

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS Y CORRELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO RQD
Y LA PERMEABILIDAD LUGEÓN**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs Díaz Cleiber,
Ochoa Peña Gerardo José
Para optar al título
De Ingeniero Geólogo

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS Y CORRELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO RQD Y LA PERMEABILIDAD LUGEÓN

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Miguel Castillejo
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Huascar Godoy

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs Díaz Cleiber,
Ochoa Peña Gerardo José
Para optar al título
De Ingeniero Geólogo

Caracas, 2009

CARTA DE APROBACION

A nuestros padres y hermanos...

Gerardo y Cleiber.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso, por brindarme la dicha de la vida, además de darme salud y perseverancia para vencer los obstáculos durante el transcurso de mi carrera.

A la Universidad Central de Venezuela, nuestra casa que vence las sombras, hogar del conocimiento y de la dignidad, cuyas aulas fueron testigos de los mejores momentos de la carrera.

A los profesores de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica por impartirnos sus conocimientos sin mezquindad y formarnos como profesionales de la Geología.

Al profesor Miguel Castillejo, quien a pesar de estar de reposo, estuvo dispuesto en todo momento a ayudarnos y a darnos buenos consejos.

A los profesores Ricardo Alezones, Lenin González y Feliciano De Santis, quienes desde comienzo de carrera y hasta el final de la misma han sido más que profesores, amigos.

Al Ing. Huascar Godoy, por su buena disposición, amistad y colaboración en el desarrollo de este trabajo. Dios le de salud y felicidad.

A mis amigos y compañeros, Luis, Darwin, Orlando, Rafael Angel, Romar, Paul, Rafael José, Kareymir, Pedro, quienes siempre estuvieron conmigo en las buenas y en las malas, dandome su apoyo incondicional, y con los cuales compartí los mejores momentos de mi carrera.

A mi familia, Ochoa y Peña, que con su cariño y comprensión me ayudaron a continuar en los momentos difíciles

Y muy especialmente a mis padres Irma y Pedro, y mi hermano Leonardo, las personas más importante en mi vida, quienes han guiado cada uno de mis pasos enseñandome el valor de la constancia y perseverancia para alcanzar mis metas y a quienes debo lo que soy.

Gerardo José Ochoa Peña

**Ochoa P, Gerardo J
Díaz, Cleiber**

ANÁLISIS Y CORRELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO RQD Y LA PERMEABILIDAD

Tutor Académico: Prof. Miguel Castillejo.

Tutor Industrial; Ing. Huascar Godoy

**Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. 2009. 156 Páginas + anexos**

Palabras Claves: Análisis, Geotecnia, RQD, Permeabilidad, Rock Quality Designation, Geomecánica, Macizos rocosos, Fundaciones para presas, Lugeon.

Resumen: El objetivo principal del Trabajo Especial de Grado es investigar la validez del uso del parámetro Rock Quality Designation (R.Q.D.) en la caracterización de macizos rocosos, específicamente para calificar la permeabilidad del mismo, su estanqueidad, y su uso para el estudio de fundaciones para presas. Para ello se realizaron análisis geológicos – geotécnicos a varias presas fundadas en distintos tipos de roca, haciendo énfasis en el Proyecto de Presa sobre el río Cuira, en el Estado Miranda, donde el lecho rocoso son rocas metavolcánicas pertenecientes al Grupo Villa de Cura, y donde no existe verdadera correspondencia entre los resultados del RQD y los de las pruebas de permeabilidad allí realizadas. Con estos análisis se espera obtener las razones por las cuales existen esas discrepancias, y establecer si estas circunstancias se repite en otros tipos de roca.

INDICE DE CONTENIDO

CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	xiv
INDICE DE TABLAS	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 UBICACIÓN	1
1.2 VIAS DE ACCESO	3
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	4
1.5 OBJETIVOS	4
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
1.6 METODOLOGÍA.....	5
1.6.1 FASE DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE	5
1.6.2 FASE DE CAMPO	6
1.6.2.1 RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO DE SUPERFICIE.....	6
1.6.2.2 ESTUDIO DE LOS NÚCLEOS RECUPERADOS EN LAS PERFORACIONES	7
1.6.3 FASE DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO.....	7

1.6.3.1	ENSAYO DE PERMEABILIDAD LUGEON.....	7
1.6.3.2	ANÁLISIS PETROGRÁFICO	8
1.6.3.3	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL	8
1.6.3.4	ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	8
1.6.4	FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS	8
1.6.4.1	AJUSTE DE PLANILLAS DE PERFORACIÓN	9
1.6.4.2	ELABORACIÓN DEL MAPA GEOLOGICO	9
1.6.5	CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO DE LA PRESA CUIRA	10
1.6.6	REVISIÓN DE PERFILES TRANSVERSALES	10
1.6.7	ELABORACIÓN DE GRÁFICAS DE RQD VS PERMEABILIDAD .	10
1.6.8	COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE LAS OTRAS PRESAS ESTUDIADAS	11
CAPÍTULO II		12
2. MARCO TEÓRICO		12
2.1	CONCEPTOS DE INGENIERÍA DE PRESAS	12
2.1.1	TIPOS DE PRESA	12
2.1.1.1	PRESAS DE MATERIALES SUELTOS:.....	14
2.1.1.2	PRESAS DE GRAVEDAD DE HORMIGÓN	16
2.1.1.3	PRESAS EN ARCO.....	17
2.1.1.4	PRESAS ALIGERADAS	19
2.1.1.5	PRESAS DE CONCRETO COMPACTADO A RODILLO	20
2.1.2	ELEMENTOS DE UN SISTEMA PRESA – EMBALSE:	22
2.2	MÉTODOS DE ESTUDIO Y CLASIFICACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS	23

2.2.1	ALGUNOS MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS	24
2.2.1.1	CLASIFICACIÓN DE DEERE O R.Q.D. (1964)	24
2.2.1.2	CLASIFICACIÓN DE BIENAWSKI (1973).....	26
2.2.1.3	CLASIFICACIÓN DE BIENAWSKI (1984).....	27
2.2.1.4	CLASIFICACIÓN DE BARTON (1974).....	31
2.2.1.5	INDICE Q DE BARTON (simplificado).....	31
2.2.1.6	INDICE Q (Simplificado) DE BARTON et al., (1974).....	32
2.2.1.7	GEOLOGICAL STRENGH INDEX – GSI.....	35
2.3	PERMEABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS	39
2.3.1	ENSAYO LUGEON.....	39
2.3.1.1	EQUIPO	43
2.3.1.2	PROCEDIMIENTO	44
2.3.1.2.1	VERIFICACIÓN DEL SELLO.....	44
2.3.1.2.2	REALIZACIÓN DE LA PRUEBA.....	44
2.3.1.2.3	EJEMPLOS:	45
2.3.1.3	INTERPRETACIÓN DE LA PRUEBA.....	46
2.4	ENSAYOS DE LABORATORIO	50
2.4.1	ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTO	50
2.4.1.1	OBJETO.....	50
2.4.1.2	SIGNIFICADO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	50
2.4.1.3	APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS	51
2.4.1.4	OBTENCION DE LA MUESTRA.....	53
2.4.1.5	PREPARACION DE LAS PROBETAS DE ENSAYO.....	54

2.4.1.6	PROCEDIMIENTO OPERATORIO.....	55
2.4.1.6.1	MARCA	55
2.4.1.6.2	COLOCACIÓN.....	55
2.4.1.6.3	CARGA.....	56
2.4.1.7	OBTENCION DE LOS RESULTADOS.....	56
2.4.1.8	EXPRESION DE LOS RESULTADOS.....	57
2.4.1.9	PRECISIÓN Y DESVIACIÓN.....	58
2.4.2	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.....	58
2.4.2.1	INSTRUMENTACIÓN	59
2.4.2.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	59
2.4.2.3	PROCEDIMIENTO	60
2.4.2.4	CÁLCULOS.....	60
2.4.2.5	REPORTE DE RESULTADOS.....	61
CAPÍTULO III.....		63
3. GEOLOGÍA DE SITIO DE PRESA – RÍO CUIRA		63
3.1	GEOGRAFÍA FÍSICA.....	63
3.1.1	RELIEVE	63
3.1.2	CLIMA.....	63
3.1.3	BIODIVERSIDAD	63
3.2	GEOLOGIA REGIONAL.....	66
3.3	GEOLOGÍA LOCAL.....	72
3.3.1	VASO DE ALMACENAMIENTO	73
3.3.1.1	LITOLOGÍA	73
3.3.1.2	ESTRUCTURAS	75

3.3.1.2.1	FALLAS.....	75
3.3.1.2.2	DIACLASAS.....	75
3.3.1.2.3	PLANOS DE BUZAMIENTO.....	76
3.3.2	SITIO DE PRESA.....	76
3.3.2.1	LITOLOGÍA.....	77
3.3.2.2	ESTRUCTURAS.....	78
3.3.2.2.1	FALLAS.....	78
3.3.2.2.2	DIACLASAS.....	79
3.4	GEOTECNIA DEL SITIO DE PRESA.....	80
3.4.1	REVISIÓN DE PERFORACIONES.....	80
3.4.2	CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO.....	82
3.4.3	PRUEBAS DE PERMEABILIDAD.....	93
CAPITULO IV.....		95
4.	GEOLOGÍA DE OTRAS PRESAS.....	95
4.1	AGUA BLANCA – ESTADO FALCÓN.....	95
4.1.1	VASO DE ALMACENAMIENTO.....	95
4.1.1.1	GEOMORFOLOGÍA.....	95
4.1.1.2	LITOLOGÍA.....	96
4.1.1.3	ESTRUCTURAS.....	98
4.1.2	SITIO DE PRESA.....	99
4.1.2.1	Litología.....	100
4.1.2.2	Estructuras.....	101
4.2	TAGUAZA – ESTADO MIRANDA.....	103
4.2.1	GEOMORFOLOGIA.....	103

4.2.2	ESTRATIGRAFÍA	105
4.3	EL DILUVIO - ESTADO ZULIA	109
4.3.1	LITOLOGÍA	109
4.3.2	UNIDADES GEOLÓGICO – GEOTÉCNICAS	111
4.4	YACAMBU – ESTADO LARA.....	113
4.4.1	GEOMORFOLOGIA.....	113
4.4.1.1	FISIOGRAFÍA.....	113
4.4.1.2	DRENAJE.....	115
4.4.1.3	ESTRATIGRAFÍA REGIONAL.....	116
4.4.1.4	LITOLOGÍA.....	118
4.4.1.5	SUELOS.....	120
4.5	RÍO MACHANGO – ESTADO ZULIA.....	122
4.5.1	GEOLOGÍA REGIONAL.....	123
4.5.2	GEOLOGÍA DEL SITIO DE PRESA:.....	125
4.6	RIO RIITO – ESTADO YARACUY.....	127
4.6.1	ASPECTOS GEOLOGICOS	127
4.6.2	LITOLOGIA.....	128
4.6.2.1	UNIDADES GEOLÓGICO - GEOTÉCNICAS.....	129
	CAPÍTULO V.....	131
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	131
5.1	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA	131
5.2	CORRELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO RQD Y LA PERMEABILIDAD LUGEON.....	133
	CAPÍTULO VI.....	144

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	144
6.1 CONCLUSIONES	144
6.2 RECOMENDACIONES	147
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	149
ANEXO I – MAPA GEOLÓGICO PERFILES TRANSVERSALES.....	150
ANEXO II – PLANILLAS DE PERFORACIÓN.....	151
ANEXO III – MEMORIA FOTOGRÁFICA NUCLEOS RECUPERADOS.....	154
ANEXO IV – RESULTADOS DE ENSAYOS.....	155
ANEXO V – MEMORIA FOTOGRÁFICA PETROGRAFÍAS.....	156

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación general de zona de estudio principal	1
Figura 2. Vista satelital de zona de estudio principal – sitio de presa Cuira.....	2
Figura 3. Mapa de ubicación de la zona de estudio principal	2
Figura 4. Presa de materiales sueltos	14
Figura 5. Presa de materiales sueltos El Diluvio, estado Zulia.....	15
Figura 6. Presa de gravedad de hormigón.....	16
Figura 7. Presa de gravedad Simón Bolívar (Guri), estado Bolívar.....	17
Figura 8. Presa en arco	17
Figura 9. Presa en arco Gral. José Antonio Páez (Santo Domingo), estado Mérida...	18
Figura 10. Presa Aligerada.....	19
Figura 11. Presa Aligerada en Pensacola, U.S.A.	20
Figura 12. Modelo de presa de concreto compactado.....	20
Figura 13. Presa de RCC El Guapo, estado Miranda.....	21
Figura 14. Representación gráfica de la medición y cálculo del índice RQD	25
Figura 15. Ensayo Lugeon	40
Figura 16. Relaciones presión – caudal en el ensayo Lugeon	46
Figura 17. Criterio para seleccionar el valor representativo de la prueba Lugeon	49
Figura 18. Dispositivo propuesto para el ensayo de resistencia a tracción indirecta “Método Brasileiro”	52
Figura 19. Ubicación de presa Agua Blanca.....	95
Figura 20. Ubicación de presa Taguaza	103
Figura 21. Ubicación de presa El Diluvio.....	109

Figura 22. Ubicación de presa Yacambú	113
Figura 23. Ubicación de presa Machango.....	122
Figura 24. Ubicación presa Rio Riito.....	127
Figura 25. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Agua Blanca”.....	137
Figura 26. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Machango”.....	138
Figura 27. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Yacambú”.....	139
Figura 28. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Río Riito”.....	140
Figura 29. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Cuirá”.....	141
Figura 30. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Taguaza”.....	142
Figura 31. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “El Diluvio”.....	143

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Métodos de clasificación de macizos rocosos	23
Tabla 2: Equivalencia entre métodos de clasificación de macizos rocosos	24
Tabla 3: Puntaje según el valor del R.Q.D.....	28
Tabla 4: Puntaje según resistencia a la Compresión Simple.....	28
Tabla 5: Puntaje según espaciamiento de discontinuidades del juego más importante.	29
Tabla 6: Puntaje según las condiciones de las discontinuidades.....	29
Tabla 7: Puntaje según las condiciones del agua subterránea.....	30
Tabla 8: Corrección por la orientación de las discontinuidades.	30
Tabla 9: Categoría de la Clasificación Geomecánica.	31
Tabla 10: Estimación de parámetros intervinientes - diaclasado	32
Tabla 11: Estimación de parámetros intervinientes - rugosidad.....	33
Tabla 12: Estimación de parámetros intervinientes - alteración	33
Tabla 13: Estimación de parámetros intervinientes – presencia de agua.....	34
Tabla 14: Estimación de parámetros intervinientes – S.R.F.....	34
Tabla 15: Clasificación final – Q de Barton.....	35
Tabla 16: Tabla actualizada para la estimación del GSI.....	38
Tabla 17: Familias de diaclasas – estribo derecho	79
Tabla 18: Familias de diaclasas – estribo izquierdo.....	79
Tabla 19: Tabla resumen de perforaciones	80
Tabla 20: Resistencia a la compresión de núcleos	83
Tabla 21: Clasificación de resistencia - roca intacta (Deere & Miller).....	84

Tabla 22: Valores de σ_t obtenidos	85
Tabla 23: Puntuación de las condiciones de las diaclasas según Bienawski(1989)....	87
Tabla 24: Clasificación según el Rock Mass Rating (RMR)	88
Tabla 25: Valores de las variables según el Q de Barton.....	89
Tabla 26: Clasificación Q de Barton.....	90
Tabla 27: Rango del Índice de Resistencia Geológica estimado (GSI)	91
Tabla 28: Tabla resumen de las clasificaciones geomecánicas.....	92
Tabla 28: Familias de diaclasas – vaso de almacenamiento, presa “Agua Blanca” ...	99
Tabla 29: familias de diaclasa – sitio de presa “Agua Blanca”.....	102
Tabla 30: Clasificación de discontinuidades según Pusch y sus y características hidráulicas	135

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 UBICACIÓN

El objetivo del presente trabajo especial de grado es la evaluación geológica geotécnica de distintos sitios de presa localizados en los estados Falcón, Zulia, Lara, Yaracuy y Miranda, de los cuales se tiene disposición de la información, aunque la data principal a ser analizada, será la de la exploración en el sitio “El Dinero” en el Río Caira, localizado en el Municipio Acevedo del estado Miranda, a unos 9 km al suroeste de Panaquire (N 1.123200 y E 796.000).



Figura 1. Ubicación general de zona de estudio principal

Fuente: tomado y modificado de Google Earth® 5.0

(Este sitio de presa fue estudiado por la empresa RGR Ingeniería C.A. para la gerencia del sistema de abastecimiento de agua Tuy IV de Hidrocapital, entre los años 2006 y 2007)

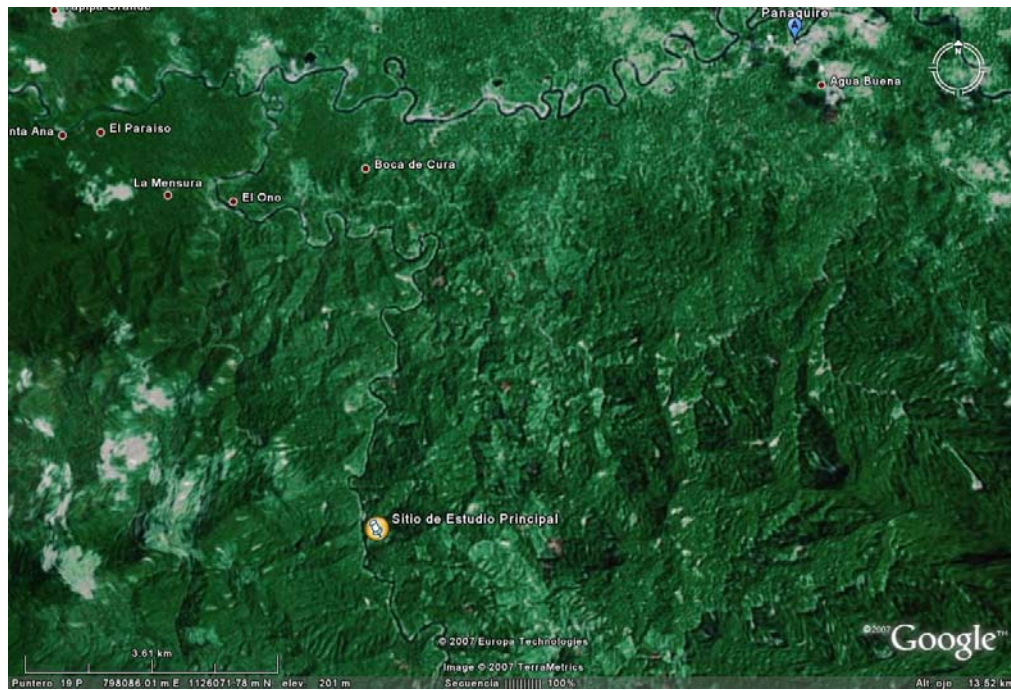


Figura 2. Vista satelital de zona de estudio principal – sitio de presa Cuira

Fuente: tomado y modificado de Google Earth® 5.0

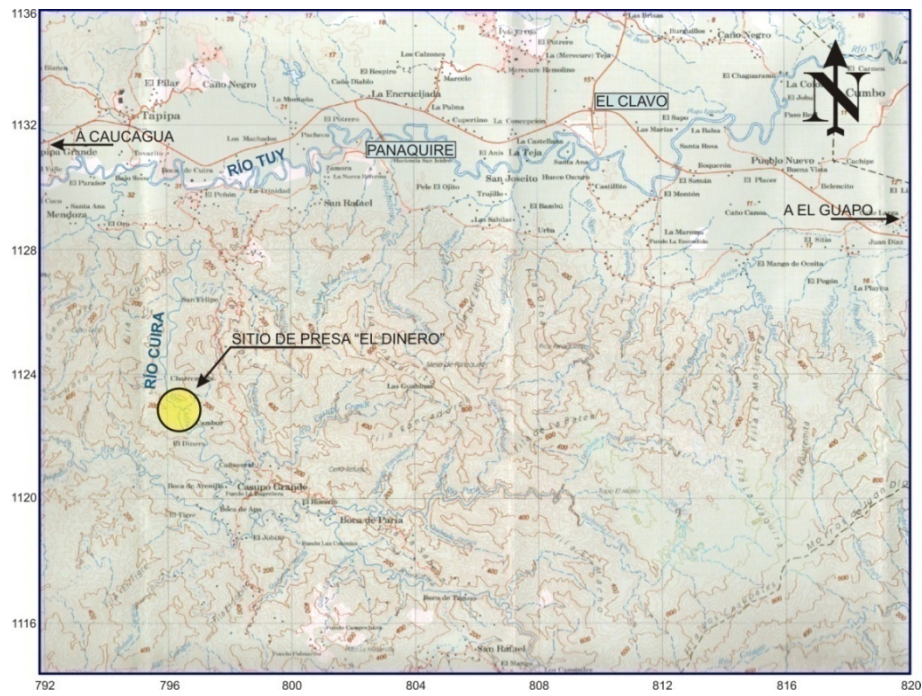


Figura 3. Mapa de ubicación de la zona de estudio principal

1.2 VIAS DE ACCESO

El acceso al sitio de estudio principal, luego de llegar por la Troncal 09 a Panaquire, se efectuó esencialmente con el uso de helicóptero y, ocasionalmente para el levantamiento geológico, navegando el mismo río.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso común del índice de calidad RQD, para calificar las condiciones de un macizo rocoso en cualquier proyecto de ingeniería, también se ha extendido a la caracterización de las fundaciones para presas, tal como la determinación de la estanqueidad del sitio de presa en estudio, variante de especial importancia en este tipo de obra. No obstante, en recientes exploraciones realizadas en rocas metavolcánicas del Grupo Villa de Cura, del sitio El Dinero, sobre el Río Cuira, no hubo mayor correspondencia entre los valores del RQD y las pruebas de permeabilidad a presión. En consecuencia, es necesario revisar si esta ocurrencia está asociada a un tipo de roca en particular y a su tipología de fracturamiento, lo cual llevaría a optimizar el uso del referido índice y, en consecuencia, a los diversos sistemas de clasificación geomecánica, que lo usan como elemento de convalidación de la aptitud del sitio de cierre.

De los pocos estudios que abordan el tema de la permeabilidad de las rocas, destaca el criterio que relaciona los grados de discontinuidad y la permeabilidad de los macizos rocosos ígneos (Pusch, Roland), el cual clasifica las discontinuidades en órdenes. En principio define un primer grupo como de **bajo orden**, donde incluye discontinuidades persistentes a nivel regional hasta zonas de fracturas locales con espaciamiento desde 30 a 150 m y con un ancho desde unos pocos decímetros a un par de metros. Luego agrupa como de discontinuidades de **alto orden**: desde fracturas discretas con un espaciamiento aproximado de 2 a 10 m, con pobre interacción entre ellas, de tal manera que su contribución a la permeabilidad del macizo rocoso es poca a nula hasta planos de debilidad o fisuras y espacios en la estructura cristalina, sin

permeabilidad alguna. En el caso de Cuira, este criterio pudiera encajar en una interpretación de los resultados obtenidos. Es necesario establecer si este criterio aplica a todo tipo de roca.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Debido al extenso uso del parámetro RQD, entre otros, para calificar las condiciones de un macizo rocoso en el diseño de fundaciones para presas, es importante determinar si existe correspondencia entre los valores de dicho parámetro y los resultados de las pruebas de permeabilidad a presión y de existir alguna relación, ver qué factores, como litología, grado de meteorización, etc., pueden incidir en esa relación.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo es determinar la validez del parámetro geotécnico RQD (Rock Quality Designation) en el estudio de la permeabilidad de sitios de presas, característica fundamental en el análisis de fundaciones de las mismas.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterización geomecánica del macizo rocoso del sitio de presa en el río Cuira.
- Determinar la correspondencia del parámetro RQD con la permeabilidad para diferentes tipos de rocas, mediante el estudio y comparación con otras presas.

1.6 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos se llevó a cabo la aplicación de una metodología sistemática basada en ocho fases fundamentales:

1.6.1 FASE DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Esta etapa consiste en la recopilación, revisión y validación de toda la información tanto Geológica, como Geotécnica de trabajos que se hayan hecho en la zona de estudio o relacionada con el tema, a través de publicaciones, trabajos previos, revisión del mapa topográfico y del mapa geológico de la zona y revisión de la información existente de estudios geotécnicos para fundaciones de presas.

Durante esta etapa se compiló el material considerado importante y necesario para el desarrollo del estudio:

- Mapas topográficos de la zona de estudio principal, realizados por la Dirección de Cartografía Nacional, cartas 6946 II – NO, 6946 – II – SO, 6946 – III – NO, 6946 – III – SE, 6946 – IV – NO y 6946 – IV – SE, a escala 1:25000.
- Mapas Geológicos realizados en base a la exploración del sitio de presa sobre el río Cuira.
- Categorización de fracturas.
- Revisión de conceptos básicos de ingeniería de presas.
- Revisión de definiciones básicas y los criterios de clasificación geomecánica.
- Revisión de definiciones básicas y métodos de determinación de permeabilidad en la exploración geotécnica de sitios de presa.
- Recopilación para su posterior análisis de los resultados de otros estudios de presas en diferentes tipos de roca: Agua Blanca (Edo. Falcón), donde

prevalecen rocas sedimentarias del Terciario, El Diluvio (Edo. Zulia), metavolcánicas del paleozoico tardío - triásico, Yacambú (Edo Lara), metamórficas del cretácico – terciario y Taguaza, (Edo. Miranda), sobre metavolcánicas similares a Cuira.

- Nueva fase de recopilación de información de presas fundadas en rocas sedimentarias del eoceno, Río Machango (Edo. Zulia) y metamórficas del mesozoico, Río Riito (Edo Yaracuy), para verificar tendencias de resultados iniciales.

1.6.2 FASE DE CAMPO

Durante esta etapa se llevó a cabo el reconocimiento, ubicación y delimitación del área de estudio. Se ubicaron vías de acceso, formaciones geológicas y demás puntos de interés mediante la información recopilada de los estudios anteriores que posteriormente fue extendida y convalidada por medio de geología de superficie. Esta fase se divide de la siguiente manera:

1.6.2.1 RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO DE SUPERFICIE

Durante el reconocimiento geológico de superficie, se recorrió el área de interés, con el propósito de validar la información ya obtenida del levantamiento realizado para el proyecto de presa, haciendo énfasis en el sitio de presa y en parte del vaso de almacenamiento, para así obtener las características geológicas de los afloramientos de la zona que permitieran caracterizar el subsuelo, mediante la determinación de la litología aflorante, familias de fallas y diaclasas, estructuras geológicas, entre otras, para así corroborar la información obtenida con anterioridad y elaborar el mapa geológico correspondiente.

1.6.2.2 ESTUDIO DE LOS NÚCLEOS RECUPERADOS EN LAS PERFORACIONES

En esta parte, se procedió a la descripción visual, táctil y su posterior análisis de los testigos recuperados en las perforaciones realizadas en el sitio de interés, para hallar entre otros, las distintas litologías que se encuentran en el subsuelo, su espesor, calcular el índice RQD de los núcleos, examinar la presencia de fracturas y rellenos, determinar mediante la presencia o no de óxido en las fracturas, si las mismas son pre-existentes o causadas por el manejo inadecuado de la máquina perforadora. En este sentido se revisaron una cantidad de 50 de las 300 cajas de muestras almacenadas en Panaquire, estado Miranda.

1.6.3 FASE DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO

En esta etapa, se estudió con detenimiento los ensayos efectuados durante el estudio previamente realizado o durante el desarrollo de este trabajo, para luego interpretarlos y procesar sus resultados en función de los objetivos propuestos. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

1.6.3.1 ENSAYO DE PERMEABILIDAD LUGEON

Estos fueron realizados durante la exploración previa para el proyecto de presa sobre el río Cuira y consiste en inyectar agua a presiones crecientes, en un tramo limitado por obturadores. Mediante estos ensayos se obtuvo la permeabilidad media de la zona afectada por los mismos.

1.6.3.2 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

Este análisis consiste en observar mediante un microscopio de polarización, secciones finas de rocas hechas para tal fin con la finalidad de identificar y estimar cuantitativamente sus componentes minerales, y en este caso para determinar con mayor exactitud las formaciones presentes

1.6.3.3 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL

Este ensayo consiste en aplicar cargas compresivas axiales cada vez mayores, a núcleos de rocas cilíndricas, hasta producir su rotura, con la finalidad de determinar su resistencia a dicha compresión.

1.6.3.4 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

El ensayo tiene como finalidad determinar la resistencia a la tracción de la roca y consiste en someter a una muestra cilíndrica de roca a una carga lineal compresiva actuando a lo largo de su diámetro. El resultado de este esfuerzo compresivo es una tensión horizontal y un esfuerzo compresivo variable. La muestra rocosa se suele romper en la mayoría de los casos separándose en dos mitades según el eje de carga diametral.

1.6.4 FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Culminada la etapa de campo y de análisis de los ensayos de campo y laboratorio, se pasó a procesar los datos obtenidos en estas fases mediante la elaboración de mapas, gráficas de discontinuidades y el ajuste de planillas de

perforación que contengan toda la información de los testigos recuperados en el sitio de estudio principal durante el estudio realizado anteriormente, al mismo tiempo que sintetizar la información geológica y las planillas de perforación, correspondientes a cada una de las otras presas y que resuman las características de la litología donde están fundadas, y que permitan posteriormente, la elaboración de gráficas que evidencien o no la existencia de relaciones entre el grado de fracturamiento de la roca y la permeabilidad de la misma, así como también de perfiles geotécnicos de la zona de estudio principal.

1.6.4.1 AJUSTE DE PLANILLAS DE PERFORACIÓN

Por medio de los datos derivados de las perforaciones ejecutadas en el área de interés, se procedió a plasmar los resultados de las mismas: litología encontrada, nivel freático, índice RQD y de las pruebas de permeabilidad Lugeon. Solo se verificaron las descripciones litológicas y los criterios de calificación de la calidad del macizo rocoso. Con estas planillas, posteriormente se hará el análisis comparativo con las otras presas estudiadas, a las cuales también se les elaboraron las planillas de perforación.

1.6.4.2 ELABORACIÓN DEL MAPA GEOLOGICO

Con la información recopilada de los estudios existentes y de la obtenida en campo, interpretando y sintetizando dicha información, mediante el uso del software AutoCAD 2008 se procedió a elaborar el mapa geológico de la zona estudiada, el cual complementa el presentado en el estudio, al incorporarse los datos obtenidos en la fase de campo del presente trabajo.

1.6.5 CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO DE LA PRESA CUIRA

Esta fase muy importante, se realiza mediante la interpretación sistemática de diversos parámetros geológicos-geotécnicos obtenidos durante las etapas anteriores, según el sistema de clasificación geomecánica en que se enmarque el macizo rocoso, en este caso, se utilizaron los sistemas Rock Mass Rating (RMR) desarrollado por Bienawski, el de Calidad de Macizo Rocosos o Q de Barton y el Geological Strength Index (GSI) desarrollado por Evert Hoek.

1.6.6 REVISIÓN DE PERFILES TRANSVERSALES

Utilizando el nuevo mapa geológico elaborado en la presente tesis, los índices RQD obtenidos, y los resultados de las pruebas de permeabilidad en campo se procedió a tomar los perfiles transversales, paralelos al eje de presa, realizados durante estudios previos, con el propósito de visualizar y comparar los RQD y unidades Lugeon de permeabilidad obtenidos.

1.6.7 ELABORACIÓN DE GRÁFICAS DE RQD VS PERMEABILIDAD

Para lograr una mejor visualización en la comparación entre los RQD y los valores de permeabilidad obtenidos, se elaboraron gráficas de dispersión para cada una de las presas, donde en el eje de las ordenadas se representan los porcentajes de RQD, y en el eje de las abscisas se representan los valores de permeabilidad obtenidos para el mismo intervalo.

1.6.8 COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE LAS OTRAS PRESAS ESTUDIADAS

Una vez culminadas las 7 etapas anteriores, se procedió a comparar estos resultados con los obtenidos en otras 6 presas estudiadas y que están fundadas sobre distintas litologías, con la finalidad de establecer relaciones, si las hay, entre la litología, el RQD y permeabilidad asociado a la misma.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS DE INGENIERÍA DE PRESAS

2.1.1 TIPOS DE PRESA

De la definición de presa se desprende que las mismas, son estructuras cuya razón de ser se funda en la condición de que el agua que retienen se utilice con tres finalidades alternativas o simultáneas:

- Elevar su nivel para poder conducirla
- Formar un depósito que retenga los excedentes hídricos, para poder compensar luego los períodos de escasez, o para amortiguar las crecidas.
- Producir energía eléctrica al transformar la energía potencial del almacenamiento de agua en energía cinética, y en energía mecánica al accionar la fuerza del agua turbinas productoras de electricidad.

Esa condición de producir un embalse, hace que el agua retenida ejerza un empuje de gran magnitud sobre la estructura, siendo ésta la mayor solicitación para la que debe diseñarse la obra. Desde el punto de vista resistente, el problema fundamental a resolver es la forma en que la presa absorberá la presión que le transmite el agua sin romperse y sin transmitir al terreno natural más carga de la que éste puede soportar.

Una corriente de agua posee una "fuerza" que es tanto más incontrolable cuanto mayor es su caudal y la pendiente del río. En el mismo sentido se incrementa su potencial destructivo. Al oponerle un obstáculo para embalsarla, la estructura llamada presa tiene que poder asimilar tal empuje de forma permanente, para cualquier condición de carga y transferirlo a la tierra. Tanto la forma en que la estructura resiste ese empuje, como la manera en que la transmite a tierra, determinarán el tipo de presa que el proyectista elija. La fundación o cimentación, a

su vez, debe ser capaz de soportar la presión a que la someterá la presa una vez lleno el embalse, cualidad denominada "capacidad portante" y que depende del tipo de suelo y/o roca que la conforma, es decir de la geología del emplazamiento.

La otra característica básica a considerar en el diseño de una presa, es que el agua penetra en todos los intersticios provocando presiones indeseadas dentro de la misma estructura, las que deben ser localizadas para diseñar la presa de manera que pueda resistirlas, y/o disipar el exceso de presión que esta condición genera, y/o buscar los mecanismos para que las partes de las obras que puedan ser dañadas resulten aisladas, protegidas o impermeabilizadas.

Otra importante condición la constituye la necesidad de lograr las premisas técnicas precedentemente enunciadas a un costo que permita la construcción económica de la obra, con esquemas factibles y aceptables para el mercado financiero. Esta búsqueda de alternativas económicas posibles, ha llevado en los últimos años a la incorporación de nuevos diseños y sistemas constructivos para las presas. Dos de ellos han tenido amplia difusión desde mediados de la década de 1980 hasta el presente debido a que, sin disminuir las condiciones de resistencia y durabilidad, se ha logrado disminuir los costos y los tiempos de construcción. Se trata de los sistemas conocidos como presa de materiales sueltos con cara de hormigón aguas arriba (sus siglas en inglés son C.F.R.D.) y presa de hormigón compactado a rodillo (sus siglas en inglés son R.C.C), esta última descrita más adelante.

De este análisis resulta la forma y materiales que el proyectista considera más aptos para cada caso.

- Presas de materiales sueltos
- Presas de gravedad de hormigón
- Presas en arco

- Presas aligeradas
- Presas de concreto compactado a rodillo ó RCC

2.1.1.1 PRESAS DE MATERIALES SUELTOS:

Son presas de gravedad en las que materiales provistos por la naturaleza no sufren ningún proceso químico de transformación, siendo tratados y colocados mediante procedimientos de compactación propios de la mecánica de suelos. En su composición intervienen, piedras, gravas, arenas, limos y arcillas, siendo denominadas como presas de escollera cuando más del 50 % del material está compuesto por piedra y presas de tierra cuando son materiales de granulometrías más pequeñas.

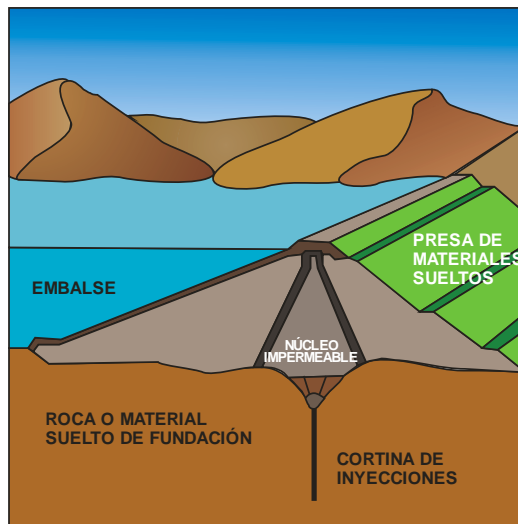


Figura 4. Presa de materiales sueltos

Fuente: elaboración propia

Cuando todo el material que componen las presas de materiales sueltos tiene las mismas características, se denominan homogéneas, pudiendo tratarse de materiales más o menos impermeables. O bien pueden ser heterogéneas,

que son las más comunes, cuando se colocan diferentes materiales zonificados, con núcleo impermeable y materiales más permeables a medida que nos alejamos del centro de la presa. La impermeabilidad puede lograrse también mediante pantallas o diafragmas. Estas variantes pueden presentarse mediante configuraciones que se integren con distintas participaciones de las diversas características mencionadas.

Las presas de materiales sueltos no soportan ser sobrepasadas por una crecida. Por ello es necesario, basándose en el conocimiento del comportamiento histórico del río, efectuar una predicción de la forma en que se deberá operar el embalse formado, para evitar que en toda la vida de la obra sea sobrepasada por ninguna crecida.



Figura 5. Presa de materiales sueltos El Diluvio, estado Zulia.

Fuente: Comité Venezolano de grandes presas (COVENPRE)

2.1.1.2 PRESAS DE GRAVEDAD DE HORMIGÓN

La presión que el agua ejerce sobre la presa, por un lado tiende a hacerla "deslizar" sobre su fundación y por otro a "volcarla" hacia aguas abajo. Las Presas de gravedad son todas aquellas en las que el peso propio de la presa es el que impide que se produzcan alguna de estas dos situaciones.

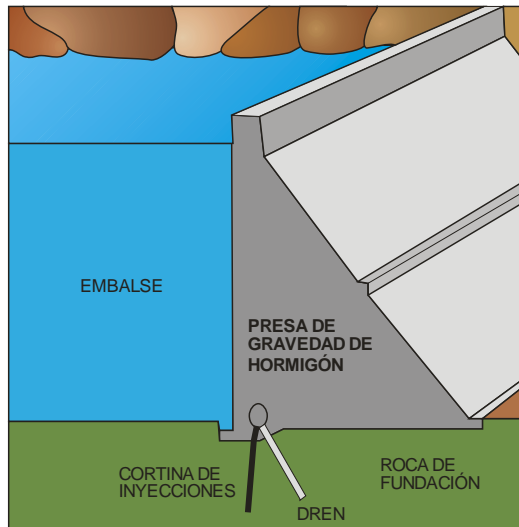


Figura 6. Presa de gravedad de hormigón

Fuente: elaboración propia

Se puede imaginar que la transferencia del empuje del agua hacia la fundación se realiza a través de la presa, la que será más estable cuanto "más pesada" sea. Desde este punto de vista, tanto una presa de materiales sueltos como una de hormigón, son de gravedad. Sin embargo, suelen llamarse así a las presas macizas de hormigón.

El cuerpo de las presas de hormigón, se compone de cemento, piedras, gravas y arenas, en proporciones variables según el tipo de estructura y las partes de las mismas que se trate. La particularidad de este material, que le permite adoptar complejas formas una vez fraguado, da la posibilidad de

optimizar la forma y, por lo tanto disponer el peso de una manera tal que sea mayor la capacidad de la presa en su conjunto para resistir el empuje.



Figura 7. Presa de gravedad Simón Bolívar (Guri), estado Bolívar

Fuente: Comité Venezolano de grandes presas (COVENPRE)

2.1.1.3 PRESAS EN ARCO

Las presas en arco transmiten el empuje del agua hacia su fundación y sus apoyos, denominados estribos, aprovechando su forma de "cáscara".

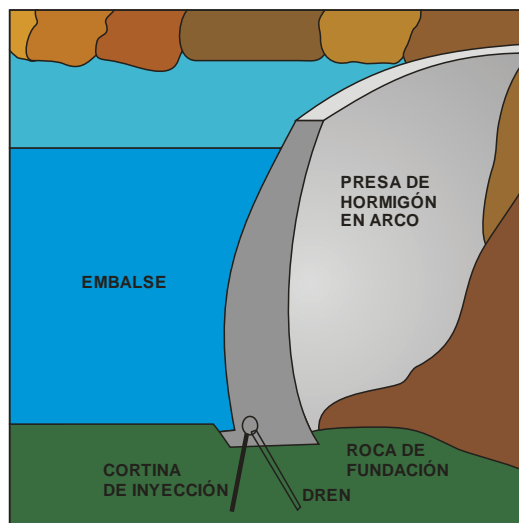


Figura 8. Presa en arco

Fuente: elaboración propia

Las presas en arco pueden ser de curvatura horizontal o de doble curvatura conocidas como bóveda o cúpulas. Las presas de arco son sumamente esbeltas adquiriendo formas muy audaces y complejas, las que les permiten ser muy altas y de poco espesor. Para lograr sus complejas formas se construyen con hormigón y requieren gran habilidad y experiencia de sus constructores, los que deben recurrir a poco comunes sistemas constructivos.

Debido a que transfieren en forma muy concentrada la presión del agua al terreno natural, se requiere que éste sea de roca muy sana y resistente, la que debe también ser muy bien tratada antes de asentar en ella la presa.

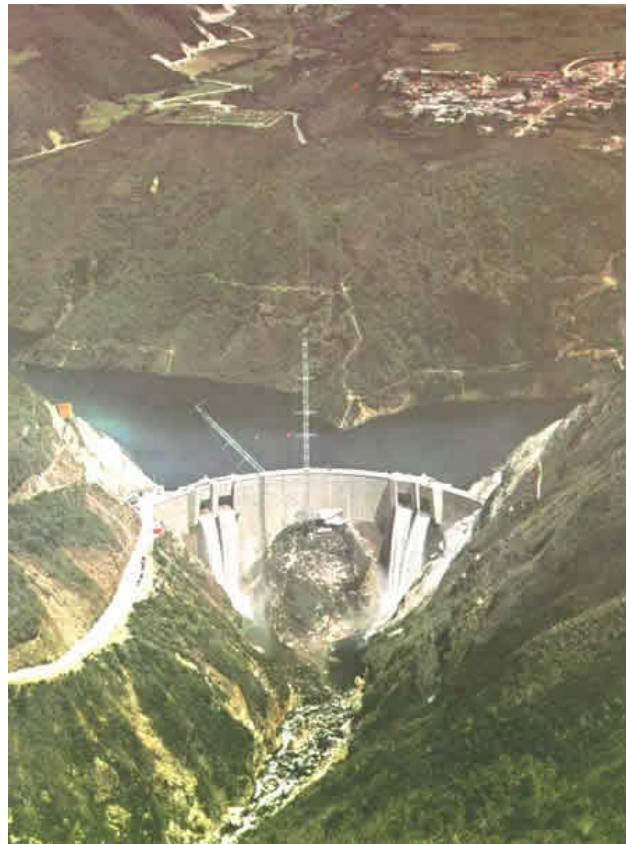


Figura 9. Presa en arco Gral. José Antonio Páez (Santo Domingo), estado Mérida

Fuente: Comité Venezolano de grandes presas (COVENPRE)

2.1.1.4 PRESAS ALIGERADAS

En las presas aligeradas, para resistir el empuje del agua, se reemplaza la utilización de hormigón en grandes masas por un cuerpo resistente más liviano integrado por elementos estructurales tales como columnas, losas y vigas. La presión del agua, distribuida a lo largo de una superficie, se transforma en fuerzas concentradas y se "conduce" a los apoyos de la presa mediante elementos planos y lineales.

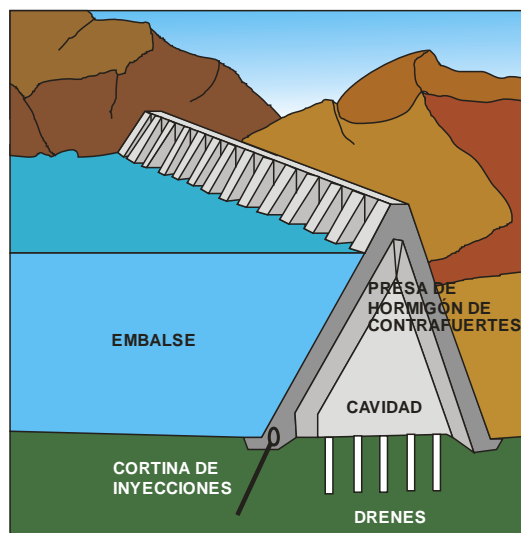


Figura 10. Presa Aligerada

Fuente: elaboración propia

Las presas del tipo aligeradas más conocidas son las de contrafuertes verticales. Estos son especies de costillas estructurales perpendiculares al eje de la presa, que se unen hacia aguas arriba con losas de hormigón que "sostienen" el agua, reciben su empuje y lo "transmite" a los contrafuertes, los que a su vez trasladan los esfuerzos a las fundaciones de la presa.



Figura 11. Presa Aligerada en Pensacola, U.S.A.

Fuente: United States Society of Dams

2.1.1.5 PRESAS DE CONCRETO COMPACTADO A RODILLO

Esta es una presa que se pudiera considerar híbrida, ya que posee características derivadas de presas de materiales sueltos así como de gravedad de concreto.

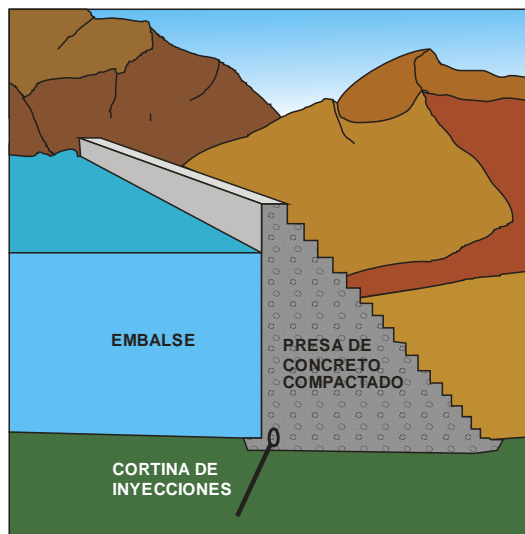


Figura 12. Modelo de presa de concreto compactado

Este tipo de presas surge de la necesidad de diseñar presas de gravedad en concreto, combinando las ventajas de utilizar en lo posible los grandes equipos de la puesta en obra (transporte y colocación) de la presa de materiales sueltos con las ventajas del concreto como material de construcción, dando origen a lo que es hoy el concreto compactado con rodillo o RCC, por sus siglas en inglés, material de aplicación más rápida, seguro y económico. En este último apartado, las presas de RCC poseen tres diferencias a su favor con respecto a las presas de concreto convencional: economía en el tiempo de construcción (por el uso de maquinaria pesada), economía de la puesta en obra (debido a la reducción de formaletas y juntas) y en la economía del conglomerante (reducción del contenido de cemento). Con respecto a las presas de materiales sueltos, también posee sus ventajas: El vertedero puede construirse dentro del mismo cuerpo de la presa, con lo que se ahorra significativamente en excavación y en estudios relativos a problemas de estabilidad de taludes, las torres de tomas pueden anclarse en el paramento de aguas arriba de la presa, lo que disminuye los costos de diseño y construcción, entre otras ventajas.



Figura 13. Presa de RCC El Guapo, estado Miranda

Fuente: Comité Venezolano de grandes presas (COVENPRE)

2.1.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA PRESA – EMBALSE:

- **El embalse:** es el volumen de agua que queda retenido por la presa.
- **El vaso:** es la parte del valle que, inundándose, contiene el agua embalsada.
- **La cerrada o boquilla:** es el punto concreto del terreno donde se construye la presa.
- **La presa:** propiamente dicha, cuyas funciones básicas son, por un lado garantizar la estabilidad de toda la construcción, soportando un empuje hidrostático del agua muy fuerte, y por otro no permitir la filtración del agua hacia abajo.

A su vez, en la presa se distingue:

- **Los paramentos:** son las dos superficies más o menos verticales principales que limitan el cuerpo de la presa, el interior o de aguas arriba, que está en contacto con el agua, y el exterior o de aguas abajo.
- **La coronación:** es la superficie que delimita la presa superiormente.
- **Los estribos:** los laterales del muro que están en contacto con la cerrada contra la que se apoya.
- **La cimentación:** la superficie inferior de la presa, a través de la cual descarga su peso al terreno.
- **El aliviadero o vertedero:** es la estructura hidráulica por la que rebosa el agua excedente cuando la presa ya está llena.
- **Las tomas** son también estructuras hidráulicas, pero de mucha menos entidad, y son utilizadas para extraer agua de la presa para un cierto uso, como puede ser abastecimiento a una central hidroeléctrica o a una ciudad.
- **La descarga de fondo:** permite mantener el denominado caudal ecológico aguas abajo de la presa.

- **Las esclusas:** que permiten la navegación "a través" de la presa.
- **La escalera de peces:** que permite la migración de los peces en sentido ascendente de la corriente.

2.2 MÉTODOS DE ESTUDIO Y CLASIFICACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS

La necesidad de construir túneles llevó a los ingenieros a buscar una forma práctica de evaluar la calidad de la roca a intervenir desde el punto de vista ingenieril.

Diferentes criterios, todos ellos provenientes de expertos de indiscutible trayectoria, dieron como resultante una serie de métodos de evaluación y valoración:

Tabla 1: Métodos de clasificación de macizos rocosos

MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS	
MÉTODOS CUALITATIVOS	TERZAGHI (1946) LAUFFER (1958)
MÉTODOS CUALI/ CUANTITATIVOS	DEERE "RQD" (1964) BIENIAWSKI (1973) BARTON, LIEM y LUNDE "Q" (1974) JACOBS ASSOC. "RSR" (1984) BIENIAWSKI "RMR" (1984)

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

La necesidad de unificar criterios llevó a la comparación de los métodos más conocidos y a establecer entre ellos equivalencias, lo cual permitió en cierta manera uniformar la concepción de la calidad de los macizos rocosos o al menos poder efectuar calibraciones más adecuadas.

Una de las equivalencias planteadas es la efectuada entre el método de índole descriptivo de Terzaghi (1946) y el método cualitativo de Lauffer (1958).

Tabla 2: Equivalencia entre métodos de clasificación de macizos rocosos

EQUIVALENCIAS ENTRE METODOS DE CLASIFICACION DE MACIZOS ROCOSOS	
Clasificación de Terzaghi (1946)	Clasificación de Lauffer (1958)
DESCRIPTIVA	CUALITATIVA
Roca intacta	Clase A: Roca estable
Roca estratificada	Clase B: Roca inestable a largo plazo
Roca moderadamente fracturada	Clase C: Roca inestable a corto plazo
Roca en bloques imperfectos vinculados	Clase D: Roca triturada
Roca triturada, químicamente intacta	Clase E: Roca muy triturada
Roca compresible	Clase F: Roca compresible
Roca expansiva	Clase G: Roca muy compresible

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

2.2.1 ALGUNOS MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS

2.2.1.1 CLASIFICACIÓN DE DEERE O R.Q.D. (1964)

La clasificación de Deere o del RQD (RQD = Rock Quality Designation) se funda en la cuantificación del grado de fractura de la roca.

RQD = ROCK QUALITY DESIGNATION

Permite la obtención de un índice, que es un valor cuantitativo que representa la calidad del macizo rocoso, teniendo en cuenta las características del testigo recuperado en una perforación.

Así, realizando una perforación con maquinaria específicamente empleadas en estas operaciones, puede evaluarse la calidad del macizo rocoso subyacente sobre la base del análisis del material que se obtiene de esa perforación.

Ordinariamente, se contempla entonces la planificación de una serie de perforaciones según el proyecto y se obtienen las características en cada punto. En función de la homogeneidad o heterogeneidad observadas, se realizan perforaciones complementarias para clarificar la situación en zonas que podrían ser consideradas a priori como críticas.

Los testigos se van colocando en cajones especiales en cuyos bordes constan las progresivas de profundidad.

De una perforación pueden extraerse trozos enteros de roca (donde la roca no está fracturada) hasta que se encuentra una discontinuidad en la masa rocosa (el testigo se interrumpe). Esta llegada a una discontinuidad puede significar que es simplemente una fractura o una diaclasa limpias o con algún material intermedio. Pero también puede tratarse de una zona de roca muy fracturada, de la cual sólo se extraen trozos de roca, contabilizándose el espacio de esta parte, si se trata de una transición.

Todos estos trozos enteros de testigo o estas partes de roca fracturada se miden y se contabilizan para entonces aplicarlos a una fórmula de cálculo (ver figura 14).

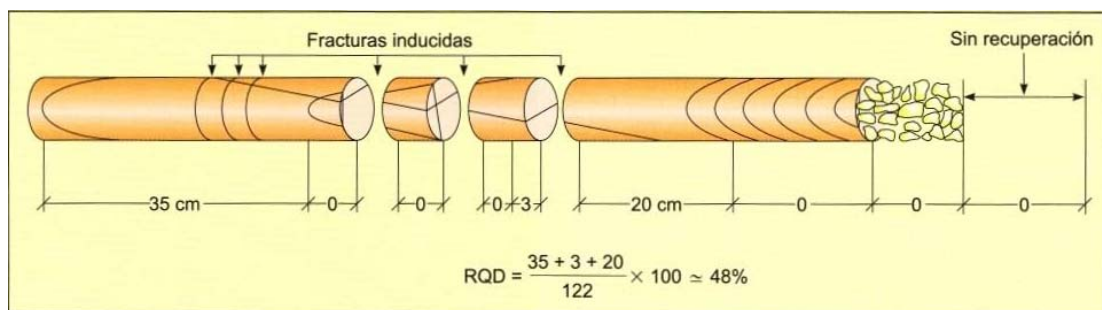


Figura 14. Representación gráfica de la medición y cálculo del índice RQD

Fuente: González de Vallejo (2002)

La condición para ser contabilizadas es que éstas tengan una longitud mayor que 0,1 m.

La fórmula a aplicar es:

$$RQD = \frac{\text{Longitud recuperada en piezas } \geq 0,1 \text{ m} \times 100}{\text{Longitud del sondeo}}$$

Donde:

l = Longitud recuperada (en metros)

L = Longitud del sondeo (en metros)

Experimentalmente, se cumple que la curva de distribución es del tipo exponencial negativa en un gráfico Frecuencia - Espaciamiento:

$$RQD = 100 \cdot e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

Donde λ es la frecuencia media de discontinuidades por metro

$$\lambda = \frac{\text{Cantidad de Dislocaciones}}{\text{Longitud del Sondeo}}$$

El error comprobado es de +/- 5%.

2.2.1.2 CLASIFICACIÓN DE BIENAWSKI (1973)

Este método le da un peso a cada uno de una serie de parámetros que se han integrado a una fórmula en la cual participan:

- El RQD
- El grado de alteración de la roca
- La resistencia de la roca sana (compresión simple, en Kg/cm²)

- La separación promedio entre diaclasas (espaciamiento en el juego más desfavorable)
- La apertura de las diaclasas
- La continuidad o extensión de las diaclasas (persistencia)
- El flujo del agua que pudiere observarse en las discontinuidades relevadas
- La orientación de las diaclasas (rumbo y buzamiento)

2.2.1.3 CLASIFICACIÓN DE BIENAWSKI (1984)

Este método engloba algunos parámetros en términos genéricos:

RMR = ROCK MASS RATING

La clasificación geomecánica **RMR** fue presentada por Bieniawski en 1973, siendo modificada sucesivamente por el autor en 1976, 1979, 1984 y 1989. Consta de un RMR básico, independiente de la estructura de la roca, y de un factor de ajuste.

El RMR básico se obtiene estimando el rango de valores de varios parámetros:

- El RQD
- Ensayo de compresión simple
- Espaciamiento de las diaclasas (juego más desfavorable)
- Condiciones de las diaclasas (4 + 5 de Bieniawski 1973)
- Condiciones del agua subterránea
- Orientación de las diaclasas (favorabilidad de Rumbo y Buzamiento)

El método se aplica asignando la valoración correspondiente para cada parámetro.

El factor de ajuste, definido cualitativamente, depende de la orientación de las discontinuidades y tiene valores distintos según se aplique a túneles, cimentaciones o taludes.

El resultado de la resta (el factor de ajuste es negativo) es el índice final RMR, que puede variar entre 0 y 100, y que clasifica los macizos rocosos en cinco clases.

Presentamos seguidamente las Tablas dirigidas a la evaluación expeditiva de macizos rocosos de Bieniawski:

Tabla 3: Puntaje según el valor del R.Q.D.

R.Q.D. (%)	Puntaje
90 - 100	20
75 - 90	17
50 - 75	13
25 - 50	8
< 25	3

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 4: Puntaje según resistencia a la Compresión Simple.

Indice del Ensayo de Carga Puntual (MPa)	Resistencia a la Compresión Simple (RCS) (MPa)	Puntaje
>10	> 250	15
4 – 10	100 – 250	12
2 – 4	50 – 100	7
1 – 2	25 – 50	4
--	10 – 25	2
--	3 – 10	1
--	< 3	0

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 5: Puntaje según espaciamiento de discontinuidades del juego más importante.

Espaciamiento (m)	Puntaje
>2	20
0,6 – 2,0	15
0,2 – 0,6	10
0,06 – 0,2	8
< 0,06	5

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 6: Puntaje según las condiciones de las discontinuidades.

Descripción	Puntaje
Superficies muy rugosas, de poca extensión, paredes de roca resistente	15
Superficies poco rugosas, apertura menor a 1 mm, paredes de roca resistente	12
Idem al anterior, pero con paredes de roca blanda	7
Superficies suaves ó relleno de falla de 1 a 5 mm de espesor ó apertura de 1 a 5 mm, las discontinuidades se extienden por varios metros	4
Discontinuidades abiertas, con relleno de falla de más de 5 mm de espesor ó apertura de más de 5 mm, las discontinuidades se extienden por varios metros	0

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 7: Puntaje según las condiciones del agua subterránea.

Filtración por cada 10m de longitud de túnel (L/min)	Presión del agua en la discontinuidad dividido la tensión Principal Mayor	Condiciones Generales	Puntaje
Nada	0	Completamente seco	15
< 10	0,0 – 0,1	Apenas húmedo	12
10 – 25	0,1 – 0,2	Húmedo	7
25 – 125	0,2 – 0,5	Goteo	4
> 125	> 0,5	Flujo continuo	0

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 8: Corrección por la orientación de las discontinuidades.

Evaluación de la influencia de la orientación para la obra	Puntaje para Túneles	Puntaje para Fundaciones
Muy favorable	0	0
Favorable	-2	-2
Medio	-5	-7
Desfavorable	-10	-15
Muy desfavorable	-12	-25

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 9: Categoría de la Clasificación Geomecánica.

CLASIFICACION GEOMECANICA FINAL (Bieniawski)		
R.M.R. Suma de los puntajes de las tablas	Calificación del Macizo Rocosó	Clase
81 – 100	Muy bueno	I
61 – 80	Bueno	II
41 – 60	Medio	III
21 – 40	Malo	IV
0 – 20	Muy malo	V

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

2.2.1.4 CLASIFICACIÓN DE BARTON (1974)

El método de Barton permite calcular la velocidad de avance de construcción de un túnel PR a través del índice Q_{TBM} .

2.2.1.5 INDICE Q DE BARTON (simplificado)

En esta clasificación se catalogan los macizos rocosos según un denominado *índice de calidad Q* (Barton et al. 1974):

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

Donde los parámetros son los siguientes:

- R.Q.D.: Rock Quality Designation
- Jn: Número de familias de diaclasas

- Jr: Rugosidad de las caras de las diaclasas
- Ja: Meteorización de las diaclasas
- Jw: Agua en las diaclasas
- S.R.F.: Factor de reducción *Stress Reduction Factor*

2.2.1.6 INDICE Q (Simplificado) DE BARTON et al., (1974)

Tabla 10: Estimación de parámetros intervinientes - diaclasado

Indice de Diaclasado Jn	Valor
Roca Masiva	0,5 - 1
Una familia de diaclasas	2
Una familia de diaclasas, con otras diaclasas ocasionales	3
Dos familias de diaclasas	4
Dos familias de diaclasas, con otras diaclasas ocasionales	6
Tres familias de diaclasas	9
Tres familias de diaclasas, con otras diaclasas ocasionales	12
Cuatro o más familias, roca muy fracturada	15
Roca triturada	20

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 11: Estimación de parámetros intervinientes - rugosidad

Indice de Rugosidad Jr	Valor
Diaclasas rellenas	1
<u>Diaclasas limpias</u>	
Discontinuas	4
Onduladas rugosas	3
Onduladas lisas	2
Planas rugosas	1,5
Planas lisas	1
<u>Lisos o espejos de falla</u>	
Ondulados	1,5
Planos	0,5

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 12: Estimación de parámetros intervinientes - alteración

Indice de Alteración Ja	Valor
Diaclasas de paredes sanas	0,75 - 1
Ligera alteracion	2
Alteraciones arcillosas	4
Con detritos arenosos	4
Con detritos arcillosos preconsolidados	6
Con detritos arcillosos poco consolidados	8
Con detritos arcillosos expansivos	8 - 12
Milonita de roca y arcilla	6 - 12
Milonita de arcilla limosa	5
Milonita arcillosas gruesa	10 - 20

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 13: Estimación de parámetros intervinientes – presencia de agua

Coefficiente reductor por presencia de agua J_w	Presión de agua [Kg/cm²]	Valor
Excavaciones secas a con < 5 l/min localmente	<1	1
Afluencia media con lavado de algunas diaclasas	1 - 2,5	0,66
Afluencia importante por diaclasas limpias	2,5 - 10	0,5
Afluencia importante por diaclasas limpias con lavado	2,5 - 10	0,33
Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo	> 10	0,2 - 0,1
Afluencia excepcional inicial, constante con el tiempo	> 10	0,1 - 0,05

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 14: Estimación de parámetros intervinientes – S.R.F.

Parametro S.R.F. (Stress Reduction Factor) (Factor de reducción de tensiones)	Valor
Zonas débiles	
Multitud de zonas débiles o milonitas	10
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta (cobertura > 50 m)	5
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta con cobertura > 50 m.	2,5
Abundantes zonas débiles en roca competente	7,5
Zonas débiles aisladas en roca competente (cobertura > 50 m)	5
Idem con cobertura > 50 m	2,5
Terreno en bloques muy fracturado	5
Roca competente	
Pequeña cobertura	2,5
Cobertura media	1
Gran cobertura	0,5 - 2,0
Terreno fluyente	
Con bajas presiones	5 - 10
Con altas presiones	10 - 20
Terreno expansivo	
Con presión de hinchamiento moderada	5 - 10
Con presión de hinchamiento alta	10 - 15

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

Tabla 15: Clasificación final – Q de Barton

TABLA DE CLASIFICACION FINAL	(Q)
Excepcionalmente malo	< 0,01
Extremadamente malo	0,01 - 0,1
Muy malo	0,1 - 1
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	> 400

Fuente: departamento de geotecnia – Universidad Nacional de Córdoba

2.2.1.7 GEOLOGICAL STRENGTH INDEX – GSI

El Doctor Evert Hoek publicó en 1994 en el noticiero oficial de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, el artículo titulado “*Strength of Rock and Rock Masses*” en el cual introdujo, definiéndolo “Índice de Resistencia Geológica” (*Geological Strength Index*), un nuevo índice de calidad geomecánica para los macizos rocosos cuyo rango numérico, comprendido entre 0 y 100, se basa en la identificación y clasificación en campo de dos de las características físicomecánicas de un macizo rocoso: La macroestructura, y la condición de las superficies de las discontinuidades.

Lo que más hace interesante el GSI, además de su sencillez y agudeza, es su carácter intrínseco a la geomecánica de los macizos rocosos, toda vez que el mismo no depende de factores extrínsecos cuales por ejemplo, la orientación, la pretensión, la humedad, etc., así como en cambio sucede para la mayor parte de los otros índices de calidad propuestos y utilizados, como por ejemplo el RMR de Bieniawski, el RSR de Wickham y el Q de Barton, ni

se reduce a la caracterización casi únicamente geométrica del macizo, como por ejemplo ocurre para el RQD de Deere. Quizás el único índice de calidad que posee carácter igualmente intrínseco es el también interesante RMi de Palmström; todos mencionados anteriormente.

Es en efecto tal carácter intrínseco del GSI, que permitió a su autor proponerlo para que fuera utilizado esencialmente para el importante objetivo de estimar y cuantificar numéricamente las principales características geomecánicas de los macizos rocosos, marcando de tal manera un paso gigantesco hacia la resolución de uno de los más álgidos problemas de la mecánica e ingeniería de rocas: el GSI provee un sistema para estimar la reducción de la resistencia y aumento de la deformabilidad de las rocas que se producen al pasar de los materiales a los macizos, al pasar o sea de la caracterización de laboratorio sobre muestras de dimensiones necesariamente muy limitadas a las formaciones naturales dentro de las cuales se realizan las obras de ingeniería que requieren ser numéricamente analizadas diseñadas o verificadas.

Tal como lo indica Hoek (2004), el GSI ha sufrido diversas modificaciones desde su versión original; siendo una de éstas la publicada en 1998 por Hoek, Marinos y Benissi, donde se amplía el rango del GSI en 5 unidades hacia abajo y 5 unidades hacia arriba, para poder incluir macizos rocosos del calidad extremadamente mala como los encontrados en las excavaciones para el metro de Atenas y algunos túneles en Venezuela.

Hoek (2000) sugiere hacer referencia a un rango y no a un valor único del GSI; también sugiere que para macizos rocosos caracterizados con un GSI > 25 es más conveniente estimar este valor a partir del RMR de Bieniawski, sin incluir el factor de corrección por orientación de las diaclasas y considerando el frente seco (RMR'89); en macizos rocosos de baja calidad con GSI < 25 , se estima el GSI en base a observaciones de la apariencia física

del macizo rocoso, ya que en estas circunstancias es difícil obtener núcleos intactos de rocas mayores a 10 cm para poder determinar el valor del RQD. La correlación entre estos dos sistemas de clasificación es la siguiente:







$$\text{GSI} = \text{RMR}'89 - 5$$

Adicionalmente, Russo en 1998 propone estimar el GSI también a partir del índice Q de Barton, depurándolo del factor de tensión (SRF) y asignando un valor de 1 al parámetro agua (J_w), obteniendo luego, de acuerdo con la preexistente correlación entre Q y RMR; siendo la correlación entre el GSI y el sistema Q la siguiente:

$$\text{GSI} = 9 \lg Q' + 44.$$

A continuación en la tabla 16 se presenta la versión actualizada de la tabla para la estimación del GSI.

Tabla 16: Tabla actualizada para la estimación del GSI

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR EL INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación,		CONDICIÓN SUPERFICIE DE DISCONTINUIDAD								
ESTRUCTURA		MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA				
		Muy rugosa, bordes sanos, superficies cerradas, sin rellenos	Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura menor a 0.1 mm, predominan los rellenos	Ligeramente rugosa, moderadamente meteorizada, abertura entre 0.1-1.0 mm, rellenos duros y blandos	Lisa, muy meteorizada, abertura entre 1.0-5.0 mm, predominan los rellenos blandos	Espejos de falla, superficies descompuestas, abertura mayor a 5.0 mm, rellenos blandos				
		DISMINUCIÓN EN CALIDAD DE SUPERFICIE								
	INTACTA O MASIVA macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	NO FOLIADA/FRACTURADA macizo rocoso poco perturbado consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas ortogonales de discontinuidades, muy bien unidos entre sí	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	NO FOLIADA/MUY FRACTURADA macizo rocoso parcialmente perturbado consistente de bloques angulares unidos entre sí, formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades.	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	NO FOLIADA/PERTURBADA macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de varios sistemas de discontinuidades.	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	NO FOLIADA/DESINTEGRADA macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente unidos entre sí.	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	BRECHADA/CIZALLADA macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

GSI:

Fuente: Modificado de Impregilo S.P.A. (2004) y Hoek (2004)

2.3 PERMEABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS

La permeabilidad constituye una de las propiedades de los macizos que presentan mayor variación dentro de una misma formación rocosa. Por ello, cuando se cuantifica la permeabilidad de un macizo rocoso es más propio hablar de un orden de magnitud (exponente en una base 10) que de valores precisos. En macizos rocosos sanos, la permeabilidad puede ser muy baja, del orden del $10^{-8} - 10^{-10}$ cm/s, aunque si el macizo rocoso está formado por matriz rocosa porosa y permeable, arenisca por ejemplo, sus valores pueden alcanzar hasta 10^{-3} cm/s. La permeabilidad de un macizo rocoso diaclasado, puede llegar a 10^{-2} y 10^{-3} cm/s.

El ensayo más extendido para determinar la permeabilidad de un macizo rocoso es el ensayo Lugeón.

2.3.1 ENSAYO LUGEON

El ensayo Lugeon se realiza en el interior de las perforaciones y permite calcular semicuantitativamente la permeabilidad de los macizos rocosos, en cualquier tipo de litología y estado de fracturación. Estos se ejecutan según avanza la perforación, es necesario ejercer presiones relativamente grandes para inyectar el agua en las fisuras. Supongamos una perforación invadida hasta una cierta profundidad. A partir de ella se perforan unos 5 metros. A continuación se fija un obturador en la parte superior de este tramo virgen y se inyecta agua a presión con una bomba. Un manómetro colocado en la boca del pozo, un contador de agua y una válvula de descarga, permiten medir los caudales inyectados a una presión dada (ver figura 15).

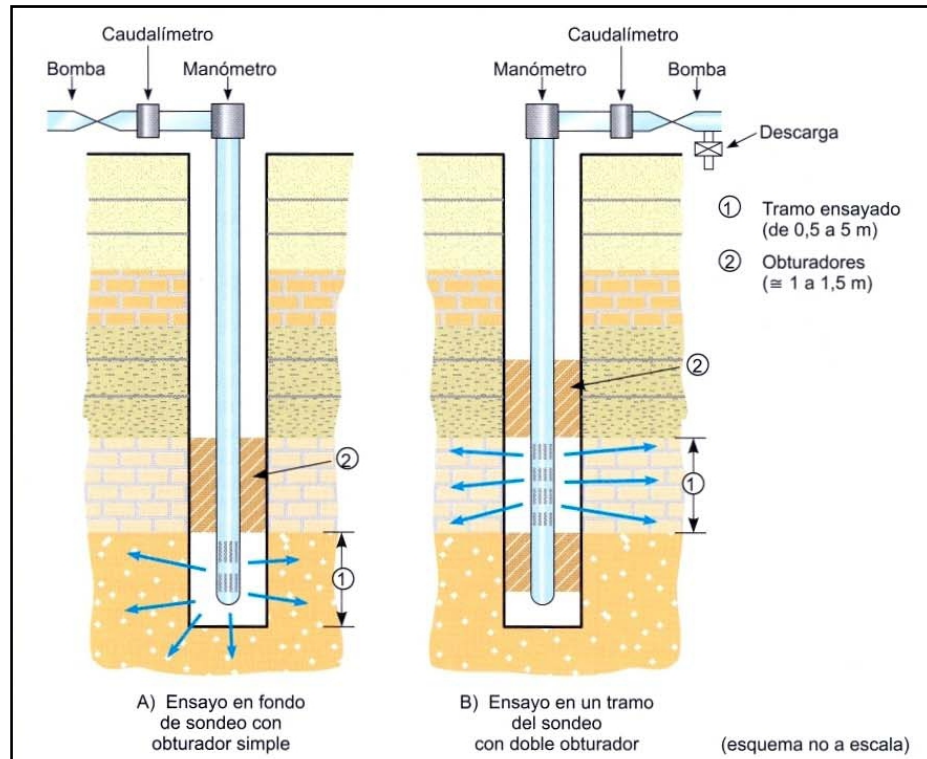


Figura 15. Ensayo Lugeon

Fuente: González de Vallejo (2002)

En general, se mide durante diez minutos el caudal inyectando a una presión constante. Después se trabaja con una presión mayor. La gama de presiones a emplear depende del estado de fisuración, pero al menos se emplean dos o tres valores que se volverán a utilizar cuando se haya alcanzado la presión máxima. Esta raramente es mayor a 10 kg/cm^2 , ya que existe un límite a causa de la presencia del obturador y de la potencia de las bombas. Por otra parte, se corre el riesgo de producir una fracturación artificial y trastornos del terreno que falsearían los resultados.

Lugeon preconiza expresar los resultados evaluando la absorción con una presión de 10 kg/cm^2 en litros por minuto y por metro, con una duración del ensayo de 10 minutos. En su honor se denomina Lugeon a esta unidad.

La unidad Lugeon (U.L.) es el gasto de litros por minuto en 1,0 m de longitud en el tramo de prueba, bajo la presión de 10 kilogramos por centímetro cuadrado.

En efecto, Lugeon considera únicamente las presiones indicadas por el manómetro que se coloca en la superficie. Como las perforaciones y la tubería de conducción del agua son de pequeño diámetro, si los caudales inyectados son grandes y el tramo ensayado es un poco profundo, las pérdidas de carga en la tubería son del mismo orden de magnitud que las presiones medidas en el manómetro. Algunas veces es necesario determinar factores de corrección para las pérdidas de carga, así como para la profundidad del nivel freático. Mientras estos refinamientos con certeza afinan la exactitud del resultado, con frecuencia no se obtiene ninguna ventaja de dichas mejoras, ya que no son de importancia a la hora de decidir si se debe utilizar lechada, por lo que se suele omitir las correcciones de presión, pero se tiene este factor presente durante el proceso de cálculo y evaluación, esto de acuerdo al criterio de Housby (1990).

El ensayo Lugeon tiene su máxima sensibilidad en situaciones de baja permeabilidad. Esto es apropiado ya que en estos casos es donde debe decidirse si la cementación con lechada puede o no ser excluida, por lo que se necesita una mayor precisión que cuando la permeabilidad es elevada y la lechada es obviamente requerida.

A medida que aumenta el valor de la unidad Lugeon, la variación también debe aumentar para que sea significativa, como se muestra a continuación:

- En el rango de 1 a 5, cada variación de una unidad es representativa.
- Entre 5 y 10, incrementos significativos son de 2 unidades.
- Entre 10 y 15, incrementos significativos son de 5 unidades.
- Entre 15 y 50, incrementos significativos son de 10 unidades.
- Entre 50 y 100, incrementos significativos son de 30 unidades.

Aun cuando la escala no tiene límite superior, por encima de 100 U.L. se obtiene el mismo resultado en términos de aplicación de lechada: es muy necesaria. Las U.L. no deben tener decimales, siempre se aproximan al número entero más cercano, exceptuando los valores menores a 1, los cuales serán aproximados a la unidad (Houlsby 1990).

La comparación de los resultados obtenidos con presiones crecientes y decrecientes es muy instructiva en lo que concierne al comportamiento del terreno. El concepto general de este método es que debe indicar:

- Si el flujo de agua a través de las fisuras es de tipo laminar o turbulento.
- Si la prueba está dilatando las fisuras.
- Si las fisuras están siendo limpiadas por el flujo de agua.
- Si los vacíos están siendo rellenados.

La prueba consiste en inyectar agua a presión en tramos de perforación, lo cual tiene por objeto tener una idea aproximada de la permeabilidad en grande, o sea debida a las fisuras de la roca o del material granular cementado estudiado. Se varía la longitud de los tramos probados, así como la presión a la que se inyecta el agua, La llamada unidad Lugeon corresponde a una absorción de 1 litro de agua por minuto, por metro de perforación, con una presión de inyección de 10 kg/cm^2 .

A continuación de muestra el equipo, procedimiento, realización e interpretación de la prueba.

2.3.1.1 EQUIPO

Un obturador o empaque con su correspondiente tubo de inyección. Existen numerosos tipos. Los mecánicos son adecuados para perforaciones de diámetro mayor de 90 mm; el sello se logra comprimiendo una serie de rondanas de hule que presionan sobre las paredes de la perforación.

Los obturadores neumáticos constan de cubiertas cilíndricas de hule que se expanden por inyección de aire comprimido; estos obturadores son eficientes pero de colocación delicada. En todos los casos, la longitud del obturador debe ser de 30 cm por lo menos y de preferencia de más de 1m.

Una bomba. La bomba se necesita para inyectar agua a presión, debe ser tal que no produzca variaciones rápidas de la presión, por tanto, debe usarse una de varios pistones, o de gusano, pero de preferencia una centrífuga de alta presión.

Caudalímetro. Solo los medidores de tipo Venturi permiten determinar el gasto con la precisión suficiente (orden de 1 por ciento)

Uno o varios manómetros. El manómetro empleado para medir la presión debe ser de buena calidad y encontrarse en buen estado. Se calibrará cuidadosamente por comparación con un manómetro de precisión. Para evitar daños al manómetro, este no debe colocarse directamente en la manguera la tubería de desfogue de la bomba, ya que sufriría el golpeteo debido a funcionamiento irregular de los pistones de la bomba.

Agua. El agua de inyección debe ser limpia y sin materiales de suspensión, para evitar taponamientos en el medidor de gastos de agua, así como en las fisuras del terreno por probar, los cuales pueden inducir errores apreciables en la prueba.

2.3.1.2 PROCEDIMIENTO

2.3.1.2.1 VERIFICACIÓN DEL SELLO

La colocación de los empaques en la perforación, con objeto de sellar el tramo por probar, puede resultar muy delicada. Para apreciar la calidad del sello, se inyecta agua y se observa si sube por la perforación, Si el agua sube, esto puede deberse a dos causas:

- La perforación no es regular y el empaque no ajusta.
- El terreno está muy fisurado y se establece un corto circuito alrededor del empaque.

En el primer caso es necesario desplazar el empaque algunos centímetros y en ocasiones algunos metros, hasta poderlo ajustar perfectamente o aumentar la longitud del empaque para lograr un mejor sello. En el segundo, resulta difícil la realización de la prueba, y se debe pensar en efectuar otro tipo de ensayo.

2.3.1.2.2 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA

- Verificando el sello, se anotan los datos correspondiente al tramo probado: profundidad y longitud del tramo probado, diámetro.
- Se aplica el primer incremento de presión de inyección, se observa el gasto correspondiente, y se espera de 10 min. a que se estabilice. Se anotan los valores del gasto y de la presión correspondiente en el registro de prueba.

- Se repite el paso anterior hasta llegar a un presión máxima de 10 kg/cm². o una que se ajuste a las condiciones del sitio, y se procede entonces, a aplicar decrementos de presión, anotando asimismo los valores de la presión y del gasto correspondiente. La secuencia de presiones aplicadas puede ser, por ejemplo, de 1, 6, 10, 6, 1, kg/cm².
- Se calcula el valor de la absorción, en unidades Lugeon, dividiendo el gasto correspondiente a una presión de 10 kg/cm², expresado en lt/min, entre la longitud de la zona probada, expresada en metros. Para dar una idea aproximada de lo que representa una unidad Lugeon, se puede establecer que, si se tuviera un medio poroso y homogéneo, en lugar de roca fisurada, sometido a una prueba de inyección, que diera una absorción igual a una unidad Lugeon, su permeabilidad sería

$$k = 1,3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

2.3.1.2.3 EJEMPLOS:

Para un gasto de absorción de 15 litros por minuto en prueba con tramo de 5 m y presión de 6 kg/cm² se tendrán.

$$\frac{15}{5} \times \frac{1}{0,6} = 5 \text{ U.L.} \quad K = 6,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

Para un gasto de absorción de 30 litros por minuto en tramo de prueba de 15,0 m con presión de 10 kg/cm² se tendrá:

$$\frac{30}{15} \times \frac{1}{1} = 2 \text{ U.L.} \quad K = 2,6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

2.3.1.3 INTERPRETACIÓN DE LA PRUEBA.

El valor de la absorción en unidades Lugeon no es la única información que se puede obtener de esta prueba. La forma de las curvas gasto-presión es muy variable y depende esencialmente de las características de fisuración de la masa: distribución y espesor de las fisuras, tipo de relleno de estas, etc. Al aumentar la presión de inyección, se puede observar que la variación del gasto no es lineal, salvo en contados casos. El tapamiento y destapamiento de las grietas con materiales de relleno provocan, a diversas presiones, fenómenos de aumento o disminución de la permeabilidad.

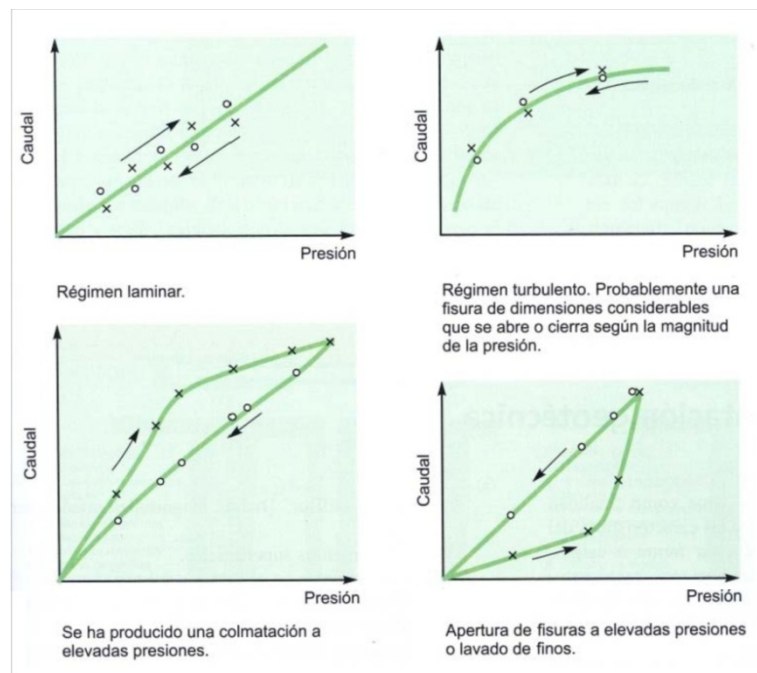


Figura 16. Relaciones presión – caudal en el ensayo Lugeon

Fuente: González de Vallejo (2002)

Para realizar este tipo de interpretaciones, se utilizan los 5 valores calculados en unidades Lugeon, uno para cada corrida de presión, y se inspeccionan para determinar el régimen de flujo o evento que ocurre en el tramo. En los ejemplos siguientes se utilizan gráficos de barra para mostrar el comportamiento del ensayo.

En el diagrama de la figura 17, los incrementos de presión se muestran en barras azules. Observándose la forma en que aumenta la presión hasta un pico en la tercera corrida y luego se reduce, de forma simétrica. Las barras mostradas en rosado, representan los valores en unidades Lugeon, calculados para cada valor de presión. En el primer caso, se observa que los valores son similares para cada corrida de presión, lo que implica que el flujo es generalmente laminar, pero no exclusivamente, considerando la mezcla de tamaños de fisuras y condiciones encontradas en la mayoría de los intervalos de ensayo.

Cuando el flujo es de este tipo, cada uno de los cinco valores de unidades Lugeon puede ser aceptado como el resultado del ensayo para el tramo, así como también puede tomarse un promedio de los mismos.

En el segundo caso, mostrado en la misma figura, se observa una distribución simétrica con el valor más bajo en el punto de mayor presión, indicativo de un flujo turbulento. Este valor bajo, debe ser considerado como el resultado del ensayo para el tramo.

El patrón de valores mostrados en el tercer caso, es de algún modo el inverso del anterior. La presión pico produce un valor mucho mayor de unidades Lugeon que en los otros puntos de presión. Esta presión ha sido suficiente para dilatar localmente las fisuras, ya sea por compresión de materiales blandos o por sellar fisuras paralelas adyacentes. La dilatación es

temporal, por lo que el valor de unidades Lugeon para el tramo debe ser representado por el de menor magnitud, generalmente relacionado al punto de menor presión.

El cuarto caso, muestra permeabilidades en incremento durante las cinco corridas, sin presentar decrecimiento alguno. Esto es indicativo del lavado de fisuras o de la introducción de fragmentos de roca en las fisuras dilatadas evitando su cierre. La ocurrencia frecuente de esto indica que la presión empleada es muy alta. La permeabilidad que debe tomarse es la del punto de la última corrida (a menor presión), con esto se presume que la presión pico es similar a la presión que eventualmente habrá con la presa en servicio, que podría producir resultados similares si no se emplea lechada.

Por último, muestra el inverso del patrón anterior. Los valores de unidades Lugeon se reducen progresivamente, indicando que espacios vacíos y fisuras están siendo rellenados, y por lo tanto el agua no puede avanzar más. Lo prudente es continuar realizando el ensayo a menores presiones hasta que la tendencia de disminución cese, indicando que todos los espacios vacíos han sido llenados. La permeabilidad representativa del tramo debe ser la de menor magnitud, ya que indica el flujo una vez llenados los vacíos.

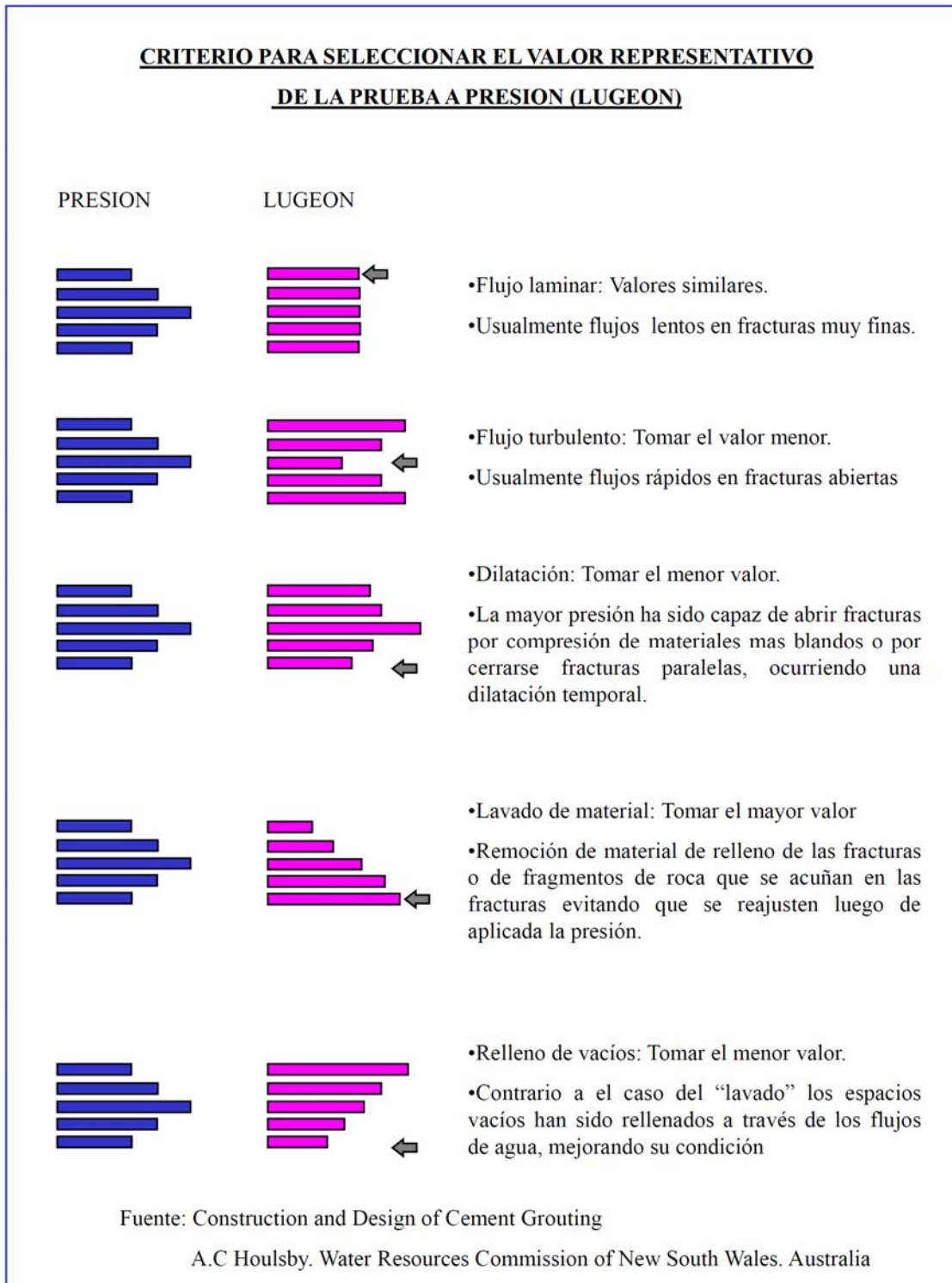


Figura 17. Criterio para seleccionar el valor representativo de la prueba Lugeon

2.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio que se describen a continuación, corresponden a aquellos contenidos en el estudio geológico geotécnico realizados por RGR Ingeniería para el proyecto de presa sobre el río Cuira, cuyos resultados fueron analizados y utilizados en este trabajo para la caracterización del macizo rocoso.

2.4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTO

2.4.1.1 OBJETO

Este procedimiento recoge los aparatos de ensayo, la preparación de la probeta y el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a la fisuración en tensión de las rocas mediante la compresión diametral de una probeta cilíndrica (Nota 1).

Nota 1. La resistencia de las rocas a tensión, determinada mediante ensayos distintos de la tracción directa, se denomina resistencia a la tensión «indirecta» y, más concretamente, el valor que se obtiene por el cálculo expuesto de este ensayo se denomina resistencia a la «fisuración» en tensión.

2.4.1.2 SIGNIFICADO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Por definición, la resistencia a tracción se halla mediante el ensayo de tensión directo uniaxial. Pero este ensayo es difícil y costoso para realizarlo rutinariamente. El ensayo de fisuración en tensión parece ofrecer una alternativa apropiada porque es mucho más simple y económico. Además, los ingenieros que se dedican a la mecánica de rocas suelen trabajar con campos de esfuerzos muy complejos, incluso varias combinaciones de campos de

esfuerzos de tensión y compresión. En esas condiciones debe hallarse la resistencia tensional en presencia de esfuerzos de compresión para que el resultado represente las condiciones reales sobre el terreno. El ensayo de fisuración en tensión es uno de los más simples entre los que se presentan tales campos de esfuerzos. Puesto que se utiliza ampliamente en la práctica, se hace necesario disponer de un procedimiento uniforme, de modo que los datos sean comparables. También se necesita este procedimiento de ensayo para asegurar que las probetas se rompen diametralmente a causa de la tracción ejercida a lo largo del diámetro sobre el que actúa la carga.

2.4.1.3 APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

Dispositivo de carga, para aplicar y medir la carga axial que se aplica a la probeta, con la suficiente capacidad para aplicarla a la velocidad que se prescribe en el apartado correspondiente.

Superficies portantes

La máquina para el ensayo debe estar equipada con dos bloques de acero portantes cuyo índice de dureza no sea inferior a 58 HRC. Uno de los bloques ha de estar asentado esféricamente y el otro será un bloque rígido plano. Las superficies portantes no deben desviarse de la planeidad más de 0,0127 mm cuando los bloques sean nuevos y la variación permisible es de 0,025 mm, dentro de la que se deben mantener. La parte móvil del bloque portante debe estar firmemente unido a la rótula esférica, pero la construcción ha de ser tal que la cara portante pueda girar e inclinarse en pequeños ángulos en cualquier sentido.

El ensayo puede realizarse con probeta puesta en contacto directo con los bloques portantes de la máquina (figura 18), o también se pueden situar

placas portantes curvas suplementarias o bandas de apoyo entre la probeta y las planchas portantes de la máquina para reducir la gran concentración de esfuerzos.

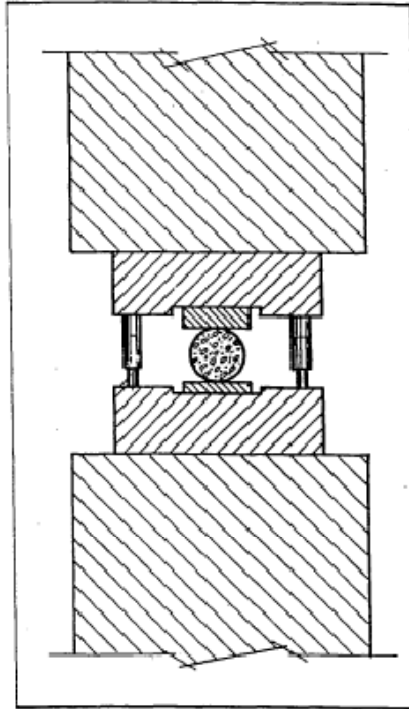


Figura 18. Dispositivo propuesto para el ensayo de resistencia a tracción indirecta “Método Brasileró”

Pueden utilizarse planchas portantes curvas con las mismas especificaciones que se estipulan anteriormente para reducir los esfuerzos de contacto. El radio de curvatura curva de los suplementos se calculará de tal modo que el arco que hace contacto con la probeta no exceda en ningún caso de 15" o que la anchura del contacto sea inferior a $D/6$, siendo D el diámetro de la probeta (Nota 2).

Nota 2. Puesto que la ecuación utilizada para calcular la resistencia o la fisuración en tensión se obtiene considerando una carga lineal, la carga que

se aplique debe confinarse a una franja muy estrecha para que el ensayo de resistencia a la fisuración en tensión sea válido. Sin embargo, la carga lineal crea altos esfuerzos de contacto que pueden ocasionar el agrietamiento prematuro. El problema se reduce apreciablemente con una franja de contacto más amplia. Las investigaciones demuestran que con un arco de contacto inferior a 15" se puede cometer un error inferior al 2% en los esfuerzos de tensión principales y al mismo tiempo reduce la posibilidad del agrietamiento prematuro.

Bandas de apoyo

Se recomienda poner un amortiguador de cartón de 0,01 D de espesor, siendo D el diámetro de la probeta, o de tablero contrachapado de 6 mm de espesor, entre las superficies portantes de la máquina (o los suplementos portantes en su caso) y la probeta para reducir la concentración de esfuerzos (Nota 3).

Nota 3. Las experiencias indican que los resultados de los ensayos realizados con suplementos portantes curvos, como se especifican anteriormente no producen dispersiones significativas, pero pueden arrojar diferencias siempre constantes respecto a los resultados de los ensayos realizados con la probeta haciendo contacto directo con la platina de la máquina.

2.4.1.4 OBTENCION DE LA MUESTRA

La probeta debe ser representativa del tipo de roca que se estudia. Esto puede lograrse mediante observación visual de los componentes minerales, la granulometría y forma de los gránulos, la porosidad y fisuración.

2.4.1.5 PREPARACION DE LAS PROBETAS DE ENSAYO

- Las muestras deben ser cilindros rectos con una altura de dos a tres veces el diámetro y que éste no sea menor de 50 mm. Además, el diámetro de la probeta deberá ser mayor que diez veces el tamaño máximo de grano de la roca.
- Las bases de la probeta deberán ser paralelas y perpendiculares a su eje.
- Las bases deberán ser planas con una aproximación mayor de 0,02 mm.
- La perpendicularidad de las bases al eje de la probeta no se debe desviar más de 0,05 mm en 50 mm.
- La cara lateral de la probeta deberá ser lisa; libre de irregularidades y recta con una desviación menor de 0,3 mm sobre la longitud de la probeta.
- No se permite añadir ningún material de ajuste.
- El diámetro de la muestra deberá ser medido con una precisión próxima a 0,1 mm como promedio de tres pares de diámetros perpendiculares tomados en diferentes alturas, en la parte alta, en el medio y en la parte baja. Este diámetro medio debe utilizarse para calcular la sección transversal. La altura de la muestra debe tomarse con precisión de 1 mm.
- El contenido de agua de la probeta en el momento del ensayo puede tener un efecto apreciable sobre el resultado. Las condiciones de humedad del terreno deben mantenerse en la probeta hasta que se efectúe el ensayo. Por otra parte, se

pueden ensayar probetas con otros contenidos de humedad, incluso nulo. En cualquier caso, puede modificarse el contenido de humedad de la probeta al problema en cuestión y consignarlo en el informe.

2.4.1.6 PROCEDIMIENTO OPERATORIO

2.4.1.6.1 MARCA

Debe indicarse la orientación de la probeta a que se desee realizar el ensayo, trazando una línea diametral en sus caras exteriores. Estas líneas servirán para centrar la probeta en la máquina de ensayo y asegurar la debida orientación colocándolas verticales, así como para punto de referencia de las mediciones de espesor y diámetro (Nota 4).

Nota 4. Si la probeta es anisotrópica, debe tenerse cuidado de que las marcas de cada probeta estén orientadas del mismo modo.

2.4.1.6.2 COLOCACIÓN

Sítue la probeta de modo que el plano diametral de las dos líneas marcadas en sus dos caras estén alineadas con el centro del empuje de la superficie portante con rótula esférica con una tolerancia de 0,013 mm (Nota 5).

Nota 5. A veces se consigue mejor la linealidad de la carga girando la probeta sobre sus ejes hasta que no se vea la luz entre la misma y las platinas portantes.

2.4.1.6.3 CARGA

Aplique una carga de compresión en continuo aumento que produzca una velocidad aproximadamente constante de carga o deformación de modo que la rotura ocurra entre uno y diez minutos de estar en carga, lo que debe corresponder con una velocidad de carga de entre **35,1** y **210,6** kg/cm²/min, según el tipo de roca (Nota 6).

Nota 6. Los resultados de los ensayos realizados por varios investigadores indican que con esta velocidad de aumento de la carga se evitan en lo posible los efectos de la aplicación demasiado rápida de la misma.

2.4.1.7 OBTENCION DE LOS RESULTADOS

La resistencia a la fisuración en tensión de la probeta se calcula como sigue:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi LD}$$

Y el resultado debe expresarse por el número de dígitos que sea apropiado (generalmente 3), siendo:

σt = resistencia a la fisuración en tensión, en Kgf/cm²;

P = carga máxima aplicada que indique la máquina de ensayo, en Kgf;

L = longitud de la probeta, en cm, y

D = diámetro de la probeta, en cm.

2.4.1.8 EXPRESION DE LOS RESULTADOS

El informe debe incluir en lo posible los siguientes datos:

- Procedencia de la probeta, incluyendo el nombre del proyecto y la situación y, si se sabe, el ambiente en que se ha conservado. La situación se expresa frecuentemente por el número del sondeo y la profundidad a que se ha tomado desde la boca de la perforación.
- Descripción física de la probeta, incluyendo la clase de roca, situación y orientación de los planos de fisuración aparentes, los planos de estratificación y la esquistosidad, así como las grandes inclusiones heterogéneas, en su caso.
- Fecha de la toma de muestras y del ensayo.
- Diámetro y longitud de la probeta, cumplimiento con los requisitos dimensionales, dirección de la carga si existe - anisotropía. Tipo de contacto entre la probeta y las bases de carga.
- Velocidad de aplicación de la carga y velocidad de deformación.
- Indicación general de la humedad de la probeta en el momento del ensayo, diciendo si se encontraba tal como fue recibida, saturada, secada en el laboratorio al aire o en estufa. Se recomienda que se determine lo más exactamente posible el grado de humedad y se consigne en forma de humedad o de grado de saturación.

- La resistencia a la fisuración en tensión que se haya calculado para cada probeta y la desviación típica o el coeficiente de variación del conjunto.
- Tipo y situación de la rotura. Se recomienda un croquis de la probeta fracturada.

2.4.1.9 PRECISIÓN Y DESVIACIÓN

La variabilidad de las rocas y la consiguiente imposibilidad de determinar un valor de referencia fiable impiden establecer una expresión significativa de la desviación.

2.4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

El ensayo de compresión sin confinar tiene como objetivo fundamental determinar la resistencia a la compresión inconfínada de una muestra de roca de geometría regular, generalmente cilíndrica. Los resultados son utilizados para la clasificación y caracterización geotécnica de la roca intacta. Si se miden las deformaciones diametrales, pueden calcularse el módulo de Young y la relación de Poisson.

El ensayo está regulado por la norma ASTM D 2938 – 95 R02, en esta norma se especifican los requerimientos que deben cumplir las muestras a ensayar, así como también las especificaciones de los instrumentos necesarios para la realización del ensayo además de los cálculos y graficas que se pueden obtener con los datos suministrados por las herramientas utilizadas.

2.4.2.1 INSTRUMENTACIÓN

Prensa para la aplicación y medida de la carga axial sobre la probeta, a una velocidad controlada.

Prensa de carga y bomba electro-hidráulica, marca Structural Behavior Laboratories (SBEL), modelo EH-1000, con capacidad de 120000 Kg.

Discos de acero para la transmisión de la carga, de diámetro igual o ligeramente superior al de la muestra ($\approx + 2$ mm), de 15 mm de espesor mínimo y de superficie completamente plana (tolerancia 0.005 mm)

Asiento esférico (ligeramente lubricado) para colocar en el extremo del disco superior.

2.4.2.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

La probeta de roca debe ser completamente cilíndrica, con una altura de 2.5 a 3.0 veces su diámetro, el cual no debe ser inferior a 54 mm. Generalmente se usan núcleos provenientes de perforaciones, de diámetro NX o superior. El diámetro de la muestra debe ser por lo menos 10 veces del mayor grano que constituye la roca.

Los extremos del núcleo deben ser planos, lisos y perpendiculares a su eje, permitiéndose las siguientes tolerancias: cara/eje = 0.06° y cara/cara = 0.25°

Los lados de la muestra deben ser lisos y libres de irregularidades o desviaciones sobre 0.3 mm

El tratamiento de los extremos de la probeta debe hacerse por medios mecánicos; no se permite el uso de “capping”.

2.4.2.3 PROCEDIMIENTO

Determinar el diámetro o dimensión lateral de la muestra con una aproximación de 0.1 mm, promediando dos medidas paralelas entre sí, que se realizarán en la parte superior, media e inferior del espécimen. El área de la sección transversal (A_0) se calculará con el promedio de estos resultados. Determinar la altura del núcleo con una aproximación de 1.0 mm.

Coloque la muestra centrada en los discos de carga, colocar el asiento esférico en la parte superior y alinear con el eje de carga de la prensa.

Aplicar carga vertical en forma continua, con un incremento de esfuerzos constantes entre 5.0 y 10.0 kg/cm²/s, hasta producir la falla, lo cual debe ocurrir entre los 5 y 10 minutos de haber comenzado el ensayo.

Registrar la máxima carga ($P_{m\acute{a}x.}$) con error no superior al 1 %.

Se recomienda realizar por lo menos 5 ensayos por litología para así garantizar la veracidad de los resultados obtenidos.

2.4.2.4 CÁLCULOS

Calcular la resistencia a la compresión Uniaxial de la muestra de roca, dividiendo la máxima carga soportada por la probeta entre el área de su sección transversal inicial.

$$C_0 = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad [\text{Kg/cm}^2 \text{ o N/mm}^2 = \text{MPa}]$$

En el caso de muestras cúbicas, se recomienda multiplicar el valor obtenido en la ecuación anterior por 0.8, para hacer equivalente la compresión en muestra cúbica con la obtenida en muestras cilíndricas.

Según el Comité Conjunto del Concreto Armado CCCA (1976), cuando la relación entre la altura y el diámetro (o dimensión lateral) difiera de la unidad en 25 % o más, se deberá calcular la resistencia del cubo equivalente, como sigue:

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{0.778 + 0.222\left(\frac{b}{h}\right)}$$

donde:

σ_c = Resistencia a la compresión de una probeta cúbica equivalente, en kg/cm².

σ = Resistencia a la compresión de la probeta de altura mayor que el diámetro o dimensión lateral, en kg/cm².

b = Diámetro o Dimensión Lateral, en cm.

h = Altura, en cm.

2.4.2.5 REPORTE DE RESULTADOS

Según la normativa establecida la entrega de resultados obtenidos por el ensayo de Resistencia a la Compresión sin Confinar debe poseer los siguientes parámetros:

Descripción litológica de la muestra de roca.

Proveniencia de la muestra: Localización geográfica, profundidad, fecha y método de muestreo, orientación.

Orientación del eje de carga con respecto a los planos de foliación o estratificación.

Diámetro y altura del núcleo ensayado.

Velocidad de aplicación del esfuerzo y duración del ensayo.

Tipo de fractura

Fecha del ensayo y características del equipo mecánico.

Otras propiedades físicas disponibles.

Resistencia a la compresión uniaxial (monoaxial, no confinada o compresión simple) de cada espécimen ensayado y valor promedio por litología.

CAPÍTULO III

3. GEOLOGÍA DE SITIO DE PRESA – RÍO CUIRA

3.1 GEOGRAFÍA FÍSICA

3.1.1 RELIEVE

La zona de estudio principal presenta un relieve accidentado de pendientes abruptas con alturas que van desde 45 hasta los 680 m.s.n.m.

3.1.2 CLIMA

El clima predominante es lluvioso cálido, con altas precipitaciones anuales que oscilan entre 1.400 y 2.800 mm. Se presentan dos máximos de precipitación al año: uno entre los meses de julio y agosto, y otro en los meses noviembre y diciembre. La estación seca por lo general es corta, siendo febrero o marzo el mes de menor precipitación.

La temperatura media anual varía entre 18 y 32 °C, siendo las mayores temperaturas entre los meses de mayo y septiembre-octubre y las temperaturas mínimas en enero y junio-julio.

La humedad relativa alcanza sus máximos valores en julio-agosto (hasta 99,5%) y en diciembre, estando el mínimo entre marzo y abril (hasta 42,3%).

3.1.3 BIODIVERSIDAD

La flora y la fauna de la zona son muy diversas y tienen influencia caribeña, andina e incluso amazónica. Las evidencias biogeográficas sugieren que la región debe haber sido un "refugio pleistocénico", una especie de relictos de selva húmeda

rodeado de zonas áridas que existió durante el período de las glaciaciones, lo cual originó elementos de flora autóctonos representados en al menos 8 especies endémicas, entre las que se encuentra incluida la palma *Asterogyne spicata*, conocida localmente como palmito (Steyermark 1979). La fauna posee numerosas especies claves del ecosistema o de interés conservacionista, tales como el jaguar o tigre americano (*Panthera onca*), la danta o tapir (*Tapirus terrestres*), el águila harpía (*Harpia harpyja*) y el mono araña del norte (*Ateles belzebuth hybridus*) (Yerena 1985, De Sola y col. 1996).

Dominan los bosques ombrófilos submontanos semidecíduos estacionales, de altura 15 a 20 metros de alto,. Estos bosques están integrados por árboles de gran porte como el tiamo y el mulato, además de otros que destacan por la vistosidad de sus flores como los bucares (*Erythrina* sp.), el palo de maría (*Triplaris* sp.), los apamates (*Tabebuia rosae*) y araguaneyes (*Tabebuia crysantha*). Otros árboles representativos son el caro (*Enterolobium cyclocarpum*), el jobo (*Spondias* sp.), el indio desnudo (*Bursera simaruba*), el guácimo, el cedro caoba (*Swietenia* sp.) y el cedro amargo (*Cedrela* sp.) (Yerena 1985). Este último árbol parece corresponder a la especie *Cedrela odorata*, que está amenazada y se encuentra ubicada en la categoría de vulnerable por el Libro Rojo de la Flora Venezolana (Llamoza y col. 2003) y por la UICN (Americas Regional Workshop 1997). Hay un segundo nivel de árboles bajos donde destaca *Brownea* sp. de hasta 13 m de alto, y el grifo blanco (*Lonchocarpus dipteroneureus*). El nivel de arbustos tiene un elemento significativo que es el de la palma macagüita (*Aiphanes* sp.).

En el sotobosque es muy significativa la aparición de bromeliáceas terrestres y agaváceas, así como las lianas y bejucos de aspecto retorcido como el de *Bauhinia cumanenses*, e incluso orquídeas trepadoras como *Vanilla pompona*. En los bosques de galería de esta formación se encuentran samanes (*Pithecelobium* sp.) de hasta 40 m de altura y fustes de más de 2 m de diámetro, lecheros (*Ficus glabrata*) de 20-30 m de altura, gigantescas ceibas (*Ceiba pentandra*) y jabillos (*Hura crepitans*) (Yerena 1985).

También está presente en las partes más altas de la zona, bosques densos, de 20 a 30 m de alto, con un sotobosque bien desarrollado. Poseen muchas palmas y helechos arborescentes, así como un elevado número de epífitas, enredaderas y trepadoras.

La fauna es muy rica en especies de mamíferos, siendo muy probable observar a el mono capuchino (*Cebus nigrivittatus*), el mono araguato (*Alouatta seniculus*), el báquiro de collar (*Tayassu tajacu*), el venado matacán (*Mazama americana*), el cachicamo montaño (*Dasybus novemcinctus*), la danta (*Tapirus terrestris*), roedores como la lapa (*Agouti paca*) y el picure común (*Dasyprocta leporina*), y felinos como el jaguar (*Panthera onca*), el puma (*Puma concolor*), el cunaguaro (*Leopardus pardalis*), el tigrillo manigordo (*Leopardus wiedii*) y la onza (*Herpailurus yagouaroundi*) (Eisenberg y col. 1979, Yerena 1985).

También se encuentran diversas especies de mamíferos amenazadas, tales como el cuspón (*Priodontes maximus*), el mono araña del norte (*Ateles belzebuth hybridus*), el tigrillo o gato de monte (*Leopardus tigrinus*), además de los ya nombrados cunaguaro, tigrillo manigordo, jaguar y danta (Rodríguez y Rojas-Suárez 1999).

La avifauna es muy diversa. Hasta el presente se han reconocido en la zona 403 especies (Lentino y col. 1993), de las cuales 36 son migratorias. Entre las especies más destacadas que se observan con mayor frecuencia están el gavilán tijereta (*Elanoides forficatus*), el gavilán habado (*Buteo magnirostris*), la guacharaca (*Ortalis ruficauda*), el guacamayo verde (*Ara militaris*), la piscua (*Piaya cayana*), el colibrí pecho canela (*Glaucis hirsuta*), el pico de frasco esmeralda (*Aulacorhynchus sulcatus*) y el conoto negro (*Psarocolius decumanus*).

La zona también es hábitat de especies que son consideradas como endémicas de la Cordillera de la Costa de Venezuela (BirdLife International 2003), como el pico de frasco esmeralda, el colibrí pechiazul (*Sternoclyta cyanopectus*), el atrapamoscas cerdoso venezolano (*Phylloscartes venezuelanus*), el atrapamoscas cerdoso vientre

amarillo (*Phylloscartes flaviventris*) y la granicera hermosa (*Pipreola formosa*). También pueden encontrarse especies amenazadas como el águila arpía (*Harpia harpyja*), el cardenalito (*Carduelis cucullatus*) y el guacamayo verde (*Ara militaris*) (BirdLife International 2003, Rodríguez y Rojas-Suárez 1999).

De los reptiles destacan las serpientes, siendo muy abundantes las especies no venenosas como la tragavenado (*Boa constrictor*), la lora (*Chironius carinatus* y *C. multiventris*), la ratonera (*Cleia cleia*), y la cazadora (*Pseustes poecilonotus*). Entre las venenosas está la mapanare (*Bothrops colombiensis*), la macagua (*Bothrops lansbergii*) y la cascabel (*Crotalus durissus*) (Dixon 1980, Sociedad La Salle de Ciencias Naturales 1965). Un aspecto interesante es el reporte de babas (*Caiman crocodylus*) en la zona de Cuira, donde también abunda el lagarto *Cnemidophorus lemniscatus* (Yerena 1985).

Entre los anfibios destaca la rana *Colostethus guatopensis*, que vive en quebradas de aguas rápidas y es considerada como endémica del sector y sus adyacencias. La otra especie es *C. herminae*, que es básicamente terrestre y se le encuentra en los senderos y en charcos de aguas tranquilas, siendo el anfibio más abundante del sotobosque (Dixon y Rivero-Blanco 1984).

Es importante mencionar la existencia de dípteros del género *Phlebotomus*, los cuales son vectores de la enfermedad de "leishmaniasis tegumentaria americana", causada por el protozoario *Leishmania brasiliensis*, quien vive en el tracto digestivo de los mencionados insectos (Pifano y col. 1960).

3.2 GEOLOGIA REGIONAL

La litología expuesta tanto en el sitio de presa como en el vaso de almacenamiento de la presa El Dinero, sobre el Río Cuira, pertenece en términos generales al Grupo Villa de Cura. En particular, presenta un complejo de rocas

máficas y ultramáficas denominado Complejo de Apa, que aflora en el curso medio del río del mismo nombre, sobre el cual descansa un manto de tobas, brechas y algunas lavas ligeramente metamorfizadas.

La bibliografía generalizada sobre la faja de Villa de Cura, es relativamente extensa, pero trabajos específicos en el área y en especial en la cuenca del río Cuira, se deben a exploraciones realizadas por Vizcarret (1982), Vizcarret y Pérez (1986) y Chirinos y Marquina (1990) (bajo la coordinación de F.Urbani), fuentes de referencia en este trabajo especial de grado.

Urbani et al. (1990), indican la presencia de tres unidades en el área:

Grupo Villa de Cura

Formación Las Hermanas

Complejo de Apa

La primera unidad aflora en el río Taguaza, identificada como similar a la Formación Santa Isabel, predominantemente esquistosa. Una sección de Villa de Cura sin diferenciar, compuesta por metatobas y metalavas, aflora al Sur de este río hasta el río Apa y entre Panaquire y el río Paria, excepto una cuña entre el río Paria y el Este del Cuira hasta su desembocadura, formada por la Formación Las Hermanas.

El grupo Villa de Cura, alóctono, tiene contacto con la Formación Paracotos, al Norte y con la Formación Guárico, al Sur, por fallas de corrimiento.

Como se indica en el Léxico Estratigráfico de Venezuela (2008) el Grupo Villa de Cura está compuesto de rocas metavolcánicas y metasedimentarias de granulometría variable y se ha dividido en cinco formaciones, que de norte a sur son El Chino, El Caño, El Carmen, Santa Isabel y Las Hermanas. El Caño consiste en metatobas afaníticas finamente laminadas, con cantidades menores de metalavas

basálticas y andesíticas. La Formación El Chino contiene metatobas estratificadas de grano fino, con cantidades menores de metabasalto, metaftanita, filita grafitosa, esquisto cuarzo - albítico y granofel cuarzo - albítico. La Formación El Carmen presenta una espesa serie de metalavas basálticas con fenocristales de augita, intercalados con metatoba, granofel, metaftanitas y filitas grafitosas. La Formación Santa Isabel consiste en granofel cuarzo - feldespático - epidótico con intercalaciones de esquisto clorítico y cantidades menores de metalavas piroxénica y metaftanitas. La Formación Las Hermanas consiste de metatoba, metalava y aglomerados volcánicos. El metamorfismo varía de sur a norte como sigue en las siguientes zonas (Navarro, 1983, p. 215-216): prehnita - pumpellita, barroisita - zoisita/clinozoisita - albita, glaucofano - hornblenda barroisítica, epidota (zoisita/clinozoisita) - glaucofano, lawsonita - glaucofano, lawsonita - albita, pumpellita - actinilota y prehnita - pumpellita.

La Formación las Hermanas cubre una extensa franja al Sur de los ríos Apa y Paria y se extiende hasta el corrimiento frontal de Guárico, además de la cuña anteriormente mencionada, cubriendo la mayor parte del vaso de la presa y formada por metatobas, metabrechas y metalavas.

Según el Lexico Estratigráfico de Venezuela (2008), la primera descripción de la Formación Las Hermanas las hace Shagam (1960) pero lo hace conjuntamente con aquellas de la localidad de Tiara. Piburn (1968, p. 194) es el primero en presenta una descripción de esta unidad precisamente en la localidad tipo de San Sebastián, dividiéndola en dos miembros, uno inferior compuesto predominantemente de conglomerados volcánicos gruesos, mal escogidos, contentivos de fragmentos redondeados a subredondeados de lavas porfíricas vesiculares, ricas en plagioclasa y piroxeno. Se encuentran además escasas intercalaciones tobáceas delgadas. En su miembro superior señala la presencia de tobas líticas, formadas por fragmentos de tobas con plagioclasa, trozos vesiculares, metalavas y lavas almohadilladas, flujos sin estructuras y ftanitas discontinuas.

Girard (1981) y Girard *et al.* (1982) describe la formación como constituida por lavas básicas, a veces almohadilladas, tobas y conglomerados volcánicos. Las volcánicas son de textura porfirítica, compuestas por microfenocristales de plagioclasa albitizados y abundantes cristales de clinopiroxeno. La matriz está recrystalizada a clorita, albita, calcita y epidoto. Algunas lavas tienen textura amigdaloides. Las tobas están frecuentemente saururizadas con la matriz formada por microlitos de plagioclasa y palagonita. Las vesículas están rellenas por clorita y calcita. las rocas en general, se presentan afectadas por un metamorfismo de la facies de la prehnita - pumpellita.

Navarro (1983) describe para esta unidad a tobas, lavas y aglomerados. Las metatobas se clasifican como de ceniza y de lapilli. Las metalavas presentan textura almohadillada y los minerales esenciales constituyentes son plagioclasa y clinopiroxeno. Los aglomerados están constituidos por fragmentos angulares cuyo diámetro es superior a los 10 cm y son de composición variable (tobas, lavas, etc.), la matriz es frecuentemente de ceniza volcánica. Las asociaciones mineralógicas corresponden a un metamorfismo en la zona de la prehnita - pumpellita.

Beck (1988, 1989, p. 263) señala que en orden de abundancias están las brechas y tobas volcánicas básicas formando capas de espesores plurimétricos, lavas en sills o coladas generalmente espilitizadas, y sills de microgabro con estructura dolerítica de grano fino.

Urbani *et al.* (1991) en la zona de Guatopo esta Formación se distingue del Grupo de Villa de Cura por su carácter masivo y carencia de estructuras planares, predominio de lavas andesíticas. Así mismo pueden cartografiar dos zonas, a) Una con predominio de metatoba piroxénica (volcaniclásticas proximales), y b) otra con metalava, metatoba y metabrecha piroxénica - anfibólica - plagioclásica (arco volcánico). Esta última zona es la más semejante a las rocas de la localidad tipo en San Sebastián. Presenta asociaciones mineralógicas de las facies de la prehnita -

pumpellita, pumpellita - actinolita y esquistos verdes (clorita - clinozoicita) progradantes de SE a NW.

Finalmente, el Complejo de Apa, formando un rectángulo irregular al Sur del curso inferior del río Apa y parte del río Las Marias, formado por una serie de intrusivas máficas y ultramáficas con muy bajo grado de metamorfismo.

Urbani *et al.* (1989, 1991) señala que el Complejo está constituido mayoritariamente por rocas ultramáficas, con proporciones variables de olivino y clinopiroxeno, formando toda una gama de rocas, a saber: dunita, wherlita, clinopiroxenita - olivinífera y clinopiroxenita. Se encuentran escasos afloramientos de hornblendita. Así mismo hay gabro con una serie de variedades: hornbléndico, hornbléndico - piroxénico, piroxeno - hornbléndico y piroxénico.

La dunita, wherlita y clinopiroxenita son de textura granular gruesa. El olivino es de color negro y el clinopiroxeno gris ligeramente verdoso; por consiguiente, la dunita es negra y la clinopiroxenita gris, mientras que las rocas con ambos minerales (wherlita y clinopiroxenita olivinífera) tiene aspecto moteado con una mezcla de cristales de ambos colores. La hornblendita también es negra pero el clivaje anfibólico a escala milimétrica a centimétrica las distingue. Las variedades de gabro son de grano grueso y de color variable de grisáceo a casi negro según la proporción relativa de plagioclasa y minerales máficos. En ocasiones el gabro adquiere una textura pegmatítica con cristales de hasta 7 cm. La plagioclasa fresca es labradorita y puede estar ligeramente alterada a leucoxeno, sericita, prehnita y pumpellita, alcanzando en esos casos una composición cercana a la andesita.

Debido a la dificultad de acceso en esta zona selvática, no se conoce claramente la distribución de litologías y sus relaciones mutuas dentro del Complejo, pero en forma global se observa una variación progresiva de NW a SE (Urbani *et al.*, 1991, p. 30), de modo que en el río Apa, en el extremo NW del cuerpo afloran dunita y wherlita; avanzando en dirección SE, en río Chiquito predominan la wherlita y clinopiroxenita; continuando en esa misma dirección en el río Arenilla predomina la

clinopiroxenita; y hacia el extremo SE en Las Marías, abunda el gabro. A pesar de esta tendencia, a nivel local hay bastante mezcla de litologías, encontrándose además diques de clinopiroxenita cortando dunita, mientras que hay diques de gabro que cortan casi todos los demás tipos de roca. En el río Arenilla en particular, los afloramientos de clinopiroxenita están frecuentemente cruzados por diques de gabro hornbléndico muchos de ellos pegmatíticos. La descripción mineralógica detallada de los diversos tipos litológicos aparece en Urbani *et al.* (1991).

Las peridotitas (dunita y wherlita) presentan color negro a gris verdoso y meteorizan a gris oliva, pardo verdoso y escasamente a negro. La dunita está atravesada por vetillas de serpentinita y magnetita que van de milimétricas a submilimétricas en espesor, pero pueden llegar hasta 1 cm de espesor, sin orientación preferencial. La wherlita es inequigranular con cristales que alcanzan hasta 8 mm de diámetro y por su irregular superficie es notable la meteorización de los cristales de olivino. Las dunitas presentan una mineralogía constituida por olivino, serpentinita y cantidades menores de opacos y esfena. La wherlita contiene clinopiroxeno, olivino, serpentinita y opacos.

La clinopiroxenita presenta tamaños de grano variables de 0,5 a 13,5 cm, entre los que destacan los prismas de piroxeno. Los escasos granos de olivino en las superficies expuestas están meteorizados dejando hoyuelos. Adicionalmente al clinopiroxeno, hay cantidades menores de olivino, serpentinita, hornblenda y opacos. La serpentinita es producto de la transformación del olivino mientras que la escasa hornblenda aparece como bordes de reacción entre olivino y piroxeno o a través de las superficies intergranulares de los piroxenos (Urbani *et al.*, 1991, p. 44).

Las rocas gabroides aparecen en diversas variedades: hornbléndico, hornbléndico - piroxénico, piroxeno - hornbléndico, piroxénico, con anfíbol verde - azul o con actinolita. Con respecto al índice de color hay tanto melanogabro como leucogabro. Así mismo se encontraron cuerpos en forma de diques, constituidos por gabro pegmatítico de composición plagioclásico - hornbléndico y en donde los

cristales alcanzan hasta 7 cm de diámetro. El tamaño de grano oscila entre 0,3 a 5 mm, predominando los de aproximadamente 2 mm. En la superficie fresca muestran una coloración grisácea que meteoriza a verde oliva y pardo rojizo. Petrográficamente se observan diversos tipos de estructuras de corona y zonación de los minerales (Urbani *et al.*, 1991, p. 35-38).

Las rocas no presentan indicios de deformación en estado plástico como es típico de complejos ofiolíticos. No se presentan evidencias de metamorfismo, a excepción de la aparición de prehnita, pumpellita y clorita tanto en vetas como asociados a la alteración de la plagioclasa del gabro. Con esto a lo sumo se puede sugerir que las rocas de este complejo han alcanzado la facies de la prehnita - pumpellita, al igual que las rocas adyacentes.

En base a su ubicación en torno a la Formación Las Hermanas, así como a la distribución de los tipos litológicos, este cuerpo puede clasificarse como un complejo ultramáfico zonado tipo Alaska (Urbani *et al.*, 1991), y por tanto formado en un arco volcánico al igual que el Complejo de Chacao, Guárico.

3.3 GEOLOGÍA LOCAL

El río Cuira sigue un curso en dirección W desde Boca de Paria hasta El Jobito, presentado sinuosidades a lo largo de ese tramo, luego cambia su curso, principalmente en la dirección N, manteniendo la misma hasta pocos kilómetros luego de la confluencia con la Qda. Casupito, donde cambia de dirección hacia el Oeste, manteniendo este curso hasta El Oro, en su desembocadura. En el tramo desde el sitio de presa El Dinero hasta Qda. Casupito, el curso del río es bastante rectilíneo, con pequeños quiebres tanto al E como al W, evidenciando la presencia de un control estructural sobre el mismo, en especial luego de la fila El Cuchillo, donde cambia de curso abruptamente en dirección W. Este río se encuentra bastante encajado, por lo que presenta valles angostos y con vertientes de alta pendiente.

3.3.1 VASO DE ALMACENAMIENTO

De acuerdo a estudios previos, el vaso de la presa del río Cuira fue limitado por el área comprendida por debajo de la cota 140, abarcando las cuencas de los ríos Cuira, Paria, Apa, Carapa y Casupo Grande. El vaso se encuentra parcialmente ubicado en el Parque Nacional Guatopo, entre 10 y 16 Km al Sur de Tapipa y pertenece a la cuenca inferior del río Tuy, en el cual desemboca.

En la zona del vaso correspondiente al sector Suroeste del **Plano N° 01** del Anexo I, se presentan dos filas dispuestas en dirección SO – NE, de topes agudos, con los nombres de El Tigre y El Jobito, por entre las cuales fluye el río Carapa, y dan origen a varias quebradas que alimentan el flujo del río Cuira. Más al Noreste, al Norte de Boca de Paria, se encuentra la fila Roncadores, presentando topes agudos, y dispuesta en dirección SO – NE, la cual, da origen al río Casupo Grande. .

En las campañas del levantamiento geológico efectuadas por la empresa RGR Ingeniería, correspondiente a la superficie del vaso de almacenamiento y muchas veces a cotas más altas de la establecida como cota máxima de inundación (140), se tomaron 47 muestras, a las cuales se les elaboró secciones finas y luego se les efectuó su análisis petrográfico, el cual fue corroborado posteriormente en este trabajo, se presentan en el **Anexo V**.

3.3.1.1 LITOLOGÍA

La descripción litológica que se presenta a continuación, está basada en los análisis petrográficos efectuados a las secciones finas proporcionadas por la empresa RGR Ingeniería y posteriormente, corroborando los resultados obtenidos en este trabajo con los de dicha empresa.

Rocas máficas y ultramáficas: se encontró lo siguiente: anfibolita, piroxenita anfibólica y serpentinita; presentando los minerales: plagioclasa de tipo andesina y

labradorita, orto y clinopiroxeno, horblenda, olivino, epidoto, clorita, magnetita y piritita. Lo que se corresponde con el Complejo Apa.

Rocas metavolcánicas: las secciones presentan: metabrechas basalto andesíticas, metatobas basalto andesíticas, metatobas laminadas y metalavas basalto andesíticas. Los minerales predominantes son los siguientes: Plagioclasa de composición félsica a intermedia (oligoclasa y andesina), ortopiroxeno y clinopiroxeno, anfíbol fibroso, epidoto, clorita y magnetita. Este tipo litológico tiene correspondencia con la Formación Las Hermanas.

Rocas gabroides y otras: se observa metagabro anfibólico y esquisto anfibólico clorítico en las que se encuentran principalmente minerales de tipo metamórfico (anfíbol, epidoto y clorita) en conjunto con plagioclasa alterada.

Se observa la presencia de cuarzo y calcita, principalmente en vetas.

La zona del vaso de la presa, presenta en su mayoría volcaniclastos muy meteorizados, en parte como consecuencia del aumento del nivel del río durante la época de lluvia. Adicionalmente se encuentran tobas de aspecto masivo, principalmente de color marrón, presentando fracturas con óxidos de hierro. Por último, se observa la presencia de escasas brechas altamente meteorizadas.

La zona del vaso correspondiente a río Casupo Grande, está constituida principalmente por volcaniclastos y lavas, de carácter masivo, el color de meteorización es principalmente marrón claro a oscuro con tonos rojizos. La roca en este tramo se encuentra altamente fracturada y diaclasada, encontrándose rellenas por calcita y óxidos de hierro, presentando en ocasiones cuarzo.

En menor proporción se encuentran tobas, de color fresco verde y meteorizado marrón, también se encuentra altamente fracturada y diaclasada, presentando relleno de óxido de hierro.

Por último, se encuentra escasa presencia de lavas, masivas, de colores grises y verdes oscuros, diaclasadas, con relleno de óxido de hierro.

El curso inferior del río Apa, el cual forma parte del vaso, presenta tobas y brechas, de carácter masivo, exhibiendo colores grises y verdes oscuros, así como ocasionales sistemas de diaclasas, con aberturas de pocos milímetros.

3.3.1.2 ESTRUCTURAS

3.3.1.2.1 FALLAS

A través del levantamiento geológico de superficie, se pudo constatar la presencia de los sistemas de falla propuestos en trabajos anteriores y que se exponen a continuación:

En el curso del río Apa, presenta fallas de rumbo N60W y N60E, mientras que el río Casupo Grande y parte del Cuira bajo, las orientaciones preferenciales son E-W y N70-80W.

Debido a las condiciones que presentan, así como por la homogeneidad de las rocas presentes en la zona, se hace demasiado difícil establecer el movimiento de las fallas, así como su magnitud de desplazamiento.

3.3.1.2.2 DIACLASAS

Las diaclasas presentes en las rocas volcánicas y volcanoclásticas son de escasa frecuencia, con aberturas de pocos milímetros e inclusive cerradas, mientras que en las rocas intrusivas, se

observan varios sistemas de diaclasas, presentando una mayor frecuencia y con aberturas de hasta 5 milímetros.

3.3.1.2.3 PLANOS DE BUZAMIENTO

Las rocas aflorantes en el vaso de almacenamiento son casi en su totalidad de carácter masivo, lo que imposibilita en ese caso, determinar su disposición, sin embargo, en ocasiones se pudo determinar debido a la presencia de tobas bandeadas, en unos casos y tobas alternadas con brechas en otros, obteniéndose una disposición general en dirección NE.

3.3.2 SITIO DE PRESA

El sitio de presa “El Dinero” es una angostura del río Cuira, aproximadamente unos 10 Km aguas arriba de su desembocadura en el río Tuy y 7 Km aguas abajo del caserío El Jobito, a orillas del mismo río. Dicho sitio de presa, se encuentra en un trecho del río que se encauza entre laderas con pendiente entre 65 y 80%, con dirección N50°E.

En una fila de topes agudos con orientación NW – SE (Chorrerones), se apoya el estribo derecho de la presa, donde se encuentran pendientes elevadas de hasta 75% aproximadamente.

El estribo izquierdo, descansa sobre una fila con disposición NW – SE, al Sur de la Fila El Cuchillo, esta presenta topes agudos y una alta pendiente de hasta 70% en la ladera NE.

Aguas arriba del sitio de presa, el río presenta un curso sinuoso que presenta un marcado control estructural, observándose socavación de la margen derecha del

mismo y formando un playón aluvial en la vertiente opuesta cerca del sitio de presa; este comportamiento ha generado un cambio en el curso del río, lo cual se evidencia en la secuencia aluvial observada en las perforaciones. Adicionalmente se encuentran a lo largo de este trayecto múltiples zonas rellenas por coluvios, cubriendo en gran parte los afloramientos.

Analizando el contacto del basamento rocoso con los sedimentos aluvionales, se observó que el río Cuira formaba un paleocanal, muy profundo, en forma de V aguda, con una cota mínima de 25 m.s.n.m. Esto indica que el nivel de base en tiempos pasados, estaba 20 m por debajo del nivel actual. La causa puede radicar en la elevación del nivel del mar a finales de la última era glacial, ya que la otra causa posible, el hundimiento de la cuenca de Barlovento, no tiene evidencias fundadas.

3.3.2.1 LITOLOGÍA

Durante las jornadas de levantamiento geológico se pudo constatar la presencia de tobas y brechas volcánicas con poco grado de meteorización, inclusive la presencia de algunas lavas andesíticas, lo que se corresponde con la formación Las Hermanas, más específicamente al grupo Villa de Cura (Urbani et. al., 1990).

Las metatobas y metabrechas presentan un carácter masivo, diferenciándose entre sí por la granulometría, siendo mayor la de las metatobas. Los colores frescos van de verde claro a oscuro con tonalidades grises y negras; con respecto a las diaclasas, son escasas y poco definidas.

Las lavas encontradas son también de carácter masivo y de color oscuro, con vesículas rellenas en su mayoría por plagioclasa.

Se confirmó la presencia de metadiabasa de color verde oscuro a negro en una quebrada al Sur del estribo izquierdo, encontrándose rocas similares en las perforaciones 14, 15, 18, 22 y 20, ubicadas en los estribos de la presa. Esta roca está

compuesta por ortopiroxeno, plagioclasa (andesina) y anfíbol cloritizado. Adicionalmente se localizó microdiorita porfídica poco metamorfizada, la cual está compuesta por plagioclasa (oligoclasa), anfíbol, clorita y cuarzo.

El metamorfismo sufrido en forma regional es de grado bajo a muy bajo, indicado por las asociaciones mineralógicas de las facies de pumpellita y esquistos verdes (Urbani et. al., 1990).

3.3.2.2 ESTRUCTURAS

3.3.2.2.1 FALLAS

Mediante el empleo de imágenes aéreas, se pudo determinar la presencia de una falla con rumbo N – S, por donde fluye el río Cuira aguas abajo del sitio de presa. Se desconocen su geometría y su movimiento relativo, ya que no presenta afloramientos. Como consecuencia de la presencia de esfuerzos laterales, la disposición de la falla se ha desviado del rumbo original N –S, siendo fracturado el plano de falla principal, en una serie de segmentos menores con desviación tanto al Este como al Oeste, por lo que el río presenta un curso zigzagueante, evidencia característica del control estructural.

Otra falla encontrada está ubicada en el tramo del río Cuira, sobre el sitio de presa El Dinero, presentando un rumbo NW – SE, la cual es cortada y desplazada en sentido sinistral por otra de rumbo NE – SW y que pudiese presentar movimiento de tipo normal, ubicada más aguas arriba del sitio de presa.

Durante el análisis de las perforaciones, se detectó la presencia de algunas fallas de poca importancia y magnitud, que pudiesen estar asociadas a las mencionadas anteriormente.

3.3.2.2.2 DIACLASAS

En el sitio de presa se ubicaron varias familias de diaclasas, específicamente cuatro familias para el estribo derecho y tres familias para el estribo izquierdo, sus rumbos y buzamientos se reflejan en las tablas 17 y 18, y su ubicación en el **plano N° 01 del Anexo I**.

Tabla 17: Familias de diaclasas – estribo derecho

DISCONTINUIDAD	RUMBO	BUZAMIENTO
D1	N 10 E – N 10 W	70 – 90 N
D2	NS – N 25 E	65 - 75 S
D3	N 40 – 75 W	25 - 60 N
D4	N 55 – 75 W	75 – 90 N

Tabla 18: Familias de diaclasas – estribo izquierdo

DISCONTINUIDAD	RUMBO	BUZAMIENTO
D5	N 15 W – N 25 E	70 – 90 N
D6	N 40 – 70 W	65 – 90 N
D7	N 40 – 60 E	45 – 75 S

3.4 GEOTECNIA DEL SITIO DE PRESA

3.4.1 REVISIÓN DE PERFORACIONES

Al ser efectuadas las perforaciones, se procedió a estudiar detalladamente los testigos de 50 de las 300 cajas, para así verificar sus descripciones, apoyándose con el análisis petrológico y tomando en cuenta las condiciones de la roca así como su fracturamiento. Las planillas con la descripción de las perforaciones y el anexo fotográfico de las cajas de muestras, conforman el **Anexo II y III** respectivamente.

En la tabla 19 se puede observar el número de perforaciones que se realizaron, así como también los metros perforados y el número de pruebas de permeabilidad ejecutados.

Tabla 19: Tabla resumen de perforaciones

Perforación	SPT (m)	ROTACIÓN (m)	Combinado (m)	Metros perforados	Nros de Pruebas de Permeabilidad
		Total		Total	
PED-1-45	0	24	6	30	-
PED-1-V	11	15	24	50	4
PED-2-45	0	11	3	14	2
PED-2-V	4	44	0	48	23
PEDI-3	7	50,7	4	61,7	-
PEDI-4	4	25,6	20	49,6	3
PEDD-5	11	39	0	50	11
PEDD-6	23	27	0	50	2
PEDI-7	10.5	19,5	0	30	3
PEDD-8	16.5	33,5	0	50	4
PEDD-9	-	50	-	50	4
PEDD-9 ^a	6	44	-	50	6
PEDV-10	-	50	-	50	7
PEDV-11	3	47	-	50	3
PEDI-12	5	45	-	50	5
PEDV-13	-	53	-	53	4
PEDI-14	-	40	-	40	5
PEDI-15	-	40	-	40	6
PEDD-16	-	50	-	50	2
PEDV-17	17	33	-	50	6
PEDD-18	-	40	-	50	9
PEDV-19	5	45	-	50	8
PEDD-20	-	40	-	40	7

PEDV-21	15	33	2	50	5
PEDD-22	-	40	-	40	7
PEDD-23	-	40	-	40	4
PEDV-24	-	50	-	50	4
PEDI-25	-	40	-	40	5
PEDD-26	6	25	19	50	5
PEDI-27	6	44	-	50	6
PEDI-28	8	41	1	50	5
PEDV-29	3	43	4	50	3
PEDV-30	7	32	11	50	5
PEDD-31	-	40	-	40	7
PEDI-32	-	40	-	40	7
PEDD-34	-	40	-	40	8
Totales	168	1374,3	94	1646,3	195

* Perforaciones Cantera Estribo Derecho

Fuente: RGR Ingeniería C.A.

Para las perforaciones se utilizó un diámetro HQ, con la obtención de núcleos de 61 mm de diámetro, mientras el hueco de la perforación, fue de 96 mm. Por lo general, se utilizó un forro HTW, con el mismo diámetro externo, pero con 70.9 mm de diámetro interno.

Los resultados obtenidos de este análisis, fueron imprescindibles para elaborar el marco geológico-geotécnico de superficie del sitio de presa expuesto en el **Plano N° 01** del Anexo I, ya que ambos estribos se encuentran bajo una cobertura coluvial, con fragmentos de roca en matriz arcillo - arenosa con colores rojizos, que no permite las observaciones directas del macizo rocoso. Los espesores de los coluvios encontrados en las perforaciones varían entre 4 m y 14 m.

Con respecto al material de origen aluvional, por lo general encontramos arcillas arenosas blandas y arenas limosas sueltas, en los primeros 3 a 5 m, seguidos de materiales de similar litología pero con mejor consistencia. Algunas perforaciones cercanas al piedemonte, como la PED-8 y PED-7, se encuentra material correspondiente a desprendimientos, con fragmentos de roca, alternados con arenas aluvionales, seguido por materiales de granulometría fina a media y luego encontrándose arenas gravosas y gravas gruesas que algunas veces sirven de matriz a

peñones de mayor tamaño. Sin embargo, en algunas perforaciones ubicadas en el cauce del río, como la PEDv-19, se encuentran espesores de material aluvional hasta de 4 m, seguido por la roca.

En las perforaciones ubicadas en el cauce del río o en la adyacencia del mismo, se encuentra principalmente gravas y arenas gravosas en los primeros 5 m, seguidos de gravas gruesas.

En la revisión de las perforaciones no se apreciaron discontinuidades diferentes de las familias encontradas durante el levantamiento geológico.

3.4.2 CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

De acuerdo a lo que se presenta en las planillas de perforación, se observa en general la siguiente distribución: roca descompuesta (RD), roca muy meteorizada (RmM) o roca meteorizada blanda (RMb), no se extienden a profundidades mayores a los 5 m, inclusive en muchos casos apenas alcanzan sólo un par de metros, para luego pasar a roca meteorizada dura (RMd), a roca poco meteorizada dura (RpMd) o roca fresca dura (RFd). Esto no se aprecia en las perforaciones efectuadas tanto en las planicies aluviales como en el cauce del río, ya que allí, la roca se encuentra cubierta por los sedimentos, por lo que presenta perfiles entre roca poco meteorizada a fresca y fracturas con óxido de hierro y de poca abertura.

Con la información obtenida de las perforaciones en relación con el grado de fracturamiento de la roca o índice RQD (Rock Quality Designation), desarrollado por Deere entre 1963 y 1967 (Stagg-Zienkiewicz) y que se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud, (descartando en lo posible, las fracturas inducidas durante el proceso de perforación) con respecto de la longitud total del sondeo, la empresa RGR Ingeniería elaboró perfiles geotécnicos, donde se

aprecia la variación lateral de este índice con respecto a la profundidad. Con esta información se estableció una distribución de acuerdo a la variación del RQD predominante por zonas, observándose que en el eje de presa (Perfil CC') y el inmediatamente hacia aguas arriba, prevalece la calificación de roca muy mala (RQD: 0 – 25%) a roca mala (RQD: 25 – 50%), hacia el estribo derecho. Mientras que el estribo izquierdo y el centro del valle, existe un predominio claro de intervalos de RQD de 25 – 50% y 50 – 75%, correspondiendo a categorías de roca mala a roca regular, respectivamente. En términos generales, un 32% del macizo tiene un RQD menor a 25 (roca muy mala) y un 28% tiene RQD entre 25 – 50 (roca mala).

De los núcleos de las perforaciones, se ensayaron ocho (08) muestras de rocas meta-volcánicas en el Laboratorio de Materiales y Ensayos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, identificadas como muestras de laboratorio 1613 a 1620, con su respectiva localización y profundidad de perforación (véase los resultados de laboratorio en **Anexo IV**). Los valores de resistencia a la compresión simple de la roca intacta σ_{ci} en seis (06) muestras analizadas se observan en la tabla 20:

Tabla 20: Resistencia a la compresión de núcleos

Muestra laboratorio : Perforación (profundidad)	σ_{ci} (kgf/cm²)
1613 : PED-19 (36.00 m)	445
1614 : PED-2V (19.50 m)	257
1615 : PED-5 (50.00 m)	582
1618 : PED-6 (40.10 m)	462
1617 : PEDD-17 (42.40 m)	667
1616 : PED-6 (50.00 m)	462

De acuerdo a los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión, se tiene que la resistencia promedio es de $\sigma_{ci} = 479$ (kgf/cm²).

Para tener una idea de la calificación de la resistencia de estos núcleos de roca intacta, se puede observar la tabla 21, donde se resume el criterio de Deere & Millar tomado del Johnson & De Graff, y se aprecia que esta roca entra en el rango de resistencia baja a media.

Tabla 21: Clasificación de resistencia - roca intacta (Deere & Miller)

CLASE	RANGO DE RESISTENCIA UNIAXIAL (Kg / cm2)
Muy Resistente	> 2200
Alta Resistencia	1100 -- 2200
Resistencia Media	550 -- 1100
Baja Resistencia	280 -- 550
Muy Baja Resistencia	< 280

Fuente: Johnson & De Graff

De la misma manera se efectuaron ensayos de tracción indirecta en dos (02) muestras analizadas, arrojando los valores de σ_t que se presentan en la tabla 22.

Tabla 22: Valores de σ_t obtenidos

Muestra laboratorio : Perforación (profundidad)	σ_t (kgf/cm²)
1619 : PED-8 (29,00 m)	106
1620 : PED-17 (50,00 m)	70

Siendo el promedio: $\sigma_t = 88 \text{ kgf/cm}^2$.

Al aplicar el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, la relación entre σ_c y σ_t puede expresarse como sigue:

$$\sigma_c / \sigma_t = \tan^2 (45 + \Phi/2)$$

Siendo Φ el ángulo de fricción interna para la **roca intacta**.

Tomando los valores promedios resulta:

$$\tan^2 (45 + \Phi/2) = 479 \text{ kgf/cm}^2 / 88,00 \text{ kgf/cm}^2 = 5,44$$

$$(45 + \Phi/2) = \arctan \sqrt{(5,44)} = 66,8^\circ$$

$$\Phi = 43,6^\circ$$

En estas condiciones, se sabe a través del mencionado criterio que:

$$q_u = \sigma_c = 2 \cdot c \tan (45 + \Phi/2)$$

Por lo tanto el valor de la cohesión en la **condición intacta** es:

$$C = \sigma_c / 2 \cdot \tan (45 + \Phi/2) = 479 \text{ kgf/cm}^2 / 2 \cdot \tan (66,8^\circ)$$

$$C = 102,79 \text{ kgf/cm}^2$$

Posteriormente se efectuó un análisis de las condiciones de las discontinuidades encontradas en los testigos de las perforaciones efectuadas, las cuales se compararon con los datos obtenidos durante el levantamiento geológico, con el objeto de determinar las características de las fracturas que se emplearan en la caracterización del macizo rocoso, lo que se presenta a continuación:

Longitud: De acuerdo a lo observado en las muestras de las perforaciones y los datos obtenidos en campo, se encuentra que la longitud de las discontinuidades, en general, es inferior a 1 m.

Abertura: Se encuentran fracturas cerradas en la mayor parte de las muestras, sin embargo, se observan aberturas entre 1 – 2 mm en algunas de las mismas.

Relleno: En algunos casos las fracturas presentan óxido de hierro, pero en la mayor parte de éstas, se encuentra cuarzo, con espesores inferiores a los 4 mm.

Rugosidad: La condición general presentada es de superficies ligeramente rugosas, con casos aislados de superficies onduladas.

Estado de las Paredes: Se encuentran paredes con escasa alteración, presentando en ocasiones evidencia de oxidación.

En la tabla 23 se puede observar las consideraciones de la clasificación de **BIENIAWSKI (1989)** aplicadas a las condiciones observadas en las diaclasas.

Tabla 23: Puntuación de las condiciones de las diaclasas según Bienawski(1989)

CARACTERÍSTICA	RANGO	PUNTUACIÓN
Longitud de la discontinuidad	< 1 m	6
Abertura	1-5 mm	3
Rugosidad	Lig. Rugosa	3
Relleno	Duro < 5mm	4
Alteración	Lig. Alterado	5
Compresión Simple	50 - 25	4
RQD	-----	Variable
Separación entre Diaclasas	0,2 – 0,6	10
SUBTOTAL (sin RQD)		35

Al emplear los intervalos de RQD expuestos en los perfiles antes mencionados, y asumiendo valores bajos, conservativos y que representan la moda para cada intervalo, se tienen los siguientes valores: RQD = 5 para el rango 0-25, RQD = 30 para el rango 25-50, RQD = 60 para el rango 50-75 y RQD = 80 para 75-90.

Al tomar la sumatoria de puntos obtenida de las condiciones del macizo rocoso y de las diaclasas, se añade la puntuación correspondiente al grado de fracturamiento, para obtener la clase de la roca de acuerdo a la clasificación RMR que se presenta a continuación en la tabla 24.

Tabla 24: Clasificación según el Rock Mass Rating (RMR)

CLASIFICACIÓN SEGÚN RMR	
(Bieniawski)	
CLASE I:	RMR>80, Roca muy buena
CLASE II:	80<RMR<60, Roca buena
CLASE III:	60<RMR<40, Roca media
CLASE IV:	40<RMR<20, Roca mala
CLASE V:	RMR<20, Roca muy mala

Posteriormente, utilizando la ecuación de BARTON et al (1974) para el cálculo del parámetro Q (Tunnelling Quality Index):

$$Q = \left(\frac{RQD}{Jn} \right) \times \left(\frac{Jr}{Ja} \right) \times \left(\frac{Jw}{SRF} \right)$$

Empleando los valores de RQD expuestos anteriormente y asumiendo valores intermedios para las variables contempladas en la ecuación de Barton, se calculó el índice Q y se clasificó el macizo rocoso de acuerdo a la tabla 26, resultados que se encuentran en la tabla 28 de resumen. Los valores asumidos para cada variable se presentan en la tabla 25.

Tabla 25: Valores de las variables según el Q de Barton

VARIABLE	MÍNIMO	MAXIMO	ASUMIDO
Jn	12,0	9,0	10,5
Jr	1,5	3,0	2,25
Ja	1,0	1,0	1,0
Jw	1,0	1,0	1,0
SRF	7,5	2,5	5,0



Tabla 26: Clasificación Q de Barton

CLASIFICACION SEGÚN Q (BARTON)	
CALIDAD DE MACIZO ROCOSO (Q)	CLASE DE ROCA
0,001 – 0,01	EXCEPCIONALMENTE MALA
0,01 – 0,1	EXTREMADAMENTE MALA
0,1 – 1	MUY MALA
1 – 4	MALA
4 – 10	MEDIA
10 – 40	BUENA
40 – 100	MUY BUENA
100 – 400	EXTREMADAMENTE BUENA
400 – 1000	EXCEPCIONALMENTE BUENA

Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se determinó el parámetro aproximado de GSI (Geological Strength Index) por medio de la tabla 27, que se presenta a continuación, obteniéndose como resultado un rango de valores entre 37 y 54.

Tabla 27: Rango del Índice de Resistencia Geológica estimado (GSI)

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR EL ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación,		CONDICIÓN SUPERFICIE DE DISCONTINUIDAD				
ESTRUCTURA		MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
		Muy rugosa, bordes sanos, superficies cerradas, sin rellenos	Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura menor a 0,1 mm, predominan los rellenos	Ligeramente rugosa, moderadamente meteorizada, abertura entre 0,1-1,0 mm, rellenos duros y blandos	Lisa, muy meteorizada, abertura entre 1,0-5,0 mm, predominan los rellenos blandos	Espejos de falla, superficies descompuestas, abertura mayor a 5,0 mm, rellenos blandos
		DISMINUCIÓN EN CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	INTACTA O MASIVA macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación	90	80	70	N/A	N/A
	NO FOLIADA/FRACTURADA macizo rocoso poco perturbado consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas ortogonales de discontinuidades, muy bien unidos entre sí	80	70	60		
	NO FOLIADA/MUY FRACTURADA macizo rocoso parcialmente perturbado consistente de bloques angulares unidos entre sí, formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades.	70	60	50		
	NO FOLIADA/PERTURBADA macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de varios sistemas de discontinuidades.	60	50	40	30	
	NO FOLIADA/DESINTEGRADA macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente unidos entre sí.	50	40	30	20	
	BRECHADA/CIZALLADA macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide.	N/A	N/A	20	10	
		↑ AUMENTO EN LA PRESENCIA DE ROCAS FOLIADAS O DISMINUCIÓN DEL ENTRAMBAMIENTO ENTRE BLOQUES				

GSI:

El valor de RQD asumido, el cual se enmarcó dentro de un criterio conservador, por lo que el valor representativo de cada rango tiende hacia el extremo inferior del intervalo de valores. Dichos valores y los resultados obtenidos para cada sistema de clasificación se reportan en la tabla 28.

Tabla 28: Tabla resumen de las clasificaciones geomecánicas

RANGO RQD	1 – 25	25 - 50	50 – 75	75 - 90
RQD Asumido	5	30	60	80
Q de BARTON	0,22	1,29	2,57	3,43
RMR	38	41	48	52
GSI	37 - 54	37 - 54	37 - 54	37 – 54

De acuerdo a la clasificación de Bieniawski para el RMR, estas rocas pertenecen a las Clase IV (Roca mala) y Clase III (Roca media). Mediante la clasificación GSI, se obtuvo como resultado una roca media, corroborando el resultado obtenido a través del RMR.

Es importante destacar que al aplicar la clasificación del RMR, los resultados difieren ligeramente de los que se obtuvieron en el proyecto original de la presa sobre el río Cuira, en el cual se utilizó el valor del Q de Barton para estimar el RMR, según la siguiente correlación:

$$\text{RMR} = 15 * \log_{10} Q + 50$$

También es importante mencionar que los valores bajos de Q, entre 0,22 y 3,43, que califican el macizo como roca muy mala a mala, discrepando con los resultados de las clasificaciones anteriores, es efecto de los factores J_n y SRF. El

primero de ellos, con valores entre 9 y 12, corresponde a tres familias de juntas o diaclasas ($J_n=9$) y tres familias más otra ocasional ($J_n=12$), manteniendo el criterio de las observaciones de campo, donde se identificaron 4 familias de fracturas en el estribo derecho y 3 en el izquierdo. El SRF, se tomó para rocas competentes sin arcilla pero con muchas zonas de cizalla, tal como fue observada en afloramientos y núcleos de perforaciones, ($SRF=7,5$) y roca competente con baja tensión en la superficie ($SRF = 2,5$).

3.4.3 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD

Estas pruebas fueron efectuadas por la empresa RGR Ingeniería a medida que se realizaban las perforaciones, en intervalos de roca y con corridas de presión de 2,5; 5,0; 10,0; 5,0 y 2,5 Kg/cm², para cotas inferiores a los 110 m en los estribos y en planicies aluviales. Para cotas superiores se empleó corridas de presión 1,0; 3,0; 5,0; 3,0 y 1,0 Kg/cm². Para el cálculo de la permeabilidad en unidades Lugeon, la empresa recurrió al criterio expuesto en el Manual de Presas de Tierra, pero adaptado al diámetro del hueco con la serie HQ, el cual se presenta a continuación:

$$K = (Q / 2 p * L * H) * \log_e L / r$$

$$K_1 = K \times 10^5$$

Donde:

K : Permeabilidad expresada en cm/seg

K₁: Permeabilidad expresada en Unidades lugeon

Q: Gasto expresado en cm³/seg

L : Intervalo de prueba (cm)

r : Radio del hueco probado (cm)

log_e: Logaritmo natural

H : Carga hidráulica total (cm)

Posteriormente para la conversión a unidades Lugeon de los datos de permeabilidad de otras presas, se aplicó el criterio expuesto por Houlby (1990):

$$k = 1,3 \times 10^{-5} \text{ cm/seg}$$

Siendo k el valor de permeabilidad expresado en unidades Lugeon.

En el **Anexo II**, se adjuntan las planillas de perforación donde se observan los resultados obtenidos en las 195 pruebas realizadas. Luego se elaboraron los perfiles de permeabilidad del macizo rocoso, basándose en el criterio de Houlby (1990). De estos perfiles se analizó en este trabajo el correspondiente al perfil D – D' (Plano 03), ya que es el más representativo con respecto a la relación RQD – Permeabilidad.

En general se observa la falta de correspondencia entre el grado de fracturamiento del macizo rocoso y la permeabilidad, para el caso particular de Cuira, presentando en la mayoría de los intervalos con valores de RQD entre 0 y 25 una permeabilidad baja, incluso por debajo de los 3 Lugeon.

Los resultados de permeabilidad de las otras presas involucradas en este trabajo, se presentan en las planillas de perforación de las mismas, en el **Anexo II**.

CAPITULO IV

4. GEOLOGÍA DE OTRAS PRESAS

4.1 AGUA BLANCA – ESTADO FALCÓN

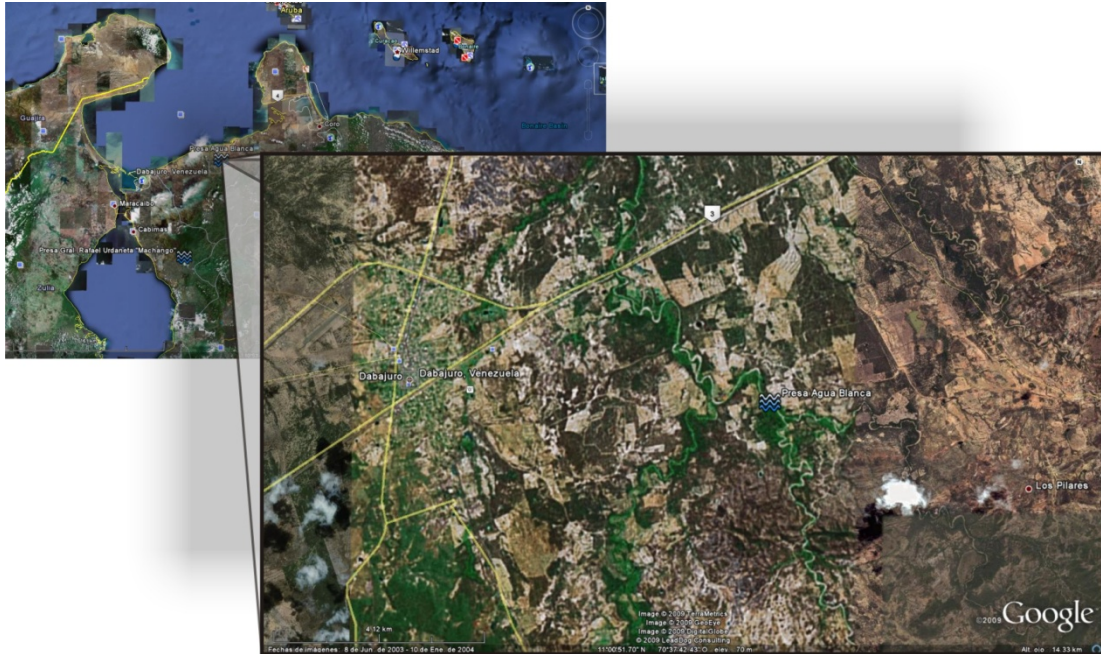


Figura 19. Ubicación de presa Agua Blanca

Fuente: tomado y modificado de Google Earth® 5.0

4.1.1 VASO DE ALMACENAMIENTO

Los aspectos geológicos más relevantes encontrados para el área de estudio fueron:

4.1.1.1 GEOMORFOLOGÍA

El aspecto fisiográfico más resaltante para el área que involucra al sitio de presa y el vaso de almacenamiento, corresponde al amplio valle alargado por donde discurre el Río Agua Blanca con terrazas aparejadas y mostrando mayor desarrollo transversal en la margen izquierda.

El valle del Río Agua Blanca está circundando por una serie de colinas de topes amplios a relativamente planos que lo limitan lateralmente.

Los niveles relativamente planos que circundan el vaso de almacenamiento corresponden a remanentes de terrazas aluviales altas y asociadas a la planicie de Dabajuro. Como es común en la mayor parte del Norte del Estado Falcón, los ríos aportan caudal para las épocas de lluvias, siendo común en el período de sequía cursos completamente secos.

El Río Agua Blanca muestra un trazado sinuoso con desarrollos de meandros en su trayecto, encauzado entre paredes verticales de los bancos aluviales.

Para la zona, el drenaje corresponde a una red fluvial del tipo rectangular a dendrítica, donde el curso principal es consecuente en su trazado.

La Qda. Guerrero, afluente por la margen derecha, corresponde el aporte secundario más importante. La restante red comprende los cortos cursos intermitentes.

4.1.1.2 LITOLOGÍA

Se encuentra expuesta hacia los flancos de laderas, cursos de quebradas y tope de filas topográficas una secuencia sedimentaria que por sus características filológicas ha sido agrupada en las formaciones geológicas establecidas, las cuales son descritas ampliamente en la literatura especializada y sirven de referencia para el marco geológico de la zona.

A continuación se reseñan las características litológicas encontradas y dominantes para el área en estudio:

Formación La Victoria (Telv)

La unidad consiste de arcilitas, lutitas y limolitas intercaladas con areniscas. Las capas lutíticas afloran en espesores delgados, pero predominan sobre los sedimentos arenosos, más conspicuos. Las lutitas y arcilitas son típicamente de color gris púrpura, chocolate, localmente abigarradas, frecuentemente yesíferas y carbonáceas a ligníticas. Las areniscas varían de blandas a duras, finas, micáceas a gruesas, y delgadamente estratificadas a capas con estratificación cruzada, contienen concreciones o nódulos de ferrolitas arcillosas. Se encontró una caliza arenácea, gris, con fósiles de gasterópodos bien preservados.

Formación Socorro (Tmφs)

Lutitas color gris y crema, microfossilíferas, frecuentemente yesíferas, con manchas y costras ferruginosas, frecuentemente con vetas rellenas de yeso fibroso, intercaladas con areniscas en capas delgadas pero pueden encontrarse en paquetes de hasta 10 metros donde se muestran de grano fino, friables, de colores claros amarillentos a gris, micáceas, a veces con estratificación cruzada y costras ferruginosas en los planos de estratificación.

Terrazas (Qt)

Comprende áreas planas constituida por peñones y fragmentos de litologías variadas tales como: areniscas de grano fino rojizas, calizas coralinas, coquinas, rocas verdes, todas en una matriz arcillo-arenosa marrón claro a rojizo-gris.

Aluvión (Qral)

Corresponde a los niveles relativamente planos que bordean la zona en estudio y están constituidos por suelos de comportamiento limo-arcilloso con variaciones a arenas finas arcillosas, de coloración predominantemente marrón claro-amarillento. También comprende las acumulaciones recientes en el cauce del río de peñones redondeados a subredondeados.

4.1.1.3 ESTRUCTURAS

Las estructuras mayores están representadas por un sinclinal con eje rumbo Nor-Este que cruza el vaso de almacenamiento y una falla, Norte-Sur, que intersecta parte de las colinas que conforman la margen derecha del vaso. No se encontraron evidencias de rasgos distintos (fallas o pliegues menores) a los descritos.

Planos de estratificación

Estos planos estructurales se encuentran bien desarrollados donde las mediciones realizadas principalmente sobre capas de areniscas, se orientan preferencialmente en el rango comprendido entre el sentido Norte 65° a 80° Este y con deflexiones en sentido Oeste en las macroestructuras dominantes en la zona.

La variación en la inclinación de los estratos en cuanto a su dirección, da lugar a una estructura sinclinal con rumbo de su plano axial Norte 45° Este, con flanco Sur bien definido y marcado en contacto discordante, angular, entre las capas arenáceas de la Formación Socorro hacia la parte alta y areniscas superiores de la Formación La Victoria.

La estructura sinclinal es la respuesta al tectonismo y plegamiento sufrido en la zona durante el período Mioceno.

Planos de Diaclasas

Esta estructura se caracteriza por presentar planos penetrativos, bien desarrollados, en general cerrados y con superficie rugosa. La frecuencia es baja de 2 a 6 diaclasas por metro en capas potentes de arenisca.

Los patrones de mayor ocurrencia en las diaclasas, se orientan según las siguientes direcciones:

Tabla 28: Familias de diaclasas – vaso de almacenamiento, presa “Agua Blanca”

SISTEMA	RUMBO	BUZAMIENTO	FRECUENCIA
D1	N10W	Vertical	4:1
D2	N70W	45°N	6:1
D3	N70E	55°N	2:1

Fuente: RGR Ingeniería C.A.

4.1.2 SITIO DE PRESA

El sector donde se localiza está caracterizado por un cruce en zigzag del río, recostado hacia el lado izquierdo para cambiar, luego de recorrer por una distancia de 130 metros, a la margen derecha desde donde el trazado se hace rectilíneo con dirección Norte-Sur franco.

El sitio de presa corresponde a una garganta por donde el río cruza con valle en forma de V y afloramiento de rocas, principalmente, hacia la margen derecha. El estribo izquierdo se encuentra solapado hacia el pie de las laderas por materiales aluviales que conforman una terraza a 6 metros del fondo del cauce.

Los estribos corresponden a una serie de filas paralelas, de crestas topográficas conspicuas, alineadas en sentido Norte 80° Este controladas por capas de areniscas de buzamiento alto aguas arriba.

4.1.2.1 Litología

Los afloramientos de roca en el lugar, de acuerdo a las litologías encontradas, se han agrupado y asignado a la Formación La Victoria.

La secuencia litológica que aflora en el estribo derecho con prolongación hacia el cauce del río, se inicia con una capa gruesa de areniscas de grano fino, parda amarillenta, meteorizada. Luego la secuencia sedimentaria se compone de una alternancia de areniscas de grano fino, gris a gris verdoso, con estratificación cruzada y lutitas gris oscuro con espesor que va incrementando desde 10 cm, en el contacto con la arenisca parda amarillenta, hasta 5,50 metros en el extremo más aguas abajo.

Resalta la alternancia arenisca-lutita con variaciones laminares donde predomina la lutita. Es característica en las areniscas la presencia de concreciones de ferrolitas arcillosas y en las lutitas el color gris carbonaceo.

En la margen izquierda la secuencia sedimentaria está cubierta, hacia el pie de la ladera, por una terraza aluvial que muestra estratos de características limo arcillosas de coloración marrón claro con espesor de 3,50 metros que cubren un manto granular aluvial formado por cantos subredondeados a redondeados embebidos en una matriz areno-gravosa,

grisácea. El espesor observado sobre el lecho del río es de 2 metros. Esta terraza se ensancha aguas abajo y se adosa principalmente a las laderas de la margen izquierda.

En el estribo izquierdo afloran areniscas de grano fino, de color pardo amarillento como producto de la descomposición y meteorización. Se alternan con capas de lutitas que muestran una coloración marrón claro-grisácea, con espesor de afloramiento de 3,50 metros.

Los topes topográficos están controlados por el rumbo de las capas de areniscas dando lugar a filas de crestas alargadas con la cuesta de buzamiento hacia aguas arriba. En las laderas se aprecian surcos de erosión en las lutitas delimitados por paredes de arenisca más resistente a la degradación.

4.1.2.2 Estructuras

Las estructuras geológicas del sitio guardan estrecha relación con los rasgos regionales, destacando la orientación de los estratos y fracturas.

Planos de Estratificación

El estribo derecho presenta un escarpe donde está expuesta la secuencia sedimentaria dominante del sitio.

La estructura geológica tiene una orientación de las capas en dirección Norte 75° Este, con rango de 10° al Este y buzamiento alto de 55° a 65° Sur.

La orientación indicada se encuentra muy uniforme en la zona reflejando el dominio topográfico en las filas de mayor elevación en el sitio.

Diaclasas

Las agrupaciones preferenciales de orientación en las diaclasas son las siguientes:

Tabla 29: familias de diaclasa – sitio de presa “Agua Blanca”

SISTEMA	RUMBO	BUZAMIENTO
D1	N10°W	Vertical
D2	N50°W	35°N
D3	N20°E	30°N

Fuente: RGR Ingeniería C.A.

4.2 TAGUAZA – ESTADO MIRANDA

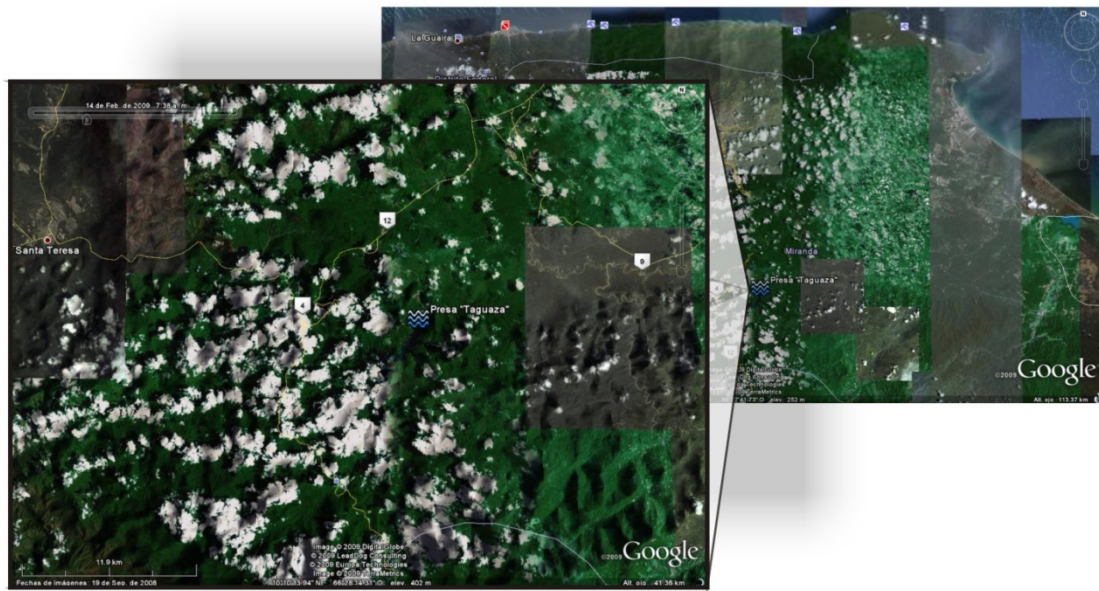


Figura 20. Ubicación de presa Taguaza

Fuente: tomado y modificado de Google Earth® 5.0

4.2.1 GEOMORFOLOGIA

El Río Taguaza desarrolla su curso a través de un ramal de la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa.

La zona estudiada está caracterizada por un complejo sistema de montañas y valles que han alcanzado una etapa de madurez temprana, en la cual tanto las elevaciones montañosas como el drenaje evidencian un claro control geológico sobre la fisiografía.

El macizo montañoso está constituido por rocas metamórficas cuya expresión topográfica son montañas con elevaciones promedio de 200-350 m, alcanzando cotas de hasta 500 metros hacia el Sur-Este de la zona.

El macizo se caracteriza además por un relieve de forma y orientación variable, destacándose filas prominentes con elongaciones Este-Oeste de las cuales arrancan ramales montañosos en direcciones Norte-Sur y Noreste, con disminución gradual de altura hacia el norte donde degradan en las pequeñas lomas y colinas que definen el límite de las montañas con las llanuras aluviales del Río Tuy.

Las montañas presentan en general zonas crestales agudas y angostas y con laderas de pendientes muy pronunciadas que localmente desarrollan amplias concavidades hacia la parte superior de la fila montañosa.

El drenaje de la zona es dendrítico e irregular, drenando principalmente sobre el Río Taguaza y la quebrada Cupara.

El Río Taguaza presenta una orientación preferencial E-W a N-S y N40E, observándose a lo largo de todo el cauce cambios locales de alineamiento derivados del control de las estructuras geológicas en el desarrollo del valle; el valle presenta un ancho promedio de 60-80 metros a nivel del río, aunque localmente la zona de terrazas desarrolla franjas de hasta 200 metros de ancho.

El drenaje secundario, a excepción de la Quebrada Cupara (caudal permanente) presenta caudales intermitentes y desarrolla sus cursos a través de cauces angostos y con pendientes muy pronunciadas. Este drenaje se diversifica en la parte superior de los cursos, en zonas de amplias concavidades derivadas de una erosión controlada por los sistemas de diaclasas de la parte superior de la montaña. La fracturación natural de las rocas (diaclasas) presenta frecuencias muy variables; en zonas de pendientes abruptas, una densidad alta de diaclasas favorece la decompresión del macizo rocoso, originando fracturas abiertas que delimitan bloques rocosos susceptibles a deslizamientos y derrumbes.

En la etapa fisiográfica actual, el volumen principal de materiales provenientes de estos deslizamientos y derrumbes ha sido transportado y depositado en el valle de los Ríos Taguaza y Tuy.

4.2.2 ESTRATIGRAFÍA

El marco geológico regional está caracterizado por rocas metamórficas pertenecientes al grupo Villa de Cura y sedimentarias de la Formación Tuy.

Formación Tuy

Está constituida por una intercalación de gravas y conglomerados mal consolidados, arcillas, margas y limos en capas con estratificación mal desarrollada que alcanza espesores individuales de hasta 3 metros.

Las gravas se presentan en una matriz arcillo-limosa, ocasionalmente calcárea y presentan guijarros cuyos tamaños oscilan entre 1 y 5 centímetros.

Las arcillas son de coloración marrón rojiza a rojo violáceo, con intervalos de coloración crema y verdoso. Son de composición montmorillonítica y localmente calcáreas por la presencia de margas.

Grupo Villa de Cura

Corresponde a una secuencia de rocas originalmente volcánicas afectadas por procesos de metamorfismo, las cuales ocupan una extensa franja superficial que se inicia en los límites de los Edos. Cojedes y Carabobo, terminando en el Edo. Miranda.

Se subdivide en cuatro formaciones (El Caño, El Chino, El Carmen y Santa Isabel) representativa cada una de ellas de eventos geológicos diferentes. En el plano local presentan una dirección estructural predominante según rumbos N75E, derivada de esfuerzos regionales de compresión actuantes en dirección NNO-SSE y esfuerzos de cizallamiento actuantes en dirección Este-Oeste.

A continuación se detallan las características litológicas de las mencionadas formaciones:

Formación El Caño

Constituida por metatobas y cantidades menores de metalavas, metachert y meta-areniscas.

Las metatobas son de textura afanítica, laminadas y de coloración en bandas alternantes verde claro a oscuro. Meteorizan a colores pardos rojizos, con abundantes óxidos de hierro y manganeso en los planos de diaclasas.

Las metalavas son rocas de color azul verdoso oscuro, tienen granularidad media y presentan a veces foliación bien definida, Se encuentran intercaladas con las metatobas en secciones con coloraciones alternadas verde claro a oscuro en las metatobas y azul verdoso en las metalavas. Son básicamente rocas de composición andesítica, siendo sus componentes mineralógicos principales plagioclasas y anfíboles.

Los metachert son rocas de color claro, en general de coloración verde grisáceo a gris verdoso, muy cuarzosas y con cantidades menores de plagioclasas y clorita. Son rocas de aspecto macizo.

Formación El Chino

Constituida principalmente por metatobas, con cantidades menores de metalavas, metachert, granulitas, esquistos y filitas.

Las metatobas se presentan como rocas de aspecto macizo a esquistoso, de coloración gris verdosa a azul oscuro; en los afloramientos se distinguen intervalos afaníticos y subesquistosos que imprimen a la roca un aspecto bandeado.

Las metalavas se encuentran a manera de flujos interestratificados con las metatobas. Son rocas de granularidad media, con abundantes fenocristales de augita; en general son de aspecto macizo.

Los metachert son rocas de textura afanítica y se encuentran a manera de capas delgadas y laminadas con espesores individuales menores de 10 cm. Son de color gris negruzco y generalmente presentan abundantes óxidos de hierro y manganeso en los planos de foliación y diaclasas.

Las granulitas son rocas de color gris verdoso a verde claro, generalmente esquistosas a subesquistosas, con abundante clorita en los planos de foliación. Se presentan en capas delgadas intercaladas con metalavas y metatobas.

Los esquistos son principalmente de composición clorítica y cuarzo albítica. Los esquistos cloríticos son de coloración verde claro a verde amarillento y presentan foliación delgada a fina; los esquistos cuarzo-albíticos son de color gris verdoso claro y presentan foliación gruesa.

Las filitas son rocas de coloración gris a azul grisácea y negra. Son de composición carbonácea y clorítica y presentan una foliación delgada a fina.

Formación El Carmen

Constituida principalmente por metalavas y metatobas.

Las metalavas son de coloración verde azulosa a verde oscuro, presentan en general un aspecto macizo con intervalos esquistosos. Localmente presenta intervalos con abundantes fenocristales de augita y vesículas-rellenas de plagioclasas, que imprimen a la roca un aspecto moteado.

Las metatobas son de color verde claro, en general macizas a subesquistosas, presentando aspecto bandeado por alternancia de coloraciones azul claro a verde oscuro.

Formación Santa Isabel

Constituida por esquistos cuarzo-albíticos, esquistos cloríticos, metalavas, metatobas y metachert.

Los esquistos cuarzo albíticos presentan una granularidad media a fina, son de color verde claro a verde azulado. Se presentan como rocas bien laminadas y en general de consistencia dura.

Los esquistos cloríticos se presentan como rocas finamente foliadas de aspecto escamoso y astilloso, localmente con apariencia lutítica. Son de color gris verdoso a verde azulado claro, En general son rocas blandas.

Las metatobas y metalavas se presentan en capas alternadas y con espesores variados. Son por lo general rocas poco laminadas y de aspecto macizo. Presentan coloración verde a azul verdoso, con abundantes fenocristales de augita y vesículas rellenas de albita que le imprimen un aspecto moteado a la roca.

Los metachert son rocas laminadas de textura afanítica, presentan laminillas de clorita y cristales de cuarzo alargados según la foliación. Son de coloración azul oscura a negra.

4.3 EL DILUVIO - ESTADO ZULIA

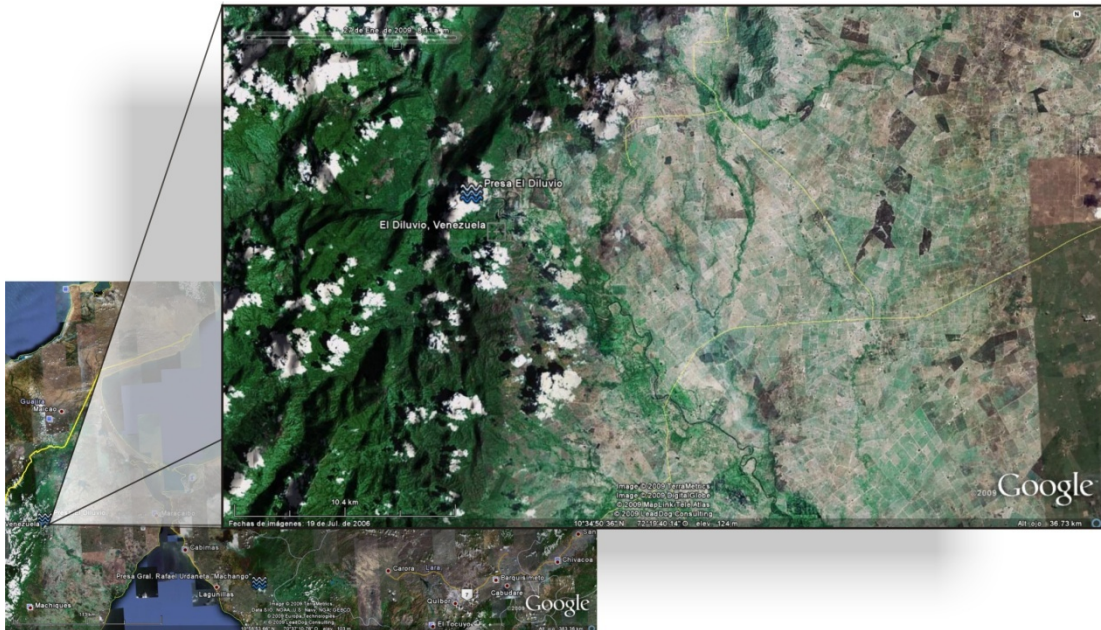


Figura 21. Ubicación de presa El Diluvio

Fuente: tomado y modificado de Google Earth® 5.0

4.3.1 LITOLOGÍA

El panorama geológico de la zona presenta dos tipos de rocas de fácil diferenciación en los afloramientos por sus colores característicos: una rojiza de origen sedimentaria (limolitas de la Fm. La Quinta) y otra marrón o gris parduzco (Rocas volcánicas del Totumo) predominante en la zona, las cuales se describen a continuación.

Formación La Quinta

En la sección tipo (Schubert *et al.*, 1979), la Formación La Quinta consta de tres intervalos: uno inferior, compuesto por una capa de toba vítrea de color violáceo, de aproximadamente 150 m de espesor; uno medio, consistente de una secuencia interestratificada de toba, arenisca gruesa y conglomerática, limolita y algunas capas

delgadas de caliza, de color verde, blanquesino, gris o violáceo (espesor aproximado: 840 m); y un intervalo superior, formado por limolita y arenisca, intercaladas con algún material tobáceo, de color rojo ladrillo y marrón chocolate, de aproximadamente 620 m de espesor. Según Arnold (en Schubert *et al.*, 1979), la cantidad de rocas piroclásticas en la Formación La Quinta, decrece de suroeste a noreste en los andes de Mérida; en el estado Trujillo, Tremaria (en Schubert, 1986) describió una secuencia puramente clástica, y en el estado Táchira, al sur de la sección tipo, Tarache (en Schubert, 1986), tampoco halló rocas piroclásticas en la Formación La Quinta. En la sierra de Perijá, Maze (1984) describió a la Formación La Quinta en la quebrada La Ge, donde se divide en tres intervalos: uno inferior (700-800 m, aproximadamente la mitad de la secuencia total), consistente de arcosa marrón a roja oscura, fina a mediana, con pocas intercalaciones volcánicas, y la cual contiene fragmentos vegetales y de carbón; una zona de transición (aproximadamente 100 m), la cual se compone de capas de basalto-andesita (a más de 20 m de espesor), conglomerado tobáceo, y arcosa verde, mediana a gruesa, con intercalaciones de arcosa marrón a rojo oscuro, y lutita roja a negra (rara vez verde) fosilíferas; y un intervalo superior (700-800 m), con rocas de grano más grueso (localmente conglomerado de cantos), consistente principalmente de arcosa roja oscura a marrón oscura, de grano grueso, y capas finas de ceniza félsica roja a rosada. El contenido de rocas volcánicas decrece de norte (donde predominan en la formación) a sur (hasta menos de la tercera parte del total).

Rocas volcánicas del Totumo

Según Hea y Whitman, en la localidad tipo la unidad comprende coladas volcánicas con algunas tobas brechadas interestratificadas, parcialmente metamorfizadas, que constituyen el miembro intermedio entre coladas e intrusiones poco profundas. Consisten de tobas líticas y aglomerados limosos a conglomeráticos, de color verde claro grisáceo a rojo oscuro, con fragmentos volcánicos de diferentes

tipos y colores, plagioclasa, cuarzo, serpentina y minerales de hierro. La matriz frecuentemente tiene un aspecto nublado no determinado; consiste de ceniza desvitrificada, cristales rudimentarios y material clorítico. Las tobas exhiben estructuras variables; con frecuencia se presentan zonas onduladas rellenas con limonita, estratificación subrítica y lenticularidad. Ocasionalmente se interstratifican con arcosas volcánicas carbonosas y pórfidos delgados.

Las coladas y rocas intrusivas poco profundas de la quebrada El Totumo se dividen en dos miembros: uno inferior, con latitas cuarcíferas, traquitas y dacitas; las latitas cuarcíferas son predominantemente rojas, con fenocristales finos, cuarzo idiomórfico corroído y grandes cristales de andesina en la matriz; el miembro superior consiste de latitas cuarcíferas porfídicas biotíticas, de color gris verdoso a rosado, macizas, gruesamente fenocristalinas y de composición similar al miembro inferior, el cual es más espilitico y puede haber sido una colada submarina.

4.3.2 UNIDADES GEOLÓGICO – GEOTÉCNICAS

Según observaciones hechas hasta el mes de Mayo de 1992, luego de excavar una gran cantidad de material superficial que impedía la visión detallada de la roca, las características del material encontrado son las siguientes:

Material de ladera reciente: agrupa aquellos materiales de poco espesor, que solapan parte de la ladera, especialmente hacia el Oeste del estribo, provenientes de desprendimientos de cotas superiores. Está conformado por una mezcla heterogénea de materiales coluviales con aristas angulares e incluso con algunos horizontes delgados de aluvión de escaso desarrollo, a unos 8 metros por encima del actual cauce del Río Palmar.

Coluvio calichoso: toda la parte superior del estribo está cubierta por una gran masa de material calichoso con peñones de diversos tamaños de caliza que se

han desprendido desde los afloramientos de rocas calcáreas que controlan el tope de estribación montañosa. Este material tiene un característico color crema claro que contrasta con los colores oscuros del resto de los afloramientos. Estos materiales están suficientemente descritos en los informes de geología para el proyecto original.

Unidad de roca movilizada: asocia todo macizo rocoso con fracturamiento intenso y abierto, sin ningún tipo de patrón definido, con delgadas capas de arcilla de superficie pulida que pueden representar planos de deslizamientos locales y acumulaciones de masas arcillosas con fragmentos de roca. Esta unidad comprende los afloramientos de las volcánicas donde se excavó el eje de presa según proyecto y un domo de arcilla oscura a la altura del estribo de la ataguía. Estos materiales posiblemente estén afectados por el macro paleo-deslizamiento identificado en las topografías aéreas y comentado en el informe del Dr. Vignali (Apéndice II), ya sea porque se han movilizado o se hayan descomprimido en el caso del macizo hacia la cara colindante con la masa deslizada. En términos generales ésta secuencia presenta una predominancia de colores marrón y gris oscuro, con depósitos calcicos en las diaclasas de colores blanquesinos. Toda la secuencia muestra evidencias de flujos subterráneos provenientes de las calizas de la parte superior.

Unidad poco fracturada: se refiere a los afloramientos que presentan familias de diaclasas definidas y consistentes, conformados principalmente por limolitas de color marrón rojizo y que se extiende desde la parte inferior de la ladera del estribo hasta el cauce y el estribo izquierdo. Destaca una especie de espolón o domo alargado, paralelo al cauce, de roca maciza y dura que posiblemente haya controlado el sentido del movimiento de la masa deslizada. Hacia aguas arriba, donde se preparó la plataforma para el sondeo P-8, la misma roca rojiza se presenta muy fracturada, afectada por el desplazamiento de la masa de coluvio calichoso suprayacente. No obstante no se observaron grietas ni cavidades.

4.4 YACAMBU – ESTADO LARA

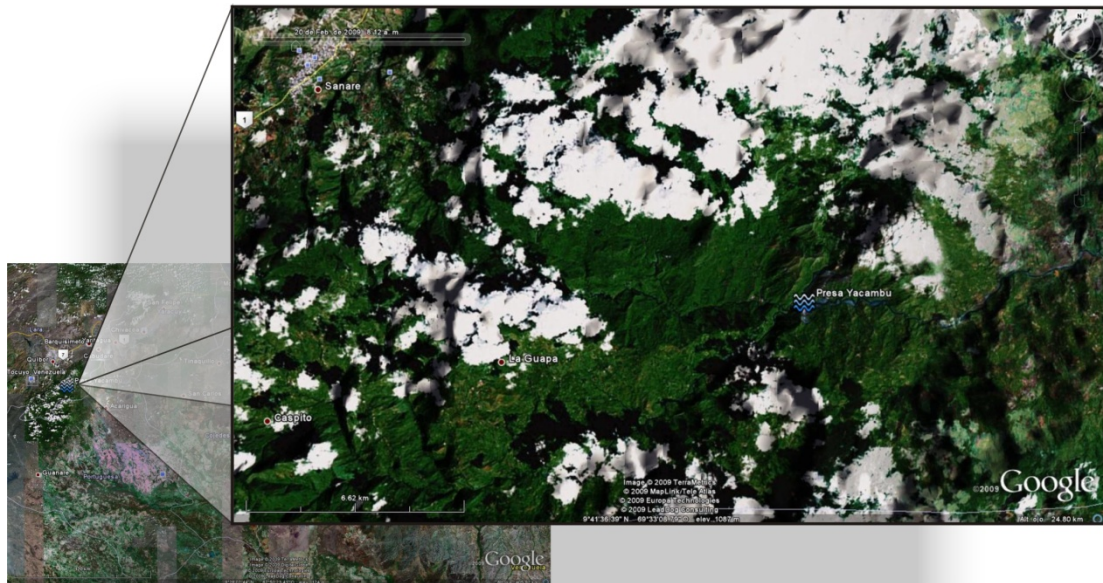


Figura 22. Ubicación de presa Yacambú

Fuente: tomado y modificado de Google Earth® 5.0

4.4.1 GEOMORFOLOGIA

4.4.1.1 FISIOGRAFÍA

La zona del vaso de almacenamiento y sitio de presa presenta un relieve irregular, caracterizado por filas y elevaciones montañosas (de hasta 1.200 m.s.n.m.), que predominan sobre áreas de topografía suave y valles estrechos, a lo largo de los cuales discurren los principales ríos y quebradas de la zona.

La configuración topográfica de la zona evidencia un estricto control litológico y estructural sobre las formas de relieve.

En efecto, las mayores elevaciones de la zona corresponden a intervalos de litología dura, resistentes a la erosión y separados entre si por

valles estrechos y cauces de quebradas controladas por los sistemas de fallas y diaclasas característicos de la región.

Se observan zonas de topografía suave onduladas en áreas donde predomina una litología menos resistente a la erosión, o donde la incidencia de estructuras geológicas han sido mayor (plegamiento más intenso, mayor densidad de diaclasas, convergencia de 2 o más fallas).

En estas últimas, el alto grado de fracturación de la roca, la composición mineralógica de la misma y la gran humedad, característica de la región, han favorecido una meteorización más intensa, desarrollándose mayores espesores de suelo y roca descompuesta susceptibles a ser erosionados por la acción de las aguas de escorrentía.

En general, estas zonas se destacan de otras donde predomina una litología más dura meteorizable y erosionable, porque forman surcos y depresiones alargadas según la dirección de la pendiente.

Ocasionalmente, las grandes elevaciones corresponden a intervalos de litología blanda, los cuales han sido levantados por tectonismo y actualmente se encuentran sometidos a una erosión intensa que se manifiesta por derrumbes y -deslizamientos en las laderas.

Las principales filas montañosas presentan crestas agudas, con cuevas de buzamiento fuertemente inclinadas (hasta 60°) y las cuales están recubiertas por una densa vegetación boscosa – selvática que dificulta las observaciones de campo; las contracuestas forman farallones o acantilados verticales con vegetación escasa o nula.

4.4.1.2 DRENAJE

El drenaje de la zona lo constituye un sistema irregular caracterizado por un colector principal, que es el río Yacambú. Sobre él drenan sus aguas colectores secundarios tales como las quebradas Honda, Negra, Los Villegas, El Salto y Agua Blanca; los cuales a su vez desarrollan sistemas de drenaje locales, en general de carácter dendrítico.

El río Yacambú presenta un rumbo generalizado de N 40-60 E y una longitud de aproximadamente de 11 km., dentro del vaso de almacenamiento. Hacia sus cabeceras desarrolla valles típicos de V cerrada, mientras que en las inmediaciones del Sitio de Presa desarrolla valles en U, con formación de terrazas, las cuales evidencian hasta 2 niveles de erosión diferentes.

En resumen, entre las cabeceras y el sitio de presa, el río Yacambú presenta rasgos característicos de juventud avanzada y madurez incipiente, interrumpidas por un rejuvenecimiento general de la zona. Aguas abajo del sitio de presa, el río discurre a lo largo de un cauce ancho, con desarrollo de curvas controladas por la geología local, deposición de aluviones en las márgenes y formación de playones en el cauce, evidenciando en conjunto una etapa de madurez avanzada.

Los tributarios han acentuado su labor erosiva en retroceso, desarrollando pequeños sistemas de drenaje dendrítico hacia aguas arriba; en estos sectores la acción de las aguas de escorrentía ha desarrollado formas fisiográficas típicas: circos y canales de deyección que en conjunto dan localmente a la zona aspectos típicos de áreas deslizadas por gravedad, siendo en realidad su origen la denudación local por fluencia de material.

Dentro del marco del vaso de almacenamiento resultan de interés las quebradas Honda y Negra ya que estas forman parte principal del vaso de

almacenamiento y representan los mayores caudales de la zona después del río Yacambú.

Las quebradas Honda y Negra, discurren a lo largo cauces estrechos en forma de V cerrada; la quebrada Negra presenta un desnivel de 150 mts, en un recorrido de 4 kms. hasta el sitio de presa y la quebrada Negra presenta un desnivel de hasta 150 metros en un recorrido de 3 kms. al sitio de presa.

Es evidente que ambas desarrollan su acción erosiva principal en retroceso provocando la denudación en las márgenes, en aquellas zonas donde confluyen los tributarios. Este proceso es más acentuado en las áreas marginales de la quebrada Negra donde la litología dominante en las elevaciones topográficas es una filita silícea carbonosa menos resistente a la erosión.

En el sitio de presa la acción erosiva de las aguas ha desarrollado un cañón a lo largo del cual discurre actualmente el río Yacambú.

4.4.1.3 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

La geología de la zona fué estudiada inicialmente por Von der Osten y Zozaya (Bol. Geol., Caracas, Vol 4, N° 9,1957).

En el mapa geológico regional (carta 2308), se indica a la Formación Villanueva como la unidad estratigráfica predominante en la zona del Sitio de Presa y Vaso de Almacenamiento.

La Formación Villanueva fue descrita como una unidad constituida principalmente por lutitas silíceas, localmente con estratificación de areniscas y calizas. (Von der Osten y Zozaya,1957).

Las lutitas son de colores gris y negro; meteorizan a colores marrón amarillento y presentan un alto contenido de sílice; en general están mal estratificadas y localmente son laminares. Su expresión topográfica son filas montañosas de plegamiento. En la zona los intervalos plegados no manifiestan continuidad en sentido longitudinal ya que se encuentran segmentados y desplazados como consecuencia de las fallas transversales. Los pliegues mayores presentan ejes con rumbo N50E y E-W, y deformación por plegamiento secundario que han originado micropliegues; por lo general los pliegues mayores y secundarios presentan ejes de rumbo diferentes.

Los estudios regionales indican que la región ha sido sometida a dos esfuerzos principales; primero un esfuerzo NW-SE (compresional), y luego un esfuerzo E-W (cizallamiento).

Como reacción a estos esfuerzos se desarrollaron también estructuras menores que afectan solamente a determinados intervalos de la Formación Villanueva; tales estructuras serían plegamiento inarmónico, acuñamiento de capas y clivaje de fractura.

El plegamiento inarmónico afecta a intervalos verticales delgados y se origina por deslizamientos intraformacionales a lo largo de los planos de foliación; el acuñamiento de capas es una consecuencia del mismo plegamiento. El clivaje de fractura afecta a secciones verticales de la formación, cercanas a zonas de falla; generalmente la roca evidencia desplazamiento vertical a lo largo de los planos de clivaje.

4.4.1.4 LITOLOGÍA

En la zona estudiada afloran rocas metasedimentarias de la Formación Villanueva, la cual está caracterizada por lutitas silíceas con delgados intervalos de areniscas y calizas lenticulares.

La litología de la Formación Villanueva fue afectada en parte por un metamorfismo de grado bajo, caracterizado por una intensa silicificación de la roca y que originó el desarrollo de filitas, esquistos y meta-cuarцитas.

En la zona de estudio predominan filitas pizarrosas de composición variada: filitas silíceas, silíceas calcáreas, silíceas carbonosas y carbonosas.

Las filitas silíceas, algo calcáreas y carbonosas, se presentan en el sitio de presa y vaso de almacenamiento.

Son rocas de color gris negruzco o negras cuando frescas y meteorizan a colores grisáceos. Sus componentes principales son sílice, cuarzo, material carbonoso y cantidades menores de carbonatas de magnesio; como accesorios contienen piritita. La roca exhibe una foliación gruesa y es muy tenaz.

Constituyen la roca más dura de la zona y su expresión topográfica más corriente es la de filas alargadas N10E a N60E, con laderas de pendientes fuertes a verticales.

En el sitio de presa constituyen más del 70% del volumen de roca en los estribos. En el vaso de almacenamiento constituyen las principales elevaciones y generalmente se encuentran interestratificadas con filitas carbonosas y filitas silíceas carbonosas.

Las filitas silíceas calcáreas, se encuentran principalmente en el sitio de presa y sectores de La Gran Parada.

Son rocas de color marrón grisáceo cuando frescas y meteorizan a colores pardos amarillentos. Sus componentes principales son sílice, cuarzo y calcita; como accesorios contiene cantidades menores de mica. La roca exhibe una foliación fina, alta fisibilidad y fractura astillosa por lo general de consistencia medianamente dura a blanda.

En el estribo izquierdo y sector de La Gran Parada se presenta en contacto con filitas silíceas carbonosas y representa el volumen principal de los materiales afectados por deslizamientos. En el vaso de almacenamiento se encuentra interestratificada con filitas silíceas carbonosas, en zonas de topografía suave y sometidas a intensa erosión.

Las filitas silíceas carbonosas, se encuentran en el sitio de presa y vaso de almacenamiento, generalmente interestratificadas con las filitas silíceas calcáreas.

Son rocas de color negruzco cuando frescas y meteorizan a colores marrón negruzco. Sus componentes principales son sílice y material carbonoso, como accesorios contienen calcita, pirita y cuarzo. La roca exhibe una foliación fina, alta fisibilidad y fractura astillosa, por lo general de consistencia blanda a medianamente dura.

En el estribo izquierdo se presenta en contacto en falla con filitas silíceas y filitas silíceas calcáreas. En el vaso de almacenamiento se encuentran generalmente interestratificadas con filitas silíceas, filitas carbonosas y filitas silíceas calcáreas.

Las filitas carbonosas, se encuentran principalmente aguas abajo del sitio de presa.

Son rocas de color negro cuando frescas y meteorizan a colores gris negruzco. Sus componentes principales son materiales carbonosos (grafito ?) y cantidades menores de sílice. La roca exhibe una foliación media, fractura concoidal con desarrollo de superficies pulidas con brillo vítreo a perlado; en general son de consistencia blanda.

Ocasionalmente se encuentra en intervalos delgados interestratificada con filitas silíceas en los estribos de la presa y vaso de almacenamiento.

4.4.1.5 SUELOS

En la zona de estudio se observan tres tipos de suelos: residuales, coluviales y aluvionales.

Los suelos aluvionales se observan en el valle del río Yacambú y en los cauces de las quebradas afluentes.

Se estima que tengan espesores de hasta 10 metros, alcanzando su máximo desarrollo en las terrazas observadas en el río Yacambú a unos 3-5 kms. aguas arriba del Sitio de Presa y a unos 2 kms. aguas abajo. En los cauces de las quebradas afluentes, los espesores de aluvión son muy variados, generalmente menores de 1 metro y no presentan continuidad a lo largo del cauce, ocasionalmente se encuentran grandes bloques de filitas provenientes de las laderas adyacentes.

El material aluvional está constituido por arenas, limos, gravas y peñones; en el sitio de presa está constituido principalmente por arenas y peñones mal gradados.

Los suelos residuales presentan espesores muy variables y están constituidos principalmente por materiales arcillosos, arcillo-limosos y limos arenosos.

En el estribo izquierdo, se estiman tengan espesores entre 1 y 12 metros; en el estribo derecho entre 1 y 4 metros y en el sitio de aliviadero, entre 1 y 5 mts.

Los suelos coluviales se observan aguas abajo del sitio de presa y en algunas zonas del vaso de almacenamiento. Están constituidos por fragmentos de roca de tamaño variado, incluidos en una matriz areno-arcillosa y areno-limosa.

4.5 RÍO MACHANGO – ESTADO ZULIA

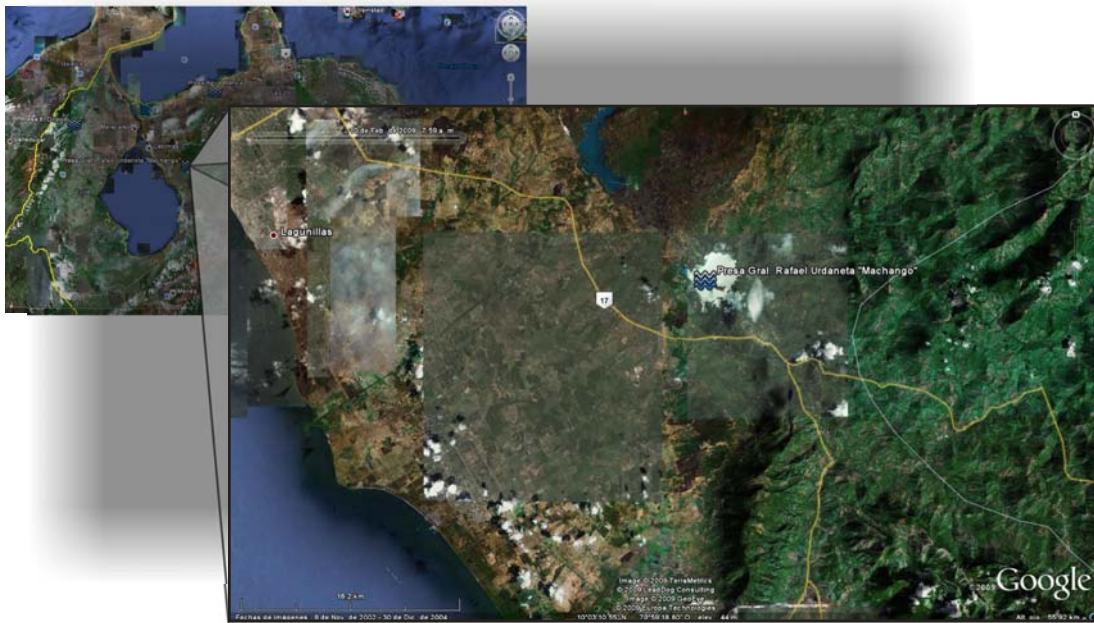


Figura 23. Ubicación de presa Machango

Fuente: tomado y modificado de Google Earth® 5.0

El río Machango, conjuntamente con los ríos Chiquito y Grande, constituyen el drenaje principal del flanco suroeste de la Serranía de Zaruma, en los límites de los estados Zulia y Falcón. El eje de presa se localiza a unos 3 km aguas arriba del puente de la carretera Lara-Zulia sobre el Río Machango, a unos 5 km de la población El Venado, donde el valle del río se estrecha y el cauce presenta cambio brusco, controlado por afloramientos rocosos. En el eje de presa el cauce posee una cota aproximada de 67 m.s.n.m. Este sitio de presa fue estudiado por RGR Ingeniería C.A. para el MARNR en el año 1983, mediante la ejecución de 20 perforaciones, de hasta 30 m de profundidad - en las cuales se realizaron 63 pruebas de permeabilidad - y 5 trincheras excavadas con un D7.

4.5.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Las formaciones que controlan un relieve de colinas hacia el vaso de almacenamiento y de filas alargadas en el mismo sentido del eje en el sitio de cierre, pertenecen al Terciario Medio, son Misoa y Lagunillas, ambas separadas por una falla, cuya traza se localiza unos 300 m aguas arriba del eje de presa,

Formación Misoa: Las características de los sedimentos de la Formación Misoa, dependen de su posición en la cuenca, del ambiente de sedimentación, de la distancia entre ellos y de la fuente de los mismos. Hacia el noreste hay más lutitas y areniscas de grano fino, mientras que hacia el sur y sureste, el porcentaje de arena aumenta al 80 y 90% de la sección, y los granos se hacen más gruesos. Se encuentran areniscas, limolitas y lutitas intercaladas en distintas cantidades, en toda la sección y hacia el este, en la sierra, algunas capas de caliza en la parte-inferior. En el área del lago se encuentran capas delgadas de caliza, en la parte inferior (Miembro C-7).

Las areniscas presentan tamaños variados de grano, pero en general, son de grano fino y gradan a limolitas y luego a lutitas. Son generalmente auras, micáceas, frecuentemente carbonáceas y generalmente bien estratificadas a macizas. Se presentan en unidades compuestas, con espesores normales de varias decenas de metros, las cuales localmente se agregan para totalizar espesores de centenares de metros, formando serranías pronunciadas. En el subsuelo, estas mismas arenas forman yacimientos múltiples verticales, con distribución lateral de decenas de kilómetros. Ghosh *et al.* (1989) identificaron los tipos de arcosa-subarcosa y sublitarenita-subarcosa, en las áreas de Urdaneta-Lagunillas y cuarzo-arenitas en la de Barúa-Motatán.

Las lutitas tienen composición variable, casi siempre son micáceas, arenosas a limolíticas, con abundantes estratos delgados, estrías y películas de arena, limo y material carbonáceo (incluyendo restos de hojas), que les den un aspecto laminado con estructura "flaser". Se presentan tanto en forma de intercalaciones menores en las unidades compuestas de arenisca-limolita, como en secuencias que alcanzan varios

centenares de metros de espesor, entre complejos de areniscas. Las lutitas han sido depositadas en ambientes de prodelta, de aguas someras, e interdeltáico, principalmente, y son diferenciables por las delgadas capas de lignito y por el material carbonáceo que contienen.

Las calizas son escasas y se presentan en la base de la formación, en la región suroriental y en el subsuelo del lago. Brondijk (*op. cit.*) las describe como de color gris a gris azulado, duras, con espesores de menos de un metro a varios metros, arenosas, gradando a areniscas calcáreas. Generalmente son bioclásticas, con foraminíferos grandes, algas y fragmentos de moluscos. En las antiguas referencias se denominaban Segundo Horizonte de Orbitoideos.

Esta formación está caracterizada en el sitio de presa por una secuencia de limolitas grises con delgados intervalos de lutitas y de areniscas. También se observan secuencias de capas gruesas de areniscas de grano medio de colores amarillentos, que presentan intercalaciones de lutitas grises.

Formación Lagunillas: En términos generales, la formación consiste en areniscas poco consolidadas, arcillas, lutitas y algunos lignitos.

Las características individuales de los miembros reflejan el cambio de ambiente marino somero, a deltáico y fluvial.

- Miembro Lagunillas Inferior. Está compuesto por areniscas friables, de grano fino, de color variable de marrón a gris claro y a blanco, intercaladas con lutitas gris claro, gris verdoso o gris oscuro. Localmente se encuentran lignitos.
- Miembro Ojeda. En la costa oriental del lago; consiste en arcillas moteadas, areniscas color gris, localmente glauconíticas y lutitas grises. En el área lago Central, se encuentran lutitas color gris a gris verdoso y gris oscuro, areniscas colores blanco, gris o marrón y lignitos. (Szenk, *op. cit.*).

- Miembro Marlago. En el área lago Central consiste, en areniscas blancas, gris o marrón con lutitas gris oscuro y verdoso y lignito (Szenk, *op. cit.*)
- Miembro Laguna. Consiste principalmente en lutitas grises fosilíferas (zona *Litophaga*, Hoffmeister, (*op. cit.*); Sutton, (*op. cit.*); además, areniscas color gris o marrón localmente glauconíticas, y arcillas arenosas moteadas.
- Miembro Urdaneta. Compuesto principalmente por arcillas de color gris verdoso claro, verde, rojo oscuro, marrón y marrón rojizo, con capas delgadas de arena arcillosa (Szenk, *op. cit.*). Está restringido al área lago Central.
- Miembro Bachaquero. Está formado por areniscas arcillosas potentes, de colores gris o marrón con arcillas gris, marrón o moteadas, lutitas gris a gris azulado y lignitos.

En el sitio de presa se caracteriza por la presencia de areniscas de colores gris a verde, limolitas y lutitas interestratificadas. Dentro de la secuencia se observa arcilla moteada y algunas capas de lignitos.

4.5.2 GEOLOGÍA DEL SITIO DE PRESA:

El estribo izquierdo está constituido por una fila alargada de dirección Norte-Sur, Limitada tanto al Este como al Oeste por quebradas intermitentes. La fila está controlada por una cuesta de buzamiento hacia aguas abajo, estando limitada hacia aguas arriba por un escarpado prominente. A unos 700 metros hacia el Sur la fila posee una pequeña depresión topográfica, por donde pasa la vía de acceso, y donde se proyecta un cierre.

El estribo derecho se caracteriza por una amplia terraza, donde se diferencia de acuerdo a sus cotas dos niveles de erosión, uno a cota 80 y otro a cota 90, los cuales se encuentran separados por un saliente topográfico de rumbo Este-Oeste, y

cuya cota máxima es de 98,50 m.s.n.m. Hacia el extremo Norte del estribo se observa una topografía de pendiente suave controlada por depósitos de ladera.

En el sitio de presa el cauce del río posee un rumbo Este- Oeste, presentando hacia aguas arriba un cambio brusco al Norte. Bordeando la terraza del estribo derecho, cuyo escarpado se encuentra controlado por afloramientos rocosos. Al pie del estribo izquierdo se observan afloramientos prominentes de areniscas, y a unos 200 metros aguas abajo el río cambia de curso al Norte controlado por afloramientos.

El valle aluvial desde el pie de la fila del estribo izquierdo posee un ancho de unos 160 m, el cual se amplía rápidamente hacia aguas arriba a más de 600 metros.

4.6 RIO RIITO – ESTADO YARACUY

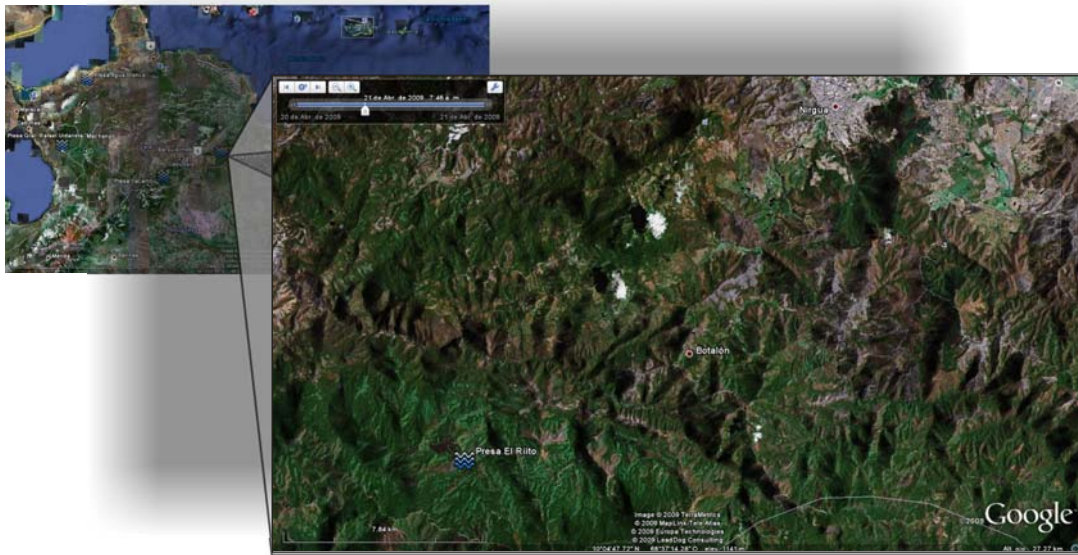


Figura 24. Ubicación presa Rio Riito

Fuente: tomado y modificado de Google Earth® 5.0

El sitio se localiza al suroeste del poblado de Nirgua, perteneciente al municipio Nirgua del Estado Yaracuy. El acceso se realiza desde Nirgua por una carretera engrazonada, en general en buen estado, que se dirige hacia la Serranía de Tucuragua, y cruza el río Riito, también llamado Tucuragua, a unos 15 km del poblado. El sitio de presa originalmente designado se encuentra a unos 200 metros aguas arriba del cruce de la carretera.

4.6.1 ASPECTOS GEOLOGICOS

La formación Aroa, del Mesozoico, controla el área del sitio de presa.

En el área de estudio resaltan los amplios valles aluviales limitados entre Serranías de topografía abrupta, como el de Nirgua, Salom y Miranda, los cuales son

el resultado de importantes fallas de rumbo principal Este - Oeste que cruzan dichos valles.

Las filas que controlan las Serranías en general poseen rumbo Este- Oeste, predominando en las cercanías de Nirgua y hacia el Sur, las de rumbo Noreste.

En Nirgua e destaca por encima del plano aluvial un antiguo nivel de terraza por debajo del cual se observan afloramientos de esquistos muy meteorizados.

Entre Nirgua y el sitio de presa se observan el desarrollo de valles aluviales alargados, los cuales se encuentran alineados con rumbo Noreste, controlado por fallas geológicas.

4.6.2 LITOLOGIA

Formación Aroa: La formación consiste de una secuencia de esquistos calcáreos grafitosos, filitas grafitosas, esquistos cuarzo-micáceo-grafitosos, calizas laminadas, calizas macizas y varios horizontes de esquistos verdes. Estos últimos exhiben una mineralogía de zoisita, clinozoisita, epidoto, feldespato, actinolita, clorita, calcita y cuarzo. Estas rocas de color verde pálido y verde oliva se utilizan como capa guía tanto en la superficie, como en minería por su fácil reconocimiento y contraste con la secuencia calcáreo grafitosa, abundan hacia la parte media de la unidad, donde alcanzan 50 m de espesor. Al sur de Yaritagua, Bushman (1959) se refirió a estos esquistos con el nombre de "Esquistos Verdes de Agua Viva", hoy incluidos dentro de la formación. Las rocas verdes posiblemente representan rocas básicas metamorfizadas, especialmente tobas y lavas (Bellizzia y Rodríguez, 1969). Los esquistos calcáreo-grafitosos, micáceo-grafitosos y filitas grafitosas constituyen alrededor del 60% de la unidad y consisten en calcita, grafito, sericita, cuarzo, feldespato, zoisita, pirita y clorita. Las calizas laminadas generalmente se

interestratifican con los esquistos calcáreo-grafitosos. Las calizas macizas alcanzan hasta 20 metros de espesor, generalmente son grafitosas, piríticas y lenticulares.

La secuencia litológica que aflora en el área corresponde a unidades de rocas metamórficas, terrazas y aluviones, cuya descripción es como sigue:

4.6.2.1 UNIDADES GEOLÓGICO - GEOTÉCNICAS

Unidad N°1 (Mt 1)

Conformada por esquistos calcáreo grafitosos, con variaciones a esquistos cuarzo micáceo grafitosos, presentando dentro de la secuencia intercalaciones de calizas recristalizadas en general lenticulares

Unidad N°2 (Mt 2)

Se asocian un conjunto de esquistos cuarzo micáceos, con variaciones a esquistos cuarzo grafitosos y filitas, presentando algunas intercalaciones de metareniscas.

Unidad N°3 (Mt 3)

Caracterizada por esquistos cuarzo feldepásticos de aspecto macizo, con variaciones a esquistos cuarzo micáceos.

TERRAZAS

Se caracterizan por un predominio de gravas arcillosas e intervalos de arenas sucias, en general de color pardo amarillento. Las gravas están formadas por cantos subredondeados en general de esquistos y cuarzo, con dimensiones menores de 10 cm

ALUVIONES

Los aluviones antiguos se caracterizan por gravas y arenas arcillosas, amarillentas, en contraste con los recientes formados por gravas arenosas con escasos limos, de color gris.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

El Índice de Calidad de la Roca, RQD, es de común uso en la evaluación de las condiciones de los macizos rocosos como parte fundamental de los sistemas de clasificación geomecánicos y ha sido factor importante, llegando a ser determinante, entre otros proyectos de ingeniería, en la caracterización de la roca para fundaciones de presas, relacionándose éste con el estudio de la estanqueidad de los sitios analizados.

De las tres clasificaciones geomecánicas utilizadas durante la realización de este trabajo, en el estudio del macizo rocoso fundacional del proyecto de presa sobre el río Cuira, dos de éstas arrojaron resultados muy similares, dando la tercera un resultado un poco más bajo de lo esperado.

El primer sistema de caracterización utilizado fue el Rock Mass Rating ó RMR. Este, considera el valor del RQD, la resistencia a la compresión simple, el espaciamiento de las discontinuidades, la condición y orientación de las mismas y la condición del agua, dando como resultado que el macizo rocoso se ubicara dentro de las clases IV (Roca Mala) y III (Roca Media).

El segundo sistema que se utilizó fue el Geological Strength Index ó GSI, el cual basa su clasificación en la identificación y clasificación en campo de la macroestructura y las condiciones de las superficies de las discontinuidades observadas en el macizo rocoso. Bajo este esquema el macizo entra en la categoría de Roca Media, coincidiendo con el resultado obtenido mediante el RMR. Por la ausencia de factores extrínsecos como humedad, orientación, pretensión, etc. aunado a su sencillez y agudeza, a diferencia de otros, El GSI se presenta como un muy

interesante sistema de clasificación, en el que el propio Hoek recomienda establecer rangos y no a un valor único.

A diferencia de los dos primeros sistemas de clasificación, cuando se utilizó el Q de Barton, el resultado arrojado no coincide con el de estos, dando valores más bajos de lo esperado, calificando al macizo como roca muy mala a mala. Analizando el porqué de estos resultados, se observa que éstos se encuentran controlados por los factores J_n , parámetro para describir el número de familias de diaclasas y el SRF, factor reductor asociado al estado tensional. Al factor J_n se le asignaron valores entre 9 y 12, lo cual corresponde a tres familias de discontinuidades ($J_n=9$) y tres familias de diaclasas mas otra ocasional ($J_n=12$), debido a que en campo se identificaron cinco familias de fracturas en el estribo derecho y tres familias en el estribo izquierdo. El otro factor, el SRF, se tomó para rocas competentes sin arcilla pero con muchas zonas de cizalla, según la información proveniente de estudios anteriores, y confirmada durante el proceso de estudio de los núcleos de las perforaciones.

Comparando los resultados obtenidos mediante el procedimiento regular con los derivados de correlaciones matemáticas, se tiene:

$$\mathbf{RMR = 15 * \log_{10} Q + 50} \quad \mathbf{GSI = RMR - 5}$$

RMR	RMR Analítico	GSI	GSI Analítico
38	40.14	37 - 54	35.14
41	51.66	37 - 54	46.66
48	56.15	37 - 54	51.15
52	58.03	37 - 54	53.03

La caracterización del macizo rocoso obtenida por diferentes sistemas, no difiere en gran medida con las obtenidas mediante relaciones matemáticas, con una desviación estándar de 7,13, corroborando el apropiado empleo de dichos sistemas.

5.2 CORRELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO RQD Y LA PERMEABILIDAD LUGEON

Una vez expuestos los resultados del estudio, se puede apreciar en las figuras 25, 26, 27 y 28 (Sección de Gráficas de Correlación RQD vs Lugeon), una tendencia de la permeabilidad medida en unidades Lugeón con respecto al grado de fracturamiento medido en RQD, presentada en las presas Agua Blanca (fig. 25) y Machango (fig. 26), fundadas sobre rocas sedimentarias; y en las presas Yacambú (fig. 27) y El Riito (fig 28), fundadas sobre rocas metamórficas. Esta tendencia se encuentra asociada a una curva que representaría la permeabilidad máxima para un RQD determinado, por lo que se determinó que esta se ajusta a una ecuación general del tipo potencial:

$$K_{max} \leq A \times RQD^{-B}$$

Donde K_{max} es la permeabilidad máxima, siendo esta ecuación representativa para las presas estudiadas en este trabajo.

Para los parámetros A y B presentados en dicha ecuación, se interpreta que pueden estar relacionados con variables asociadas a las características de las discontinuidades del macizo rocoso, tales como la disposición, abertura, relleno y espaciamiento de los mismos, por lo que se pueden encontrar valores de permeabilidad diferentes asociados a distintos valores de RQD, como consecuencia de lo expuesto anteriormente.

Es importante destacar, que en estas figuras, se aprecian valores elevados esperados de permeabilidad asociados a valores bajos de RQD, así como valores bajos esperados de permeabilidad asociados a valores elevados de RQD.

Cuando se analizan los resultados obtenidos en el caso de la presa sobre el río Cuira, en la figura 29, así como en las presas Taguaza, figura 30 y El Diluvio, figura 31, todas fundadas sobre rocas metavolcánicas, estas presentan un comportamiento

errático de la permeabilidad con respecto al grado de fracturamiento de la roca, donde no se observa ningún patrón que sea indicio de relación alguna entre estos dos parámetros.

Tratando de encontrar una explicación al comportamiento observado en estos casos, donde no se corresponde el grado de fracturamiento del macizo rocoso con la permeabilidad obtenida, se recurrió al criterio que relaciona los grados de discontinuidad con la permeabilidad de los macizos rocosos ígneos propuesto por el profesor Roland Pusch (1995) del Departamento de Geotecnología de la Universidad de Lund, Suecia, el cual clasifica las discontinuidades del macizo rocoso en 7 órdenes, dividiéndolas en dos grupos principales, uno de **bajo orden**, conteniendo las discontinuidades de primero, segundo y tercer orden; y otro de **alto orden**, el cual contiene las discontinuidades del cuarto al séptimo orden. Estos grupos, así como las discontinuidades contenidas en ellos, se presentan a continuación.

En principio, Pusch define un primer grupo como de **bajo orden**, donde incluye lo siguiente:

- **Discontinuidades de Primer orden:** Son aquellas zonas de fracturas regionales con unos pocos km de espaciamiento y una persistencia de decenas de kilómetros.
- **Discontinuidades de Segundo Orden:** zonas de fracturas locales con espaciamiento desde cientos de metros hasta kilómetros. El carácter es similar a las discontinuidades de primer orden aunque con un poco menos de ancho en las zonas de la base y el borde, y con una baja frecuencia de fracturas y de contenido de arcilla.
- **Discontinuidades de Tercer Orden:** zonas de fracturas locales con espaciamiento desde 30 a 150 m y con un ancho desde unos pocos decímetros a un par de metros.

Luego agrupa como de discontinuidades de **alto orden**:

- **Discontinuidades de Cuarto Orden:** ocurren como fracturas discretas con un espaciamiento aproximado de 2 a 10m, y con una persistencia de más de esto; son los miembros discretos hidráulicamente activos de rocas localizados entre discontinuidades de bajo orden.
- **Discontinuidades de Quinto Orden:** las cuales representan el 90 % de las fracturas visibles alternas entre las discontinuidades de bajo orden antes descritas y su espaciamiento es aproximadamente 1/10 de las de Cuarto Orden, es decir: entre 0,2 y 1,0 m, con pobre interacción entre ellas, de tal manera que su contribución a la permeabilidad del macizo rocoso es poca a nula.
- **Las Discontinuidades de Sexto y Séptimo Orden:** Estas discontinuidades representan planos de debilidad o fisuras y espacios en la estructura cristalina, respectivamente, ambas requieren el uso de microscopio para ser identificadas. La **tabla N° 30**, presenta un resumen de las características y sus capacidades de transmisividades hidráulicas.

	GEOMETRIA				CARACTERISTICAS HIDRÁULICAS		
	Discontinuidad (m)	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Ancho (m)	Transmisividad (m ² /s)	Conductividad Hidráulica (m/s)	Observaciones
BAJO ORDEN	1er. Orden	>10 ⁴	>10 ³	>10 ²	10 ⁻⁵ – 10 ⁻²	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵ (10 ⁻⁶)	Resistencia debido a la fricción y dilatación
	2do. Orden	10 ³ - 10 ⁴	10 ² – 10 ³	10 ¹ -10 ²	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁶ (10 ⁻⁶)	
	3er. Orden	10 ² - 10 ³	30 – 150	1-10	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁶	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁷ (10 ⁻⁸)	
	4to. Orden	10 ¹ - 10 ²	1 – 10	-	-	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻⁹ (10 ⁻¹⁰)	
ALTO ORDEN	5to. Orden	1 – 10	0,2 – 1,0	-	-	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰ (10 ⁻¹¹)	Representa el 90% de las fracturas visibles de alto orden
	6to. Orden	0,2 – 1,0	0,05 – 0,2	-	-	10 ⁻¹³ – 10 ⁻¹¹ (10 ⁻¹²)	
	7mo Orden	0,05	<0,05	-	-	<10 ⁻¹³	

Tabla 30: Clasificación de discontinuidades según Pusch y sus y características hidráulicas

Fuente: Rock Mechanics on a Geological Base (R. Push Dpt. Of Geotechnology Lund University of Technology. Suecia 1995)

Bajo este esquema, la mayor conductividad de agua estaría asociadas a la existencia de discontinuidades de Primera y Segundo Orden, mientras que las intermedias, Tercera y Cuarta, consideradas como discretas, son más o menos fracturas portadoras de agua. Mientras que a partir del Quinto Orden, corresponden más con debilidades mecánicas que son de importancia para el esfuerzo de la roca, pero no para la conductividad hidráulica.

Retomando los rasgos estructurales de los afloramientos estudiados en el reconocimiento geológico de superficie efectuado en el sitio de presa sobre el río Cuirá, donde se apreció que las frecuencias de diaclasas varían de 1 a 4/m, es decir con espaciamiento entre 0,25 y 1,0 m, se estaría en presencia de un Quinto Orden de discontinuidades en el macizo rocoso que, con la facilidad de fracturamiento de los núcleos de las perforaciones al manipularse o golpearse con la piqueta, pareciera que también están presentes discontinuidades, al menos de Sexto Orden, con las cuales deben esperarse permeabilidades bajas del macizo rocoso.

Este criterio, no descarta la existencia eventual de discontinuidades de **bajo orden**, ya sean por planos de fallas locales o diaclasas que hayan aumentado su abertura por esfuerzos posteriores a los que las originaron.

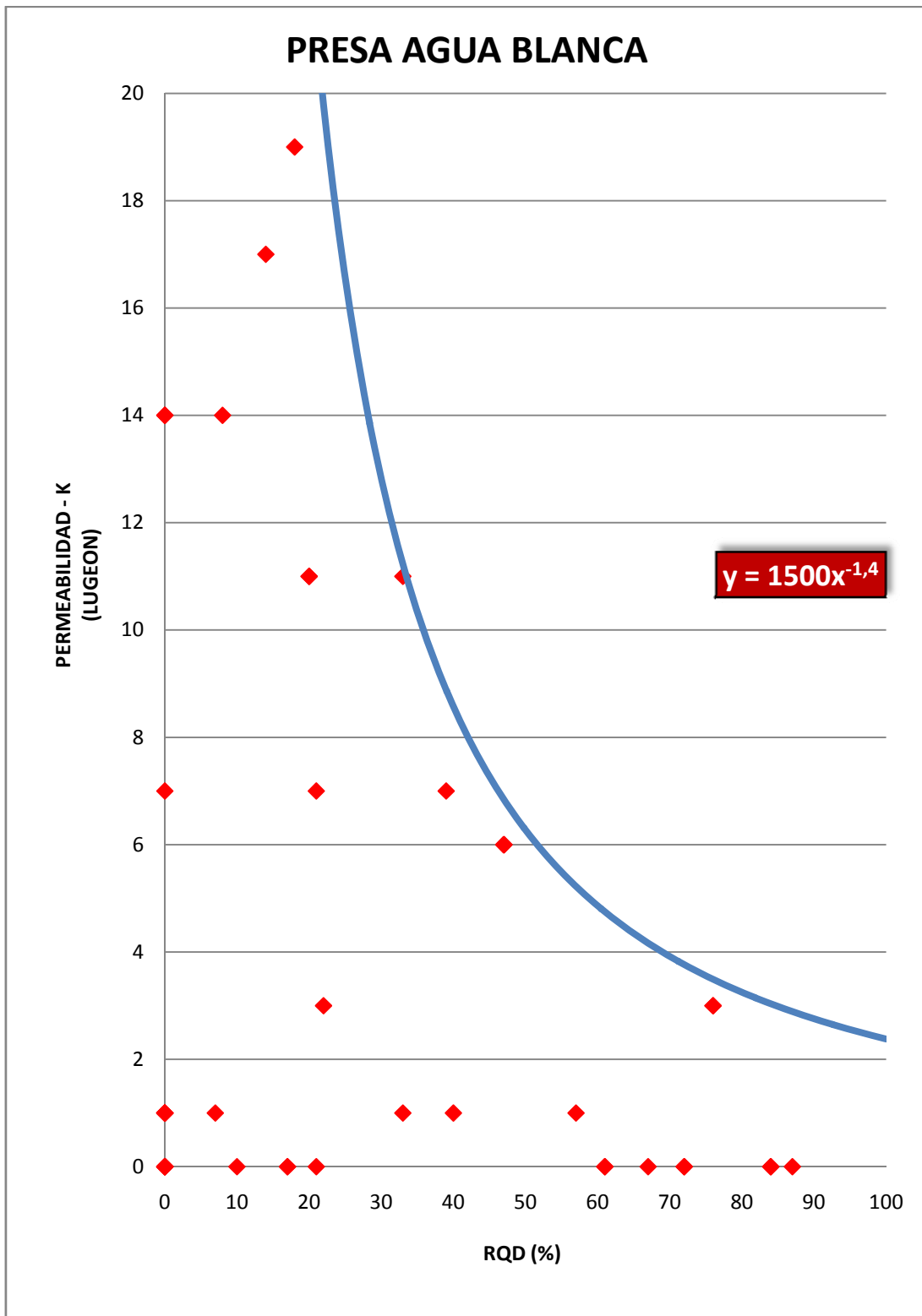


Figura 25. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Agua Blanca”

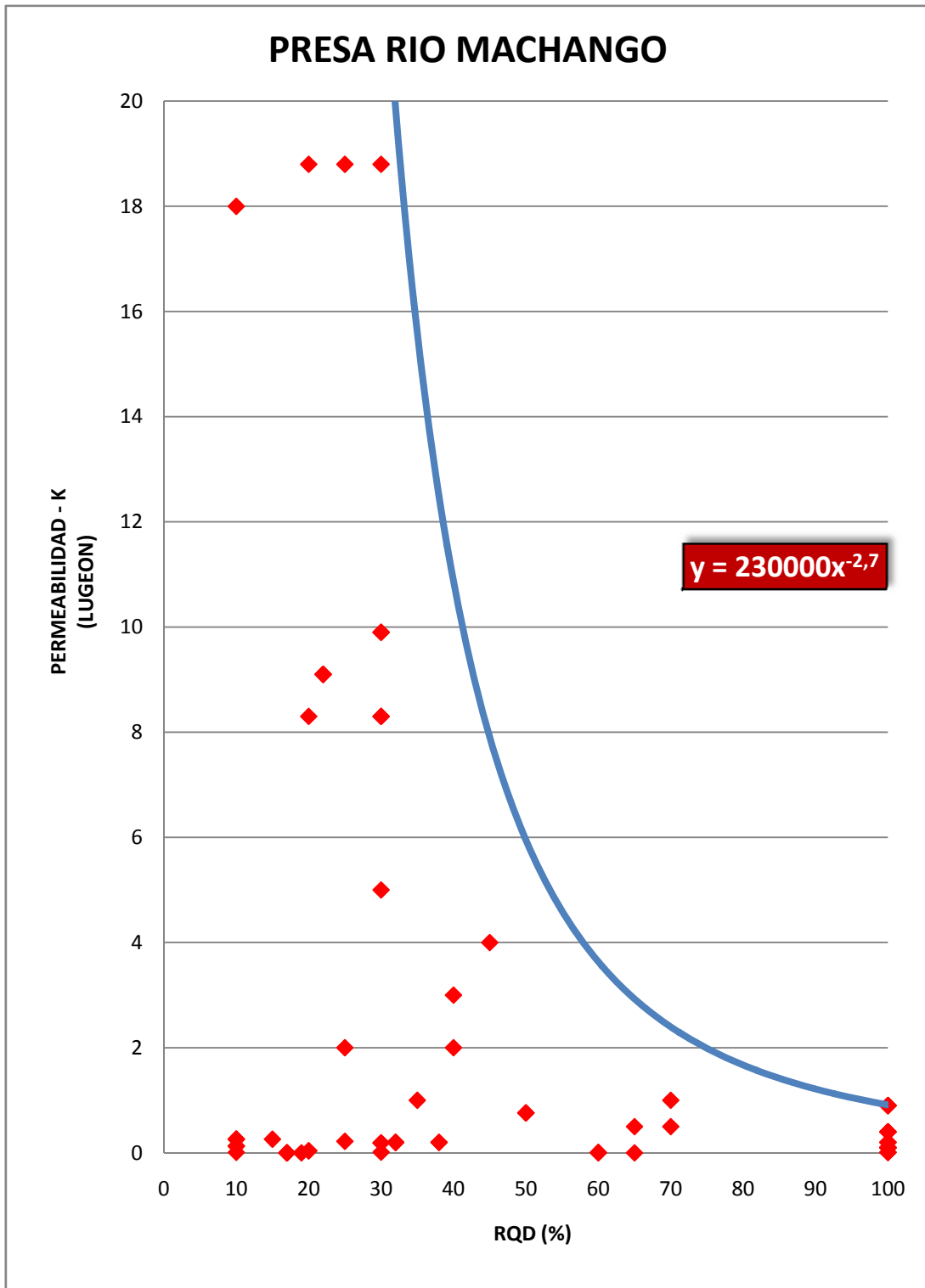


Figura 26. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Machango”

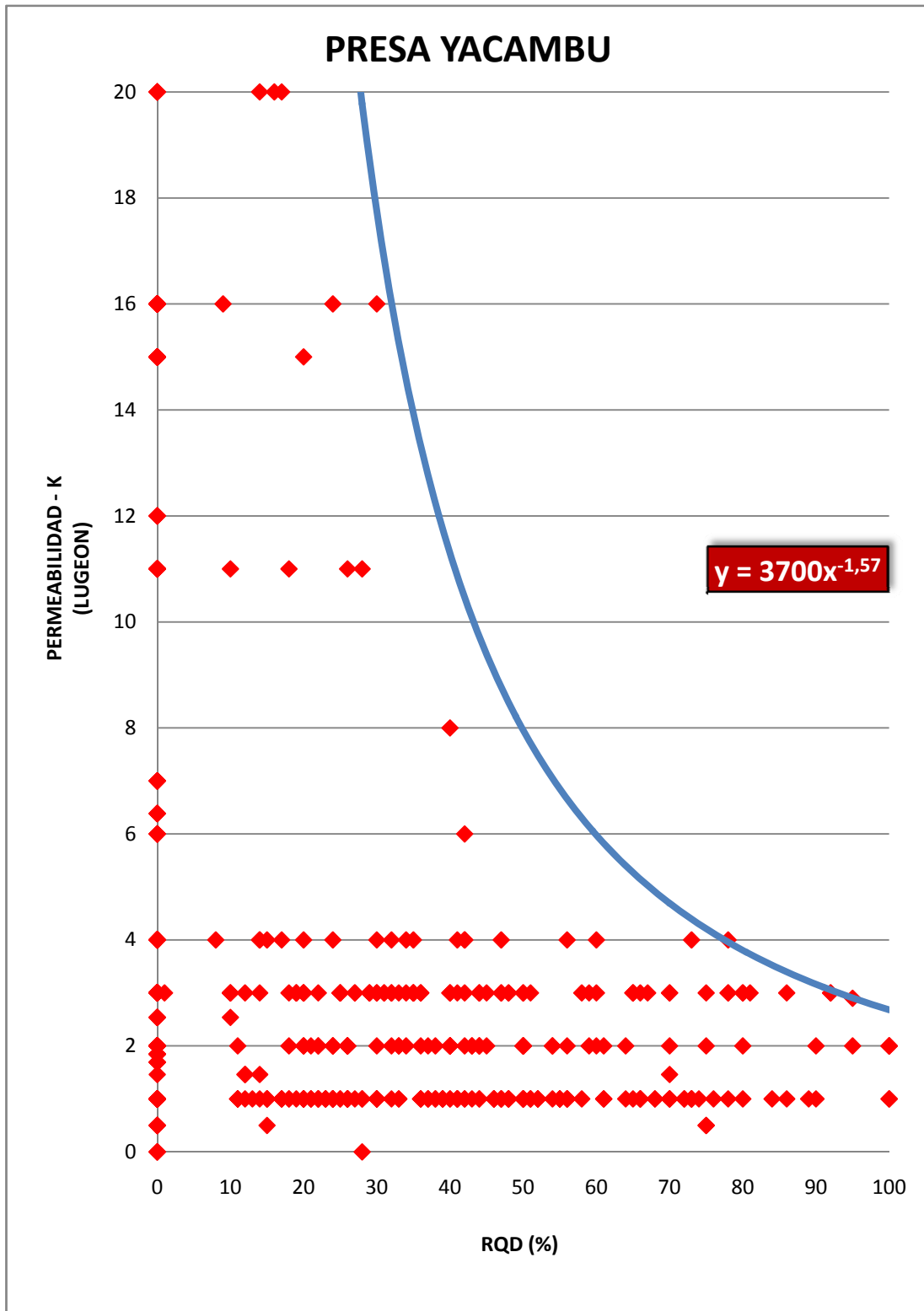


Figura 27. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Yacambú”

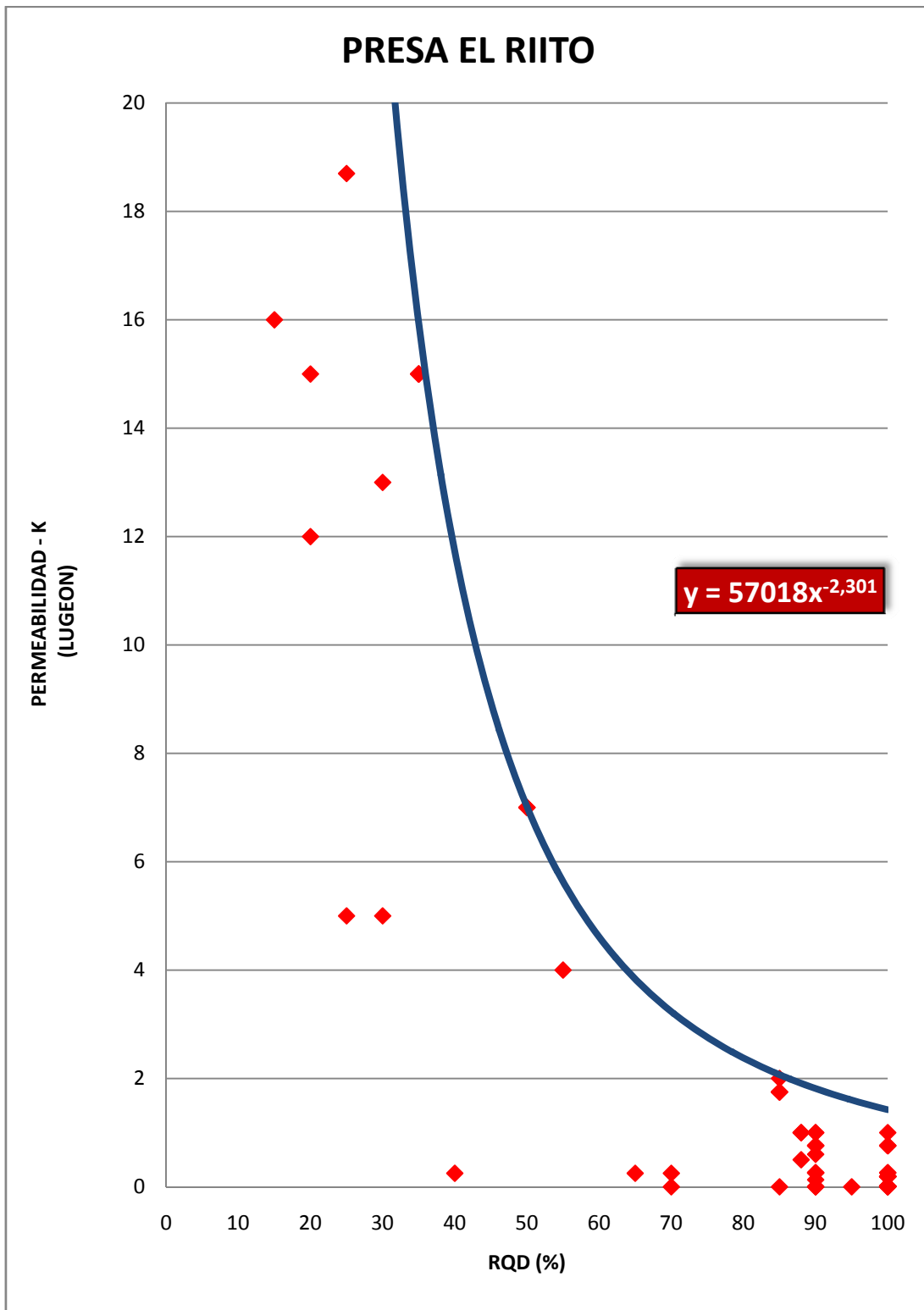


Figura 28. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Río Riito”

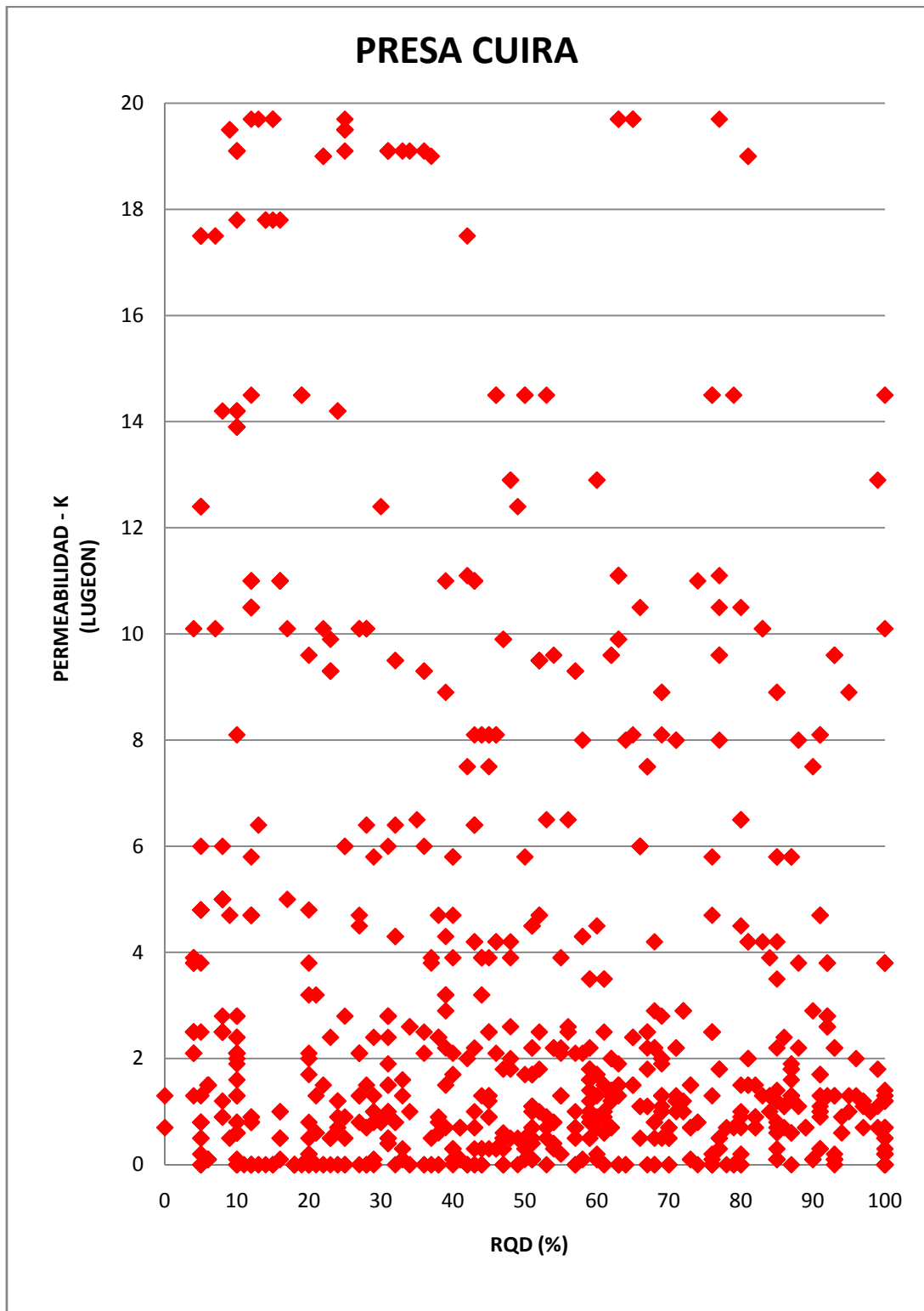


Figura 29. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Cuira”

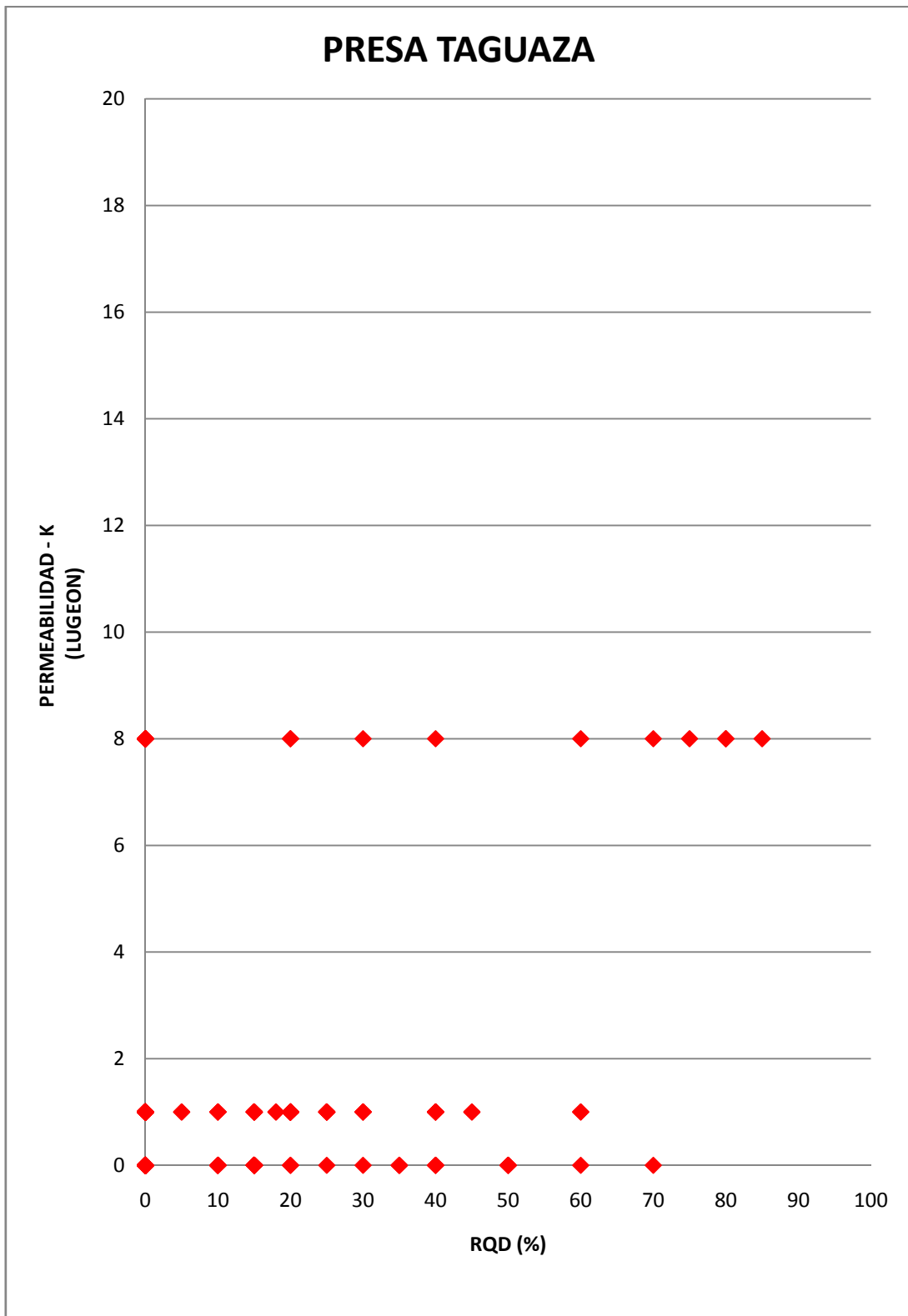


Figura 30. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “Taguaza”

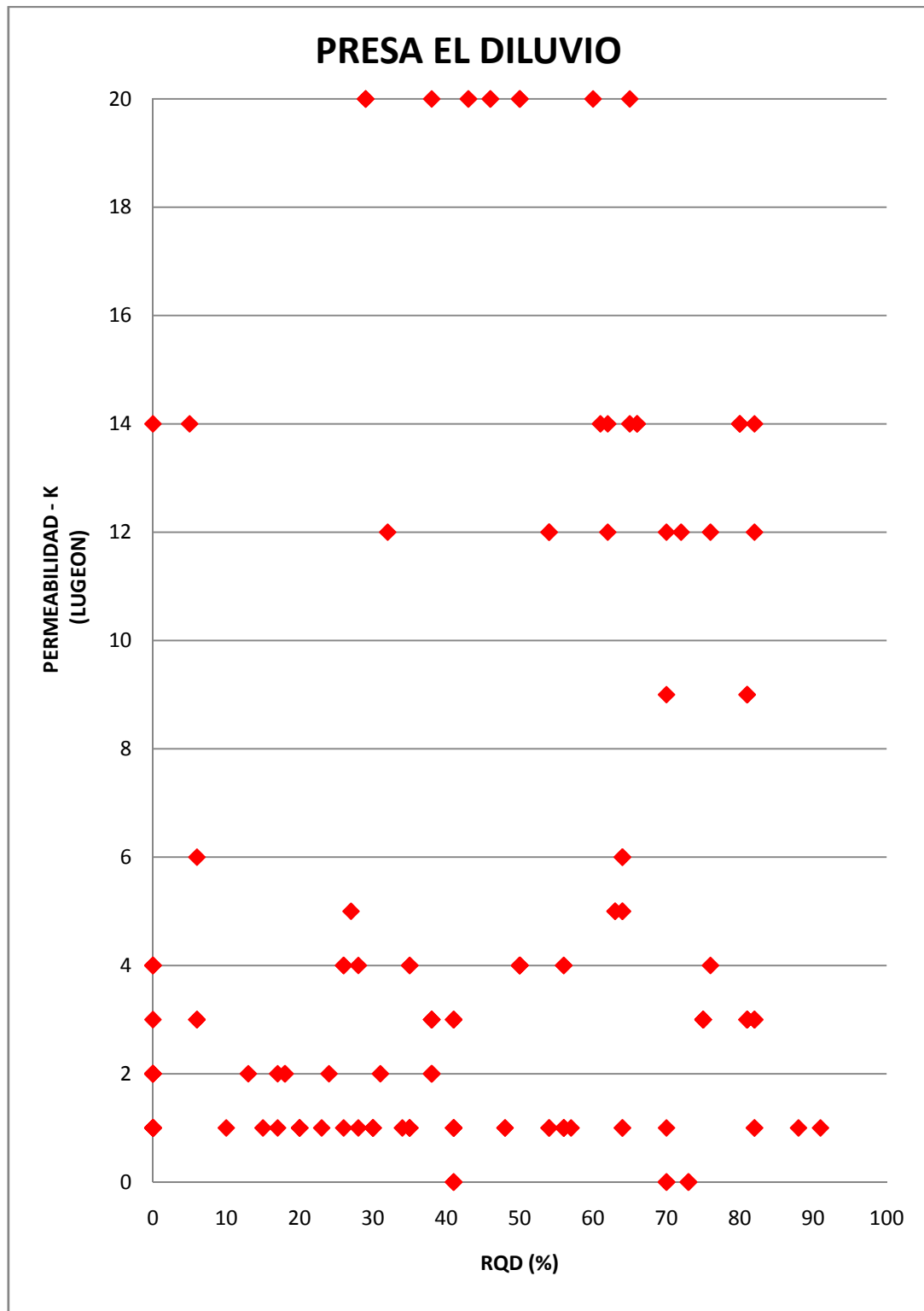


Figura 31. Grafica de RQD vs. Permeabilidad, presa “El Diluvio”

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Siguiendo los objetivos propuestos en el presente trabajo y según los resultados obtenidos, las conclusiones a las que se llegan son las siguientes:

Aplicando de la metodología propuesta por cada uno de los sistemas de caracterización geomecánica utilizados, se obtuvo resultados semejantes en dos de los tres sistemas de caracterización.

De acuerdo a la clasificación del Rock Mass Rating – RMR, el cual toma en cuenta el RQD, la resistencia a la compresión simple, el espaciamiento de las discontinuidades, la condición y orientación de las mismas y la condición del agua, el macizo rocoso fundacional de la presa sobre el río Cuira, pertenece a la clase IV (Roca Mala) y clase III (Roca Media).

Mediante la clasificación Geological Strength Index o GSI, la cual se basa en la identificación y clasificación en campo de dos de las características fisiomecánicas del macizo rocoso: la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades, se obtuvo como resultado una roca media, lo que corrobora el resultado obtenido mediante el RMR.

En cuanto a la clasificación Q de Barton se obtuvo valores más bajos de los esperados según los otros sistemas, calificando el macizo rocoso como roca muy mala a mala, resultado controlado por los valores asumidos para los factores J_n y SRF. El primero de ellos, con valores entre 9 y 12, corresponde a tres familias de diaclasas ($J_n=9$) y tres familias de diaclasas mas otra ocasional ($J_n=12$). El SRF, se tomó para rocas competentes sin arcilla pero con muchas zonas de cizalla.

De acuerdo al alto grado de fracturamiento que presenta el macizo rocoso estudiado en el sitio de presa “El Dinero” sobre el río Cuira, se inferiría un comportamiento en cuanto a la permeabilidad, acorde a la esperada correspondencia entre estos parámetros, según la cual esta última sería inversamente proporcional al índice RQD o dicho en otras palabras, directamente proporcional al grado de fracturamiento. Sin embargo, luego de estudiar los resultados de las pruebas de permeabilidad a presión efectuadas, se observó que dicha correspondencia era poca o nula, y que aún en niveles de RQD entre 0 y 25 % (alto fracturamiento), se obtenían valores de permeabilidad menores a los 3 Lugeon (relativamente baja).

Cuando se estudiaron los otros casos de presas fundadas sobre rocas metavolcánicas, Taguaza y El Diluvio, se obtuvieron resultados similares, donde no existe correspondencia alguna entre los parámetros anteriormente nombrados.

Para revisar si esa ocurrencia está asociada a este tipo de litología en particular y a su tipología de fracturamiento, se procedió a estudiar presas fundadas en rocas sedimentarias, presa Agua Blanca, y en rocas metasedimentarias, presa Yacambú. Al analizar los resultados desprendidos de estas, se observa una clara correspondencia entre los parámetros RQD y Permeabilidad, aunque con solamente un caso de cada litología no es un resultado representativo.

En un esfuerzo para determinar si este comportamiento se mantenía en otras presas fundadas en los mismos tipos de roca, se analizaron dos casos más, La presa Machango, fundada sobre rocas sedimentarias, y la presa Rio Riito, sobre rocas metamórficas. El estudio de estos casos arrojó resultados muy similares, manteniéndose la correspondencia esperada entre la permeabilidad y el grado de fracturamiento observada en los casos de Agua Blanca y Yacambú.

Para las litologías mencionadas anteriormente, se observó que la tendencia observada está asociada a una curva de ecuación del tipo potencial, la cual representa la permeabilidad máxima para un RQD determinado en cada una de las presas evaluadas en este trabajo

La ecuación encontrada viene dada por la ecuación de permeabilidad máxima

$$K_{max} \leq A \times RQD^{-B}$$

Finalmente, analizando el comportamiento de las presas fundadas sobre rocas metavolcánicas, se recurrió al criterio expuesto por Roland Pusch, el cual relaciona los grados de discontinuidad y la permeabilidad de los macizos rocosos igneos, y que categoriza las discontinuidades según siete órdenes, desde grandes zonas de fractura (bajo orden – primer y segundo orden), zonas de fracturas menores (tercer orden) y zonas de fracturas discretas de persistencia variada (alto orden – del cuarto al séptimo orden).

De acuerdo a las características de las fracturas descritas en el desarrollo del trabajo, en las presas fundadas sobre rocas metavolcánicas, y enfocándose en el caso de estudio principal, las diaclasas presentan un espaciamiento entre 0,25 y 1,00 m. Donde siguiendo la clasificación anterior, el comportamiento que presentan estos casos se debe a que las discontinuidades predominantes son del quinto orden, las cuales corresponden más con debilidades mecánicas que son importantes para el esfuerzo de la roca, pero no para la conductividad hidráulica, ya que existe una pobre interacción entre discontinuidades, por lo que su contribución a la permeabilidad de la roca es escasa a nula.

Por consiguiente, el parámetro Rock Quality Designation ó RQD, como parte de sistemas de caracterización más complejos, es válido para calificar las condiciones de un macizo rocoso, sin embargo, este se debe utilizar con cuidadoso criterio para la determinación de la estanqueidad de un sitio de presa, ya que, como se pudo determinar en los análisis efectuados, hay casos como el de las rocas metavolcánicas aquí estudiadas, donde para altos grados de fracturamiento según el RQD la permeabilidad acorde a los ensayos Lugeon son bajas. En consecuencia no debe utilizarse el valor del RQD como indicativo único de permeabilidad, debiéndose recurrir a ensayos Lugeon.

6.2 RECOMENDACIONES

Como parte final de este trabajo se recomienda:

- Profundizar en el estudio del comportamiento de la permeabilidad en macizos rocosos ígneos, ya que solamente el trabajo de tesis logró analizar sitios de presa de rocas metavolcánicas, cuyo grado de fracturamiento no se corresponde con la permeabilidad, mediante la escogencia de un gran número de presas en distintas litologías para así realizar un inventario que permita presentar unos resultados más concluyentes al respecto.
- Realizar un estudio que relacione la categorización de discontinuidades propuesta por Roland Pusch con las litologías ígneas en Venezuela.
- Realizar observaciones referentes al estudio de macizos rocosos, en función de limitar el uso del Índice de Calidad de Roca, RQD, en el caso de querer utilizarlo como indicativo de permeabilidades, especialmente en rocas metavolcánicas.
- Efectuar estudios de permeabilidad que relacionen la disposición de las discontinuidades con el parámetro RQD, con respecto a la dirección de flujo, para obtener un comportamiento hidráulico que se ajuste mejor a las condiciones reales de los macizos rocosos
- Hacer investigaciones en otros sitios de presas, para ir verificando y/o ajustando los resultados aquí obtenidos, principalmente en rocas sedimentarias y metasedimentarias, de manera de que en litologías similares, el uso del RQD tenga alguna utilidad en la interpretación de los rangos de permeabilidades de las fundaciones de presa.

- Realizar estudios que evalúen la influencia de otras variables que puedan afectar la permeabilidad en macizos rocosos, tomando en cuenta la ecuación hallada en este trabajo, con la finalidad de validarla, así como también determinar la relación de los parámetros A y B dentro de esta ecuación con dichas variables

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARTON, N. y CHOUBEY V. "The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice". Rock Mechanics Springer-Verlag. 54 págs. (1977).

BUREAU OF RECLAMATION. Manual de Tierras (Earth Manual) Editorial Técnica Castillo-1980.

HOEK, E. et al. "Hoek-Brown Failure Criterion - 2003 Edition". (2002).

HOEK, E. Y DIEDERICHS. "Empirical estimation of rock mass modulus". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43 (2006) 203-215.

HOULSBY, A.C. Construction and Design of Cement Grouting. John Wiley & Sons, Inc., 1990.

JOHNSON R, & DE GRAFF J.. Principles of Engineering Geology. John Wiley & Sons, Inc ., 1988.

LEXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA

<http://www.pdv.com/lexico/a350w.htm>

KUMAR, P. "Shear Failure Envelope of Hoek-Brown Criterion for Rockmass". Tunneling and Underground Space Technology. Volumen 13, Número 4. (1998).

MARNR-DGI-DEP (1979) Informe preliminar geológico-geotécnico proyecto Cuira. Informe interno.

PDVSA-INTEVEP: Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela: Complejo de: Apa,

PEREZ D'GREGORIO A. (1987) Compilación de Mapas Geológicos de La Región de Caucagua, Esc. 1:50000, A Partir de Trabajos Especiales de Grado Universidad Central de Venezuela Caracas.

PUSCH, R. Rock Mechanics on a Geological Base. Elsevier. (1995).

RAMAMURTHY, T. "A geo-engineering classification for rocks and rockmasses". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Pág 89-101. (2004).

RGR Ingeniería C.A. Informes Geológicos de Presas Machango, El Diluvio, Agua Blanca.

ROMANA MANUEL. DMR, a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR. 4º International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, 2003.

STAGG-ZIENKIEWICZ. Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica. Editorial Blume-1970.

UCAR, R. "Determinación de los Parámetros de corte equivalentes en macizos rocosos a través del criterio empírico de Hoek y Brown, y su aplicación en la estabilidad de taludes. (2004).

UCAR, R. "Determination of Shear Failure Envelope in Rock Masses". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No.3. (1986).

URBANI et.al. (1990) Geología del área de Guatopo - El Guapo, Estados Miranda y Guarico. Parte 1: Grupo Villa de Cura. Revista de Ingeniería Vol.5 N° 1, 96-196 Caracas.

URBANI et.al. (1991) Geología del área de Guatopo - El Guapo, Estados Miranda y Guarico. Parte 2: Formación Las Hermanas y Complejo de Apa. Revista de Ingeniería Vol.6 N° 1, 5-52 Caracas.

DEPARTAMENTO DE GEOTÉCNIA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOVA www.geocities.com/geotecnia_lab

GONZALEZ DE VALLEJO, LUIS I. Y FERRER MERCEDES. Ingeniería Geológica. Pearson Educación, Madrid (2002).