; estableciendo relaciones entre el número de golpes “N” del SPT, la densidad relativa y Ángulo de Fricción Interna. Se estudió su funcionalidad además de sus aplicaciones, como la determinación de la capacidad portante en suelos granulares y finos.

2. Perforación Diamantina en la exploración Geotécnica de macizos rocosos. De acuerdo con Arévalo, 1992 actualmente es frecuente el uso de perforaciones diamantinas en los proyectos de ingeniería donde es necesaria la exploración de macizos rocosos, se estudiaron y determinaron los parámetros fundamentales para, la obtención de muestras, desde las características del equipo de perforación diamantina; planeamiento de la exploración geotécnica; manipulación de testigos y registros de perforación. Además se incluyó la evaluación de ensayos in-situ, tales como: Carotage Sísmico (Down Hole, Up Hole y Cross Hole), fracturamiento hidráulico de la roca con el fin de determinar las direcciones de los esfuerzos principales in-situ, así como pruebas de absorción de agua, tipo Lugeon.
3. Ensayo de Consolidación. Según Vergara, 1992 la prueba de Consolidación Estándar consiste en comprimir verticalmente una muestra de suelo en estudio, confinándola en un anillo rígido. El suelo está sujeto a un esfuerzo en sus dos superficies planas; toda deformación ocurre en el eje vertical, las deformaciones elástica y cortante son insignificantes debido a que toda la superficie de la muestra se carga y no permite deformación lateral. Los esfuerzos se aplican siguiendo una secuencia de cargas normalizadas o establecidas previamente, las cuales estarán de acuerdo al nivel de cargas que el suelo en estudio soportará en el futuro.
4. Ensayos de Resistencia al Esfuerzo Cortante. De acuerdo con Gutiérrez, 1992 las características mecánicas de los suelos y ensayos in-situ, están tradicionalmente caracterizadas por la determinación de los parámetros de resistencia; el ángulo de fricción interna " ϕ " y la cohesión " c ". estos parámetros son medidos exclusivamente en el laboratorio sobre muestras inalteradas, mediante ensayos de corte directo o por ensayos de compresión triaxial. Para algunos requerimientos donde la resistencia al corte de un suelo, necesita ser determinada con rapidez, se puede aceptar ampliamente el método de compresión no-confinada.
5. Ensayo Triaxial Dinámico. Según Parra, 1992 debido a su relativa simplicidad y a la gran disponibilidad del equipamiento necesario, es todavía el procedimiento de ensayo más comúnmente usado. En este ensayo una muestra cilíndrica y saturada de arena es consolidada bajo un cierto esfuerzo efectivo. Se previene todo drenaje y luego es sometida a ciclos de cambio de esfuerzo axial. Mediante este modelaje de la aplicación de un esfuerzo desviador cíclico para representar el comportamiento de campo de depósitos de suelos, se pueden realizar los siguientes ensayos en el equipo triaxial cíclico: a) Ensayo de Licuación de arenas, para evaluar la resistencia a la carga cíclica

de especímenes de arenas saturadas, b) Ensayo de Deformación Dinámica para evaluar el Modulo de Young y Factor de amortiguamiento de los suelos.

6. Ensayos de Refracción Sísmica y medición de ondas de corte. Para Aguilar, 1992 el ensayo de refracción sísmica es una herramienta básica para explorar en forma rápida y económica grandes áreas, permitiendo obtener con relativa precisión los espesores de los estratos y las velocidades de ondas P, y de ondas S en algunos casos. Este método permite representar el perfil del subsuelo con resolución vertical relativamente cruda, ya que no es posible diferenciar capas delgadas.

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES

Ausenco (2014), realizó el Informe Geotécnico de las Instalaciones de Ciénaga Norte Pad de Lixiviación de la Fase 1 y Pozas de Procesos para CIA. MINERA COIMOLACHE S.A. Este consistió en un programa de investigación geotécnica de campo, con la finalidad de evaluar las características y propiedades de los materiales de la cimentación. Este programa se encargó de la ejecución del cartografiado geológico-geotécnico incluyendo estaciones geomecánicas en afloramientos rocosos; excavación de 90 calicatas; 9 perforaciones diamantinas de hasta 90 m de profundidad con ejecución de ensayos de SPT y ensayos de permeabilidad en su interior; 29 ensayos LDPT y ensayos geofísicos que comprendieron la ejecución de ensayos de Refracción Sísmica, MASW/MAM y SEV. Asimismo, se realizó el muestreo representativo de los materiales de cimentación para ser adecuadamente ensayados en los laboratorios de mecánica de suelos, mecánica de rocas y químicos. Determinación de unidades geotécnicas y ubicación de áreas para relleno estructural.

2.2.BASES TEÓRICAS

2.2.1. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Según Gonzales (2001); la zonificación geotécnica se basa en la clasificación de unidades geotécnicamente homogéneas, que pueden abarcar diferentes edades geológicas; a su vez, estas pueden dividirse en subunidades. El detalle y el grado de homogeneidad dependen de la escala, objetivo del mapa y datos disponibles. La delimitación de las unidades geotécnicas de suelos y rocas se deberá realizar de acuerdo a sus propiedades físicas y mecánicas, como resistencia, deformabilidad, permeabilidad, etc.

En cuanto a la zonificación de suelos; una de las opciones es realizarlo de acuerdo al Sistema Unificado SUCS, carta de plasticidad de Casagrande, tipo de depósito, Consistencia o Densidad Relativa, permeabilidad, y parámetros de resistencia. Para la zonificación de rocas se deberá tener en cuenta clasificaciones geomecánicas, las que están referidas a la resistencia de la matriz rocosa, meteorización y/o alteración, frecuencia, distribución y tipos de discontinuidades, el grado de fracturamiento y permeabilidad.

2.2.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS MATERIALES

Una vez definido geométrica y topográficamente el problema de estabilidad que se quiere analizar, y una vez identificados los materiales que intervienen, bien mediante ensayos de laboratorio o de campo, o ambos, el objetivo siguiente consiste en definir y valorar la resistencia de los mismos frente a los esfuerzos cortantes a que se ven sometidos.

De esta manera sencilla, se describen los distintos procedimientos y las diferentes teorías que existen y que permiten valorar la resistencia al corte de los suelos y de las rocas, bajo las diferentes condiciones posibles. (ITGE, 1986).

2.2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES

Una vez que se han efectuado y se disponen de los resultados de las investigaciones y ensayos de campo, así como los resultados de los ensayos de laboratorio se trata de interpretar los mismos con vistas a poder cuantificar posteriormente las características resistentes de los materiales. (ITGE, 1986).

La primera necesidad es la de poder distinguir si se trata de un suelo o una roca, para utilizar con ella una metodología u otra. Se entiende por roca “los materiales de la corteza terrestre, compuestos por uno o varios materiales, ligados estrechamente entre sí, y que se encuentran tan poco alterados como para reconocer la estructura de origen” (Hunt, 1984). Se entiende por suelo “un agregado natural de partículas discretas, o de granos, consecuencia de la alteración geológica de las rocas” (Hunt, 1982).

Consiste en mantener inmersos en agua los elementos, representativos del conjunto, más consistentes del material. Si se deshacen al cabo de un cierto tiempo se puede considerar que es un suelo. En caso contrario sería una roca. Este ensayo, es útil a efectos prácticos, puesto que la verdadera distinción de un suelo de una roca se debe efectuar en base a

criterios geológicos y geotécnicos, lógicamente más completos y complejos, con los cuales se pueda distinguir el estado, estructura y/o litología del material.

2.2.4. MECÁNICA DE SUELOS

2.2.4.1. Origen y formación

Según Gonzáles de Vallejo (2002), los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas:

Física, debida a cambios térmicos (lo que origina dilataciones entre los diferentes minerales dando lugar a acciones y fisuras internas) y a la erosión del agua (arrastrés de fragmentos ya erosionados; posible acción directa por congelación, que produce tensiones internas por el aumento de volumen del hielo respecto al agua; acción alternante de humedad-sequedad a lo largo del tiempo). Estas acciones físicas tienden a romper la roca inicial y a dividirla en fragmentos de tamaño cada vez más pequeño, los cuales son separados de la roca por agentes activos (agua, viento, gravedad), creando y llevando las partículas que van a formar el suelo.

Química, originado por fenómenos de hidratación (por ejemplo, paso de anhídrita o sulfato hemihidratado a yeso o sulfato dihidratado), disolución (de sales, como los sulfatos en el agua), oxidación (de minerales de hierro por efecto ambiental), cementación (por agua conteniendo carbonatos previamente disueltos a partir de otra roca), etc. Representa la conjunción de una física y posteriormente química, la cual contribuye en muchos casos más a destruir y transformar que a unir partículas de suelo.

Biológica, producida por actividad bacteriana induciendo putrefacciones de materiales orgánicos y mezclando el producto con otras partículas de origen físico-químico, actuando de elemento catalizador, etc.

Todo ello da lugar a fenómenos de disgregación (alteración o meteorización) y transformación de la roca, creándole el perfil de meteorización. En este perfil la roca madre ocupa la parte más baja y alejada de la superficie, y el suelo la más alta. Cuando el suelo permanece in situ sin ser transportado se le conoce como “suelo residual”, y cuando ha sufrido transporte, formando depósitos coluviales, aluviales, etc., se denomina “suelo transportado”.

En la Fig. 4, se resumen los distintos procesos que intervienen en la formación de los suelos, caracterizados por: Ser un sistema particulado de sólidos de diverso origen, que

pueden considerarse indeformables; Tener una granulometría de gruesos (centímetros) a finos (micras); las partículas más finas (por debajo de las 2 o 5 micras) necesitan procesos físico-químicos para su constitución, las de mayor tamaño solo necesitan procesos físicos, aunque pueden intervenir los químicos; Una estructura y fabrica en función del origen de los minerales, agentes cementantes, transformaciones químicas, medio de disposición, etc.; Presencia importante de huecos (o poros o intersticios), con agua (suelo saturado), aire y agua (semisaturado) o solo aire (seco), situación prácticamente inexistente en la naturaleza.

Las deformaciones del suelo se producen por giros y deslizamientos relativos de las partículas y por expulsión de agua; en raras ocasiones se producen por roturas de granos.

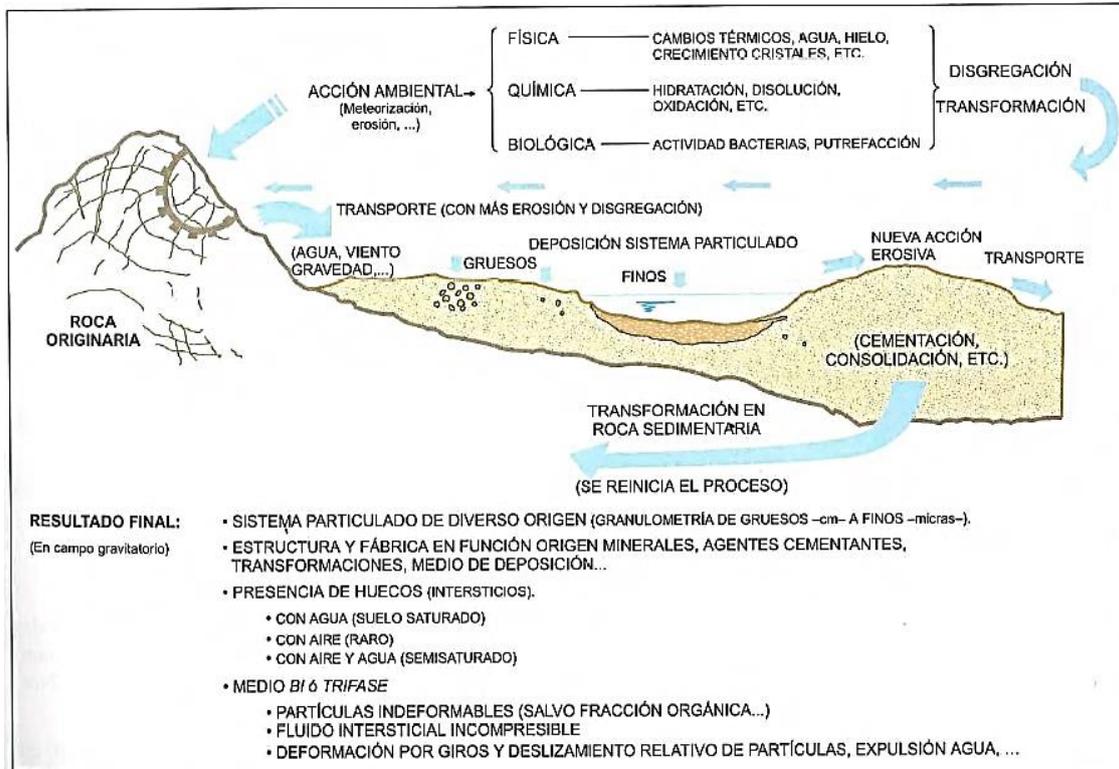


Figura 4. Formación de suelos. (González de Vallejo, 2002).

2.2.4.2. Clasificación de los Suelos

Para estudiar un material complejo como el suelo (con diferente tamaño de partículas y composición química) es necesario seguir una metodología con deformaciones y sistemas de evaluación de propiedades, de forma que se constituya un lenguaje fácilmente comprensible (González de Vallejo, 2002).

La clasificación del suelo es de suma importancia para la creación de modelos geotécnicos y el diseño de cimentaciones en un terreno específico, debido a que se requiere conocer el tipo de suelo, la capacidad de carga y los asentamientos generados sobre los estratos

de suelo presentes en el lugar donde se construirá la futura obra, de tal forma que éstos posean las propiedades necesarias para el soporte de la estructura. (Das, 2001).

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System-USCS), fue presentado por Arthur Casagrande, usado para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se puede clasificar en suelos con tamaños menores de tres (3) pulgadas; se representa mediante un símbolo con dos letras. (Braja M. Das, 2001).

El sistema Unificado de Clasificación, clasifica los suelos en dos amplias categorías:

1. Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.
2. Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos son también usados para la clasificación: W: bien graduado, P: mal graduado, L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50), H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50).

Tabla 1. Símbolos de grupo clasificación SUCS incluyendo Prefijos y Sufijos.

Tipo de Suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien gradada	W
Arena	S	Pobrementemente gradada	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	H
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	L

(Braja M. Das, 2001).

En función de su granulometría y según Normas D.I.N., ASTM, AENOR, etc., se han clasificado los suelos en cuatro grandes grupos: Gravas, Arenas, Limos, Arcillas. (González de Vallejo, 2002). Se describe a continuación:

Gravas, con tamaño de grano entre unos 8-10 cm y 2 mm; se caracterizan porque los granos son observables directamente. No retienen el agua, por la inactividad de su superficie y los grandes huecos existentes entre partículas.

Arenas, con partículas comprendidas entre 2 y 0.060 mm, todavía son observables a simple vista. Cuando se mezclan con el agua no se forman agregados continuos, sino que se separan de ella con facilidad.

Limos, con partículas comprendidas entre 0.060 y 0.002 mm (algunas normativas indican que este último valor debe ser 0.005 mm). Retienen el agua mejor que los tamaños superiores. Si se forma una pasta agua-limo y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se ve cómo el agua se exuda con facilidad.

Arcillas, formadas por partículas con tamaños inferiores a los limos (0.002 mm). Se trata ya de partículas tamaño gel y se necesita que haya habido transformaciones químicas para llegar a estos tamaños. Están formadas, principalmente por minerales silicatados, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos (el ion silicio se encuentra en el centro de cada una de estas estructuras regulares), unidas por enlaces covalentes débiles, pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas produciendo, a veces, aumentos de volumen (recuperables cuando el agua se evapora).

Para una clasificación apropiada con este sistema, debe conocerse algo o todo de la información siguiente: Coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de curvatura (C_t); Límite líquido e índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla No. 40.

El Sistema SUCS cubre como ya se mencionó con anterioridad los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. (Juárez & Rico, 2005).

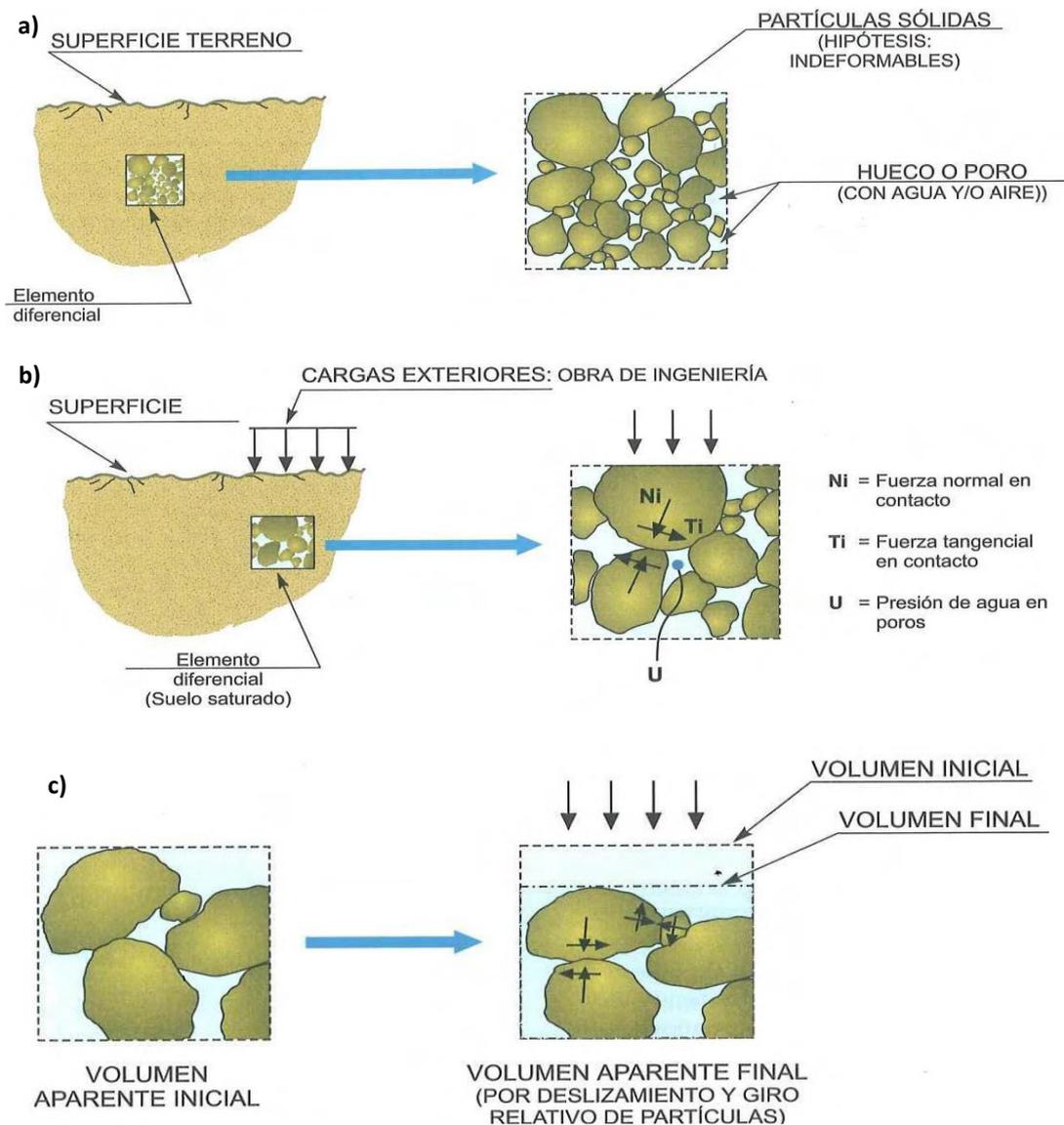


Figura 5. El suelo como sistema particulado. a) Constitución de un suelo, b) Acciones sobre un suelo, c) Movimientos de partículas producidas por acciones exteriores. (González de Vallejo, 2002).

Dentro de los Suelos Gruesos se encuentran las Gravas (gravel) G y las Arenas (sand) S, las cuales se separan con la malla No. 4, y se subdividen en cuatro tipos:

1. Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo W (well graded). En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
2. Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo P (poorly graded). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.
3. Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo M (del sueco mo y mjala). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GM y SM.

4. Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C (clay). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GC y SC.

Asimismo para los Suelos Finos el Sistema considera a los suelos agrupados y dando lugar a Limos Inorgánicos (del sueco mo y mjla) M, Arcillas inorgánicas (clay) C y Limos y arcillas orgánicas (organic) O. (Juárez & Rico, 2005).

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdivide, según su límite líquido, en dos grupos. Si éste es menor de 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se le añade al símbolo genérico la letra L (low compressibility), obteniéndose por esta combinación de grupos ML, CL, y OL. Los suelos finos con límite líquido mayor de 50%, o sea de alta compresibilidad, llevan el símbolo genérico la letra H (high compressibility), teniéndose así los grupos MH, CH y OH.

Grupos CL y CH. En estos grupos se encasillan las arcillas inorgánicas. El grupo CL comprende a la zona sobre la Línea A, definida por $LL < 50\%$ e $I_p > 7\%$.

El grupo CH corresponde a la zona arriba de la Línea A, definida por $LL > 50\%$. Las arcillas formadas por descomposición química de cenizas volcánicas, tales como la bentonita con niveles altos de límites líquidos, se encasillan en el grupo CH.

Grupos ML y MH. El grupo ML comprende la zona bajo la Línea A, definida por $LL < 50\%$ y la porción sobre la línea A con $I_p < 4$. El grupo MH corresponde a la zona debajo de la línea A, definida por $LL > 50\%$. En estos grupos quedan comprendidos los limos típicos inorgánicos y limos arcillosos. Los tipos comunes de limos inorgánicos y polvo de roca, con $LL < 30\%$, se localizan en el grupo ML. Los depósitos eólicos, del tipo del Loess, con $25\% < LL < 35\%$ usualmente, caen también en ese grupo.

Un tipo interesante de suelos finos que caen en esta zona son las arcillas del tipo caolín, derivados de los feldespatos de rocas graníticas; a pesar de que el nombre de arcillas está muy difundido para estos suelos, algunas de sus características corresponden a limos inorgánicos; por ejemplo, su resistencia en estado seco es relativamente baja y en estado húmedo muestran cierta reacción a la prueba de dilatancia; sin embargo, son suelos finos y suaves con un alto porcentaje de partículas tamaño de arcilla, comparable con el de otras arcillas típicas, localizadas arriba de la línea A.

Grupos OL y OH. Las zonas correspondientes a estos dos grupos son las mismas que las de los grupos ML y MH, respectivamente, si bien los orgánicos están siempre en lugares próximos a la línea A. Una pequeña adición de materia orgánica coloidal hace que el límite líquido de una arcilla inorgánica crezca, sin apreciable cambio de su índice plástico;

esto hace que el suelo se desplace hacia la derecha en la Carta de Plasticidad, pasando a ocupar una posición más alejada de la línea A.

Grupo Pt. Las pruebas de límites pueden ejecutarse en la mayoría de los suelos turbosos, después de un completo remoldeo. El límite líquido de estos suelos suele estar entre 300% y 500%, quedando su posición en la Carta de Plasticidad netamente abajo de la línea A; el índice plástico normalmente varía entre 100% y 200%.

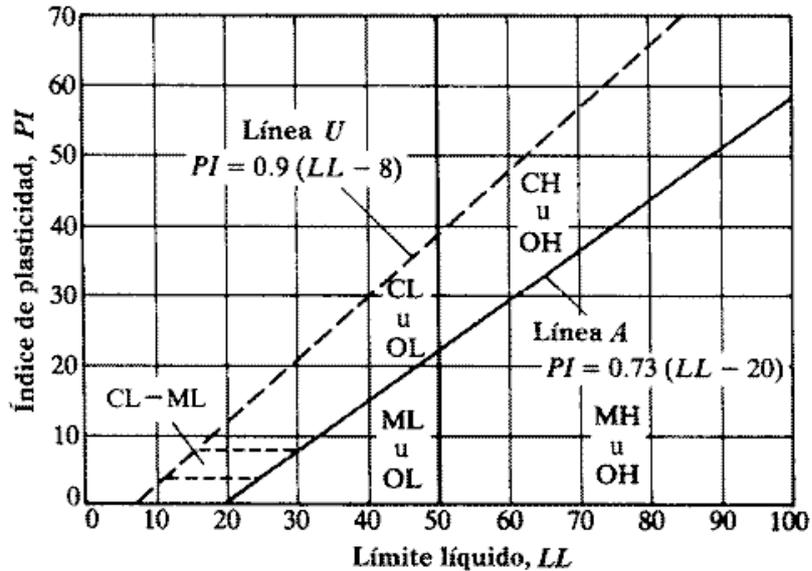


Figura 6. Carta de Plasticidad de Casagrande. (Braja M. Das, 2001).

Tabla 2. Símbolos de cada Tipo de Suelo Clasificación SUCS.

GRUPO DE SUELO	SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Grava (>50% en tamiz # 4 ASTM)	GW	Limpias (Finos <5%)	Bien Gradada
	GP		Pobremente Gradada
	GM	Con finos (Finos >12%)	Componente Limoso
	GC		Componente Arcilloso
Arena (<50% en tamiz # 4 ASTM)	SW	Limpias (Finos <5%)	Bien Gradada
	SP		Pobremente Gradada
	SM	Con finos (Finos >12%)	Componente Limoso
	SC		Componente Arcilloso
Limo	ML	Baja Plasticidad (LL<50)	
	MH	Alta Plasticidad (LL<50)	
Arcilla	CL	Baja Plasticidad (LL<50)	
	CH	Alta Plasticidad (LL<50)	
Orgánico	OL	Baja Plasticidad (LL<50)	
	OH	Alta Plasticidad (LL<50)	
Turba	Pt	Suelos Altamente Orgánicos	

(Braja M. Das 2001).

2.2.5. MECÁNICA DE ROCAS

2.2.5.1. Conceptos Generales

El problema ingenieril del diseño estructural de excavaciones, ya sean subterráneas o a cielo abierto, que trata de resolver la mecánica de rocas es la predicción del comportamiento mecánico del macizo rocoso en una determinada obra o explotación sujeta a las cargas que se le apliquen a lo largo de toda su vida operativa (Brady y Brown, 1985); contemplada desde este punto de vista la mecánica de rocas se debería llamar más propiamente ingeniería de los macizos rocosos.

Según Gonzáles de Vallejo (2002), la mecánica de rocas se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en tu entorno físico. El desarrollo de la mecánica de rocas se inició como consecuencia de la utilización del medio geológico para obras superficiales y subterráneas así como la explotación de recursos mineros los distintos ámbitos de aplicación de la mecánica de rocas se pueden agrupar en aquellos en que el material rocoso constituye la estructura (excavación de túneles, galería, taludes, etc.), aquellos en que la roca es el soporte de otras estructuras (cimentaciones de edificios, presas, pozas de sedimentación, pozas de relaves) y aquellos en los que las rocas se emplean como material de construcción por ejemplo: escolleras, pedraplenes, rellenos.

	Matriz rocosa	Macizo rocoso
Origen Geológico Sedimentario Ígneo Metamórfico	Composición Mineralógica Densidad	Litología
Historia Geológica Diagénesis Tectónica (esfuerzos) Condiciones ambientales (agua, presión y temperatura) Erosión	Fábrica Porosidad Permeabilidad Alterabilidad	Estructura Discontinuidades Estado de esfuerzos
Procesos de alteración y meteorización	Variación en la composición mineralógica y en las propiedades	Hidrogeología Zonas alteradas y meteorizadas. Variación de las propiedades

Figura 7. Control geológico de las propiedades de la matriz rocosa y del macizo rocoso. (Gonzáles de Vallejo, 2002).

2.2.5.2. Propiedades físicas de la matriz rocosa

Según Gonzáles de Vallejo, 2002, existen una serie de parámetros que se emplean para la identificación y descripción cuantitativa de las propiedades básicas de las rocas y permiten, así mismo, establecer una primera clasificación con fines geotécnicos. Estas propiedades, denominadas propiedades “Índice”, serán las que determinen en primer lugar, junto con la composición mineralógica y fábrica, las propiedades y el comportamiento mecánico de la matriz rocosa. La descripción geológica de la roca incluye su nombre, su mineralogía, textura, tipo de cementación y grado de alteración.

El estudio de la matriz rocosa permite interpretar sus propiedades físicas en función de sus componentes y características petrográficas (poros y fisuras, uniones intergranulares, anisotropías, minerales, composición química), mediante la descripción de parámetros petrográficos y procedimientos para su evaluación. (Montoro & Esbert, 1999).

Tabla 3. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación.

	Propiedades	Métodos de determinación
Propiedades de identificación y clasificación	Composición mineralógica Fábrica y textura Tamaño de grano Color	Descripción visual Microscopía óptica y electrónica Difracción de rayos X
	Porosidad (n)	Técnicas de laboratorio
	Peso específico (γ)	
	Contenido en humedad	
	Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad, k)	Ensayo de permeabilidad
	Durabilidad Alterabilidad (índice de alterabilidad)	Ensayos de alterabilidad
	Propiedades mecánicas	Resistencia a compresión simple (σ_c)
Resistencia a la tracción (σ_t)		Ensayo de tracción directa Ensayo de tracción indirecta
Velocidad de ondas sísmicas (V_p , V_t)		Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio
Resistencia (parámetros c y ϕ)		Ensayo de compresión triaxial
Deformabilidad (módulos de deformación elástica estáticos o dinámicos: E , ν)		Ensayo de compresión uniaxial Ensayo de velocidad sísmica

(González de Vallejo, 2002).

2.2.5.3. Clasificaciones Geomecánicas de los macizos rocosos

Los sistemas de clasificación de los macizos rocosos tienen por objeto evaluar sus características para determinar de forma cuantitativa su calidad. El término “macizo rocoso” se refiere al conjunto de uno o varios tipos de rocas atravesados por plano de discontinuidad en el que se inserta la obra de ingeniería o la mina. (Alejano & Ramírez, 2004). Su caracterización requiere el conocimiento de los siguientes parámetros.

Resistencia y comportamiento de la roca; Familias de discontinuidades existentes; Espaciado de los planos de discontinuidad y fracturación del macizo; Caracteres geomecánicos de las discontinuidades: continuidad, rugosidad, separación y resistencia de los labios, meteorización y relleno; Condiciones del agua en las juntas; Tensiones in situ, naturales o inducidas; Alteraciones producidas en el macizo rocoso por las excavaciones.

La gran variabilidad de estos factores y el carácter discontinuo y anisótropo de los macizos rocosos implica la dificultad para establecer clasificaciones geotécnicas o geomecánicas generales válidas para los diferentes tipos de macizos. (González de Vallejo, 2002).

Las tres clasificaciones más utilizadas actualmente en mecánica de rocas son la de Bieniawski (RMR), la de Barton (Q) y la de Hoek-Brown (GSI). Las dos primeras utilizan un parámetro, RQD (Rock Quality Designation). (Alejano & Ramírez, 2004). Estas establecen diferentes grados de calidad del macizo en función de las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, y proporcionan valores estimativos de sus propiedades resistentes globales.

Clasificación de Bieniawski (1973, 1976, 1989)

Según (Alejano & Ramírez, 2004), para determinar la calidad del macizo rocoso, se divide este en dominios estructurales, es decir, en zonas delimitadas por discontinuidades geológicas, dentro de las cuales la estructura es prácticamente homogénea. La estructura del macizo comprende el conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región. Actualmente se usa la edición de 1989, para determinar el índice RMR (Rock Mass Rating), de calidad de la roca, el cual es igual a la suma de los cinco primeros parámetros del terreno: La resistencia a la compresión uniaxial de la roca (1), RQD (2), espaciado de discontinuidades (3), condición de las discontinuidades (4), presencia de agua (5); Siendo el $RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$. Estos se describen a continuación:

Resistencia a compresión simple del material rocoso (1). En la Tabla 5, se presenta una estimación de las resistencias medias de ciertas rocas según Bieniawski, 1973.

Tabla 4. Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo.

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple (MPa)
S ₁	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0,025
S ₂	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025-0,05
S ₃	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05-0,1
S ₄	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,1-0,25
S ₅	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25-0,5
S ₆	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,5
R ₀	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25-1,0
R ₁	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1,0-5,0
R ₂	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0-25
R ₃	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
R ₄	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50-100
R ₅	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100-250
R ₆	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo solo saltan esquirlas.	>250

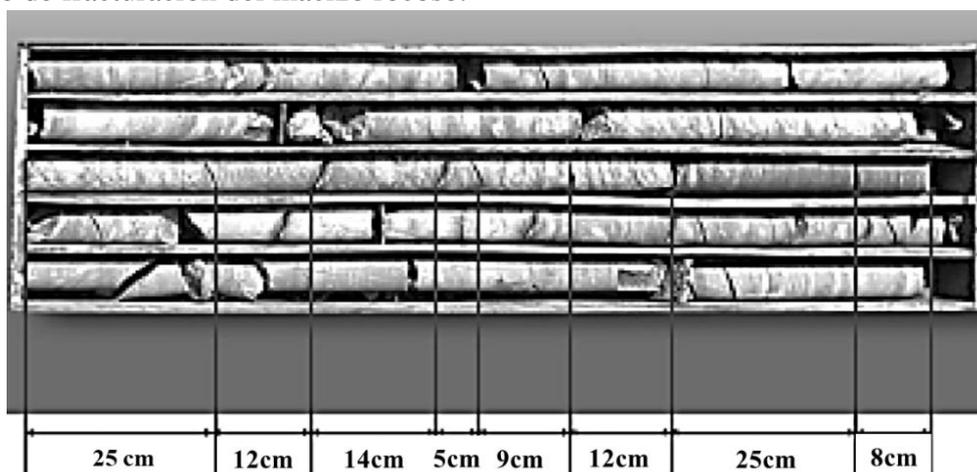
(González de Vallejo, 2002).

Tabla 5. Valoración del RMR de Bieniawski respecto a la Resistencia a la Compresión Uniaxial.

Clase	Descripción (Roca)	UCS (Mpa)	PLS (Mpa)	Identificación de campo.	Puntaje RMR
R0	Extremadamente Débil	<1	N.A.	La roca puede ser marcada por la uña del pulgar.	0
R1	Muy Débil	1-5	N.A	Se disgrega o desintegra al golpe firme con la punta del martillo geológico. Puede ser escarbada con un cortaplumas.	1
R2	Débil	5-25	N.A	Con dificultad puede ser escarbada con un cortaplumas. Marcas superficiales pueden ser hechas con un golpe firme con la punta del martillo geológico.	2
R3	Moderada o Medianamente Dura	25-50	1-2	No puede ser escarbada con un cortaplumas. Se rompe con un golpe firme del martillo geológico.	4
R4	Dura	50-100	2-4	Se rompe con más de un golpe del martillo geológico.	7
R5	Muy Dura	100 - 250	4-10	Se requieren muchos golpes del martillo geológico para romper la roca.	12
R6	Extremadamente Dura	>250	>10	Los golpes del martillo geológico sólo obtienen esquirlas.	15

(González de Vallejo, 2002).

RQD (2). Este parámetro se obtiene a partir del porcentaje de trozos de testigo mayores de 10 cm recuperado en un sondeo, tal y como se muestra en la Fig. 8 y permite estimar el grado de fracturación del macizo rocoso.



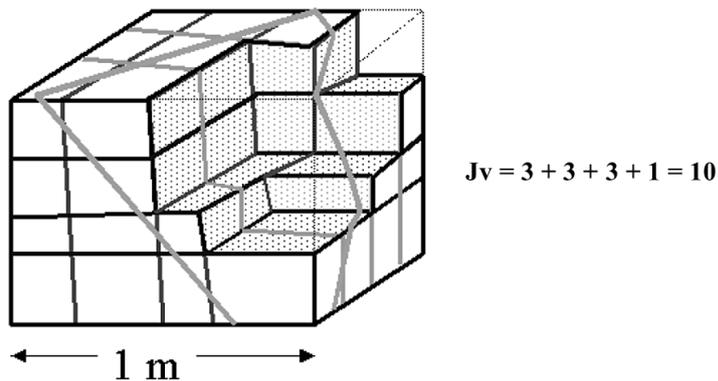
$$RQD = \frac{\sum \text{testigos} \geq 10 \text{ cm}}{\text{longitud del taladro}} \times 100 \quad RQD = \frac{25+12+14+12+25}{110} = 80\%$$

Figura 8. Estimación del RQD a partir de testigos de sondeo. (Alejano, 2004).

El RQD hay que tomarlo con las debidas precauciones, ya que su valor depende no solo de la fracturación del macizo rocoso sino también de otros factores, como la técnica del sondeo, su dirección, diámetro, etc.

A veces hay que estimar el RQD a partir de datos en afloramientos, al no disponer de sondeos. En estos casos, se puede utilizar la siguiente relación (Palmstrom, 2005), aunque su precisión no es superior a la que puede proporcionar una mera estimación visual (Bieniawski, 2003a). $RQD = 110 - 2.5 \times J_v$, donde J_v es el índice volumétrico de juntas o numérico de juntas por metro cubico.

Índice volumétrico de juntas (J_v): Es el numero de juntas que intersecta 1 m^3 de macizo rocoso



Los términos descriptivos de la tabla dan una idea del tamaño del bloque en función de J_v

Tamaño de bloque	Valor de J_v
Bloques muy grandes	< 1,0
Bloques grandes	1-3
Bloques Medios	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	> 30

Figura 9. Estimación del J_v y clasificación del tamaño de bloque en función de espaciados de juntas y número de familias observadas en campo. (Alejano, 2004).

Tabla 6. Clasificación de la calidad del macizo y Valoración del RMR de Bieniawski, respecto al RQD.

RQD (%)	Calidad de la Roca	Puntaje RMR 89
< 25	Muy Mala	3
25 - 50	Mala	8
50 - 75	Regular	13
75 - 90	Buena	17
90 - 100	Excelente	20

(González de Vallejo, 2002).

Espaciado de las juntas (3). El término juntas ase refiere a las discontinuidades estructurales: fallas, diaclasas, planos de estratificación, etc., y su espaciado es la distancia media entre los planos de discontinuidad de cada familia, es decir, de cada conjunto con las mismas características geomecánicas. Entre este parámetro y el RQD existe una relación clara. La resistencia del macizo rocoso se reduce al aumentar el número de juntas.

Tabla 7. Valoración del RMR de Bieniawski respecto al Espaciamiento de las Discontinuidades.

Descripción del Espaciamiento	Espaciado (mm)	Espaciado (cm)	Puntaje RMR 89
Muy Junto	< 60	<6	5
Junto	60 – 200	6 - 20	8
Moderadamente Junto	200 – 600	20 - 60	10
Separado	600 – 2 000	60 - 200	15
Muy Separado	>6 000	>200	20

(González de Vallejo, 2002).

Naturaleza de las juntas (4). Para describir el estado de las se utilizan los siguientes parámetros: Apertura entre los labios de la discontinuidad; Continuidad (dimensiones) de la junta según rumbo y buzamiento; Rugosidad de los labios; Resistencia de la roca en los labios de la discontinuidad; Relleno de la roca. Usualmente para la valoración respecto al RMR es posible asignar a las superficies de las discontinuidades alguna característica asociada a su forma y a su condición general en el intervalo de logeo o corrida.

Tabla 8. Valoración del RMR de Bieniawski respecto a la Condición de Fractura generalizada. (González de Vallejo, 2002).

Descripción	Valoración RMR 1989
Fracturas continuas. Relleno blando, suave > 5 mm de espesor, separación > 5 mm.	0
Fracturas continuas. Superficie con estrías de fricción o superficies pulidas con relleno blando < 5 mm ó separación de 1 a 5 mm.	10
Superficies ligeramente rugosas. Separación < 1 mm, paredes/caras de testigos roca altamente meteorizadas o alteradas	20
Superficies ligeramente rugosas. Separación < 1 mm, paredes/caras de testigos de roca dura a ligeramente alteradas.	25
Superficies muy rugosas, fracturas discontinuas o no continuas, sin separación, no meteorizadas o inalteradas (paredes de roca dura).	30

(González de Vallejo, 2002).

En ocasiones, se requiere de una mayor precisión en la definición de este parámetro, razón por la cual, la tabla a continuación, incluye un detalle de la valoración más estricta.

Tabla 9. Valoración del RMR de Bieniawski respecto a la Condición de Fractura Detallada.

Parámetro de Discontinuidad	Condición o Característica				
	Continuidad (m)	<1	1 - 3	3 - 10	10 - 20
Valoración	6	4	2	1	0
Apertura (mm)	0	<0.1	0.1 - 1	1 - 5	>5
Valoración	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Lisa o Suave	Pulida
Valoración	6	5	3	1	0
Condición de Relleno	Sin Relleno	Duro <5mm	Duro >5mm	Blando < 5mm	Blando >5mm
Valoración	6	4	2	2	0
Alteración	Fresca	Ligeramente Alterada	Moderadamente Alterada	Muy Alterada	Descompuesta
Valoración	6	5	3	1	0

(González de Vallejo, 2002).

Orientación de las discontinuidades (5). Presencia de agua. En un macizo rocoso diaclasado, el agua tiene mucha influencia en su comportamiento, debiendo estimarse el flujo en agua litros/min., cada 10 m de túnel. La descripción utilizada es la siguiente: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.

Tabla 10. Valoración del RMR de Bieniawski respecto a la Condición de Agua.

Descripción	Qw (lt/min)	Pw / S1	Puntaje RMR 89
Completamente Seca	0	0	15
Húmeda	<10	<0.1	10
Mojada	10 - 25	0.1 0.2	7
Goteo	25 - 125	0.2 – 0.5	4
Filtraciones	>125	>0.5	0

(González de Vallejo, 2002).

Por último, luego de dar las valoraciones para cada parámetro del RMR, se procede a sumar todos los puntajes, el puntaje acumulado será la valoración RMR para el macizo rocoso, además se procede a calificar y a nombrar por clases de acuerdo a la Tabla 11.

Tabla 11. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR de Bieniawski.

Calidad del Macizo	RMR	Clase	Cohesión	Angulo de rozamiento
Muy Buena	100 – 81	I	> 4 kg/cm ²	> 45 ^a
Buena	80 – 61	II	3 - 4 kg/cm ²	35 ^a – 45 ^a
Regular	60 – 41	III	2 - 3 kg/cm ²	25 ^a – 35 ^a
Mala	40 - 21	IV	1 - 2 kg/cm ²	15 ^a – 25 ^a
Muy mala	≤ 20	V	< 1 kg/cm ²	< 15 ^a

(González de Vallejo, 2002).

Clasificación GSI (Geological Strength Index)

Según Alejano & Ramírez (2004), la clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso y, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geomecánicas de las superficies de discontinuidad existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos. El GSI combina los dos aspectos fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos, es decir: su fracturación, o sea, el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades. Esta clasificación

fue expuesta por primera vez por Hoek et al., en 1992 y desarrollada posteriormente por Hoek (1994), Hoek et al. (1995) y Hoek y Brown (1997), pero en esta primera época su campo de aplicación se restringía a macizos rocosos relativamente resistentes y no incluía los macizos rocosos más débiles. En posteriores publicaciones de Hoek y Marinos (Hoek et al. 1998; Marinos y Hoek 2000, 2001 y 2005) se ha ampliado la clasificación GSI para abarcar un tipo más de macizos rocosos: los laminados y cizallados.

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
	MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
	CALIDAD DECRECIENTE DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES →				
 <p>INTACTO O MASIVO Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.</p>	90			N/A	N/A
 <p>FORMADO POR BLOQUES Macizo rocoso consistente en bloques cúbicos delimitados por tres familias de discontinuidades, con los bloques bien encajados.</p>	80				
 <p>FORMADO POR MUCHOS BLOQUES Macizo rocoso formado por bloques angulares de muchas caras delimitados por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero sólo parcialmente.</p>	70				
 <p>FORMADO POR MUCHOS BLOQUES, DISTORSIONADO Y BANDEADO Plegado con muchos bloques angulares formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Planos de estratificación o de esquistosidad persistentes.</p>	60				
 <p>DESINTEGRADO Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.</p>	50				
 <p>LAMINADO Y CIZALLADO Debido a la existencia de numerosos planos débiles muy próximos de esquistosidad o de cizalla, no existen bloques.</p>	40				
	30				
	20				
	10				
	N/A	N/A			

ENCAJE DECRECIENTE ENTRE LOS TROZOS DE ROCA ↓

Figura 10. Índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturados de acuerdo a Hoek y Marinos. (Alejano, 2004).

Condiciones de los Labios de las Discontinuidades

MUY BUENA: superficies muy rugosas y sanas

BUENA : superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y teñidas de óxido

MEDIA : superficies lisas y moderadamente meteorizadas y alteradas

MALA : superficies con espejos de falla y altamente meteorizadas, con rellenos de fragmentos angulares o con recubrimientos compactos.

MUY MALA : superficies con espejo de falla altamente meteorizada con recubrimientos o rellenos de arcillas blandas.

Al realizar la combinación de estos dos parámetros fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos, es decir su fracturación, o sea, el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades, nos proporciona una base práctica para describir un rango amplio de tipos de macizos rocosos.

Los valores varían desde 0 hasta 100; los valores más bajos corresponden a superficies muy alteradas, con arcilla blanda en las discontinuidades, con una estructura poco resistente debido a las formas redondas, y a la gran cantidad de fragmentación que sufre el macizo. Por el contrario, valores de GSI cercanos a 100, implican macizos de gran calidad, ya que significa una estructura marcada por una pequeña fragmentación en la que abundan las formas prismáticas y superficies rugosas sin alteración, Hoek (2000).

La Fig. 10, permite estimar el GSI a partir de datos geológicos. Cuando se considera que la resistencia al corte de las discontinuidades puede sufrir un deterioro como consecuencia de los cambios de humedad, si existe agua en las discontinuidades, debe atribuirse a la calidad de las superficies de las discontinuidades un grado inmediatamente inferior al que aparentemente poseen.

La clasificación GSI se basa en un comportamiento isótropo del macizo rocoso, es decir, independiente de la dirección de aplicación de las cargas. Por consiguiente, no es utilizable en aquellos macizos rocosos en los que, como en las pizarras, existe una dirección estructural dominante que controla, por su debilidad, la rotura del macizo rocoso; el macizo rocoso situado en la fila inferior de la Fig. 10, o sea, la sexta, no puede tener un comportamiento anisótropo ya que la diferencia de resistencias entre la roca y las discontinuidades es pequeña.

2.2.6. MÉTODOS DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

De acuerdo con Aguilar (1992), los requerimientos de diseño de estructuras importantes en áreas altamente sísmicas como la nuestra, implican un conocimiento adecuado del comportamiento dinámico de los depósitos de suelos. Esto involucra la exploración de estratos relativamente profundos y de sus respectivos parámetros dinámicos, para así poder determinar su respuesta ante solicitaciones sísmicas. En tal sentido, los métodos de exploración geofísica, tales como los ensayos de refracción sísmica, medición de ondas P y S en pozos (down-hole), medición de microtrepidaciones, entre otros, se han convertido en herramientas esenciales en los trabajos de exploración geotécnica de grandes y medianos proyectos de ingeniería.

2.2.6.1. Ensayo de Refracción Sísmica

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentra el de refracción sísmica. En este método se mide el tiempo de propagación de las ondas de cuerpo, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen de una serie de sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción sísmica. Como se aprecia en la Fig. 11, la refracción del frente de ondas provocado por la diferente rigidez de los materiales del subsuelo proporciona información sobre la conformación del terreno.

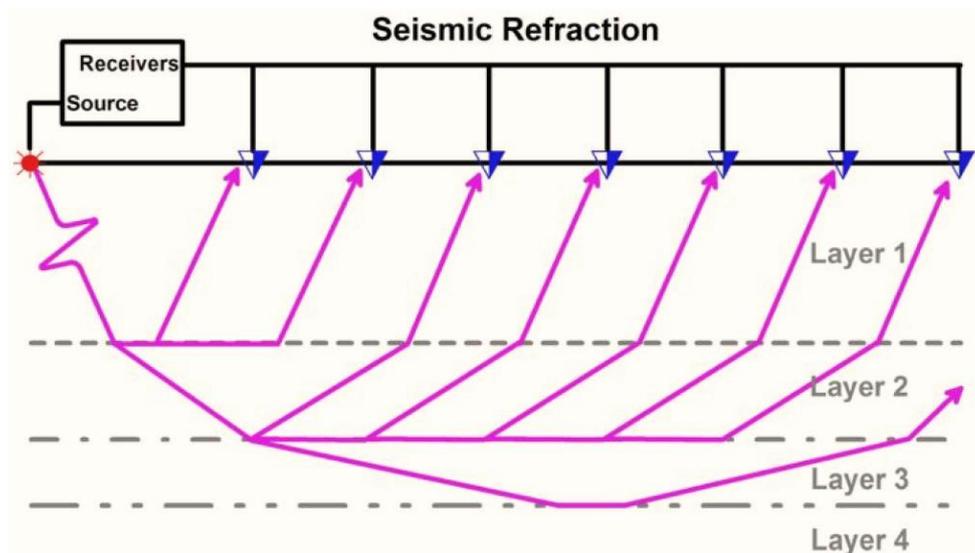


Figura 11. Distribución del tendido sísmico y refracción de ondas en estratos de diferente rigidez. (HJK Ingeniería, 2016).

La aplicación más común de la refracción sísmica en la ingeniería es para la determinación de la profundidad del basamento en los proyectos de construcción de represas y grandes hidroeléctricas, y para la determinación de las condiciones (meteorización, fracturamiento) y competencia de la roca en donde se asentarán las estructuras.

Como parte del procesamiento de las líneas de refracción sísmica, se construyen curvas tiempo-distancia también conocidas como dromocrónicas que se trazan a partir de los tiempos de llegada de las ondas P a cada uno de los geófonos y la distancia de cada geófono al punto de disparo (Fig. 12). Estas dromocrónicas son interpretadas en términos de la profundidad a interfaces entre capas de suelo y de las velocidades de propagación de la onda P en cada capa. Estas velocidades están controladas por los parámetros dinámicos del material.

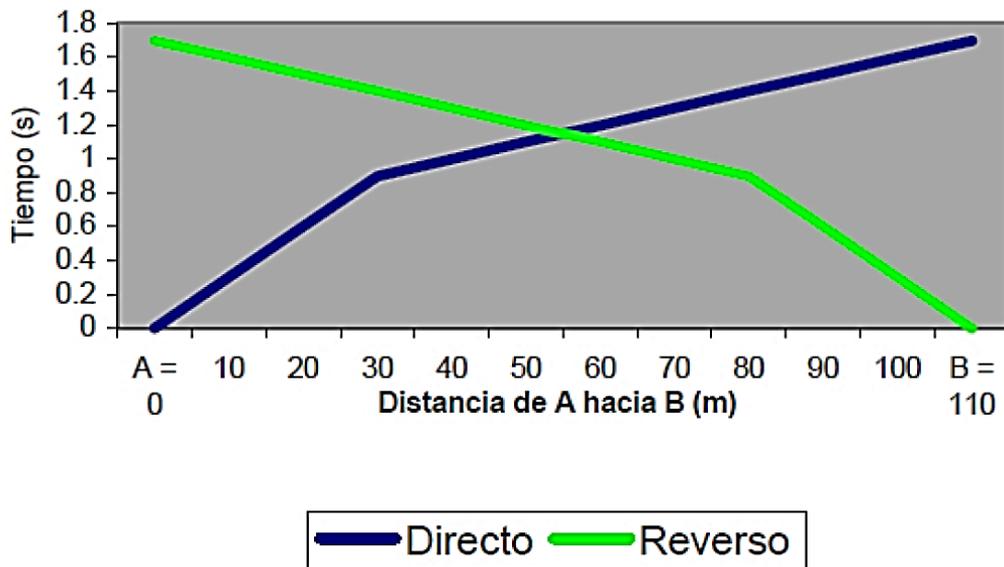


Figura 12. Dromocrónica para los disparos directo e inverso. (HJK Ingeniería, 2016).

Arce (2010), según sus experiencias durante las últimas cuatro décadas en los Andes latinoamericanos ha preparado un diagrama de referencia Fig. 13, para situaciones geológicas generales. La asignación de colores es arbitraria y es necesario adecuar la escala de colores a las condiciones propias de cada lugar investigado. Este diagrama no necesariamente es aplicable a situaciones particulares y se muestra solamente como referencia para compararlo con las características sísmicas y geológicas locales.

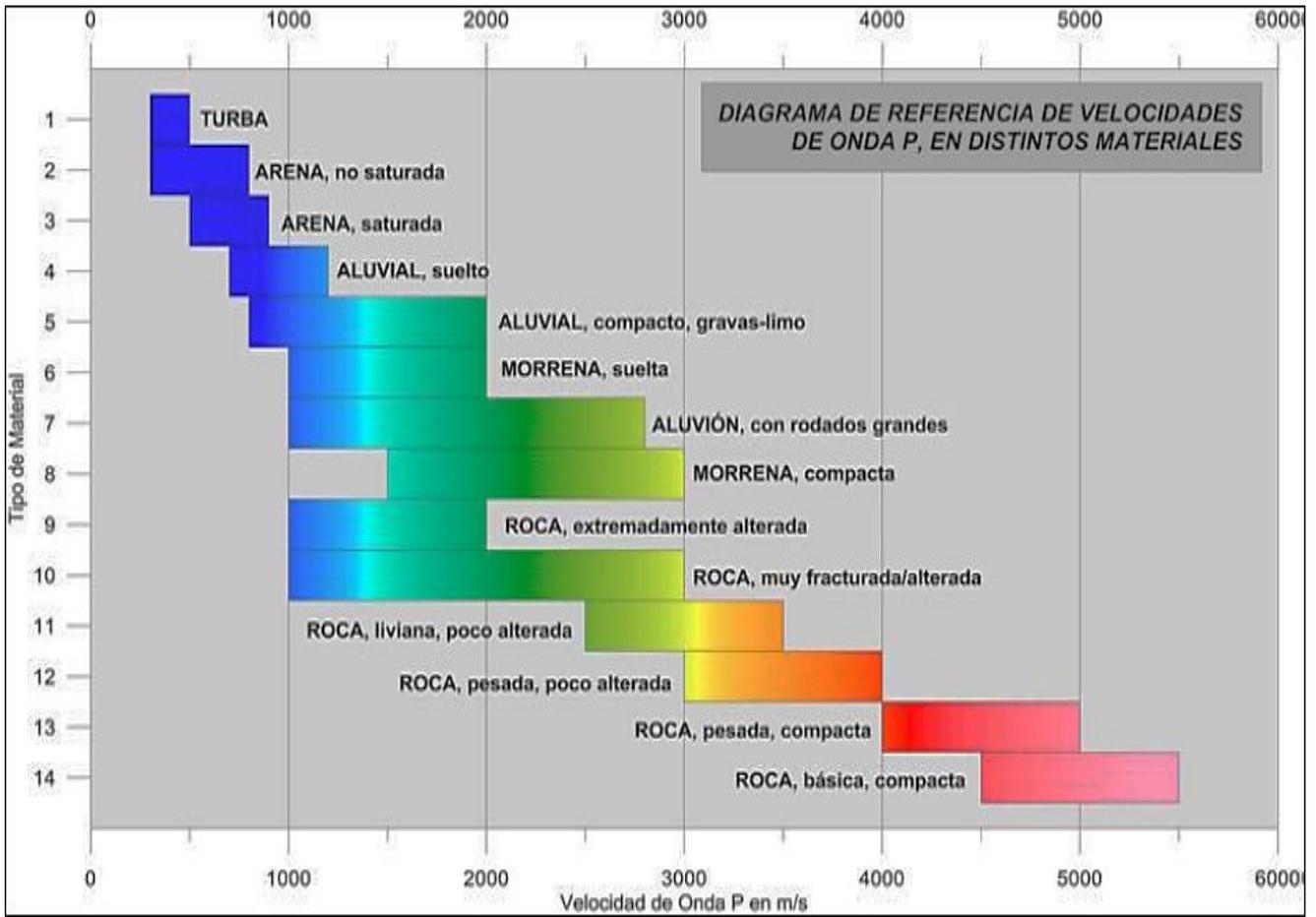


Figura 13. Interpretación general de tipos de materiales litológicos y sus velocidades de onda P. (Arce, 2010).

2.2.6.2. Ensayos MASW y MAM

Según J. Arce (2002), el método Multichannel Analysis of Surface Waves o Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) fue desarrollado entre 1999 y 2000 por los ingenieros y científicos del Kansas Geological Survey (KGS). Las técnicas de modelado han sido mejoradas desde entonces hasta obtener la precisión disponible en la actualidad, la cual es mayor que la de los registros convencionales tipo Down-Hole. Los investigadores del KGS pudieron determinar que las ondas de superficie tienen un componente principal de más de 98% de onda S y menos de 2% de onda P. La investigación también mostró que las ondas de superficie se atenúan a mayores frecuencias y con una disminución de velocidad de fase.

La técnica de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) es un método que analiza las propiedades de propagación de las ondas sísmicas superficiales (V_s), principalmente las Ondas de Rayleigh, las cuales se propagan horizontalmente desde la

fuente emisora hasta los geófonos receptores. En un medio estratificado, la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas de Rayleigh depende de la frecuencia. Esta propiedad se conoce como dispersión.

El método MAM o Análisis de Microtrépιδaciones en Arreglo Multicanal, consiste en monitorear vibraciones ambientales es decir utiliza como fuente el ruido ambiental, en arreglos predeterminados y mediante el análisis de dispersión de éstas, determinar el perfil de velocidades de ondas S. Este método fue desarrollado más tarde como método pasivo MASW, que utiliza 12 o más geófonos para aprovechar completamente las ventajas del registro y procesamiento multicanal (Park et al., 2007). Las bases teóricas del método son las mismas que los Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW). La diferencia del método (MASW) puede llegar a la máxima próxima profundidad de investigación, que suele ser de 20 a 30 m.

La combinación de los métodos MASW y MAM, permiten obtener perfiles de ondas S hasta profundidades promedio de 60 a 100 m. de penetración.

Tabla 12. Valores Típicos de Vp y Vs en Suelos Saturados.

TIPOS DE SUELOS	(gr/ cm³)	Vp (m/ seg)	Vs (m/ seg)
Suelo Superficial	1.2	250	90
Turba	1.2	250	90
Ceniza Volcánica	1.6	1,100	170
Limo	1.6	1,150	210
Arcilla	1.6	1,330	350
Arena	1.6	1,760	450
Arena Fina	1.6	1,780	460
Arena Media	1.6	1,810	600
Arena Gruesa	1.6	1,700	300
Arena Marina	1.6	1,350	360
Grava	1.7	1,910	510
Grava Gruesa	1.8	2,250	650
Esquisto de barro, deposito o acarreo fluvial	1.7	1,750	550

(Aguilar, 1992).

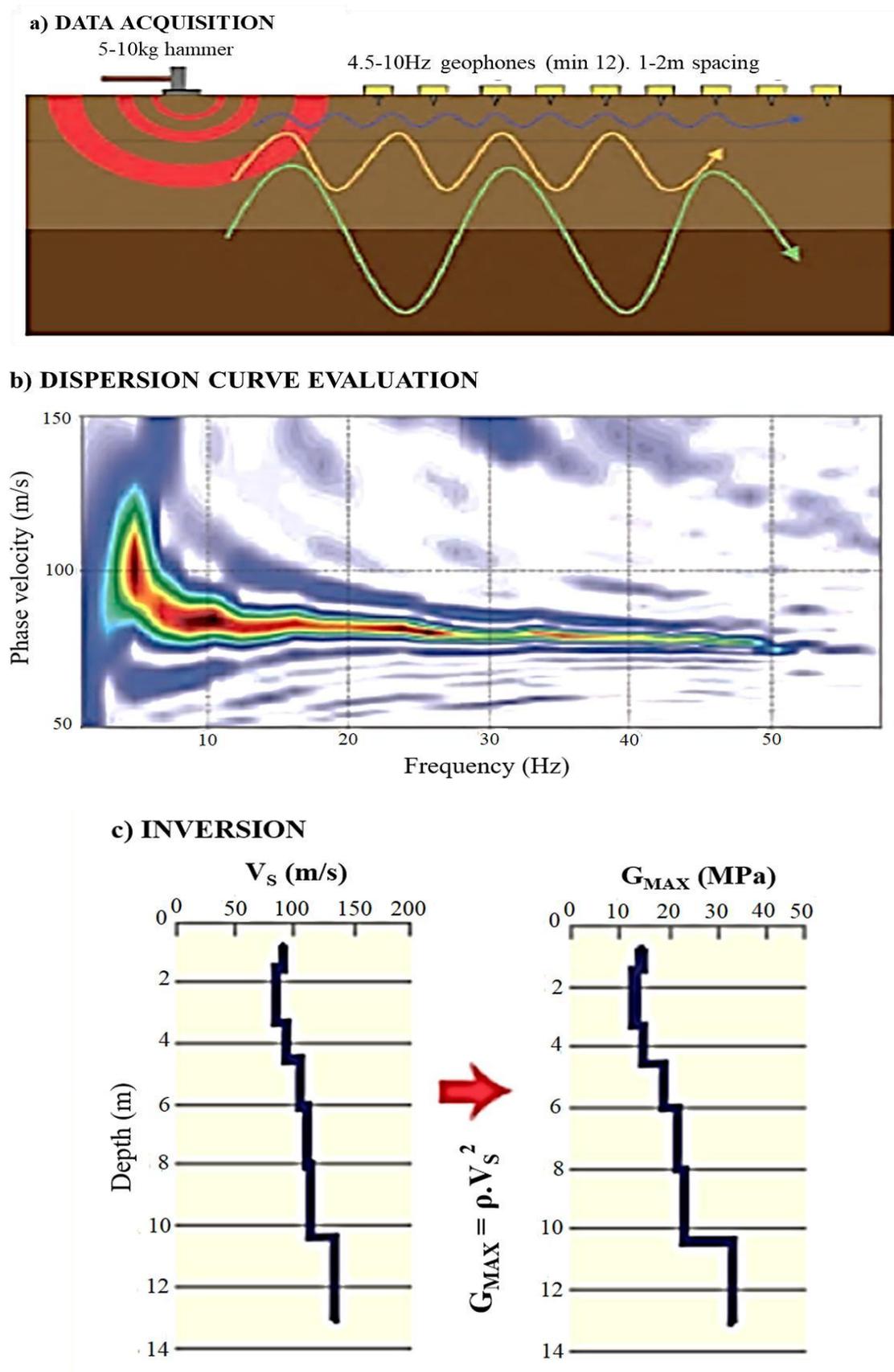


Figura 14. Esquema de distribución de la línea geofísica del ensayo MASW. (HJK Ingeniería, 2016).

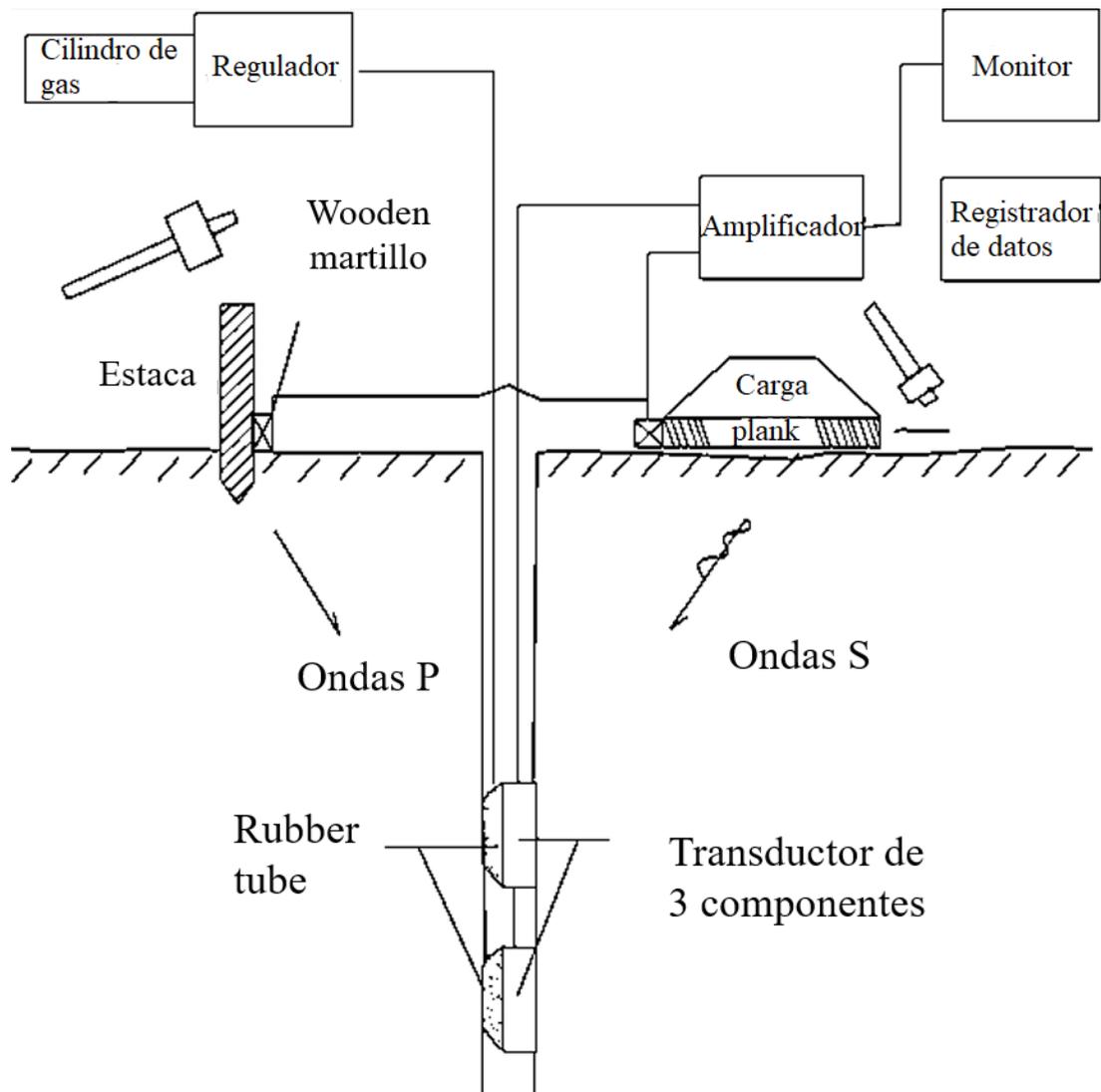


Figura 15. Esquema del Ensayo de Medición en Pozos de Ondas P y S. (Aguilar, 1992).

2.3.DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Suelo. Agregado natural de partículas minerales granulares y cohesivas, separables por medios mecánicos de baja energía o por agitación en agua (González de Vallejo 2002).

Roca. Agregado natural de partículas de uno o más minerales, con fuerte unión cohesiva permanente, que habitualmente se consideran un sistema continuo, la proporción de diferentes minerales, la estructura granular, la textura, y el origen sirven para su clasificación geológica (González, 2002).

Matriz rocosa. También denominada Roca Matriz o roca intacta; es el material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de roca intacta que quedan entre ellas. La matriz rocosa a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente queda

caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad (González de Vallejo 2002).

Discontinuidad. Cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que separa o independiza los bloques de la matriz rocosa en un macizo rocoso, con una resistencia a la tracción nula o muy baja. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte o, en su caso, por la del material de relleno. (González de Vallejo, 2002).

Macizo rocoso. Conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico. (González de Vallejo, 2002).

Caracterización. Es un tipo de descripción cualitativa que puede recurrir a datos o a lo cuantitativo con el fin de profundizar el conocimiento sobre algo. Para cualificar ese algo previamente se deben identificar y organizar los datos; y a partir de ellos, describir (caracterizar) de una forma estructurada; y posteriormente, establecer su significado. (Sánchez, 2010).

Muestra Alterada e Inalterada. La primera corresponde a un espécimen con su estructura disturbada. La segunda se basa en la calificación de valor relativo, para un espécimen de suelo tomado con herramientas apropiadas, retirado del terreno con el cuidado debido, transportado, conservado y llevado al aparato de ensayo, de manera que pueda considerarse que las propiedades del suelo natural, a conocer, no se han modificado de manera significativa. (Duque, Escobar, 2000).

Estudios de Evaluación Geotécnica. En el nivel de detalle es necesario emplear un mínimo de prospecciones para definir la estratigrafía del terreno y determinar sus propiedades geotécnicas. Al tratarse de áreas grandes, razones económicas obligan a limitarse el número de reconocimientos pero, al mismo tiempo, se requiere un encuadre geológico adecuado para situarlos correctamente y sacar el máximo partido de la información obtenida. (Rodríguez et. al, 1980).

Factores Geológicos y Problemas Geotécnicos. Los Factores Geológicos condicionan técnica o económicamente la obra. Estos son la causa de la mayoría de los problemas geotécnicos. Por ejemplo, el agua es uno de los factores de mayor incidencia en el comportamiento geotécnico de los materiales, sobre el medio físico. (González de Vallejo, 2002).

Técnicas de reconocimiento del terreno. La prospección del terreno se puede realizar utilizando una o varias técnicas, de modo que se consigan los objetivos propuestos. Tales ensayos comprenden: pozos, sondeos mecánicos o manuales, pruebas de penetración dinámica o estática, métodos geofísicos y pruebas in situ. (Rodríguez et. al, 1980).

Pruebas in situ. Cuando la información no es suficiente se pueden realizar aquellas pruebas in situ necesarias para determinar adecuadamente las propiedades del terreno. Por ejemplo: ensayos de carga con placa, útiles para establecer la deformabilidad y capacidad portante de suelos del terreno; pruebas de carga de terrenos blandos; ensayos sobre prototipos de cimentaciones; pruebas de permeabilidad, etc., etc., etc.; a través de la toma de muestras representativas. (Rodríguez et. al, 1980).

Sondeos Exploratorios. Es el método más satisfactorio para conocer las condiciones del subsuelo, ya que consiste en excavar un pozo de dimensiones suficientes para examinar los diferentes estratos de suelo en su estado natural, así como darse cuenta de las condiciones precisas referentes al agua contenida en el suelo. Teniendo en cuenta el cuidado de los criterios para distinguir las muestras in situ. (Juárez & Rico, 2005).

Ensayos de laboratorio. Con las muestras procedentes de la prospección geotécnica se realizan los ensayos de laboratorio, los cuales, según la finalidad del estudio, pueden ser: ensayos de clasificación e identificación, ensayos de resistencia, ensayos de deformabilidad entre otros, que van a permitir determinar propiedades como: la densificación, grado de compactación, etc., etc., etc. (Rodríguez et. al, 1980).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.UBICACIÓN

Se sitúa dentro de la jurisdicción de CIA. Minera Coimolache, cuyas operaciones en el lugar se realizan bajo la concesión del proyecto con el mismo nombre, Ciénaga Norte. El proyecto contempla la construcción del Pad de lixiviación y sistema de Pozas (Control, monitoreo, sedimentación y mayores eventos).

El desarrollo de la investigación se centra únicamente, en la descripción de las características geotécnicas del suelo y roca, para el diseño y construcción de un sistema de pozas, cuya función será el control de sedimentos, con capacidades que oscilan desde los 250 m³ hasta los 100000 m³, ubicadas en el flanco norte del cerro Quinuillas, a 1,0 km al suroeste del Tajo Ciénaga Norte.

3.1.1. GEOGRÁFICA

La zona presenta un relieve variado y responde a una morfogénesis glaciár, destacando colinas alargadas coronadas de cimas rocosas, y valles amplios en cuyas cabeceras se emplazan pequeñas lagunas. Geográficamente está enmarcada en los siguientes vértices a una altitud promedio de 3 800 msnm:

Tabla 13. Coordenada UTM de la zona de investigación. DATUM WGS84.

COORDENADAS			
Vértice	Este	Norte	Cota
1	753000	9254500	3786
2	754000	9254500	3886
3	753000	9253500	3865
4	754000	9253500	3940

3.1.2. POLÍTICA

El área donde se desarrolló la investigación, se recolectó la información y se efectuaron los análisis de campo tanto como la toma de muestras para los ensayos de laboratorio comprende la zona de Ciénega Norte, la cual se encuentra entre el distrito de Chugur y Hualgayóc, provincia de Hualgayóc (ver plano N°1), además está ubicada en el flanco oriental de la Cordillera Occidental del norte del Perú. Políticamente pertenece:

Región: Cajamarca

Departamento: Cajamarca

Provincia: Hualgayóc

Distrito: Hualgayóc y Chugur

Caseríos: Chéncho, Ramírez

3.1.3. ACCESIBILIDAD

El acceso a la zona de investigación por vía Terrestre desde la ciudad de Lima, es relativamente fácil se realiza a través de la Carretera Panamericana norte hasta la ciudad de Cajamarca, desde donde se toma una carretera asfaltada - afirmada para llegar a la zona de trabajo con un recorrido total de 1,006.0 Km.

El poblado más cercano y representativo a la zona de investigación es el Caserío de Ramírez perteneciente al distrito de Chugur, ubicado aproximadamente a 13 Km. de distancia, en línea recta. Otros Centros Poblados cercanos son: La Colpa, Chéncho, Perlamayo, Tambillo Bajo pertenecientes al distrito de Chugur respectivamente (Ver plano N° 2). En el área no se han identificado zonas arqueológicas.

Por lo mencionado anteriormente el acceso a la zona de estudio se da principalmente en carro (combis, camionetas, ómnibus) y a través de las siguientes rutas:

Tabla 14. Vías de acceso Principal al área de Ciénega Norte.

TRAMO	TIPO DE VÍAS DE ACCESO	DISTANCIA (Km)	TIEMPO (Hr)
Cajamarca – Ciénega Norte	Asfaltada - Afirmada	77.9	2.20
Hualgayóc – Ciénega Norte	Asfaltada – Afirmada	20	0.35

3.1.3.1.Clima

El área de investigación se localiza en una región comprendida en las zonas climático ecológicas Páramo muy húmedo-Subalpino Tropical (pmh-SaT) y Páramo pluvial - Subalpino tropical (pp-SaT)) según la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge; donde la mayor parte de la precipitación ocurre entre octubre a marzo, con una temperatura promedio de 7.6 °C. La precipitación anual es de 1,336 mm y la humedad relativa es de 71%. La zona se encuentra sobre una altitud comprendida entre los 3,750 y 4,000 msnm, en un sitio donde los vientos desarrollan una velocidad promedio de 15 km/h. Para estimar las condiciones meteorológicas se ha considerado la información regional de la estación meteorológica del SENAMHI ubicada en el distrito de Hualgayóc, por ser la más cercana. Para definir las precipitaciones en el área de estudio, los registros de Hualgayóc fueron escalados en proporción a la variación orográfica regional de las precipitaciones promedios anuales del 2008.

Tabla 15. Cuadro Precipitación Mensual.

Mes	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínima (mm)	Máxima (mm)	% Anual
Enero	142	48.9	0.3	75	283	10.6
Febrero	164	53.2	0.3	71	275	12.3
Marzo	187	74.7	0.4	67	374	14
Abril	135	41.3	0.3	69	242	10.1
Mayo	81	34.8	0.4	11	140	6.1
Junio	40	26.3	0.7	0	93	3
Julio	30	19.7	0.7	2	86	2.2
Agosto	37	25.5	0.7	0	103	2.8
Septiembre	84	40.3	0.5	22	201	6.3
Octubre	155	56.4	0.4	38	307	11.6
Noviembre	135	53.2	0.4	56	280	10.1
Diciembre	146	44.2	0.3	42	217	10.9
Anual	1336	170.1	0.1	449	2603	100

(SENAMHI, 2008).



Foto 1. Nubosidad muy densa característica del clima en la zona de estudio.

3.1.3.2. Vegetación

Según ONERN, 1976 e INRENA, 1995 y mediante evaluaciones de campo posteriores, se determinó que el área de estudio ocupa la zona de vida correspondiente a Páramo muy húmedo Subalpino Tropical (pmh-SaT). En esta zona de vida, la biotemperatura media anual máxima es de 6 °C y la media anual mínima de 3,8 °C, el promedio máximo de precipitación total por año según ONERN es de 1 254,8 mm y el promedio mínimo de 584,2 mm. La vegetación predominante es el pajonal de puna que se encuentra principalmente sobre los 3 800 y hasta los 4 500 m de altitud. Las especies con mayor número son: Asteraceae, Poaceae y Cyperaceae. Con respecto a la abundancia de individuos, las familias con mayor número de individuos son: Poaceae, Asteraceae, existe además presencia de Juncáceas que se encuentran generalmente en áreas donde la pendiente es poco pronunciada y suelos poco profundos.



Foto 2. La vegetación típica es el pajonal de Puna o Ichu que se extiende en toda la zona.

3.1.3.3. Geomorfología

El área de estudio forma parte de una extensa ladera de relieve irregular, que se ubica entre el Alineamiento de Cerros Quihuillas y Ciénaga Sur, rasgo topográfico más saltante, y la confluencia de pequeños cursos que forman la quebrada Campos, valle de origen glaciar. Hacia el norte se presenta la Laguna Campos, pequeño cuerpo de agua.

La ladera que comprende el área de estudio, puede diferenciarse a su vez de acuerdo a su pendiente general y geoformas locales predominantes, en ladera de moderada a fuerte pendiente, donde destacan colinas rocosas alineadas, pequeñas depresiones, rellenadas; y ladera de baja a moderada pendiente, donde predomina la presencia de pajonal inundado que bordean pequeñas colinas rocosas aisladas (ver plano N° 3).

Tabla 16. Clasificación de pendientes.

PENDIENTE	TIPO
0 - 15	Baja
15 - 30	Moderada
30 - 45	Moderada - alta
45 - 60	Alta
60 - 90	Muy Alta

(Borkoswki, 1994).

A continuación se describen las geoformas diferenciadas:

Valle Glaciar. Representado por las escorrentías de origen glaciar que dan lugar a la laguna Campos; se caracteriza por tener flancos asimétricos, de pendiente moderada a suave, ligeramente disectadas, fondo amplio, donde se emplaza un extenso bofedal. Los materiales que se exponen, están constituidos principalmente por suelos residuales, morrénicos y coluviales, donde resaltan pequeños afloramientos rocosos.



Foto 3. Valles de tipo glaciar ocasionados por la escorrentía de la laguna Campos y dan origen a suelos morrénicos.

Ladera de Fuerte Pendiente. Esta geoforma se extiende adyacente al alineamiento de cerros Ciénaga Sur y Quihuillas. Se caracteriza por la presencia de promontorios rocosos aislados, alargados, alineados, de rumbo E-O, separados por un incipiente drenaje que confluye en pequeñas depresiones. Los promontorios rocosos están conformados por rocas volcánicas tobáceas y domos phyricos, en parte muy alterados a suelos residuales, que resaltan sobre una cobertura de suelos coluviales y morrénicos que la bordea. Las pequeñas depresiones correspondientes a zonas de pajonal inundado colmatadas de suelos finos saturados.

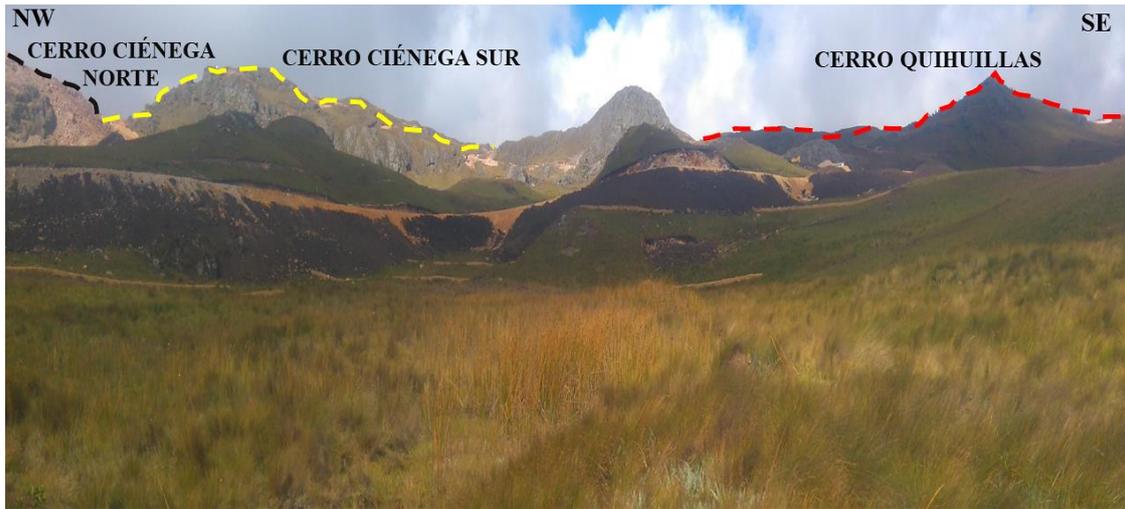


Foto 4. Cadenas de cerros con pendientes promedio de 85° . De tipo muy alta. (Borkoswki, 1994).

Ladera de Moderada a Baja Pendiente. Se distingue por su brusco cambio de pendiente y la presencia de extensas zonas de pajonal inundado que bordean pequeños promontorios rocosos aislados, alargados, alineados. Litológicamente presenta similares características que la anterior, aunque la cobertura coluvial y morrénica es mínima. Las zonas de pajonal inundado ocupan las quebradas, hondonadas, o laderas, estando conformados por suelos saturados con presencia de suelos orgánicos y turba.

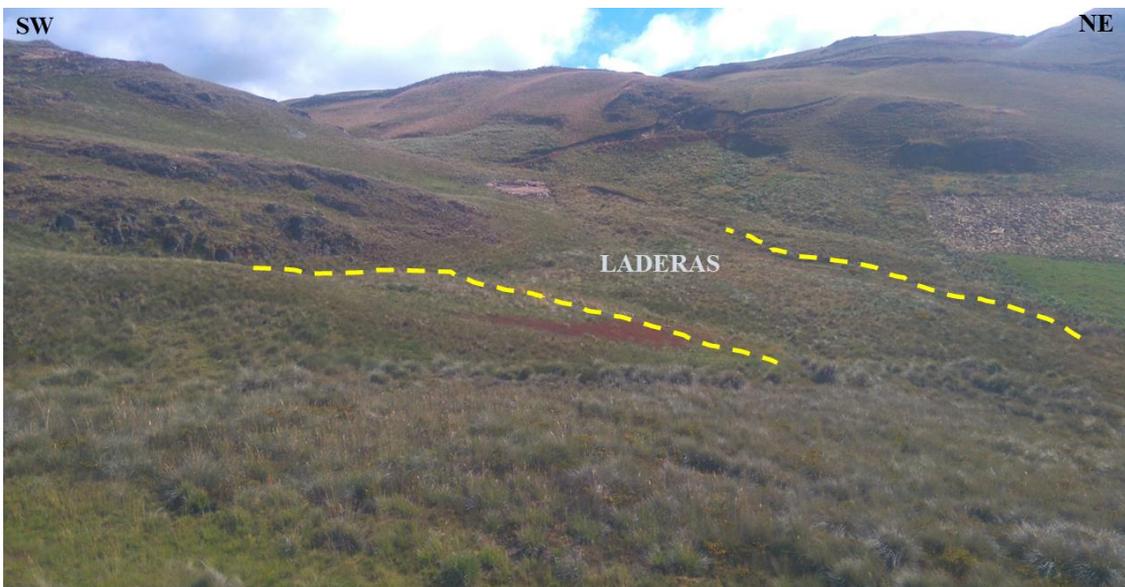


Foto 5. Ladera con pendiente moderada a baja, en promedio $30^\circ - 45^\circ$. (Borkoswki, 1994).

3.1.3.4.Hidrología

En setiembre del 2006, BISA elaboró un informe Hidrológico del Proyecto Tantauatay. La zona de investigación se caracteriza por presentar una precipitación irregular durante el año, lo que a su vez da lugar a una variación significativa de los caudales de las fuentes hídricas. De acuerdo a los registros de la estación Hualgayóc, considerada representativa de la zona, la precipitación se presenta principalmente entre los meses de octubre y abril; en los demás meses la precipitación es menor, sin ser nula; no obstante, se presentan meses con precipitación nula (ver plano N° 4).

El tipo de drenaje presente en el área, es el dendrítico y lo conforman: las quebradas Puente de la Hierba y Tres Amigos, las que limitan con la quebrada Río Colorado. Las dos primeras quebradas confluyen y forman el río Tingo, tributario del río Llaucano el que pertenece a la vertiente del Atlántico. La quebrada Río Colorado desemboca finalmente al río Chancay – Lambayeque de la vertiente del Pacífico. Estas escorrentías dan lugar a la microcuenca Tantauatay. Es notoria también la presencia de lagunas de tipo glaciario como la Laguna Campos.

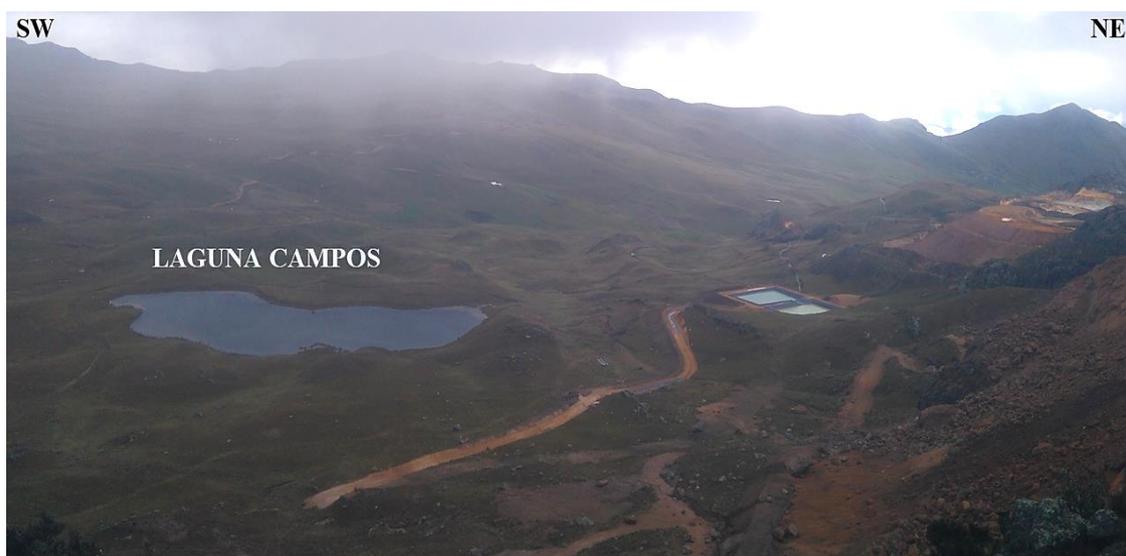
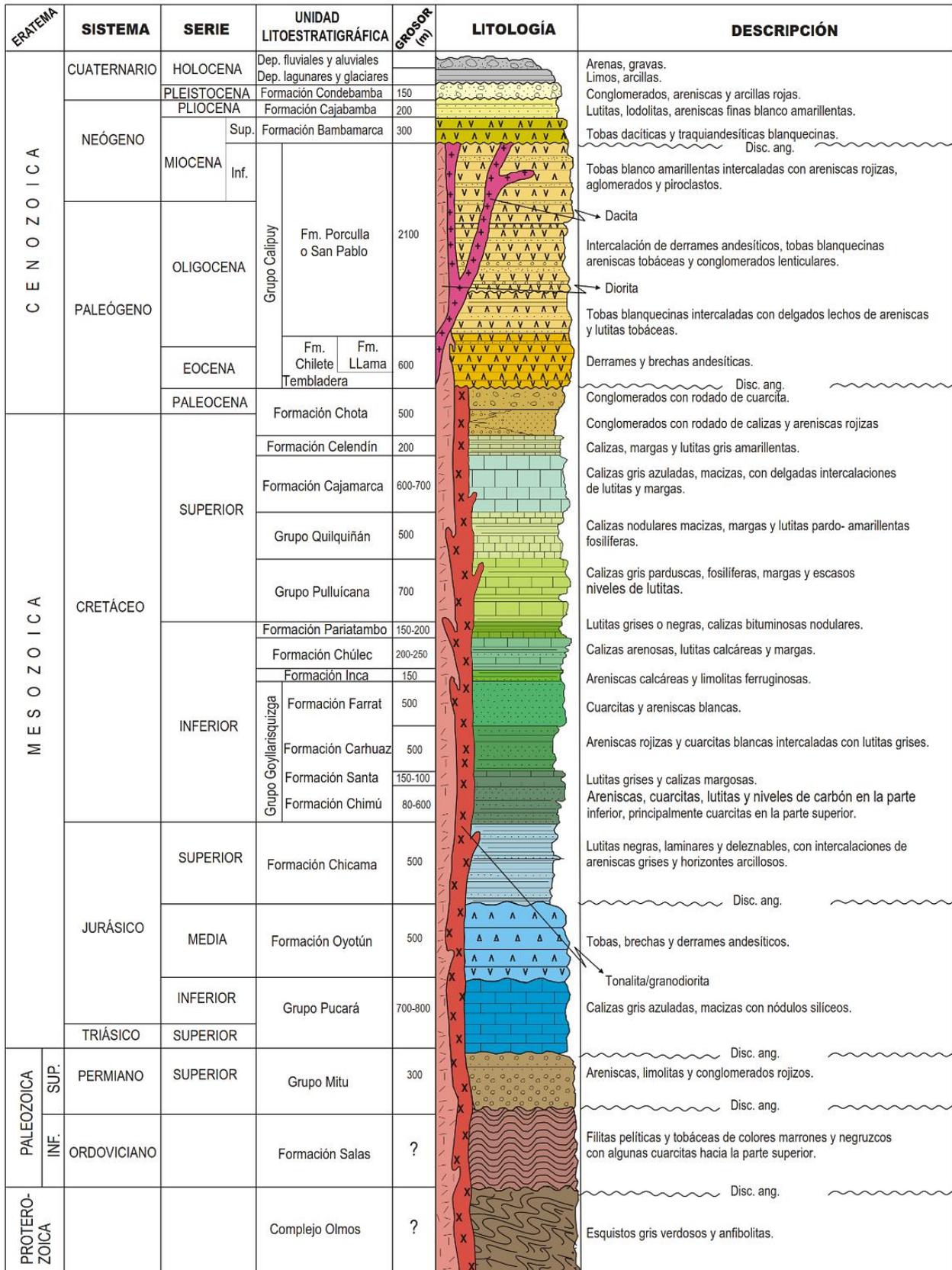


Foto 6. Según el ambiente de formación glaciario, se originó la Laguna Campos, que condiciona el tipo de materiales existentes en la zona de estudio.

3.1.3.5. Geología



(Modificado de Ingemmet, 1980)

Figura 16. Columna estratigráfica de la región olmos – Trujillo. (Herrera, 2012).

Geología Local

La columna estratigráfica del área de investigación comprende principalmente secuencias volcánicas y volcanoclásticas del grupo Calipuy de edad Miocena, y sobreyaciendo depósitos cuaternarios conformados por materiales morrénicos, y coluviales (ver plano N° 5).

Grupo Calipuy. Volcánico Calipuy (Cossio, 1964), es el producto de un vulcanismo post-tectónico en la región cordillerana y representan el magmatismo efusivo que siguió al emplazamiento definitivo del batolito costanero. Generalmente, la disposición de esta serie vulcano-clástica ha sido subterránea y de gran extensión. La deposición volcánica se presenta en forma continua, con algunos periodos de inactividad. El Grupo Calipuy descansa en discordancia angular sobre la secuencia Cretácea.

El basamento rocoso sobre el que se emplaza el área de estudio consiste principalmente de tobas andesíticas y rocas andesíticas del Domo Phyrico que se extiende ampliamente hacia el sur; siendo cortados a su vez por diques tardíos de andesitas y brechas. Estas rocas se presentan en general moderada a fuertemente fracturadas, mayormente alterados y argilizados, conformando suelos residuales de espesor variable. En parte se presenta silicificada.



Foto 7. Alteración Argílica presente en Tobas Andesíticas en los flancos de la zona de investigación, asociado a pequeños afloramientos.



Foto 8. Rocas Andesíticas características por su textura y presencia de plagioclasas.

Depósitos Cuaternarios. Estos depósitos se encuentran en diferentes lugares y niveles, dispuestos en bancos sub-horizontales constituidos por sedimentos finos, arenarcillosos, a los que algunas veces se intercalan lentes de grava y bancos delgados de conglomerados.

Sobreyaciendo a las rocas del Grupo Calipuy en el área de estudio, se presentan depósitos recientes poco o nada consolidados, conformados principalmente por acumulaciones morrénicas y coluviales;

Depósitos morrénicos, consiste de grava arcillosa, arcilla arenosa a gravosa, de clastos subangulosos, y bolonería aislada; con espesores estimados que hasta 5,0 m.

Depósitos coluviales, se extienden ampliamente en la zona, estando asociados a los afloramientos rocosos existentes. Está conformado por de grava pobremente gradada, grava arcillosa, arena limosa y arcilla arenosa a limosa, con gravas angulosas, y bolonería aislada; con espesores estimados de hasta 5,0 m.



Foto 9. Depósitos Cuaternarios de tipo morrénico a manera de bofedales inundados.

3.1.3.6. Geología Estructural

Los rasgos estructurales delineados en el área de estudio, corresponden a fallas locales que conforman dos sistemas principales, el primero de rumbo andino NO-SE asociado a fallas regionales que limitan el corredor estructural San Pablo-Porculla, encontrándose afectado a su vez por fallas transversales de rumbo predominante NE-SO el segundo. Se han asociado además pequeños sistemas de fallas de rumbo NO-SE. (AUSENCO, 2014). En el plano N° 10, se presentan algunas fallas inferidas las cuales están cubiertas por la vegetación de la zona.



Foto 10. Familias de fracturas con orientaciones NO-SE.



Foto 11. Presencia de cuarzo en vetillas, rellenando algunas fracturas en tobas Andesíticas de importante potencia.

3.2.PROCEDIMIENTOS

Para la realización del estudio se consideraron tres aspectos que fueron dos etapas de Gabinete (preliminar y final) y una de Campo. La etapa preliminar de gabinete representó una de las más importantes en la ejecución del proceso, debido a que con la información necesaria, como punto de partida, la investigación, pudo llevarse a cabo y cumplir con los objetivos propuestos; para la etapa de campo se contó con instrumentos y técnicas que han permitido realizar la toma de datos, los cuales sirvieron para la obtención de buenos resultados y dar una buena interpretación. La duración del proyecto de investigación fue un aproximado de 7 meses (Mayo 2016 – Noviembre 2016), la cual se desarrolló en base a tres etapas:

Etapa Preliminar de Gabinete. Esta etapa involucró la búsqueda, obtención y revisión de informes anteriores así como libros sobre: geotecnia, geología, geología estructural, hidrogeología, mecánica de rocas y suelos, ensayos de laboratorio, etc.; antes de la primera salida a campo. Además se procedió a la elaboración y obtención de imágenes satelitales, planos topográficos y planos geológicos, los cuales se procesaron en softwares como el GIS y AutoCAD a escalas 1/5000, 1/10000, 1/15000.

Etapa de Campo. En esta etapa se procedió al reconocimiento general de la zona de estudio en la primera salida, procediéndose en posteriores visitas a la toma de muestras de suelo y roca, para su análisis en campo como para los ensayos de laboratorio. Se reconocieron las Formaciones geológicas presentes, además se realizó la toma de datos,

identificación y determinación de unidades geotécnicas, con la finalidad de realizar un registro y cartografiado geológico; se reconocieron, describieron unidades geomorfológicas; se realizaron estaciones geomecánicas para determinar las características del macizo rocoso, a través del sistema RMR; por último se llevaron a cabo las investigaciones geotécnicas, a modo de registros, con la ayuda de instrumentos para la determinación de las propiedades del suelo y roca con la finalidad del diseño y construcción del sistema de pozas de sedimentación. También se procedió a la toma de coordenadas para el cual se utilizó el GPS Garmín en el sistema UTM. Datum: WGS 84 y PSAD 56.

Etapa Final de Gabinete. Posteriormente a las salidas de campo se realizó una etapa de gabinete, en donde se procedió a filtrar la información recopilada, así como al análisis de los resultados de los ensayos de laboratorio y pruebas realizadas en campo, para el suelo y roca. Se procesaron los valores obtenidos de las estaciones geomecánicas, de acuerdo a la data recopilada en campo. Todo ello para establecer la respectiva interpretación y caracterización geotécnica de la zona de investigación. Los resultados obtenidos se cuantificaron y registraron a modo de cuadros o tablas, donde se han considerado los factores más importantes y descriptivos para cada tipo de material y análisis efectuado. Se elaboraron asimismo planos geológicos, topográficos, perfiles geológicos, etc. como producto del cartografiado y la toma de datos. También se procedió al análisis de algunas muestras recolectadas en campo, además del procesamiento de fotos tomadas y análisis de planos geológicos-geotécnicos. Cabe destacar que los datos obtenidos en campo son procesados en Excel con el fin de guardar orden en dichos datos, y para la elaboración de los planos se usó ArcGis 10.3 y AutoCAD 2014.

3.2.1. METODOLOGÍA

El problema investigado tiene características descriptivas, comparativas, explicativas. Los métodos de investigación serán: Descriptivo, analítico, comparativo, deductivo y explicativo.

3.2.1.1.Descriptivo

La investigación es descriptiva ya que según las evaluaciones, cálculos y parámetros determinados en campo así como los ensayos de laboratorio realizados servirán para describir la Geotecnia, Geología, Geomorfología, Hidrogeología, Hidrología.

3.2.1.2. Analítico

La investigación es analítica porque a partir de las muestras recopiladas y los ensayos efectuados en el campo y laboratorio sobre suelo-roca, permite realizar la interpretación de las características del terreno, así como la determinación de las unidades geotécnicas.

3.2.1.3. Comparativo

La investigación es comparativa porque de acuerdo a los resultados obtenidos se podrá relacionar las características geotécnicas del suelo y roca, en diferentes puntos de muestreo.

3.2.1.4. Deductivo

La investigación es deductiva porque gracias a los ensayos de campo y laboratorio sobre suelo-roca se podrán determinar las características geotécnicas del terreno.

3.2.1.5. Explicativo

La investigación es explicativa porque a partir de las condiciones naturales de la zona estudio permitirá dar a conocer cuáles son las características del suelo y el macizo rocoso para el emplazamiento del sistema de pozas de sedimentación.

3.2.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES

A continuación se presentan las Variables Dependientes e Independientes consideradas en la investigación.

Tabla 17. Definición de Variables.

VARIABLE DEPENDIENTE (Efecto)	VARIABLE INDEPENDIENTE (Causa)
Factores Geológicos	Geomecánica
Cuantificación, cualificación de las propiedades del suelo y roca aplicando ensayos de campo y laboratorio.	Caracterización Geotécnica

3.2.3. TÉCNICAS

Consiste en procesar los datos (dispersos, desordenados, individuales) para generar como resultado (datos agrupados y ordenados), a partir de los cuales se realizará el análisis según los objetivos de hipótesis de la investigación realizada. (Hernández, 2003).

Las técnicas empleadas para el acopio de la información serán:

Toma de muestras in situ. Consiste en la recolección de muestras representativas tomadas en campo mediante calicatas y perforaciones para su análisis.

Cartografiado temático. Localización y cartografiado en campo de los parámetros geológicos condicionantes en la zona, por ejemplo: geológicos, geotécnicos, hidrológicos.

Análisis geotécnicos en Laboratorio. Por medio de la recolección de muestras se determinan en el laboratorio las características de los materiales.

Documentación por medio de tablas. Recopilación de la información geomecánica de las unidades geológicas a través de estaciones de muestreo.

3.2.4. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

Para la realización de trabajos en campo y gabinete se emplearon los siguientes instrumentos:

Plano Geológico (Escala: 1/2,000), coordenadas UTM WGS 84. Para identificar las formaciones geológicas y tipos de roca presentes.

GPS Navegatorio Garmin Mal 60 Cx. Instrumento utilizado para la obtención de las coordenadas en la ubicación de puntos.

Picota marca Estwing mango largo o martillo de Geólogo. Herramienta necesaria para extraer muestras de roca y probar su resistencia.

Brújula Brunton modelo 5006. Usado para la toma de datos sobre direcciones, discontinuidades y planos de estratificación en las estaciones geomecánicas efectuadas.

Laptop Lenovo de 4GB de memoria RAM. Instrumento utilizado para el procesamiento de los datos y redacción del informe.

Libretas de apuntes. Utilizado para llevar el control de ubicación y datos específicos de los ensayos realizados.

Rotuladores de muestras. Para identificar y codificar las muestras obtenidas.

Bolsas plásticas de muestreo. Usadas para guardar y transportar las muestras alteradas e inalteradas.

Cajas de madera. Para recopilar los testigos de perforación.

Lapiceros y lápices. Utilizado para anotaciones, codificados y cartografiados.

Cámara Canon Powershot sd 940 is, 12MP. Instrumento utilizado para el registro fotográfico.

Tablas geomecánicas, tablas de suelos y de registro. Utilizados como guías para la documentación de las propiedades de resistencia de los macizos rocosos e identificación de suelos.

Los equipos empleados para la investigación fueron:

Maquinaria (excavadora 336 D). Para la excavación de calicatas.

Equipos de perforación diamantina MLXG 001. Para realizar la extracción de los testigos, efectuar los análisis en roca y suelos.

Equipos de tamizado. Utilizados para los análisis granulométricos de suelos.

Equipos para sondeos geofísicos. Para determinar las cualidades y condiciones del subsuelo.

Los Softwares utilizados son los siguientes:

ArcGis vers. 10.3. empleado para el análisis de datos geográficos en el diseño, captura, almacenado, procesado en todas sus formas de la información georeferenciada, con el fin de elaborar los planos, geológico, topográfico, ubicación y acceso, entre otros.

AutoCAD vers. 2016. Para la elaboración de los planos a detalle de la zona de estudio.

Microsoft Office vers. 2013. Para registrar los datos de campo y posteriormente redactar el informe de investigación.

Adobe Acrobat Reader DC vers. 2017. Utilizado para visualizar los diferentes archivos, libros virtuales, pappers, artículos, publicaciones científicas que sirvieron como fundamento para realizar esta investigación.

Software Dips vers. 5.1 de Rocscience. Para evaluar las características del macizo rocoso.

Por último se emplearon ensayos de laboratorio donde se determinaron algunas características del suelo que no se logran conseguir en el campo, como la permeabilidad, cohesión, ángulo de fricción, plasticidad.

3.3.PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.3.1. GEOMECÁNICA

Las propiedades Geomecánicas de los materiales fueron obtenidas a partir de: Ensayos in situ, Ensayos de campo y Ensayos de laboratorio; los cuales fueron realizados en muestras representativas con el fin de determinar las características inherentes de los materiales (suelo-roca), bajo un estricto programa de investigación y cartografiado geológico-geotécnico

El tipo de análisis de los datos Geomecánicos es básicamente descriptivo/inferencial y tiene su fundamento principal en la observación.

Los parámetros, valores obtenidos por ensayo se presentan mediante tablas, cuadros, figuras, planos y se aprecian con mayor detalle en los anexos, respectivamente.

De esta manera para realizar la caracterización Geomecánica y establecer resultados, se utilizaron la suma de los resultados de las Pruebas in situ, que comprenden estaciones geomecánicas; Calicatas y Perforaciones, mediante las cuales se efectuaron ensayos de campo y además se recopilaron muestras para su análisis en el laboratorio. Pruebas de campo: ensayo de Penetración Dinámica Ligera (LDPT), para evaluar indirectamente la resistencia de los materiales en las zonas de pajonales húmedos; ensayos de Penetración Estándar “SPT y LPT”, tomados en cuenta para la obtención de parámetros de resistencia, el cual fue realizado durante las perforaciones; ensayos de permeabilidad tipo Lugeon - Lefranc para evaluar las propiedades hidráulicas de los materiales; ensayos geofísicos mediante los métodos de Refracción Sísmica y MASW/MAM para determinar, en forma indirecta la estratigrafía así como las principales características sísmicas del suelo. Por último Pruebas de laboratorio : Análisis granulométrico por tamizado, ensayos de Limite de Atterberg y Contenido de Humedad, que sirven para la identificación y clasificación de los suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); ensayos de Peso Volumétrico; ensayos de Compresión Triaxial No drenado para estimar los parámetros de resistencia cortante del suelo y ensayo de Carga Puntual para estimar los parámetros de resistencia compresiva de la roca, realizados correctamente en los laboratorios de mecánica de suelos, mecánica de rocas y químicos.

3.3.1.1. Pruebas In Situ

Estaciones Geomecánicas. Se realizaron cinco (05) estaciones geomecánicas en afloramientos rocosos representativos a fin de obtener los dominios estructurales en superficie.

El Plano N° 6, muestra la ubicación de las estaciones geomecánicas realizadas. Fueron un total de 5 estaciones geomecánicas caracterizadas usando el método de celdas de detalle, a fin de registrar las características geomecánicas del macizo rocoso, las propiedades de sus discontinuidades, y su posterior valoración mediante el sistema de clasificación del macizo rocoso RMR (Rock Mass Rating).

La información obtenida consistió en litología, RQD, dureza, así como algunas características de las discontinuidades, tal como su orientación espacial en términos de dirección de buzamiento-buzamiento y sus características (apertura, relleno, forma, rugosidad, espesor, espaciamiento y persistencia), presencia de agua, que en conjunto permiten definir un RMR básico.

En la Tabla 18, se muestra la ubicación, rumbo, litología, y características geomecánicas como dureza y clasificación RMR básico, en cada estación geomecánica. El registro de las estaciones geomecánicas se describe en el anexo 3.

Tabla 18. Estaciones Geomecánicas (coordenadas obtenidas con GPS navegador).

Estación	Coordenadas		Litología	Azimut/ Buz. (°)	Grado De Resistencia (*)	RMR (%)
	Norte	Este				
E – 01	9 254 818	753 946	Toba Andesítica	N284°/60°	R2.5 – R3	60
E – 02	9 254 760	753 843	Toba Andesítica	N183°/64°	R3	65
E – 03	9 254 497	753 703	Andesita	N180°/72°	R3	63
E – 04	9 254 439	753 592	Andesita	N105°/82°	R3	56
E – 05	9 254 441	753 548	Andesita	N190°/62°	R3	52

(AUSENCO, 2014).

La información obtenida de las estaciones geomecánicas realizadas ha sido utilizada para el análisis estereográfico de las discontinuidades medidas en campo, considerándose en conjunto las 5 estaciones, generándose el estereograma respectivo. Los datos de buzamiento y dirección de buzamiento fueron analizados usando el software Dips v5.1 de Rocscience. El análisis estereográfico fue usado para corroborar las familias de estructuras encontradas, y definir el dominio estructural. En la Tabla 19 se presentan las

orientaciones de las familias principales y secundarias encontradas en los afloramientos de la zona de estudio.

Tabla 19. Familias de Discontinuidades.

Familia	Dirección de Buzamiento (°)	Buzamiento (°)
P1	80	34
P2	175	74
P3	325	78
S1	212	60
S2	129	62

(AUSENCO, 2014).

Calicatas. Se ejecutaron un total de noventa (90) calicatas a cargo de AUSENCO (2014) convenientemente ubicadas, de las que se detallan treinta y nueve (39), las cuales se encuentran distribuidas dentro del área de interés, con la finalidad de evaluar las características y condiciones geotécnicas de los materiales de cimentación para la construcción de las pozas. En cada una de las calicatas se llevó a cabo una detallada descripción de los tipos de suelos encontrados. Asimismo, se tomaron muestras disturbadas, las cuales fueron identificadas y almacenadas en bolsas plásticas con la finalidad de efectuar ensayos posteriores de caracterización física y mecánica en el laboratorio geotécnico. Las calicatas fueron llevadas a cabo utilizando una excavadora modelo CAT 336. La Tabla 20 presenta un resumen de las calicatas realizadas. Como se puede observar la profundidad máxima alcanzada fue de 6,0 m. En muchas de ellas se alcanzó el nivel del basamento rocoso. En cada una de las calicatas se realizó el muestreo y registro detallado de los diferentes tipos de materiales existentes. En el plano N° 6, se presentan las ubicaciones de las calicatas y en el anexo 4 se describe su registro.

Tabla 20. Resumen de Calicatas. Abreviaturas: Df: Nivel de fundación propuesta; Prof: Profundidad; NE: No Encontrado; ND: No Determinado.

Código de Calicata	Coordenadas UTM		Nivel Agua (m)	Topsoil (m)	Df (m)	Nivel Roca (m)	Prof. Total (m)
	Norte	Este					
TP_CN14-01	9 254 546	753 748	NE	2,00	2,20	2,20	2,20
TP_CN14-02	9 254 504	753 750	NE	0,60	1,00	2,30	3,30
TP_CN14-03	9 254 507	753 789	NE	0,40	1,00	2,50	2,50
TP_CN14-04	9 254 490	753 842	NE	0,60	1,50	1,80	2,30

Código de Calicata	Coordenadas UTM		Nivel Agua (m)	Topsoil (m)	Df (m)	Nivel Roca (m)	Prof. Total (m)
	Norte	Este					
TP_CN14-05	9 254 468	753 910	NE	0,40	1,50	3,20	4,20
TP_CN14-06	9 254 431	753 883	NE	0,40	1,50	3,30	3,30
TP_CN14-07	9 254 417	753 961	NE	0,30	0,40	0,90	0,90
TP_CN14-08	9 254 399	753 998	2,40	0,90	3,90	NE	3,90
TP_CN14-09	9 254 390	753 967	3,70	0,50	3,90	NE	3,90
TP_CN14-10	9 254 409	753 910	2,80	1,00	2,80	2,80	3,20
TP_CN14-11	9 254 374	753 883	1,20	0,90	2,40	2,40	2,40
TP_CN14-12	9 254 385	753 880	NE	0,80	1,20	1,70	2,10
TP_CN14-13	9 254 455	753 789	1,40	1,20	1,40	1,40	1,60
TP_CN14-14	9 254 446	753 752	1,20	1,20	1,90	2,30	2,30
TP_CN14-15	9 254 451	753 715	NE	0,50	0,70	0,70	1,20
TP_CN14-16	9 254 432	753 701	1,70	1,00	2,00	3,00	3,70
TP_CN14-17	9 254 372	754 061	1,50	1,10	ND	NE	4,50
TP_CN14-18	9 254 316	754 060	1,50	1,00	ND	NE	5,50
TP_CN14-19	9 254 289	754 114	NE	0,50	2,30	2,30	2,30
TP_CN14-20	9 254 330	754 173	NE	0,90	2,00	3,30	3,30
TP_CN14-21	9 254 240	754 071	NE	0,40	1,20	NE	2,90
TP_CN14-22	9 254 252	753 998	NE	0,40	1,90	4,00	4,00
TP_CN14-23	9 254 238	753 935	NE	0,40	1,00	3,60	3,60
TP_CN14-24	9 254 303	753 948	NE	0,40	1,50	2,10	2,10
TP_CN14-25	9 254 197	753 979	NE	0,30	2,00	2,60	2,60
TP_CN14-26	9 254 171	753 939	NE	0,40	0,60	0,60	2,50
TP_CN14-27	9 254 101	753 906	NE	0,50	1,20	3,40	3,40
TP_CN14-28	9 254 122	753 986	NE	0,40	3,00	3,00	3,00
TP_CN14-29	9 254 153	753 868	NE	0,30	1,00	1,90	1,90
TP_CN14-30	9 254 210	753 852	NE	0,30	1,00	1,80	1,80
TP_CN14-31	9 254 204	753 792	NE	NE	2,80	NE	2,80
TP_CN14-32	9 254 269	753 816	NE	0,30	0,90	1,60	1,60
TP_CN14-33	9 254 299	753 756	NE	0,40	2,40	2,40	2,40
TP_CN14-34	9 254 266	753 724	NE	0,40	1,00	1,00	1,60
TP_CN14-35	9 254 527	753 664	NE	NE	0,10	0,00	0,10
TP_CN14-36	9 254 576	753 690	NE	NE	0,10	0,00	1,00
TP_CN14-37	9 254 597	753 670	NE	NE	0,10	0,00	1,80
TP_CN14-38	9 254 626	753 627	NE	NE	0,10	0,00	1,10
TP_CN14-39	9 254 561	753 660	NE	NE	0,10	0,00	0,10

(AUSENCO, 2014).

Perforaciones. Las perforaciones diamantinas fueron un total de nueve (09) verticales a cargo de Gold of Drilling S.A (2014), convenientemente ubicadas y distribuidas, con la finalidad de obtener la información necesaria para caracterizar los materiales y realizar la zonificación geotécnica. En el desarrollo del presente estudio de investigación solo se detallan seis (06).

En cada una de las perforaciones se llevó a cabo una detallada descripción de los tipos de suelos y roca encontrados. Asimismo, se realizó un registro geomecánico de los testigos de roca a fin de determinar la calidad y resistencia del macizo rocoso subyacente.

El plano N° 7, presenta la ubicación en planta de los puntos de perforación llevadas a cabo en este estudio. La Tabla 21 muestra un resumen de los datos recopilados mediante las perforaciones realizadas. El registro de perforaciones se describe en el anexo 5.

Tabla 21. Resumen de Perforaciones. Abreviaturas. Prof: Profundidad.

Código de Perforación	Coordenadas UTM		Nivel	Nivel	Prof.
	Norte	Este	Freático (m)	Roca (m)	Total (m)
DH - CN14 -01	9 254 307	753 456	Superficial	3,70	80,0
DH - CN14 -02	9 254 597	753 541	3,40	8,40	60,0
DH - CN14 -03	9 254 401	753 673	4,90	12,80	60,5
DH - CN14 -04	9 254 058	753 823	NE	1,90	90,0
DH - CN14 -05	9 254 324	753 914	20,60	1,75	40,0
DH - CN14 -06	9 254 502	753 716	5,10	1,50	30,0

(AUSENCO, 2014).

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las perforaciones realizadas en el área:

DH-CN14-01. Registra de 0,0 a 5,70 m de suelo orgánico y un horizonte de suelo residual, seguido hasta los 8,50 m de roca muy mala; le sigue hasta 80 m tobas andesíticas gris claras a gris verduzcas, grano fino a medio, muy alteradas, de dureza entre R2 a R3, poco fracturadas a muy fracturadas, con RQD de 0 a 70% hasta los 25 m, mejorando en profundidad; con calidad geomecánica de acuerdo a la valoración del índice RMR básico de regular a buena, con pequeños tramos de roca de calidad mala a muy mala asociada a zonas de intensa alteración. El nivel de agua fue registrado relativamente superficial.

DH-CN14-02. Registra de 0,0 a 10,60 m un delgado horizonte de suelo morrénico, seguido de suelo residual intercalado con pequeños tramos de roca de dureza R2. Le sigue hasta 60,0 m tobas andesíticas gris plomizas a gris verduzcas, en partes con piritita

diseminada, venillas de calcita, y clorita en juntas; poco alteradas a muy alteradas, de dureza entre R2 a R5, poco fracturadas a muy fracturadas, con RQD de 50% a 97% y pequeños tramos de 0 a 33%. La roca presenta en general calidad geomecánica regular, y pequeños tramos de roca mala a muy mala. El nivel de agua se ha registrado a la profundidad de 3,40 m.

DH-CN14-03. Registra de 0,0 a 12,80 m suelo residual, que mejora ligeramente a roca de dureza R1.5 hasta los 17,20 m. Le sigue hasta 33,70 m tobas andesíticas, con venillas de calcita y pirita diseminada, muy alteradas, de dureza entre R1.5 a R2.5, muy fracturadas, con juntas algo paralelos al eje del sondaje; con calidad geomecánica regular a mala; mejorando la calidad de roca a regular y buena hasta la profundidad final de 60,50 m. El nivel de agua fue registrado a la profundidad de 4,90 m.

DH-CN14-04. Registra de 0,0 a 8,80 m suelo residual intercalado con un tramo de roca de dureza R2, con calidad de roca muy mala a regular; le sigue hasta 35,10 m tobas andesíticas gris plomizas a rojizas por alteración, muy alteradas, en parte silicificadas con dureza R2 a R6, moderadamente fracturadas con pequeños tramos muy fracturados, con calidad geomecánica regular a muy buena. Hasta los 90,0 m, la roca se presenta muy alterada a intensamente alterada, con dureza R1 a R1.5 y pequeños tramos de R2; disminuyendo la calidad de roca a muy mala con pequeños tramos de roca mala a regular. No se ha reportado nivel de agua.

DH-CN14-05. Registra de 0,0 a 3,85 m suelo residual dureza R1 a R1.5; le sigue hasta 11,25 m tobas andesíticas muy alteradas, dureza 2, moderadamente fracturadas con tramos desintegrados, con calidad geomecánica regular a mala. Le sigue hasta los 17,25 m, un tramo de roca intensamente alterada a suelo residual, dureza R1 a R1.5, y calidad de roca muy mala.

En profundidad, hasta los 40,0 m, la roca está poco alterada a muy alterada, con dureza R2.5 a R5, poco a fuertemente fracturada, con calidad de roca buena a regular, y pequeños tramos de roca mala. El nivel de agua se ha registrado a la profundidad de 20,60 m.

DH-CN14-06. Registra de 0,0 a 30,0 m tobas andesíticas gris verdosas, grano fino a medio, poco alterada, dureza R5, moderadamente fracturadas, con pequeños tramos muy fracturados, RQD de 87 a 100%, juntas con óxidos, y fracturas paralelas al eje del sondaje; con calidad geomecánica buena a muy buena. El nivel de agua se ha registrado a la profundidad de 5,10 m.

3.3.1.2. Pruebas de Campo

Ensayo de Penetración Dinámica Ligera (LDPT). El ensayo de penetración dinámica ligera o LDPT (siglas en inglés) consiste en auscultar los suelos a través de una punta cónica de 60° unida a unas varillas de 1,0 m de largo y 35,6 mm de diámetro, a través del impacto de un martillo de 10 kg de peso, en el que se mide el número de golpes necesarios para penetrar cada 10 cm de profundidad (N10). Se utilizó este método de auscultación debido a la imposibilidad de la prospección directa a través de calicatas por la presencia de pajonales profundos.

Se ejecutaron un total de 26 ensayos LDPT en puntos convenientemente ubicados y distribuidos en el área (ver plano N° 8). La Tabla 22, resume las características de los ensayos realizados. El registro por ensayo LDPT se describe en el anexo 6.

Tabla 22. Resumen de Ensayos LDPT. Abreviaturas: Prof.: Profundidad.

LDPT	Coordenadas UTM		Prof. de Ensayo (m)
	Norte	Este	
LDPT_01	9 254 348	754 050	6,00
LDPT_02	9 254 387	754 033	4,10
LDPT_03	9 254 366	754 013	4,50
LDPT_04	9 254 354	753 976	3,0
LDPT_05	9 254 372	753 953	2,4
LDPT_06	9 254 380	753 934	4,60
LDPT_07	9 254 367	753 911	3,30
LDPT_08	9 254 346	753 920	4,80
LDPT_09	9 254 330	753 886	2,30
LDPT_10	9 254 288	753 897	4,60
LDPT_11	9 254 244	753 886	5,90
LDPT_12	9 254 236	753 855	2,50
LDPT_13	9 254 225	753 833	2,80
LDPT_14	9 254 296	753 858	4,40
LDPT_15	9 254 359	753 875	2,90
LDPT_16	9 254 371	753 849	1,40
LDPT_17	9 254 378	753 831	1,20
LDPT_18	9 254 401	753 770	2,80
LDPT_19	9 254 399	753 772	3,00
LDPT_20	9 254 417	753 727	2,10
LDPT_21	9 254 431	753 676	7,10
LDPT_22	9 254 413	753 649	3,60
LDPT_23	9 254 353	753 729	3,00
LDPT_24	9 254 324	753 756	2,90
LDPT_25	9 254 333	753 802	1,40
LDPT_26	9 254 157	753 795	4,30

(AUSENCO, 2014).

Ensayos de Penetración Estándar “SPT y LPT”. En las perforaciones diamantinas descritas y ejecutadas para evaluar las características y condiciones del suelo-roca de fundación se realizaron una serie de ensayos de penetración estándar SPT y ensayos de penetración a gran escala LPT, los que permitieron determinar de manera indirecta la

resistencia a la penetración en suelos profundos y al mismo tiempo obtener muestras disturbadas representativas para su identificación en laboratorio.

Para los suelos que contienen gravas y no permiten realizar el ensayo SPT, existe la posibilidad de realizar el ensayo LPT “Large Penetration Test”. Este ensayo se realiza de similar manera que el ensayo de penetración estándar o SPT, pero en este caso se usa un martillo de 300 lbs (136 kg), una cabeza de impacto de 36 cm de diámetro, barras NQ, cuchara partida y zapata de diámetro 2 7/8”. La Tabla 23 muestra los ensayos realizados en cada perforación. El registro SPT y LPT se describe en el anexo 7.

Tabla 23. Resumen de Ensayos de Penetración SPT/ LPT en Perforaciones. * Se encontró rechazo al realizar los ensayos de penetración. ** Valores de NSPT obtenidos a partir de correlaciones existentes con el ensayo LPT. Abreviaturas: SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Código de Perforación	Número de Ensayo	Tramo de Ensayo (m)	Tipo de Suelo (SUCS)	N _{LPT}	N _{SPT}	Consistencia/ Compacidad
DH_CN14-01	SPT-01	1,50 – 1,95	CL	-	13	Compacta
	SPT-02	3,00 – 3,95	CL	-	50	Dura
DH_CN14-02	LPT-01	3,00 – 3,45	SC	8	11**	Medianamente Densa
	LPT-02	6,00 – 6,45	SC	7	9**	Medianamente Densa
	LPT-03	9,00 – 9,45	SC	9	12**	Medianamente Densa
	LPT-04	12,00 – 12,45	SC	8	11**	Medianamente Densa
DH_CN14-03	SPT-01	1,90 – 2,35	CH	-	21	Muy Compacta
	SPT-02	3,00 – 3,45	CH	-	20	Muy Compacta
	SPT-03	4,50 – 4,95	CH	-	18	Muy Compacta
	SPT-04	6,50 – 6,95	CL	-	58	Dura
DH_CN14-04	SPT-01	1,20 – 1,65	CL	-	85	Dura
	SPT-02	3,00 – 3,45	CL	-	>50*	Dura
	SPT-03	4,50 - 4,95	CL	-	>50*	Dura
DH_CN14-05	SPT-01	1,50 – 1,95	GC	-	>50*	Muy Densa

(AUSENCO, 2014).

El SPT evalúa la resistencia de un material a la penetración de un muestreador de dimensiones y bajo condiciones establecidas. Existen correlaciones entre el número de golpes del martillo (valor de NSPT) con el comportamiento del suelo. De esta manera se mide el número de golpes realizados con el martillo (a una altura de caída de 76 cm) necesarios para que el muestreador penetre 15 cm. Se señalan tres marcas de 15 cm (total

45 cm) y se mide el número de golpes necesario para que el muestreador penetre cada 15 cm. Acabado el ensayo, el NSPT es la suma del número de golpes utilizado en los últimos 30 cm, desechándose los primeros 15 cm pero se registran en el formato correspondiente. Las correlaciones con el ensayo NSPT se muestran en el anexo 10. Este ensayo se ejecutó bajo las normas establecidas en el estándar ASTM D-1586.

Ensayos de Permeabilidad. Con el fin de determinar las propiedades hidráulicas de los materiales, se realizaron ensayos de permeabilidad in situ del tipo Lefranc de carga variable (ASTM 4631) para determinar el valor de la conductividad hidráulica del suelo; y ensayos Lugeon (Packer) en roca. La Tabla 24 muestra los coeficientes de permeabilidad obtenidos en los ensayos de permeabilidad realizados en diferentes perforaciones y profundidades.

Tabla 24. Resumen de Ensayos de Permeabilidad. Abreviaturas: K: Conductividad Hidráulica; SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Código de Perforación	Ensayo	Método de Ensayo	Tramo de Ensayo	SUCS/Litología	Valor K (m/s)
DH_ CN14-01	Lugeon	---	11,00 – 20,00	Andesita Volcánica	4,3E-07
	Lugeon	---	24,50 - 31,00	Andesita Volcánica	6,7E-07
	Lugeon	---	35,50 - 40,00	Andesita Volcánica	8,6E-07
	Lugeon	---	66,0 - 80,10	Andesita Volcánica	2,9E-07
DH_ CN14-02	Lefranc	Carga Variable	5,40 – 8,00	SC	8,44E-08
	Lugeon	---	14,00 – 20,90	Andesita	7,30E-07
	Lefranc	Carga Variable	32,55 – 44,30	Andesita Volcánica	7,13E-08
	Lefranc	Carga Variable	50,90 – 60,00	Andesita Volcánica	2,32E-07
DH_ CN14-03	Lefranc	Carga Variable	3,00 – 4,95	CH	1,48E-09
	Lefranc	Carga Variable	9,00 – 11,10	CL	1,12E-09
	Lugeon	---	17,10 – 27,70	Andesita Volcánica	1,90E-07
DH_ CN14-04	Lugeon	---	25,20 – 41,20	Andesita Volcánica	3,80E-07
	Lugeon	---	49,40 – 58,40	Andesita Volcánica	4,70E-07
	Lugeon	---	74,20-90,00	Andesita Volcánica	6,50E-07
DH_ CN14-05	Lugeon	---	13,00 – 23,25	Andesita Volcánica	1,40E-06
	Lugeon	---	25,10 – 33,10	Andesita Volcánica	2,20E-06
DH_ CN14-06	Lugeon	---	20,60 – 30,00	Andesita Volcánica	1,60E-04

(AUSENCO, 2014).

Cabe mencionar que el ensayo Lugeon (Packer) realizó determinando previamente un tramo de obturación de características geotécnicas apropiadas. Hecho esto, se infló el Packer a una presión apropiada para aislar el tramo de ensayo y posteriormente se procedió a registrar el consumo de agua a diferentes presiones de cámara aplicadas gradualmente a dicho tramo.

Ensayos Geofísicos. Los ensayos geofísicos fueron realizados por HJK EIRL., y han sido realizados con la finalidad de determinar, en forma indirecta, la estratigrafía del suelo de fundación así como sus principales características sísmicas a través de los perfiles sísmicos generados. A partir de los ensayos geofísicos se pueden estimar los parámetros dinámicos de los suelos de cimentación, mediante la determinación de las velocidades de propagación de las ondas de compresión (V_p) y de corte (V_s). El estudio involucró la investigación del sitio usando los métodos de refracción sísmica, los métodos de medición de ondas superficiales conocidos como análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y análisis multicanal de microtrepidaciones (MAM). Las Tablas 25 a la 27 muestran los ensayos de refracción y los resultados obtenidos, las Tablas 28-29, muestran la ubicación y resultados mediante los ensayos MASW/ MAM. Los registros y perfiles sísmicos realizados, se describen en el anexo 8.

Tabla 25. Líneas de Refracción Sísmica – Longitud de Línea Sísmica.

Línea	Longitud Inclínada (m)
L - 01	96
L - 02	96
L - 03	72
L - 04	72

(AUSENCO, 2014).

Tabla 26. Líneas de Refracción Sísmica – Ubicación. (Coordenadas en PSAD56).

Sondaje	Inicio/ Final	Este (m)	Norte (m)
L - 01	Inicio	753 877,9	9 254 190,0
	Final	753 812,9	9 254 259,7
L - 02	Inicio	753 903,0	9 254 212,8
	Final	753 839,4	9 254 283,6
L - 03	Inicio	753 871,5	9 254 251,4
	Final	753 820,0	9 254 204,0
L - 04	Inicio	753 896,4	9 254 251,4
	Final	753 843,9	9 254 204,0

(AUSENCO, 2014).

Tabla 27. Interpretación de Resultados de Refracción Sísmica.

Línea	Estrato Sísmico	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Descripción
L - 01	1	300 - 1500	3,0 - 7,0	Bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil.
	2	>1500	---	Roca débil a medianamente dura.
L - 02	1	300 - 1500	3,5 - 6,0	Bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil.
	2	>1500	---	Roca débil a medianamente dura.
L - 03	1	300 - 1500	2,5 - 4,5	Bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil.
	2	>1500	---	Roca débil a medianamente dura
L - 03	1	300 - 1500	3,0 - 3,5	Bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil.
	2	>1500	---	Roca débil a medianamente dura

(AUSENCO, 2014).

Todas las líneas de refracción sísmica tuvieron una longitud superficial de 120 m. Para una mejor apreciación en planta de estas se puede revisarse el plano N°9.

En lo que respecta a los ensayos MASW/MAM se realizaron 03 Sondajes: MASW/MAM-1, MASW/MAM-2 y MASW/MAM-3. Cada sondaje MASW tuvo una longitud de 53 m y los MAM se realizaron a través de líneas de 100 m cada una.

Tabla 28. Ensayos MASW/ MAM – Ubicación. (Todas las coordenadas fueron obtenidas en el Sistema Geodésico PSAD56).

Sondaje	Ubicación	Este (m)	Norte (m)
MASW/ MAM – 01	Centro	753 825,2	9 254 246,6
MASW/ MAM – 02	Centro	753 848,3	9 254 257,2
MASW/ MAM – 03	Centro	753 873,7	9 254 230,9

(AUSENCO, 2014).

Tabla 29. Interpretación de Resultados de Ensayos MASW/ MAM.

Línea	Estrato Sísmico	Vs (m/s)	Profundidad (m)	Descripción
MASW/ MAM - 01	1	370 - 400	4,5	Bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil
	2	435 - 660	9,5	Roca débil
	3	700 - 885	---	Roca débil a medianamente dura.
MASW/ MAM - 02	1	245 - 500	4,5	Bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil.
	2	550 - 965	---	Roca débil a medianamente dura.
MASW/ MAM - 03	1	330 - 460	4,5	Bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil.
	2	530 - 795	---	Roca débil a medianamente dura

(AUSENCO, 2014).

3.3.1.3. Pruebas de Laboratorio

Se realizaron los ensayos de laboratorio a las muestras de suelo y roca obtenidas durante la investigación geotécnica de campo. Los ensayos se realizaron siguiendo las Normas ASTM que a continuación se describen: Ensayos Índices de Mecánica de Suelos: Análisis granulométrico por tamizado, ASTM D-422; Límites de Atterberg, ASTM D-4318; Contenido Natural de Humedad, ASTM D-2216; Ensayo Peso Volumétrico, ASTM C-29; Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado No Drenado (CU), ASTM D-4767; y Ensayos de Carga Puntual, ASTM D-5731. A continuación se presenta la descripción de estos ensayos.

Ensayos Índice en Mecánica de Suelos. En las muestras seleccionadas obtenidas en la exploración de campo (excavación de calicatas y perforaciones) se llevaron a cabo ensayos estándar de laboratorio con fines de identificación y clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Las propiedades índices de los suelos ensayados se resumen en las Tablas 30 y 31 en términos de granulometría, límites de plasticidad y contenido de humedad natural. El registro de estos ensayos se describe en el anexo 9.

Tabla 30. Resumen de Ensayos de Clasificación de Suelos – Calicatas. Abreviaturas: SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; LL: Límite Líquido; IP: Índice Plástico; Lím. De At: Limite de Atterberg; Clasif.: Clasificación; Prof.: Profundidad.

Calicata/(Muestra)	Prof. (m)	Clasif. SUCS	Granulometría (%)			Lím. De At.		Cont. de Hum. (%)
			Grava	Arena	Finos	LL (%)	IP (%)	
TP_CN14-02/(M-1)	1,00 – 2,00	SC	13,0	38,6	48,4	48	21	23,0
TP_CN14-02/(M-2)	2,50 – 3,20	SM	15,3	44,0	40,7	48	17	22,3
TP_CN14-04/(M-1)	0,70 – 1,30	CH	5,8	28,3	65,9	53	26	32,9
TP_CN14-04/(M-2)	1,50 – 1,80	CL	9,8	30,3	59,9	42	24	17,5
TP_CN14-06/(M-1)	1,50 – 1,80	GC	36,3	26,9	36,8	46	25	14,5
TP_CN14-06/(M-2)	1,80 – 2,50	CL	15,0	32,3	52,7	50	27	16,9
TP_CN14-11/(M-1)	1,50 – 2,30	GC	28,3	28,2	43,5	41	22	19,1
TP_CN14-19/(M-1)	0,90 – 1,40	ML	4,3	45,6	50,1	37	12	23,1
TP_CN14-19/(M-2)	1,70 – 2,00	MH	4,1	19,6	76,3	50	20	43,4
TP_CN14-20/(M-1)	1,30 – 2,30	CL	10,3	33,6	56,1	42	19	24,4
TP_CN14-23/(M-1)	0,90 – 3,60	ML	2,3	27,0	70,7	44	16	28,6
TP_CN14-29/(M-1)	0,30 – 1,90	ML	1,0	38,2	60,8	48	18	23,9

(AUSENCO, 2014).

Tabla 31. Resumen de Ensayos de Clasificación de Suelos – Perforaciones. Abreviaturas: SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; LL: Límite Líquido; IP: Índice Plástico; Lím. De At: Limite de Atterberg; Clasif: Clasificación, Prof.: Profundidad.

Perforación/Ensayo	Prof. (m)	Clasif. SUCS	Granulometría (%)			Lím. De At.		Cont. de Hum. (%)
			Grava	Arena	Finos	LL (%)	IP (%)	
DH_CN14-03/SPT-01	1,90 – 2,35	CL	0,1	30,2	69,7	48	31	18,9
DH_CN14-03/SPT-02	3,00 – 3,45	CH	0,0	17,3	82,7	69	42	30,2
DH_CN14-03/SPT-03	4,50 – 4,95	CH	1,9	19,7	78,4	64	38	24,2
DH_CN14-03/SPT-04	6,50 – 6,95	CL	0,2	28,9	70,9	46	28	13,1
DH_CN14-04/SPT-01	1,20 – 1,55	CL	0,9	47,5	51,6	42	17	18,3
DH_CN14-04/SPT-02	3,00 – 3,25	SC	4,5	52,7	42,8	35	13	20,4
DH_CN14-04/SPT-03	4,50 – 4,80	SC	1,1	54,7	44,2	39	14	23,5

(AUSENCO, 2014).

Peso Volumétrico. En el laboratorio se llevaron a cabo ensayos de Peso Volumétrico, los resultados se presentan en la Tabla 32 y el registro de estos se describe en el anexo 9.

Tabla 32. Resumen de Ensayos de Peso Volumétrico.

Calicata/ Muestra	Prof. Total (m)	Litología	Densidad Natural Promedio (kN/m ³)		
			Densidad Natural Promedio (kN/m ³)	Densidad Seca Promedio (kN/m ³)	Humedad Promedio (%)
TP-CN14-06/M-1	1,50 –1,80	Suelo	2,12	1,822	16,4
TP-CN14-19/M-2	1,70 –2,00	Suelo	1,71	1,20	43,4
TP-CN14-20/M-1	2,10 –2,40	Suelo	1,79	1,296	37,8
TP-CN14-21/M-1	1,20 –1,50	Suelo	1,99	1,58	25,5

(AUSENCO, 2014).

Ensayos de Compresión Triaxial. Con el objetivo de estimar los parámetros de resistencia cortante del suelo de cimentación para la construcción de las pozas de sedimentación, se han realizado ensayos de compresión triaxial del tipo consolidados no drenados (CU) con medición de presión de poros. Los ensayos se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM D-4767. Los resultados obtenidos de estos ensayos se presenta en la Tabla 33 y se aprecian con mayor detalle en el anexo 9.

Tabla 33. Resumen de Resultados de los Ensayos de Compresión Triaxiales (CU). Abreviaturas: C.H.: Contenido de humedad; C: Cohesión; ϕ : Ángulo de fricción; Prof.: Profundidad.

Calicata/ Muestra	Prof. (m)	Clasific. SUCS	Densidad Natural (kN/cm ³)	C.H. (%)	E. Efectivos		E. Totales	
					Cohesión (kPa)	Ángulo Fricción (ϕ)	Cohesión (kPa)	Ángulo Fricción (ϕ)
TP-CN14-19/ M-2	1,70– 2,00	MH	1,69	47,08	27	16,8	22	9,8
TP-CN14-21/ M-1	1,20– 1,50	CL	2,00	25,57	32	18,9	34	11

(AUSENCO, 2014).

Ensayo de Carga Puntual. Se realizaron ensayos de carga puntual a la muestra de roca obtenida de las calicatas y perforaciones, con la finalidad de obtener su resistencia compresiva. Los resultados se presentan en la Tabla 34 y el registro de estos se describe en el anexo 9.

Tabla 34. Resumen de Resultados de los Ensayos de Carga Puntual – Perforaciones. Abreviaturas: Is (50): Índice de carga puntual corregido; σ_c : Resistencia a la compresión no confinada; Prof.: Profundidad.

Perforación/ Muestra	Prof. (m)	Carga Puntual		ISRM
		Is(50) (MPa)	σ_c (MPa)	
DH-CN14-02/M-1	15,58 – 16,03	0,57	14	R2
DH-CN14-02/M-2	28,84 – 29,15	8,11	195	R5
DH-CN14-02/M-3	39,95 – 40,29	3,42	82	R4
DH-CN14-02/M-4	58,95 – 59,35	6,84	164	R5
DH-CN14-03/M-1	24,70 – 24,98	0,28	7	R2
DH-CN14-03/M-2	34,70 – 37,62	8,12	195	R5
DH-CN14-03/M-3	45,25 – 45,70	5,74	138	R5
DH-CN14-03/M-4	52,25 – 52,53	7,20	173	R5
DH-CN14-04/M-2	11,00 – 11,20	13,36	321	R6
DH-CN14-04/M-3	24,90 – 25,38	0,90	22	R2
DH-CN14-04/M-4	48,80 -49,18	0,34	8	R2
DH-CN14-05/M-1	6,85 – 7,27	0,58	14	R2
DH-CN14-05/M-2	18,25 – 18,41	3,13	75	R4
DH-CN14-05/M-3	25,65 -25,84	8,38	201	R5
DH-CN14-05/M-4	32,10 – 32,40	8,87	213	R5
DH-CN14-06/M-1	2,50 – 2,70	10,13	243	R5
DH-CN14-06/M-2	6,30 – 6,47	9,96	239	R5

(AUSENCO, 2014).

Tabla 35. Resumen de Resultados de los Ensayos de Carga Puntual - Calicatas. Abreviaturas: $I_s(50)$: Índice de carga puntual corregido; σ_c : Resistencia a la compresión no confinada; Prof.: Profundidad.

Calicatas/ Muestra	Prof. (m)	Carga Puntual		ISRM
		$I_s(50)$ (MPa)	σ_c (MPa)	
TP-CN14-04/M-3	2,00 – 2,30	1,38	33	R3
TP-CN14-07/M-1	0,40 – 0,90	0,15	4	R1
TP-CN14-12/M-1	1,70 – 2,10	0,13	3	R1
TP-CN14-16/M-1	2,00 – 3,00	0,06	1	R1
TP-CN14-19/M-3	2,30 – 2,40	4,52	108	R5
TP-CN14-20/M-2	3,20 – 3,30	5,64	135	R5
TP-CN14-32/M-1	0,90 – 1,60	5,04	121	R5
TP-CN14-37/M-1	0,00 – 1,80	2,98	72	R4
TP-CN14-39/M-1	0,00 – 0,20	4,47	107	R5

(AUSENCO, 2014).

Este ensayo sigue los procedimientos de la norma ASTM D-5731. Mediante las Tablas 34 y 35 se presentaron los resultados en términos de la resistencia a la compresión no confinada equivalente a σ_c y de la resistencia de la roca. El registro de los ensayos de Carga puntual se describe en el anexo 9.

3.3.2. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

El tipo de análisis de los datos utilizados para realizar la zonificación geotécnica es descriptivo/inferencial y tiene su fundamento principal en la observación. Los parámetros obtenidos a partir de estos, se presentan a través de tablas, figuras y planos.

Con la ayuda de las investigaciones superficiales, el análisis a través de sondeos de perforación-calicatas, ensayos geofísicos y ensayos de laboratorio de suelos. Se establecieron las unidades geotécnicas presentes en el área de estudio y son cinco (05): Pajonal Inundado (Unidad Geotécnica I), Depósito Coluvial (Unidad Geotécnica II), Depósito Morrénico (Unidad Geotécnica III), Depósito Residual (Unidad Geotécnica IV), y Basamento Rocoso (Unidad Geotécnica V), las que se muestran en el Plano N° 10, y se describen a continuación.



Foto 12. La zona de Ciénega Norte se encuentra en la ladera norte del cerro Quihuillas.

3.3.2.1. Pajonal Inundado (Unidad Geotécnica I)

Están ubicados generalmente en terrenos de baja pendiente o cercana a cursos de agua, con un drenaje superficial inadecuado y nivel freático relativamente superficial. Está conformado por suelos saturados a muy húmedas, de compacidad y consistencia blanda y/o suelta, constituidos por intercalaciones de suelos orgánicos, turba, horizontes de suelos limo arenoso o arena limosa con grava aislada, arcilla de alta plasticidad, arcilla limosa, y grava arcillosa a arenosa; dispuestos en estructura lenticular o estratiforme.

Esta unidad se distribuye ampliamente en el sector de las pozas. De acuerdo a los ensayos DLPT y calicatas excavadas en alrededores, se estima que la potencia de esta unidad varía entre 0,50 m a 8,0 m.



Foto 13. Unidad Geotécnica I - Pajonal Inundado, se presenta superficialmente con alto grado de incidencia en la zona central y en los márgenes derecho e izquierdo del sistema de pozas prospectado.

3.3.2.2. Depósito Coluvial (Unidad Geotécnica II)

Corresponde a suelos depositados en laderas, por acción esencialmente de la gravedad, y poco a nulo transporte de agua. Consiste mayormente de grava pobremente gradada, grava arcillosa a limosa con arena, arena limosa con grava, limos, limo con arena, y arcilla arenosa a limosa; clasificando como GP, GC, GM, SM, CH, ML, CL, respectivamente en el sistema SUCS; de plasticidad nula a media y compacidad suelta a medianamente densa en los suelos granulares, plasticidad baja a alta, consistencia blanda a rígida en los suelos finos; húmeda a muy húmeda, con gravas angulosas, y presencia de bolonería aislada; con espesores estimados que van de 0,50 m a 5,0 m. Si bien en algunas calicatas se ha registrado materiales que indican cierto transporte de agua (coluvio-aluvial y aluvial), dada su presencia irregular en este sector, se ha visto conveniente, considerarlos como parte del material coluvial.

Esta unidad se presenta en gran parte en el área de estudio y sobreyacen al basamento rocoso, suelo residual y ocasionalmente a suelos morrénicos.



Foto 14. Unidad Geotécnica II - Depósito Coluvial, de características granulares y con presencia de transporte.

3.3.2.3. Depósito Morrénico (Unidad Geotécnica III)

Corresponde a remanentes de suelos originados por la actividad glaciar. Estos depósitos consisten mayormente de grava arcillosa, arcilla arenosa a gravosa, limo elástico con arena, que clasifican como GC, CL, CH, MH, respectivamente en el sistema SUCS. La plasticidad varía de baja a alta, variando su compacidad de medianamente densa a densa en los suelos granulares, y consistencia firme a rígida en los suelos finos; húmedos, estructura homogénea, clastos subangulosos, y bolonería aislada.

De acuerdo al registro de calicatas y perforaciones, se estima que la potencia de esta unidad varía entre 0,50 m a 6,00 m.



Foto 15. Unidad Geotécnica III - Depósito Morrénico propio de la actividad glaciar y se extiende en la zona central respecto del sistema de pozas.

3.3.2.4. Depósito Residual (Unidad Geotécnica IV)

Corresponde a suelos generados in situ por la alteración y/o meteorización del basamento rocoso. Conformado de grava arcillosa a limosa, arena arcillosa, arcilla con arena y grava y limo arenoso, que clasifican como GC, GM, SM-SC, CL, CH y ML, respectivamente en el sistema SUCS; de plasticidad baja a alta y compacidad medianamente densa a muy densa en los suelos granulares, plasticidad media a alta y consistencia firme a dura en los suelos finos. En general estos materiales se presentan húmedos, en parte saturados, estructura homogénea, con gravas sub-angulosas a sub-redondeadas.

Esta unidad geotécnica subyace a una delgada cobertura de suelo orgánico, y en parte, a las unidades anteriormente descrita; estando relacionado a los afloramientos de rocosos. Su presencia y potencia se supedita al grado de meteorización y/o alteración del basamento rocoso. Cabe indicar que para propósitos de modelamiento geotécnico, al basamento rocoso con dureza $R < 2$, se le considera como parte de los suelos residuales.



Foto 16. Unidad Geotécnica IV - Depósito Residual, corresponde a suelos generados in situ con durezas $R < 2$, localizado en la zona central y a los flancos derecho e izquierdo del sistema de pozas.

3.3.2.5. Basamento Rocoso Dureza $\geq R2$ (Unidad Geotécnica V)

Ha sido registrado a través del cartografiado de afloramientos rocosos, y el registro de calicatas y perforaciones. Esta unidad geotécnica consiste mayormente tobas andesíticas, y localmente andesitas, color a gris verdusco que varía a gris claro y gris plomizo por alteración, moderada a intensamente alterada, con dureza de $R2$ a $R4$; poco a muy fracturado, con un RQD que va de 0 hasta 100 %. Calidad de roca RMR de mala a buena.



Foto 17. Unidad Geotécnica V - Basamento Rocoso Dureza $\geq R2$, se presenta como promontorios Andesíticos aislados, localizados en la zona central del sistema de pozas y en el flanco izquierdo del área de investigación.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Las investigaciones geotécnicas ejecutadas sirvieron para identificar y definir las propiedades geotécnicas del material de fundación de las pozas de sedimentación; a través de la estimación de los parámetros de resistencia y deformación de los materiales identificados como suelo residual (dureza R1.5 a R2) y roca. Esto fue posible tomando en consideración los ensayos SPT, ensayos geofísicos y valoración RMR del basamento rocoso.

La zona de pozas se ubica en el sector inferior de la ladera norte del cerro Quihuillas y aguas abajo. Morfológicamente es una ladera de baja a moderada pendiente, ligeramente disectada, donde se aprecia extensas áreas de pajonal inundado que rodean pequeños promontorios rocosos aislados. Durante la investigación se realizó el cartografiado geológico-geotécnico detallado del área de estudio, con el fin de determinar las propiedades del suelo-roca e identificar las unidades geotécnicas presentes. De esta manera se consideró que el basamento rocoso con dureza $\leq R2$ (Valoración RMR respecto a la Resistencia a la Compresión Uniaxial - Bieniaswki 1989); ha sido registrado como suelo residual, asimismo, que no se considera la cobertura de material orgánico (top soil). Litológicamente, el pajonal inundado está conformado por limos y arcillas con niveles de turba, en estado saturado, que denota un drenaje deficiente, y espesores estimados de 3 a 7 m, pudiendo ser puntualmente algo mayores. Se presentan afloramientos rocosos constituidos por tobas, moderadamente fracturadas a muy fracturadas, alteradas a extremadamente alteradas con durezas de R4 a R1.5, constituyendo en parte suelos residuales; y de manera restringida cobertura de material coluvial y morrénico. De acuerdo a las estaciones geomecánicas y al análisis de las estructuras principales y secundarias determinadas, se puede asumir que la familia P1 y S4 estaría asociada al

sistema de fallamiento de rumbo NO-SE. Las familias P2, P3 y S2 están relacionadas a fallas y fracturas transversales E-O y NE-SO.

Los resultados de los ensayos de refracción sísmica permitieron definir con mayor exactitud la capa superficial conformada por el material de bofedal. Los estratos más profundos no pudieron ser adecuadamente definidos debido a que el material superficial se mostró muy suelto y con presencia de agua lo cual imposibilitó una adecuada transmisión de las ondas sísmicas a mayores profundidades. A diferencia de los ensayos eléctricos, cuya fuente de energía es inducida al terreno, la energía de las ondas sísmicas se encuentra en función de los impactos realizados los cuales, en suelos pantanosos en superficie, son rápidamente atenuados y consecuentemente no permiten profundizar la investigación.

En ese sentido, las líneas de refracción sísmica permitieron delimitar la presencia de un estrato superficial conformado por el material de bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil. Las velocidades de este estrato superficial se encuentran entre 300 m/s y 1500 m/s con profundidades en el rango de 2.5 m a 7.0 m.

El segundo estrato lo conforma un material arenoso compacto y/o roca muy fracturada que presenta velocidades de Ondas P (V_p) mayores a 1500 m/s. Este segundo estrato puede significar la continuidad del material de bofedal con la presencia eventual de roca fracturada.

La complementación de los sondajes MASW y MAM permitió analizar el terreno entre una profundidad de entre 35 m y 80 m de profundidad. Estos ensayos también se encuentran limitados por la condición de suelo blando en superficie indicado anteriormente. De la misma forma que en los ensayos de refracción sísmica, permitió definir dos estratos en promedio para la zona de estudio.

El primer estrato lo conforma el material de bofedal, suelo rígido o residual parcialmente saturado o roca muy débil. Este estrato presenta velocidades de ondas de corte (V_s) variando entre 245 m/s y 500 m/s y profundidades promedio de 4.5 m. El segundo estrato lo conforma roca débil con velocidades entre 435 m/s y 660 m/s con un espesor de 9.5 m. Este estrato fue identificado en el sondaje MASW/MAM-1 que también identificó un tercer estrato con velocidades entre 700 m/s y 885 m/s que corresponde a una roca medianamente dura.

En los demás sondajes, el material de roca débil se presentó hasta una profundidad promedio de 35 m y con velocidades en el intervalo de 530 m/s a 965 m/s que podría significar la presencia de roca medianamente dura a profundidad.

Se resumen a continuación las características geotécnicas así como la estimación de los parámetros de resistencia en los suelos de mayor influencia dentro del área de estudio.

4.1.1.MORRENA

Este material corresponde mayormente a arena limosa y arena arcillosa, en menor proporción arcilla arenosa y grava arcillosa, de compactación medianamente densa a densa y con presencia de bolonería sub-angulosa de tamaño máximo 12". También se realizaron ensayos SPT en las perforaciones obteniendo un valor promedio de NSPT de 28. Por lo tanto se estimó conservadoramente un ángulo de fricción de 32° y 5 kPa de cohesión. Así tenemos que para suelos morrénicos encontrados en esta zona, la compactación varía en general desde medianamente densa a muy densa. De acuerdo a la literatura técnica vigente (Daniel, Howie and Sy, 2003), los números de golpes obtenidos con el LPT son aumentados 1,38 veces para obtener el número de golpes equivalentes al ensayo SPT.

Dadas sus características son adecuados para propósitos de cimentación, previo retiro del material orgánico de cobertura, y tratamiento de su techo, dependiendo esto último del grado de compactación/consistencia del material.



Foto 18. Retiro de la cubierta orgánica donde se observan suelos tipo morrénicos de consistencia areno-limoso y areno-arcilloso, determinados con exactitud mediante los ensayos.

4.1.2. SUELO RESIDUAL

Este material corresponde a la roca en estado de intemperismo alto a muy alto y que ha sido identificado en las calicatas y en la recuperación de muestras en las perforaciones, presentando dureza menor a 25 MPa (R2) y porcentajes de recuperación inferior al 50%, el valor de RMR Básico que se obtiene en estos sectores es menor a 20, donde también se realizaron ensayos de SPT obteniéndose en general valores de NSPT superiores a 20 e inclusive rechazo en muchos de los ensayos. Este material residual presenta una clasificación SUCS CL, CH, SC y SM. Se llevaron a cabo dos ensayos de compresión triaxial a muestras obtenidas de la calicatas TP_CN14-19 y TP_CN14-21; obteniéndose en términos esfuerzos efectivos ángulos de fricción de 16,8 - 18,9° y cohesión de 27 a 32 kPa. Dada la naturaleza de material residual y a que en general los niveles freáticos se encuentran por debajo de este depósito, para el análisis se ha considerado un ángulo de fricción de 16,8° y una cohesión de 27 kPa.

Dadas sus características descritas, estos materiales son adecuados para propósitos de cimentación, previo retiro del material orgánico de cobertura, y tratamiento de su techo, dependiendo esto último del grado de compacidad/consistencia del material.



Foto 19. Suelo residual analizado mediante calicatas.

4.1.3. BASAMENTO ROCOSO

4.1.3.1. Propiedades Geotécnicas del Macizo Rocoso

Al realizar las perforaciones y las excavaciones de calicatas, se registraron afloramientos rocosos. La caracterización del macizo rocoso se realizó siguiendo el Sistema de Clasificación Geomecánica (RMR) de Bieniawski, 89. En base a los registros geomecánicos se obtuvieron las propiedades relevantes del macizo rocoso. Estas propiedades son el valor del RQD, la resistencia de la roca intacta, el grado de meteorización, el grado de fracturamiento, y la condición de las discontinuidades. El valor del RMR permite clasificar al macizo rocoso en términos de su calidad, como se indica en la Tabla 36.

Tabla 36. Sistema de clasificación RMR utilizado para la descripción de los afloramientos rocosos en el área de estudio.

Valoración RMR	Clase	Descripción
80 – 100	I	Roca Muy Buena
60 – 80	II	Roca Buena
40 – 60	III	Roca Regular
20 – 40	IV	Roca Mala
0 – 20	V	Roca Muy Mala

(Bieniawski, 1989).



Foto 20. Evaluación de las propiedades de las rocas a través del análisis RQD y las condiciones GSI, en muestras obtenidas de la zona central del sistema de pozas. a) De acuerdo a las características mineralógicas de las rocas se determinó la presencia de Andesitas, b) Se evaluaron además las propiedades geomecánicas de bloques rocosos Andesíticos.

La tabla 37 indica las características de las muestras extraídas de acuerdo al código de perforación así como los detalles que de ella se desprenden (clasificación RQD, RMR y descripción). La clasificación de la roca en general va de mala a buena.

Tabla 37. Resumen de Valores de RMR en las Perforaciones. En las perforaciones realizadas.

Código de Perforación	Profundidad (m)	RMR Básico	Clase	Descripción
DH_CN-14-01	5,70 – 8,50	29	IV	Roca mala
	8,50 – 72,50	50	III	Roca Regular
	72,50 – 80,00	67	II	Roca buena
DH_CN-14-02	8,40 – 12,00	25	IV	Roca mala
	12,00 – 60,00	45	III	Roca Regular
DH_CN-14-03	12,80 – 17,20	16	V	Muy Mala
	17,20 – 41,10	45	III	Roca Regular
	41,10 – 50,50	65	II	Roca Buena
DH_CN-14-04	0,30 – 9,60	25	IV	Roca Mala
	9,60 – 35,10	65	II	Roca Buena
	35,10 – 78,50	19	V	Muy Mala
	78,50 – 90,00	39	IV	Roca Mala
DH_CN-14-05	1,75 -17,25	30	IV	Roca Mala
	17,25 – 40,00	55	III	Roca Regular
DH_CN-14-06	1,50 – 30,00	75	II	Roca Buena

(AUSENCO, 2014).

4.1.3.2. Parámetros de Resistencia de las Rocas

Los parámetros de resistencia en roca, fueron determinados empleando las correlaciones presentadas por Bieniawski (1989) y que se muestran en la Tabla 38.

Tabla 38. Resistencia de las rocas presentes en el área de estudio.

Calidad del Macizo	RMR	Angulo de rozamiento	Cohesión (kPa)	Clase
Muy Buena	100 – 81	> 45 ^a	> 300	I
Buena	80 – 61	35 ^a – 45 ^a	200 – 300	II
Regular	60 – 41	25 ^a – 35 ^a	150 – 200	III
Mala	40 - 21	15 ^a – 25 ^a	100 – 150	IV
Muy mala	≤ 20	< 15 ^a	< 100	V

(Bieniawski 1989).

De la Tabla 38, se obtiene un valor de RMR promedio de 45, según las condiciones que presentan las rocas en la zona de investigación; se tomó conservadoramente el valor de 40, del cual por correlaciones de Bieniawski se obtienen por parámetros de resistencia, una cohesión de 100 kPa y un ángulo de fricción de 30°. A partir de la clasificación geomecánica obtenida de las perforaciones y ensayos de carga puntual.

La roca subyacente a poca profundidad en los depósitos cercanos a afloramientos y a mayor profundidad en la zona de humedales y pajonales fue identificada como roca toba andesítica.

De acuerdo a los registros de calicatas y perforación ejecutados en el área de investigación además de ensayos de laboratorio complementarios, se identificó que el material del basamento rocoso (dureza $R \geq R_2$) se encuentra conformado mayormente por tobas andesíticas. El basamento rocoso se encuentra predominantemente subyaciendo a depósitos coluviales, depósitos coluvio aluviales, depósitos morrénicos y depósitos residuales. En el acápite de Investigaciones Geotécnicas, se presentó la descripción detallada, por estructura, de cada una de las perforaciones ejecutadas en función de los valores de RQD, dureza, condición de juntas, etc. En base a esta información, se pudo verificar que el macizo rocoso, que estará en contacto con posteriores estructuras de cimentación, se encuentra altamente fracturado.

En la Tabla 39 se presentan los valores de RMR Básico reportados directamente de los registros geomecánicos de perforación. Para la obtención del RMR 1989, se debe considerar una condición de agua subterránea seca (puntuación 15) y una orientación por discontinuidades clasificada como muy favorable (orientación de discontinuidades es de 0). A partir del RMR_{89} puede obtenerse el valor de GSI (Geological Strength Index), el cual es un parámetro requerido para la caracterización del basamento rocoso como material de fundación. Este parámetro se determina mediante los siguientes criterios:

Para $RMR_{89} > 23$, el Índice de Resistencia Geológica es: $GSI = RMR_{89} - 5$; Para $RMR_{89} < 23$, el Sistema de Clasificación Geomecánica RMR no puede ser utilizado para la determinación del GSI, ya que dichos valores son los mínimos obtenidos por el RMR para macizos rocosos de mala calidad.

A continuación la Tabla 39 muestra a manera de resumen los valores de RMR_{89} y GSI obtenidos para las perforaciones geotécnicas con mayor grado de incidencia.

Tabla 39. Valoración del RMR89 y GSI del Basamento Rocoso en el área de estudio.

*Los valores de RMR Básico reportados corresponden al basamento rocoso que estará en contacto con la cimentación (aproximadamente 10 m por debajo del terreno natural).

Perforación	RMR Básico*	RMR ₈₉	GSI
DH_CN14 – 03	45	53	48
DH_CN14 – 04	65	70	65
DH_CN14 – 05	55	60	55

(AUSENCO, 2014).

Para la ejecución del análisis de estabilidad, las propiedades de resistencia cortante de los materiales ensayados han sido reducidas apropiadamente para tomar en cuenta la variabilidad espacial de los mismos.

Tabla 40. Resumen de Propiedades de los Materiales más importantes según las zonas geotécnicas identificadas para Análisis de Estabilidad.

Material	γ total (kN/m ³)	γ sat (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
Morrena	20,0	21,0	5	32
Residual	20,0	21,0	27	16,8
Basamento Rocoso	24,0	24,0	100	30

(AUSENCO, 2014).

Cabe mencionar que las perforaciones y los ensayos geofísicos permitieron reconocer la presencia de suelo residual como material de fundación, se identificaron valores de V_p y V_s asociados a roca de dureza $R < 2$ (suelo residual).

4.1.4. NIVEL DE AGUA

De acuerdo a registros del cartografiado superficial, calicatas y perforaciones, se ha determinado la presencia de un nivel freático relativamente superficial en la zona de pozas con registros de 0,0 m a 5,0 m, y un nivel más profundo llegando a los 20,0 m (DHCHN_05), mayormente en las zonas de mayor altitud.

La presencia de vegetación asociada a ojos de agua en algunos sectores, sugiere la eventual presencia de nivel freático relativamente superficial de carácter estacional.



Foto 21. Nivel superficial del agua característico de la formación geotécnica pajonal inundado en la zona central del sistema de pozas.

4.1.5. NIVEL DE CIMENTACIÓN

Durante la investigación geotécnica se determinaron además y gracias a los resultados recopilados los niveles de desplante para cimentación en toda el área. El criterio de inspección de estos niveles se basa principalmente en encontrar un basamento rígido o un material no cedente que permita soportar solicitaciones de carga y presión generadas, con el fin de que los depósitos subyacentes a este nivel sean de las mismas características en profundidad o hasta el encuentro del basamento rocoso.

El nivel de cimentación varía sustancialmente entre 0,10 m en los afloramientos rocosos, a 3,0 m en las áreas de suelos residuales.

Finalmente y en concordancia con lo planteado por Lambe & Whitman (1991), la geología es una herramienta fundamental en el diseño de estructuras de cimentación como pozas de relaves-pozas de sedimentación, diques o cualquier estructura que se asienta sobre el terreno, debido a que sobre estas influyen cargas, esfuerzos según las propiedades inherentes de los materiales de construcción; ya que el método de formación de una masa de suelo influye en el tamaño, forma y comportamiento del mismo.

La exploración ayuda a establecer los contornos de un depósito y permite realizar la selección de muestras para pruebas de laboratorio. Por lo tanto, se debe contrastar el análisis e interpretaciones in situ, comportamiento real, con el comportamiento previsto para una estructura a construir.

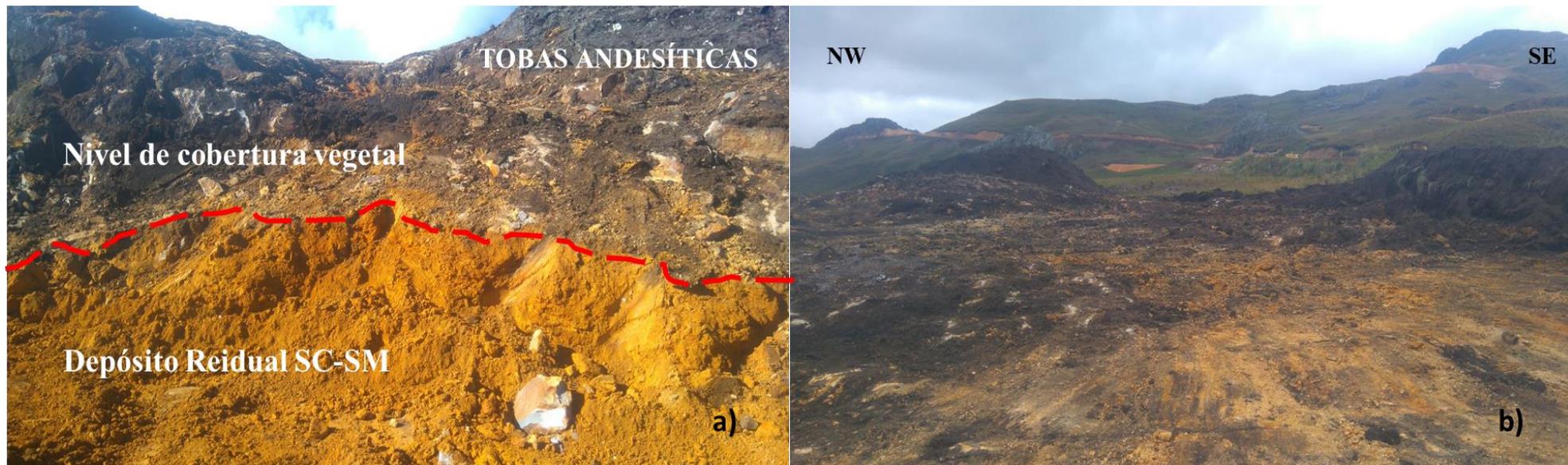


Foto 22. Nivel de cimentación en el área de investigación, a) Deposito residual bajo la capa de material orgánico que se encuentra sobre Tobas Andesíticas; b) Retiro de cobertura vegetal con espesores que varían desde 0,10m m a 3,0 m hasta llegar a terreno de fundación.

4.2. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El ingeniero geólogo, geotecnista, para proyectar una estructura inteligentemente, debe tener un conocimiento razonable de las propiedades físicas y disposición de los materiales del subsuelo. El método que más se adapta a una variedad de condiciones consiste en hacer sondeos en el terreno y extraer muestras para su identificación y, en algunos casos, para hacerles pruebas. Para sondear, comúnmente se usan varios métodos. De la misma manera, se dispone de una variedad de métodos de muestreo. La elección depende de la naturaleza del material y del objeto del programa de exploración.

La caracterización del suelo y roca desde el punto de vista de la geotecnia, a través de los diferentes ensayos efectuados en el área de Ciénega Norte arrojó la siguiente información: espesor de suelo orgánico (top soil), niveles freáticos, nivel de roca, resistencia de los materiales en las zonas de pajonales húmedos, parámetros de resistencia a la penetración en suelos profundos, resistencia al esfuerzo cortante en suelos, propiedades hidráulicas de los materiales, granulometría, identificación y clasificación de los suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), parámetros de resistencia compresiva en rocas, identificación de discontinuidades, clasificación RMR y posteriormente la determinación de unidades geológicas-geotécnicas. Esta información es indispensable para conocer y evaluar las propiedades que presenta el terreno de fundación con la finalidad de llevar a cabo la construcción del sistema de pozas sedimentadoras prospectadas para dicha zona. Esto tuvo lugar durante el proceso de investigación geotécnica, donde se realizó el respectivo cartografiado geológico-geotécnico a detalle.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

A partir de los ensayos geotécnicos realizados se caracterizó satisfactoriamente tanto el suelo como el macizo rocoso, determinando su aptitud para la construcción del sistema de pozas sedimentadoras previsto.

Se seleccionaron, recolectaron muestras de roca y suelo representativas, que sirvieron para ser analizadas geotécnicamente en el laboratorio y determinar sus propiedades.

Mediante los ensayos de granulometría, cohesión, ángulo de fricción, permeabilidad y plasticidad, se clasificaron los suelos de acuerdo al sistema SUCS en GP, GC, GM, SM, CH, ML, CL y MH.

Se determinaron las características geomecánicas del macizo rocoso, obteniendo un valor de RMR promedio de 45. Se consideró para efectos de análisis el valor de 40, con una cohesión de 100 kPa, un ángulo de fricción de 30°, y un RQD de condiciones regular a mala.

Al interpretar y analizar los resultados de los ensayos realizados se delimitaron cinco (05) unidades geotécnicas: Pajonal Inundado (Unidad Geotécnica I), Depósito Coluvial (Unidad Geotécnica II), Depósito Morrénico (Unidad Geotécnica III), Residual (Unidad Geotécnica IV), y Basamento Rocosos (Unidad Geotécnica V).

5.2. RECOMENDACIONES

Realizar y analizar sondeos eléctricos verticales (SEV) con el fin de obtener resultados más certeros con respecto a la morfología y características del terreno a profundidad.

Considerar el análisis de estabilidad de taludes con propósitos de evaluar las variables sísmicas para el sistema de pozas sedimentadoras.

Efectuar ensayos sismoresistentes para la construcción de estructuras que incluyan el apilamiento de material, factor de seguridad, capacidades de carga, resistencia cortante, etc.; de acuerdo a los materiales a depositar.

Se deberá evaluar constantemente los materiales encontrados y los taludes resultantes al efectuar el movimiento de tierras, a fin de prevenir posibles taludes inestables como producto de la aparición de lentes débiles.

Realizar mayor número de sondeos de perforación entre 15 y 20 m de profundidad con el objetivo de complementar las investigaciones geofísicas realizadas en el área y corroborar los perfiles sísmicos reportados en los ensayos geofísicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ausenco. 2012. Ingeniería de Detalle Pad de Lixiviación Fase 2. Compañía Minera Coimolache S.A.
- Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley and Sons.
- Braja, M. 1985. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Brooks/Cole Publishing. Sacramento, California.
- Braja, M. 2006. Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones. Quinta Edición. Editorial Thomson S.A. de C.V. Sacramento California.
- Campos, A., y Vásquez, O. 1992. Seminario Taller de Mecánica de Suelos y Exploración Geotécnica. Primera Edición CISMID-FIC-UNI.
- González de Vallejo, L. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Educación. Madrid, España.
- Gonzales, M. 2001. El Terreno. Primera Edición. Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, SL. España.
- Hanson W., Peck R., and Thornburn T. 1974. Ingeniería de Cimentaciones. Segunda Edición. Limusa S.A-Noriega Editores. México D.F.
- Hoek, E., and Brown, E. T. 1980. Empirical Strength Criterion for Rock Masses, Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers. Vol. 106. No GT9. pp. 1013 - 1035.
- I.T.G.E. y EPTISA S.A. 1986. Manual de Ingeniería de Taludes. Programa Inventario y Valoración del Potencial Minero Energético. España.
- Juárez, E., y Rico, A. 2005. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Segunda Edición. Limusa S.A. México D.F.
- Lambe, W., and Whitman, R. 1991. Mecánica de Suelos. 8ª imp. Editorial Limusa de C.V. México D.F.
- Rivera, L. 1980. Boletín N° 31, Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba”, Hojas 15f-15g y 16g, Editado por Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima-Perú.
- Rodríguez, J. 1980. Curso aplicado de Cimentaciones. Primera Edición COAM.
- SLIDE. 2003. 2D Limit Equilibrium Slope Stability for Soil and Rock Slopes. User's Guide. Rocscience.
- Vector, S.A.C. 2007. Diseño de Factibilidad del Pad de Lixiviación y Botaderos, proyecto Tantahuatay. Informe Técnico preparado para la Compañía Minera Coimolache S.A. Perú.

ANEXOS

- 1. LISTA DE PLANOS**
- 2. REGISTRO FOTOGRÁFICO**
- 3. REGISTRO DE ESTACIONES GEOMECÁNICAS**
- 4. REGISTRO DE CALICATAS**
- 5. REGISTRO DE PERFORACIONES**
- 6. ENSAYOS LDPT**
- 7. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD**
- 8. ENSAYOS GEOFÍSICOS**
- 9. PRUEBAS DE LABORATORIO**
- 10. CORRECCIONES DEL NÚMERO DE GOLPES NSPT**

Plano 1. Ubicación Geográfica y Política.

Plano 2. Accesibilidad.

Plano 3. Geomorfológico de Pendientes.

Plano 4. Hidrológico.

Plano 5. Geológico.

Plano 6. Estaciones geomecánicas y calicatas.

Plano 7. Perforaciones.

Plano 8. Ensayos LDPT.

Plano 9. Ensayos geofísicos.

Plano 10. Unidades geotécnicas.

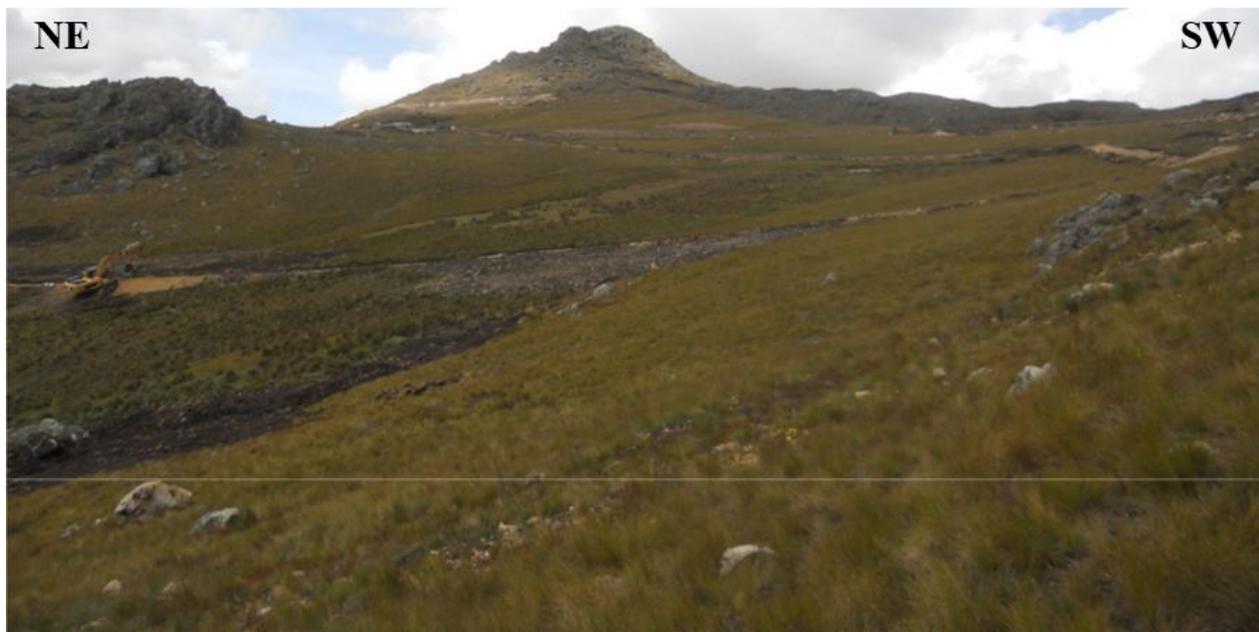


Foto 23. Vista Panorámica de la Zona de Investigación en el sector denominado Ciénaga Norte.

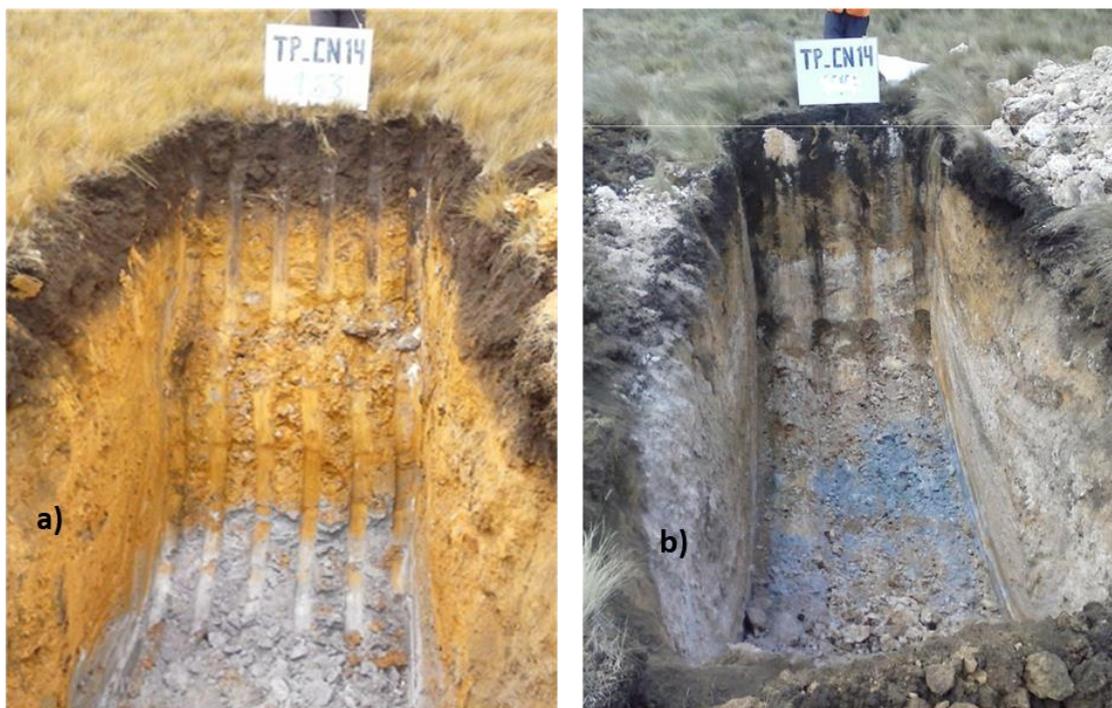


Foto 24. a) Calicata TP_CN14-20; b) Calicata TP_CN14-28 – Pozas de Sedimentación.



Foto 25. Ensayo LDPT_CN14-06 – Pozas de Sedimentación.



Foto 26. Ensayo LDPT_CN14-19 – Pozas de Sedimentación.



Foto 27. Vista del lugar donde se realizó el ensayo LS-1; se puede observar medición y marcado de la línea geofísica.



Foto 28. Vista del lugar donde se realizó el sondaje sísmico MASW/MAM-1.



Foto 29. Perforación geotécnica DH-14-01, caja con muestras de 0,00 a 17,50 m.



Foto 30. Perforación geotécnica DH-14-01, caja con muestras de 17,50 a 34,15 m.



Foto 32. Perforación geotécnica DH-14-03, caja con muestras de 15,85 a 32,40 m.



Foto 33. Perforación geotécnica DH-14-04, caja con muestras de 00,00 a 16,60 m.



Foto 34. Perforación geotécnica DH-14-04, caja con muestras de 16,60 a 33,00 m.