



Comisión Nacional de Riego



**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD  
“MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO  
EN RÍO ACHIBUENO, REGIÓN DEL MAULE”**

**INFORME FINAL**

**TOMO IV  
“Geología y Geotecnia”**

**SANTIAGO, MAYO DE 2014**



# ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD “MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO EN RÍO ACHIBUENO, REGIÓN DEL MAULE”

INFORME FINAL

TOMO IV

“Geología y Geotécnica”

Estudio Elaborado por:



**TECNICA Y PROYECTOS S.A. - AGENCIA EN CHILE**

Dirección: Av. Don Carlos 2939 Oficina 904, LAS CONDES - SANTIAGO

Fono: +56 02 23352289

[www.grupotypsa.cl](http://www.grupotypsa.cl)

SANTIAGO, MAYO DE 2014

## ÍNDICE DE TOMOS

- TOMO I: ESTUDIOS PRELIMINARES
1. ASPECTOS GENERALES
  2. REVISIÓN GENERAL DE ANTECEDENTES
  3. PRIMERAS VISITAS SOBRE EL TERRENO
  4. DIAGNÓSTICO PRELIMINAR
  5. IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS
  6. DEFINICIÓN PRELIMINAR DE CARACTERÍSTICAS DE LAS ALTERNATIVAS
  7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS
- ANEXOS
- TOMO II ESTUDIO AGROECONÓMICO
1. DESCRIPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL ÁREA DE LOS ESTUDIOS AGRONÓMICOS
  2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS PRODUCTIVOS BÁSICOS
  3. INFRAESTRUCTURAS DE RIEGO
  4. SITUACIÓN ACTUAL AGROPECUARIA
  5. SITUACIÓN SIN PROYECTO
  6. SITUACIÓN CON PROYECTO
  7. BENEFICIOS AGRÍCOLAS NETOS DEL PROYECTO
- ANEXOS
- TOMO III ESTUDIOS HIDROLÓGICOS
1. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS – HIDRÁULICOS
  2. MODELOS DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
- ANEXOS
-

TOMO IV - GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

1. ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS
2. SISMICIDAD

ANEXOS

TOMO V - ESTUDIO AMBIENTAL

1. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AMBIENTAL
2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AMBIENTAL
3. PLAN DE MANEJO AMBIENTAL Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL

ANEXOS

TOMO VI - PARTICIPACIÓN CIUDADANA

1. PROGRAMA DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA PARA EL ESTUDIO
2. CONTEXTUALIZACIÓN SOCIAL Y TERRITORIAL DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO
3. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ACTORES RELEVANTES
4. DIFUSIÓN DE LOS OBJETIVOS Y ALCANCES DEL ESTUDIO A LOS ACTORES
5. OPINIONES, INQUIETUDES, CONOCIMIENTOS Y SUGERENCIAS DE LOS ACTORES SOCIALES
6. PLAN DE TRABAJO DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA
7. COMPONENTE GÉNERO

ANEXOS

TOMO VII - TRABAJOS TOPOGRÁFICOS

1. INTRODUCCIÓN
2. CARTOGRAFÍA GENERAL DE LA ZONA Y TRABAJOS PRELIMINARES
3. CARTOGRAFÍA GENERAL DE LA ZONA DEL ESTUDIO
4. CARTOGRAFÍAS DE LOS EMBALSES

ANEXOS

---

TOMO VIII - DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS

1. INTRODUCCIÓN Y MARCO NORMATIVO LEGAL
2. ORGANIZACIONES DE USUARIOS EN LA ZONA DE RIEGO DEL ESTUDIO
3. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL
4. ASESORÍA LEGAL Y TÉCNICA SOBRE DERECHOS DE AGUA

ANEXOS

TOMO IX - DISEÑO DE LAS OBRAS Y VALORACIÓN ECONÓMICA

1. INTRODUCCIÓN Y DATOS DE PARTIDA
2. TIPOLOGÍA DE PRESA
3. EVACUADOR DE CRECIDAS
4. ALTURA DE PRESA
5. OBRAS DE DESVÍO DEL RÍO Y DESAGUES DEL EMBALSE
6. OBRAS COMPLEMENTARIAS
7. ESTUDIO DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO
8. PRESUPUESTOS DE CONSTRUCCIÓN
9. EVALUACIÓN DE LOS EMBALSES COMO CONTROL DE CRECIDAS
10. ESTUDIO DE TENENCIA DE LA TIERRA
11. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA
12. CONCLUSIONES SOBRE LAS SOLUCIONES DE EMBALSE

ANEXOS

TOMO X - PLANOS

HOJAS TOPOGRÁFICAS

ESTUDIO AGROECONÓMICO

ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

DISEÑO DE LAS OBRAS

---

## ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD “MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO EN RÍO ACHIBUENO”, REGIÓN DEL MAULE

### TOMO IV - GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA

#### ÍNDICE

<b>1. ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS.....</b>	<b>1-1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1-1
1.2. ANTECEDENTES .....	1-1
1.2.1. Avance Geológico de la Hojas Rancagua-Curicó, Talca-Linares, Chanco y Concepción.-Chillán. E 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1977. ....	1-2
1.2.2. Hoja Laguna del Maule. Carta Geológica de Chile Nº 64. E 1:250.000. Servicio Nacional De Geología y Minería. J. Muñoz y H. Niemeyer1984. ....	1-3
1.2.3. Rodados multicolores: su distribución y características en el sur de Chile. A. Hauser, Revista Geológica de Chile Nº 27, p. 69-83. 1986. ....	1-3
1.2.4. Carta Hidrogeológica de Chile. Hoja de Talca. E. 1:100.000. SNGM. 1995.....	1-4
1.2.5. “Evaluación Preliminar de peligros del Volcán Nevado de Longaví” J.A. Naranjo (2001).....	1-4
1.2.6. Proyecto constructivo del embalse de Ancoa. Informe de Factibilidad. Consultora San Martín Ingenieros (SMI). 2004 .....	1-4
1.2.7. Stratigraphy, Petrology, and Geochemistry of Nevado Longaví Volcano, Chilean Andes (36.2°S)”. D.F. Sellés Mathieu, 2006. ....	1-6
1.2.8. Proyecto Hidroeléctrico Achibueno: Estudio de Impacto ambiental”. POCH. 2009.....	1-6
1.2.9. Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillan y Copahue- Callaqui (Andes del Sur, 36-39°S). Radic, J.P. Revista geológica de Chile: p. 220-246. Andean Geology formerly. Revista Geológica de Chile. Enero, 2010 .....	1-7
1.2.10.El Cenozoico del alto río Teno, Cordillera Principal, Chile Central: Estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas. José Piquer, Juan Carlos Castelli, Reynaldo Charrier, Gonzalo Yáñez: Andean Geology 37 (1): 32-53. January, 2010.....	1-8
1.2.11.Tasas de transferencia sedimentaria en la cuenca del río Ñuble. Estimación basada en desequilibrios en la serie del Uranio-238. F.D. Del Campo Rojas, (Memoria para el título de geólogo). 2010. ....	1-9
1.2.12.Pequeña Central Hidroeléctrica Baquedano. Estudio hidrogeológico. EDIC. 2011. ....	1-9
1.2.13.Geología y viabilidad de posibles sectores de emplazamiento de embalses en el curso medio del río Longaví. E. Godoy 2012 .....	1-10
1.2.14.Reconocimiento y Estudio preliminar de las posibilidades de embalse preseleccionadas en la Cuenca del río Maule. CEDEC 1977 .....	1-10
1.2.15.Estudio integral de riego de la Cuenca del río Maule. Prefactibilidad, Parte VII “Estudios de obras matrices”. Comisión Nacional de Riego. CEDEC 1977 .....	1-12
1.2.16.Estudio integral de riego de la Cuenca del río Maule. Prefactibilidad. Álbum nº 2. Comisión Nacional de Riego. CEDEC 1977 .....	1-12
1.2.17.Estudio de sistemas de obras matrices. Diseño preliminar de los embalses” Comisión Nacional de Riego. Unidad de Grandes Obras. CEDEC 1978 .....	1-12

1.2.18. Estudio integral de la Cuenca del Rio Maule. Estudio del Esquema nº 3. Comisión Nacional de Riego.  
Unidad de Grandes Obras. CEDEC 1978 1-12

1.3.	ENCUADRE GENERAL.....	1-13
1.4.	FORMACIONES AFECTADAS .....	1-13
1.4.1.	Formación Cura-Mallín. Eoceno –Mioceno Inferior. ....	1-13
1.4.2.	Unidad de Rocas intrusivas. Cretácico superior a Mioceno.....	1-14
1.4.3.	Formación La Montaña. Pleistoceno .....	1-14
1.4.4.	Depósitos Aluviales. Cuaternario.....	1-15
1.4.5.	Depósitos coluviales (coluviones). Cuaternario .....	1-15
1.5.	TRABAJOS DE TERRENO .....	1-16
1.5.1.	Reconocimientos geológicos.....	1-16
1.5.2.	Campaña geotécnica.....	1-16
1.6.	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES RECONOCIDOS EN LOS EMPLAZAMIENTOS ESTUDIADOS .....	1-46
1.6.1.	Substrato rocoso andesítico.....	1-49
1.6.2.	Substrato rocoso tobáceo.....	1-53
1.6.3.	Recubrimientos cuaternarios: Formación la Montaña.....	1-56
1.6.4.	Recubrimientos cuaternarios: Suelos fluviales y/o aluviales.....	1-59
1.6.5.	Recubrimientos cuaternarios: Suelos coluviales y conos de deyección.....	1-61
1.7.	GEOLOGÍA DE LOS EMPLAZAMIENTOS DE PRESA .....	1-63
1.7.1.	La Recova .....	1-63
1.7.2.	El Montecillo .....	1-80
1.7.3.	Riesgo por volcanismo en el valle del Achibueno.....	1-92
1.8.	ESTUDIO DE MATERIALES .....	1-92
1.8.1.	Materiales impermeables .....	1-93
1.8.2.	Materiales granulares.....	1-94
1.8.3.	Enrocado de cantera.....	1-99
1.9.	CONCLUSIONES.....	1-101
1.9.1.	La Recova .....	1-101
1.9.2.	Montecillo.....	1-103
1.10.	PARÁMETROS GEOTÉCNICOS .....	1-105
1.11.	RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS POSTERIORES.....	1-105
1.11.1.	La Recova .....	1-105
1.11.2.	Montecillo.....	1-106
<b>2.</b>	<b>SISMICIDAD.....</b>	<b>2-1</b>
2.1.	INTRODUCCIÓN .....	2-1
2.2.	ANTECEDENTES.....	2-1
2.3.	METODOLOGÍA .....	2-1
2.4.	MARCO TECTÓNICO GENERAL.....	2-1
2.5.	MARCO SISMOGENÉTICO GENERAL .....	2-2

2.6.	SISMICIDAD HISTÓRICA.....	2-5
2.7.	FUENTES SISMOGÉNICAS.....	2-5
2.7.1.	Terremotos interplaca subductivos tipo Thrust.....	2-6
2.7.2.	Terremotos Intraplaca de profundidad intermedia (al interior de la placa de Nazca).....	2-6
2.7.3.	Terremotos Intraplaca superficiales o corticales (al interior de la placa sudamericana).....	2-6
2.8.	LEYES DE ATENUACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA HORIZONTAL.....	2-6
2.9.	ESTIMACIÓN DE LAS ACELERACIONES MÁXIMAS HORIZONTALES PARA FUENTES COSTERAS DE POCA PROFUNDIDAD.....	2-6
2.10.	ESTIMACIÓN DE LAS ACELERACIONES MÁXIMAS HORIZONTALES PARA FUENTES DE PROFUNDIDAD INTERMEDIA.....	2-7
2.11.	CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS Y REGIONALIZACIONES SÍSMICAS DE CHILE. ESTUDIO DE MAGNITUDES MÁXIMAS.....	2-7
2.11.1.	Regionalización de Labbé y Saragoni (1976).....	2-7
2.11.2.	Regionalización de Barrientos (1980). Zona cordillerana.....	2-9
2.11.3.	Análisis probabilístico.....	2-12
2.11.4.	Análisis determinístico.....	2-13
2.12.	ACELERACIÓN MÁXIMA HORIZONTAL PROPUESTA PARA EL DISEÑO.....	2-15

#### **ANEXOS (EN SOPORTE DIGITAL)**

ANEXO GEO 01.	NOTAS DE CAMPO DEL RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO
ANEXO GEO 02.	REGISTROS DE SONDAJES
ANEXO GEO 03.	FOTOGRAFÍAS DE SONDAJES
ANEXO GEO 04.	REGISTROS Y FOTOGRAFÍAS DE CALICATAS
ANEXO GEO 05.	ENSAYOS DE PERMEABILIDAD
ANEXO GEO 06.	INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA
ANEXO GEO 07.	ENSAYOS DE LABORATORIO
ANEXO GEO 08.	DATOS Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MACIZO ROCOSO



ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO EN RÍO  
ACHIBUENO, REGIÓN DEL MAULE

TOMO IV – GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA



## 1. ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En este informe se presenta el estudio geológico y el análisis de resultados de los trabajos de investigación geotécnica desarrollados sobre las dos soluciones seleccionadas para el emplazamiento de un embalse en el valle del río Achibueno: La Recova y El Montecillo.

Los trabajos de terreno incluyen reconocimientos geológicos de superficie y trabajos de investigación geotécnica, con los correspondientes ensayos de laboratorio sobre muestras seleccionadas. La interpretación de sus resultados constituye el presente informe, para cada solución de embalse. Al final del documento se presentan las conclusiones, valorando la aptitud de los emplazamientos seleccionados, desde el punto de vista geológico-geotécnico, y las posibles tipologías de presa compatibles con las características topográficas y geológico-geotécnicas de los emplazamientos.

Junto con la descripción, en el presente documento se incluyen láminas con plantas geológicas, tanto de los sitios de presa como de las zonas inundables, incluyendo la situación de los reconocimientos geotécnicos realizados, y la delimitación de las zonas de yacimientos de materiales recomendadas, así como perfiles geológico-geotécnicos (por los posibles ejes de presa), para las dos alternativas consideradas.

Los datos del reconocimiento geológico de superficie se presentan en el Anexo 1 "Notas de campo del reconocimiento geológico". La situación de los puntos de lectura (toma de datos litológicos, estructurales y fotografías) citados en dicho apéndice, se encuentra en las plantas geológicas correspondientes.

Los Anexos nº 2 a nº 7 presentan los registros y fotografías de sondajes y calicatas, resultados de los ensayos de permeabilidad in situ, resultados de la investigación geofísica, y resultados de los ensayos de laboratorio.

Los datos estructurales tomados en afloramientos del substrato rocoso, con la disposición de las principales familias de discontinuidades del macizo, se han analizado con la aplicación informática CALEST, desarrollada por TYPASA. Los listados de datos con su proyección estereográfica, las agrupaciones consideradas para diferentes zonas y las salidas gráficas del programa CALEST, se presentan en el Anexo 8 "Datos y análisis estructural del macizo rocoso".

### 1.2. ANTECEDENTES

Para la presente interpretación, se han consultado los siguientes antecedentes, cuyo análisis se presenta resumido en los numerales correspondientes:

Para el encuadre geológico:

- Avance Geológico de la Hojas Rancagua-Curicó, Talca-Linares, Chanco y Concepción.-Chillán. E 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1977.
- Hoja Laguna del Maule. Carta Geológica de Chile Nº 64. E 1:250.000. Servicio Nacional De Geología y Minería. 1984.

- "Rodados multicolores: su distribución y características en el sur de Chile". A. Hauser, Revista Geológica de Chile N° 27, p. 69-83. 1986.
- "Carta Hidrogeológica de Chile. Hoja de Talca". E. 1:100.000. SNGM. 1995
- "Evaluación Preliminar de peligros del Volcán Nevado de Longaví" J.A. Naranjo (2001)
- "Proyecto constructivo del embalse de Ancoa. Informe de Factibilidad". Consultora San Martín Ingenieros (SMI). 2004
- "Stratigraphy, Petrology, and Geochemistry of Nevado Longaví Volcano, Chilean Andes (36.2°S)". D.Sellés, 2006.
- "Proyecto Hidroeléctrico Achibueno: Estudio de Impacto ambiental". POCH. 2009
- "Tasas de transferencia sedimentaria en la cuenca del río Ñuble. Estimación basada en desequilibrios en la serie del Uranio-238". Del Campo Rojas, F.D. Memoria para el título de geólogo. 2010.
- "El Cenozoico del alto río Teno, Cordillera Principal, Chile Central: Estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas". J. Piquer, J. C. Castelli, R. Charrier, G.Yáñez: Andean Geology 37 (1): 32-53. January, 2010
- "Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillan y Copahué-Callaqui (Andes del Sur, 36-39°S)". , J.P. Radic. Revista geológica de Chile: p. 220-246. Enero, 2010
- "Pequeña Central Hidroeléctrica Baquedano. Estudio hidrogeológico". EDIC Ingenieros. 2011.
- "Geología y viabilidad de posibles sectores de emplazamiento de embalses en el curso medio del río Longaví". E. Godoy, 2012.

#### Para el análisis de antecedentes en la preselección de embalses:

- "Reconocimiento y Estudio preliminar de las posibilidades de embalse preseleccionadas en la Cuenca del río Maule. CEDEC 1977.
- "Estudio integral de riego de la Cuenca del río Maule. Prefactibilidad", Parte VII "Estudios de obras matrices". Comisión Nacional de Riego. CEDEC 1977.
- "Estudio integral de riego de la Cuenca del río Maule. Prefactibilidad". Álbum n° 2. Comisión Nacional de Riego. CEDEC 1977.
- "Estudio de sistemas de obras matrices. Diseño preliminar de los embalses" Comisión Nacional de Riego. Unidad de Grandes Obras. CEDEC 1978
- "Estudio integral de la Cuenca del Río Maule. Estudio del Esquema n° 3". Comisión Nacional de Riego. Unidad de Grandes Obras. CEDEC 1978.

#### 1.2.1. Avance Geológico de la Hojas Rancagua-Curicó, Talca-Linares, Chanco y Concepción.-Chillán. E 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1977.

Esta hoja geológica, que solamente incluye el tramo de río Achibueno situado aguas abajo de la confluencia con el Estero Vega de Salas presenta una cartografía muy simple y, en algunos aspectos, no compatible con las observaciones del reconocimiento de campo realizado por TYP SA.

La margen derecha del valle correspondería a materiales de la Fm Abanico (volcanitas con intercalaciones continentales), de edad Cretácico Superior, mientras que la margen izquierda aparece como "sedimentos fluviales y glaciales de relleno de valles actuales", omitiendo los relieves con afloramientos rocosos localizados que se han observado en el reconocimiento de campo (zonas de la Recova y El Peñón por ejemplo) y que deberían figurar en esta zona del mapa.

En la zona alta del Estero Vega de Salas se representa un afloramiento intrusivo del denominado Batolito Andino, constituido por granodioritas y tonalitas.

1.2.2. Hoja Laguna del Maule. Carta Geológica de Chile N° 64. E 1:250.000. Servicio Nacional De Geología y Minería. J. Muñoz y H. Niemyer 1984.

En esta hoja geológica, más moderna que la anterior, aparece todo el valle del río Achibueno aguas arriba del Estero Vega de Salas. Presenta diferencias interpretativas con el anterior:

- No se da continuidad al Batolito Andino de Vega de Salas, en cuya confluencia con el Achibueno se representan pórfidos andesíticos.
- El substrato dominante, en todo el entorno, corresponde a la Formación Cura-Mallin de edad Oligoceno-Mioceno, constituida por tobas, brechas, andesitas y dacitas con intercalaciones de calizas, areniscas y lutitas.

Toda la margen izquierda del valle, en el tramo de río de dirección NNW presenta relieves constituidos por depósitos no consolidados con mezcla de materiales morrénicos, fluvio-glaciares, fluviales, glacio-lacustres y piroclásticos. Estos materiales, a los que se asigna una edad Cuaternario antiguo (Pleistoceno), constituyen la Formación La Montaña.

En los tramos superiores del río, aguas abajo del Estero Las Ánimas, se representan algunos enclaves locales de intrusivo granodiorítico.

1.2.3. Rodados multicolores: su distribución y características en el sur de Chile. A. Hauser, Revista Geológica de Chile N° 27, p. 69-83. 1986.

El trabajo de Hauser describe, bajo el nombre de "Rodados Multicolores", una serie de conglomerados fuertemente alterados, formados de manera predominante por andesitas y basaltos. La unidad se distribuye ampliamente en la zona comprendida entre el río Maule y la Isla de Chiloé.

Los clastos, bien rodados, presentan tamaño promedio entre 10 y 15 cm, y se disponen en bancos masivos pobremente estratificados, con abundantes intercalaciones lenticulares de areniscas y gravas. La meteorización proporciona a la serie una gran variedad cromática. La alteración podría deberse a su transporte y depósito en cuencas con drenaje deficiente, donde los detritos habrían permanecido largo tiempo en condiciones de saturación.

La génesis de estos materiales estaría relacionada con procesos fluvio-torrenciales, con significativos aportes volcánicos.

En la Figura 1 "Mapa de ubicación de las principales localidades con Rodados Multicolores", los depósitos localizados en el valle del río Achibueno, al ESE de Linares, parecen constituir la presencia más septentrional de Rodados Multicolores, La mayor extensión de estos depósitos se localiza más al sur, entre las localidades de Los Ángeles y Temuco.

Se indica que, en la zona comprendida entre el río Maule y la región de Los Lagos, la cobertura superficial está constituida, en su mayor parte, por suelos limo-arcillosos procedentes de la alteración in situ de cenizas volcánicas, conocidos como "trumaos".

Esta unidad fue inicialmente definida como Formación Morrena de la Montaña (Muñoz-Cristi, 1960), que le asignó una edad Plioceno. Gajardo (1961) incluyó, en la Formación La Montaña (Muñoz-Cristi, 1960) un

conjunto de sedimentos glaciales y glacio-lacustres distribuida al sur de Talca, que conforman una serranía de lomas redondeadas. Les asignó una edad cuaternaria y los describió como una mezcla de fragmentos de rocas volcánicas, basálticas y graníticas, con variable grado de redondeamiento, en matriz arcillosa pardo rojiza y tamaños de clastos entre 7 y 40 cm.

El autor recoge también la integración de materiales equivalentes a los Rodados Multicolores en trabajos anteriores y posteriores de diferentes autores: Feruglio, 1950, Fidalgo y Riggi, 1970, González, 1978, Leanza y Leanza, 1979, Porter, 1981, Valenzuela, 1982, Valera y Moreno, 1982.

En la descripción litológica se destaca: los colores variados, el alto grado de redondeamiento y de alteración de los clastos, y la formación de estructuras en capas concéntricas en torno a los núcleos de los clastos, por el proceso de alteración progresiva desde la periferia hacia el centro de cada elemento rodado. En numerosos casos presentan procesos de redepositación.

Respecto a la edad de estos depósitos, se indica que en el corte del flanco norte del río Codihue, aparecen cubiertos por una colada de lava que sería parte de la Fm Cola de Zorro (Aguirre y Levi, 1964, Hauser, 1970). Vergara y Muñoz asignaron una edad de 1-2 Ma (Plio-Pleistoceno) a la Fm Cola de Zorro, Dado que, por la ausencia de buenos afloramientos, y la falta de continuidad entre ellos, no se puede asegurar rigurosamente que las lavas de la Fm Cola de Zorro se apoyen sobre los Rodados Multicolores, y de acuerdo con los antecedentes disponibles, el autor opta por asignar una edad Plio-Pleistocena a los Rodados Multicolores.

#### 1.2.4. Carta Hidrogeológica de Chile. Hoja de Talca. E. 1:100.000. SNGM. 1995

Las descripciones geológicas, muy generales, no presentan interés para el presente estudio. Destacamos la única referencia geológica relacionada con el valle del río Achibueno:

- Abanico fluvial Ancoa-Achibueno. Situado en torno al punto de descarga de los ríos Ancoa y Achibueno al Valle Central. Integrado por materiales clásticos gruesos con bolones, ripios y gravas con escasa matriz arenosa. Clastos muy bien redondeados, frescos y con superficies pulimentadas. Disposición en forma de abanico y espesor en torno a 20 – 30 m.

En el Mapa 2. Linares, a escala 1:100.000 se presenta el tramo de río Achibueno aguas abajo de la zona de Vegas del Molino. Hasta las proximidades de su confluencia con el Ancoa, ambos márgenes se representan con materiales de la Formación Coya-Machalí (Rocas volcánicas andesíticas, riolíticas y basálticas con intercalaciones de lutitas y areniscas, en bancos bien estratificados) de edad Cretácico Superior. Nuevamente parece otro nombre asignado a materiales similares a los de las Formaciones Abanico y Cura-Mallin, anteriormente comentadas.

#### 1.2.5. “Evaluación Preliminar de peligros del Volcán Nevado de Longaví” J.A. Naranjo (2001)

Este documento se comenta en el apartado 2.8.3. “Riesgo por volcanismo en el valle del Achibueno”, ya que la información contenida en el mismo es la que ha servido de base para la evaluación del riego volcánico, dada su proximidad a la zona de estudio.

#### 1.2.6. Proyecto constructivo del embalse de Ancoa. Informe de Factibilidad. Consultora San Martín Ingenieros (SMI). 2004

Se describe la zona de proyecto con afloramientos de brechas volcanoclásticas verdosas asignadas tentativamente a la Formación Abanico. También se observan tobas volcánicas gris verdosas. (Esta

descripción podría corresponderse con la que se hace, en el Proyecto Hidroeléctrico Achibueno, para el tramo superior de la Formación Río Blanco, constituido por tobas de lapilli verde, brechas volcánicas y areniscas. También sería compatible con su asignación a la Fm Cura-Mallín, que según otros autores, por ejemplo en la Hoja Geológica "Laguna de Maule", aflora en las mismas áreas asignadas a la Fm Río Blanco).

El estero La Sombra, afluente del Ancoa por el sur del emplazamiento, marca el contacto entre las rocas volcánicas de la Fm Abanico con el cuerpo intrusivo correspondiente a una apófisis del Batolito El Melado.

Además de este encuadre geológico general, presenta cierto interés la descripción más detallada de las zonas de presa, original y alternativa, y sus problemáticas geológico-geotécnicas asociadas, por su posible similitud con alguno de los emplazamientos considerados en el río Achibueno.

En el sitio de presa original (donde se iniciaron las obras en 1956 y hasta 1958), la roca de fundación aflora en el centro del cauce con limitada continuidad aguas abajo y aguas arriba, constituyendo un verdadero "islote" con dos paleocauces laterales muy definidos. A lo largo del eje de presa la roca se encuentra entre 15 y 40 m de profundidad. Los estribos corresponden a un estrechamiento del valle conformado por deslizamientos de materiales finos que tiene bajo ellos un gran espesor de gravas redondeadas fluvio-glaciales, permeables, presentes hasta la cota 525. El tipo de presa previsto era de materiales sueltos, de tipo zonada, con núcleo impermeable.

Tras los estudios realizados por la consultora, se optó por un nuevo emplazamiento de presa (el emplazamiento denominado Ancoa Alto 1. En los antecedentes analizados se cita el documento "Geología y Geotecnia Área Embalse Melado, Consorcio MN – Harza, 1984", en el que se indica una curiosa anomalía geológica, consistente en reconocer un cuerpo andesítico de grandes dimensiones "flotando" en los sedimentos del río Melado en una profundidad de 60 a 120 m. Las investigaciones, tanto de superficie como de subsuelo, no lograron establecer un modelo geológico aceptable para explicar tal anomalía, ya que hacia aguas abajo, la roca se localizaba a una cota superior a la del cuerpo indicado. Como consecuencia se decidió desplazar la presa hacia aguas abajo del eje inicial.

Los estudios del Proyecto Ancoa detectaron asimismo, en la zona inundable (sector de yacimientos), un desnivel de fondo rocoso que alcanza los 70 m bajo la superficie, mientras que unos cientos de metros aguas abajo, la roca se presenta cercana a la superficie. Se trata por tanto de una situación parecida a la detectada en el Embalse Melado. La explicación que se ha dado es por acción erosiva del hielo en el modelado glacial del valle.

El estudio de materiales para este proyecto se centró en una tipología de presa CFGD. Los reconocimientos, mediante calicatas y sondajes eléctricos verticales se realizaron en las gravas de las terrazas en ambas riberas, que aseguraban una explotación de 8 o más metros de profundidad sin problemas de agotamiento (los sondeos eléctricos verticales indicaron espesores de material adecuado hasta 30 a 60 m). Con mayor seguridad es adecuado todo el material que se encuentra hasta 20 m de profundidad. Los volúmenes estimados (variando el espesor explotable entre 5, 8 y 20 m) oscilan entre 2.750.000 m<sup>3</sup> (explotando 5 m) hasta 110.000.000 m<sup>3</sup> (si se explota hasta 20 m de espesor), para una necesidad estimada de 2.600.000 m<sup>3</sup> (para presa CFGD con taludes 1:1.5 y 1:1.6 para embalse de 120 mill m<sup>3</sup> de capacidad).

### 1.2.7. Stratigraphy, Petrology, and Geochemistry of Nevado Longaví Volcano, Chilean Andes (36.2°S)". D.F. Sellés Mathieu, 2006.

El volcán Nevado de Longaví (VNL) es un estratovolcán Cuaternario perteneciente a la Zona Volcánica Sur de los Andes (ZVS). Está ubicado en la vertiente occidental de los Andes, a los 36.2°S, cercano a la Depresión Central de Chile. Con su cima de 3.242 msnm, es la máxima altura de la zona pese a su modesto volumen de ~20 km<sup>3</sup>. El VNL es un cono único compuesto principalmente por coladas andesíticas, y con los restos de un domo dacítico en la cumbre. Gran parte de este domo colapso durante el Holoceno hacia el Este, cubriendo una colada andesítica y un depósito de pómez de caída dacítica, también Holocenos.

El cono del Volcán nevado de Longaví se sobrepone al borde norte de un estratovolcán máfico mas antiguo (volcán Villalobos; ~1 Ma), representante local de una secuencia de extensión regional (Fm. Cola de Zorro). Rocas volcanoclásticas del Paleógeno, levemente plegadas e intruidas por plutones Neógenos, forman el basamento de ambos volcanes.

El vulcanismo del Plioceno-Cuaternario en el área entre 36 ° S y 37 ° S se construye sobre estratos volcanoclásticos del Oligoceno-Mioceno temprano y medio, y sobre de granitoides del Mioceno tardío. La secuencia volcanoclástica, conocida en esta zona como la Formación Cura-Mallín, es una secuencia gruesa (2800 m) compuesta principalmente por tobas andesíticas y brechas, con flujos de lava y estratos subordinados de rocas sedimentarias continentales, de facies fluviales y lacustres, con metamorfismo de bajo grado (Muñoz y Niemeyer, 1984; Jordan et al, 2001). Esta formación fue depositada en cuencas extensionales intra-arco.

La Formación Cura-Mallín fue ligeramente plegada durante la inversión de la cuenca y acortamiento cortical a partir del Mioceno.

Plutones granitoides, a escala de batolito, del Mioceno Medio penetraron al oeste del arco Cuaternario, pero pequeñas stocks del Mioceno tardío afloran en las cercanías de los volcanes activos (Muñoz y Niemeyer, 1984). Son granitoides de biotita y de anfíbol, que van desde cuarzo-dioritas a tonalitas y granodioritas.

### 1.2.8. Proyecto Hidroeléctrico Achibueno: Estudio de Impacto ambiental". POCH. 2009

En los documentos consultados, se muestra una interpretación geológica más reciente y más focalizada en el valle del río Achibueno y su entorno, por lo que presenta mayor interés para nuestro trabajo.

En el marco Geológico General se indica que, aunque en la Hoja Laguna del Maule (1984) se interpreta el área del estudio conformada por rocas volcánicas, volcano-sedimentarias y sedimentarias-terciarias asignadas a la Fm Cura-Mallin (Muñoz y Niemeyer, 1984), de edad Oligoceno-Mioceno y rocas intrusivas granodioríticas pertenecientes al Batolito El Melado, otros antecedentes complementarios (Gardeweg, 1980) indica que la zona está cubierta por rocas de la Fm Río Blanco (andesitas porfídicas, tobas de lapilli verde, brechas volcánicas y areniscas) de edad Cretácico Superior.

El estudio recoge esta última interpretación como la más coincidente con sus trabajos geológicos de campo.

Dividen este substrato en dos sub-unidades, definidas por Gardeweg:

- Tramo inferior de andesitas porfídicas
- Tramo superior de tobas con intercalaciones de brechas volcánicas y areniscas.

Valdés (1990) define dos unidades: andesítica y tobácea. Respecto a las rocas plutónicas establece tres unidades: Las Ánimas, Granitoide y Las Toscas. Las dos primeras se han reagrupado, en el estudio realizado para este proyecto, en una nueva unidad denominada “Unidad de Rocas Intrusivas”, constituida por dioritas, dioritas cuarcíferas y tonalitas, mientras que Las Toscas (solamente aflora en la parte alta del cordón que separa las quebradas de Los Huelles y Pejerreyes) está constituida por pórfido andesítico y diorítico de grano fino, y parece corresponder a materiales interestratificados más que intrusivos.

Como depósitos no consolidados sobre el substrato rocoso se indican:

- Depósitos fluvio-glaciares. Se caracterizan por la variabilidad litológica y de tamaño de sus componentes (poligénicos y heterométricos). Clastos angulosos a subredondeados, centimétricos a métricos con matriz fina areno-limosa.
- Depósitos coluviales. Clásticos, brechosos, constituidos por clastos angulosos con escasa matriz fina. Composición ligada a los afloramientos superiores de los que proceden.
- Depósitos fluviales. Ligados al cauce actual del río. Gravas rodadas y bolos con matriz arenosa.

1.2.9. Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillan y Copahue-Callaqui (Andes del Sur, 36-39°S). Radic, J.P. *Revista geológica de Chile*: p. 220-246. *Andean Geology formerly. Revista Geológica de Chile*. Enero, 2010

Este trabajo presenta un margo geológico estructural regional, en el que se enmarcan las unidades que afectan al estudio. La interpretación geológica histórico-estructural se resume en los siguientes aspectos:

- Las cuencas cenozoicas comenzaron su desarrollo durante el Oligoceno-Mioceno como depresiones extensionales, conformando un sistema de al menos tres subcuencas orientadas N-S y conectadas por dos zonas de acomodación estructural. Posteriormente este sistema de cuencas fue tectónicamente invertido hacia finales del Mioceno y los antiguos depocentros fueron deformados y exhumados, reutilizando las fallas originalmente extensionales. Las zonas de acomodación estructural permanecieron como estructuras de primer orden a escala de cuenca y constituyeron zonas de debilidad que favorecieron el posterior desarrollo del volcanismo y magmatismo.
- Durante el Oligoceno-Mioceno la zona fue afectada por el desarrollo de la cuenca extensional de Cura-Mallín, y tectónicamente invertida hacia el Mioceno Superior (Jordán et al., 2001; Burns, 2002; Radic et al., 2002; Folguera et al., 2002, 2003).
- A partir del Plioceno, la Cordillera Principal en la zona del retroarco fue afectada por una tectónica extensional (Cuenca de Cola de Zorro, Folguera et al., 2003, 2006b), mientras que su contraparte en el intraarco era afectada por una tectónica transcurrente de máximo esfuerzo horizontal principal NE-SO que actuó desde el Pleistoceno hasta ahora (Laveny y Cembrano, 1999; Melnick et al., 2006a).
- El relleno del sistema extensional está representado por las formaciones Cura-Mallín en Chile y Epulauquen en Argentina (González y Vergara, 1962; Niemeyer y Muñoz, 1983; Muñoz y Niemeyer, 1984; Suárez y Emparan, 1997; Pesce, 1981; Zanettini, 1987), el cual está caracterizado principalmente por facies volcánicas y volcanoclásticas distribuidas de acuerdo a la proximidad de los paleocentros volcánicos.
- Sobreyaciendo concordantemente a las unidades mencionadas se dispone una secuencia volcánica conocida como formación Trapa-Trapa y Mitrau-quén en Chile (Niemeyer y Muñoz, 1983; Suárez y Emparan, 1997) y Cajón Negro y Quebrada Honda en Argentina (Pesce, 1981). Debido a que su

distribución se extiende sobrepasando los límites de las unidades previas y, además, presentando poca variación en su espesor, es que no ha sido considerada como parte del relleno de la etapa extensional de la cuenca.

- La inversión tectónica durante el evento compresivo del Mioceno Tardío se tradujo en la reutilización de las fallas originalmente extensionales que formaban parte de la cuenca de Cura-Mallín, exhumando y deformando los depósitos asociados. El estilo de deformación es típico de faja plegada de piel gruesa con basamento involucrado y está caracterizada por una geometría doble vergente reconocida en muchas cuencas invertidas alrededor del mundo (McClay, 1995).
- Basado en las observaciones de campo, se plantea la hipótesis de que parte de los intrusivos mayores en la zona de estudio (Batolito de Santa Gertrudis e Intrusivos de la Cordillera Andina) puedan corresponder a rocas más antiguas, emplazadas con anterioridad al desarrollo del sistema extensional de Cura-Mallín, e incluidas en la deformación del evento de inversión tectónica del Mioceno Tardío.
- Los depósitos volcánicos del Plioceno-Holoceno se han dividido en el presente trabajo en dos unidades mayores, una de edad plio-pleistocénica inferior y otra pleistocena superior-holocena. La unidad plio-pleistocénica inferior incluye varias estructuras volcánicas y rocas asociadas, principalmente basaltos y andesitas, relacionadas con estratovolcanes muy erosionados y que constituyen extensas mesetas subhorizontales que fosilizan la estructura de las rocas subyacentes. En Chile esta unidad se conoce como Formación Cola de Zorro (González y Vergara, 1962)
- La unidad pleistocena superior-holocena está representada por el arco volcánico actual
- En conjunto, el volcanismo plioceno-holoceno ha sido interpretado como producto de un régimen tectónico extensional que habría afectado la Cordillera Principal en el retroarco y un régimen transtensional que la habría afectado en el intraarco durante los últimos 5 Ma (Folguera et al., 2000, 2002, 2003, 2006b; García y Folguera, 2005; Ramos y Folguera, 2005; Melnick et al., 2006b, c).

#### 1.2.10. El Cenozoico del alto río Teno, Cordillera Principal, Chile Central: Estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas. José Piquer, Juan Carlos Castelli, Reynaldo Charrier, Gonzalo Yáñez: *Andean Geology* 37 (1): 32-53. January, 2010

Este trabajo reciente, aunque concierne a la parte alta del valle del Teno, presenta interés para nuestra interpretación geológica, ya que permite correlacionar las formaciones Abanico y Cura-Mallin de las hojas geológicas anteriormente comentadas, al atribuir a la Fm Abanico una edad Eoceno Tardío – Mioceno Temprano a Medio, lo que coincide con la indicada para la Fm Cura-Mallin en la Hoja Laguna del Maule.

Teniendo en cuenta la identidad litológica con que se definen ambas formaciones poligénicas (volcanitas andesíticas con intercalaciones continentales de areniscas-lutitas, calizas, etc.), cabe pensar en dos diferentes denominaciones para el mismo tipo de materiales geológicos.

1.2.11. Tasas de transferencia sedimentaria en la cuenca del río Ñuble. Estimación basada en desequilibrios en la serie del Uranio-238. F.D. Del Campo Rojas, (Memoria para el título de geólogo). 2010.

En el Capítulo 4 “Marco Geológico” se describe la Formación Río Blanco (Gardeweg, 1980) de edad Cretácico, constituida por lavas andesíticas e intercalaciones de brechas piroclásticas y epiclásticas. Indica que se encuentran cubiertas, en discordancia, por la Formación Cola de Zorro.

En el mismo capítulo se describe la Formación Cura-Mallín, de edad Eoceno – Mioceno Inferior. Se indica que Muñoz y Niemeyer (1984) definen dos miembros en esta formación:

- Un miembro inferior Río Queuco, volcanoclástico, constituido por tobas (de cristales, y en menor cantidad vítreas y de lapilli), brechas (líticas, con fragmentos de andesitas, dacitas porfíricas y pómez) y, de forma subordinada, areniscas, conglomerados, lutitas y coladas de lava.
- Un miembro superior, Malla-Malla, formado por areniscas, conglomerados y lutitas, y en menor proporción por tobas, brechas, calizas y niveles carbonosos.

La Formación Cura-Mallín es cubierta, en discordancia, por la Formación Cola de Zorro.

Se describe asimismo la Formación La Montaña, de edad Pleistoceno, constituida por depósitos morrénicos compuestos por sedimentos no consolidados, de escasa compactación, arcillosos, de color rojo a pardo-rojizo, que contienen de forma caótica fragmentos de rocas volcánicas, basálticas y graníticas, de distinto grado de redondeamiento y en diferente grado de alteración. El tamaño de los clastos varía de 7 a 40 cm en promedio, existiendo algunos bloques de hasta 5 m, en algunos sectores.

Presenta intercalaciones de arcillas, arenas y cenizas volcánicas bien estratificadas, que se interpretan como glacio-lacustres.

También define la Formación Trapa-Trapa, de edad Mioceno Medio – Superior, que incluye andesitas, andesitas basálticas y dacitas calco-alcalinas.

1.2.12. Pequeña Central Hidroeléctrica Baquedano. Estudio hidrogeológico. EDIC. 2011.

En el apartado 4.1 “Marco geológico regional” se describen las siguientes formaciones:

#### Cura-Mallín (Eoceno – Mioceno)

- Definida por González y Vergara, 1962 en la cuenca del río Queuco, incluye la Fm Malla-Malla de los mismos autores, utilizando el sentido de Serrano (1975).
- Corresponde a una secuencia estratificada, de espesores entre 900 y 1500 m que presenta, en su parte basal, tobas brechosas y finas, multicolores (Miembro Río Queuco), y en su parte superior por conglomerados, areniscas y lutitas con intercalaciones carbonosas y calcáreas (Miembro Malla-Malla)

#### Trapa-Trapa (Mioceno medio – Superior)

- Definida por Niemeyer y Muñoz (1983).
- Constituida por más de 1000 m de aglomerados volcánicos, conglomerados y lavas andesíticas, que se disponen transicionalmente sobre la Fm Cura-Mallín.

#### Cola de Zorro (Plioceno – Pleistoceno)

- Definida por González y Vergara (1962) en las cercanías de la Laguna del Maule.
- Espesores variables de andesitas, andesitas basálticas y basaltos grises con intercalaciones de aglomerados volcánicos.
- Fuerte discordancia angular sobre las Fm Cura-Mallín y Trapa-Trapa y sobre los intrusivos miocénicos

#### La Montaña (Pleistoceno – Holoceno)

- Gajardo (1980). Corresponde a lo que Muñoz-Cristi (1960) nombró Formación Morrena de la Montaña o Cono Poligénico de Quilleo (Thiele, 1998).
- Formada por depósitos morrénicos y aluviales con bancos lenticulares de arcillas y arenas, con intercalaciones volcanoclásticas.
- Sobreyace discordantemente a la Fm Cola de Zorro y Cura-Mallín.

#### 1.2.13. Geología y viabilidad de posibles sectores de emplazamiento de embalses en el curso medio del río Longaví. E. Godoy 2012

Este interesante informe es muy relevante para nuestro estudio, ya que concierne a los depósitos cuaternarios antiguos de la margen derecha del valle del Longaví, que enlazan en continuidad con los detectados a lo largo de la margen izquierda del valle del río Achibueno.

Se trata, según los mapas del estudio realizado por EDIC en 2002, de gravas y fragmentos angulosos en matriz cinerítica, ocasionalmente con niveles interestratificados arenosos. Estos materiales, en los que se labraron las terrazas existentes, están rellenoando un amplio paleocauce. Según Naranjo (2001) el relleno del paleocauce se realizó principalmente por depósitos de avalancha volcánica, aunque los niveles arenosos interestratificados indican alguna combinación con transporte acuoso.

En el caso de la margen derecha del Achibueno, se han observado gravas de terraza fluvial con cantos bien redondeados y bolones, que alternan con niveles morrénicos, fluvio-glaciares y laháricos o de avalancha volcánica, agrupados en la denominada Fm La Montaña de edad asignada Pleistoceno. Los flujos de avalancha volcánica procederían del volcán Longaví situado al sur y sureste del Achibueno.

#### 1.2.14. Reconocimiento y Estudio preliminar de las posibilidades de embalse preseleccionadas en la Cuenca del río Maule. CEDEC 1977

En el río Achibueno se describen los siguientes emplazamientos considerados aptos para embalses:

- Montecillos (o Montecillo)
- Colliguay
- La Recova
- El Peñasco

De cada uno de estos embalses se presenta información relativa a los siguientes aspectos:

- Ubicación
- Accesos
- Hidrología
- Topografía

- Geología
- Geotecnia
- Características de las obras (Presa, embalse y obras de entrega)
- Conclusiones

También se cita un emplazamiento en Vega de Salas, pero no se adjunta situación ni otro tipo de información relacionada con el mismo.

El documento concluye con la recomendación de La Recova para emplazamiento de la presa, dado que las condiciones geológicas y geotécnicas de la fundación, en su lado derecho son iguales o más favorables que las existentes en Montecillos, Colliguay y El Peñasco. Sin embargo, en el lado izquierdo, las condiciones pueden ser más desfavorables por la proximidad del estero Las Minas y de la puntilla terminal de este lado.

En el capítulo de geología del emplazamiento Montecillos se indica que *"El curso superior del río Achibueno se caracteriza por tener en su lado izquierdo (oeste) grandes depósitos aterrazados de sedimentos cuaternarios (pre última glaciación) con posibles intercalaciones de materiales volcánicos de tipo lahárico y flujos de lava. Estos depósitos se extienden prácticamente hasta la zona en que el río desemboca en el valle central. Se estima que todo este gran relleno proviene de la cabecera del valle del Longaví y se extiende algo más al norte que el río Ancoa. Los materiales pueden derivar principalmente del estrato-volcán plio-pleistocénico Nevado del Longaví..."*

Este esquema, contrastado por TYP SA en el reconocimiento de campo realizado para la presente fase inicial del estudio, describe perfectamente la asimetría geológica del valle del Achibueno en la mayor parte del tramo estudiado (afecta a el tramo de valle de alineación NNW), con presencia de materiales rocosos en su margen derecha y relieves constituidos por materiales cuaternarios antiguos en su margen izquierda, lo que origina el principal condicionante, relativo al apoyo izquierdo de las presas en este tramo del valle (capacidad de soporte, permeabilidad y erosionabilidad de los materiales cuaternarios). Siguiendo el valle hacia aguas arriba, donde el curso del mismo gira hacia el este, se abandonan estos aterrazamientos cuaternarios antiguos y el valle, más estrecho, pasa a presentar substrato rocoso volcánico (o localmente intrusivo) en ambos lados. Asimismo, en el tramo inferior, antes de su entrada en el valle central, aguas abajo de la desembocadura del estero Vega de Salas, aparecen algunos afloramientos rocosos aislados que pueden permitir un apoyo izquierdo de parte o totalidad de la presa en materiales rocosos del substrato terciario (emplazamientos de La Recova, Polcura y El Peñasco).

Respecto al emplazamiento de Montecillos, en el documento analizado se indica una problemática relacionada con el posible importante espesor de sedimentos aluviales permeables del fondo del valle. En este sentido, debemos destacar que en nuestro reconocimiento de campo, aguas arriba del emplazamiento indicado en los estudios previos, existe un tramo de río encañonado, encajado en el substrato rocoso volcánico, donde no se tendría este tipo de condicionantes, no siendo por otro lado notablemente superior la anchura del valle. Es en esta zona donde se ha considerado la posible alternativa de presa en el presente estudio.

Otra discrepancia de nuestro reconocimiento de campo respecto a la interpretación geológica del documento analizado concierne al emplazamiento La Recova. De acuerdo a las observaciones realizadas, la presencia del substrato rocoso no se limita a las inmediaciones del cauce, sino que constituye todo el saliente morfológico que origina el estrechamiento del valle, de manera que las gravas del relleno cuaternario solo aparecen en la zona superior del relieve, donde la loma citada se une a la cuerda principal de la margen

izquierda del valle. En esta situación, prácticamente toda la presa, si no supera una altura del orden de los 100 m, tendría su apoyo izquierdo en substrato rocoso, si bien es cierto que bastante alterado en su zona superior.

#### 1.2.15. Estudio integral de riego de la Cuenca del río Maule. Prefactibilidad, Parte VII "Estudios de obras matrices". Comisión Nacional de Riego. CEDEC 1977

Se incluye la misma información geológica de La Recova contenida en el anterior documento, enfatizando la problemática de riesgo de filtraciones por el lado izquierdo, tanto hacia el estero las Minas, muy próximo por el oeste, como hacia aguas abajo a través de la puntilla que estrecha el valle en este lado.

Se indica que por esta razón se consideró prudente no exceder una altura de muro de 70 m, sobre todo si se considera que la relación agua/muro para esa altura es cercana al óptimo.

Además el espesor de aluvial muy permeable en fondo del valle puede ser considerable, lo que requeriría una importante impermeabilización (pared moldeada e inyecciones). La impermeabilización debería penetrar además al menos unos 100 m en el lado izquierdo, por los riesgos de filtraciones anteriormente comentados.

La geometría del lado izquierdo es favorable para la ubicación del vertedero con excavación bastante contenida. Las obras de desviación deberían también ubicarse en este lado por la menor longitud del túnel requerida.

#### 1.2.16. Estudio integral de riego de la Cuenca del río Maule. Prefactibilidad. Álbum nº 2. Comisión Nacional de Riego. CEDEC 1977

Se presenta un plano de "Disposición general y descriptivo del muro". Contrariamente a lo indicado en el texto del documento anterior, el túnel de desviación y de entrega para riego, para la Presa de La Recova, se ubica en la margen derecha del emplazamiento.

#### 1.2.17. Estudio de sistemas de obras matrices. Diseño preliminar de los embalses" Comisión Nacional de Riego. Unidad de Grandes Obras. CEDEC 1978

Documento manuscrito.

Su contenido es coincidente con las "Criterios hidráulicos y estructurales para el diseño de embalses" que se incluye en el documento "Estudios de obras matrices" anteriormente comentado. Incluye datos de la presa y curva de embalse de La Recova.

#### 1.2.18. Estudio integral de la Cuenca del Río Maule. Estudio del Esquema nº 3. Comisión Nacional de Riego. Unidad de Grandes Obras. CEDEC 1978

El "Esquema nº 3" es una alternativa de "Regadío Integral de la cuenca del río Maule" que contempla, en su Alternativa nº 1, un embalse de regulación en cabecera del río Achibueno, en el emplazamiento de La Recova, con capacidad de 167 millones de m<sup>3</sup>.

No contiene información geológico-geotécnica relativa al emplazamiento de la presa.

### 1.3. ENCUADRE GENERAL

El valle del río Achibueno se encuadra dentro de la VII Región de Maule. La población más importante en las inmediaciones del río Achibueno es la ciudad de Linares, que se encuentra a 300 km al sur de Santiago de Chile.

El curso del río se inicia en las estribaciones más occidentales de la cordillera de los Andes, en la laguna del mismo nombre situada al pie del nevado Longaví, al oriente del mismo. Desde la laguna, el río discurre rodeando por el norte el Nevado Longaví, disponiéndose a continuación hacia el suroeste para cambiar inmediatamente de rumbo hacia el norte, manteniéndose dentro de la precordillera andina, una vez alcanzado el valle central, el río se dispone hacia el noroeste hasta su desembocadura en el río Loncomilla.

Geológicamente, el valle del Achibueno se emplaza en rocas volcánicas y sedimentarias asignadas a la Formación Cura-Mallín, de edad Oligoceno-Mioceno y, según Gardeweg, 1980, en la Formación Río Blanco, de edad asignada Cretácico superior, aunque según otras interpretaciones, las rocas asignadas a la Fm Río Blanco corresponderían a materiales de la Fm Cura Mallín, y su edad sería más moderna (Oligoceno – Mioceno Inferior). También aparecen rocas intrusivas, predominantemente granodioríticas, pertenecientes al extremo sur del batolito el Melado, de edades Cretácico superior a Mioceno, que se emplazaron en algunas zonas del valle. Cubriendo parcialmente las diferentes unidades estratigráficas e intrusivas de la zona aparecen depósitos plio-cuaternarios poco consolidados (formación la Montaña) compuesta por conglomerados, areniscas, limolitas y depósitos piroclásticos. Se trata de materiales de edad pleistoceno, de origen complejo, en el que intervienen mecanismos fluviales (terrazas) glaciales (morrenas), volcánicos (piroclastos y cenizas) y coluviales (derrumbes gravitacionales y acumulaciones de pie de laderas).

### 1.4. FORMACIONES AFECTADAS

#### 1.4.1. Formación Cura-Mallín. Eoceno –Mioceno Inferior.

Es la formación predominante en todo el ámbito del valle. Está formado por volcanitas y porfiritas cuarcíferas con intercalaciones de areniscas y lutitas. En el sector del valle estudiado para emplazamiento de los embalses, aparecen materiales andesíticos y tobáceos, estando ausentes las intercalaciones sedimentarias, excepto en una zona situada aguas arriba del emplazamiento de Montecillo.

Los materiales andesíticos y tobáceos reconocidos aparentarían coincidir con los materiales definidos por Gardeweg (1980) como Fm Río Blanco, a la que atribuyó una edad Cretácico Superior. La presencia de esta unidad es discutida por otros autores, por ejemplo, Muñoz y Niemeyer (1984) consideran que los materiales aflorantes en todo el entorno del valle del Achibueno pertenecerían a la Fm Cura-Mallín.

Lo que sí parece claro, por las dataciones y estudios paleontológicos realizados, es que su edad es más moderna, concretamente entre el Eoceno Superior y el Mioceno Inferior

Valdés (1990) diferencia, en el substrato volcánico, (que correspondería a los materiales de la formación definida por Gardeweg), dos unidades:

- Unidad inferior andesítica, constituida por andesitas porfídicas, andesitas afaníticas y dacitas con intercalaciones menores de tobas. De aspecto masivo y mal estratificada.
- Unidad superior tobácea. Se suele localizar en las partes topográficamente más altas. Está compuesta por tobas de lapilli de tamaño medio a fino, con matriz de ceniza fina, de composición andesítica a dacítica

de color amarillo-verdoso generalmente, alternando con algunos niveles de tobas brechosas de composición similar y capas delgadas de areniscas finas.

Como el contexto de este trabajo dista mucho, tanto por alcances como por objetivos, de poder intervenir en la discusión geológica general sobre asignaciones de los materiales reconocidos a las unidades geológicas regionales establecidas por diferentes autores, hemos preferido mantener un criterio cartográfico de carácter litológico, asumiendo para el substrato, la diferenciación de Valdés, (1990) en una Unidad Andesítica inferior y una Unidad Tobácea superior, lo que parece ser más coherente con el conjunto de observaciones de campo realizadas en el estudio geológico, y con los resultados obtenidos en los reconocimientos geotécnicos realizados para el presente estudio. Podría también tratarse de los materiales que se definen como dominantes en el Miembro Inferior de la Fm Cura Mallín (Rio Queuco), o pertenecientes a la zona de transición con el Miembro Superior (Malla-Malla), caracterizado por el predominio de materiales sedimentarios. El emplazamiento de Montecillo podría corresponder a esta zona de transición, ya que se detectan cuerpos estratificados, finamente bandeados, que aparecen sobre potentes coladas andesíticas, que podrían corresponder a materiales sedimentarios como los que afloran claramente junto al cauce fluvial aguas arriba del emplazamiento.

Otra interpretación posible es la pertenencia, de los materiales andesíticos, a un extenso intrusivo hipoabisal, del tipo filones-manto, que afectaría a los materiales, predominantemente sedimentarios, de la Fm Cura-Mallín. En esta interpretación, probablemente los materiales tobáceos, cartografiados en la Recova, constituirían el tramo superficial, efusivo, de la intrusión, que lógicamente debió producirse a muy poca profundidad.

En función de lo anterior, y recogiendo la observación del supervisor, D. Estanislao Godoy, en el sentido de que *“Desde el punto de vista geotécnico puede ser que la génesis de estas rocas no sea un factor gravitante, pero imagino que siempre debe aspirarse a entender bien el sistema natural que se estudia”*, y dado el carácter de geología aplicada, con alcance de prefactibilidad, de nuestro estudio, no tenemos criterio para establecer con claridad la posible génesis de los materiales reconocidos, por lo que optamos por ceñirnos, en la definición del substrato litológico, a los datos recabados en el terreno, con presencia de andesitas basales y materiales tobáceos superiores, secuencia muy clara en La Recova y no tanto en Montecillo, donde se han observado materiales andesíticos muy próximos a septos sedimentarios de la Fm Cura Mallín, mientras que las tobas superiores, caso de existir, permanecerían en las partes altas de ambas márgenes, carentes de afloramientos, y en las que no ha sido posible realizar reconocimientos geotécnicos.

#### 1.4.2. Unidad de Rocas intrusivas. Cretácico superior a Mioceno

Las rocas intrusivas que aparecen en los sectores del cerro de Las Animas y del cerro de los Maquis, pertenecen al Batolito el Melado. Este complejo intrusivo es de composición básica a intermedia y está compuesto por rocas de composición predominantemente, granodiorítica y tonalítica, dioritas, dioritas cuarcíferas, tonalitas y monzodioritas cuarcíferas. También se incluye en esta unidad cuerpos intrusivos andesíticos de menor extensión que afloran en la confluencia del estero de los Guindos con el río Achibueno.

#### 1.4.3. Formación La Montaña. Pleistoceno

Definida por Gajardo en 1980, correspondiendo a lo que Muñoz-Cristi (1960) denominó Formación Morrena de La Montaña.

Se trata de un conjunto de conglomerados de muy baja cementación, gravas arenosas, areno-limosas o arcillo-limosas, arenas, limos y depósitos piroclásticos, semiconsolidados y alterados. El predominio de clastos y bolones bien rodados parece indicar un mecanismo originario dominante de tipo fluvio-torrencial. Presenta clastos redondeados a subredondeados de tamaño variable entre 5 y 20 cm y esporádicamente bolones o bloques tamaño métrico, englobados en matriz limo-arenosa o arcillo-limosa. Destaca el carácter bien rodado de la mayoría de los clastos, su composición predominantemente andesítica – basáltica, el importante grado de alteración de muchos de los clastos y la descomposición esferoidal, en capas, de los clastos rodados, como fenómenos característicos.

La estratificación está poco desarrollada, observándose ocasionalmente, capas lenticulares de arenas, limos y cenizas intercaladas entre conglomerados arenosos. La litología de los clastos corresponde en su mayor parte (80 %) a andesitas, andesitas basálticas y basaltos de características similares a las coladas de lava pertenecientes a la Formación Cola de Zorro. Los clastos de rocas intrusivas, sedimentarias y piroclásticas, no sobrepasan el 20 % de total.

Aunque estos materiales también se corresponden con la denominación “Rodados Multicolores”, definida por A. Hauser en 1986, hemos preferido, en el presente estudio, mantener la denominación de Gajardo por ser también la adoptada en el estudio de Muñoz y Niemeyer (1984) para la elaboración de la Hoja Laguna del Maule, de la Carta Geológica de Chile a escala 1:250.000.

En el reconocimiento realizado, se han reconocido en Lomas del Membrillo hasta la coronación del relieve, lo que puede condicionar la impermeabilidad de la margen izquierda para los embalses de presas situadas aguas abajo de este sector, como el Peñasco, Polcura o la Recova, por su posible conexión con el estero las Minas, muy próximo a la margen izquierda del valle en las cercanías de La Recova. Asimismo también se han localizado en el sector del Alto del Latiguillo, por lo que podría condicionar la impermeabilidad de la margen izquierda del valle en áreas del vaso de Montecillo

#### 1.4.4. Depósitos Aluviales. Cuaternario

Se localizan en el actual cauce del río, estando originados por la acción fluvial. Se componen de fragmentos subredondeados a redondeados, de mediana y buena selección y de tamaño desde milimétricos, tamaño arena, hasta tamaños métricos, gravas, bolones y bloques, siempre en matriz arenosa. También existen depósitos aluviales antiguos, constituidos por importantes terrazas fluviales, con espesores variables de gravas rodadas en matriz arenosa o areno-limosa, emplazados en diferentes cotas del valle, relacionadas con la dinámica fluvial en el proceso histórico de encajamiento del río. En ocasiones, estas terrazas presentan tramos limosos relacionados con depósitos de baja energía en antiguas llanuras de inundación de la historia del valle.

#### 1.4.5. Depósitos coluviales (coluviones). Cuaternario

Corresponden a depósitos clásticos brechosos, con fragmentos subangulosos de tamaño heterogéneo, centimétricos a métricos con escasa matriz areno-limosa. Su génesis es de transporte por mecanismo gravitacional, procedentes de las litologías aflorantes en las zonas altas de los relieves.

Se localizan mayoritariamente en la base de los cerros, cubriendo la zona de transición entre las laderas rocosas del relieve, de fuerte pendiente, y las planas morfológicas constituidas por sedimentos fluviales. Se desarrollan de forma importante en la margen izquierda entre las quebradas de los Guindos y Guanuyanca.

En algunos casos, donde presentan gran extensión podrían corresponder a depósitos de remociones en masa.

Se incluyen en esta unidad, las acumulaciones correspondientes a conos de deyección en la salida de los cauces de barrancos a las zonas de pendiente suave situadas en la base de los relieves, aunque su mecanismo de génesis no sea puramente gravitacional, ya que también combinan mecanismos de transporte hídrico, aunque siempre de corta distancia, y con escasa afección a la geometría, principalmente angulosa, de los clastos.

## 1.5. TRABAJOS DE TERRENO

### 1.5.1. Reconocimientos geológicos

En la primera etapa del Estudio se realizó un reconocimiento geológico de superficie preliminar, apoyado sobre información cartográfica a escala 1:50.000 y 1:25.000 en el valle del río Achibueno y esteros adyacentes, con el estudio de 11 posibles alternativas de emplazamiento.

De ellas, al final de la segunda etapa del estudio, se seleccionaron dos: La Recova y El Montecillo -1. En los trabajos de terreno correspondientes a la cuarta etapa del Estudio, se realizaron nuevos reconocimientos geológicos de terreno, más detallados, en estas dos soluciones, tratando de obtener información sobre las condiciones geológicas generales, tanto de litología y estructura del substrato rocoso, como de la naturaleza y espesor de recubrimientos cuaternarios en fondo de valle y laderas.

En estos reconocimientos geológicos de superficie se han cartografiado los afloramientos rocosos existentes en ambos márgenes del valle, y en ellos se han tomado datos litológicos y de estructura del macizo rocoso en numerosas estaciones geomecánicas o puntos de lectura (ver Anexo nº1.- Notas de campo del reconocimiento geológico) identificando las eventuales fallas locales y la disposición de los sistemas de diaclasas dominantes en el entorno de los emplazamientos. También se ha realizado la cartografía geológica de los recubrimientos cuaternarios en zonas de vaguada, los niveles de terrazas fluviales, y la delimitación de los rellenos aluviales del fondo del valle.

Los trabajos han sido realizados por parte de un equipo de geólogos especialistas de TYP SA, con el objetivo de ubicar y evaluar los emplazamientos de presa seleccionados, además de asentar los criterios para ubicar la campaña de investigación en terreno (sondajes, calicatas, perfiles geofísicos y ensayos).

### 1.5.2. Campaña geotécnica

Paralelamente a los reconocimientos geológicos de superficie, se realizó una campaña de reconocimientos geotécnicos con un total de 7 sondajes, 35 calicatas y 15 extendimientos de investigación geofísica.

En las zonas de emplazamiento de las presas, se ha buscado obtener la información necesaria para la estimación de las condiciones generales de fundación (profundidad del substrato rocoso, resistencia del terreno de apoyo, y profundidad de excavación requerida), así como de las condiciones generales de impermeabilidad de fondo del valle y estribos.

En las áreas de vaso de los posibles embalses se ha buscado obtener información de la naturaleza de los márgenes del valle, especialmente en lo que respecta a la impermeabilidad y estabilidad de laderas.

También, con preferencia dentro de la zona prevista de inundación de los posibles embalses, se han realizado reconocimientos y muestreos para la posible obtención de materiales para las posibles tipologías de presa.

Gráfico 1-1 –Situación de la Investigación geotécnica en la Recova. Fuente: TYP SA

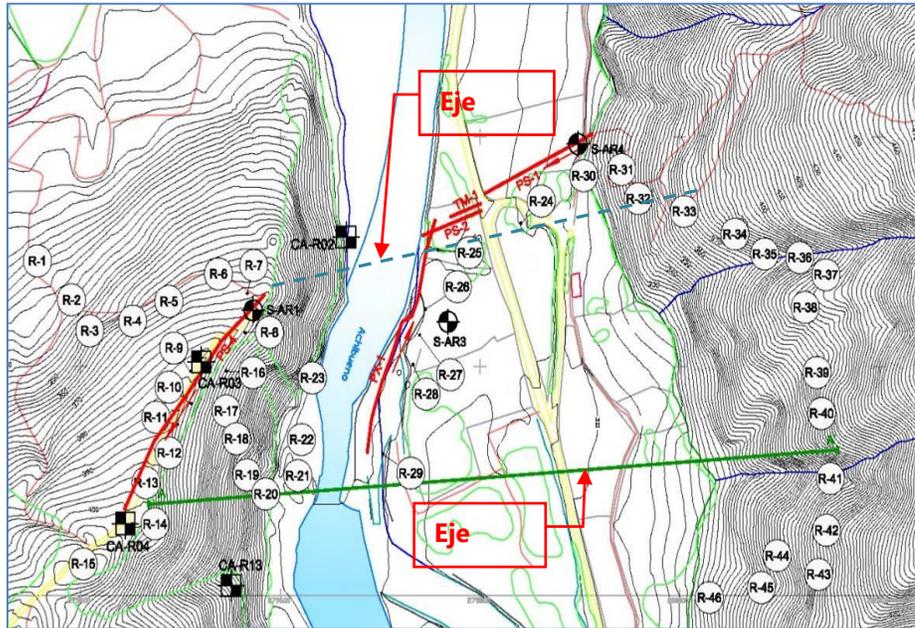
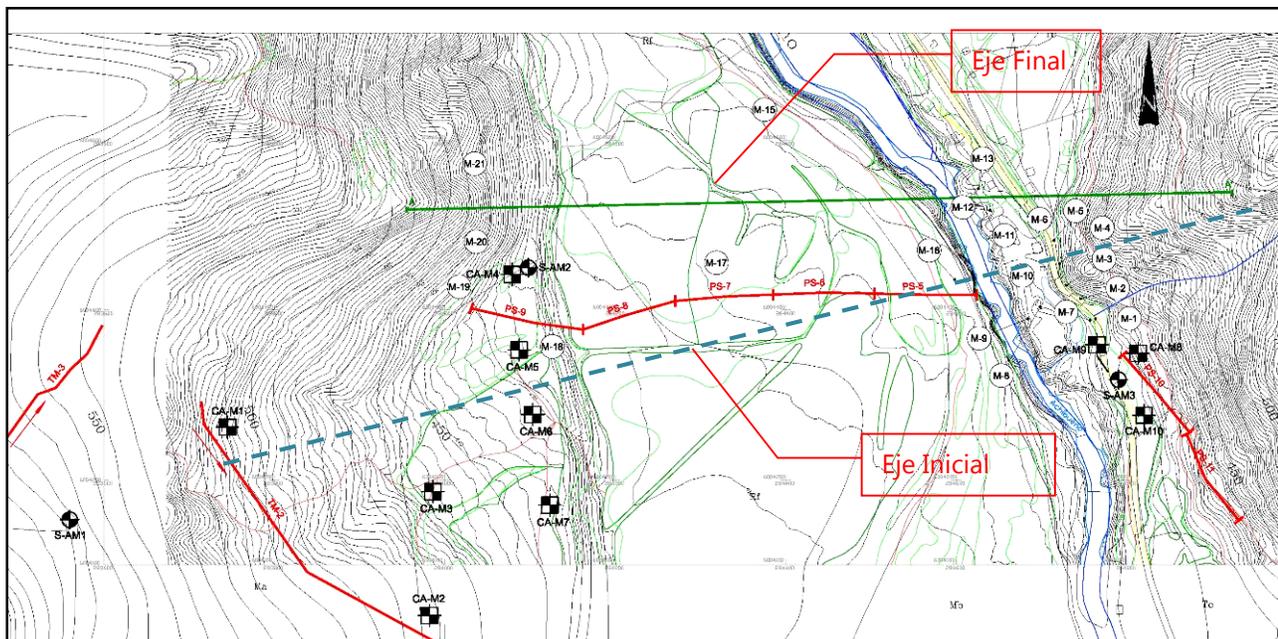


Gráfico 1-2–Situación la Investigación geotécnica en Montecillo. Fuente: TYP SA



### 1.5.2.1. Sondajes

Se ha realizado una campaña de sondajes dirigida a reconocer las condiciones del terreno en zona de fundación de las presas, de manera que sea posible detectar la cota del substrato rocoso en ambos estribos y en el fondo de valle. En todos los sondajes se han realizado ensayos de permeabilidad.

La situación, en planta, de los sondajes, se presenta en las Plantas Geológicas adjuntas, correspondientes a los emplazamientos de La Recova (Lámina 1) y Montecillo (Lámina 3).

Además de los sondajes realizados para caracterizar los emplazamientos de presa, en el caso particular de La Recova, dado el posible riesgo de permeabilidad del vaso, en la zona más próxima al Estero Las Minas, se ha un sondaje adicional en la margen izquierda del vaso, con el objetivo principal de obtener información sobre la composición y permeabilidad de los materiales de la Fm La Montaña.

Todos los sondajes se perforaron a rotación, con recuperación continua de testigo, con sistema de perforación wire-line.

La necesaria gestión de permisos de particulares y de vialidad, las dificultades de accesos, la abundancia de gravas, bolones y bloques presentes en los materiales de origen fluvial-aluvial, y los suministros de agua para sondajes alejados del río, han retrasado el inicio y dificultado en gran medida la perforación, ralentizando los rendimientos, ocasionando cierto retraso en los trabajos de terreno.

En la tabla adjunta, se indican las coordenadas, la profundidad y el n° de muestras y ensayos de permeabilidad Lugeon realizados en cada uno de los sondajes realizados.

**Tabla 1-1. Sondajes realizados en la Recova. Fuente TYPASA.**

Localización	Sondaje	Coordenadas			Datum	Huso	Prof. (m)	Muestras (n°)	Ensayos Perm. (n°)
		Latitud	Longitud	Cota. msnm					
Margen izquierda	S-AR1	36°0'14.16" S	71°26'44.20"O	376	WGS84	19H	30,00	6	4
Loma del Membrillo (relieve margen izquierda del vaso)	S-AR2	36°0'49.97"S	71°26'39.87"O	484	WGS84	19H	44,00	3	6
Fondo de valle	S-AR3	36°0'14.64"S	71°26'36.43"O	300	WGS84	19H	32,00	7	3
Margen derecha	S-AR4	36°0'9.72"S	71°26'31.08"O	310	WGS84	19H	30,40	6	3

**Tabla 1-2. Sondajes realizados en Montecillo. Fuente TYP SA.**

Localización	Sondaje	Coordenadas			Datum	Huso	Prof. (m)	Muestras (n°)	Ensayos Perm. (n°)
		Latitud	Longitud	Cota msnm					
Margen izquierda. Zona alta	S-AM1	36°4'59.37"S	71°24'13.65"O	588	WGS84	19H	67,50	6	12
Margen izquierda. Zona baja	S-AM2	36°4'50.17"S	71°23'51.87"O	434	WGS84	19H	31,50	8	5
Margen derecha	S-AM3	36°4'55.00"S	71°23'24.35"O	408	WGS84	19H	30,0	7	3

La información obtenida en los sondajes realizados, se presenta en el Anexo n° 2 - Registros de sondajes y en el Anexo n° 3 - Fotografías de sondajes. En el Anexo n° 5.- Ensayos de permeabilidad, se presentan los resultados de los ensayos Lefranc y Lugeon realizados, su representación gráfica, y su interpretación, basada en un análisis comparativo de la gráfica resultante con los tipos de modelos básicos (Flujo laminar, Flujo turbulento, Dilatación, Lavado y Relleno de huecos), establecidos por A.C. HOULSBY (*Routine Interpretation of the Lugeon Water-test. Q. Jl Engr Geol. Vol 9 1976 pp 303 – 313*)

En el cuadro adjunto, se resumen muy brevemente, los aspectos esenciales (litología, meteorización y zonas de falla), del registro de cada uno de los sondajes realizados, y los resultados finales de los ensayos Lefranc y Lugeon, el RQD se analiza en los apartados correspondientes en cada sitio de presa de forma pormenorizada:

**Tabla 1-3. Resumen de los resultados obtenidos en los sondajes en la Recova. Fuente TYP SA.**

Sondaje	Profundidad (m)	Litología	Permeabilidad		
			Tramo (m)	Tipo Ensayo	k (m/s)
S-AR1	0,00 – 10,50	Tobas andesíticas GM IV-V	4,50 - 5,50	Lefranc	5,2E-06
			9,50 - 10,50	Lefranc	9,3E-08
S-AR1	10,50-14,00	Tobas andesíticas GM- III-IV	11 - 16	Lugeon	Ensayo fallido
S-AR1	14,00-18,00	Toba andesítica GM II-III			

**Tabla 1-3. Resumen de los resultados obtenidos en los sondajes en la Recova. Fuente TYP SA.**

Sondaje	Profundidad (m)	Litología	Permeabilidad		
			Tramo (m)	Tipo Ensayo	k (m/s)
S-AR1	18,00–24,40	Toba andesítica GM III	20 - 25	Lugeon	Ensayo fallido
S-AR1	24,40- 30,00	Andesita afanítica GM II-III	27 - 30	Lugeon	0,3E-07
S-AR2	0,00-16,40	Limos y Arcillas (Fm la Montaña)	13 - 14	Lefranc	1,3E-06
S-AR2	16,40-44,00	Gravas y bolones en matriz limo-arcillosa (FM la Montaña)	18 - 19	Lefranc	6,0E-06
			24 - 25	Lefranc	1,2E-06
			29 - 30	Lefranc	9,0E-07
			34 - 35	Lefranc	2,7E-06
			39 - 40	Lefranc	2,8E-06
S-AR3	0,00 - 12,80	Depósito fluvial de fondo de valle. Gravass rodadas y bolones			
S-AR3	12,80–20,50	Rocas andesíticas GM-III-IV	15 - 16	Lefranc	8,7E-06
S-AR3	20,50–32,00	Rocas andesíticas GM II	20 - 25	Lugeon	Ensayos fallidos
			27 - 32	Lugeon	
S-AR4	0,00 – 4,00	Depósito fluvial limo-arenoso			
S-AR4	4,00 – 7,60	Depósito fluvial de gravas rodadas y bolones			
S-AR4	7,60 – 21,50	Rocas andesíticas GM-III	10 – 11	Lefranc	8,6E-06
			10 - 15	Lugeon	0,9E-07
S-AR4	21,50–25,60	Roca andesítica tectonizada y fracturada GM-IV			
S-AR4	25,60–30,40	Andesita porfídica GM - II	25 – 30	Lugeon	Ensayo fallido

**Tabla 1-4. Resumen de los resultados obtenidos en los sondajes en Montecillo. Fuente TYP SA.**

Sondaje	Profundidad (m)	Litología	Permeabilidad		
			Tramo (m)	Tipo Ensayo	k (m/s)
S-AM1	0,00- 57,50	Gravas y bolos en matriz limo-arcillosa (Fm La Montaña)	9 – 10	Lefranc	5,27E-07
			15 – 15	Lefranc	4,14E-07
			19 – 20	Lefranc	1,01E-06
			24 – 25	Lefranc	2,73E-07
			29 – 30	Lefranc	3,26E-07
			34 – 35	Lefranc	3,16E-07
			39 – 40	Lefranc	5,39E-07
			44 – 45	Lefranc	1,31E-06
			48,50-49,50	Lefranc	1,38E-07
		54 - 55	Lefranc	7,72E-08	
S-AM1	57,50- 62,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM III-II	60 - 63	Lugeon	1,0E-08
S-AM1	62,00-67,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II	64-67,50	Lugeon	1,0E-08
S-AM2	0,00 – 21,00	Gravas y bolos en matriz limo-arcillosa (Fm La Montaña)	4 – 5	Lefranc	3,46E-06
			9 – 10	Lefranc	4,14E-06
			14 – 15	Lefranc	7,49E-07
			19 – 20	Lefranc	3,27E-07
S-AM2	21,00-31,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II-III	21,00- 22,50	Lugeon	1,0E-08
			30,5-31,5	Lugeon	1,0E-07
S-AM3	0,00 - 4,00	Gravas y bolos con algo de arena (Depósito fluvial)			
S-AM3	4,00-6,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM III			
S-AM3	6,50- 13,70	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II-III	7,5-12,5	Lugeon	Ensayo fallido
S-AM3	13,70-20,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II	13,5-18,6	Lugeon	3,0E-08

**Tabla 1-4. Resumen de los resultados obtenidos en los sondajes en Montecillo. Fuente TYP SA.**

Sondaje	Profundidad (m)	Litología	Permeabilidad		
			Tramo (m)	Tipo Ensayo	k (m/s)
S-AM3	20,00-27,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II-III	18,5-23,0	Lugeon	Ensayo fallido
			23,0-28,0	Lugeon	Ensayo fallido
S-AM3	27,00-30,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II			

**Tabla 1-5. Criterios de finalización de faenas de perforación. (Fuente TYP SA)**

Sondaje	Inicio de roca (m)	Fin sondaje Prof. (m)	Observaciones
SA-R1	0	30,00	Todo el sondaje se realiza en roca
SA-R2		44,00	Se trata de un sondeo adicional de reconocimiento de la formación Montaña en la zona inundable. La cartografía geológica mostró que la FM Montaña se mantiene por encima de la cota de inundación
SA-R3	13,00	32,00	19,00 m perforados en roca
SA-R4	7,50	30,40	22,90 m perforados en roca
SA-M1	57,50	67,50	10,00 m perforados en roca
SA-M2	21,00	31,50	10,50 m perforados en roca
SA-M3	4,00	30,00	26,00 m perforados en roca

#### 1.5.2.2. Calicatas

Para completar la información obtenida en los reconocimientos geofísicos y sondajes, se han realizado la excavación de calicatas en diferentes zonas.

- En el emplazamiento de la presa, con el fin de determinar el espesor y características del recubrimiento de suelos y manto de alteración del substrato rocoso.

- En los vasos de los posibles embalses, para definir condiciones de impermeabilidad de los suelos superficiales, y con el fin de identificar y caracterizar los materiales para su posible aprovechamiento, principalmente los depósitos aluviales para la obtención de agregados para la fabricación de hormigones, aunque también se han investigado las características de las arcillas y limos de la formación La Montaña, para su posible empleo como núcleo impermeable de presa.

Se han realizado un total de 30 calicatas (pozos de reconocimiento) en las zonas de emplazamiento y vasos de las alternativas. La ejecución de las mismas se ha realizado durante los meses de marzo y abril de 2013. En la tabla adjunta, se indican las coordenadas, profundidad alcanzada y materiales encontrados de cada una de ellas.

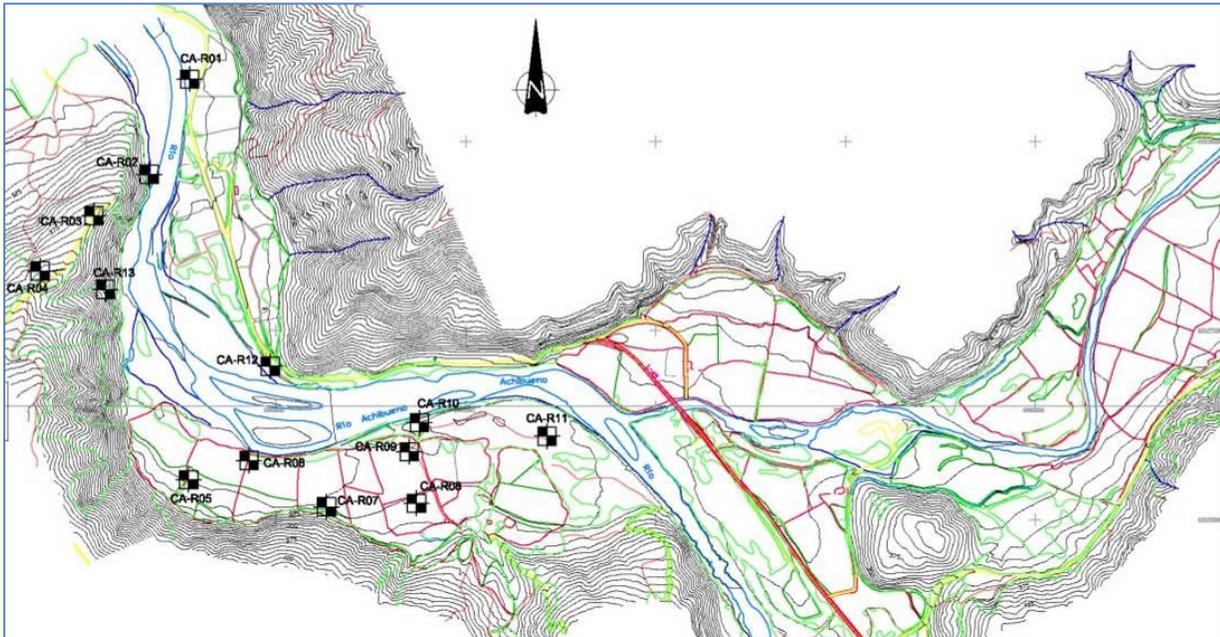
**Tabla 1-6. Resumen de las calicatas realizadas en la Recova. Fuente TYP SA.**

Calicata	X	Y	Z	Datum	Huso	Profundidad alcanzada(m)	Litología	Finalidad
CA-R1	279773	6013165	324	WGS84	19H	3,60	Gravas y arenas. Depósito fluvial	Calicata
CA-R2	279666	6012913	304	WGS84	19H	1,50	Gravas y bolones. Depósito de Terraza	Calicata
CA-R3	279521	6012804	388	WGS84	19H	4,00	Toba andesítica GM V	Calicata
CA-R4	279445	6012663	407	WGS84	19H	4,00	Toba andesítica GM V	Calicata
CA-R5	279770	6012106	317	WGS84	19H	3,10	Gravas y arenas. Depósito fluvial	Calicata
CA-R6	279929	6012157	312	WGS84	19H	3,40	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-R7	280133	6012034	308	WGS84	19H	3,60	Limo arcilloso. Depósito de Terraza	Pozo
CA-R8	280370	6012044	311	WGS84	19H	4,00	Limos y arenas. Depósito de Terraza	Pozo

**Tabla 1-6. Resumen de las calicatas realizadas en la Recova. Fuente TYPASA.**

Calicata	X	Y	Z	Datum	Huso	Profundidad alcanzada(m)	Litología	Finalidad
CA-R9	280351	6012180	310	WGS84	19H	3,60	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-R10	280378	6012257	315	WGS84	19H	2,80	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-R11	280714	6012221	324	WGS84	19H	3,30	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-R12	279985	6012406	352	WGS84	19H	2,30	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-R13	279751	6012609	310	WGS84	19H	1,70	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
<b>Total calicatas/pozos realizados en la Recova</b>						<b>13</b>		

**Gráfico 1-3 –Calicatas. La Recova. Fuente TYPASA.**



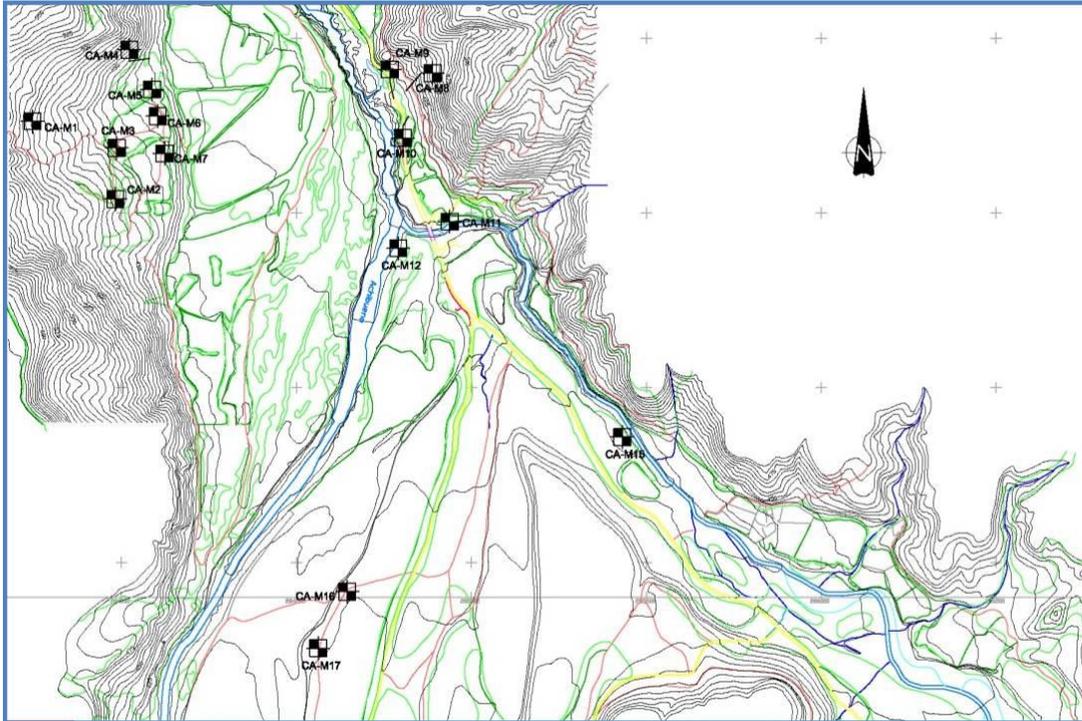
**Tabla 1-7. Resumen de las calicatas realizadas en Montecillo. Fuente TYP SA.**

Calicata	X	Y	Z	Datum	Huso	Prof. (m)	Litología	Finalidad
CA-M1	283.744	6.004.261	505	WGS84	19H	4,2	Gravas y arcillas. Fm La Montaña	Calicata
CA-M2	283.982	6.004.050	464	WGS84	19H	4,2	Gravas y arcillas. Fm La Montaña	Calicata
CA-M3	283.986	6.004.187	473	WGS84	19H	4,2	Gravas y arcillas. Fm La Montaña	Calicata
CA-M4	284.080	6.004.442	418	WGS84	19H	4,0	Gravas y arcillas. Fm La Montaña	Calicata
CA-M5	284.087	6.004.353	439	WGS84	19H	4,4	Gravas y arcillas. Fm La Montaña	Calicata
CA-M6	284.104	6.004.277	428	WGS84	19H	4,15	Gravas y arcillas. Fm La Montaña	Calicata
CA-M7	284.122	6.004.169	429	WGS84	19H	4,3	Gravas y arcillas. Fm La Montaña	Calicata

**Tabla 1-7. Resumen de las calicatas realizadas en Montecillo. Fuente TYP SA.**

Calicata	X	Y	Z	Datum	Huso	Prof. (m)	Litología	Finalidad
CA-M8	284813	6004349	396	WGS84	19H	3,30	Arcillas y arenas. Depósito Coluvial	Calicata
CA-M9	284778	6004327	398	WGS84	19H	2,0	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Calicata
CA-M10	284820	6004276	405	WGS84	19H	3,0	Limos y arenas. Depósito aluvial	Pozo
CA-M11	284938	6003975	397	WGS84	19H	2,20	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-M12	284791	6003899	404	WGS84	19H	1,70	Arenas, gravas y bolos. Depósito de terraza	Pozo
CA-M15	285431	6003359	429	WGS84	19H	2,40	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-M16	284645	6002917	424	WGS84	19H	2,10	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-M17	284562	6002755	425	WGS84	19H	2,20	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
CA-M18	284462	6001951	439	WGS84	19H	3,00	Gravas y bolos. Depósito de Terraza	Pozo
<b>Total calicatas/pozos realizados en Montecillo</b>					<b>16</b>			

**Gráfico 1-4 –Calicatas. El Montecillo. Fuente TYP SA.**



### 1.5.2.3. Perfiles geofísicos

Se ha realizado una campaña geofísica, utilizando distintos métodos (sísmica de refracción, tomografía eléctrica y sísmica de reflexión), para poder interrelacionar la información proporcionada por cada uno de ellos y en función de las características que mejor se adecuasen a cada litología presente en el terreno. Concretamente se ha realizado sísmica de refracción para determinar el espesor de suelos, de roca alterada, y la calidad del substrato rocoso sano, en las zonas de los estribos (con la roca a menor profundidad); sísmica de reflexión y tomografía eléctrica para conocer el espesor de depósitos fluviales existente en el fondo de los valles.

En los cuadros siguientes se presenta un resumen de los métodos empleados y las longitudes de cada perfil realizados, en las distintas alternativas:

**Tabla 1-8. Sísmica de Reflexión. Fuente TYPSA.**

Emplazamiento	Zona	Perfil	Longitud (m)
La Recova	Fondo del Valle	PX-1	220
<b>Total ejecutado</b>			<b>220</b>

**Tabla 1-9. Tomografía eléctrica. Fuente TYPSA.**

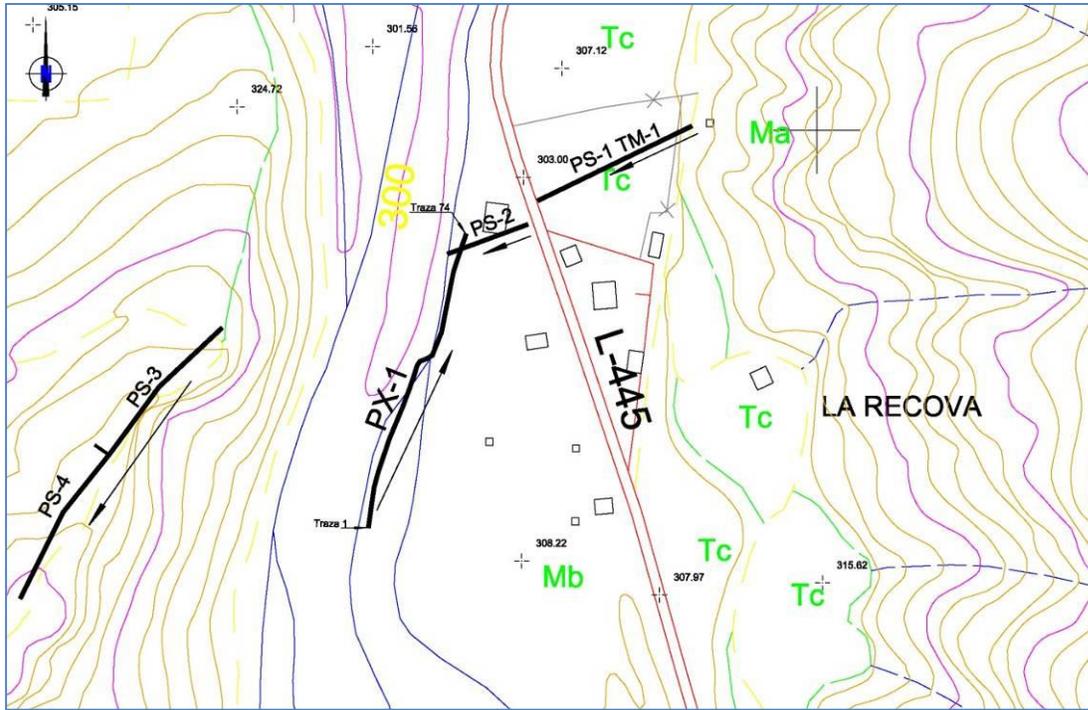
Emplazamiento	Zona	Perfil	Longitud (m)
La Recova	Margen derecha	TM-1	120
Montecillo	Margen Izquierda	TM-2	400
Montecillo	Margen Izquierda	TM-3	175
<b>Total ejecutado</b>			<b>695</b>

**Tabla 1-10. Sísmica de refracción. Fuente TYPASA.**

Emplazamiento	Zona	Perfil	Longitud (m)
La Recova	Margen derecha	PS-1	120
La Recova	Margen derecha-centro valle	PS-2	60
La Recova	Margen izquierda	PS-3	120
La Recova	Margen Izquierda	PS-4	120
Montecillo	Margen izquierda-centro valle	PS-5	120
Montecillo	Margen izquierda-centro valle	PS-6	120
Montecillo	Margen izquierda-centro valle	PS-7	120
Montecillo	Margen izquierda-centro valle	PS-8	120
Montecillo	Margen izquierda-centro valle	PS-9	120
Montecillo	Margen derecha	PS-10	120
Montecillo	Margen derecha	PS-11	120
<b>Total ejecutado</b>			<b>1260</b>

Total geofísica: 2.175 m de perfiles sísmicos y eléctricos

**Gráfico 1-5 – Geofísica. La Recova. Fuente: OCSA.**



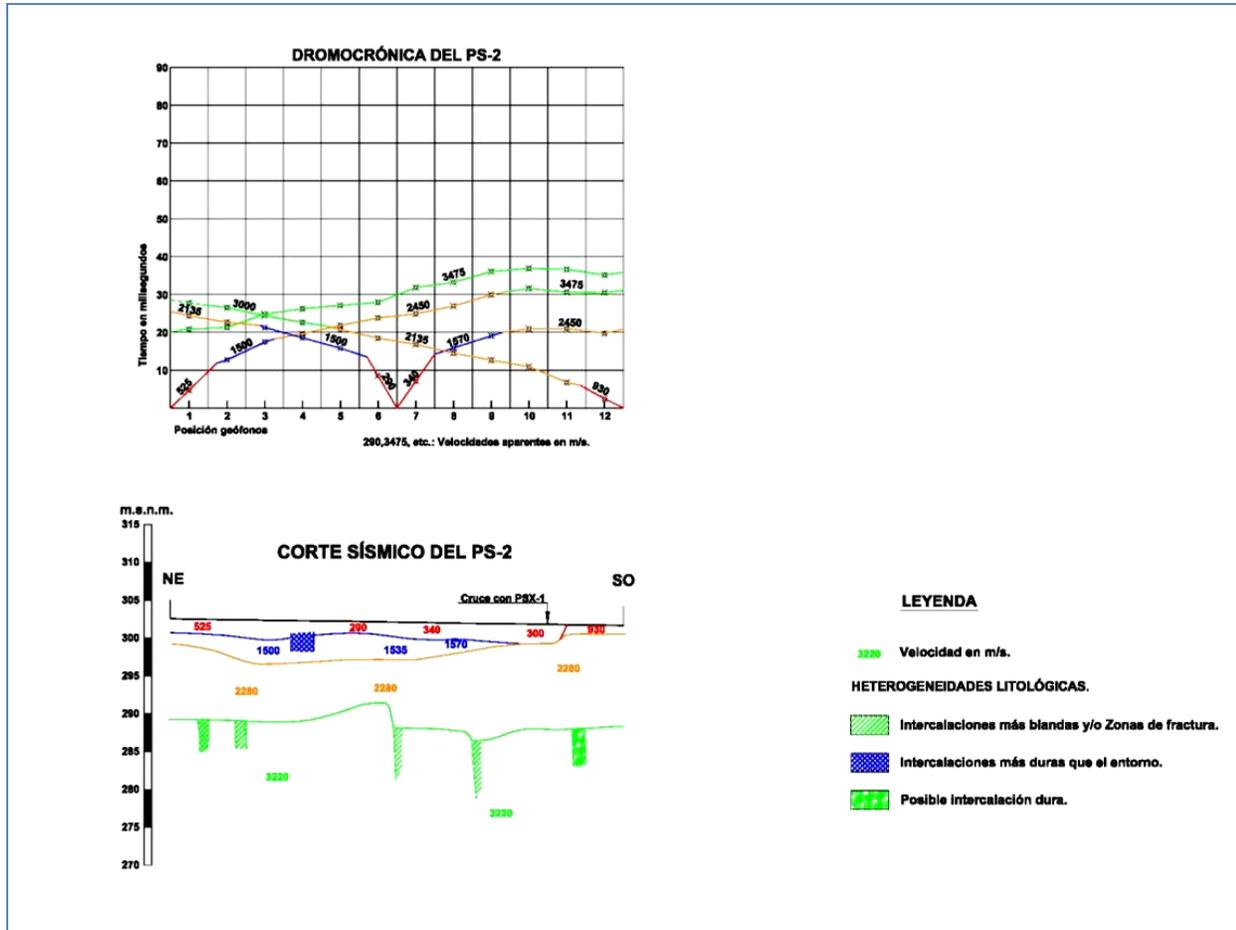
En La Recova se han realizado 6 perfiles geofísicos, utilizando tres métodos diferentes. El método de sísmica de reflexión, se ha utilizado en el centro del valle para conocer el espesor del material fluvial existente y la profundidad del substrato. La tomografía eléctrica se ha utilizado en la margen derecha del valle. Finalmente, la sísmica de refracción se ha empleado en ambas márgenes con la realización de cuatro perfiles. A continuación se describen los resultados obtenidos:

El perfil de sísmica de refracción PS-1 de 120 m de longitud, se ubicó en la margen derecha, transversalmente al valle, desplazado aguas abajo del teórico eje de presa y en la zona más próxima a la ladera donde se produce el cambio de pendiente y la vegetación se hace muy densa. Este perfil presenta un espesor de suelos aluviales de baja energía (limos arenosos), máximo de 6 m, con velocidades de 335 a 375 m/s, ubicado en la zona más nororiental del perfil, adyacente a la ladera. Presenta zonas donde se reduce su espesor hasta 1,50 a 2 m, lo que concuerda con los datos obtenidos por el sondaje S-RA4 realizado en ese punto y los afloramientos existentes en los alrededores. Por debajo aparece otro tramo hasta 10-15 m de profundidad, de velocidad 2155 m/s que debe corresponder a roca fracturada o algo alterada. Por debajo se encuentra la roca sana con velocidades superiores a los 3000 m/s. Desde la parte media del perfil hasta su extremo suroeste, se aprecia un incremento del espesor hasta los 5-8 m, de suelos fluviales de alta energía con velocidades de 1200-1300 m/s que debe corresponderse a gravas y bolones. Por debajo de este nivel se detecta el substrato sano rocoso con velocidades superiores a los 3000 m/s.

El perfil de tomografía eléctrica TM-1 de 120 m de longitud, se ha realizado de forma paralela al perfil de sísmica de refracción PS-1, con objeto de cruzar la información de ambos perfiles. Se ubicó en la margen derecha, transversalmente al valle, desplazado aguas abajo del teórico eje de presa. Comienza en la zona más próxima a la ladera donde se produce la ruptura de pendiente y la vegetación se hace muy densa y se dirige hasta la carretera L-445. En este perfil el substrato rocoso se detecta con la línea isorresistiva de 1000



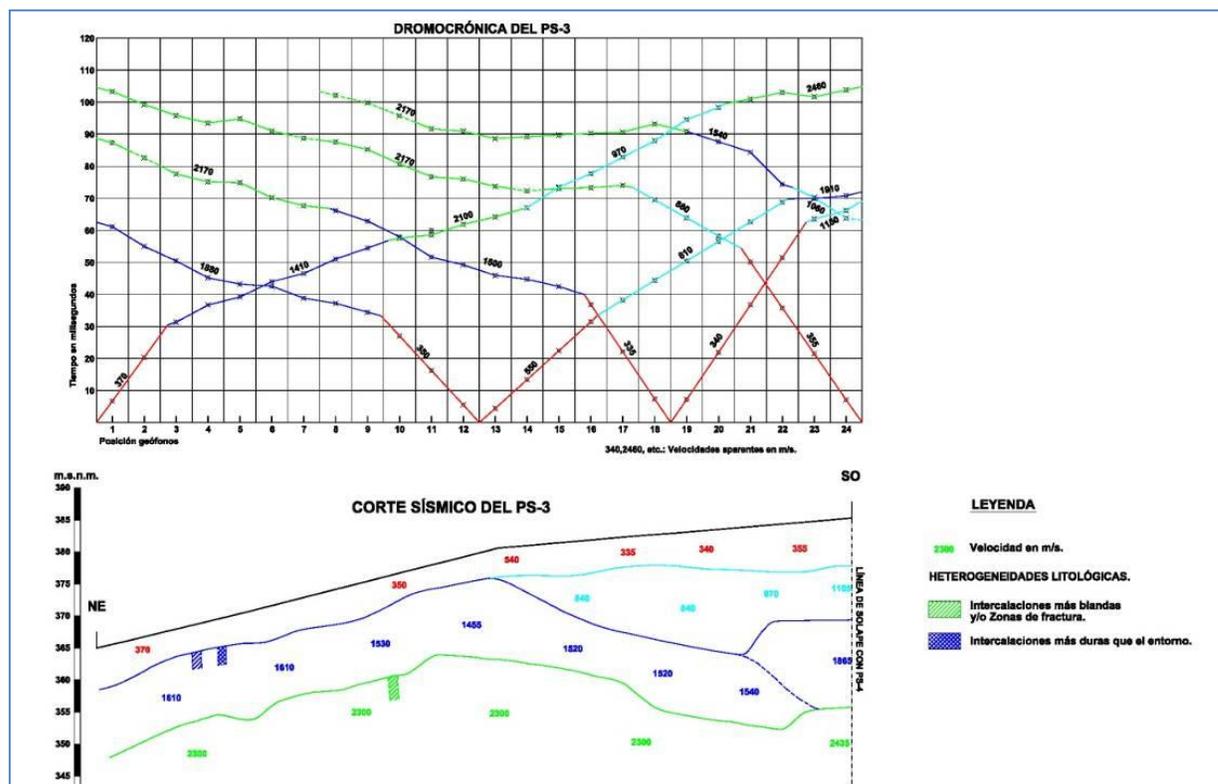
Figura 1-2. Perfil PS-2. Fuente OCSA



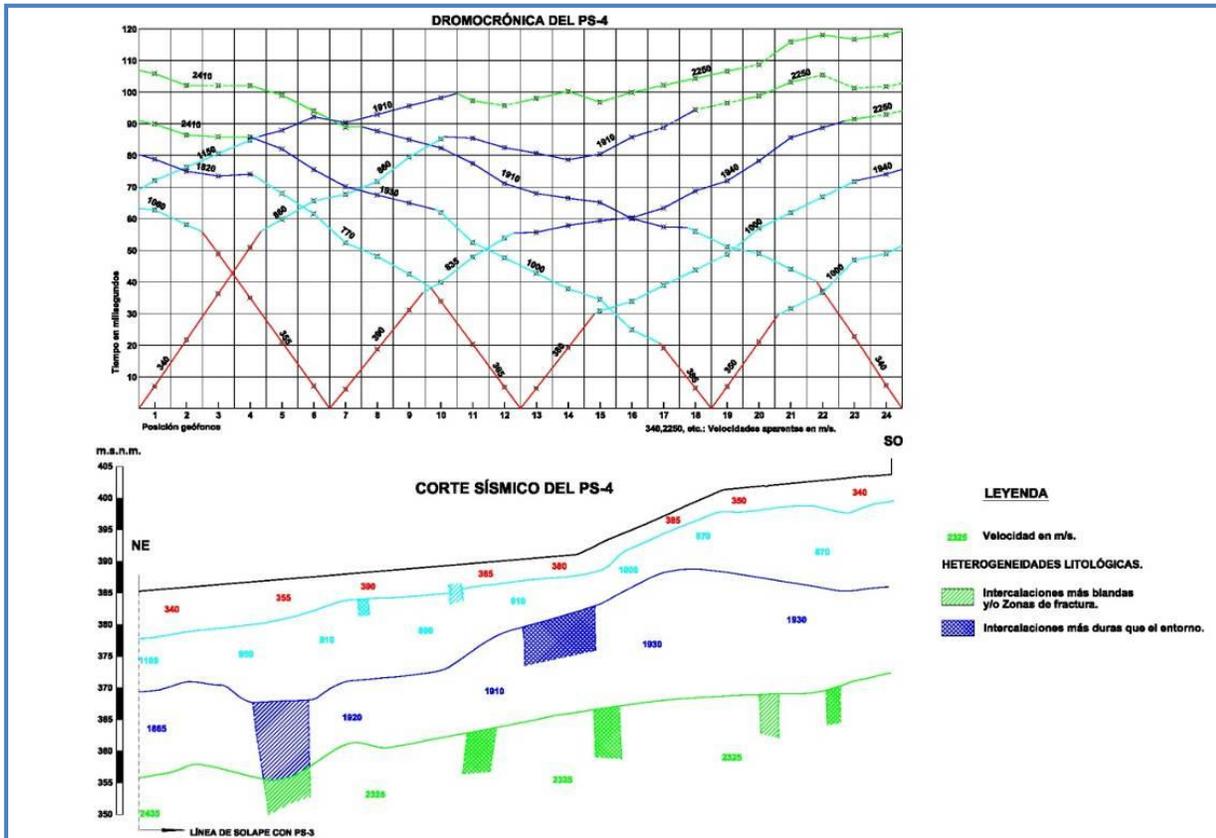
El perfil de sismica de refracción **PS-3 y PS-4** se encuentra uno a continuación del otro, en la margen izquierda, siguiendo la loma existente de manera ascendente hacia el SO y de forma subparalela al cauce. Estos perfiles presentan un espesor variable de roca alterada y descomprimida desde superficie hasta unos 8 m de profundidad máxima, extendiéndose a lo largo de 170 m de longitud, desde la parte más nororiental del perfil y situada más deprimida topográficamente, hasta la zona de ruptura y aumento de la pendiente, situada los 50 m finales del perfil PS-4, donde, este nivel de roca alterada presenta por encima dos niveles de velocidades entre 350 m/s y 870 m/s, que se deben corresponder con los suelos residuales (roca tobácea alterada en grado V) que se observa en superficie. Tanto en el perfil PS-3 como en el PS-4, aparece una segunda capa de roca alterada por debajo de la primera superficial, con velocidad de 800 a 1000 m/s. Si bien este contacto es variable, y presenta un espesor máximo en la parte central de ambos perfiles que se extiende hasta una profundidad máxima de 20 m y desaparece en ambos extremos del perfil (PS-3, PS-4), donde aparece otra capa de velocidades de 1500 a 1950 m/s y que se extiende a lo largo de ambos perfiles (PS-3 y PS-4), por debajo de la capa anterior, hasta una profundidad de 28-30 m. Estas velocidades deben corresponder a roca poco alterada y algo descomprimida. Finalmente, se detecta una última capa por debajo de la anterior, con velocidades superiores a los 2300 m/s, que debe corresponderse con roca tobácea sana o poco alterada.

Los datos obtenidos por la geofísica son comparables con el sondeo SA-R1, en el que se ha detectado un primer tramo de roca tobácea meteorizada fracturada y/o descomprimida hasta los 10,50 m, que correspondería con el primer nivel detectado por los perfiles de geofísica de velocidades anormalmente bajas de 350 a 870 m/s. En el sondeo SA-R1 el segundo tramo detectado se encuentra entre 10 y 20,50 m de profundidad y se caracteriza por la aparición de la unidad andesítica, con una disminución de la meteorización y fracturación, lo que implica un aumento del % RQD y se asimila a las velocidades obtenidas por la segunda capa de los perfiles, correspondiente a velocidades de 800 a 1000 m/s. Estas velocidades se deben a cierta descompresión del macizo y también a la cercanía de la ladera lo que implica el efecto de borde que se produce en el método geofísico y que produce una disminución de la velocidad detectada. Finalmente en el sondeo SA-R1 se detecta un tercer tramo desde 20,50 m hasta los 30 m caracterizado por la presencia de la unidad andesítica poco meteorizada aunque con una fracturación media, lo que coincide con las velocidades de la tercera capa detectada por los perfiles geofísicos que dan unas velocidades de 1500 a 1950 m/s concordante con la roca andesítica detectada en el sondeo a partir de 20 m menos fracturada que en el tramo anterior. La última capa detectada de velocidades superiores a 2300 m/s a partir de 30 m de profundidad debe implicar claramente una disminución de la fracturación de la unidad andesítica observada en el sondeo desde los 20 m.

**Figura 1-3. Perfil PS-3. Fuente OCSA.**



**Figura 1-4. Perfil PS-4. Fuente OCSA.**

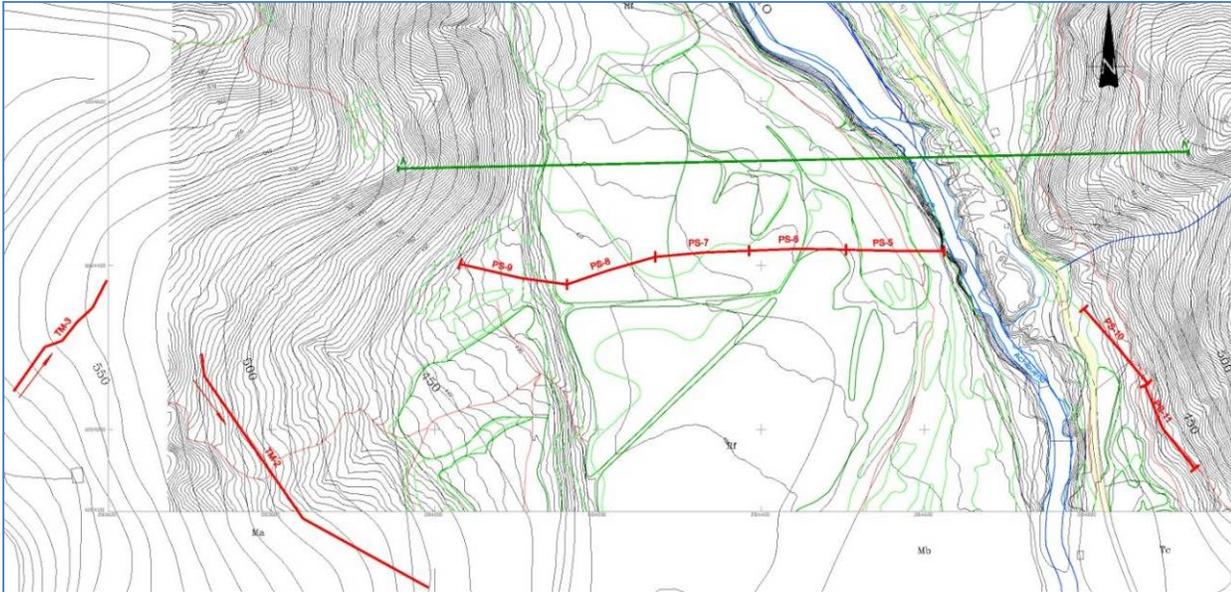


El perfil de sismica de reflexión **PX-1** de 220 m de longitud, se ubica en el centro del valle paralelo al cauce. Este perfil presenta un espesor de suelos aluviales de alta energía variable, máximo de 6,5 m, en la zona central del perfil y 1 a 2 m en ambos extremos, con velocidades desde 300 m/s en superficie y de entre 1200 a 1700 m/s en profundidad. Por debajo aparece un nivel muy constante, de velocidad entre 2100 y 2500 m/s que se extiende hasta 2 m en la zona más superficial y de alrededor de 20 m en las zonas más profundas. Este nivel puede corresponder a gravas aluviales compactas, o parcialmente a roca algo alterada y descomprimida. Por debajo de este nivel se han detectado velocidades superiores a 3300 m/s que deben corresponderse al substrato rocoso andesítico sano.

Los datos obtenidos en el sondeo SA-R3 detectan un primer tramo de depósitos fluviales hasta los 13 m, que se corresponden con una velocidad sísmica 300 m/s para los niveles más superficiales y de 1200 a 1700 m/s para los niveles inferiores de depósitos fluviales más consolidados. Como se observa tanto en este perfil de sismica de reflexión, como en el perfil de sismica de refracción PS-2, el contacto del depósito fluvial con la roca es irregular en la plana aluvial, aumentando su espesor desde los afloramientos encontrados junto al cauce hasta la ubicación del sondeo SR-3. Las velocidades de 2100 a 2500 m/s corresponden a el substrato andesítico algo meteorizado en grado de meteorización III (moderadamente meteorizada) detectado en el sondeo SA-R3 desde los 13 m hasta los 23 m. Desde los 23 m hasta el final del sondeo, se detectó roca andesítica en grado de meteorización II (roca sana con diaclasas teñidas de óxido) lo que se asimilaría a velocidades superiores a 3300 m/s detectadas en el perfil.



**Gráfico 1-6 –Geofísica. El Montecillo. Fuente TYPSA.**



En el emplazamiento de El Montecillo se han realizado 9 perfiles geofísicos. La sísmica de refracción está dividida en dos grupos del perfil PS-5 al PS-9 y del perfil PS-10 al PS-11. La tomografía eléctrica se ha realizado en dos perfiles situados en la margen izquierda con el fin de determinar el espesor de la formación la Montaña existente en esta margen. A continuación se describen los resultados obtenidos:

El perfil de sísmica de refracción formado por los perfiles **PS-5, PS-6, PS-7, PS-8 y PS-9**, consta de de 480 m de longitud en total. Se ubico en la margen izquierda, transversalmente al valle, iniciándose junto al cauce y dirigiéndose en dirección oeste-noroeste hacia la ladera. Este perfil presenta un primer nivel superficial de depósitos de terraza formados por gravas y arenas sueltas, de espesor 2 a 4 m y velocidades de 300 a 400 m/s. Este nivel termina en la zona de ruptura de la plana aluvial con la ladera izquierda, en la zona más occidental, aproximadamente a los 15 m desde el inicio del perfil PS-9, donde aparecen otras dos capas diferentes. La primera superficial, de 1 a 2 m de profundidad, con velocidad de 300 a 400 m/s que debe corresponder a los suelos coluviales de ladera y una segunda capa por debajo de esta, que se extiende hasta los 10 m de profundidad, que presenta velocidades de 680 a 980 m/s y que se debe corresponder con una segunda terraza colgada.

En la zona más oriental del perfil, junto al cauce, se inicia una segunda capa continua irregular, que llega a disponerse por debajo de los materiales de ambas terrazas, de velocidades entre 1500 a 1700 m/s hasta los 10 -15 m y que debe corresponderse con roca fracturada y descomprimida. Por debajo, se observa el substrato rocoso sano con velocidades superiores a los 3300 m/s.

En el sondeo SA-M2 detecta un primer tramo de suelos coluviales hasta una profundidad de 5 m que se corresponde con el primer nivel detectado en el perfil PS-9 de velocidades de 300 a 400 m/s. A continuación en este sondeo se detectó suelos depósitos de terraza muy densos, hasta los 21 m de profundidad que se corresponden con velocidades de 1500 a 1700 m/s. Finalmente en el sondeo se detectó el substrato rocoso andesítico que se asimila con unas velocidades superiores a los 3000 m/s obtenidas en los diferentes perfiles mencionados.

Figura 1-6. Perfil PS-5. Fuente OCSA.

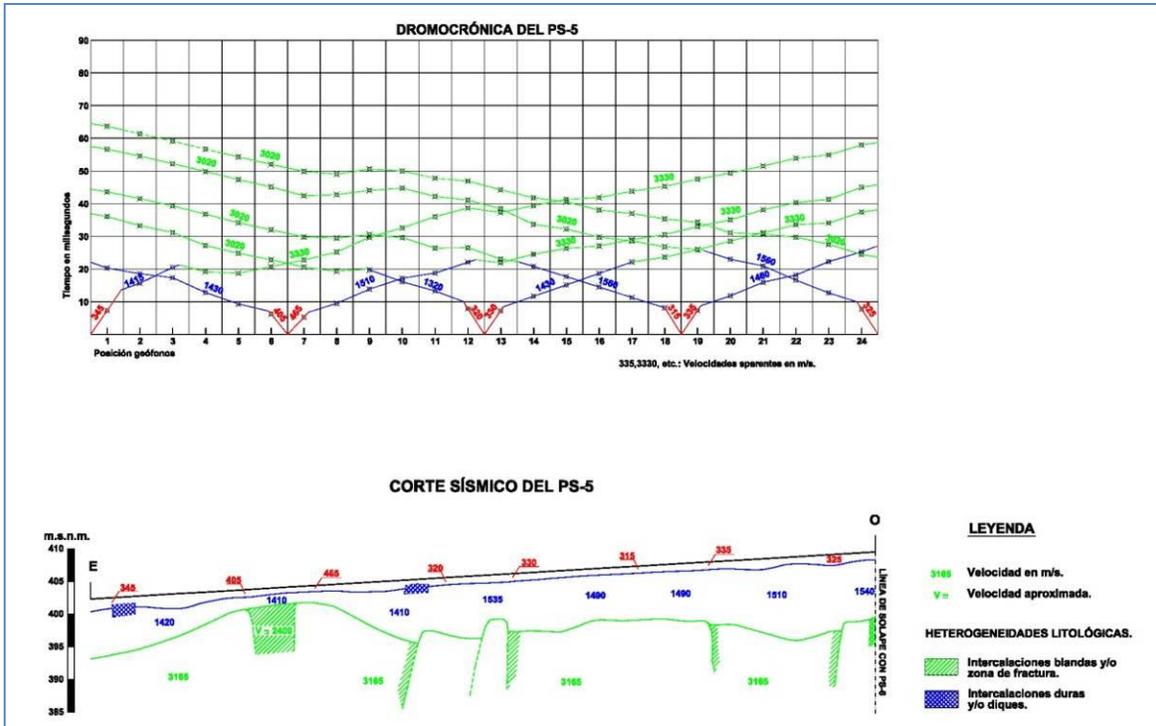


Figura 1-7. Perfil PS-6. Fuente OCSA.

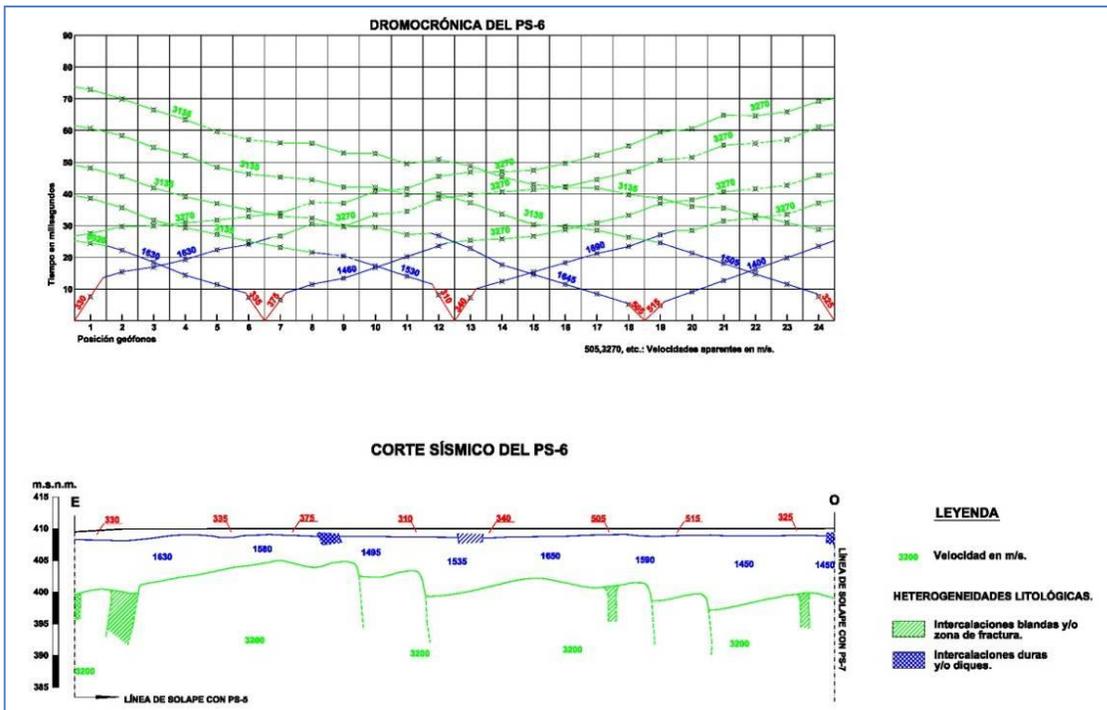


Figura 1-8. Perfil PS-7. Fuente OCSA.

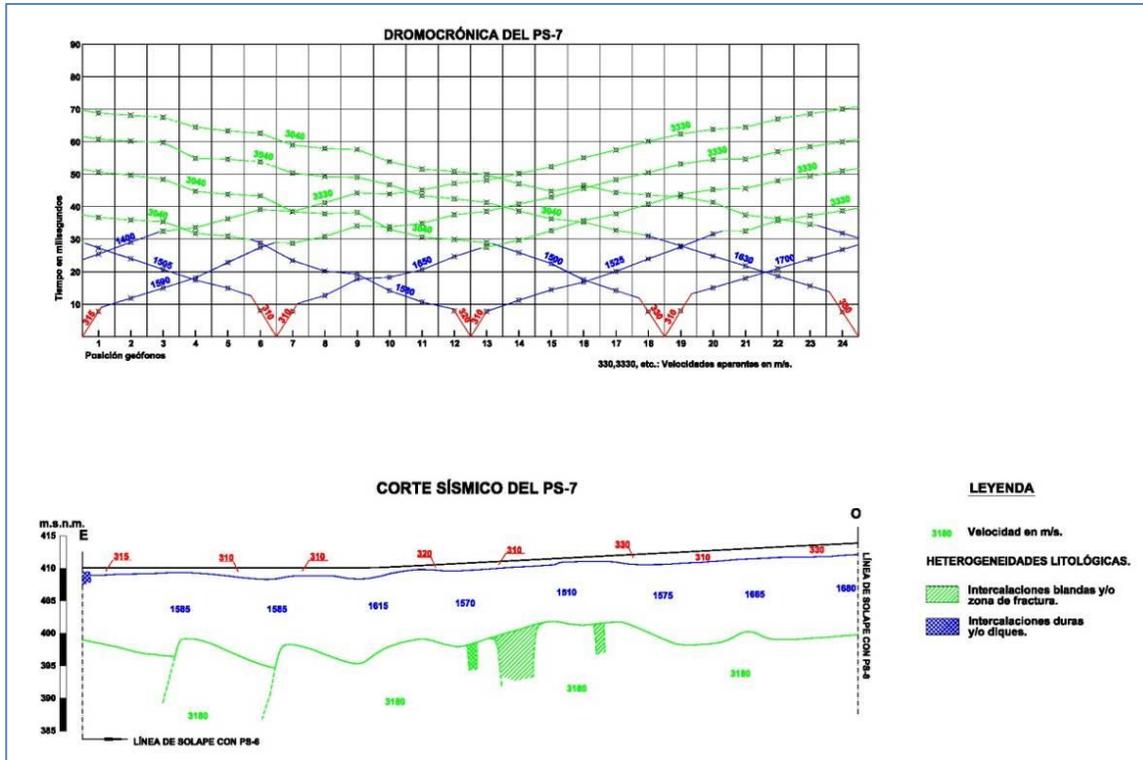


Figura 1-9. Perfil PS-8. Fuente OCSA

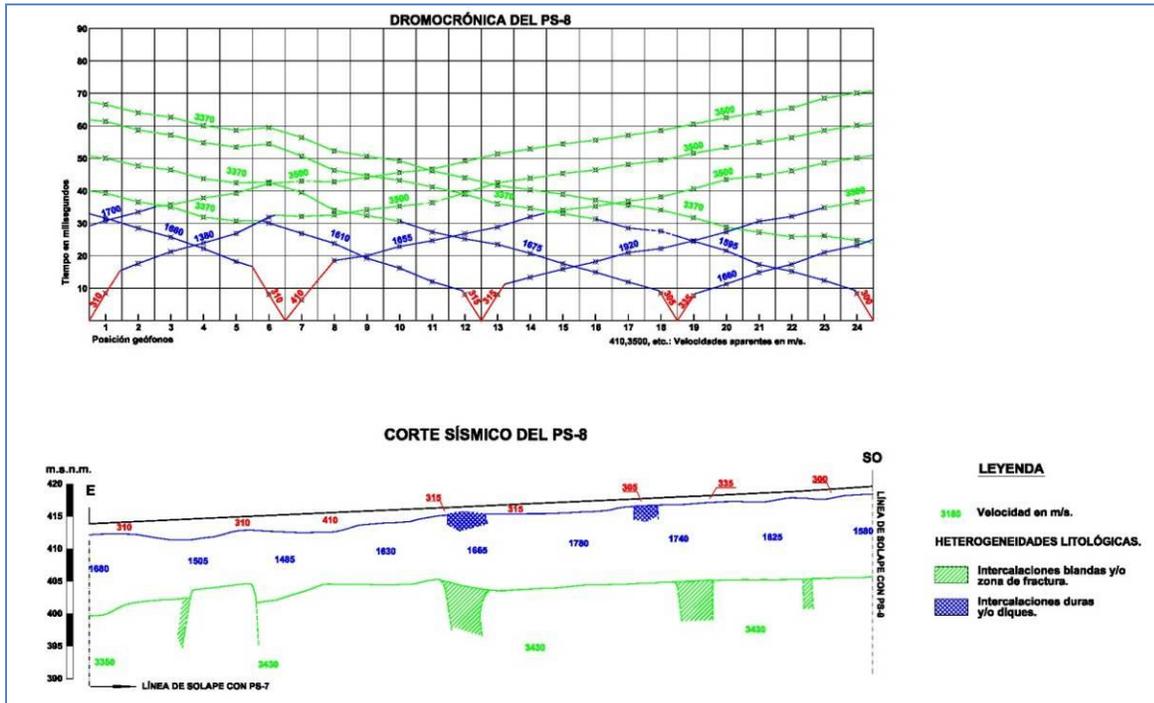
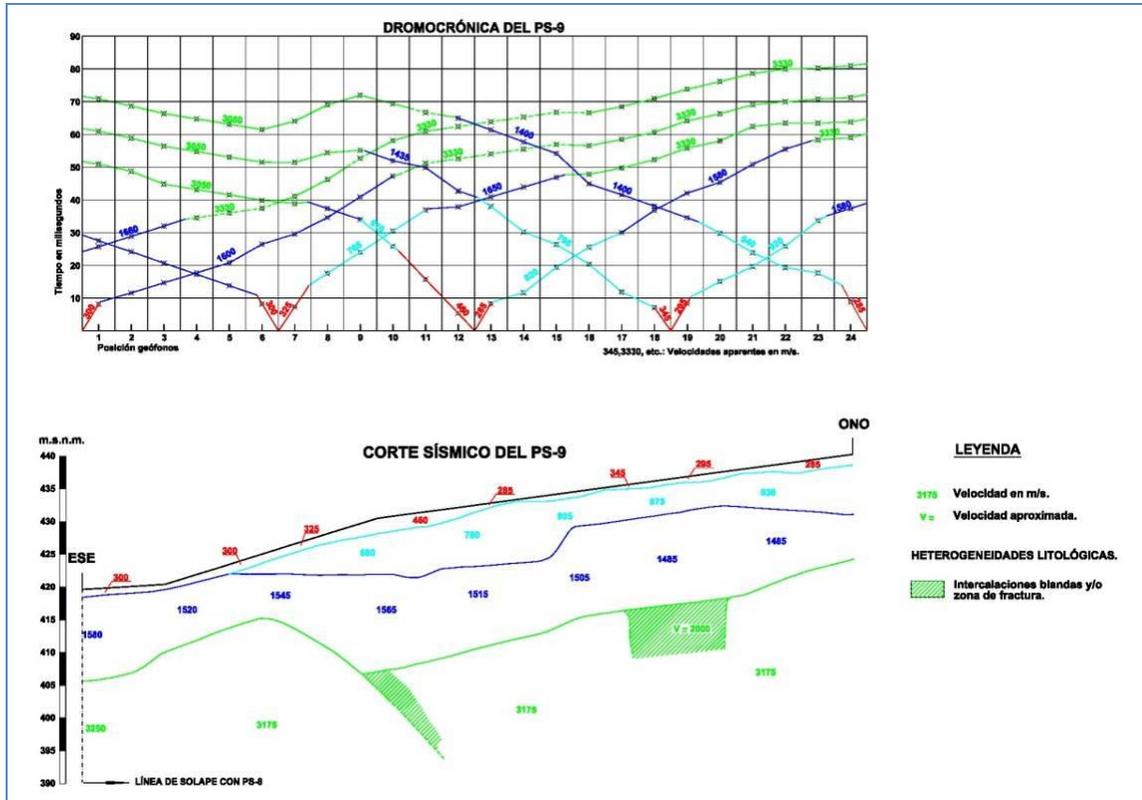


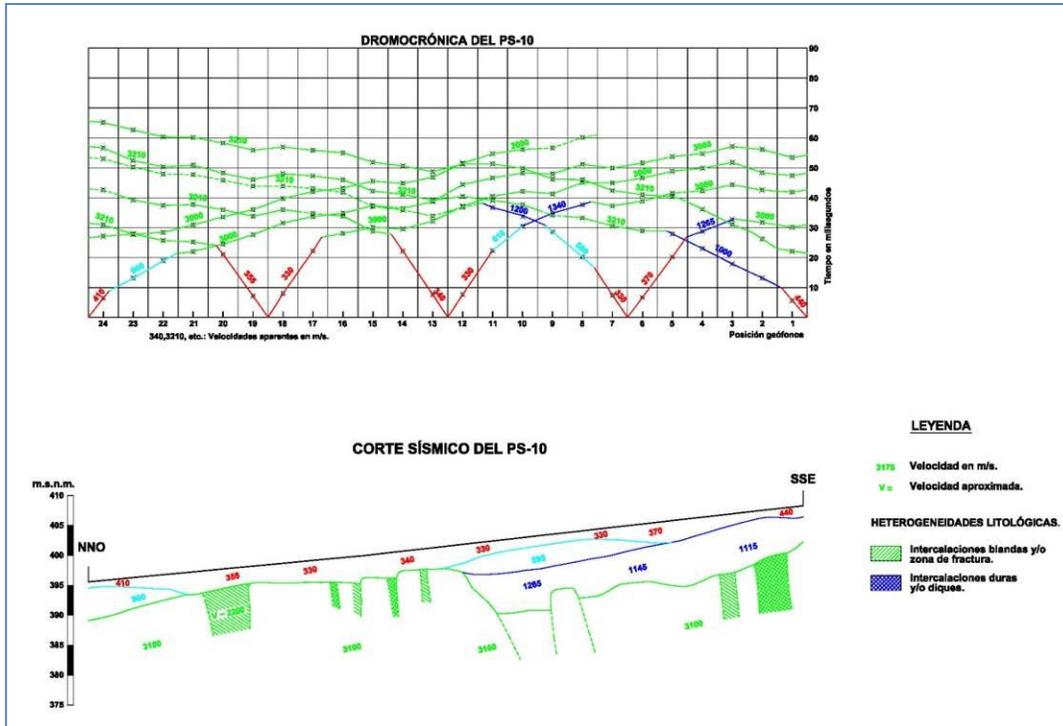
Figura 1-10. Perfil PS-9. Fuente OCSA.



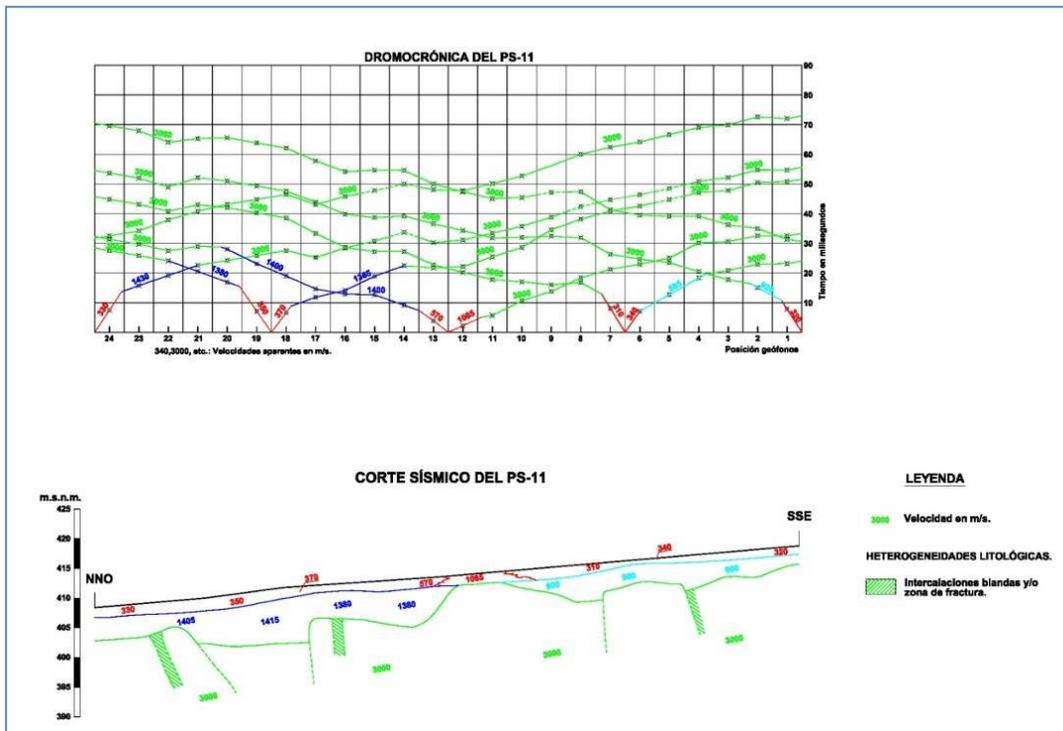
El perfil de sismica de refracción formado por los perfiles **PS-10 y PS-11**, consta de de 240 m de longitud en total. Se ubico en la margen derecha, paralelamente al cauce, ascendiendo en dirección sureste, a lo largo de la ladera, aprovechando un camino existente. Este perfil presenta una primera capa superficial que llega hasta los 4 m de profundidad en algunos puntos, con velocidades de 300 a 350 m/s, que debe corresponderse con depósitos coluviales a excepción de los primeros 50 m del perfil PS-10 que pueden ser depósitos de terraza. En la parte central entre los 15 últimos metros el perfil PS-10 y los 50 m iniciales del perfil PS-11, se observa por debajo otra capa de velocidad 900 m/s, hasta los 5,5 m de profundidad máxima, que se interpreta corresponden también a depósitos coluviales con mayor grado de consolidación. Tanto en la parte inicial del perfil PS-10 y parte final del perfil PS-11, se detecta otra capa discontinua, de velocidades 1100 a 1400 m/s y que debe corresponderse a roca alterada y descomprimida. Esta capa se extiende hasta los 10 m de profundidad. Por debajo, se detecta el substrato rocoso sano con velocidades superiores a los 3000 m/s.

El sondeo SA-M3 situado junto a estos perfiles ha detectado un primer tramo formado por depósitos de terraza fluviales hasta los 4 m de profundidad que coincide con el primer nivel detectado en el perfil PS-10 de 300 a 350 m/s. A continuación en el sondeo se detectó el substrato rocoso andesítico en grado de meteorización III (moderadamente meteorizada) hasta los 10 m de profundidad. Este nivel meteorizado se ha detectado en ambos perfiles PS-10 y PS-11 con velocidades de 1200 a 1450 m/s. Finalmente en el sondeo se detecta roca andesítica sana desde los 10 m hasta los 30 m y se corresponde con el tercer nivel detectado en los perfiles que presenta velocidades superiores a 3000 m/s.

**Figura 1-11. Perfil PS-10. Fuente OCSA.**

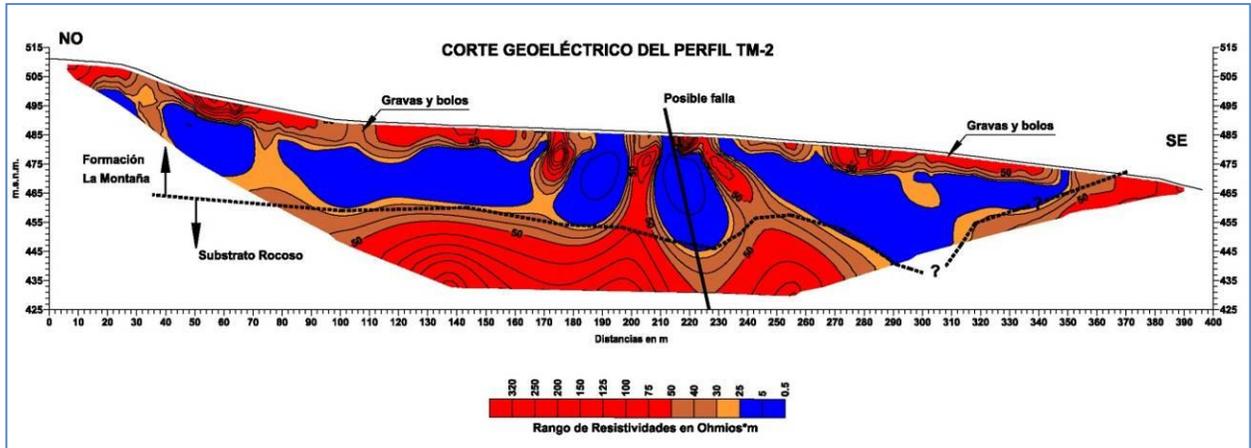


**Figura 1-12. Perfil PS-11. Fuente OCSA.**



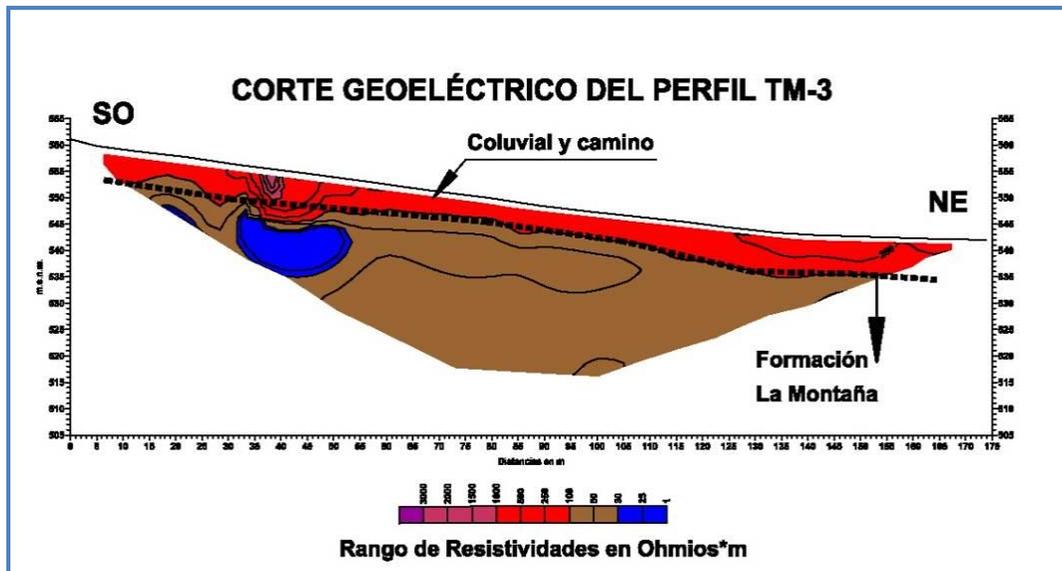
El perfil de tomografía eléctrica **TM-2**, se ubica en la margen izquierda en la ladera, justo por encima de la zona de ruptura de la ladera con la terraza aluvial existente. En este perfil se ha diferenciado el substrato rocoso a partir de la línea donde las resistividades aumentan sustancialmente, estando aproximadamente a una profundidad 30 m. La zona superior, menos resistiva, se correspondería con los materiales débilmente consolidados de la Formación la Montaña, o a derrames coluviales de materiales de esta misma Formación.

**Figura 1-13. Perfil TM-2. Fuente OCSA.**



El perfil de tomografía eléctrica **TM-3**, se ubica en la margen izquierda en la ladera en el estribo y está realizado por encima de un camino existente. Este perfil ha detectado la mayor compactación del terreno existente en el propio firme del camino, y no ha alcanzado un substrato significativamente más resistivo. Los materiales reconocidos se asignan a la Formación la Montaña, que, de acuerdo con la geología de superficie, presentan una gran potencia en esta zona.

**Figura 1-14. Perfil TM-3. Fuente OCSA.**



### 1.5.3. Ensayos de laboratorio

Sobre testigos seleccionados de los sondajes realizados, se han encargado los ensayos de laboratorio, tendientes a definir las características resistentes de las litologías que constituyen el sustrato rocoso en las zonas de emplazamiento de las presas.

En el cuadro adjunto, se indican las muestras seleccionadas en sondeos y calicatas y los ensayos de laboratorio realizados en dichas muestras:

**Tabla 1-11. Resumen de muestras y ensayos de sondajes. La Recova. Fuente TYP SA.**

Sondaje	Muestra	Profundidad (m)	Longitud (cm)	Descripción	Ensayos
S-AR1	M-4	17,70-18,00	30	Toba andesítica	Resistencia
S-AR2	M-1	29,00-30,00	100	Limo arenoso	Identificación, químicos
S-AR2	M-2	35,00-36,00	100	Limo arcilloso	Identificación
S-AR2	M-3	41,00-42,00	100	Limo arenoso	Identificación, químicos
S-AR3	M-3	12,00-12,50	50	Arenas	Identificación, químicos
S-AR3	M-4	14,10-14,48	38	Andesita	Resistencia
S-AR3	M-6	24,35-24,68	33	Andesita	Resistencia
S-AR3	M-7	29,50-29,87	37	Andesita	Resistencia
S-AR4	M-1	3,50-4,00	50	Arena fluvial	Identificación, químicos
S-AR4	M-2	10,50-10,75	25	Brecha andesítica	Resistencia
S-AR4	M-4	20,60-20,80	20	Aglomerado	Resistencia
S-AR4	M-6	28,50-29,00	20	Andesita	Resistencia

**Tabla 1-12. Resumen de muestras y ensayos de sondeos. El Montecillo Fuente TYP SA.**

Sondaje	Muestra	Profundidad (m)	Longitud (cm)	Descripción	Ensayos
S-AM1	M-1	12,30-12,50	20	Grava y arcilla	Identificación
S-AM1	M-2	33,80-34,00	20	Grava y arena	Identificación
S-AM1	M-3	48,07-48,30	23	Arcilla con grava	Identificación
S-AM1	M-4	53,50-53,70	20	Grava y arena	Identificación
S-AM1	M-8	59,38-59,55	17	Basalto meteorizado	Resistencia
S-AM1	M-10	65,00-65,35	35	Basalto	Resistencia
S-AM1	M-11	67,00-67,30	30	Basalto	Resistencia
S-AM2	M-1	26,00-26,20	20	Andesita	Resistencia
S-AM2	M-3	30,75-30,90	15	Andesita	Resistencia
S-AM3	M-1	8,60-8,96	36	Andesita	Resistencia
S-AM3	M-3	16,00-16,55	55	Andesita	Resistencia

**Tabla 1-13. Resumen de muestras y ensayos de calicatas. La Recova. Fuente TYP SA.**

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Descripción	Ensayos
CA-R2	M-1	0,40-0,80	Gravas y arenas	Identificación
CA-R3	M-1	3,00-3,40	Toba andesítica.	Identificación
CA-R4	M-1	1,60-2,00	Toba andesítica.	Identificación
CA-R5	M-1	0,60-0,80	Arcilla limosa.	Identificación y químicos
CA-R6	M-1	1,40-1,80	Grava.	Identificación y químicos

**Tabla 1-13. Resumen de muestras y ensayos de calicatas. La Recova. Fuente TYP SA.**

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Descripción	Ensayos
CA-R7	M-1	1,00-1,30	Limo arcilloso.	Identificación y químicos
CA-R8	M-1	1,40-1,80	Limo.	Identificación
CA-R8	M-2	2,80-3,10	Arena limosa.	Identificación
CA-R9	M-1	1,00-1,40	Grava.	Identificación
CA-R10	M-1	0,40-0,80	Arena limosa.	Identificación
CA-R10	M-2	1,80-2,00	Grava.	Identificación
CA-R11	M-1	1,90-2,20	Grava.	Identificación, químicos y compactación
CA-R12	M-1	1,60-2,00	Gravas y arenas	Identificación
CA-R13	M-1	0,50-0,80	Gravas y arenas.	Identificación

**Tabla 1-14. Resumen de muestras y ensayos de calicatas. El Montecillo. Fuente TYP SA.**

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Descripción	Ensayos
CA-M1	M-1	2,20-2,60	Grava arcillosa.	Identificación
CA-M1	M-2	3,40-3,60	Grava arcillosa.	Identificación, químicos
CA-M2	M-1	2,60-2,80	Arcilla limosa.	Identificación y compactación
CA-M3	M-1	1,40-1,60	Grava arcillosa.	Densidad
CA-M4	M-1	0,80-1,10	Arcilla limosa.	Identificación y compactación

**Tabla 1-14. Resumen de muestras y ensayos de calicatas. El Montecillo. Fuente TYP SA.**

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Descripción	Ensayos
CA-M4	M-2	3,0-3,30	Arena.	Identificación, químicos
CA-M5	M-1	1,20-1,50	Grava arcillosa.	Densidad
CA-M5	M-2	3,20-3,40	Arcilla limosa.	Identificación
CA-M6	M-1	3,00-3,20	Grava arcillosa.	Identificación, químicos y compactación
CA-M7	M-1	2,80-3,20	Arcilla limosa.	Identificación
CA-M8	M-1	2,60-3,00	Arena limosa.	Identificación
CA-M10	M-2	2,20-2,40	Arena limosa.	Identificación
CA-M11	M-1	1,10-1,30	Gravas y bolos.	Identificación y compactación
CA-M15	M-1	1,40-1,60	Gravas y bolos.	Identificación, químicos
CA-M17	M-1	1,60-1,80	Gravas y bolos.	Identificación, químicos y compactación
CA-M18	M-1	0,60-0,80	Limo arcilloso.	Identificación

## 1.6. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES RECONOCIDOS EN LOS EMPLAZAMIENTOS ESTUDIADOS

En los dos emplazamientos seleccionados, los materiales afectados por la posible cimentación de la presa, pueden diferenciarse geotécnicamente en tres grupos:

- ✓ Substrato rocoso de tipo andesítico, constituido por rocas duras, cuya excavación precisa de voladuras. La roca se presenta generalmente sana, y en la mayoría de afloramientos observados, poco fracturada.
- ✓ Substrato rocoso de tipo tobáceo, excavable con medios mecánicos, cuando se encuentra alterada, y generalmente ripable cuando se encuentra sana, aunque puede requerir voladuras de esponjamiento ocasionales. Generalmente se presenta meteorizada en superficie (grado III-IV) y con fracturación alta.
- ✓ Recubrimientos cuaternarios: Suelos aluviales, coluviales y Formación la Montaña. Los suelos aluviales aparecen en el entorno del cauce y plana aluvial actual y en planas morfológicas de terrazas (aluviales antiguos) a diferentes cotas. Los suelos coluviales existentes se observan en ambas márgenes al pie de las laderas y proceden de la erosión de tanto de materiales de la formación Montaña como de, materiales rocosos alterados y fracturados. Los materiales de la Fm La Montaña, constituyen, con espesores variables, las zonas altas, y en ocasiones la totalidad, de los relieves que constituyen la margen izquierda del valle. Se trata de bolos heterogéneos y heterométricos generalmente de gran resistencia, y gravas de clastos rodados, envueltos en matriz arenosa o areno-limosa (caso de los suelos aluviales) o en matriz limo-arcillosa a limo-arenosa (caso de la Fm La Montaña). Todos estos materiales serán fácilmente excavables con medios mecánicos.

Fundamentalmente se presenta en el lecho del cauce y su entorno, y en tramos bajos del valle, cercanos a la plana aluvial. Afectará a la fundación de las presas en buena parte de las zonas centrales y tramos inferiores de las márgenes del valle. Está formada por andesitas, afaníticas y porfídicas, y dacitas. Se trata de una roca de buena calidad y de alta resistencia.

En el siguiente cuadro se resumen los ensayos de laboratorio realizados:

Tabla 1-15. Resumen ensayos realizados (1 de 2). Fuente TYPESA.

7419 - ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD. MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO DEL RÍO ACHIBUENO (CHILE)																																
Resultados de ensayos de laboratorio. CONJUNTO DE DATOS																																
FECHA: 15/10/2013																																
SONDEO	MUESTRA (TIPO Y NÚMERO)	PROFUNDIDAD				DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	UNIDAD GEOTÉCNICA	IDENTIFICACIÓN								ENSAYOS QUÍMICOS				RESISTENCIA			ENSAYOS DE COMPACTACIÓN			ENSAYOS ÁRIDOS						
		DE (m)	A (m)	MED. (m)	L (cm)			SECA (KN/m <sup>3</sup> )	PARTÍCULAS SÓLIDAS (KN/m <sup>3</sup> )	WL (%)	WP (%)	IP (%)	RET # 10 >2,00 mm (Gravas)	PASA #10 RET #200 (Arenas)	PASA # 200 <-0,075mm (Finos)	USCS	AASHTO (I.C.)	M.O. mg/kg	Carbonatos (%)	Resistividad álcalis	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	qu (MPa)	COMPR. SIMPLE	Wopt (%)	DENS. MAX. COMPACTADA HUMEDA (KN/m <sup>3</sup> )	DENS. MAX. COMPACTADA SECA (KN/m <sup>3</sup> )	CBR 95%	DESGASTE DE LOS ANGELES (%)	EQUIVALENTE DE ARENA (%)			
CANTERA	M-1					ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	25,5													70,40											
S-AR1	M-4	17,70	18,00	17,85	30	TOBA ANDESITICA	SUBSTRATO U. Tobácea	26,7													40,80											
S-AR2	M-1	29,00	30,00	29,50	100	LIMO ARENOSO	FM LA MONTAÑA			41	38	3	6	38	56	ML	A-5(1)	12			48											
S-AR2	M-2	35,00	36,00	35,50	100	LIMO ARCILLOSO	FM LA MONTAÑA			37	34	3	0	4	96	ML	A-4(5)															
S-AR2	M-3	41,00	42,00	41,50	100	LIMO ARENOSO	FM LA MONTAÑA			NP	NP	NP	0	44	56	ML	A-4(0)	10			56											
S-AR3	M-3	12,00	12,50	12,25	50	ARENAS	DEPÓSITO ALUVIAL			NP	NP	NP	1	87	12	SP-SM	A-2-4 (0)	186			53				18,6							
S-AR3	M-4	14,10	14,48	14,29	38	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	25,9													26,60											
S-AR3	M-6	24,35	24,68	24,52	33	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	27,0													52,40											
S-AR3	M-7	29,50	29,87	29,69	37	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	26,8													40,50											
S-AR4	M-1	3,50	4,00	3,75	50	ARENA	DEPÓSITO ALUVIAL			NP	NP	NP	0	91	9	SP-SM	A-3 (0)			42				17,3								
S-AR4	M-2	10,50	10,75	10,63	25	BRECHA ANDESÍTICA GM III	SUBSTRATO U. Tobácea														14,90											
S-AR4	M-4	20,60	20,80	20,70	20	AGLOMERADO VOLCÁNICO GM-II	SUBSTRATO U. Tobácea														2,10											
S-AR4	M-6	28,50	29,00	28,75	50	ANDESITA PORFÍDICA GM-II	SUBSTRATO U. Tobácea														53,00											
S-AM1	M-1	12,30	12,50	12,40	20	GRAVA Y ARCILLA	FM LA MONTAÑA			NP	NP	NP	39	25	36	GM	A-4(0)															
S-AM1	M-2	33,80	34,00	33,90	20	GRAVA Y ARENA	FM LA MONTAÑA			NP	NP	NP	63	28	9	GP-GM	A-1a(0)															
S-AM1	M-2	48,07	48,30	48,19	23	ARCILLA CON GRAVA	FM LA MONTAÑA			36	23	13	40	13	47	GC	A-6(3)															
S-AM1	M-4	53,50	53,70	53,60	20	GRAVA Y ARENA	FM LA MONTAÑA			NP	NP	NP	73	18	9	GP-GM	A-1a(0)															
S-AM1	M-8	59,38	59,55	59,47	17	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	24,4													11,10											
S-AM1	M-10	65,00	65,35	65,18	35	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	26,1													16,00											
S-AM1	M-11	67,00	67,30	67,15	30	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	23,2													2,40											
S-AM2	M-7	26,00	26,20	26,10	20	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	25,8													72,80											
S-AM2	M-8	30,75	30,90	30,83	15	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	26,7													118,90											
S-AM3	M-1	8,60	8,96	8,78	36	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	24,4													25,00											
S-AM3	M-3	16,00	16,55	16,28	55	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	24,6													38,20											
CA-R2	M-1	0,40	0,80	0,60	40	GRAVAS Y ARENAS	DEPÓSITO ALUVIAL	27,3		NP	NP	NP	92	7	1	GW	A-1a(0)													13,7		
CA-R3	M-1	3,00	3,40	3,20	40	TOBA ANDESITICA	SUBSTRATO U. Tobácea	27,2		39	36	3	4	23	73	ML	A-4(3)															
CA-R4	M-1	1,60	2,00	1,80	40	TOBA ANDESITICA	SUBSTRATO U. Tobácea	27,1		36	28	8	18	30	52	ML	A-4(2)															
CA-R5	M-1	0,60	0,80	0,70	20	ARCILLA LIMOSA	DEPÓSITO COLUVIAL			33	22	11	4	32	64	CL	A-6(5)	53			172											
CA-R6	M-1	1,40	1,80	1,60	40	GRAVA	DEPÓSITO ALUVIAL			NP	NP	NP	70	29	1	GP	A-1a(0)							No reactivo	6,2	23,7	22,3	72,7				
CA-R7	M-1	1,00	1,30	1,15	30	LIMO ARCILLOSO	DEPÓSITO COLUVIAL			35	22	13	3	29	68	CL	A-6(7)	85			28											
CA-R8	M-1	1,40	1,80	1,60	40	LIMO	DEPÓSITO COLUVIAL			37	34	3	0	14	86	ML	A-4(4)															
CA-R8	M-2	2,80	3,10	2,95	30	ARENA LIMOSA	DEPÓSITO COLUVIAL	26,9		NP	NP	NP	11	65	24	SM	A-2-4(0)															
CA-R9	M-1	1,00	1,40	1,20	40	GRAVA	DEPÓSITO ALUVIAL	27,1		NP	NP	NP	77	17	6	GP-GM	A-1a(0)													22,1		
CA-R10	M-1	0,40	0,80	0,60	40	ARENA LIMOSA	DEPÓSITO ALUVIAL			NP	NP	NP	6	86	8	SP-SM	A-3(0)															
CA-R10	M-2	1,80	2,00	1,90	20	GRAVA	DEPÓSITO ALUVIAL	26,9		NP	NP	NP	64	31	5	GP-GM	A-1a(0)															
CA-R11	M-2	1,90	2,20	2,05	30	GRAVA	DEPÓSITO ALUVIAL	26,8		NP	NP	NP	65	33	2	GP	A-1a(0)							No reactivo	9,0	24,0	22,0	79,9				

Tabla 1-16. Resumen ensayos realizados (2 de 2). Fuente TYPESA.

<b>7419 - ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD. MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO DEL RÍO ACHIBUENO (CHILE)</b>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------

## Resultados de ensayos de laboratorio. CONJUNTO DE DATOS

FECHA: 15/10/2013

SONDEO	MUESTRA (TIPO Y NÚMERO)	PROFUNDIDAD				DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	UNIDAD GEOTÉCNICA	IDENTIFICACIÓN							ENSAYOS QUÍMICOS				RESISTENCIA	ENSAYOS DE COMPACTACIÓN			ENSAYOS ÁRIDOS					
		DE (m)	A (m)	MED. (m)	L (cm)			DENSIDAD		PLASTICIDAD			FRACC. GRANULOMÉTRICA			CLASIFICACIÓN		M.O. mg/kg	Carbonatos (%)	Resistividad alcalis	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	COMPR. SIMPLE	PRÓCTOR MODIFICADO		CBR	DESGASTE DE LOS ANGELES (%)	EQUIVALENTE DE ARENA (%)	
								SECA (kN/m <sup>3</sup> )	PARTICULAS SOLIDAS (kN/m <sup>3</sup> )	WL (%)	WP (%)	IP (%)	RET. #10 >2,00 mm (Gravas)	PASA #10 RET. #200 (Arenas)	PASA #200 <0,075mm (Finos)	USCS	AASHTO (I.G.)					qu (MPa)	Wopt (%)	DENS. MAX. COMPACT ADA HUMEDA (kN/m <sup>3</sup> )				DENS. MAX. COMPACT ADA SECA (kN/m <sup>3</sup> )
CA-R12	M-1	1,60	2,00	1,80	40	GRAVAS Y ARENAS	DEPÓSITO ALUVIAL		27,6	NP	NP	NP	77	21	2	GW	A-1a(0)											
CA-R13	M-1	0,50	0,80	0,65	30	GRAVAS Y ARENAS	DEPÓSITO ALUVIAL		27,3	NP	NP	NP	69	28	3	GP	A-1a(0)											
CA-M1	M-1	2,20	2,60	2,40	40	GRAVAS ARCILLOSAS	FM LA MONTAÑA		26,1	44	27	17	34	24	42	GM	A-7-6(3)											
CA-M1	M-2	3,40	3,60	3,50	20	ARCILLA CON GRAVA	FM LA MONTAÑA			50	30	20	21	18	61	MH	A-7-5(11)	380	0		116							
CA-M2	M-1	2,60	2,80	2,70	20	ARCILLA LIMOSA	FM LA MONTAÑA		26,0	39	26	13	25	19	56	ML	A-6 (5)					17,9	19,5	16,5	14,7			
CA-M3	M-1	1,40	1,60	1,50	20	GRAVA ARCILLOSA	FM LA MONTAÑA		24,5																			
CA-M4	M-1	0,80	1,10	0,95	30	LIMO CON BASTANTE ARENA	DEPÓSITO COLUVIAL			51	31	20	10	22	68	MH	A-7-5 (14)					19,1	19,5	16,4	4,8			
CA-M4	M-2	3,00	3,30	3,15	30	ARENA CON ALGO DE GRAVA	FM LA MONTAÑA		26,3	41	23	18	16	38	46	SC	A-7-6 (5)	110	0		46							
CA-M5	M-1	1,20	1,50	1,35	30	GRAVA ARCILLOSA	FM LA MONTAÑA		26,3																			
CA-M5	M-2	3,20	3,40	3,30	20	ARCILLA LIMOSA	FM LA MONTAÑA			49	25	24	52	11	37	GC	A-7-6 (3)											
CA-M6	M-1	3,00	3,20	3,10	20	ARCILLA CON GRAVA	FM LA MONTAÑA			35	22	13	15	30	55	CL	A-6 (5)	56	0		18	17,8	20,2	17,1	18,5			
CA-M7	M-1	2,80	3,20	3,00	40	ARCILLA LIMOSA	FM LA MONTAÑA		26,0	40	25	15	1	33	66	CL	A-6 (9)											
CA-M8	M-1	1,10	1,30	1,20	20	ARCILLA LIMOSA	DEPÓSITO COLUVIAL											3072			64							
CA-M8	M-1	2,60	3,00	2,80	40	ARENA LIMOSA	DEPÓSITO COLUVIAL			26	23	3	13	44	43	SM	A-4(0)											
CA-M10	M-2	2,20	2,40	2,30	20	ARENA LIMOSA	DEPÓSITO COLUVIAL		26,5	25	22	3	26	49	25	SM	A-2-4(0)	85			18							
CA-M11	M-1	1,10	1,30	1,20	20	GRAVAS Y BOLOS	DEPÓSITO ALUVIAL	24,5	27,3	NP	NP	NP	52	43	5	GP-GM	A-1A(0)					8,9	23,3	21,4	41,4		72,7	
CA-M12	M-1	0,80	1,00	0,90	20	ARENA ALGO LIMOSA	DEPÓSITO ALUVIAL											1210			32							
CA-M15	M-1	1,40	1,60	1,50	20	GRAVAS Y BOLOS	DEPÓSITO ALUVIAL			37	32	5	80	15	5	GP-GM	A-1A(0)					No dañino						
CA-M17	M-1	1,60	1,80	1,70	20	GRAVAS Y BOLOS	DEPÓSITO ALUVIAL	26,5	27,3	NP	NP	NP	80	19	1	GP	A-1A(0)					No dañino	8,5	23,3	21,5	43,4	18,4	
CA-M18	M-1	0,60	0,80	0,70	20	LIMO ARCILLOSO	COLUVIAL-TIERRA VEGETAL		25,2	35	23	12	4	39	57	CL	A-6(4)											

### 1.6.1. Substrato rocoso andesítico.

Fundamentalmente se presenta en el lecho del cauce y su entorno, y en tramos bajos del valle, cercanos a la plana aluvial. Afectará a la fundación de las presas en buena parte de las zonas centrales y tramos inferiores de las márgenes del valle. Está formada por andesitas afaníticas y porfídicas y dacitas. Se trata de una roca de buena calidad y de alta resistencia.

Se dispone de 11 muestras ensayadas, en las que se ha determinado su densidad y resistencia a compresión simple. Los valores obtenidos de estos ensayos han sido los siguientes:

El valor medio de la densidad seca obtenida en los 11 ensayos de laboratorio obtenidos es de 25,6 kN/m<sup>3</sup>, con un valor mínimo de 23,2 kN/m<sup>3</sup> y un valor máximo de 27,0 kN/m<sup>3</sup>.

En los resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple, se observa una gran variación de resultados, entre 2,10 y 118,9 MPa, lo que impone las siguientes consideraciones:

- Los valores inferiores a 20 MPa se deben a variaciones litológicas, alto grado de alteración o roturas a través de fisuras preexistentes, y no deben considerarse representativos del substrato rocoso que se pretende caracterizar.
- Los valores entre 20 y 40 MPa deben corresponder a las andesitas con cierto grado de alteración (grado III o III-IV). En el gráfico adjunto (Figura 1-15) se observan estos valores en el tramo superficial del macizo, entre 0 y 20 m de profundidad.
- A partir de los 20 m de profundidad se observan valores entre 40 y 80 MPa, que pueden considerarse característicos del material. El valor de 118,9 MPa es un dato aislado, obtenido por debajo de 30 m de profundidad, que debe indicar la mejor calidad del substrato andesítico intacto.

**Figura 1-15. Substrato andesítico: Resistencia a compresión simple/profundidad. Fuente TYPESA.**



Por otro lado, se han realizado 17 ensayos de permeabilidad Lugeon en materiales de esta formación, atravesados por los sondeos efectuados en el tramo en estudio, de los que en 6 ensayos han resultado fallidos por imposibilidad de obturación, debido a la elevada fracturación de algunos tramos del macizo rocoso. Los resultados de coeficiente de permeabilidad oscilan entre  $8,6E-06$  y  $1,0E-08$  m/s, con un valor medio de  $1,96E-06$  m/s y una desviación típica de  $3,80E-06$  m/s.

Por la naturaleza misma de los materiales y debido a que la permeabilidad de los materiales rocosos está muy relacionada con la fracturación de los mismos, existe una gran incertidumbre en la definición de los valores de permeabilidad de estos materiales y en su variación con la profundidad.

En resumen, se trata de una roca de alta densidad con unas características resistentes buenas, aunque siempre condicionadas por el grado de fracturación local, altamente abrasiva y que necesitará de voladura, pudiendo emplearse la rozadora cuando la fracturación sea alta y picas de metal duro y máquinas potentes para su excavación cuando no se empleó la voladura.

Las velocidades obtenidas a profundidades comprendidas entre 10 y 15 m por la investigación geofísica han dado valores de 3340 m/s (PS-1) y 3220 m/s (PS-2). Estos valores son asimilables a andesita sana en grado de meteorización II y poco fracturada.

En las tablas adjunta se presentan los resultados de los ensayos de permeabilidad in situ, y de los ensayos de laboratorio efectuados sobre las muestras de andesita:

**Tabla 1-17. Ensayos de permeabilidad. Substrato. Unidad andesítica. Fuente TYPASA**

7419 ESTUDIO PREFACTIBILIDAD. MEJORAMIENTO DE LA CUENCA DEL RIO ACHIBUENO (CHILE)												
Sondeo	cota sondeo	EMPLAZAMIENTO	Tipo	Ref. ensayo	Desde (m)	Hasta (m)	Longitud (m)	Formación	k (m/s)	Cota ensayo	Prof. Media (m)	-log (k)
S-AR1	376	LA RECOVA	LUGEON	5	27,00	30,00	3,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	3,00E-08	347,50	28,50	7,52
S-AR1	376	LA RECOVA	LUGEON	3	11,00	16,00	5,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	FALLIDO	362,50	13,50	
S-AR1	376	LA RECOVA	LUGEON	4	20,00	25,00	5,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	FALLIDO	363,50	22,50	
S-AR3	301	LA RECOVA	LEFRANC	1	15,00	16,00	1,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	8,69E-06	285,50	15,50	5,08
S-AR3	301	LA RECOVA	LUGEON	2	20,00	25,00	5,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	FALLIDO	278,50	22,50	
S-AR3	301	LA RECOVA	LUGEON	3	27,00	32,00	5,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	FALLIDO	271,50	29,50	
S-AR4	310	LA RECOVA	LEFRANC	1	10,00	11,00	1,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	8,64E-06	289,50	10,50	5,06
S-AR4	310	LA RECOVA	LUGEON	2	10,00	15,00	5,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	9,00E-08	297,50	12,50	7,05
S-AR4	310	LA RECOVA	LUGEON	3	25,60	30,40	4,80	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	FALLIDO	282,00	28,00	
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LUGEON	11	60,00	63,00	3,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	1,00E-08	518,50	61,50	8,00
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LUGEON	12	64,00	67,50	3,50	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	1,00E-08	514,25	65,75	8,00
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LUGEON	5	21,00	22,50	1,50	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	1,00E-08	403,25	21,75	8,00
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LUGEON	6	30,00	31,50	1,50	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	1,00E-07	394,25	30,75	7,00
S-AM3	408	EL MONTECILLO	LUGEON	1	7,50	12,50	5,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	FALLIDO	398,00	10,00	
S-AM3	408	EL MONTECILLO	LUGEON	2	13,50	18,60	5,10	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	3,00E-08	391,95	16,05	7,52
S-AM3	408	EL MONTECILLO	LUGEON	3	18,50	23,00	4,50	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	FALLIDO	387,25	20,75	
S-AM3	408	EL MONTECILLO	LUGEON	4	23,00	28,00	5,00	S.ROCOSO. UNIDAD ANDESITICA	FALLIDO	392,50	25,50	

Nº Datos	17
Valor medio	1,96E-06
Valor máximo	8,69E-06
Valor mínimo	1,00E-08
Desv. Estándar	3,80E-06

**Tabla 1-18. Resultado de ensayos de laboratorio. Substrato rocoso andesítico. Fuente TYPESA**



Resultados de ensayos de laboratorio. Substrato andesítico

FECHA: 15/10/2013

SONDEO	MUESTRA (TIPO Y NÚMERO)	PROFUNDIDAD				DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	UNIDAD GEOTÉCNICA	DENSIDAD	RESISTENCIA
		DE (m)	A (m)	MED. (m)	L (cm)			SECA (kN/m <sup>3</sup> )	COMPR. SIMPLE
									qu (MPa)
CANTERA	M-1					ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	25,5	70,40
S-AR1	M-4	17,70	18,00	17,85	30	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	26,7	40,80
S-AR3	M-4	14,10	14,48	14,29	38	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	25,9	26,60
S-AR3	M-6	24,35	24,68	24,52	33	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	27,0	52,40
S-AR3	M-7	29,50	29,87	29,69	37	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	26,8	40,50
S-AR4	M-2	10,50	10,75	10,63	25	BRECHA ANDESÍTICA GM III	SUBSTRATO U. Andesítica		14,90
S-AR4	M-4	20,60	20,80	20,70	20	AGLOMERADO VOLCÁNICO GM-II	SUBSTRATO U. Andesítica		2,10
S-AR4	M-6	28,50	29,00	28,75	50	ANDESITA PORFÍDICA GM-II	SUBSTRATO U. Andesítica		53,00
S-AM1	M-8	59,38	59,55	59,47	17	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	24,4	11,10
S-AM1	M-10	65,00	65,35	65,18	35	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	26,1	16,00
S-AM1	M-11	67,00	67,30	67,15	30	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	23,2	2,40
S-AM2	M-7	26,00	26,20	26,10	20	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	25,8	72,80
S-AM2	M-8	30,75	30,90	30,83	15	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	26,7	118,90
S-AM3	M-1	8,60	8,96	8,78	36	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	24,4	25,00
S-AM3	M-3	16,00	16,55	16,28	55	ANDESITA	SUBSTRATO U. Andesítica	24,6	38,20

NÚMERO DE DATOS	15	15	12	15
PROMEDIO			25,6	39,01
VALOR MÁXIMO			27,0	118,90
VALOR MÍNIMO			23,2	2,10
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			1,2	31,43

LEYENDA

Muestra

TA = muestra alterada  
TP = muestra parafinada  
SH = muestra SHELBY

SPT = muestra SPT

Golpeo

N<sub>SPT.30</sub> = golpeo en muestra SPT  
R = Rechazo

### 1.6.2. Substrato rocoso tobáceo.

En ambos estribos de La Recova, alcanzando hasta casi el pie de ambas laderas, se han reconocido rocas tobáceas, localmente brechoides, que se presentan en superficie con cierta alteración desde grado III hasta V, que presentan características resistentes claramente inferiores a las facies andesíticas de la zona inferior de laderas y fondos del valle.

Dado el alto grado de alteración de los materiales tobáceos reconocidos en el sondaje realizado en la margen izquierda, no ha sido posible la obtención de testigos válidos para la realización de ensayos de resistencia. Se dispone únicamente de ensayos del material alterado, geotécnicamente equivalente a un suelo, en el que se ha determinado la densidad de partículas sólidas, granulometría, plasticidad y clasificaciones USCS y AASTHO.

De acuerdo con los ensayos de identificación efectuados, los niveles más alterados de estos materiales están constituidos principalmente por limos con bastante arena y algo de grava. La distribución granulométrica media obtenida en los dos ensayo de laboratorio efectuados sobre los niveles alterados de estos materiales, en porcentaje de grava/ arena/ finos ha sido de 11/ 27/ 63. De acuerdo con la clasificación USCS estos materiales se clasifican como ML.

En estas mismas muestras, se han realizado dos ensayos para obtener el peso específico de las partículas, en los que se ha obtenido valor mínimo de  $27,1 \text{ kN/m}^3$  y un valor máximo de  $27,2 \text{ kN/m}^3$ , con un valor medio de  $27,1 \text{ kN/m}^3$ .

Se han efectuado dos ensayos de plasticidad sobre estos materiales, en los que se ha obtenido un límite líquido medio de 38 y un índice de plasticidad medio de 6, por lo que estos materiales presentan una plasticidad baja-media.

Por otro lado, se han realizado 2 ensayos de permeabilidad Lefranc en materiales de esta formación, dada su baja resistencia y por tanto la imposibilidad de obturar y realizar el ensayo en presión (Lugeon). Concretamente, se han obtenido resultados del coeficiente de permeabilidad que oscilan entre  $5,38\text{E}-06$  y  $9,32\text{E}-08 \text{ m/s}$ , con un valor medio de  $2,69\text{E}-06 \text{ m/s}$  y una desviación típica de  $3,67\text{E}-06 \text{ m/s}$ .

Las velocidades obtenidas mediante técnicas geofísicas oscilan entre 2000 a 2500 m/s para la toba sana, entre 1400 a 1900 m/s para toba moderadamente alterada en grado III, e inferiores a 1400 m/s para las tobas más superficiales, muy alteradas y fracturadas y altamente descomprimidas.

En resumen, se trata de una roca con unas características resistentes bajas, aunque siempre condicionadas por el grado de meteorización y fracturación local. En general, se podrán excavar mediante medios mecánicos, previo ripado, si bien puede requerir el empleo de martillos hidráulicos o voladuras puntuales de esponjamiento.

En las tablas adjunta se presentan los resultados de los ensayos de permeabilidad in situ, y de los ensayos de laboratorio efectuados sobre las muestras de toba andesítica:

**Tabla 1-19. Ensayos de permeabilidad. Substrato. Unidad tobácea. Fuente TYP SA.**

7419 ESTUDIO PREFACTIBILIDAD. MEJORAMIENTO DE LA CUENCA DEL RIO ACHIBUENO (CHILE)												
Sondeo	cota sondeo	EMPLAZAMIENTO	Tipo	Ref. ensayo	Desde (m)	Hasta (m)	Longitud (m)	Formación	k (m/s)	Cota ensayo	Prof. Media (m)	-log (k)
S-AR1	376	LA RECOVA	LEFRANC	1	4,50	5,50	1,00	S.ROCOSO UNIDAD TOBACEA	5,28E-06	371,00	5,00	5,28
S-AR1	376	LA RECOVA	LEFRANC	2	9,50	10,50	1,00	S.ROCOSO UNIDAD TOBACEA	9,32E-08	386,00	10,00	7,03

Nº Datos:	2
Valor medio	2,69E-06
Valor máximo	5,28E-06
Valor mínimo	9,32E-08
Desv. Estándar	3,67E-06

**Tabla 1-20. Resultado de ensayos de laboratorio. Substrato volcánico. Unidad tobácea. Fuente TYPASA**

7419 - ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD. MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO DEL RÍO ACHIBUENO (CHILE)																																							
Resultados de ensayos de laboratorio. CONJUNTO DE DATOS																																							
SONDEO	MUESTRA (TIPO Y NÚMERO)	PROFUNDIDAD			DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	UNIDAD GEOTÉCNICA	PARTÍCULAS SÓLIDAS (KN/m3)	ENSAYOS IDENTIFICACIÓN				CLASIFICACIÓN																											
		DE (m)	A (m)	MED. (m)				L (cm)	DENSIDAD	PLASTICIDAD	FRACC. GRANULOMÉTRICA																												
							ML (%)	VP (%)	IP (%)	RET. # 10 (Gravas)	RET. # 200 (Arenas)	PASA # 200 (<0,074mm)																											
CA-R3	M-1	3,00	3,40	3,20	40	TOBA ANDESITICA	27,2	39	36	3	4	23	73	USCS	MASHTO (I.G.)																								
CA-R4	M-1	1,60	2,00	1,80	40	TOBA ANDESITICA	27,1	36	28	8	18	30	52	ML	A-4(2)																								
NÚMERO DE DATOS																																							
PROMEDIO																																							
VALOR MÁXIMO																																							
VALOR MÍNIMO																																							
DESVIACIÓN ESTÁNDAR																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">27,1</td> <td style="width: 25%;">38</td> <td style="width: 25%;">32</td> <td style="width: 25%;">6</td> <td style="width: 25%;">11</td> <td style="width: 25%;">27</td> <td style="width: 25%;">63</td> </tr> <tr> <td>27,2</td> <td>39</td> <td>36</td> <td>8</td> <td>18</td> <td>30</td> <td>73</td> </tr> <tr> <td>27,1</td> <td>36</td> <td>28</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>23</td> <td>52</td> </tr> <tr> <td>0,1</td> <td>2</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>10</td> <td>5</td> <td>15</td> </tr> </table>												27,1	38	32	6	11	27	63	27,2	39	36	8	18	30	73	27,1	36	28	3	4	23	52	0,1	2	6	4	10	5	15
27,1	38	32	6	11	27	63																																	
27,2	39	36	8	18	30	73																																	
27,1	36	28	3	4	23	52																																	
0,1	2	6	4	10	5	15																																	
LEYENDA																																							
<b>Muestra</b> TA = muestra alterada TP = muestra parafinada SH = muestra SHELBY						<b>Golpeo</b> N <sub>60</sub> /30 = golpeo en muestra SPT R = Rechazo																																	

### 1.6.3. Recubrimientos cuaternarios: Formación la Montaña.

Estos materiales constituyen la zona superior del relieve en la margen izquierda del valle, y aparecen en ambos emplazamientos.

Se dispone de 16 muestras ensayadas, en las que se han realizado ensayos de identificación, de determinación de la densidad de las partículas sólidas, ensayos químicos y de compactación. A continuación se resumen los valores obtenidos en estos ensayos.

Estos depósitos están constituidos principalmente por limo arcilloso con bastante grava y bastante arena, o bien grava limo-arcillosa con bastante arena. En las muestras ensayadas, la distribución granulométrica media, en porcentaje de grava/ arena/ finos es de 28/ 25/ 48. La clasificación USCS de estos materiales es: en un 43 % GP-GM (2 muestras), GM (dos muestras) o GC (dos muestras), en un 36 % ML (4 muestras) o MH (una muestra), en un 14 % CL (dos muestras) y finalmente en un 7 % SC (una muestra).

El valor medio de la densidad de las partículas sólidas, obtenida en los 6 ensayos de laboratorio es de 25,9 kN/m<sup>3</sup>, con un valor mínimo de 24,5 kN/m<sup>3</sup> y un valor máximo de 26,3 kN/m<sup>3</sup>.

En los ensayos de plasticidad realizados, se han obtenido límites líquidos variables entre 35 y 50, con un valor medio de 41, e índices de plasticidad variables entre 3 y 24, con un valor medio de 14. En un 28% las muestras ensayadas han sido no plásticas.

Se han efectuado ensayos químicos de contenido en materia orgánica, carbonatos y sulfatos sobre tres muestras. En el caso de la muestra M2 de la calicata CM-1, se han obtenido valores relativamente altos de Materia orgánica (380 mg/kg) y Sulfatos (116 mg/kg). El contenido de carbonatos, en los tres ensayos realizados, ha sido nulo. El contenido en Materia Orgánica mínimo de las muestra ensayadas ha sido 10 mg/kg sido de 10 y el promedio 113 mg/kg, y el contenido en Sulfatos mínimo de 18 y el promedio ha sido de 57 mg/kg.

Se ha realizado dos ensayos de compactación Próctor Modificado, en los que se han obtenido los valores de humedad óptima de 17,9% y 17,8% y unas densidades máximas de compactación de 20,2 kN/m<sup>3</sup> y 19,5 kN/m<sup>3</sup> respectivamente. El índice CBR, para una la compactación del 95% de la densidad máxima Próctor Modificado, han sido de 14,7 y 18,5.

Por otro lado, se han realizado 20 ensayos de permeabilidad Lefranc, en materiales de esta formación. Se han obtenido resultados del coeficiente de permeabilidad que oscilan entre 6,07E-06 y 7,72E-08 m/s, con un valor medio de 1,43E-06 m/s y una desviación típica de 1,60E-06 m/s.

En resumen, se trata de suelos que se podrán excavar mediante medios mecánicos.

Los materiales más finos, de la matriz, podrían ser aptos como núcleos impermeables en caso de tipologías de presa de materiales locales, siempre que su entidad y homogeneidad permitieran una explotación rentable.

En las tablas adjuntas se presentan los resultados de los ensayos de permeabilidad in situ, y de los ensayos de laboratorio efectuados sobre los depósitos pleistocénicos de la formación La Montaña:

**Tabla 1-21. Ensayos de permeabilidad. Fm la Montaña. Fuente TYPASA**

7419 ESTUDIO PREFACTIBILIDAD. MEJORAMIENTO DE LA CUENCA DEL RIO ACHIBUENO (CHILE)												
Sondeo	cota sondeo	EMPLAZAMIENTO	Tipo	Ref. ensayo	Desde (m)	Hasta (m)	Longitud (m)	Formación	k (m/s)	Cota ensayo	Prof. Media (m)	-log (k)
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	1	13,00	14,00	1,00	FM LA MONTAÑA	1,31E-06	470,50	13,50	5,88
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	2	15,00	19,00	1,00	FM LA MONTAÑA	6,07E-06	465,50	18,50	5,22
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	3	24,00	25,00	1,00	FM LA MONTAÑA	1,18E-06	459,50	24,50	5,93
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	4	29,00	30,00	1,00	FM LA MONTAÑA	8,99E-07	454,50	29,50	6,05
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	5	34,00	35,00	1,00	FM LA MONTAÑA	2,66E-06	449,50	34,50	5,58
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	6	39,00	40,00	1,00	FM LA MONTAÑA	2,81E-06	444,50	39,50	5,55
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	1	9,00	10,00	1,00	FM LA MONTAÑA	5,27E-07	570,50	9,50	6,28
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	2	14,00	15,00	1,00	FM LA MONTAÑA	4,14E-07	565,50	14,50	6,38
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	3	19,00	20,00	1,00	FM LA MONTAÑA	1,01E-06	560,50	19,50	6,00
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	4	24,00	25,00	1,00	FM LA MONTAÑA	2,73E-07	555,50	24,50	6,56
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	5	29,00	30,00	1,00	FM LA MONTAÑA	3,26E-07	550,50	29,50	6,49
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	6	34,00	35,00	1,00	FM LA MONTAÑA	3,16E-07	545,50	34,50	6,50
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	7	39,00	40,00	1,00	FM LA MONTAÑA	5,39E-07	540,50	39,50	6,27
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	8	44,00	45,00	1,00	FM LA MONTAÑA	1,31E-06	535,50	44,50	5,88
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	9	49,50	49,50	1,00	FM LA MONTAÑA	1,38E-07	531,00	49,00	6,86
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	10	54,00	55,00	1,00	FM LA MONTAÑA	7,72E-08	525,50	54,50	7,11
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LEFRANC	1	4,00	5,00	1,00	FM LA MONTAÑA	3,46E-06	420,50	4,50	5,46
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LEFRANC	2	9,00	10,00	1,00	FM LA MONTAÑA	4,14E-06	415,50	9,50	5,38
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LEFRANC	3	14,00	15,00	1,00	FM LA MONTAÑA	7,49E-07	410,50	14,50	6,13
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LEFRANC	4	19,00	20,00	1,00	FM LA MONTAÑA	3,27E-07	405,50	19,50	6,49

Nº Datos	20
Valor medio	1,43E-06
Valor máximo	6,07E-06
Valor mínimo	7,72E-08
Desv. Estándar	1,60E-06

**Tabla 1-22. Resultado de ensayos de laboratorio. Depósitos cuaternarios. Formación La Montaña. Fuente TYP SA.**

SOLUCO	MUESTRA (TIPO Y NÚMERO)	PROFUNDIDAD			DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	UNIDAD GEOTÉCNICA	DENSIDAD (g/cm³)	PLASTICIDAD (NP, NP)	ELECCIÓN			CLASIFICACIÓN (USCS)	ENSAYOS QUÍMICOS		RESISTENCIA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)	ENSAYOS DE COMPACTACIÓN			EQUIVALENTE DE ASBESTO (Mg)	
		DE (m)	MED. (m)	L (cm)					REACTIVOS (%)	M.O. (mg/kg)	W <sub>1</sub> (%)		DENS. COMPACTADA (g/cm³)	DENS. MÁX. MOJEDA (g/cm³)		DENS. MÁX. MOJEDA (g/cm³)	W <sub>opt</sub> (%)	W <sub>90</sub> (%)		
S-AR3	M-3	12,00	12,25	50	ARENAS	DEPÓSITO ALUVIAL	27,3	NP	NP	1	BT	12	SP-SM	A-24 (0)	186	53	18,8			
S-AR4	M-1	3,50	4,00	3,75	50	ARENA	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	0	91	9	SP-SM	A-3 (0)		42	17,3			
CA-R2	M-1	0,40	0,60	0,60	40	GRAVAS Y ARENAS	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	92	7	1	GW	A-18(0)				13,7		
CA-R8	M-1	1,40	1,80	1,60	40	GRAVA	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	70	29	1	GP	A-18(0)		6,2	23,7	22,3	72,7	
CA-R9	M-1	1,00	1,40	1,20	40	GRAVA	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	77	17	6	GP-GM	A-18(0)				22,1		
CA-R10	M-1	0,40	0,60	0,60	40	ARENA LIMOSA	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	6	86	8	SP-SM	A-3(0)						
CA-R10	M-2	1,80	2,00	1,90	20	GRAVA	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	64	31	5	GP-GM	A-18(0)						
CA-R11	M-2	1,80	2,20	2,05	30	GRAVA	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	65	33	2	GP	A-18(0)		9,0	24,0	22,0	79,9	
CA-R12	M-1	1,80	2,00	1,80	40	GRAVAS Y ARENAS	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	77	21	2	GW	A-18(0)						
CA-R13	M-1	0,50	0,80	0,65	30	GRAVAS Y ARENAS	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	69	28	3	GP	A-18(0)						
CA-M11	M-1	1,10	1,30	1,20	20	GRAVAS Y BOLOS	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	52	43	5	GP-GM	A-18(0)		8,9	23,3	21,4	41,4	72,7
CA-M12	M-1	0,80	1,00	0,90	20	ARENA ALGO LIMOSA	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	80	15	5	GP-GM	A-18(0)		32				
CA-M15	M-1	1,40	1,60	1,50	20	GRAVAS Y BOLOS	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	80	10	1	GP	A-18(0)						
CA-M17	M-1	1,80	1,60	1,70	20	GRAVAS Y BOLOS	DEPÓSITO ALUVIAL	NP	NP	80	10	1	GP	A-18(0)		8,5	23,3	21,5	40,4	18,4

VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	NÚMERO DE DATOS													
			2	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
25,5	27,2	37	32	5	56	39	6	668,0	#####	42,3	#####	0,2	23,6	20,5	59,4	18,1
26,5	27,8	37	32	5	92	91	12	1,210,0	0,0	53,0	0,00	9,0	24,0	22,3	79,9	22,1
24,5	26,8	37	32	5	0	7	1	188,0	0,0	32,0	0,00	6,2	23,3	17,3	41,4	13,7
1,4	0,3	#####	#####	#####	32	29	3	724,1	#####	15,5	#####	1,3	0,3	2,1	19,8	4,2

Muestra	TA = muestra alterada	TR = muestra para triaxial	SPT = muestra SPT	GRUPO
TA = muestra alterada			SPT = muestra SPT	Grupos
TR = muestra para triaxial				Non-Gr
SPT = muestra SPT				R = Hierro

#### 1.6.4. Recubrimientos cuaternarios: Suelos fluviales y/o aluviales.

En este grupo geotécnico se incluyen los suelos existentes en las planas aluviales de los dos emplazamientos y cauce actual del río. Estos materiales se presentan fundamentalmente en el entorno del fondo del valle.

Se dispone de 14 muestras ensayadas, en las que se han realizado ensayos de identificación, se ha determinado la densidad seca de la arena, la densidad de las partículas sólidas, se han efectuado ensayos químicos y ensayos de áridos. A continuación se resumen los valores obtenidos en estos ensayos.

La distribución granulométrica media obtenida de los ensayos de laboratorio efectuados de estos materiales en porcentaje de grava/ arena/ finos es de 56/ 39/ 5. Se trata por tanto de grava arenosa con indicios de finos. De acuerdo con la clasificación USCS, las muestras ensayadas se clasifican, en un 77% como GP (4 muestras), GP-GM (4 muestras), o GW (2 muestras), y en un 33% como SP-SM (3 muestras).

Los valores de plasticidad de la fracción fina de estos materiales han sido, en un porcentaje superior al 92% No Plástico. En la única muestra con finos plásticos, se ha obtenido un valor de límite líquido de 37%, y un índice de plasticidad de 5.

En los 4 ensayos para determinar la densidad seca de estos materiales, se ha obtenido un valor medio de 20,1 kN/m<sup>3</sup>, con un valor mínimo de 14,2 y una densidad máxima de 26,5 kN/m<sup>3</sup>.

Se han efectuado 8 ensayos de determinación de la densidad de las partículas sólidas, en los que se ha obtenido un valor medio de 27,2 kN/m<sup>3</sup>, con un valor mínimo de 26,8 y un valor máximo de 27,6 kN/m<sup>3</sup>.

Se dispone de 2 ensayos de contenido en Materia Orgánica, obteniéndose un valor de 186 mg/kg, y, en la muestra muy superficial de la calicata CA-M12, de 1210 mg/kg. Asimismo, el contenido máximo de sulfatos solubles obtenido en las 3 muestras ensayadas ha sido de 53 mg/kg. Los 4 ensayos efectuados para determinar la resistividad de estos materiales frente a los álcalis muestran que estos materiales son no reactivos (dos muestras) o no dañinos (2 muestras).

Se han efectuado 4 ensayos de compactación Próctor Modificado, en las que se ha obtenido unos valores medios de humedad óptima y densidad máxima de compactación, respectivamente de un 8,2% y 23,6 kN/m<sup>3</sup>. El índice CBR medio obtenido para una compactación del 95% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Próctor Modificado ha sido de 59,4, con un valor mínimo de 41,4 y un valor máximo de 79,9.

Se han realizado 3 ensayos de desgaste de Los Ángeles, en los que se ha obtenido un índice de desgaste medio de un 18,1%, con valor máximo de 22,1 % y mínimo de 13,7%.

Asimismo, se dispone de un ensayo para la determinación del equivalente de arena, en el que se ha obtenido un valor de 72,7%.

En resumen, se trata de suelos que se podrán excavar mediante medios mecánicos.



#### 1.6.5. Recubrimientos cuaternarios: Suelos coluviales y conos de deyección.

Se han agrupado en esta unidad, los depósitos de acumulación localizados a pie de ladera, constituido por materiales procedentes del relieve a cuyo pie se ubican, y cuyo mecanismo de transporte ha sido exclusivamente gravitacional.

Se caracterizan por carecer de ordenamiento interno, y por el carácter generalmente anguloso de sus elementos gruesos (clastos y bloques), excepto en los casos de elementos rodados heredados de formaciones topográficamente superiores, y por tener una composición ligada a los materiales del relieve inmediatamente superior al depósito.

También se han agrupado aquí los conos de deyección, acumulaciones vinculadas a la salida de las principales quebradas desde el relieve hacia los llanos inferiores, a pesar de que su mecanismo de transporte es de tipo mixto, alternando los procesos gravitacionales con el transporte hídrico en épocas de lluvia. Su composición y forma de los elementos gruesos son similares a las de los suelos coluviales, aunque manifiestan cierto ordenamiento interno en capas de elementos gruesos relacionados con los episodios estacionales de arrastre hídrico.

En los suelos coluviales ensayados se observa un alto porcentaje de elementos finos, de tipo limo-arcilloso con proporciones variables de arena y grava. Esto se debe a que proceden, en su mayor parte de relieves coronados por potentes acumulaciones de materiales de la Fm Montaña, en cuya matriz también predomina la fracción fina.

Los ensayos muestras promedios granulométricos de grava/arena/finos de 9/37/54, aunque la fracción grava puede estar penalizada a la baja, debido a que la toma de muestras prescinde de los elementos gruesos de mayor tamaño, que sin embargo se observan en superficie y en los cortes de depósitos coluviales.

Se clasifican (USCS) como CI (3 muestras), SM o SC (3 muestras) y MI o MH (2 muestras).

Los finos presentan plasticidad media, con Límite Líquido entre 25% y 51% el Índice de Plasticidad entre 3 y 20.

Los ensayos químicos han arrojado los siguientes resultados:

- Materia Orgánica entre 53 mg/kg y 85mg/kg, con un valor anómalo de 3072 mg/kg en la muestra M-1 de la calicata CA-M8
- Contenido en Carbonatos: Nulo
- Contenido en Sulfatos: entre 18 mg/kg y 172 mg/kg.

Se ha realizado un ensayos Próctor Modificado con los siguientes resultados:

- Humedad Óptima de 19,1%
- Densidad Máxima de 19,5 kN/m<sup>3</sup>

El índice CBR obtenido sobre muestra compactada al 95% P.M. ha sido de 4,8.

En la tabla adjunta se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio desarrollados sobre muestras de suelo coluvial:

Tabla 1-24. Resultado de ensayos de laboratorio. Depósito coluvial. Fuente TYPSA.

7419 - ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD, MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO DEL RÍO ACHIBUENO (CHILE)																												
Resultados de ensayos de laboratorio. CONJUNTO DE DATOS																												
SONCHEO	MUESTRA (Tipo y Número)	DE (m)	A (m)	MED. (m)	L (cm)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	UNIDAD GEOTÉCNICA	DENSIDAD			PLASTICIDAD			IDENTIFICACIÓN			ENSAYOS QUÍMICOS		RESISTENCIA A LA TRACCIÓN SIMPLE		ENSAYOS DE COMPACTACIÓN			ENSAYOS DE LOS ANGELES (s)		EQUIVALENTE DE ARENA (%)		
								SECA (dNm)	MOJADA (dNm)	PARTÍCULAS < 0,075 mm	VP (%)	VI (%)	LI (%)	PL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)	UCL (%)
CA-R5	M-1	0,60	0,80	0,70	20	ARCILLA LIMOSA	DEPOSITO COLUVIAL				33	22	11	4	32	64	A(6)	53	172									
CA-R7	M-1	1,00	1,30	1,15	30	LIMO ARCILLOSO	DEPOSITO COLUVIAL				35	22	13	3	29	66	CL A-6(7)	65	28									
CA-R8	M-1	1,40	1,80	1,60	40	LIMO	DEPOSITO COLUVIAL				37	34	3	0	14	85	ML A-4(4)											
CA-R8	M-2	2,80	3,10	2,85	30	ARENA LIMOSA	DEPOSITO COLUVIAL	26,0			NP	NP	NP	11	65	24	SM A-2-4(0)											
CA-M4	M-1	0,60	1,10	0,95	30	LIMO CON BASTANTE ARENA	DEPOSITO COLUVIAL				51	31	20	10	22	68	MH A-7-5 (14)											
CA-M8	M-1	1,10	1,30	1,20	20	ARCILLA LIMOSA	DEPOSITO COLUVIAL				25	23	3	13	44	43	SM A-4(0)	3072	64									
CA-M8	M-1	2,60	3,00	2,80	40	ARENA LIMOSA	DEPOSITO COLUVIAL	26,5			25	22	3	26	49	25	SM A-2-4(0)	65	18									
CA-M10	M-2	2,20	2,40	2,30	20	ARENA LIMOSA	DEPOSITO COLUVIAL	25,2			35	23	12	4	39	57	CL A-6(4)											
CA-M18	M-1	0,60	0,80	0,70	20	LIMO ARCILLOSO	DEPOSITO COLUVIAL-TIERRA VEGETAL																					

NÚMERO DE DATOS	0										1										2										3										4										5										6										7										8										9									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9																				
PREMIO	0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00									
VALOR MÁXIMO	0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00									
VALOR MÍNIMO	0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00									
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00										0,00									

LEYENDA	Muestra		SPT		Golpeo	
	TA = muestra alterada	TP = muestra perturbada	SPT = muestra SPT	Narra = golpeo en muestra SPT	R = Rechazo	

## 1.7. GEOLOGÍA DE LOS EMPLAZAMIENTOS DE PRESA

### 1.7.1. La Recova

#### 1.7.1.1. Situación

Este emplazamiento se sitúa dentro del valle del río Achibueno en su zona media, a unos 24 km de al sureste de la ciudad de Linares, en una zona donde el valle se estrecha y el cauce presenta una curva hacia el norte, forzada por los afloramientos rocosos existentes en la margen izquierda del valle. El emplazamiento se ubica a unos 1.000 m aguas abajo, de la desembocadura del estero Vega de Salas en el río Achibueno.

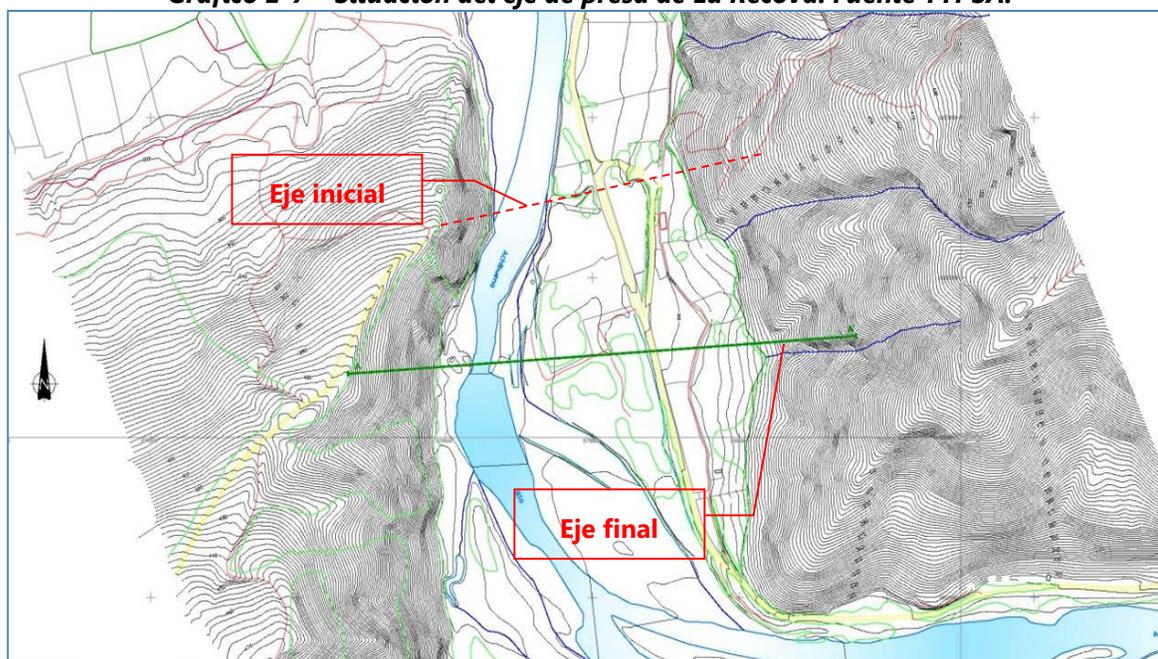
La situación aproximada del sitio de presa es el siguiente:

**Tabla 1-25 – Situación de La Recova. Fuente TYP SA.**

SITIO	CAUCE	COORDENADAS EJE PRESA						COTA APROXIMADA (msnm)	
		MARGEN DERECHA		MARGEN IZQUIERDA		DATUM	HUSO	FONDO	CORONACIÓN
		X	Y	X	Y				
La Recova	Río Achibueno	279.860	6.012.773	279.425	6.012.631	WGS84	19H	310	390-400

El emplazamiento de La Recova corresponde a un posible muro de unos 80-90 m de altura aproximada y 620-720 m de longitud en coronación, con previsible empotramiento en roca en ambas laderas y un amplio fondo de valle que presenta depósito fluvial poco desarrollado.

**Gráfico 1-7 – Situación del eje de presa de La Recova. Fuente TYP SA.**



**Fotografía 1-1. Vista, hacia aguas arriba, del emplazamiento de la Recova.**



#### 1.7.1.2. Descripción de las litologías aflorantes

En el reconocimiento de detalle realizado, se han observado afloramientos rocosos en superficie tanto en ambos estribos como dentro de la zona central y cauce del río.

Litológicamente se han diferenciado cinco tipos diferentes de materiales ordenados cronológicamente de mayor a menor edad:

##### Substrato. Unidad andesítica.

Estos materiales volcánicos corresponderían a una serie de andesitas afaníticas o porfídicas y dacitas con intercalaciones ocasionales de tobas. De aspecto masivo y mal estratificada que se han reconocido en los afloramientos observados en el cauce y en los sondajes S-AR1 (a partir de 10,50 m de profundidad), S-AR3 y S-AR4.

**Fotografía 1-2. Afloramiento junto al cauce, en la margen izquierda**



**Fotografía 1-3. Andesitas afaníticas.**



**Fotografía 1-4. Andesitas. Detalle de la textura de la roca**



Substrato. Unidad Tobácea.

Esta unidad se encuentra por encima de la unidad andesítica. Se han observado afloramientos tanto en el estribo izquierdo como en el derecho y se ha reconocido en el sondaje S-AR1, hasta aproximadamente los 10,50 m de profundidad. Esta unidad presenta en algunos puntos una cierta propilitización (desarrollo de sericita, clorita, calcita, sulfuros y mineralizaciones de Au, Ag, etc.) debido a la alteración hidrotermal que le confiere tonos verdosos y hace friable a la roca. En el estribo izquierdo aflora la unidad tobácea con importante meteorización superficial (grado IV), bastante penetrativa, lo que se refleja en las bajas velocidades de transmisión de ondas sísmicas obtenidas en los perfiles geofísicos de refracción, PS-3 y PS-4, realizado en esta margen.

**Fotografía 1-5. Afloramiento de tobas brechosas andesíticas meteorizadas en grado IV, en la margen izquierda.**



**Fotografía 1-6. Detalle de la textura de la toba, aguas arriba de la cerrada, en la margen izquierda del valle.**



#### Formación La Montaña (Gajardo 1981). Pleistoceno

Se trata de un conjunto de conglomerados, areniscas, limolitas, lapilli y ceniza, débilmente consolidados, de origen fluvial, glaciofluvial y piroclástico. Se han detectado en la margen izquierda por encima del estribo de la posible presa (por encima de la cota 405 m.s.n.m.). Está formado por clastos redondeados a subredondeados de composición y tamaño variable, en una matriz arenosa a arcillo-limosa.

En el sondaje S-AR2, situado en la zona superior del relieve de la margen izquierda del valle, aproximadamente 1 km aguas arriba del emplazamiento propuesto para la presa, se han atravesado 44 m de estos materiales.

Los primeros metros del sondaje presentan un marcado predominio de finos, limosos, arcillo-limosos y arcillosos con escasos cantos. Se describen capas centimétricas de arcillas grises, limos anaranjados, vetas carbonosas y cantos blandos alterados. Interpretamos esta zona superficial, que ocupa el alto del relieve, como un relicto de un recubrimiento superficial de cenizas volcánicas edafizadas

A partir de 16,50 m de profundidad, los materiales perforados corresponden a gravas y bolos de clastos redondeados, poligénicos y muy heterométricos, en matriz limo-arenosa, areno-limosa o limo-arcillosa. Los clastos son poligénicos, predominando las andesitas, con presencia de clastos de basaltos, tobas, limolitas etc., en muchos casos alterados. El tamaño de los clastos, muy variable, está generalmente comprendido entre 3 y 20 cm. Los tamaños máximos de clastos apenas superan los 20 cm de diámetro.

Se intercalan algunas capas decimétricas de arenas finas y de limos arenosos.

**Fotografía 1-7. Detalle de afloramiento de la Formación la Montaña, detectada en la zona superior del relieve, por encima del estribo izquierdo. Se observa un clasto rodado de toba, totalmente alterado.**



#### Depósitos fluviales de alta energía. Cuaternario

Se han localizado en el cauce actual del río hasta la margen derecha, con anchura aproximada, de unos 140 m, medida en sentido transversal al valle. Los depósitos aluviales se extienden por la margen derecha, ya que el cauce fluvial, en la zona de emplazamiento de la presa, discurre por el pie de la abrupta ladera de la margen izquierda, constituida por escarpes rocosos. El depósito aluvial está formado por gravas y bolos redondeados en matriz arenosa, y depósitos de arenas. El espesor detectado en los sondajes e investigación geofísica realizada es de 12,80 m hacia el centro del valle, y de unos 6,50 m en el pie de la margen derecha.

**Fotografía 1-8. Depósitos de alta energía formados por gravas y bolos. Vista hacia aguas arriba.**



#### Depósitos fluviales de baja energía. Cuaternario

Se trata arenas y limos de la terraza aluvial inferior, en la margen derecha, que se han detectado en el sondaje S-AR4, desde la superficie hasta 4 m de profundidad.

#### Depósitos coluviales

Se trata de acumulaciones de suelos a pie de laderas de los relieves del valle, que conectan morfológicamente las fuertes pendientes de ladera con la plana aluvial de fondo del valle.

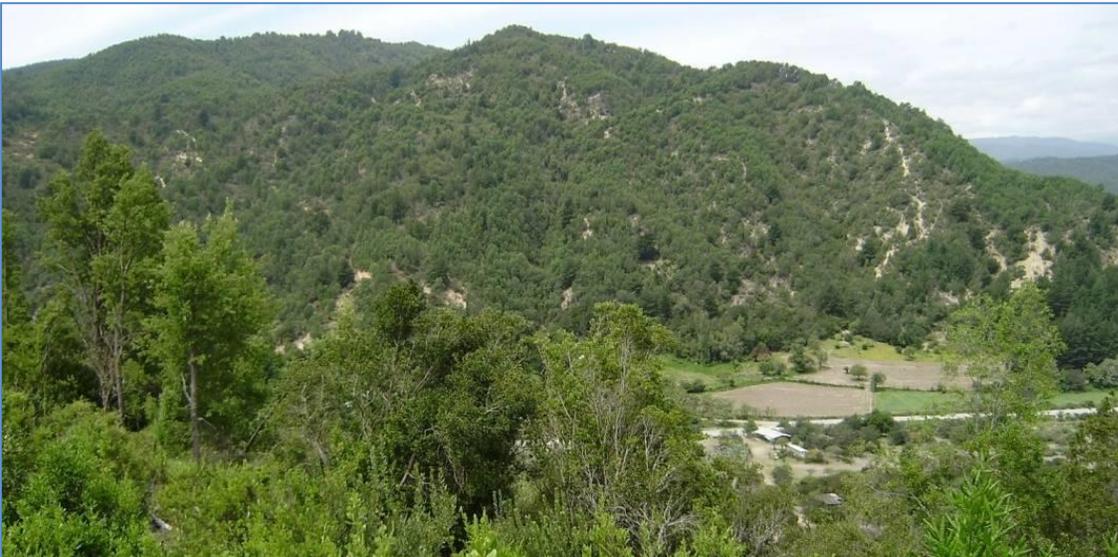
Consisten en materiales de granulometría variable, generalmente brechosos, con clastos y bloques angulosos de las mismas litologías aflorantes en los relieves cuya base ocupan.

En algunos casos, donde presentan gran entidad, como ocurre en la ladera NW del relieve de la margen izquierda del emplazamiento, no puede descartarse que las acumulaciones del sector basal del depósito coluvial, entre las cotas 304 y 318, puedan tener su origen al algún proceso antiguo de remoción en masa. En superficie, y muy especialmente por encima de la cota 318, lo que se observa es una delgada cobertura de suelos coluviales y residuales desarrollada sobre el substrato tobáceo alterado, de baja resistencia.

**Fotografía 1-9. Vista de la plana aluvial y margen izquierda, desde la margen derecha.**



**Fotografía 1-10. Vista de la margen derecha**



1.7.1.3. RQD obtenido en sondajes

**Tabla 1-26. % RQD obtenido en sondajes. (Fuente TYP SA).**

Sondaje	Profundidad (m)	Litología	RQD (%)
S-AR1	0,00 – 10,50	Tobas andesíticas GM IV-V	0
S-AR1	10,50–14,00	Tobas andesíticas GM- III-IV	40-80
S-AR1	14,00–18,00	Toba andesítica GM II-III	20-60
S-AR1	18,00–24,40	Toba andesítica GM III	0-40
S-AR1	24,40- 30,00	Andesita afanítica GM II-III	40-70
S-AR2	0,00-16,40	Limos y Arcillas (Fm la Montaña)	
S-AR2	16,40-44,00	Gravas y bolones en matriz limo-arcillosa (FM la Montaña)	
S-AR3	0,00 - 12,80	Depósito fluvial de fondo de valle. Gravass rodadas y bolones	
S-AR3	12,80–20,50	Rocas andesíticas GM-III-IV	0 - 70
S-AR3	20,50–32,00	Rocas andesíticas GM II	40 - 100
S-AR4	0,00 – 4,00	Depósito fluvial limo-arenoso	
S-AR4	4,00 – 7,60	Depósito fluvial de gravas rodadas y bolones	
S-AR4	7,60 – 14,50	Rocas andesíticas GM-III	25 - 70
S-AR4	14,50 – 16,00	Roca andesítica GM III-IV	0
S-AR4	16,00-21,50	Aglomerado volcánico GM II-III	40 - 70
S-AR4	21,50–25,60	Roca andesítica tectonizada y fracturada GM-IV	0
S-AR4	25,60–30,40	Andesita porfídica GM - II	40 -90

### Sondaje S-AR1.

En este sondaje el RQD es del 0 % desde la cota 0 hasta la cota 10,50 m, aunque a partir de 9 m se aprecia una disminución de la fracturación con un pequeño tramo entre 9 y 10 con el RQD del 30 %. Desde 10,50 m hasta 14,00 m la fracturación del macizo disminuye con un RQD variable del 40 al 80 %. A continuación, desde 14,00 m hasta 18,00 m la fracturación se incrementa de forma que disminuye el RQD hasta un 20 % con algunas zonas menos fracturadas intermedias entre el 40 y el 60 %. A continuación, se detecta otro tramo muy fracturado entre 18,00 y 24,40 m, con un RQD máximo del 40 % y zonas de RQD del 0% totalmente fracturadas. El último tramo diferenciado, desde 24,40 m hasta 30,00 m presenta una fracturación media, con un RQD entre el 40 % y el 70 %, salvo un zona entre 26,40 y 27,00 m donde ha sido del 0 %. Por tanto, el macizo rocoso en la margen izquierda a partir de 24,40 m de profundidad presenta una calidad media.

### Sondaje S-AR2.

Este sondaje se desarrolla en su totalidad en la formación La Montaña formada por suelos.

### Sondaje S-AR3.

Este sondaje desde la cota 0 hasta 12,80 m se desarrolla en suelos. Desde 12,80 m hasta 20,50 m presenta un RQD máximo del 70 % pero tiene varias zonas con intensa fracturación y RQD del 0 % entre 13,00 -13,80 m, 15,00 -16,00 y 20,20 -20,60 m. Estos tramos tienen asociados zonas algo fracturadas con un RQD del 20-30 %. El siguiente tramo diferenciado se extiende desde 20,50 m a 32 m y presenta una disminución general de la fracturación con un RQD variable desde 40 al 100 %, coincidiendo con una disminución del grado de meteorización del macizo. Por tanto en el fondo de valle se estima que el macizo rocoso presenta una calidad media a partir de 20,50 m de profundidad.

### Sondaje S-AR4.

Este sondaje presenta suelos desde 0 a 7,60 m de profundidad. De 7,60 a 14,50 m presenta un RQD del 25 al 70 % con una zona de RQD del 0 % entre 11,40 y 11,70. De 14,50 a 16,00 se ha detectado una zona muy fracturada con un RQD del 0 %. De 16,00 a 21,50 m la fracturación disminuye con un RQD entre el 40 y el 70 %. De nuevo se ha detectado un tramo extenso, totalmente fracturado con un RQD del 0%, entre 21,50 y 25,60 m. El último tramo se extiende desde 25,60 a 30,40 m y presenta un RQD que se incrementa del 40 al 90 % según aumenta la profundidad. Por tanto se estima que en la margen derecha, a partir de 27,50 m el substrato rocoso es de calidad media-alta.

#### 1.7.1.4. Estructura del macizo rocoso

Para el estudio de la estructura geológica del emplazamiento de la Recova, se han tomado 46 estaciones geomecánicas y/o puntos de lectura, con un total de 114 medidas estructurales de diaclasas, no habiéndose detectado ninguna falla en el entorno. Para su análisis se ha empleado el programa CALEST desarrollado por TYPESA, y se han establecido tres sectores geográficos distintos afectados por las distintas familias de diaclasas, la margen derecha, la zona central y la margen izquierda. Si bien como se verá a continuación, existen algunos sistemas dominantes o con variaciones locales y otros sistemas más caóticos y localizados en puntos concretos.

El análisis ha revelado cuatro sistemas de diaclasas principales, coincidentes en los tres sectores analizados. Estos sistemas son (indicados en dirección de manto y ángulo de manto):

**Tabla 1-27. Sistemas principales de diaclasas en el emplazamiento de la Recova. Fuente TYPASA.**

Sistema	Tipo de plano	Margen derecha		Zona central		Margen izquierda	
		Dirección de manto	Ángulo de manto	Dirección de manto	Ángulo de manto	Dirección de manto	Ángulo de manto
J1	Diaclasa	289°	26°	276°	27°	332°	26°
J2	Diaclasa	284°	78°	219°	73°	193°	77°
J3	Diaclasa	160°	70°	136°	72°	151°	60°
J4	Diaclasa	065°	80°	062°	73°	075°	73°
J5	Diaclasa	024°	86°	328 <sup>a</sup>	70°	120°	79°
J6	Diaclasa			131°	31°		

El sistema J1 presenta gran continuidad y espaciado decimétrico a métrico.

El sistema J2, subvertical, tiene continuidad media y espaciado decimétrico a métrico.

El sistema J3, tiene continuidad media y espaciado decimétrico a métrico.

El sistema J4, es también subvertical y de espaciado centimétrico.

Los sistemas J5 y J6 son ocasionales y dependen del sector en concreto donde se han medido.

#### 1.7.1.5. Análisis de la napa de agua

A continuación se presenta una tabla con el resumen de los niveles de agua medidos al finalizar los sondeos:

**Tabla 1-28. Resumen niveles de agua medidos. (Fuente TYPASA).**

Fecha	Sondeo	Prof. Agua (m)	Situación
01-04-13	S-AR1	Seco	Estribo izquierdo
08-04-13	S-AR2	16,10*	Zona alta en margen izquierda valle
25-03-13	S-AR3	4,30	Fondo de valle
13-03-13	S-AR4	7,60	Pie de la margen derecha

\*Puede tratarse de la misma agua de perforación retenida en el taladro por finos de la Fm La Montaña

Los niveles medidos confirman que, en las profundidades reconocidas, solo existe napa de agua en el fondo de valle, coincidente aproximadamente con el nivel de fluctuación del nivel de agua del río.

#### 1.7.1.6. Permeabilidad del substrato en el emplazamiento

Se han realizado 4 ensayos tipo Lefranc y 7 ensayos tipo Lugeon en los sondajes realizados en el emplazamiento de la Recova. Los ensayos de permeabilidad realizados, han arrojado resultados muy variables, por otro lado, habituales en medios rocosos de origen volcánico, debido precisamente a su característica variabilidad en litologías y fracturación. En bastantes tramos de ensayo, no se ha conseguido alcanzar la presión requerida, lo que se debe, probablemente a diferentes causas:

- **Fallo en la obturación** (el agua contornea el packer y sale por la boca del sondaje), lo que parece haber ocurrido en tres de los ensayos realizados. Generalmente asociado a la presencia de fracturación subvertical, que conecta el tramo ensayado con la zona superior del taladro.
- **Hidrofracturación** (rotura de diaclasas y pérdida repentina de la presión), ocurrida en uno de los ensayos realizados.
- **Elevada permeabilidad del tramo**, que impide alcanzar la presión con el máximo caudal suministrado por la bomba (>100 l / min) situación que se atribuye a uno de los ensayos realizados.

Los resultados obtenidos en todos los ensayos de permeabilidad, realizados hasta el momento, se presentan en el Anexo nº 5. Los valores obtenidos se resumen en el cuadro adjunto:

---

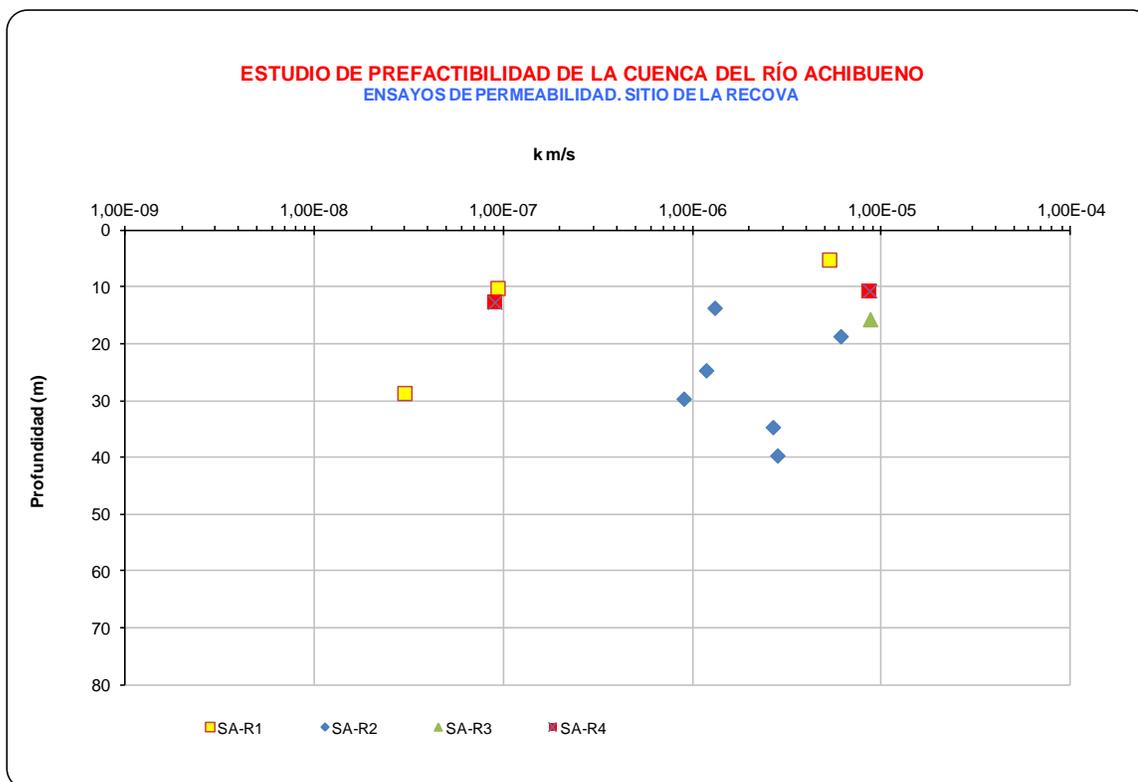
***Tabla 1-29. Resumen de los ensayos de permeabilidad realizados en la Recova. Fuente TYP SA.***

**7419 ESTUDIO PREFACTIBILIDAD, MEJORAMIENTO DE LA CUENCA DEL RIO ACHIBUENO (CHILE)**

Sondeo	cota sondeo	EMPLAZAMIENTO	Tipo	Ref. ensayo	Desde (m)	Hasta (m)	Longitud (m)	Formación	k (m/s)	Cota ensayo	Prof. Media (m)	-log (k)
S-AR1	376	LA RECOVA	LEFRANC	1	4,50	5,50	1,00	TOBAS	5,28E-06	371,00	5,00	5,28
S-AR1	376	LA RECOVA	LEFRANC	2	9,50	10,50	1,00	TOBAS	9,32E-08	366,00	10,00	7,03
S-AR1	376	LA RECOVA	LUGEON	3	11,00	16,00	5,00	ANDESITAS	E-FALLIDO	362,50	13,50	
S-AR1	376	LA RECOVA	LUGEON	4	20,00	25,00	5,00	ANDESITAS	E-FALLIDO	353,50	22,50	
S-AR1	376	LA RECOVA	LUGEON	5	27,00	30,00	3,00	ANDESITAS	3,00E-08	347,50	28,50	7,52
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	1	13,00	14,00	1,00	FM LA MONTANA	1,31E-06	470,50	13,50	5,88
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	2	18,00	19,00	1,00	FM LA MONTANA	6,07E-06	465,50	18,50	5,22
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	3	24,00	25,00	1,00	FM LA MONTANA	1,18E-06	459,50	24,50	5,93
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	4	29,00	30,00	1,00	FM LA MONTANA	8,99E-07	454,50	29,50	6,05
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	5	34,00	35,00	1,00	FM LA MONTANA	2,86E-06	449,50	34,50	5,58
S-AR2	484	LA RECOVA	LEFRANC	6	39,00	40,00	1,00	FM LA MONTANA	2,81E-06	444,50	39,50	5,55
S-AR3	301	LA RECOVA	LEFRANC	1	15,00	16,00	1,00	ANDESITAS	8,69E-06	285,50	15,50	5,06
S-AR3	301	LA RECOVA	LUGEON	2	20,00	25,00	5,00	ANDESITAS	E-FALLIDO	278,50	22,50	
S-AR3	301	LA RECOVA	LUGEON	3	27,00	32,00	5,00	ANDESITAS	E-FALLIDO	271,50	29,50	
S-AR4	310	LA RECOVA	LEFRANC	1	10,00	11,00	1,00	ANDESITAS	8,64E-06	299,50	10,50	5,06
S-AR4	310	LA RECOVA	LUGEON	2	10,00	15,00	5,00	ANDESITAS	9,00E-08	297,50	12,50	7,05
S-AR4	310	LA RECOVA	LUGEON	3	25,60	30,40	4,80	ANDESITAS	E-FALLIDO	282,00	28,00	

Nº Datos	17
Valor medio	3,15E-06
Valor máximo	8,69E-06
Valor mínimo	3,00E-08
Desv. Estándar	3,23E-06

**Figura 1-16. Permeabilidad/ profundidad sondeos. (Fuente TYPSA).**



#### 1.7.1.7. Geología y permeabilidad del vaso

Desde las primeras fases del estudio, se ha considerado cierto riesgo asociado a la posible permeabilidad de la margen izquierda del vaso, donde aparecen materiales plio-cuaternarios poco consolidados de la Fm Montaña, con cierto porcentaje, variable, de gravas redondeadas de origen presumiblemente fluvioglacial.

El riesgo parecía especialmente importante a lo largo de los primeros 1,5 a 2 km de margen izquierda del vaso, debido a la proximidad del Estero Las Minas, cuyo cauce dista, en planta, unos 800 m del cauce del Achibueno, en su zona más cercana, y se encuentra a solamente unos 20 o 30 m por encima de la cota de fondo de éste último.

Sin embargo, en los reconocimientos geológicos de superficie, realizados en las distintas fases del estudio, se ha observado la presencia de tobas alteradas a lo largo de la margen izquierda, en el entorno del paraje denominado Coigue, que alcanzan desde el fondo del valle hasta alrededor de la cota 400, aproximadamente a cota de coronación de la presa, y parecen presentar continuidad con los afloramientos tobáceos estudiados en la margen izquierda del emplazamiento de la presa. En estas condiciones, los riesgos de permeabilidad a través de los materiales de la Fm Montaña, estarían prácticamente ausentes en la zona de mayor proximidad del Estero Las Minas.

**Fotografía 1-11. Aspecto del substrato tobáceo alterado en la zona de Coigue**



No obstante, dada la presumible presencia de materiales de la Fm Montaña, en otras zonas de la margen izquierda del vaso, se han realizado dos perforaciones, con sus correspondientes ensayos, para determinar su permeabilidad. Dada la variabilidad de los materiales de la Fm Montaña, con variaciones en la composición de la matriz, de arcillo-limosa a limo-arenosa, se han seleccionado dos tramos, uno superior, en coronación del relieve, y otro basal, en el área de Coigue, para reconocer los primeros metros de su contacto con el substrato tobáceo infrayacente.

El sondaje S-AR2, se ha realizado en la coronación de la margen izquierda, en la loma del Membrillo, a unos 1.000 m aproximadamente aguas arriba del posible eje de presa., con objeto de conocer la permeabilidad de los materiales de la Fm Montaña, que pudieran afectar al vaso.

Los ensayos de permeabilidad, tipo Lefranc, realizados en el sondaje S-AR2 han dado los siguientes resultados:

Lefranc-1. Tramo de 13,00 a 14,00 m sobre arcillas arenosas y arenas, se ha obtenido una  $k = 1,31E-06$  m/s.

Lefranc-2. Tramo de 18,00 a 19,00 m, sobre gravas con algo a bastante arcilla, se ha obtenido una  $k = 6,1E-06$  m/s.

Lefranc-3. Tramo de 24,00 a 25,00 m, sobre gravas con algo a bastante arcilla, se ha obtenido una  $k = 1,2E-06$  m/s.

Lefranc-4. Tramo de 29,00 a 30,00 m, gravas con algo a bastante arcilla, se ha obtenido una  $k = 9,0E-07$  m/s.

Lefranc-5. Tramo de 34,00 a 35,00 m, gravas y bolos en matriz arcillo-limosa, se ha obtenido una  $k = 2,7E-06$  m/s.

Lefranc-6. Tramo de 39,00 a 40,00 m, gravas y bolos con algo a bastante limo y arcilla, se ha obtenido  $k = 2,8E-06$  m/s.

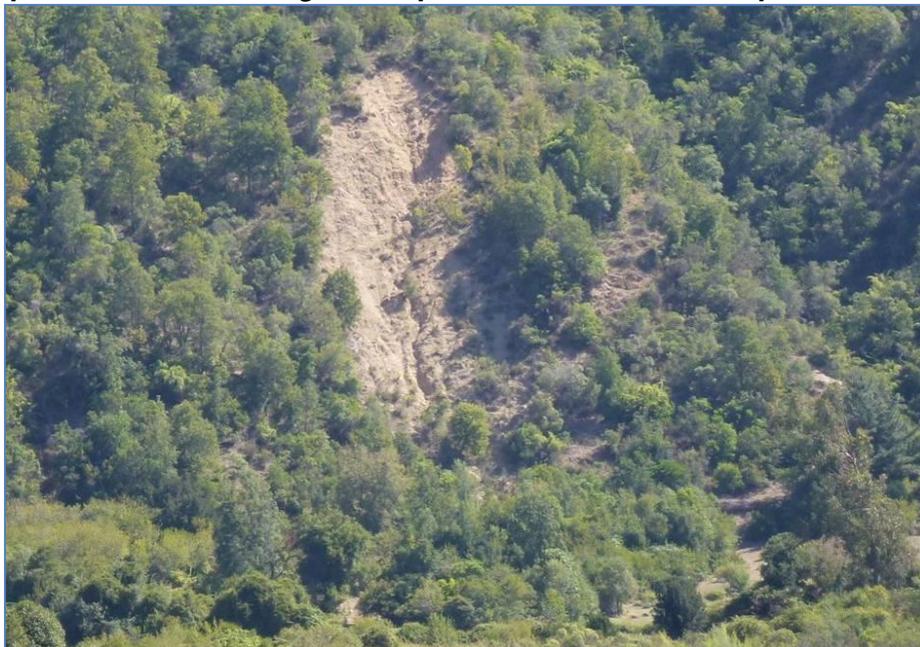
Por otra parte, dada la geometría de la loma donde apoya el estribo izquierdo de la presa, no puede descartarse el riesgo de contorneo de dicho estribo, por el agua del embalse, con salida aguas abajo, a la terraza aluvial del Achibueno, por lo que la pantalla de inyecciones de impermeabilización, deberá extenderse hacia el SO, al menos unos 100 - 150 m más allá del estribo de la presa.

#### 1.7.1.8. Riesgos geológicos por fallas en la zona de inundación.

Respecto a la estabilidad de las laderas del vaso, si descartamos algún pequeño deslizamiento muy superficial, en las tobas alteradas en tramo de ladera de pendiente especialmente verticalizada (ver fotografía adjunta), no se observan deslizamientos importantes ni acumulaciones de suelo de entidad suficiente para suponer riesgos de estabilidad de laderas en las oscilaciones de nivel de agua correspondientes al llenado y explotación del embalse.

Dada la fuerte pendiente de laderas, en materiales tobáceos, no es de esperar un gran espesor de alteración que haya transformado el macizo rocoso en suelos, que difícilmente resultarían compatibles con laderas tan verticalizadas, por lo que el riesgo de inestabilidades parece limitado a deslizamientos superficiales paralelos de pequeño espesor, que no deben comprometer la seguridad del conjunto presa/embalse. Dado que los materiales de la Fm Montaña, más sensibles a la inestabilidad por el contenido en finos de su matriz, quedan generalmente por encima de la cota de inundación, no se estiman riesgos asociados a los mismos.

***Fotografía 1-12. Pequeño deslizamiento superficial, paralelo al terreno, en suelos residuales (tobas alteradas) en la margen izquierda del vaso de La Recova, en ladera de muy fuerte pendiente. El escarpe de deslizamiento original fue posteriormente erosionado por la escorrentía.***



## 1.7.2. El Montecillo

### 1.7.2.1. Situación

El emplazamiento de presa de este sector del valle se encuentra a unos 3.500 m aguas arriba de la confluencia del estero Pejerreyes con el Achibueno.

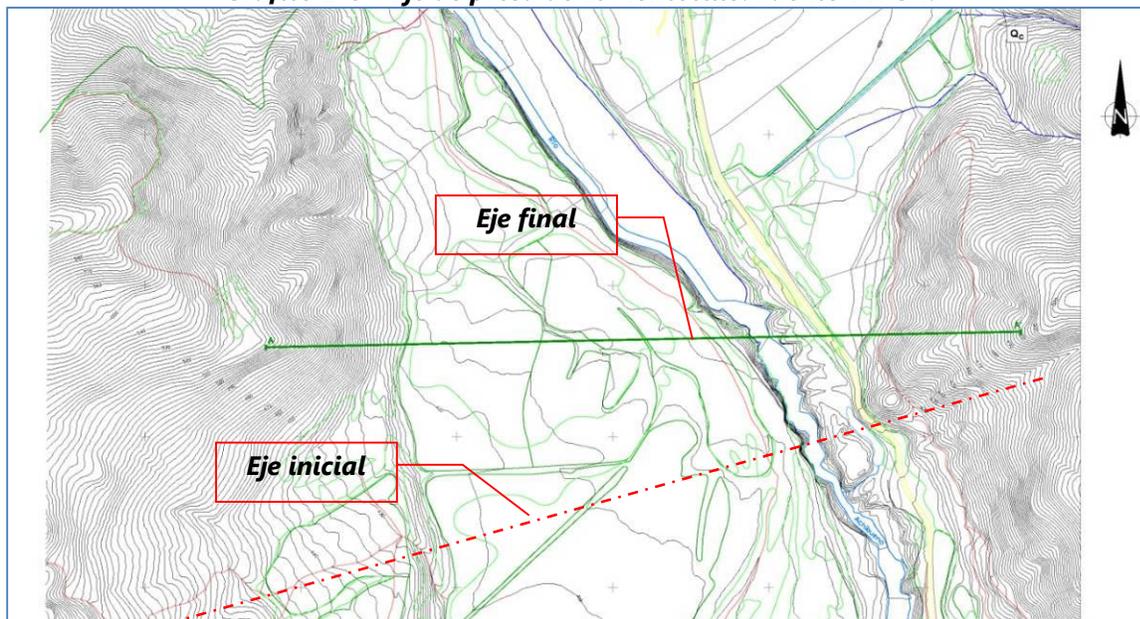
**Tabla 1-30 – El Montecillo. Situación. Fuente TYP SA.**

SITIO	CAUCE	COORDENADAS EJE PRESA				DATUM	HUSO	COTA APROXIMADA (msnm)	
		MARGEN DERECHA		MARGEN IZQUIERDA				FONDO	CORONACIÓN
		X	Y	X	Y	WGS84	19H		
MONTECILLO	Río Achibueno	284.789	6.004.303	283.993	6.003.885	WGS84	19H	400	500

El emplazamiento de El Montecillo corresponde a un posible muro de hasta unos 100 m de altura aproximada y 1.000 m de longitud aproximada en coronación, con empotramiento en roca en la margen derecha y entorno del cauce, que en este tramo discurre encañonado entre afloramientos de roca volcánica sana, de tipo andesítico.

La margen izquierda, por el contrario, presenta, en su zona superior, recubrimientos de materiales fluvio-glaciares y laháricos (Fm La Montaña), que pueden afectar al estribo izquierdo de la presa. Además, estos materiales pliocuaternarios de la Fm Montaña, aparecen también aguas arriba, ocupando parte de la margen izquierda del vaso (sector del Alto del Latiguillo), por lo que se mantienen algunas incertidumbres, tanto respecto a la permeabilidad del terreno, en esta margen del vaso, como a las condiciones de fundación de la presa en la zona superior del estribo izquierdo.

**Gráfico 1-8 – Eje de presa de El Montecillo. Fuente TYP SA.**



**Fotografía 1-13. Vista desde la margen derecha hacia la margen izquierda, aguas arriba del eje de presa.**



**Fotografía 1-14. Vista del cauce, hacia aguas abajo, a la altura del eje de presa.**



**Fotografía 1-15. Vista hacia la margen derecha, desde el borde izquierdo del cauce.**



#### 1.7.2.2. Descripción de las litologías aflorantes

Como se puede observar en las fotografías anteriores, la margen derecha y el lecho del río del emplazamiento de Montecillo, se encuentra sobre roca de buena calidad, predominando el pórfido andesítico. Mientras que en la margen izquierda, como se ha podido comprobar mediante los perfiles geofísicos realizados, hay un nivel de terraza y en la parte baja de la ladera de esta margen se ha reconocido el substrato rocoso, cubierto parcialmente por suelos coluviales de poca entidad, apareciendo por encima, en buena parte de la zona superior, la formación la Montaña con un espesor importante hacia aguas arriba y hacia coronación del relieve, por encima de la presa.

A continuación se describen las litologías diferenciadas:

##### Substrato Rocosos indiferenciado.

Estos materiales volcánicos corresponderían a una serie de transición hacia el tramo con predominio de materiales sedimentarios, ya que estos afloran claramente aguas arriba del emplazamiento, y se han observado en contacto normal, sobreyaciendo a potentes bancos de composición andesítica – basáltica en los afloramientos junto al cauce, de su margen derecha.

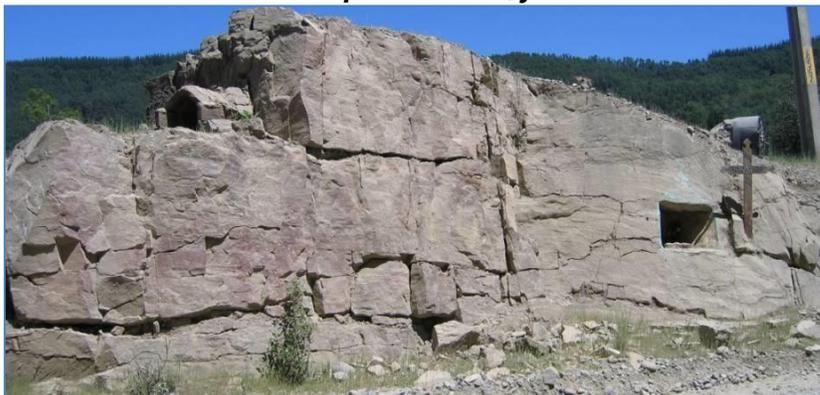
También se han reconocido materiales de origen volcánico en taludes del camino de la margen derecha, y en pequeños afloramientos de la margen izquierda del valle. En las zonas medias de ladera parecen predominar materiales de tipo tobáceo-andesítico, mientras que en los afloramientos por donde discurre el cauce encañonado, aparecen materiales lávicos de predominio andesítico o andesítico-basáltico, en algún caso con marcada disyunción columnar.

Los afloramientos observados en el entorno del cauce, en el desmonte de la pista existente por la margen derecha del valle, y en el pie de ladera de la margen izquierda, corresponden a un predominio de rocas andesíticas de escasa alteración y buenas características resistentes. Sin embargo, la morfología más suave

en las zonas superiores de ladera de ambas márgenes, con ausencia de afloramientos, podrían indicar, especialmente para el caso de la margen derecha, la presencia de un substrato tobáceo de mayor debilidad y alteración, o bien materiales sedimentarios, que afectarían a la zona de apoyo del estribo izquierdo de la presa.

En el estribo derecho, la zona con ausencia de afloramientos, al menos por encima de la cota 480 parece corresponder a la presencia de materiales cuaternarios de la Fm Montaña, que cubren el substrato rocoso en la zona media y alta del relieve de esta margen del valle.

**Fotografía 1-16. Desmorte en rocas de tipo andesítico, junto al camino en la margen derecha**



**Fotografía 1-17. Detalle de disyunción columnar en andesitas, junto al cauce fluvial**



#### Formación La Montaña (Gajardo 1981). Pleistoceno

Se trata de un conjunto de conglomerados, areniscas, limolitas, lapilli y ceniza, débilmente consolidados, de origen fluvial, fluvioglacial y piroclástico. Se han detectado en la margen izquierda por encima del macizo rocoso aflorante en la zona baja del relieve. Está constituida por clastos redondeados a subredondeados de tamaño variable en una matriz limo-arenosa a arcillo-limosa. La estratificación está poco desarrollada, observándose ocasionalmente, capas lenticulares de arenas, limos y cenizas intercaladas entre

conglomerados limo-arcillosos y arenosos. La litología de los clastos corresponde en su mayor parte (80 %) a andesitas, andesitas basálticas y basaltos de características similares a las coladas de lava pertenecientes a la Formación Cola de Zorro. Los clastos de rocas intrusivas, sedimentarias y piroclásticas, no sobrepasan el 20 % de total de clastos.

En el sondeo S-AM1, realizado en la zona alta del relieve del Alto del Latiguillo (cota 580), se han reconocido estos materiales en 57,5 m de espesor, con substrato de basaltos y andesitas, por debajo de la cota 522,5. El registro del sondaje S-AM1 muestra gravas de matriz arcillo-limosa con clastos poligénicos de andesitas, basaltos y alguno de granito, muchos de ellos alterados hasta G IV-V. Intercala niveles de arenas de espesores generalmente decimétricos, destacando un nivel arenoso de espesor métrico entre 9,50 y 12,20 m de profundidad, y otra intercalación de arena con arcilla y limo, entre 17,40 y 18,70 m de profundidad.

En el pie de ladera de la margen izquierda del valle se localiza un pequeño escarpe local por el que se accede a una zona llana constituida por materiales con predominio de finos, con algunos clastos rodados, lo que se interpreta como correspondiente a restos de un antiguo recubrimiento de cenizas edafizadas, conteniendo cantos rodados y bolos pertenecientes a la Fm La Montaña. El espesor total de recubrimiento de suelos sobre el substrato rocoso alcanza en esta margen los 21 m, reconocidos con el sondaje S-AM2.

**Fotografía 1-18. Marcado escarpe en materiales de la Fm La Montaña, en la zona superior del relieve, en margen izquierda, inmediatamente aguas arriba del emplazamiento de Montecillo**



A la altura del eje de presa en esta margen, se interpreta que los materiales de la Fm Montaña pueden aparecer por encima de la cota 450, afectando por tanto al estribo izquierdo de la presa, aunque se mantiene una importante incertidumbre en este aspecto, pudiendo presentar mayor o menor espesor, ya que la zona concreta del estribo no ha podido ser reconocida con sondajes.

### Depósitos de terraza aluvial. Cuaternario

Se han localizado, con gran extensión y reducido espesor, por encima de los afloramientos rocosos del cauce, extendiéndose, por la margen izquierda, hasta el pie de ladera de los relieves de dicha margen, constituyendo una planicie de unos 500 m de anchura. Está constituida por gravas de clastos rodados en matriz arenosa. De acuerdo con los datos de los perfiles de sísmica de refracción realizados, su espesor es del orden de 4 a 10 m a lo largo del posible eje de presa.

También se localizan materiales de terraza aluvial en la margen derecha, donde presentan menor desarrollo, afectando apenas al posible eje de presa. En el sondaje S-AM3, situado ligeramente aguas arriba, se ha reconocido 4 m de gravas redondeadas correspondientes a esta terraza.

#### ***Fotografía 1-19. Detalle de la terraza de la margen izquierda, sobre la roca andesítica del cauce.***



**Fotografía 1-20. Detalle del escarpe, en materiales de la Fm Montaña, existente sobre el borde oeste de la terraza fluvial de la margen izquierda.**



**Fotografía 1-21. Gravas rodadas correspondientes a la terraza de la margen derecha, en el talud de la pista aguas abajo del eje de presa.**



1.7.2.3. RQD obtenido en sondajes

**Tabla 1-31. % RQD obtenido en sondajes.**

Sondaje	Profundidad (m)	Litología	RQD (%)
S-AM1	0,00- 57,50	Gravas y bolos en matriz limo-arcillosa (Fm La Montaña)	
S-AM1	57,50- 62,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM III-II	40-60
S-AM1	62,00- 64,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM III-II	20
S-AM1	64,00-67,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II	40-60
S-AM2	0,00 – 21,00	Gravas y bolos en matriz limo-arcillosa (Fm La Montaña)	
S-AM2	21,00–28,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II-III	20-60
S-AM2	28,50–31,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II-III	0-20
S-AM3	0,00 - 4,00	Gravas y bolos con algo de arena (Depósito fluvial)	
S-AM3	4,00-6,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM III	0-25
S-AM3	6,50- 13,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II-III	60-70
S-AM3	13,50- 16,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II-III	0-70
S-AM3	16,00-20,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II	60-90
S-AM3	20,00-21,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM III	0
S-AM3	21,50-26,50	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II-III	40-100
S-AM3	26,50-27,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM III	0
S-AM3	27,00-30,00	Andesitas porfídicas y afaníticas GM II	100

Sondaje S-AM1.

Este sondaje desde la cota 0 hasta 57,50 m se desarrolla en suelos de la formación La Montaña. De 57,50 a 58,50 presenta un tramo inicial totalmente fracturado en roca con RQD del 0 %. Desde 58,50 m hasta 62 m, presenta un RQD del 40 al 60 %. De 62 a 64 m la fracturación aumenta disminuyendo el RQD hasta el 20 %.

De 64 a 67,50 m el RQD aumenta del 40 al 60 %. Por tanto, el macizo rocoso presenta una calidad media a partir de 64 m de profundidad (cota relativa a boca de sondaje).

#### Sondaje S-AM2.

Este sondaje de 0 a 21 m se desarrolla en suelos de la Fm La Montaña. De 21,00 a 28,50 m presenta un RQD del 20 al 60 %. De 28,50 a 31,50 m el RQD disminuye el 0 al 20 %. Por tanto se considera que el macizo presenta una calidad media a partir de 21 m de profundidad.

#### Sondaje S-AM3.

Este sondaje de 0 a 4 m se desarrolla en suelos. De 4 a 6,50 presenta un RQD de 0 al 20 %. De 6,50 a 13,50 m el RQD aumenta de forma importante del 60 al 70 %. De 13,50 a 16,00 presenta dos zonas fracturadas de RQD 0 % entre un tramo del RQD del 70 %. El siguiente tramo disminuye la fracturación, desarrollándose entre 16,00 y 20,00 m, presentando un RQD del 60 al 90 %. A continuación hay un tramo totalmente fracturado entre 20,00 y 21,50 m. Entre 21,50 y 26,50 m el RQD aumenta desde el 40 al 100 %. De nuevo se ha detectado una zona totalmente fracturada entre 26,50 y 27,00 m con RQD del 0%. De 27,00 a 30,00 m el RQD permanece constante, siendo del 90 %. Por tanto se considera que el macizo rocoso presenta una calidad alta a partir de 27 m.

#### 1.7.2.4. Estructura del macizo rocoso

Para el estudio de la estructura geológica del emplazamiento de Montecillo, se han tomado 22 estaciones geomecánicas en afloramientos, con un total de 56 medidas estructurales de diaclasas, (y una falla local según F1-330°/85°). Para su análisis se ha empleado el programa CALEST desarrollado por TYP SA, y se han establecido tres sectores diferenciados afectados por las distintas familias de diaclasas: la margen derecha, la zona adyacente al cauce por la margen derecha y la margen izquierda. Si bien como se verá a continuación, existen algunos sistemas dominantes o con variaciones locales y otros sistemas más caóticos y localizados en puntos concretos.

El análisis ha revelado tres sistemas de diaclasas principales, coincidentes en los tres sectores analizados por lo que se pueden considerar discontinuidades principales, de carácter "genérico", dada su presencia en todo el emplazamiento del Montecillo.

Los polos medios de los sistemas de diaclasas, tras el análisis en proyección estereográfica, son los siguientes (expresados en dirección de manto y ángulo de manto):

**Tabla 1-32. Sistemas principales de diaclasas del emplazamiento de Montecillo. Fuente TYP SA.**

Sistema	Tipo de plano	Margen derecha		Zona adyacente al cauce por la margen derecha		Margen izquierda	
		Dirección de manto	Ángulo de manto	Dirección de manto	Ángulo de manto	Dirección de manto	Ángulo de manto
<b>J1</b>	Diaclasa	210°	31°	281°	31°	320°	40°
<b>J2</b>	Diaclasa	029°	82°	052°	81°	241°	81°
<b>J3</b>	Diaclasa	282°	77°	280°	89°	353°	70°
<b>J4</b>	Diaclasa			005°	82°	124°	54°
<b>J5</b>	Diaclasa			144°	80°		

**Tabla 1-32. Sistemas principales de diaclasas del emplazamiento de Montecillo. Fuente TYP SA.**

Sistema	Tipo de plano	Margen derecha		Zona adyacente al cauce por la margen derecha		Margen izquierda	
		Dirección de manto	Ángulo de manto	Dirección de manto	Ángulo de manto	Dirección de manto	Ángulo de manto
<b>F1</b>	Falla			330°	85°		

El sistema J1/E es el plano que parece corresponder a los planos de estratificación de materiales sedimentarios que aparecen por encima del volcánico. Se trata de un sistema de gran continuidad y espaciado decimétrico a métrico.

El sistema J2, subvertical tiene gran continuidad y espaciado decimétrico a métrico.

El sistema J3, tiene continuidad media y espaciado decimétrico a métrico.

Los sistemas J4 y J5 son ocasionales y dependen del sector en concreto.

La Falla F1 tiene un carácter muy local, afectando al macizo rocoso únicamente en el entorno inmediato de la zona donde fue detectada.

#### 1.7.2.5. Análisis de la napa de agua

A continuación se presenta una tabla con el resumen de los niveles de agua medidos al finalizar los sondeos:

**Tabla 1-33. Resumen niveles de agua medidos. (Fuente TYP SA)**

Fecha	Sondeo	Prof. Agua (m)	Situación
29-05-13	S-AM1	Seco	Zona alta relieve margen izquierda
05-05-13	S-AM2	5,10	Pie margen izquierda
13-04-13	S-AM3	12,40	Pie margen derecha

Los niveles medidos confirman que, en las profundidades reconocidas, solo existe napa de agua en el fondo de valle, coincidente aproximadamente con el nivel de fluctuación del agua del río.

#### 1.7.2.6. Permeabilidad del substrato en el emplazamiento

En los tres sondajes perforados, para reconocimiento del terreno, en el emplazamiento de El Montecillo, se han realizado un total de 22 ensayos de permeabilidad. De estos ensayos 14 han sido del tipo Lefranc, 10 de ellos en materiales cuaternarios de la Fm Montaña (sondaje S-AM-1) y 4 en materiales de la extensa terraza fluvial de la margen izquierda (sondaje S-AM2). En el substrato rocoso andesítico, se han realizado un total de 8 ensayos Lugeon (2 en el sondaje S-AM-1, 2 en el sondaje S-AM2 y 4 en el sondaje S-AM3). Dos de los ensayos Lugeon realizados, en el sondaje S-AM3, han sido fallidos, generalmente debido al bypass del packer, con salida de agua por la boca del sondaje, debido probablemente a la existencia de fracturación subvertical que conecta el tramo de ensayo con la zona superior del sondaje.

Los resultados obtenidos en los ensayos se resumen en el cuadro adjunto:

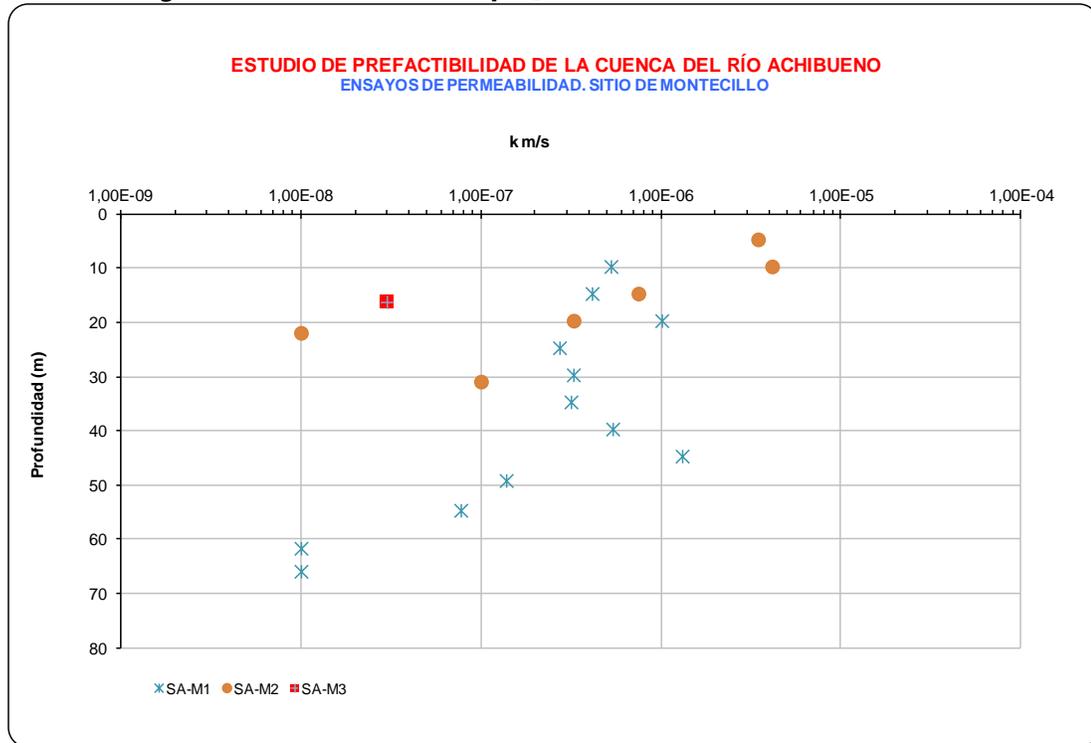
**Tabla 1-34. Resumen de los ensayos de permeabilidad realizados en Montecillo. Fuente TYP SA**

7419 ESTUDIO PREFACTIBILIDAD. MEJORAMIENTO DE LA CUENCA DEL RIO ACHIBUENO (CHILE)												
Sondeo	cota sondeo	EMPLAZAMIENTO	Tipo	Ref. ensayo	Desde (m)	Hasta (m)	Longitud (m)	Formación	k (m/s)	Cota ensayo	Prof. Media (m)	-log (k)
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	1	9,00	10,00	1,00	FM LA MONTAÑA	5,27E-07	570,50	9,50	6,28
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	2	14,00	15,00	1,00	FM LA MONTAÑA	4,14E-07	565,50	14,50	6,38
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	3	19,00	20,00	1,00	FM LA MONTAÑA	1,01E-06	560,50	19,50	6,00
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	4	24,00	25,00	1,00	FM LA MONTAÑA	2,73E-07	555,50	24,50	6,56
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	5	29,00	30,00	1,00	FM LA MONTAÑA	3,26E-07	550,50	29,50	6,49
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	6	34,00	35,00	1,00	FM LA MONTAÑA	3,16E-07	545,50	34,50	6,50
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	7	39,00	40,00	1,00	FM LA MONTAÑA	5,39E-07	540,50	39,50	6,27
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	8	44,00	45,00	1,00	FM LA MONTAÑA	1,31E-06	535,50	44,50	5,88
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	9	48,50	49,50	1,00	FM LA MONTAÑA	1,38E-07	531,00	49,00	6,86
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LEFRANC	10	54,00	55,00	1,00	FM LA MONTAÑA	7,72E-08	525,50	54,50	7,11
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LUGEON	11	60,00	63,00	3,00	ANDESITAS	1,00E-08	518,50	61,50	8,00
S-AM1	580	EL MONTECILLO	LUGEON	12	64,00	67,50	3,50	ANDESITAS	1,00E-08	514,25	65,75	8,00
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LEFRANC	1	4,00	5,00	1,00	DEPOSITO FLUVIAL	3,46E-06	420,50	4,50	5,46
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LEFRANC	2	9,00	10,00	1,00	DEPOSITO FLUVIAL	4,14E-06	415,50	9,50	5,38
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LEFRANC	3	14,00	15,00	1,00	DEPOSITO FLUVIAL	7,49E-07	410,50	14,50	6,13
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LEFRANC	4	19,00	20,00	1,00	DEPOSITO FLUVIAL	3,27E-07	405,50	19,50	6,49
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LUGEON	5	21,00	22,50	1,50	ANDESITAS	1,00E-08	403,25	21,75	8,00
S-AM2	425	EL MONTECILLO	LUGEON	6	30,00	31,50	1,50	ANDESITAS	1,00E-07	394,25	30,75	7,00
S-AM3	408	EL MONTECILLO	LUGEON	1	7,50	12,50	5,00	ANDESITAS	E. FALLIDO	398,00	10,00	
S-AM3	408	EL MONTECILLO	LUGEON	2	13,50	18,60	5,10	ANDESITAS	3,00E-08	391,95	16,05	7,52
S-AM3	408	EL MONTECILLO	LUGEON	3	18,50	23,00	4,50	ANDESITAS	E. FALLIDO	387,25	20,75	
S-AM3	408	EL MONTECILLO	LUGEON	4	23,00	28,00	5,00	ANDESITAS	E. FALLIDO	382,50	25,50	

Nº Datos	22
Valor medio	7,25E-07
Valor máximo	4,14E-06
Valor mínimo	1,00E-08
Desv. Estándar	1,14E-06

**Figura 1-17. Permeabilidad/profundidad sondeos, (Fuente TYPASA).**



#### 1.7.2.7. Riesgos geológicos por fallas en la zona de inundación.

Respecto a la estabilidad de las laderas del vaso, hay que señalar la presencia de materiales no consolidados de la Fm La Montaña, en algunos tramos de la margen izquierda del embalse, que serán sometidos a saturación en el llenado del embalse. Dada la fuerte pendiente que presenta generalmente este relieve, no pudo descartarse cierto riesgo de inestabilidad de laderas en las oscilaciones de nivel de agua correspondientes al llenado y explotación del embalse, especialmente en situación de desembalse rápido, y en el caso más desfavorable si se combina la concurrencia de desembalse rápido y sismo.

En la fase de Estudio de Factibilidad, deberá realizarse una evaluación más concreta de este riesgo, determinando espesores de suelos y pendientes dentro de la zona inundable del embalse. La presencia de algún importante escarpe de derrumbe, en los materiales de la Fm La Montaña, como el que se observa en la Fotografía 1-18 de este documento, indica la posibilidad de ocurrencia de remociones en masa de cierta entidad, que resultarían más probables en la posible situación hipotética de presencia de zonas saturadas en la matriz limo-arcillosa de la Fm Montaña, que pudieran quedar colgadas sobre el nivel de embalse, con condiciones estabilidad muy críticas. La minoración de este posible riesgo puede requerir actuaciones de retaluzado, drenaje etc, de la pendiente natural en algún punto o tramo de ladera especialmente problemático.

### 1.7.3. Riesgo por volcanismo en el valle del Achibueno

El presente apartado se ha basado, principalmente, en el documento "Evaluación Preliminar de peligros del Volcán Nevado de Longaví" realizado por J.A. Naranjo (2001) para el estudio de factibilidad del embalse de Longaví realizado por EDIC, y analizado dentro de los Antecedentes del presente estudio.

El peligro volcánico de los emplazamientos planteados en el valle del río Achibueno viene dado por la presencia del volcán Nevado Longaví situado a unos 33 y 24 km de distancia aproximadamente hacia el sureste de los ejes de presas de la Recova y Montecillo respectivamente. Este volcán, cuya altura alcanza los 3.242 m.s.n.m no presenta registros de actividad eruptiva reciente, aunque muestra evidencias de actividad explosiva en un periodo de pocos miles de años.

Según Naranjo (2001), "el peligro potencial más gravitante sería la generación de lahares poco voluminosos, pero con olas de caudales punta del orden de los 10.000 m<sup>3</sup>/s en la confluencia de los ríos Blanco y Longaví, principalmente del colapso de represamientos causados por obstrucciones del sistema de drenaje que apunta hacia el río Longaví".

La caída de piroclastos es el peligro de mayor alcance directo de una erupción debido a la dispersión provocada por el viento. La dispersión de la unidad pómez del volcán Longaví tuvo una dirección típica hacia el sureste, la cual corresponde al sentido de los vientos geostróficos predominantes para los Andes Chilenos. En circunstancias climáticas excepcionales se podrían producir dispersiones al este y NNE.

Por otra parte en el valle del río Achibueno no se han detectado depósitos laháricos y salvo la posible presencia de los mismos, pero geológicamente más antiguos, intercalados entre la formación la Montaña. En todo caso, parece que la distancia al volcán es lo suficientemente alejada para minorar los posibles flujos de detritos volcánicos, flujos de lava o caída de piroclastos sobre los embalses planteados. Se han detectado mantos de cenizas y lapilli, cubriendo el substrato en algunos sectores del valle, por lo que parece que la mayor probabilidad de ocurrencia es la de caída de cenizas, aunque los vientos dominantes parecen, en todo caso, no implicar un alto riesgo para la zona del Achibueno frente a este evento.

Por tanto, los antecedentes analizados, indican que el valle del Achibueno corresponde a un sector de muy baja o nula recurrencia de flujos de detritos volcánicos distales de origen lahárico. Solamente una erupción catastrófica y muy compleja, lo que solo ha ocurrido en un lapso de miles de años, podría tener alguna influencia en forma de depósitos de tefra.

## 1.8. ESTUDIO DE MATERIALES

El objetivo principal de la investigación de materiales es obtener la suficiente información sobre estos, para satisfacer las necesidades de su utilización en función de la alternativa y del tipo de presa que se considere. En este sentido, debe procederse de una manera secuencial adecuada al progresivo conocimiento de la geotecnia de los emplazamientos seleccionados, optimizando el coste y plazo de la investigación.

El presente estudio de materiales se ha enfocado principalmente dentro de los vasos o zonas inundables de los emplazamientos de presa propuestos, con el fin de evitar la necesidad de expropiaciones adicionales a las del propio embalse, evitar la afección medioambiental y disminuir los costes por transporte de los materiales desde sus zonas de extracción a la zona de emplazamiento. Asimismo, aunque de manera menos significativa, las excavaciones en las zonas de vaso aumentarían la capacidad de los embalses.

Las necesidades de material se diferencian en función de la tipología de presa y por la zonación de la misma: núcleo impermeable o pantalla, espaldones, filtros, drenes y protección contra oleaje (rip-rap).

Debido a las características de los sitios de presa seleccionados y aunque en la presente fase de estudio, la tipología de presa no se encuentra aún definida, se han estudiado los siguientes tipos de material enfocados a las opciones de presa más razonables, tanto técnica como económicamente:

- Materiales impermeables
- Materiales granulares para espaldones, para filtros y drenes, agregados de hormigón y cuerpo de presa de grava.
- Escollera para espaldones, escollera de protección (rip-rap) o cuerpo de presa

Se ha establecido una campaña de calicatas diferenciada dentro de los dos vasos de las alternativas de presa seleccionadas con el fin de caracterizar los materiales existentes.

#### 1.8.1. Materiales impermeables

Se han estudiado y muestreado los materiales más finos de la Formación La Montaña, únicos con suficiente porcentaje limo-arcilloso en su matriz, para resultar adecuados a este fin. Se han reconocido fundamentalmente en la margen izquierda de ambos emplazamientos.

En la inspección de campo de las calicatas y el sondaje S-AM1, realizado en el emplazamiento de Montecillo en la margen izquierda, se ha reconocido el carácter limo-arcilloso de la matriz de esta unidad, lo que podría indicar su aptitud, obviamente previa selección y cribado de la fracción granular gruesa, para constituir un núcleo impermeable de presa. Para valorar su posible aptitud como material impermeable (núcleo de muros de materiales locales), se han realizado ensayos de identificación, (granulometría y plasticidad), y compactación Próctor, etc. Los materiales provenientes de la formación Montaña han presentado una proporción media de finos del 47 %, con un valor máximo del 96 % y un valor mínimo del 9 % siendo la desviación estándar del 22 %.

El límite líquido promedio ha sido de 42, con un valor máximo de 51 y un valor mínimo de 9. El índice de plasticidad promedio ha sido de 12, con un valor máximo de 20 y un mínimo de 3. De las 10 muestras ensayadas 4 han resultado No Plásticas.

Por tanto, según el gráfico de Casagrande, se clasificarían como ML-OL, limos inorgánicos u orgánicos poco plásticos. En el ensayo Próctor Modificado que se ha realizado, se ha obtenido una humedad óptima de 18 %, y densidad máxima de 19,5 kN/m<sup>3</sup>. El índice CBR obtenido, sobre muestra compactada al 95% P.M., ha sido de 14,7. Dado significativo porcentaje de gravas y arenas, así como la baja plasticidad de las muestras, y especialmente la variabilidad composicional, estos materiales no parecen muy favorables para su empleo como núcleo impermeable.

Además, por los reconocimientos geológicos de superficie y mediante sondajes y calicatas realizados en esta Formación, parece complicado, dada la variabilidad composicional de la matriz, en diferentes zonas y tramos, que pueda delimitarse un área con suficiente homogeneidad y volumen para justificar su explotación y aprovechamiento.

### 1.8.2. Materiales granulares

Los materiales granulares para espaldones, filtros, drenes, agregados para hormigón y cuerpo de presa de grava, se han estudiado dentro del vaso en ambas alternativas.

Se trata de los abundantes depósitos de gravas de clastos rodados y bolones que ocupan el fondo de valle a lo largo de los vasos de los potenciales embalses.

Existe una gran heterogeneidad de tamaños en forma de bolones, gravas y arenas de distintas litologías predominantes, de tipo granítico, andesítico y basáltico, y menos abundantes de tipo intrusivo (granitos, dioritas). En general, las propiedades resistentes de estas litologías son muy altas, dada su completa ausencia de alteración. Son excelentes materiales para, previo cribado y machaqueo, obtener las granulometrías artificiales necesarias para agregados de hormigones, filtros y drenes.

También pueden contemplarse, en estado natural, para constitución de cuerpo de presa de tipo CFGD (se ha utilizado con éxito en la Presas chilenas de Santa Juana, Puclaro y El Bato)

Así mismo, mediante adición de cemento y compactación, las arenas y gravas de los potentes depósitos aluviales presentes en los vasos de ambas alternativas, pueden utilizarse para la construcción de una presa de tipo Hardfill, con pantalla de hormigón.

Finalmente, la opción elegida ha sido la de Presa tipo CFGD, con cuerpo de pera de material aluvial, gravas arenosas compactadas y pantalla impermeable de hormigón armado.

De acuerdo a la experiencia constructiva de estas presas chilenas, el material aluvial puede colocarse mayoritariamente sin procesar, en estado natural, y se añaden los materiales rocosos procedentes de la construcción de obras de fábrica, túnel de desvío del río y caminos.

Además de la capa de apoyo de la pantalla de hormigón, que debe ser de tipo 2A (suelos granulares finos no cohesivos) y de la capa de transición, de tipo 2B, que debe servir de filtro a la anterior, el grueso del cuerpo de presa presentará básicamente dos zonas:

- El cuerpo del espaldón de aguas arriba presentará una composición de material grueso de la mejor calidad (3A) con contenido en finos menores del 5% y tamaño máximo inferior a 2/3 de la altura de tongada de compactación. Previsiblemente el tamaño máximo de bolo será del orden de 30 – 40 cm
- En el cuerpo del espaldón de aguas abajo, que admite condiciones menos estrictas podrá englobar el rechazo del material anterior y compactarse en tongadas más gruesas, lo que permitirá tamaños máximos de bolos cercanos al metro, muy escasos en el depósito aluvial del valle.

**Fotografía 1-22. Depósito aluvial de cauce (gravas, arenas y bolones) en el vaso de La Recova.**

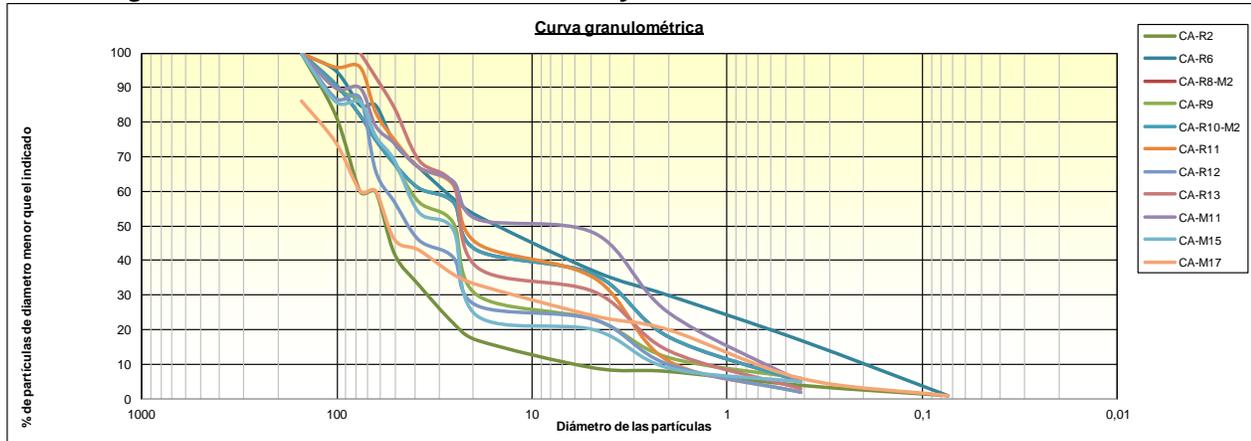


El depósito aluvial del valle, de acuerdo con los ensayos realizados, cumple las prescripciones granulométricas generales para su empleo, en estado natural, en cuerpo de presa y ataguía, únicamente se requerirá cribado para eliminar los escasos elementos con sobretamaño, de las zonas que así lo requieran.

La figura adjunta recoge las curvas granulométricas del depósito aluvial, obtenida de los ensayos realizados a muestras tomadas en calicatas, en las zonas inundables de ambos embalses. Se han tratado ambos yacimientos en común debido a su absoluta homogeneidad litológica, de tamaños y espesores.

Aunque las calicatas no han alcanzado gran profundidad, los datos de sondajes realizados, en la zona de fondo del valle en los dos emplazamientos de presa, muestran un depósito aluvial de fondo de valle que supera generalmente los 10 m de espesor, y ello considerando que los emplazamientos de presas han buscado las zonas más estrechas y con menor depósito aluvial posible, por lo que el espesor medio arriba indicado podrá, con seguridad, hacerse extensivo a las áreas de préstamo consideradas para ambas alternativas.

**Figura 1-18. Granulometrías calicatas de yacimientos recomendados. Fuente: TYP SA.**



De acuerdo a la curva granulométrica (Figura 1-18) de los materiales aluviales investigados, dado que su fracción fina no supera en ningún caso el 2% – 4%, son aptos para su empleo, sin tratamientos, en el cuerpo de presa. Únicamente se requerirá el cribado ocasional de los bolos más gruesos, que lógicamente son se han incluido en las muestras ensayadas, pero cuya presencia se estima muy minoritaria.

Respecto a la estimación de volúmenes de materiales granulares del depósito aluvial en las zonas inundables de los embalses considerados, se ha considerado, para cada presa, las zonas de posible extracción de gravas y bolonería aluvial, dimensionadas en función de las necesidades volumétricas de cada cuerpo de presa.

El rechazo que hay que aplicar al conjunto del volumen explotable se deriva, tanto de las zonas de curso fluvial activo, como al desbroce de la tierra vegetal (30 – 50 cm superiores) que afecta parcialmente a las zonas de préstamo. Se estima, del lado de la seguridad, un rechazo de un 25% del volumen disponible debido a estos aspectos.

En el cuerpo de presa de la Recova, se tiene una estimación de volumen de material necesario del orden de 4.721.000 m<sup>3</sup>. La zona de yacimiento propuesta, dentro de su zona inundable, que se presenta en Lámina nº 7 "Planta de Situación de Yacimientos de la Zona Inundable de La Recova, se extiende hacia aguas arriba, por los valles del Achibueno, y de Vega de Salas, con una superficie de 1.751.615 m<sup>2</sup>, lo que, considerando un espesor explotable de 6 m, nos daría un volumen de material para cuerpo de presa, del orden de 10.500.000 m<sup>3</sup>, con la posibilidad de ampliar, si se considerase necesario, tanto el espesor explotable, como la superficie de material aluvial a explotar a lo largo de la extensa plana aluvial, tanto del valle del Achibueno, como de Vega de Salas, dentro de la zona inundable del embalse.

Considerando un 25% de rechazo, el volumen disponible quedaría en el orden de magnitud de 8.400.000 m<sup>3</sup> de gravas y arenas, muy superior a los 7.081.500 que suponen el volumen requerido por la presa más un 50% adicional.

Para el emplazamiento de Montecillo, se estima un requerimiento del orden de 6.116.000 m<sup>3</sup> de material necesario para el cuerpo de presa. La zona de yacimiento propuesta, dentro de su zona inundable, que se presenta en Lámina nº 8 "Planta de Situación de Yacimientos de la Zona Inundable de Montecillo, se extiende hacia aguas arriba, por el valle del Achibueno, con cierta penetración en el valle del Estero Los Guayes. Corresponde a una superficie de 2.324.140 m<sup>2</sup>, de la que, considerando un espesor explotable de 5 m, se

podría extraer un volumen de material del orden de 11.600.000 m<sup>3</sup>, con la posibilidad de ampliar, si se considerase necesario, tanto el espesor explotable, como la superficie de material aluvial a explotar a lo largo de la extensa plana aluvial del Achibueno, dentro de la zona inundable del embalse.

Considerando un 25% de rechazo, el volumen disponible quedaría del orden de los 9.300.000 m<sup>3</sup> de gravas y arenas, por encima de los 9.174.000 que suponen el volumen requerido por la presa más un 50% adicional.

En la tabla adjunta se recogen los ensayos, sobre materiales aluviales, realizados a las muestras tomadas en calicatas realizadas en las zonas inundables de los embalses.



Los ensayos granulométricos obtenidos en los ensayos realizados a los materiales granulares del depósito fluvio-aluvial del valle, recomendados como materiales para la construcción del cuerpo de presa en los emplazamientos estudiados, se presentan a continuación en el gráfico adjunto:

### 1.8.3. Enrocado de cantera

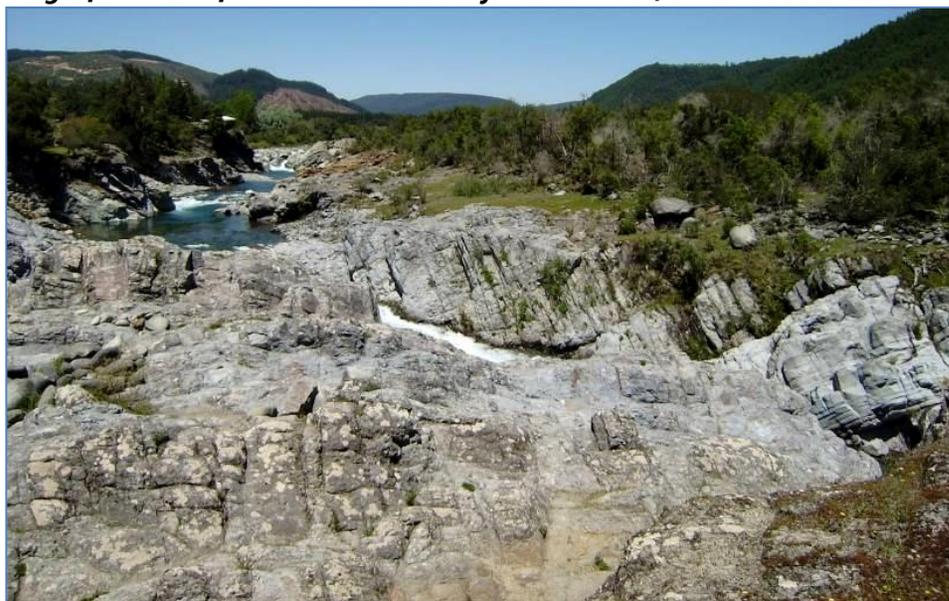
Los materiales de enrocado para las tipologías de presa han sido considerados, en dos zonas de morro prominentes en ambos márgenes del valle, existiendo además, en el de la margen derecha, una cantera de roca. Los posibles emplazamientos canterables, están situados entre los emplazamientos de la Recova y Montecillo. Ambos morros rocosos parecen quedar por encima de la cota de inundación del embalse de La Recova.

En el caso del vaso de la Recova, hay afloramientos de roca competente tipo andesita afanítica y porfídica, en el fondo del valle, prácticamente a cota del río o a escasa altura sobre el mismo, lo que complicaría enormemente su explotación

Adicionalmente, en el caso del vaso de Montecillo, el cauce del río se encuentra en algunos tramos encajado en el lecho rocoso tipo andesítico porfídico o afanítico, cerca de 10 m de profundidad, lo que favorecería la creación de una zona canterable sin necesidad de desvíos del río y con un buen resguardo de posibles avenidas. El volumen canterable en este caso, es mayor que en el caso de la Recova, aunque también se encuentra limitado a unos 400 m hacia aguas arriba del eje de presa.

El mayor condicionante para la obtención de enrocado, además de la calidad en cuanto a ausencia de alteración y elevada resistencia que se exige a la roca, puede ser el grado de fracturación del macizo rocoso, que caso de ser muy elevado no permitiría la obtención de bloques de tamaño adecuado, lo que inclinaría la balanza comparativa a favor de la utilización de materiales aluviales de su extensa zona inundable.

#### **Fotografía 1-23. Afloramientos rocosos junto al cauce, en el vaso de Montecillo.**



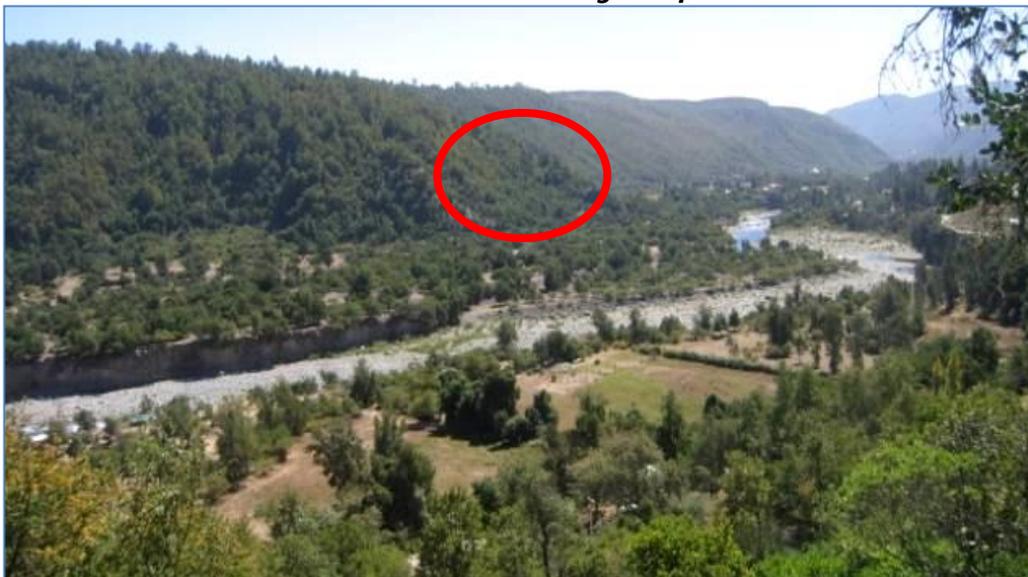
También se ha detectado fuera de los vasos de ambas alternativas, en la margen derecha, un pequeño frente de explotación de roca andesítica, a unos 300 m aguas abajo, desde la confluencia del cajón de Pejerreyes

con el Achibueno. La resistencia compresión simple de una muestra proveniente de este frente ha sido de 70 MPa, por lo que a priori se trata de una roca de media a buena calidad.

**Fotografía 1-24. Frente de cantera en la margen derecha del valle, junto a Pejerreyes**



**Fotografía 1-25. Vista desde la margen derecha, hacia aguas abajo. El círculo rojo señala la posible zona canterable en la margen izquierda**



**Fotografía 1-26. Detalle del morro rocoso de la fotografía anterior.**



## 1.9. CONCLUSIONES

### 1.9.1. La Recova

En el emplazamiento de La Recova, se observa en superficie el substrato litológico en ambas márgenes, así como en el entorno del cauce. El recubrimiento aluvial del fondo del valle es de espesor reducido y se localiza a lo largo de la plana morfológica de la margen derecha del cauce, de unos 300 m de anchura, abarcando los depósitos recientes de cauce, que ocupan la zona inundable en avenidas, y la terraza inferior, con suelos limo-arenosos (depósitos de antigua llanura de inundación) en superficie, que completan la zona llana del fondo del valle.

El substrato rocoso está constituido, en el entorno del cauce y zona inferior de ambas márgenes, por rocas de tipo andesítico, que se extienden hasta aproximadamente las cotas 315 (margen izquierda) a 330 (margen derecha). Por encima de estas cotas, y hasta cotas superiores a la de coronación de la posible presa (cota 390-400) el substrato rocoso está constituido por rocas de tipo tobáceo, de tonos claros.

Las andesitas son rocas duras, sanas o débilmente meteorizadas en los afloramientos reconocidos, con resistencias a compresión del orden de 50 a 150 MPa, y velocidad sísmica de 3300 m/s. Este substrato presenta, en cuanto a resistencia, condiciones favorables a cualquier tipología de presa, incluidas las de hormigón de gravedad y arco-gravedad.

Por el contrario el substrato tobáceo que ocupa la zona superior, por encima de la cota 320, corresponde a un tipo de roca blanda de características resistentes muy inferiores a las andesitas. Su resistencia a compresión, en estado sano, se estima del orden de 20 a 40 MPa, y su velocidad sísmica no supera los 2400 m/s para el estado sano del macizo. Además aparecen intensamente meteorizadas en superficie (grado IV-

V) y hasta profundidades importantes, del orden de 20 – 30 m con grado III, lo que disminuye mucho su resistencia (velocidad sísmica inferior a 2000 m/s a 30 m de profundidad).

Los suelos aluviales reconocidos, gravas de clastos rodados y bolones, presentan espesor máximo en torno a los 15 m en la zona de apoyo de la presa, desarrollados sobre el substrato andesítico sano. La terraza de la margen derecha, reconocida con el sondaje S-AR4 ha encontrado 7,60 m de depósito aluvial, con los 4 m superiores de composición areno-limosa y el resto de gravas y bolones.

Por lo anteriormente indicado, aunque una tipología de presa de hormigón es compatible con los valores de resistencia del substrato y con los espesores, relativamente reducidos, de recubrimientos de suelos a excavar en la cimentación, la relativa debilidad de los materiales tobáceos en ambos estribos de la presa puede hacer más recomendable una tipología de materiales sueltos, preferentemente de tipo CFRD o CFGD (enrocado o gravas con pantalla de hormigón) o bien de tipo HARDFILL (FHSD, *Faced Symmetrical Hardfill Dam*) o (CSG, *Cemented Sand and Gravel*), que permite un mayor abanico de materiales utilizables.

Para la constitución del cuerpo de presa, de materiales locales, se dispone de un importante volumen de gravas aluviales en el vaso, en cambio parece haber mayor dificultad para la obtención de escollera de calidad dentro de la zona inundable del embalse.

Otro argumento a favor de una tipología de presa de materiales locales lo constituye la morfología alomada de la margen izquierda y la fácil excavabilidad de los materiales tobáceos superficiales de la misma, condiciones muy favorables para la ubicación de una aliviadero o vertedor independiente del cuerpo de presa en esta margen, tal como requiere esta tipología.

La tipología finalmente contemplada y valorada, es la de CFGD (gravas aluviales compactadas, con pantalla de hormigón).

Respecto a la disponibilidad de materiales para el cuerpo de presa, el depósito aluvial de gravas rodadas y bolones en matriz arenosa, presenta, dentro de la zona inundable del embalse, volúmenes sobrados para cubrir las necesidades de cuerpo de presa y ataguía, filtros, drenes, y también los agregados para hormigones, previo chancado y clasificación, a partir de las gravas y bolos aluviales.

El préstamo señalado, en la zona inundable del embalse, presenta una superficie de 1.751.615 m<sup>2</sup>, lo que, considerando un espesor explotable de 6 m, y un rechazo del 25%, nos daría un volumen de material de 8.400.000 m<sup>3</sup> de gravas y arenas, muy superior a los 7.081.500 que suponen el volumen requerido más un 50% adicional.

El desvío del río se proyecta en túnel por la margen derecha, su excavación afectará previsiblemente al substrato rocoso andesítico, de elevada resistencia y grado de fracturación variable. No obstante, no puede descartarse la presencia de materiales tobáceos, detectados en ambas laderas del valle, ya que uno de los aspectos de incertidumbre, en este emplazamiento, es justamente la posición del contacto entre tobas y andesitas subyacentes, a lo largo de esta margen del valle.

El evacuador de crecidas se proyecta por el relieve alomado de la margen izquierda. Su excavación, en la zona superior, hasta aproximadamente el labio o vertedor, afectará a los materiales de la Fm Montaña (gravas de bolos y cantos rodados en matriz limo-arenosa o arcillo-arenosa), y el apoyo del canal se realizará sobre el substrato tobáceo, con la posibilidad de encontrar andesitas en su zona final, más cercana al cauce fluvial.

Respecto a la permeabilidad del substrato, en la margen izquierda parece que la impermeabilidad se alcanza a partir de los 30 m, mientras que en fondo de valle y pie de margen derecha, la fracturación de las andesitas, con numerosos planos subverticales ha complicado la ejecución de ensayos Lugeon, conectando el tramo en ensayo con la parte alta de los sondajes, por lo que hay que suponer permeabilidades elevadas en toda la profundidad investigada, del orden de los 30 m.

En todo caso, para evitar el riesgo de contorneo del estribo izquierdo por el agua, muy evidente dada la geometría de este relieve, y su fuga hacia aguas abajo del valle del Achibueno, será necesario prever la prolongación de la pantalla de impermeabilización al menos 100 – 150 m hacia el SW, más allá del estribo izquierdo de la presa.

En el vaso no se evidencian problemas graves ligados a la permeabilidad o inestabilidad de laderas. En la zona de mayor riesgo, por la proximidad del profundo estero Las Minas, en los primeros 2 km de la margen izquierda del vaso, parece aflorar el substrato tobáceo alterado hasta cotas equivalentes a las de coronación de la presa. Aguas arriba, hacia la zona de Los Copihues, donde los materiales pleistocénicos de la Fm Montaña parecen ocupar toda la zona media y alta del relieve de la margen izquierda, no se evidencian riesgos de fuga del agua hacia otras cuencas. En todo caso, los reconocimientos geológicos de superficie y la interpretación geológica de las zonas cubiertas, parecen indicar, para la zona inundable de La Recova una presencia de los materiales de la Fm Montaña, casi siempre por encima de la cota de máximo embalse (para altura de presa del orden de 100 m), lo que prácticamente anula las posibles afecciones negativas por la permeabilidad de dichos materiales.

La estabilidad de laderas es buena, los materiales de la Fm Montaña, que pueden localmente llegar a afectar a la margen izquierda del embalse, dada su cierta compacidad y cementación soportan taludes de excavación estables próximos a subverticales, y su relativamente alta permeabilidad (del orden de  $10^{-6}$  m/s) hace prever un buen comportamiento frente a las variaciones del nivel de agua en el embalse y a la situación extrema de desembalse rápido. En el resto de materiales solo cabe esperar pequeños arrastres superficiales de suelos coluviales o de alteración del substrato rocoso, que no deben presentar ningún riesgo para la presa.

### 1.9.2. Montecillo

La roca está presente en la margen derecha, en el entorno del cauce, y en la zona baja-media de la margen izquierda. También está presente en la extensa zona llana de la margen izquierda, de unos 500 m de anchura, bajo un espesor variable, generalmente reducido, de gravas de terraza, así como en afloramientos de la zona inferior de ladera en ambos márgenes del valle.

En la zona superior de la margen izquierda, y afectando previsiblemente al estribo izquierdo de la presa, aparecen materiales de la Fm Montaña, constituida por depósitos poco consolidados de limos, arenas, gravas, bolones y bloques. Estos depósitos se extienden, hacia aguas arriba, por la margen izquierda, hasta coronación del relieve del sector del Alto del Latiguillo. En el sondaje S-AM1, situado por encima de la cota 570 en este relieve, se ha reconocido un espesor de 52 m en estos materiales, sobre substrato rocoso de tipo andesítico.

El substrato rocoso está constituido mayoritariamente por rocas de tipo andesítico-basáltico, aunque intercala otros litotipos aglomeráticos o tobáceo-andesíticos. Localmente se detecta la presencia, en la zona superior de los afloramientos, de niveles bandeados interpretados como la base de la serie sedimentaria (atribuida a la Fm Cura-mallín) que aflora aguas arriba del emplazamiento.

Los afloramientos presentes en el entorno del cauce, en la margen derecha del mismo y bajo la escasa terraza de la margen izquierda se presentan con roca poco meteorizada y con buenas características resistentes. Su grado de fracturación es muy variable, desde zonas con lajamiento decimétrico bien marcado, a tramos masivos con espaciados métricos de los sistemas de diaclasas dominantes. Además, en las zonas altas de ambos márgenes, y especialmente en la margen derecha (ya que la izquierda está cubierta por materiales de la Fm Montaña), la ausencia de afloramientos combinada con formas morfológicas relativamente suaves, pueden indicar la presencia de un substrato tobáceo más débil y con mayor profundidad de alteración, o bien de rocas sedimentarias menos resistentes, que afectarían al apoyo del estribo derecho de la presa.

El macizo rocoso, en la zona baja de la margen derecha se ha reconocido en profundidad con el sondaje S-AM3. El substrato rocoso aparece bajo 4 m de gravas de terraza, constituido por andesitas de buena calidad geotécnica.

La terraza fluvial de la margen izquierda presenta escaso espesor sobre el substrato rocoso en la zona de cauce, del orden de 4 m, sin embargo su espesor aumenta a medida que nos acercamos al relieve de la margen izquierda, especialmente cuando se añade su tramo superior de mayor predominio limoso (posiblemente debido a un recubrimiento de cenizas volcánicas edafizadas), presentando en conjunto un espesor de 21 m, reconocido en el sondeo S-AM2 situado en el pie de ladera, sobre el escarpe superior de la terraza.

Los ensayos Lugeon realizados indican una permeabilidad relativa del substrato rocoso por su fracturación, predominando valores de  $k$  en torno a E-08 m/s. A partir de 27 - 30 m de profundidad, la roca parece presentar valores de RQD del 100%, por lo que se estima, en general, que presentará buenas condiciones de impermeabilidad a partir de dicha profundidad. Respecto a las formaciones cuaternarias, los terrenos aluviales son obviamente muy permeables (E-06 m/s) mientras que los materiales de la Fm Montaña, algo menos permeables, presentan sin embargo valores superiores, del orden de E-07 m/s, como corresponde al mayor contenido de finos en su matriz.

Aunque la calidad del macizo rocoso y su escaso recubrimiento de suelos (al menos en la extensa zona central del valle) serían compatibles con la fundación de una presa de hormigón, la geometría de la cerrada, con aproximadamente un kilómetro de longitud de presa, y especialmente las incertidumbres sobre la calidad del macizo rocoso en ambos estribos de la presa, con ausencia de afloramientos, la posible presencia de tobas alteradas en la zona alta de la margen derecha, y de materiales cuaternarios de la Fm Montaña en la zona de estribo izquierdo, así como el considerable espesor de terraza aluvial en dicha margen (21 m), hacen que parezca más aconsejable, la tipología de materiales locales, de tipo CFRD o bien de Hardfill (FHSD o CSG). Otra posible solución, que no debe descartarse a priori, podría ser la construcción de una presa de tipo mixto, que podría contar con una zona central de presa de hormigón, integrando el aliviadero o vertedor, y dos zonas laterales en ambos estribos, de materiales sueltos.

Respecto a la disponibilidad de materiales para el cuerpo de presa, el depósito aluvial de gravas rodadas y bolones en matriz arenosa, presenta, dentro de la zona inundable del embalse, volúmenes sobrados para cubrir las necesidades de cuerpo de presa y ataguía, filtros, drenes, y agregados para los hormigones, previo chancado y clasificación, a partir de las gravas y bolos aluviales.

La tipología finalmente contemplada y valorada, es la de CFGD (gravas aluviales compactadas, con pantalla de hormigón).

El préstamo señalado, en la zona inundable del embalse, corresponde a una superficie de 2.324.140 m<sup>2</sup>, de la que, considerando un espesor explotable de 5 m, se podría extraer un volumen de material del orden de 11.600.000 m<sup>3</sup>, que considerando un rechazo del 25%, nos daría un volumen útil del orden de los 9.300.000 m<sup>3</sup> de gravas y arenas, por encima de los 9.174.000 que suponen el volumen requerido más un 50% adicional.

El desvío del río se proyecta en túnel por la margen derecha, su excavación afectará previsiblemente al substrato rocoso andesítico de acuerdo con los afloramientos observados, tanto en el talud de la pista, como en el cortado del cauce, que discurre muy próximo a esta margen. El sondaje SA-M3, perforado en la zona de inicio del túnel se han detectado, bajo 4 m de materiales de terraza, rocas andesíticas de texturas afanítica y porfídica, en general de excelente calidad geotécnica, con baja meteorización y valores altos de RQD, exceptuando algunos tramos locales, de 1 a 2 m de espesor, de intensa fracturación, donde la meteorización ha sido algo más penetrativa. No obstante, dada la variabilidad de litologías presentes en la Formación Cura-Mallín, no es totalmente descartable la presencia, a lo largo del trazado del túnel de desvío, de otros materiales, tobáceos o sedimentarios, de características geotécnicas más desfavorables, así como zonas locales de falla, que puedan requerir sostenimientos más pesados.

El evacuador de crecidas se proyecta por el relieve de la margen izquierda, de fuerte pendiente. Su excavación, en la zona superior, hasta aproximadamente el labio o vertedor, afectará a los materiales de la Fm Montaña (gravas de bolos y cantos rodados en matriz limo-arenosa o arcillo-arenosa), y el apoyo del canal se realizará tanto sobre materiales de la Fm Montaña, como sobre el substrato rocoso, cuya litología concreta, así como las cotas del contacto superior con la Fm Montaña, habrán de ser investigadas en estudios posteriores.

#### 1.10. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Para los materiales aluviales, recomendados para la construcción de presas de materiales locales, en ambos emplazamientos, se han considerado los siguientes parámetros geotécnicos:

- Cohesión: NULA
- Ángulo de Rozamiento Interno: Los cálculos de las presas se ha realizado con un análisis de sensibilidad de este parámetro, con variación entre 38° y 45°.

#### 1.11. RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS POSTERIORES

##### 1.11.1. La Recova

En el emplazamiento de La Recova están bien definidas las características geológicas y geotécnicas de terreno, especialmente en lo que respecta a litología del substrato en fondo de valle y en ambas márgenes, y al espesor del recubrimiento aluvial de fondo del valle.

Las incertidumbres remanentes en este emplazamiento se limitan a la definición de la profundidad de substrato rocoso permeable en fondo de valle y margen derecha, ya que esta última, aunque presenta abundantes afloramientos de materiales tobáceos, no ha podido ser reconocida, mediante sondajes, en su zona superior, correspondiente al estribo derecho de la presa, debido a la falta de acceso y a la imposibilidad de abrir nuevas pistas, con fuerte movimiento de tierras, en esta fase, tan temprana, del estudio.

Se recomienda por tanto, la ejecución de dos sondajes profundos en el fondo del valle (margen derecha del cauce), con ensayos de permeabilidad de tipo Lugeon, para determinar la cota de substrato rocoso

impermeable (estimada por el momento del orden de 30 m de profundidad), y concretar con más ajuste la profundidad que deberá alcanzar la pantalla de inyecciones de impermeabilización bajo el apoyo de la pantalla.

Se remienda asimismo la ejecución de un sondaje en el estribo derecho de la presa, previa construcción de una pista de acceso al mismo. Los objetivos de este sondaje serían la caracterización, en profundidad, del substrato rocoso tobáceo, y la cota del contacto con las andesitas subyacentes, así como la determinación de la permeabilidad del estribo mediante ensayos Lugeon en el sondaje.

Simultáneamente, este sondaje serviría para conocer las condiciones de excavación del túnel de desvío del río, previsto en esta margen. Dos sondajes adicionales, uno en el tramo inicial y otro en el tramo final, pueden aportar información sobre las características del terreno atravesado por este túnel, ya que al respecto se mantiene alguna incertidumbre sobre la posición del contacto de las andesitas basales con las tobas superiores a lo largo del trazado.

El Evacuador de Crecidas se ha previsto sobre la loma de la margen izquierda del valle, donde se han realizado dos sondajes. En principio no existe incertidumbre respecto a las excavaciones, que afectarán a los materiales de la FM Montaña en su zona superior, y al substrato tobáceo por debajo. Algún sondaje adicional, en el canal del Evacuador, podría completar la información sobre las condiciones de apoyo del mismo, en su mitad inferior.

#### 1.11.2. Montecillo

Existe una buena definición de las condiciones geológicas de éste emplazamiento, en lo que respecta a las zonas de fondo de valle y tramo inferior de laderas en ambas márgenes.

Se mantienen incertidumbres respecto a las dos zonas superiores de ladera, correspondientes a los estribos de la presa, en especial en lo que concierne al estribo izquierdo, con gran incertidumbre respecto a la cota del contacto entre los materiales pleistocénicos de la Fm Montaña y el substrato rocoso de la Fm Cura-Mallín. Estas dudas se derivan de la lejanía del sondaje de referencia SA-M1, separado del orden de 300 m del citado estribo, dada la imposibilidad de acceso al mismo. Aunque se ha supuesto, para la zona del estribo, un contacto a cota algo inferior a la detectada en dicho sondaje, dado que la Fm Montaña se depositó sobre un relieve preexistente, es posible encontrar fuertes variaciones de cota en el contacto inferior de la misma

En la margen derecha, aunque existen importantes afloramientos rocosos en el talud de la pista que discurre por su zona inferior, se mantienen incertidumbres sobre la zona superior, alomada y carente de afloramientos. Su pendiente, más suave, podría estar relacionada con la presencia de materiales de recubrimiento (retazo de la Fm Montaña) o bien de rocas más blandas, tobáceas o sedimentarias, de la formación Cura-Mallín a la que corresponde el substrato litológico.

Se recomienda la ejecución de al menos dos sondajes en cada margen del valle, uno de ellos en cada estribo de la presa, y otros dos para investigación, respectivamente del túnel de desvío, emplazado en la margen derecha, y del evacuador de crecidas, proyectado en la margen izquierda del valle.

Se recomienda estudiar con mayor detalle, en fase posteriores la potencial inestabilidad de las laderas del vaso, especialmente de la margen izquierda, para determinar el espesor de materiales no consolidados existente y su extensión, mediante sondajes y/o perfiles geofísicos. Asimismo la minoración de este posible riesgo puede requerir posteriores actuaciones de retaluzado, drenaje etc, de la pendiente natural en algún punto o tramo de ladera especialmente problemático.

## 2. SISMICIDAD

### 2.1. INTRODUCCIÓN

A continuación, se describen los antecedentes sismotectónicos y de sismicidad que sirven de base para la estimación de la aceleración horizontal máxima de diseño aplicable a las obras del proyecto, tanto desde el punto de vista probabilístico como determinístico.

El estudio probabilístico se basa en los datos obtenidos por el trabajo "Peligro Sísmico en el Segmento Norte de la Región del Maule, Chile". A.A Alfaro (2011), teniendo en cuenta todas las fuentes actuando en conjunto sobre el sitio. Mientras que en el estudio determinístico se toman en cuenta los sucesos sísmicos ocurridos, considerando el sismo que puede generar la máxima aceleración en el área de Proyecto, lo que proporciona un enfoque muy sencillo para estimar las sollicitaciones dinámicas a esperarse de un sitio.

### 2.2. ANTECEDENTES

El estudio se ha basado por una parte en la actividad sísmica de los grandes terremotos históricos y la información de otros trabajos bibliográficos en la zona mediante el método probabilístico y el análisis de terremotos de magnitud  $>6$  entre las latitudes de  $30^{\circ}$  y  $37^{\circ}$  S y entre las longitudes de  $70^{\circ}$  y  $73^{\circ}$  W entre los que se encuentra la cuenca del río Achibueno, recopilados por la United States Geological Survey (USGS), para realizar un análisis determinístico.

### 2.3. METODOLOGÍA

En primer lugar se realiza un marco sismogénico general de la zona de estudio, incluyendo información histórica sobre la localización, magnitud y mecanismo focal de la sismicidad, para definir y caracterizar las fuentes sismogénicas presentes en la zona, utilizando la ley de Gutenberg-Richter (1944).

A continuación, se define una ley de atenuación, que relacione una cierta magnitud con una aceleración horizontal máxima, considerando la pérdida de energía de las ondas sísmicas al atravesar distintas estructuras geológicas.

Una vez definidos estos antecedentes, se realiza una estimación del peligro sísmico mediante el método probabilístico basado en Cornell (1968), Algermissen & Perkins (1976) y Algermissen et al. (1982), Anderson & Trifunac (1978), Barrientos (1980), Leyton et al. 2009, 2010), que consideran las fuentes sismogénicas homogéneas.

Finalmente se realiza un análisis determinístico considerando el escenario más desfavorable que podría producirse, de acuerdo con la información disponible, para cada tipo de fuente, permitiendo determinar la aceleración horizontal máxima asociada.

### 2.4. MARCO TECTÓNICO GENERAL

Chile está situado en el denominado cinturón de fuego del Pacífico, en el límite entre las placas tectónicas oceánicas y continentales que rodean al Océano Pacífico. Esta situación geográfica está localizada en la zona de colisión de la placa oceánica de Nazca y la placa continental suramericana. La placa de Nazca está siendo subducida bajo la placa suramericana a una velocidad media de 80 mm al año. Por otra parte, la placa oceánica antártica también es subducida bajo la placa suramericana en el extremo más meridional de Chile,

pero a una velocidad media de 20 mm al año. Este hecho, puede ser una de las causas por la que la actividad sísmica es mucho menor en esta zona del país.

**Figura 2-1. Terremotos de  $M_s > 8,5$  producidos en el cinturón del Pacífico (fuente AIR)**

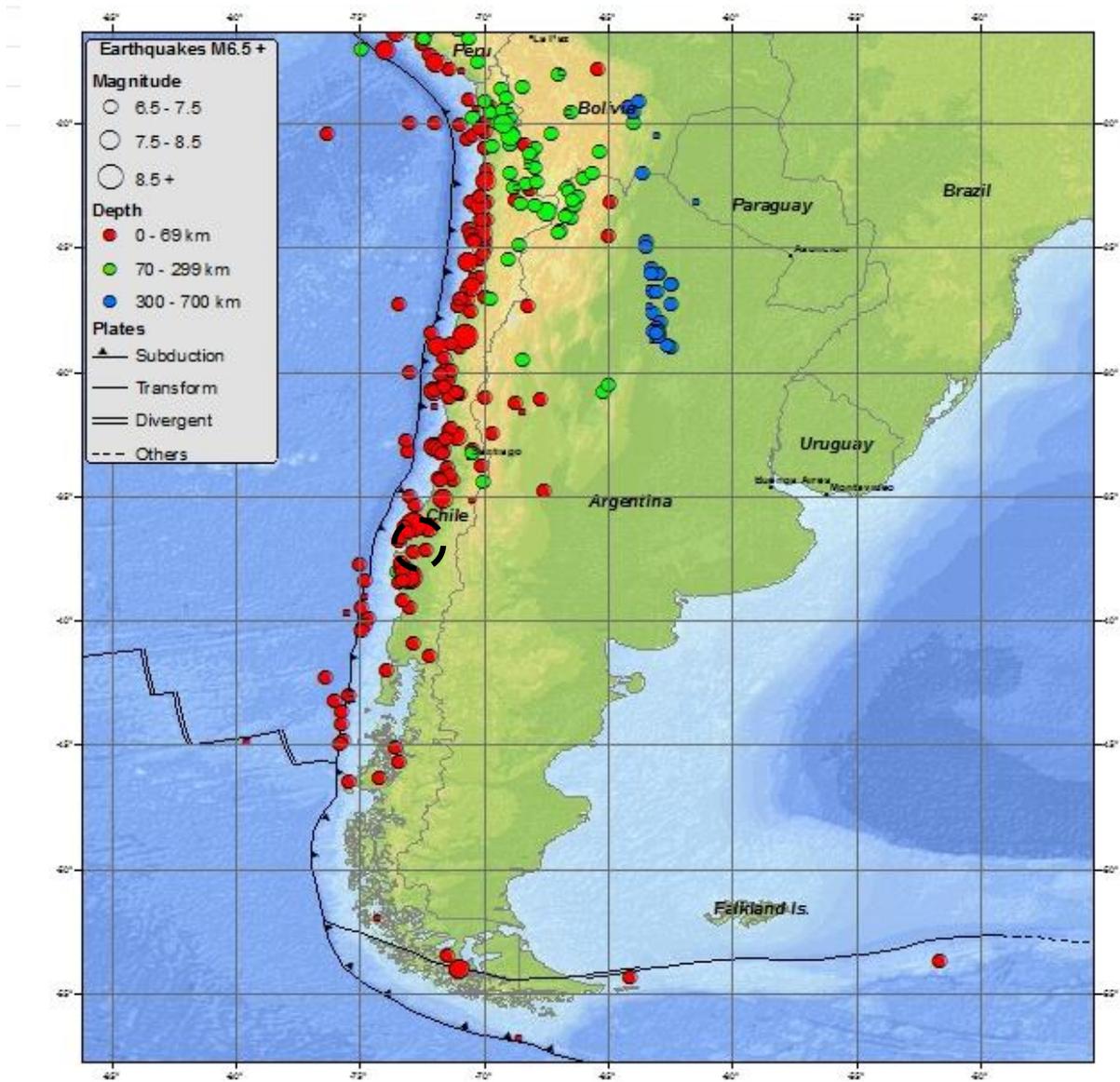


- |                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Chile, 1960: $M_w$ 9,5       | 6 Ecuador, 1906: $M_w$ 8,8        |
| 2 Alaska, 1964: $M_w$ 9,2      | 7 Islas Rat, 1965: $M_w$ 8,7      |
| 3 Sumatra, 2004: $M_w$ 9,1-9,3 | 8 Sumatra, 2005: $M_w$ 8,6        |
| 4 Kamchatka, 1952: $M_w$ 9,0   | 9 Islas Andeanof, 1957: $M_w$ 8,6 |
| 5 Chile, 2010: $M_w$ 8,8       | 10 Tibet, 1980: $M_w$ 8,6         |

## 2.5. MARCO SISMOGENÉTICO GENERAL

La zona donde se ubica el proyecto corresponde a una zona de sismicidad intermedia respecto de la franja costera de Chile, donde se concentran la mayoría de los terremotos.

**Figura 2-2. Mapa de sismicidad de Chile de 1900 hasta la actualidad (Fuente USGS)**



A continuación se presentan los terremotos de magnitud  $\geq 6$  situados entre latitud  $30^\circ - 37^\circ$  S y  $70^\circ - 72^\circ$  W desde 1973, registrados por la USGS.

**Tabla 2-1. Principales terremotos acaecidos en el cuadrante de latitud 30°S a 37°S y longitud 70°W a 72°W. (Fuente USGS)**

DATOS DE DATOS DE USGS de 1973 a 2013							LATITUD	30°S	37°S
RANGO MA RANGO MAGNITUDES							LONGITUD	70°W	73°W
REGISTRO	AÑO	LAT	LONG	DEP	MAG	MT	SC	COORDENADAS SITIO PRESA	
1	2012	36,074	70,57	8	6	MWW	PDE	36,005	71,445
2	2012	32,625	71,365	29	6,7	MWW	PDE	36,005	71,445
3	2012	35,2	72,217	40,7	7,1	MWW	PDE	36,005	71,445
4	2011	33,819	71,832	20	6	MWW	PDE	36,005	71,445
5	2011	35,38	72,834	21	6,7	MWW	PDE	36,005	71,445
6	2011	36,422	72,96	26	6,9	MWW	PDE	36,005	71,445
7	2010	36,227	72,878	24	6	MWC	PDE	36,005	71,445
8	2010	34,47	72,004	31,5	6	MB	PDE	36,005	71,445
9	2010	34,326	71,799	18	7	MWC	PDE	36,005	71,445
10	2010	34,29	71,891	11	6,9	MWC	PDE	36,005	71,445
11	2010	33,216	72,125	24,2	6	MWC	PDE	36,005	71,445
12	2010	34,903	71,617	46	6,2	MWB	PDE	36,005	71,445
13	2010	34,7	71,827	35	6	MB	PDE	36,005	71,445
14	2010	33,422	71,828	31,1	6,2	MWC	PDE	36,005	71,445
15	2010	33,281	71,955	35	6	MB	PDE	36,005	71,445
16	2010	34,749	72,427	35	6,1	MB	PDE	36,005	71,445
17	2010	36,869	72,673	35	6	MB	PDE	36,005	71,445
18	2010	33,878	71,943	35	6	MB	PDE	36,005	71,445
19	2010	34,867	72,614	35	6,2	MB	PDE	36,005	71,445
20	2010	36,122	72,898	22,9	8,8	MWC	PDE	36,005	71,445
21	2008	32,473	72,051	25	6	MWC	PDE	36,005	71,445
22	2008	32,458	71,726	18	6,2	MWC	PDE	36,005	71,445
23	2006	31,256	71,368	31	6,4	MWC	PDE	36,005	71,445
24	2004	35,173	70,525	5	6,5	MWB	PDE	36,005	71,445
25	2003	30,608	71,637	33	6,8	MWC	PDE	36,005	71,445
26	2002	30,805	71,124	54	6,6	MWB	PDE	36,005	71,445
27	2001	30,749	71,197	52,1	6	MWB	PDE	36,005	71,445
28	2000	32,321	71,492	37	6	MWB	PDE	36,005	71,445
29	1999	33,877	70,088	120,2	6,4	MWC	PDE	36,005	71,445
30	1998	30,738	71,993	33	6	MWB	PDE	36,005	71,445
31	1998	32,312	71,286	51,1	6,4	MWC	PDE	36,005	71,445
32	1997	30,985	71,41	34,8	6,6	MWC	PDE	36,005	71,445
33	1997	30,744	71,224	45	6,2	MWB	PDE	36,005	71,445
34	1997	30,933	71,22	58	7,1	MWC	PDE	36,005	71,445
35	1997	30,517	71,862	33	6,3	MWC	PDE	36,005	71,445
36	1997	30,554	72,016	33	6,1	MWC	PDE	36,005	71,445
37	1997	30,462	71,906	33	6,2	MWB	PDE	36,005	71,445
38	1997	30,328	71,917	33	6	MWB	PDE	36,005	71,445
39	1997	30,058	71,872	19	6,8	MWC	PDE	36,005	71,445
40	1996	31,9	71,56	39	6	MWB	PDE	36,005	71,445
41	1996	33,672	71,671	43,3	6	MWB	PDE	36,005	71,445
42	1994	31,103	71,706	40	6	MWB	PDE	36,005	71,445
43	1992	31,33	71,992	11,7	6,5	MW	PDE	36,005	71,445
44	1992	31,565	71,565	18,8	6	MW	PDE	36,005	71,445
45	1992	33,594	72,018	29,5	6,1	MW	PDE	36,005	71,445
46	1990	31,62	71,695	35,8	6	MW	PDE	36,005	71,445
47	1990	35,925	71,415	75,9	6,2	MW	PDE	36,005	71,445
48	1988	32,833	71,704	42,1	6,1	MW	PDE	36,005	71,445
49	1987	30,284	71,484	36,4	6,2	MW	PDE	36,005	71,445
50	1985	32,951	72,072	31,4	6	MW	PDE	36,005	71,445
51	1985	30,253	71,329	39,1	6,3	MW	PDE	36,005	71,445
52	1985	34,131	71,618	37,8	7,2	MW	PDE	36,005	71,445
53	1985	32,584	71,656	33	6,2	MW	PDE	36,005	71,445
54	1985	34,254	72,185	45	6,5	MW	PDE	36,005	71,445
55	1985	33,198	71,653	42,2	6,7	MW	PDE	36,005	71,445
56	1985	32,633	71,551	33	6,7	MW	PDE	36,005	71,445
57	1985	32,878	71,818	33	6,2	MW	PDE	36,005	71,445
58	1985	33,842	71,249	40,1	6,3	MW	PDE	36,005	71,445
59	1985	33,142	71,997	33	6,3	MS	PDE	36,005	71,445
60	1985	33,825	71,93	33	6,3	MW	PDE	36,005	71,445
61	1985	32,925	71,793	33	6,6	MS	PDE	36,005	71,445
62	1985	34,115	71,905	33	6,2	MS	PDE	36,005	71,445
63	1985	33,207	71,663	33	7,4	MW	PDE	36,005	71,445
64	1985	32,738	71,215	33	6,4	MS	PDE	36,005	71,445
65	1985	33,135	71,871	33	8	MW	PDE	36,005	71,445
66	1984	30,707	71,179	46,3	6,2	MW	PDE	36,005	71,445
67	1983	33,099	70,12	100,1	6,2	MW	PDE	36,005	71,445
68	1981	32,199	71,336	65,2	6,8	MS	PDE	36,005	71,445
69	1981	33,661	71,892	46,3	6,2	MS	PDE	36,005	71,445
70	1973	32,518	71,478	33	6,7	MS	PDE	36,005	71,445
71	1973	32,987	71,916	14	6,5	MS	PDE	36,005	71,445

## 2.6. SISMICIDAD HISTÓRICA

A continuación se muestra una tabla con los principales terremotos acaecidos en Chile desde el siglo XVIII.

**Tabla 2-2. Terremotos históricos Chile. Fuente (USGS)**

FECHA (año/mes/día)	UBICACIÓN	MAGNITUD (Ms)	PROFUNDIDAD (Km)
1730 07 08	Valparaiso, Chile	M 8.7	-
1835 02 20	Concepción, Chile	M 8.2	-
1868 08 13	Arica, Peru (now Chile)	M 9.0	-
1877 05 10	Offshore Tarapaca, Chile	M 8.3	-
1906 08 17	Valparaiso, Chile	M 8.2	-
1922 11 11	Chile-Argentina Border	M 8.5	-
1928 12 01	Talca, Chile	M 7.6	-
1939 01 25	Chillan, Chile	M 7.8	-
1943 04 06	Illapel - Salamanca, Chile	M 8.2	-
1960 05 21	Arauco Peninsula, Chile	M 7.9	-
1960 05 22	Chile	M 9.5	-
1965 02 23	Taltal, Chile	M 7.0	-
1965 03 28	La Ligua, Chile	M 7.4	-
1971 07 09	Valparaiso region, Chile	M 7.5	-
1985 03 03	offshore Valparaiso, Chile	M 7.8	-
1998 01 30	Near Coast of Northern Chile	M 7.1	42
2002 06 18	Chile-Argentina Border Region	M 6.6	-
2003 06 20	Near the Coast of Central Chile	M 6.8	33
2004 05 03	Bio-Bio, Chile	M 6.6	21
2005 06 13	Tarapaca, Chile	M 7.8	117,2
2007 11 14	Antofagasta, Chile	M 7.7	40
2007 12 16	Antofagasta, Chile	M 6.7	57,8
2008 02 04	Tarapaca, Chile	M 6.3	32,3
2009 11 13	Offshore Tarapaca, Chile	M 6.5	28
2010 02 27	Offshore Bio-Bio, Chile	M 8.8	35

## 2.7. FUENTES SISMOGÉNICAS

En Chile, los terremotos se asocian a tres tipos de fuentes sismogénicas que generan sismos de magnitudes máximas específicas, cuya importancia para el proyecto depende de su distancia relativa a la fuente.

### 2.7.1. Terremotos interplaca subductivos tipo Thrust

Este tipo de terremotos ocurre en el contacto de las placas de Nazca y Sudamericana. Se caracterizan por producir terremotos de gran magnitud y presentar ubicación costera. Estos terremotos se desarrollan desde la fosa oceánica hasta 50-60 km de profundidad (Tichelaar y Ruff, 1993; Suárez y Comte, 1993; Belmonte – Pool, 1997).

### 2.7.2. Terremotos Intraplaca de profundidad intermedia (al interior de la placa de Nazca)

Este tipo de terremotos se ubica al interior de la placa de Nazca con epicentro continental. La profundidad del hipocentro de estos terremotos aumenta conforme se avanza hacia el este. La profundidad focal de estos terremotos se encuentra entre 70 y 100 km. Estos terremotos se localizan desde los 50 km hasta los 200 km de profundidad. Este tipo de terremotos es el de mayor probabilidad de ocurrencia en la zona de estudio.

### 2.7.3. Terremotos Intraplaca superficiales o corticales (al interior de la placa sudamericana)

La convergencia de la placa de Nazca y Sudamericana, da lugar a esfuerzos tectónicos en la placa sudamericana que ocasiona sismo superficiales o corticales. Estos sismos han sido de poca ocurrencia en la reciente historia sísmica chilena. Se dan en los sectores precordilleranos y cordilleranos, ubicándose a una profundidad menor de 30 km.

## 2.8. LEYES DE ATENUACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA HORIZONTAL

La ley de atenuación es la relación que liga la aceleración máxima horizontal con la magnitud y distancia entre la fuente y el punto de estudio. La atenuación de la intensidad de las ondas sísmicas sigue leyes distintas debido a las diferentes características de las estructuras geológicas que se atraviesan, siendo necesario estudiar los diferentes tipos de atenuación de forma independiente.

## 2.9. ESTIMACIÓN DE LAS ACELERACIONES MÁXIMAS HORIZONTALES PARA FUENTES COSTERAS DE POCA PROFUNDIDAD

Martín (1990) consideró la muestra más completa de datos de terremotos chilenos hasta la fecha para el cálculo de la aceleración máxima para la zona costera

$$A_{\max} = (71,3e^{0,83Ms}) / (R+60)^{1,03} \text{ cm/sg}^2$$

Siendo:

A= valor medio de la aceleración máxima horizontal en un sitio constituido por roca y en cm/sg<sup>2</sup>

R= distancia hipocentral en kilómetros  $\sqrt{(\Delta^2 + H^2)}$

$\Delta$ = distancia al epicentro (km)

H= profundidad del hipocentro (km)

Recientemente Medina (1998) modificó esta expresión:

$$A_{\max} = 733e^{0,7Ms} (R+60)^{-1,31} \text{ cm/sg}^2$$

## 2.10. ESTIMACIÓN DE LAS ACELERACIONES MÁXIMAS HORIZONTALES PARA FUENTES DE PROFUNDIDAD INTERMEDIA

Para fuentes de profundidad intermedia se utilizará la relación de atenuación de aceleraciones máximas horizontales determinada por Ruiz y Saragoni (2005)

$$A_{\max} = 565898e^{1,29M_s} (R+80)^{-3,24} \text{ cm/sg}^2$$

## 2.11. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS Y REGIONALIZACIONES SÍSMICAS DE CHILE. ESTUDIO DE MAGNITUDES MÁXIMAS

Diversos autores, aplicando criterios estadísticos han realizado estudios de regionalización del país en zonas sísmicas con diversas características de sismicidad. Los trabajos más recientes son de Labbé y Saragoni (1976) para los terremotos tipo Thrust e intraplaca de profundidad intermedia y de Barrientos (1980), siendo este último el empleado en proyectos ubicados al pie de la cordillera de los Andes o en la cordillera.

Para la caracterización de cada región sismogénica se recurre a las **leyes de Gutenberg-Richter** en la que se relaciona el número de terremotos ocurridos durante un periodo de tiempo, con su magnitud sísmica.

$$\text{Log } N = a - b \cdot M_s$$

N: Es el número de eventos con magnitudes mayor o igual que un valor  $M_s$ .

a: Representa la actividad sísmica de una región en términos generales.

b: Coeficiente que indica la proporción de sismos pequeños con respecto a la cantidad de sismos grandes. Su valor fluctúa generalmente entre 0.7 y 1.5, en general es cercano a 1.0 cuando los sismos son de origen tectónico. Mientras mayor es el valor de b, mayor es la cantidad de sismos pequeños respecto de los grandes registrados. También se ha observado que este parámetro puede reducir su valor transitoriamente, lo que se interpreta como un estado previo a un sismo de gran magnitud.

$M_s$ : Es la magnitud del sismo, estimada a partir de la amplitud máxima de las ondas superficiales con periodos iguales a 20 segundos.

### 2.11.1. Regionalización de Labbé y Saragoni (1976)

J.C.Labeé (1976) efectuó una regionalización a partir de la homogeneización de una muestra de 573 sismos de un periodo de 65 años y cálculo las constantes "a" y "b" de la ecuación, obteniendo la siguiente sectorización:

Tabla 2-3. Zonas sísmicas. Fuente: Labeé y Saragoni (1976)

Zona Geográfica	Ubicación	Log N=A-BM
1. Arica-Taltal	18°S - 26°S	7,63-1,14 $M_s$
2. Taltal -Linares	26°S – 36°S	6,41 – 0,99 $M_s$

Tabla 2-3. Zonas sísmicas. Fuente: Labeé y Saragoni (1976)

Zona Geográfica	Ubicación	Log N=A-BM
<b>3. Linares Pto. Aysén</b>	<b>36°S - 45°S</b>	<b>6,68 – 1,03 Ms</b>
4. Pto. Aysén – Cabo de Hornos	45°S – 56°S	4,46 – 0,81 Ms

Teniendo en cuenta que la zona de proyecto se ubica en la zona 3, se adoptarán los valores de "a" y "b" según:

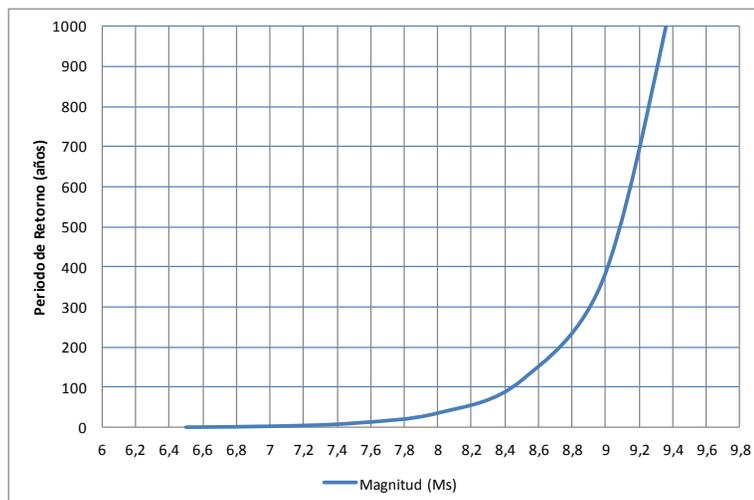
**Zona 3. Linares – Pto. Aysen 36°S – 45°S: Log N= 6,68 – 1,03 Ms**

**Tabla 2-4. Frecuencia de sismos y sus periodos de retorno. Fuente: Labeé y Saragoni (1976)**

Magnitud (Ms)	(N) Sismos /año	(1/N) Periodo de Retorno (años)
<b>6,5</b>	<b>0,9661</b>	<b>1,03</b>
<b>7,0</b>	<b>0,2952</b>	<b>3,38</b>
<b>7,5</b>	<b>0,0901</b>	<b>11,10</b>
<b>8,0</b>	<b>0,0275</b>	<b>36,36</b>
<b>8,5</b>	<b>0,0084</b>	<b>118,85</b>
<b>9,0</b>	<b>0,0025</b>	<b>389,04</b>
<b>9,5</b>	<b>0,00078</b>	<b>1273,50</b>

En Chile, se considera como sismo de diseño aquel con un periodo de retorno de 100 años y como sismo máximo creíble aquel con un periodo de retorno de 500 años.

**Figura 2-3. Periodo de Retorno de sismos en función de su magnitud. Fuente: Labbé y Saragoni (1976)**



Para dichos periodos de retorno las magnitudes resultan ser:

**Periodo de retorno de 100 años Ms=8,4**

**Periodo de retorno de 500 años Ms= 9,1**

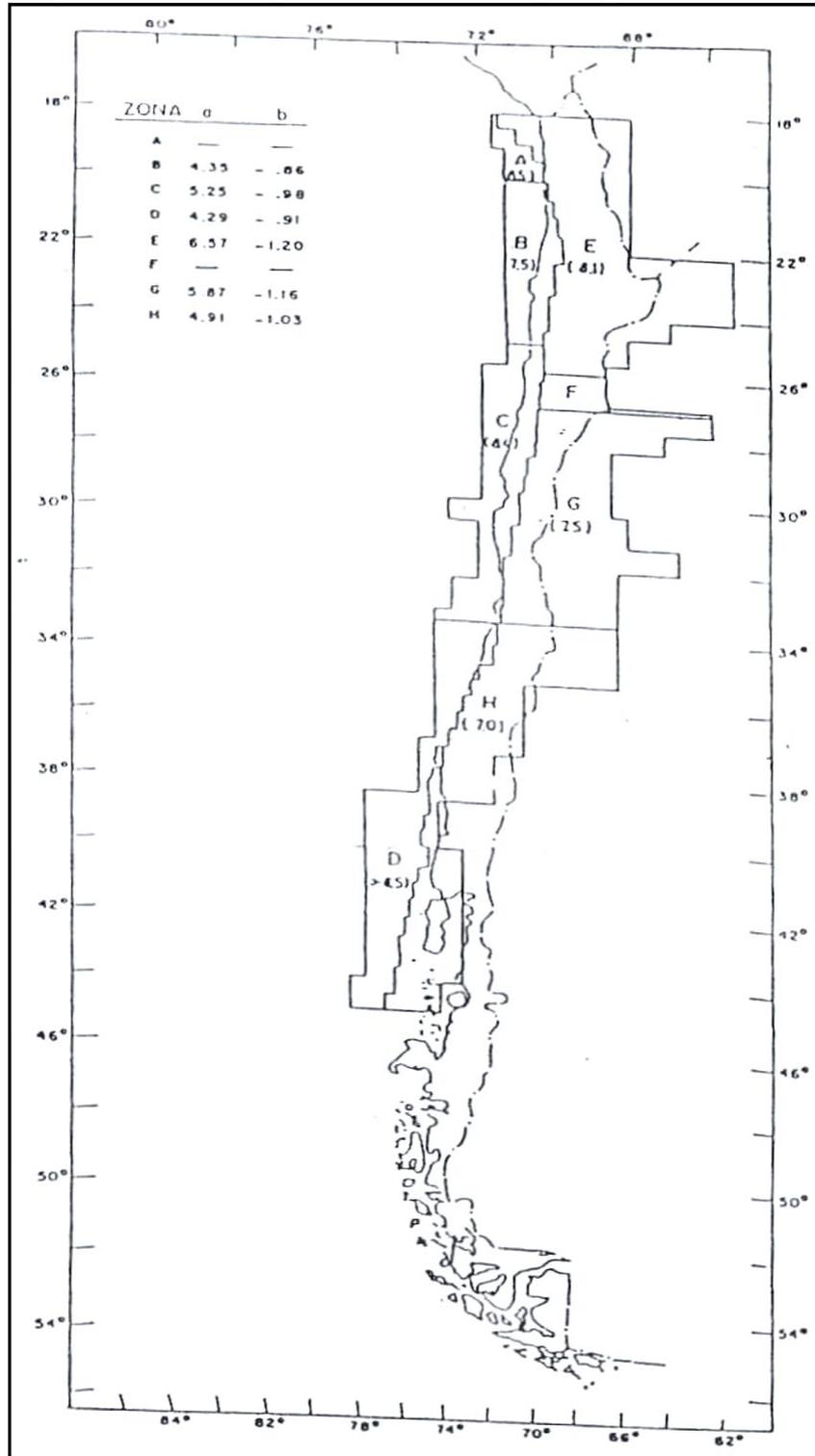
**Estas consideraciones son válidas para sismos cuyo epicentro e hipocentro se sitúan en la costa y en el mar.**

#### 2.11.2. Regionalización de Barrientos (1980). Zona cordillerana

Este autor además de la variación de la sismicidad con la latitud, considera una variación de la sismicidad según la longitud, de forma que diferencia las regiones cordilleranas o interiores y las costeras.

Según este criterio, establece ocho zonas, cuatro costeras (A, B, C y D) y cuatro cordilleranas (E, F, G y H), con sus respectivos valores característicos.

**Tabla 2-5. Regiones Sísmicas en Chile (Barrientos, 1980)**



**Tabla 2-6. Zonas sísmicas. Fuente Barrientos (1980)**

Zona	a	b	Magnitud Máxima
A	-	-	8,5
B	4,35	0,86	7,5
C	5,25	0,98	8,4
D	4,29	0,91	>8,5
E	6,57	1,20	8,1
F	-	-	-
G	5,87	1,16	7,5
H	4,91	1,03	7,0

Los emplazamientos de las alternativas dentro del valle del Achibueno están situados en la zona H, por lo que la fórmula de Gutenberg-Richter tiene la siguiente expresión:

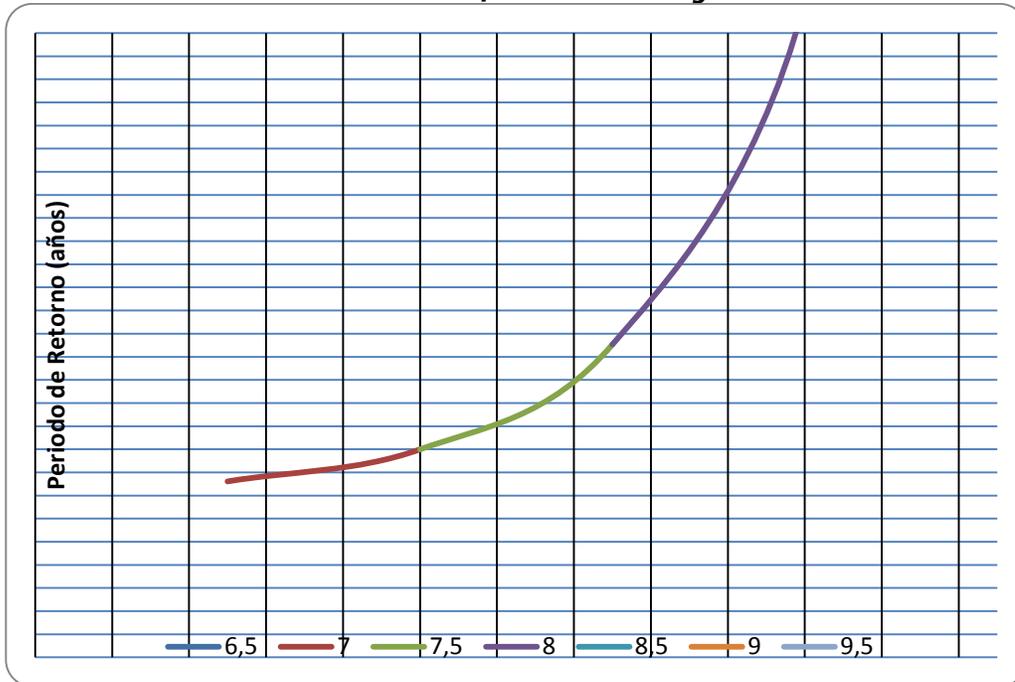
$$\text{Log } N = 4,91 - 1,03 M_s$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos al aplicar el criterio de Barrientos para el periodo de retorno para el área del valle de Achibueno:

**Tabla 2-7. Frecuencia de sismos y sus periodos de retorno. Fuente: Barrientos (1980)**

Magnitud (Ms)	(N) Sismos/año	(1/N) Periodo de Retorno (años)
6,5	0,0164	60,95
7,0	0,0050	199,53
7,5	0,0015	653,13
8,0	0,0005	2137,96
8,5	0,0001	6998,42

**Figura 2-4. Periodo de Retorno de sismos en función de su magnitud. Fuente: Barrientos (1980)**



Para dichos periodos de retorno las magnitudes resultan ser:

**Periodo de retorno de 100 años Ms=6,6**

**Periodo de retorno de 500 años Ms=7,4**

### 2.11.3. Análisis probabilístico

Para el análisis probabilístico se utilizan los datos provenientes de la sismicidad histórica y la definición de fuentes sísmicas, usando como medida la aceleración horizontal máxima (PGA) esperada para cierta probabilidad en un determinado periodo de recurrencia.

La probabilidad de exceder ciertos niveles de aceleración en periodos dados de tiempo, se calcula haciendo uso de leyes empíricas de atenuación del movimiento del terreno, suponiendo que estos eventos siguen una distribución de Poisson en el tiempo y una distribución exponencial de frecuencia-magnitud (Relación de Gutenberg y Richter). El peligro sísmico se define en términos probabilísticos como la probabilidad de que ocurra al menos un sismo de características preestablecidas en cuanto a nivel de movimiento fuerte del suelo durante un periodo dado de T años. Para evaluar esta probabilidad se utiliza la distribución de Poisson:

$$P(n) = \frac{(T/Tr)^n e^{-T/Tr}}{n!}$$

Donde P(n) es la probabilidad de ocurrencia de n situaciones de la clase considerada, con periodo de retorno Tr durante un intervalo de T años. Evaluando esta expresión para n=0 se encuentra la probabilidad de que no ocurra ningún caso durante el periodo T:

$$P(0) = e^{-T/Tr}$$

Por tanto, la probabilidad de que ocurra al menos un evento en el periodo T será:

$$P_s = 1 - e^{-T/T_r}$$

Siendo  $P_s$  = Peligro sísmico,  $T$  = Vida útil considerada y  $T_r$  = Tiempo medio de retorno.

Los sismos considerados en el cálculo de  $T_r$  pertenecen a una determinada clase que se define previamente atendiendo a alguna característica propia, como por ejemplo, aquellos sismos registrados en el periodo disponible que originen en el lugar de estudio una aceleración máxima del suelo mayor que un valor prefijado.

El método probabilístico fue publicado originalmente por Cornell (1968) y posteriormente adaptado para permitir su uso numérico por Algermissen y Perkins (1976). Para estimar el movimiento fuerte del suelo en una zona, se utilizan las curvas de atenuación de aceleraciones máximas horizontales en función de la magnitud de Richter y de la distancia hipocentral desarrolladas por Martin (1990) y modificadas recientemente por Medina (1998). Estas curvas incorporan los datos de acelerogramas registrados con ocasión del terremoto del 3 de marzo, 1985, Magnitud  $m=7.8$ , y reemplazan las curvas generalmente usadas por Saragoni et al. (1981) propuestas con anterioridad al sismo de 1985, que sólo consideraban los sismos de la Ligua de 1965 y de 1971, de magnitudes 7.1 y 7.5 respectivamente y otros sismos menores. La expresión de atenuación de Medina (1998) estima aceleraciones sistemáticamente mayores que la de Saragoni et al. (1981), especialmente para magnitudes grandes y distancias inferiores a 100 km. Sin embargo, entregan valores similares a las expresiones obtenidas por Schaad y Saragoni (1989) y Schaad (1991).

En el trabajo realizado recientemente "Peligro Sísmico en el Segmento Norte de la Región del Maule, Chile. A. Altair (2011), mediante el método probabilístico, se obtienen valores de aceleración horizontal máxima de 0,29 a 0,34g en la ciudad de Linares para terremotos interplaca para una vida útil de 50 años con un 10 % de probabilidad de excedencia. Mientras que para la fuente intraplaca oceánica, con igualdad de probabilidad de excedencia, se espera una aceleración horizontal máxima de 0,42g. El modelo probabilístico final obtenido para ambas fuentes en conjunto resulta en valores máximos superiores a 0,40g, llegando a 0,52g para un periodo de retorno de 475 años.

#### 2.11.4. Análisis determinístico

Para el análisis determinístico, se ha tomado una muestra a partir de los registros de sismos, obtenidos de la USGS, de magnitud  $\geq 6$ , del periodo de 1973 -2013, del área situada entre la latitud  $30^\circ$  y  $37^\circ$  S y la longitud entre  $70^\circ$  y  $72^\circ$  W.

El método determinista considera el máximo sismo que pudiese ocurrir en las fallas potencialmente activas, asociadas a sismicidad. Se han evaluado las variables propias de cada fuente sismogénica según mecanismo y geometría, utilizando como criterio la aceleración horizontal máxima en roca.

A continuación se han agrupado los datos obtenidos según la fuente sismogénica de origen, de forma que se han obtenido los siguientes resultados:

**Tabla 2-8. Sismos ocurridos desde 1973 a 2013 entre las latitudes escogidas. Fuente: TYP SA**

DATOS DE LA USGS		
LATITUD	30°S	37°S
LONGITUD	70°W	73°W
MUESTRA DE 1973 A 2012		
RANGO MAGNITUDES		M <sub>s</sub> >6
TOTAL 71 SISMOS		

	SISMOS INTERPLACA	SISMOS INTRAPLACA PROF. INTERMEDIA	SISMOS CORTICALES
Nº SISMOS	15	52	4
MAGNITUD MÁXIMA	8,8	8	6,7
MAGNITUD MEDIA	6,4	6,3	6,4
MAGNITUD MÍNIMA	6	6	6
DESVIACIÓN	0,75	0,42	0,29
PROFUNDIDAD MÁX (km)	45	120	31
PROFUNDIDAD MEDIA (km)	30	42	18
PROFUNDIDAD MIN (km)	21	30	5
DESVIACIÓN	7	16	14
DISTANCIA MÁX (km)	608	600	528
DISTANCIA MEDIA (KM)	230	375	280
DISTANCIA MIN (km)	110	9	80
DESVIACIÓN	136	170	212

Del análisis de los datos anteriores, se puede observar que en el valle del río Achibueno, los sismos con mayor ocurrencia son los sismos intraplaca de profundidad intermedia, habiendo ocurrido un sismo a 9 km de distancia, hasta la ubicación aproximada de la alternativa de la Recova.

A continuación se presentan las características de los posibles terremotos característicos, según la fuente generadora para el área en estudio en función de los datos anteriores:

A partir de los datos anteriores establecemos los escenarios más desfavorables en función de la fuente:

**Tabla 2-9. Escenarios más desfavorables. Fuente: TYP SA**

	Magnitud Ms	Profundidad (km)	Distancia al sitio de presa considerado* (km)	Ley de atenuación	Aceleración Max (cm/sg <sup>2</sup> )	PGA (g)
<b>Terremoto interplaca</b>	8,8	21	110	Medina (1998)	409,13	<b>0,41g</b>
<b>Terremoto intraplaca de prof. intermedia</b>	8,0	30	9	Ruiz y Saragoni (2005)	402,74	<b>0,40g</b>
<b>Terremoto cortical</b>	6,7	5	80	Ruiz y **Saragoni (2005)	230,99	<b>0,23 g</b>

\* Se ha considerado el sitio de presa ubicado en la Recova, extrapolándose los datos obtenidos a “el Montecillo”

\*\* No hay trabajos que permitan determinar las leyes de atenuación para esta fuente por lo que se ha optado por la de Ruiz y Saragoni (2005) para estimar la aceleración máxima.

### 2.12. ACELERACIÓN MÁXIMA HORIZONTAL PROPUESTA PARA EL DISEÑO

Del resultado de los análisis de los resultados anteriores, se propone la aceleración máxima horizontal siguiente para el sismo de diseño:

**Tabla 2-10. Aceleración sísmica para el diseño. Fuente TYP SA**

<b>Sismo de diseño (100 años) <math>a_{max} = 0,41g</math></b>
----------------------------------------------------------------

Se estima que la aceleración vertical, podría ser 2/3 de la horizontal.