



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**PROCESOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA  
DE TARAPACÁ: ANÁLISIS DE LAS RELACIONES  
SEDIMENTOLÓGICAS CON EL ABANICO ALUVIAL**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**DARÍO ALFREDO TORO PIÑEIRO**

PROFESOR GUÍA:

LINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

MIGUEL ÁNGEL CARO HERNÁNDEZ

SANTIAGO DE CHILE

2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo  
**POR:** Darío Alfredo Toro Piñeiro  
**FECHA:** 14/12/2015  
**PROF. GUÍA:** Linda Daniele.

## **PROCESOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ: ANÁLISIS DE LAS RELACIONES SEDIMENTOLÓGICAS CON EL ABANICO ALUVIAL**

La región de Tarapacá se caracteriza por sus cuencas endorreicas, ya sea en el Altiplano (cuencas altiplánicas) como en la Depresión Central (cuenca Pampa del Tamarugal). Estas cuencas endorreicas limitan al norte y al sur con cuencas exorreicas que tienen su desembocadura en el mar (Camiña y Río Loa). Sumado a esta característica, también destaca la condición de clima árido, cuya evaporación supera con creces a la precipitación, condicionando el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico de esta zona, en la cual dominan los ambientes evaporíticos y napas subterráneas con recarga lateral.

En el presente trabajo se realiza un análisis geológico, hidrológico e hidrogeológico para estudiar la interacción entre dos sistemas de importancia hidrogeológica en la región de Tarapacá, estos son el acuífero Pampa del Tamarugal y la cuenca de la Quebrada de Tarapacá. El área de estudio comprende la cuenca de la quebrada de Tarapacá, y también el abanico aluvial situado a la salida de la cuenca, dentro del cual se localiza el sondaje Huara de la Dirección General de Aguas (DGA). Este organismo del Estado es el que ha solicitado el estudio sedimentológico y estratigráfico de este sondaje.

Desde el punto de vista geológico se realizó una descripción sedimentológica y estratigráfica del sondaje, cuya interpretación sedimentaria es complementada con los valores de conductividad hidráulica en distintos tramos del sondaje, obtenidos a partir de ensayos realizados por el IDIEM.

Mediante una caracterización hidrogeológica, se definen unidades de importancia hidrogeológica en el área de la cuenca, considerando la geología, la hidrografía y usando métodos de SIG y teledetección. A partir de la caracterización hidrogeológica, se estudia y analiza hidrológicamente la cuenca, lo cual conduce a la estimación la recarga natural hacia el acuífero Pampa del Tamarugal mediante el método de la Curva Número. Con este método y con una caracterización de los parámetros morfométricos de la cuenca, se hace una estimación de caudales máximos líquidos a la salida de la cuenca, con los cuales se calculan caudales y volúmenes mínimos y máximos detríticos que permiten desarrollar modelos flujos de detritos para el abanico aluvial, para una escenario de caudales con períodos de retorno de 100 años y otro escenario que reproduce el evento de crecidas de 2012 que ocurrió en la región de Tarapacá.

Como conclusiones generales de este trabajo se obtiene que la interacción que existe entre el acuífero de la Pampa del Tamarugal y la Quebrada de Tarapacá se ve reflejada en la sedimentología y estratigrafía de los depósitos de flujos de detritos y de inundación del sondaje Huara.

*A mis padres y a mi hermana*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la profesora Linda Daniele, que ha sido mi guía de esta memoria, atenta y disponible a pesar de sus muchas cargas, me aconsejó, alentó y apoyó a lo largo de todo el proceso, entregando gran paciencia y disponibilidad. En particular quiero agradecer los conocimientos hidrogeológicos y manejo de SIG, principales pilares en los que se sustenta este trabajo.

Agradezco a la Dirección General de Aguas la posibilidad de realizar esta memoria de título. En particular quiero agradecer a Miguel Ángel Caro por su disponibilidad y entrega de conocimientos hidrológicos que tanto me han aportado.

Al profesor Sergio Sepúlveda le agradezco por brindarme los conocimientos de geología aplicada y por su disponibilidad para resolver mis dudas y ayudar en la construcción de este trabajo.

Agradezco a los compañeros y personas que he conocido a lo largo de mi vida universitaria.

Finalmente quiero expresar mi eterno agradecimiento por mi familia que me ha apoyado incondicionalmente en todo aspecto de la vida. A mi papá por su total apoyo y entrega de valores y conocimientos desde el punto de vista de la geografía. A mi mamá y mi hermana por estar siempre conmigo.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
<b>1.1 Exposición del Problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Enfoques y procedimientos actuales en uso.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Ubicación y vías de acceso .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Objetivos .....</b>	<b>4</b>
1.4.1 Objetivo general .....	4
1.4.2 Objetivos específicos .....	4
<b>1.5 Hipótesis de Trabajo.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6 Organización de Trabajo .....</b>	<b>5</b>
2. METODOLOGÍAS .....	6
<b>2.1 Metodología para la caracterización de variables sedimentológicas y estratigráficas del sondaje DGA Huara .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Metodología para la caracterización hidrogeológica de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá.....</b>	<b>7</b>
2.2.1 Mapeo de depósitos fluviales.....	7
2.2.2 Clasificación no supervisada <i>K-Means</i> .....	8
<b>2.3 Metodología para la caracterización hidrológica de la zona.....</b>	<b>8</b>
2.3.1 Recopilación y manejo de datos meteorológicos de la zona .....	8
2.3.2 Metodología de la Curva Número para la determinación de la recarga .....	8
2.3.3 Caracterización de los parámetros morfométricos de la cuenca .....	9
2.3.4 Determinación de las variables hidráulicas .....	9
<b>2.4 Metodología para la estimación de caudales y volúmenes máximos detríticos mediante el modelo de Takahashi .....</b>	<b>10</b>
2.4.1 Modelo de Takahashi para caudales detríticos .....	10
2.4.2 Volumen detrítico.....	10
<b>2.5 Metodología para el modelo de flujos detríticos mediante Laharz.....</b>	<b>11</b>
3. ANTECEDENTES .....	13
<b>3.1 Marco Teórico .....</b>	<b>13</b>
3.1.1 Flujos de Detritos.....	13
3.1.2 Abanicos Aluviales .....	14
3.1.2 Ciclo Hidrológico .....	16
<b>3.2 Marco Geográfico.....</b>	<b>16</b>
3.2.1 Clima .....	16

3.2.2 Geomorfología .....	17
3.2.3 Suelos .....	19
3.2.4 Vegetación .....	20
<b>3.3 Marco Geológico .....</b>	<b>21</b>
3.3.1 Geología Regional.....	21
3.3.2 Geología Local.....	22
3.3.3 Hidrogeología .....	26
<b>3.4 Marco Hidrológico.....</b>	<b>28</b>
4. ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICA DEL SONDAJE DGA HUARA	29
<b>4.1 Descripción del testigo de sondaje .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2 Caracterización hidráulica del sondaje DGA Huara .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3 Interpretación de subambientes sedimentarios aluviales en el sondaje DGA Huara .</b>	<b>33</b>
5. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA .....	35
<b>5.1 Mapeo Hidrográfico .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2 Unidades de importancia hidrogeológica relativa.....</b>	<b>37</b>
Unidades de importancia hidrogeológica relativa a partir de la geología local.....	37
Unidades de importancia hidrogeológica relativa a partir de la clasificación no supervisada .....	37
Unidades de importancia hidrogeológica relativa de acuerdo a la red hidrográfica.....	38
Unidades de importancia hidrogeológica relativa.....	39
6. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA .....	42
<b>6.1 Antecedentes Meteorológicos .....</b>	<b>42</b>
<b>6.2 Estimación de la escorrentía y recarga mediante la Curva Número .....</b>	<b>44</b>
<b>6.3 Evento del 11 de marzo de 2012 .....</b>	<b>51</b>
<b>6.4 Determinación De Los Parámetros Morfométricos de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá.....</b>	<b>52</b>
6.4.1 Tiempos de Concentración .....	52
<b>6.5 Cálculo de caudales máximos mediante el método de la Curva Número.....</b>	<b>53</b>
7. MODELO DE FLUJOS DETRÍTICOS EN LA SALIDA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ.....	55
<b>7.1 Cálculo de caudales detríticos máximos mediante el método de Takahashi.....</b>	<b>55</b>
<b>7.2 Modelamiento de flujo de detritos .....</b>	<b>56</b>
7.2.1 Flujos para períodos de retorno de 100 años en la salida de la Quebrada de Tarapacá .....	61
7.2.2 Flujos para el evento de crecida de 2012 en la salida de la Quebrada de Tarapacá	62
8. DISCUSIÓN.....	63

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución porcentual de extracciones de agua dulce en la minería del cobre 2011 (%) (Comisión Chilena del cobre (COCHILCO) 2012).....	2
Figura 2. Ubicación y accesos del área de estudio. En rojo se observa zona a estudiar.....	4
Figura 3. Esquema de la organización del trabajo y las conexiones entre las metodologías que hacen posible llegar al objetivo general. En azul se muestra lo relativo a la cuenca de la quebrada de Tarapacá, y en amarillo se representa lo relativo al sondaje DGA Huara y el abanico aluvial.....	6
Figura 4. jerarquía hidrográfica propuesta por strahler en 1964. ....	7
Figura 5. Diagrama que muestra la asociación entre las dimensiones de un idealizado lahar y su sección transversal (A) y sección planimétrica (B). Modificado de Iverson <i>et al</i> , 1998). ....	11
Figura 6. Velocidades típicas para distintos tipos de deslizamientos Cruden y Varnes (1996).....	13
Figura 7. Morfología de un flujo de detritos (modificado de Pierson 1986).....	14
Figura 8. Tipos de depósitos en abanicos aluviales. (Nichols, 2009). ....	15
Figura 9. Esquema del ciclo hidrológico (Chow <i>et al.</i> , 1994).....	16
Figura 10. Localización de los Andes Central y Sur en relación a Sudamérica, mayores elementos morfológicos de la cordillera de los Andes, y placas oceánicas frente al margen oeste de Sudamérica. (a) Localización de la cordillera de los Andes en relación a Sudamérica, mayores subdivisiones a lo largo de ella, y mayores elementos tectónicos y morfológicos en las placas oceánicas frente al margen oeste de Sudamérica: Placa de Nazca y Pacífica-Antártica, separada por el Ridge de Chile. (b) Mayores rasgos morfológicos del centro y sur de los Andes en Chile (17°45' to 56°S): Oroclino boliviano y patagónico, segmentación de los Andes y unidades Morfoestructurales: 1, Cordillera de la Costa (entre 27° y 33°S); 2, Depresión Central; 3, Antearco de la Precordillera y Cordillera oeste, entre 18° y 27°S, Andes Altos, entre 27° y 33°S (Segmento de subducción flat-slab), Cordillera principal, entre 33°S y 42°S, 4, Cordillera Patagónica, 5, Antearco andino en la Patagonia Sur. (c) Sección esquemática del segmento de subducción norte de alto ángulo (Zona volcánica centro) mostrando distribución de las unidades morfoestructurales. Imagen Tomada del Libro Geología de Chile. Capítulo 3 Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile (R. Charrier <i>et al</i> 1993).....	18
Figura 11. Modelo teórico de los mecanismos y etapas de relleno de la cuenca sedimentaria de la Pampa del Tamarugal. a) Abanicos rellenan la Pampa con material volcánico continental, b) diferentes etapas fluviales rellenan y erosionan antiguos niveles, c) nueva actividad volcánica cubre el paisaje; y d) paisaje y nivel de erosión actual. (Pinto, 1999).....	19
Figura 12. Geología local de la zona de estudio (adaptado de Sernageomin, 2003).....	26
Figura 13. Mapa hidrogeológico de Chile (DGA, 1986) adaptado para la zona de estudio de este trabajo mediante elaboración propia. ....	27
Figura 14. Mapa de cuencas y subcuencas hidrográficas de la Pampa del Tamarugal delimitadas según distintas fuentes (CIDERH, 2013). ....	28
Figura 15. Gravas sueltas correspondientes a los tramos comprendidos entre 35 m y 39.5 m de profundidad.....	29
Figura 16. Testigos de arenas medias moderadamente cementadas correspondientes a los tramos comprendidos entre 75.5 m y 80 m de profundidad.....	29

Figura 17. Testigos correspondientes a los tramos comprendidos entre 98 m y 102.5 m de profundidad. .....	30
Figura 18. Columna estratigráfica del sondaje dga huara. El tamaño de grano representado corresponde a la moda.....	31
Figura 19. Tramo de 9-13 m del sondaje donde fue realizado el ensayo de Lefranc. ....	32
Figura 20. Tramo de 57.5-62 m del sondaje donde fue realizado el ensayo de Lefranc.....	32
Figura 21. Gráfico de la profundidad en el sondaje Huara y la conductividad hidráulica medida con carga constante. En el punto rojo se presenta el dato de conductividad hidráulica calculado por idiem para este trabajo. ....	33
Figura 22. Mapa de la red hidrográfica para la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá. Elaboración propia. .....	35
Figura 23. Mapa de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá con las unidades de importancia hidrogeológica definidas a partir de la geología local a escala 1.000.000 de sernageomin (2003). ....	37
Figura 24. Mapa de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá con las unidades de importancia hidrogeológica, definidas a partir de la clasificación no supervisada k-means. Elaboración propia.....	38
Figura 25. Buffer creado a partir de la red hidrográfica. Elaboración propia.....	39
Figura 26. Mapa de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá con las unidades de importancia hidrogeológica definidas. Elaboración propia. ....	39
Figura 27. Ubicación de las estaciones pluviométricas de la DGA utilizadas en este trabajo. ....	43
Figura 28. Ubicación de las estaciones de evaporación de la DGA utilizadas en este trabajo.....	44
Figura 29. gráfico de la precipitación máxima en 48 hrs para un período de retorno de 10 años versus la altitud.....	45
Figura 30. Mapa de bandas hipsométricas para la cuenca de la Quebrada de Tarapacá. Elaboración propia. ....	46
Figura 31. Comparación de imágenes satelitales de los años 2009 y 2012 para la zona del abanico aluvial a la salida de la quebrada de Tarapacá. Para la imagen del 2012 sólo se pudo obtener una un sector acotado del abanico. En rojo se delimita a los flujos que corresponderían al evento de crecida del año 2012. ....	51
Figura 32. Perfil topográfico del cauce principal. Elaboración propia. ....	53
Figura 33. Esquema del hidrograma unitario triangular del SCS (Mujumdar P.P, Nagesh Kumar, 2013)..	54
Figura 34. Flujos detríticos modelados a partir de valores de coeficientes $c_1$ y $c_2$ según lo recomendado por Grisswold e Iverson (2008) ( $c_1=0.1$ y $c_2=20$ ) y por webb et al., (2008) ( $c_1=0.1$ y $c_2=40$ ). De fondo se utiliza una imagen satelital Landsat TM 8, con fecha del 28 de marzo de 2013 Elaboración propia. ....	58
Figura 35. Mapa de la Región de Tarapacá y Perfil topográfico c-c' (Viguiet et al., 2015). ....	60
Figura 36. Flujos de detritos para volúmenes máximos y mínimos correspondientes a un período de retorno de 100 años. De fondo se utiliza una imagen satelital Landsat TM 8, con fecha del 28 de marzo de 2013 Elaboración propia.....	61
Figura 37. Flujos de detritos para volúmenes máximos y mínimos correspondientes al evento de 2012. De fondo se utiliza una imagen satelital Landsat TM 8, con fecha del 28 de marzo de 2013 Elaboración propia.....	62
Figura 38. Esquema de las trayectoria de granos y las resultantes segregaciones granulométricas en los flujos de detritos (Iverson, 2005).....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados Ensayos Lefranc en el sondaje para los tramos entre 11.5-13 m y 57,5-59 m bajo carga constante y carga variable. Ensayo de permeabilidad bajo carga constante para el tramo entre 77.5-78 m de profundidad. ....	33
Tabla 2. Tamaños de buffer utilizados según la jerarquía del dren.....	38
Tabla 3. Áreas para las distintas unidades de de importancia hidrogeológica relativa definidas. ....	40
Tabla 4. Valor de la curva número para cada una de las bandas hipsométricas definidas en este trabajo. ....	41
Tabla 5. estaciones meteorológicas de la dga empleadas para obtener los datos de precipitación. ....	42
Tabla 6. estaciones meteorológicas de la dga empleadas para obtener los datos de evaporación. ....	43
Tabla 7. estaciones pluviométricas de la dga con su cota y precipitaciones máximas en 48 horas para un período de retorno de 10 años.....	45
Tabla 8. Precipitación máxima en 48 horas para un período de retorno de 10 años en cada banda hipsométrica.....	47
Tabla 9. evaporación en 48 horas potencial y corregida para cada una de las bandas hipsométricas. ....	48
Tabla 10. Resultados de escorrentía, infiltración y recarga en l/s obtenidos para un período de retorno de 10 años. ....	50
Tabla 11. Parámetros morfométricos obtenidos para la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá. ....	52
Tabla 12. Caudales máximos (Qp) para distintos períodos de retorno. ....	54
Tabla 13. parámetros para la estimación del caudal detrítico. Obtenidos del estudio “diagnóstico de riesgo en quebradas laterales a los cauces de las quebradas de Camiña y Tarapacá” (IDIEM - Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas. 2012-2013, Sepúlveda et al.,2014) .....	55
Tabla 14. Resumen de caudales y volúmenes detríticos máximos y mínimos para distintos períodos de retorno en la salida de la Quebrada de Tarapacá.....	56
Tabla 15. Áreas y espesores máximos y mínimos para flujos modelados a partir de los coeficientes propuestos por Griswold e Iverson (2008) y Webb et al., (2008). ....	58
Tabla 16. Áreas y espesores máximos y mínimos para flujos modelados a partir de los volúmenes detríticos para períodos de retorno de 100 años. ....	61
Tabla 17. Áreas y espesores máximos y mínimos para flujos modelados a partir de los volúmenes detríticos para que reproducen el evento de crecida de 2012. ....	62

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Exposición del Problema

En ambientes con climas áridos como en la región de Tarapacá, Chile, y en particular la zona de la Pampa del Tamarugal, el estudio de los recursos hídricos subterráneos es de suma importancia dada la escasez de precipitaciones. En efecto, la región de Tarapacá es una de las zonas más áridas del mundo, por lo cual es prioritario realizar estudios ya sean públicos y privados que estén relacionados los recursos hídricos.

La principal reserva de agua para la población de la región de Tarapacá corresponde a la existente en el Acuífero Pampa del Tamarugal. Este acuífero se integra en la Formación Altos de Pica, de edad Terciario Superior a Cuaternario Inferior (Troger *et Gerstner* 2004). Esta formación se compone de secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas, lutitas y limolitas. Estas secuencias se intercalan con secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso (Tobas Soldadas). El funcionamiento de este gran acuífero aún no se conoce en detalle, como tampoco se conoce el comportamiento de las principales quebradas que en ocasiones transportan grandes cantidades de flujo que contribuye a la potencial recarga de este sistema acuífero.

Actualmente, la cuenca Pampa del Tamarugal posee la mayor cantidad de derechos de aprovechamiento de agua (DAA) subterráneos aprobados en la región, alcanzando un 94% del total. Además, en lo que respecta al caudal extraíble otorgado en la región, en la cuenca de la Pampa del Tamarugal se extrae el 65.5% (CIDERH, 2013). Entre los usuarios, con caudal otorgado mayor a 20 l/s, se encuentran las empresas de servicios sanitarios con más de 2000 l/s a las que siguen las compañías mineras metálicas y no metálicas, Teck Quebrada Blanca, SOQUIMICH, COSAYACH, BHP Cerro Colorado y Doña Inés de Collahuasi. Por lo cual queda en claro la gran importancia en las extracciones de agua para la minería del cobre en Chile, cuya distribución por región, y en particular para la de Tarapacá, se muestra en el gráfico de la figura 1. En este gráfico elaborado por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), se puede apreciar como la Región de Tarapacá ocupa el cuarto lugar nacional en la distribución porcentual de extracciones de agua dulce en la minería del cobre para el año 2011.

La explotación intensiva de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá, hace que sea de suma importancia profundizar en el conocimiento hidrogeológico de la zona. En particular los estudios de la interacción de los sistemas cuenca y acuífero son necesarios para conocer la evolución y los mecanismos que esta interacción pueda tener en zonas donde la recarga desde el sistema cuenca se lleva a cabo con el acuífero.

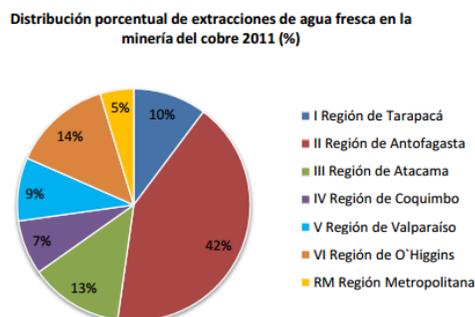
Además, existen importantes diferencias en cuanto a las características y las dimensiones propuestas para la delimitación del Acuífero Pampa del Tamarugal. El Acuífero Pampa del Tamarugal ha sido definido como una unidad no confinada (JICA, 1995). En contraste a esto, el Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC) en 2008 identifica y describe zonas confinadas en algunos sectores,

identificando un acuífero inferior de espesor variable de 25 a 175 m y un acuífero superior con espesores de 25 m a 225 m.

Por otra parte, la Dirección General de Aguas (DGA) propone una delimitación para determinar zonas de restricción para el aprovechamiento del recurso subterráneo (Resolución 245/2009). El acuífero se definió con una longitud de 146 km de Norte a Sur y 16-55 km de ancho de Oeste a Este, con una extensión de 4.845 km<sup>2</sup> y pendiente promedio 0.2-0.5 % (CIDERH, 2014). A diferencia de lo anteriormente propuesto por DGA en 2009, el Estudio sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la Parte Norte de Chile realizado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en 1995 propone una delimitación del acuífero con una superficie aproximada de 3.032 km<sup>2</sup>, es decir, 1.813 km<sup>2</sup> menos de extensión que la propuesta por DGA.

Al considerar las discrepancias con respecto a las extensiones del acuífero, cabe recordar que el área de estudio no existen antecedentes de análisis que relacionen completamente las características hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá con el acuífero Pampa del Tamarugal, siendo los análisis sedimentológicos y estratigráficos en el abanico aluvial a la salida de la cuenca muy importantes para entender mejor los mecanismos de transferencia y recarga.

Es justamente en estos últimos aspectos que esta memoria quiere avanzar analizando y estableciendo estas relaciones que ayuden a detallar la evolución geológica en el abanico aluvial. También es de suma importancia que tienen estas problemáticas sobre la demanda antrópica, pero su incorporación merece otro enfoque extendido y haber descuidado el interés central que se tiene en este trabajo.



**FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE EXTRACCIONES DE AGUA DULCE EN LA MINERÍA DEL COBRE 2011 (%) (COMISIÓN CHILENA DEL COBRE (COCHILCO) 2012).**

## 1.2 Enfoques y procedimientos actuales en uso

Existen estudios de levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y II, realizados por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de

Chile en diciembre del 2008, los cuales dejan en evidencia la escasez de recursos hídricos en superficie.

En diciembre de 2010, GCF ingenieros Ltda., para la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, publica el informe final “Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I, II, III regiones” donde se plantea elaborar un procedimiento de cálculo aplicable a escala regional a cualquier cuenca ubicada entre las regiones XV, III, sobre la cota 1500 m.s.n.m.

En 2012, Isabel Casanova realiza un trabajo de memoria de título que modela la recarga promedio de la quebrada de Tarapacá en su sector de cabeceras.

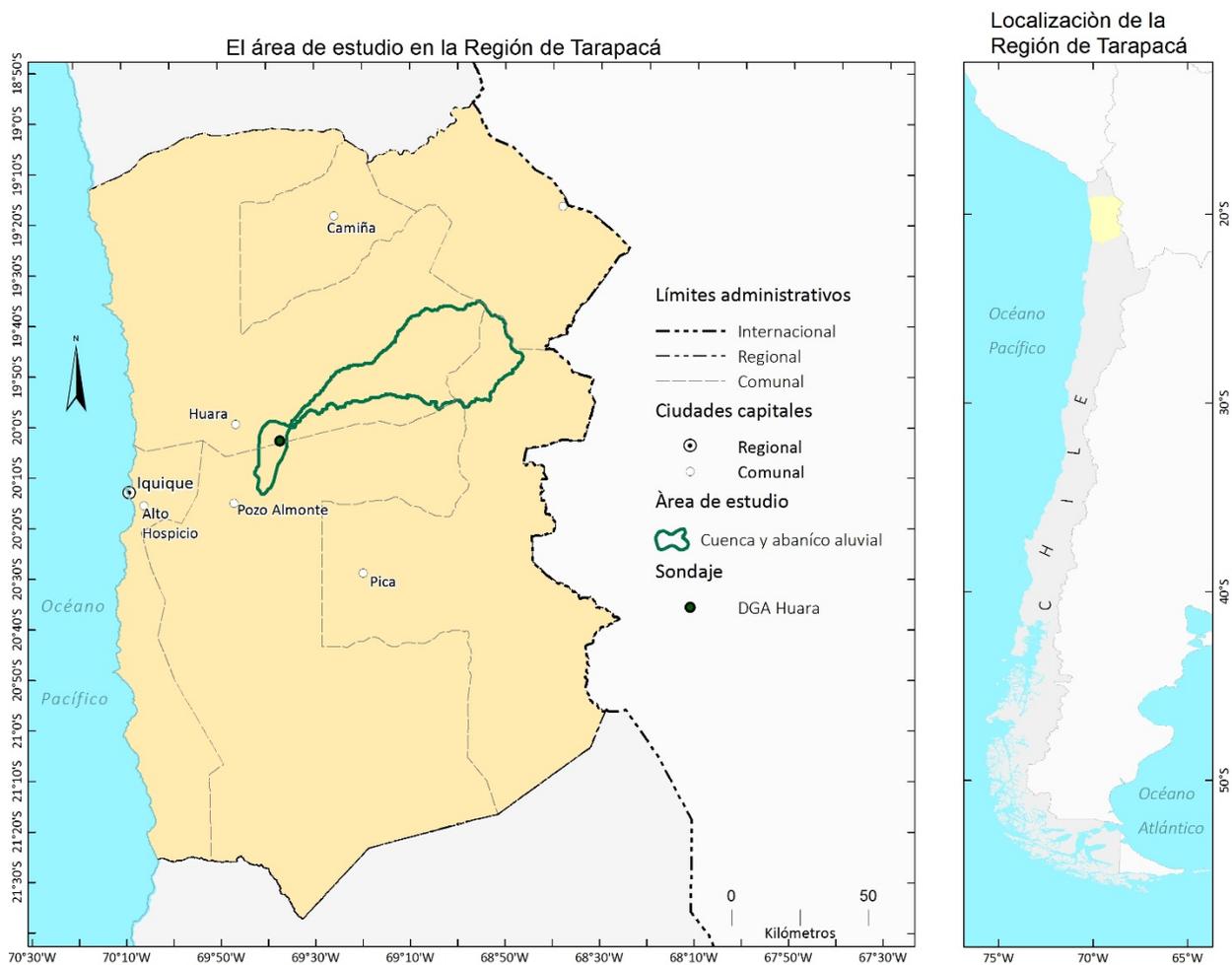
En 2013 el IDIEM, realiza un estudio de crecidas y procesos de remoción en masa para Camiña, Yala Yala, Chapiquilta, Apamilca, Cuisama, Moquella, Limacsiña, Huaviña, Mocha, Laonzana Diagnóstico de la situación de riesgo en quebradas laterales a los cauces de las quebradas de Camiña y Tarapacá. Parte del trabajo es publicado por el trabajo de Sepúlveda *et al.*, 2014 acerca de la descripción de los flujos de detritos generados en el evento de precipitaciones extremas de 2012, sus efectos en zonas pobladas y las características geomorfológicas e hidrológicas.

En 2014, el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) en conjunto con el Centro de Geosistemas, Instituto Superior Técnico, realizan una reproducción de la Piezometría del Acuífero Pampa del Tamarugal. En este trabajo se realiza una actualización de la Carta Piezométrica del Acuífero Pampa del Tamarugal.

En 2014, la Dirección General de Aguas (DGA) en su informe realiza una investigación y levantamiento de información hidrológica e hidrogeológica en la Quebrada de Tarapacá que se centra en profundizar el conocimiento de los recursos hídricos disponibles y de esta manera consolidar la información hidrogeológica de una de las cuencas más importantes que aportan recarga al acuífero de la Pampa del Tamarugal.

### **1.3 Ubicación y vías de acceso**

La zona de estudio abarca la zona del sondaje DGA Huara, en los depósitos de abanicos aluviales a la salida de la Quebrada de Tarapacá y cuyas coordenadas UTM son 7782909N y 435209E, y la cuenca de la Quebrada de Tarapacá. El acceso a la zona de estudio es a través de la Ruta 5 Norte hasta el cruce de Huara, donde se toma el camino aledaño CH 15 (Figura 2). En esta figura del área de estudio se enmarca la cuenca de la Quebrada de Tarapacá y parte del abanico aluvial a la salida de esta.



**FIGURA 2. UBICACIÓN Y ACCESOS DEL ÁREA DE ESTUDIO. EN ROJO SE OBSERVA ZONA A ESTUDIAR.**

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Profundizar en el conocimiento de los recursos hídricos disponibles en la Quebrada de Tarapacá y relacionar factores sedimentológicos y estratigráficos en los depósitos aluviales del sondaje DGA Huara con la hidrología e hidrogeología de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Definir unidades estratigráficas para la zona del abanico aluvial, a la salida de la Quebrada de Tarapacá.
- Interpretar ambientes geológicos para las unidades estratigráficas definidas.
- Determinar parámetros morfométricos de la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá.
- Efectuar estimaciones de la recarga natural hacia la Pampa del Tamarugal.

- Estimar máximos caudales para la cuenca de la Quebrada de Tarapacá, para distintos períodos de retorno.
- Confeccionar modelos de deposición para dos escenarios de flujos de detritos en el abanico aluvial.

## **1.5 Hipótesis de Trabajo**

La sedimentología del sondaje Huara permitirá inferir pautas de comportamiento hidológico e hidrogeológico de la Quebrada de Tarapacá, lo cual a su vez ayudará a reconstruir la historia sedimentológica ente la sedimentología y estratigrafía de los depósitos aluviales de este sondaje.

## **1.6 Organización de Trabajo**

Revisión de antecedentes y trabajos anteriores realizados en el área de estudio, desde octubre de 2014.

Trabajo mapeo de sondaje en el Laboratorio de Solidos del IDIEM de la Universidad de Chile durante los meses de diciembre del 2014 y enero del 2015.

Trabajo de mapeo hidrogeológico de la zona apoyado con software GIS, posterior al trabajo de laboratorio.

Trabajo de mapeo geológico de la zona de estudio a partir del Mapa Geológico 1.000.000 (Sernageomin, 2003), paralelo al trabajo de mapeo hidrogeológico.

Obtención de los parámetros morfométricos de la cuenca a partir del análisis hidrológico realizado previamente.

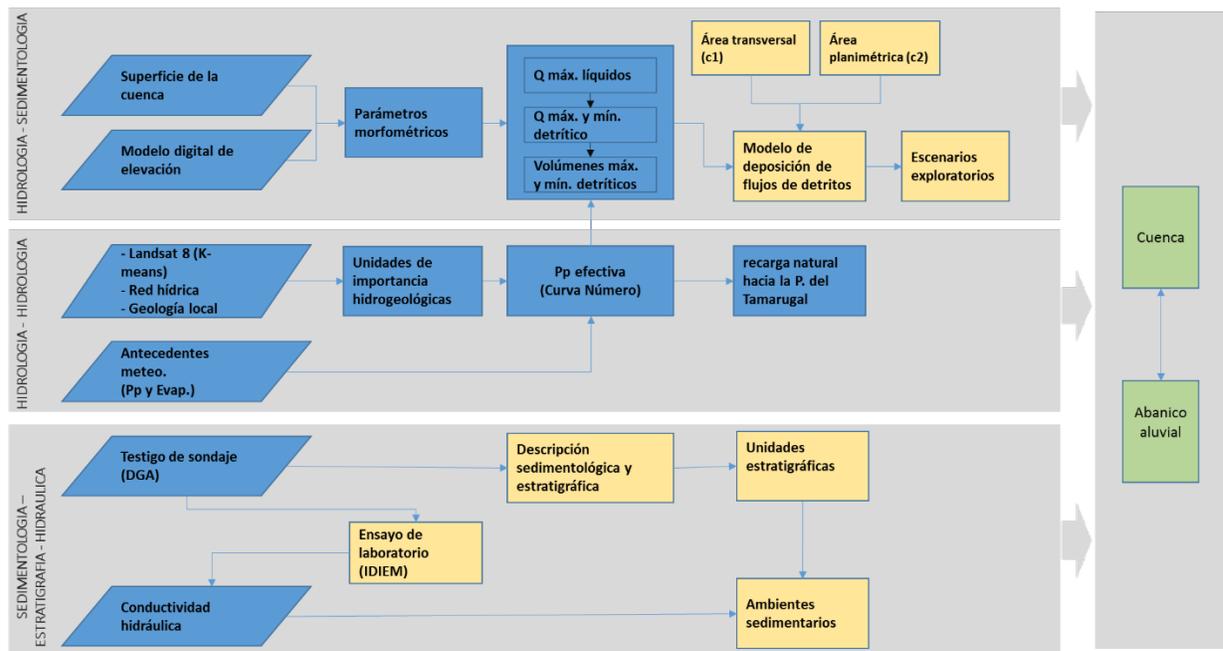
Utilización de los parámetros morfométricos de la cuenca y empleo de metodologías que den como resultado caudales y volúmenes detríticos y posterior empleo de estos resultados en modelos realizados mediante el programa Laharz en Arcgis 10.

Calibración, análisis e interpretación de los resultados obtenidos. Esto se realiza consultando la literatura pertinente a cada uno de los conceptos y procesos hidrológicos, hidrogeológicos y sedimentarios involucrados.

Una vez terminadas las actividades anteriores, se realiza la redacción de interpretaciones y análisis de resultados, organización de la discusión.

## 2. METODOLOGÍAS

Las metodologías utilizadas en este trabajo se orientan y se hacen específicas de acuerdo a los sistemas que conforman la zona de estudio, a saber, la cuenca y su abanico aluvial. Es así como mediante tres enfoques metodológicos, que incorporan diversas y complementarias perspectivas de análisis – hidrológica, sedimentológica, estratigráfica, geológica e hidrogeológica – se aborda el conocimiento de los recursos hídricos disponibles en la Quebrada de Tarapacá y sus implicancias en la sedimentología del sondaje Huara. Estos se resumen esquemáticamente en la figura 3 y en las secciones posteriores se presentan de manera detallada y de acuerdo a la secuencia en que fueron puestos en práctica a través del desarrollo del presente trabajo.



**FIGURA 3. ESQUEMA DE LA ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO Y LAS CONEXIONES ENTRE LAS METODOLOGÍAS QUE HACEN POSIBLE LLEGAR AL OBJETIVO GENERAL. EN AZUL SE MUESTRA LO RELATIVO A LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ, Y EN AMARILLO SE REPRESENTA LO RELATIVO AL SONDAJE DGA HUARA Y EL ABANICO ALUVIAL.**

### 2.1 Metodología para la caracterización de variables sedimentológicas y estratigráficas del sondaje DGA Huara

Descripción de muestras de testigo de sondaje DGA Huara realizado por la Dirección General de Aguas. Este organismo del Estado es el que ha solicitado y facilitado el estudio sedimentológico y estratigráfico de este sondaje. En esta descripción se incluyen las siguientes variables: litología, grado de humedad, esfericidad y redondeamiento de clastos, litología de

clastos, tamaño de clastos, compacidad y consistencia. Este trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Sólidos MECESUP, de la Universidad de Chile.

También se realizan estudios de la permeabilidad de las muestras de sondaje DGA Huara para determinar la conductividad hidráulica. Se han hecho ensayos de permeabilidad sobre 2 zonas del sondaje DGA Huara, los cuales se han llevado a cabo en el laboratorio de geotecnia del IDIEM ubicado en Arturo Prat 1171, Santiago de Chile. Los ensayos de permeabilidad realizados son del tipo carga constante y carga variable.

## 2.2 Metodología para la caracterización hidrogeológica de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá

Mapeo geomorfológico de la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá basado en su potencial hidrogeológico. Para la realización de este mapeo se han utilizado el software ArcGis 10 y ENVI 4.8.

La información utilizada para este mapeo es la siguiente:

- Imagen satelital Landsat TM 8, con fecha del 28 de marzo de 2013.
- Mapa geológico escala 1.000.000 (Sernageomin, 2003).
- Red hidrográfica de la cuenca elaborada en ArcGis 10.

### 2.2.1 Mapeo de depósitos fluviales

Para el mapeo de depósitos fluviales fue necesario disponer de la red hidrográfica jerarquizada de acuerdo al orden de sus drenes. Para ello se utilizó como base inicial, la cartografía IGM 1:250.000, la cual se fue enriqueciendo mediante la interpretación de los cursos de agua observados en las imágenes de la aplicación Google Earth. La red se ha digitalizado siguiendo la jerarquía hidrográfica propuesta por Strahler en 1964 (Figura 4).

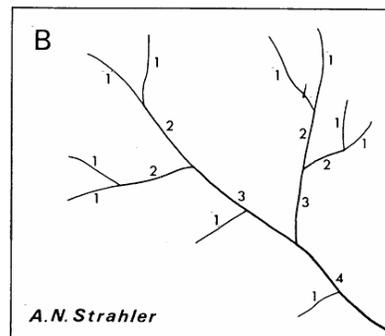


FIGURA 4. JERARQUÍA HIDROGRÁFICA PROPUESTA POR STRAHLER EN 1964.

### **2.2.2 Clasificación no supervisada *K-Means***

Los métodos de clasificación no supervisada pueden ser utilizados para agrupar píxeles en un conjunto de datos basándose únicamente en las estadísticas disponibles en las bandas espectrales sobre la imagen satelital a analizar.

Uno de los métodos de clasificación no supervisada de agrupación es *k-means*, el cual realiza una partición de un conjunto de  $n$  observaciones en  $k$  grupos, en el que cada observación pertenece al grupo más cercano a la media. Este método fue propuesto por MacQueen en 1967.

Sobre la imagen Landsat 8 de la zona de estudio se ha aplicado este método mediante el software ENVI 4.8 y así clasificar depósitos aluviales, coluviales y fluviales. Para esta clasificación se aplicó una máscara para excluir del análisis los datos estadísticos que no se encuentren dentro de la cuenca.

## **2.3 Metodología para la caracterización hidrológica de la zona**

### **2.3.1 Recopilación y manejo de datos meteorológicos de la zona**

Se recopilan datos meteorológicos de la Dirección General de Aguas (DGA) tales como las precipitaciones y evaporación.

A partir de los datos meteorológicos de precipitaciones se determinan las probabilidades de excedencia de los registros y el período de retorno asociado a estos.

### **2.3.2 Metodología de la Curva Número para la determinación de la recarga**

Para la determinación de la recarga se utilizan las siguientes variables de entrada:

- Antecedentes meteorológicos de precipitaciones y evaporación.
- Mapa de bandas hipsométricas de la cuenca.
- Valor de la Curva Número.

Se ha utilizado el Método de la Curva Número, propuesto por el Soil Conservation Service (SCS) de los EEUU en 1969, con el fin de definir las condiciones de recarga y así estimar la recarga al acuífero Pampa del Tamarugal por parte de la Cuenca Quebrada de Tarapacá. A partir de la tabulación de valores de Curva Número propuesto por Soil Conservation Service (SCS) (Anexo A1) según el tipo de suelo.

Este método es comúnmente utilizado debido a que es práctico y sencillo de llevar a cabo. Se basa en la infiltración producida durante las precipitaciones.

Esta metodología ya ha sido utilizada con éxito para la zona de cabeceras de la Quebrada de Tarapacá en el trabajo de memoria de título de Casanova en 2012. Sin embargo, aún no ha sido implementada esta metodología para el área total de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá.

### 2.3.3 Caracterización de los parámetros morfométricos de la cuenca

Se determinan parámetros morfométricos de la cuenca, tales como:

- Longitud del eje del cauce principal: Longitud axial de la cuenca (medido sobre el cauce más largo desde la cabecera hasta la salida de la cuenca). Medida en km.
- Longitud directa del cauce principal: Longitud entre dos puntos, uno en la cabecera del cauce principal y el otro en la salida de este.
- Coeficiente de sinuosidad hidráulico: Coeficiente de un río que representa la medida que el trazado del río se aparta de una línea recta. Se mide por la relación entre la distancia que separa dos puntos a lo largo de la parte más profunda del cauce y la distancia en línea recta entre ellos (Mueller, 1968).
- Altitud inicial: Altitud en la cabecera del cauce principal (msnm).
- Altitud media: Altitud media del cauce principal (msnm).
- Pendiente promedio del cauce principal: Expresada en grados.
- Tiempo de concentración según California Highways and Public Works: Tiempo de viaje de una partícula de agua desde el punto más remoto, hacia la salida de la cuenca. Modificación al tiempo de concentración de Kirpich de 1940 para cuencas mayores a 200 ha.

$$t_c = 0.95 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (1)$$

Donde  $t_c$  es el tiempo de concentración en horas,  $L$  la longitud en kilómetros del eje del cauce principal, y  $H$  la diferencia de altitud en metros entre la zona de cabeceras y la parte baja del cauce principal.

Para obtener estos parámetros se ha hecho uso del software ArcGis 10 y de Idrisi 17.0.

Las variables de entrada para obtener estos parámetros son: un modelo de elevación digital (DEM) y el límite de cuenca. El DEM se ha sido construido a partir de las curvas de nivel de la zona a escala 1:50.000, las obtenidas de Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). Mientras que el límite de cuenca se ha construido a partir de la red hidrográfica de la cuenca.

### 2.3.4 Determinación de las variables hidráulicas

Se determinan caudales máximos para periodos de retorno de 5, 10, 15, 50 y 100 años en la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá.

Para el cálculo de los caudales máximos se hace uso de los tiempos de concentración ( $t_c$ ) calculado según California Highways and Public Works y descrito en los parámetros morfométricos calculados para la cuenca y el uso del Método de la Curva Número, anteriormente mencionado.

Además, se analiza mediante dos imágenes satelitales obtenidas de Google Earth en la zona del abanico para los años 2009 y 2012, los posibles depósitos de flujos provocados por el evento de intensas precipitaciones ocurrido en marzo de 2012 para la zona de estudio (Sepúlveda *et al.*, 2014).

## 2.4 Metodología para la estimación de caudales y volúmenes máximos detríticos mediante el modelo de Takahashi

Takahashi en 1991 describe en su libro “Debris Flow” las observaciones realizadas en la quebrada Kamikahorizawa-Volcán Monte Takedake (Japón), en el que señala que los fenómenos de flujo detrítico están vinculados a tormentas de intensidades, que superan los 4 a 7 mm en 10 min (24 a 42 mm/hr en promedio), y no a las condiciones de precipitación antecedente. Las ondas son prácticamente de frente vertical desplazándose entre velocidades de 3 a 4 m/s en pendiente del orden del 7 a 10%. La densidad del flujo se estima entre 1,40 y 1,85 gr/cm<sup>3</sup>, y el material más grueso (sobre 10 cm) presente en la corriente proviene básicamente de la degradación que experimenta el lecho. La deposición del material, una vez alcanzado el valle, tiene la forma de un abanico de unas 2 a 3 veces el ancho de la quebrada.

### 2.4.1 Modelo de Takahashi para caudales detríticos

El procedimiento para calcular el flujo de detritos es descrito por Takahashi (1978, 1981) y también por Montserrat (2005). La expresión para el flujo de detritos descrita por Takahashi (1978, 1981) queda dada por:

$$Q_d = Q_0 \frac{C^*}{C^* - C_d} \quad (2)$$

Donde  $Q_d$  corresponde al máximo flujo de detritos,  $Q_0$  es el máximo caudal líquido,  $C_d$  es la concentración volumétrica teórica y  $C^*$  es la concentración máxima de sólidos, la cual generalmente toma valores del orden del 65%.  $C_d$  se puede estimar como sigue:

$$C_d = \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\phi) - \tan(\alpha)} \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  corresponde al ángulo de inclinación del lecho, y  $\phi$  al ángulo de fricción interna del material depositado (entre 30° y 40°) (Ayala, 1996; Armanini *et al.*, 2000),  $\rho$  es la densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>) y  $\rho_s$  es la densidad de sólidos (cerca de 2650 kg/m<sup>3</sup>). El parámetro  $C_d$  es definido por Takahashi (1981) como la concentración de equilibrio del flujo, la cual se alcanza en condiciones estacionarias. Los resultados obtenidos mediante esta ecuación presentan una buena correlación con los datos experimentales (Takahashi, 1981).

### 2.4.2 Volumen detrítico

La estimación del volumen detrítico provee una relación aproximada para predecir el volumen total de escorrentía sin conocer los hidrogramas. Takahashi (1991), emplea sus datos para calcular el volumen total obtenido de la regresión que tiende a limitar superiormente todas las observaciones (envolvente), mediante la siguiente ecuación:

$$V_{emax} = 1000Q_d \quad (4)$$

donde  $V_{emax}$  es el volumen total en  $m^3$ , y  $Q_d$  en  $m^3/s$ .

Takahashi (1991) utiliza esta expresión para  $V_{emax}$  y define el volumen de material sólido en depósito mediante la siguiente expresión:

$$V_d = 1500 \frac{Q_d}{1-C_v} \quad (5)$$

siendo  $V_d$  el volumen de sólidos arrastrados considerado en depósito expresado en  $m^3$ ,  $Q_d$  el caudal detrítico total en  $m^3/s$  y  $C_v$ , la concentración volumétrica de sólidos.

## 2.5 Metodología para el modelo de flujos detríticos mediante Laharz

Laharz es un programa computacional desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1998 (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 1998) que permite delimitar zonas de peligro volcánico, asociadas a la posible inundación generada por flujos laháricos a través de un método semi-empírico. El modelo está implementado en el software ArcGis. El método utiliza una combinación de análisis dimensional y estadístico para determinar áreas de inundación transversal (A) y planimétricas (B) generadas por el flujo en función del volumen de éste (Figura 5).

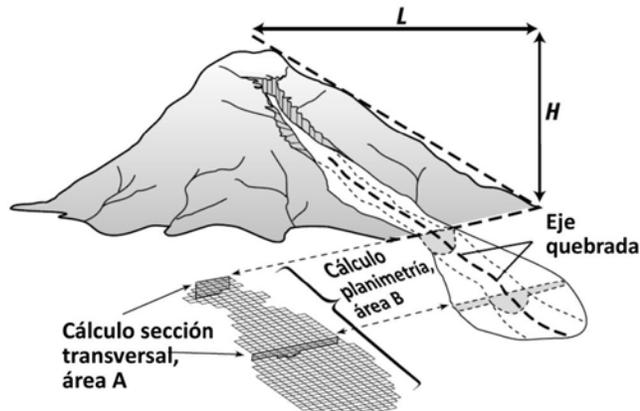


FIGURA 5. DIAGRAMA QUE MUESTRA LA ASOCIACIÓN ENTRE LAS DIMENSIONES DE UN IDEALIZADO LAHAR Y SU SECCIÓN TRANSVERSAL (A) Y SECCIÓN PLANIMÉTRICA (B). MODIFICADO DE IVERSON *ET AL*, 1998).

De forma de poder aplicar este método, se asume una masa y densidad constante, por lo tanto un volumen constante y mediante algoritmos matemáticos se obtienen las siguientes expresiones:

$$A = c_1 * V^{2/3} \quad (6)$$

$$B = c_2 * V^{2/3} \quad (7)$$

Donde  $V$  es el volumen,  $c_1$  y  $c_2$  son constantes adimensionales. Para el cálculo de estas constantes se deben utilizar datos de eventos de similares características al evento que se desea modelar.

Las ventajas que este programa presenta son la facilidad y rapidez de uso, lo cual permite ahorro de tiempo para obtener resultados. Estas ventajas vienen dadas por el hecho de que solamente se requiere un modelo de elevación digital de la zona (MDE). Por otra parte, las desventajas vienen dadas por la simplificación que supone el utilizar un volumen constante, la arbitrariedad del punto de partida del flujo y la imposibilidad de involucrar las propiedades reológicas.

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1 Marco Teórico

##### 3.1.1 Flujos de Detritos

###### Definición

En términos generales los flujos han sido definidos por Varnes (1978) como un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento muestra un comportamiento que se asemeja al de un fluido, el cual puede ser lento o rápido, saturado o seco.

Dentro del amplio término de flujo, existen los flujos de detritos, los cuales han sido definidos como flujos acuosos, plásticos, y altamente concentrados de sedimentos y agua, con un elevado *yield strength* (Pierson y Costa, 1987; Coussot y Meunier, 1996).

Por otra parte, Cruden y Varnes (1996), definen a un flujo de detritos como un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados (Figura 6), no plásticos ( $IP < 5\%$ ), el cual transcurre principalmente encauzado. Cuando el flujo es de detritos saturados, plásticos ( $IP > 5\%$ ), recibe el nombre de flujo de lodo.

Landslide velocity scale (Cruden and Varnes, 1996).

Velocity class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical velocity	Human response
7	Extremely Rapid	$5 \times 10^3$	5 m/sec	Nil
6	Very Rapid	$5 \times 10^1$	3 m/min	Nil
5	Rapid	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/hr	Evacuation
4	Moderate	$5 \times 10^{-3}$	13 m/month	Evacuation
3	Slow	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m/year	Maintenance
2	Very Slow	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/year	Maintenance
1	Extremely Slow			Nil

FIGURA 6. VELOCIDADES TÍPICAS PARA DISTINTOS TIPOS DE DESLIZAMIENTOS CRUDEN Y VARNES (1996).

###### Morfología

Los eventos de flujos están compuestos por oleadas o pulsos, cada cual presenta una morfología característica como se muestra en el diagrama de Pierson (1986) en la figura 7, donde priman distintos mecanismos de transporte de material fino y granular, niveles de energía y volumen de material.

Se distinguen tres regiones principales en un pulso de un flujo: el frente o cabeza, el cuerpo y la cola (Pierson, 1986).

El frente o cabeza del flujo tiene un comportamiento turbulento, transporta material granular, incluyendo grandes bloques (dependiendo del material disponible), es la zona más alta

del flujo, pudiendo superar los 10 metros. Esta característica es la que le otorga el gran nivel destructivo a estos eventos (Pierson, 1986).

El cuerpo corresponde a la zona que sigue a la cabeza, es la más extensa, tiene un comportamiento semi-turbulento y transporta gran porcentaje de partículas gruesas en suspensión (Pierson, 1986).

La cola sigue al cuerpo, es la zona de menor altura en un pulso, tiene un comportamiento laminar, transporta partículas finas y en función de la disponibilidad de estas, puede presentarse hiperconcentrada, es decir mayor concentración de agua que sólidos en el flujo (Pierson, 1986).

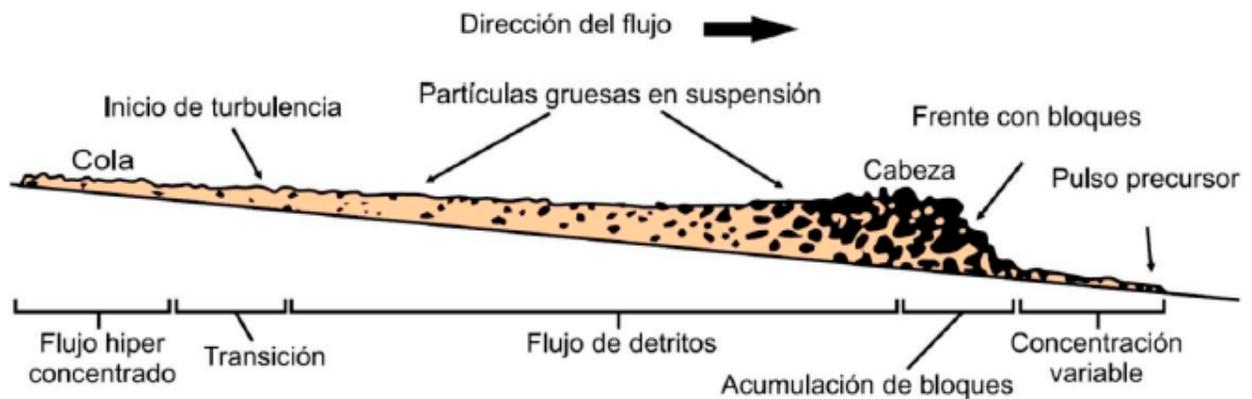


FIGURA 7. MORFOLOGÍA DE UN FLUJO DE DETRITOS (MODIFICADO DE PIERSON 1986).

### 3.1.2 Abanicos Aluviales

#### Definición

El término abanico aluvial se describe en la literatura como una amplia variedad de depósitos con una forma aproximadamente cónica y que carece de un cauce (Blair y McPherson 1994).

Por otra parte también son considerados abanicos aluviales los conos con bajo ángulo de depósitos de detritos de cauces en el borde de una cuenca (Harvey *et al.* 2005).

Nichols en 2009 define a los abanicos aluviales como conos de detritos que se forman en un quiebre de pendiente en el borde de un plano aluvial. Estos se forman por la deposición de un flujo de agua y sedimento proveniente de un ambiente erosivo adyacente a una cuenca.

#### Morfología

Según Nichols (2009), la morfología de los abanicos aluviales se compone de: **un cañón alimentador** que canaliza el drenaje en el borde de cuenca, un **ápice** que es la zona más proximal al cañón alimentador desde donde se deposita radialmente, y de **pie** del abanico que es el límite de deposición de detritos gruesos.

#### Procesos y deposición

Para Nichols (2009), estos procesos se ven determinados por la disponibilidad de agua, la cantidad y tipo de sedimento que es transportado desde el cañón alimentador y el gradiente en la

superficie del abanico. Variando estos parámetros se tienen tres tipos de subambientes (Figura 8):

- **Depósitos de flujos de detritos**

Formados por una densa mezcla de agua y sedimento. No alcanzan grandes distancias. Se caracteriza por depósitos de conglomerados matriz soportados, la selección en general es muy pobre, clastos sin orientación con tamaños de hasta varios metros, y los depósitos van desde centímetros a metros de espesor.

- **Planicies de inundación**

Cuando hay mayor disponibilidad de agua en la mezcla se forman estos depósitos, generalmente en tormentas. Se caracteriza por estratos de espesores de decenas de centímetros a un par de metros, los cuales son bien estratificados y con paquetes distintivos de arenas y gravas. Presenta imbricación de clastos comúnmente. La selección es pobre pero es ampliamente ausente el tamaño arcilla. Gradación normal puede presentarse.

- **Depósitos fluviales**

Depósitos que se forman cuando se encuentran encauzados. Forman canales que migran de una posición a otra en el abanico con el paso del tiempo. Se depositan capas más o menos continuas de grava, con estructuras sedimentarias de ríos entrelazados, estratificación cruzada e imbricación de clastos.

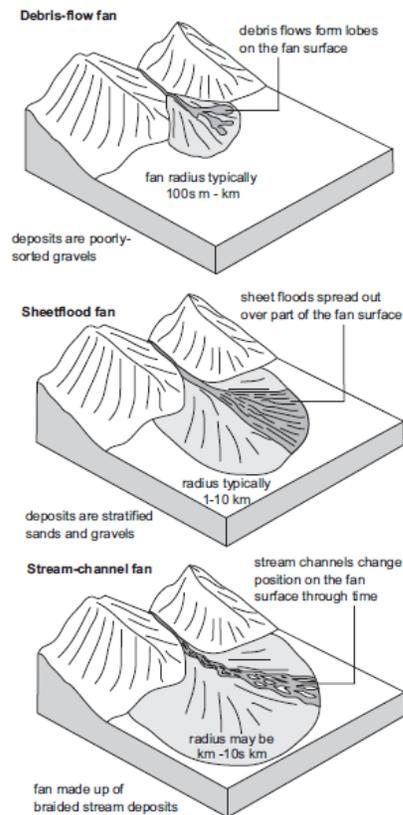


FIGURA 8. TIPOS DE DEPÓSITOS EN ABANICOS ALUVIALES. (NICHOLS, 2009).

### 3.1.2 Ciclo Hidrológico

#### Definición

En hidrología, el ciclo hidrológico es definido por Chow *et al.* (1994) como un ciclo con procesos que ocurren de forma continua. En este ciclo, esquematizado en la figura 9, se explica cómo el agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos en lo que se conoce como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escurrimiento superficial, regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar el escurrimiento superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa.

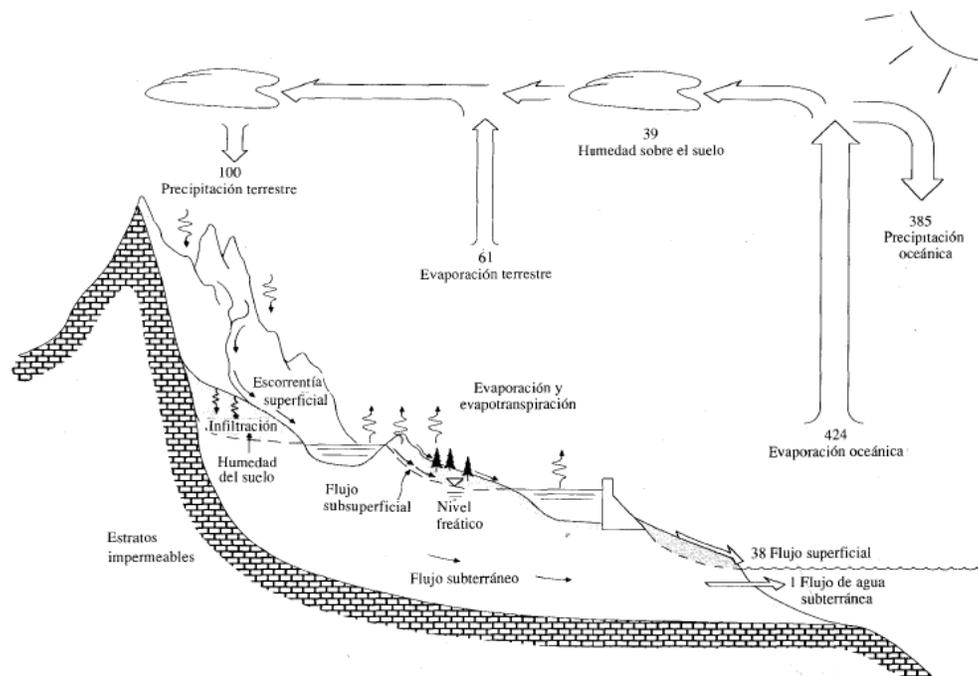


FIGURA 9. ESQUEMA DEL CICLO HIDROLÓGICO (CHOW ET AL., 1994).

## 3.2 Marco Geográfico

### 3.2.1 Clima

Existen tres tipos de clima presentes en la cuenca de la Quebrada de Tarapacá, estos son clima desértico interior, desértico marginal de altura y clima de estepa de altura.

La zona de estudio se encuentra ubicada a una altitud cercana a los 1100 m, y pertenece al clima desértico interior. Este tipo de clima se caracteriza por no tener influencia oceánica costera; además este subtipo climático se caracteriza por ser de extrema aridez, donde las precipitaciones anuales son de 0 mm, y las temperaturas medias alcanzan a 18°C. Característico de este clima son los días con cielos despejados y mucha luminosidad, y más seco que el tipo climático desértico costero, la humedad relativa en promedio es de 50%.

Las cantidades de precipitación promedio registradas por la estación pluviométrica de Huara en Fuerte Baquedano (a unos 17 km al suroeste del sondaje DGA Huara) localizada a 1100 metros de altitud, son de 1.4 mm/año.

El activo desarrollo de nubosidad convectiva en la parte sur de la cuenca amazónica y sobre el altiplano, durante el verano, condiciona el establecimiento de una circulación anticiclónica en la tropósfera superior, alrededor de un centro de alta presión denominado alta de Bolivia (Gutman y Schwerdtfeger, 1965; Virgi, 1981) cuyo centro se localiza sobre el territorio altiplánico, el cual corresponde a la zona de la parte alta de la Quebrada de Tarapacá.

### **3.2.2 Geomorfología**

La Quebrada de Tarapacá, se encuentra en el sector centro de la I Región de Tarapacá, en la provincia de Iquique. En esta zona es posible distinguir cuatro unidades morfoestructurales principales con orientación general Norte – Sur. Estas unidades se presentan en forma de escalones entre el Océano Pacífico y el límite fronterizo oriental, involucran dos extensas superficies deprimidas, a manera de fosas tectónicas o grabens, intercaladas entre tres macizos de tierras altas o cordilleras inducidas por una tectónica de bloques con hundimientos y solevantamientos a lo largo de fallas regionales de similar orientación. A pesar de lo anterior, se reconocen potenciales fallas transversales que interrumpen la regularidad de una determinada unidad. Las cuatro unidades morfoestructurales definidas de Oeste a Este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central o Intermedia, Precordillera y Cordillera Occidental (Figura 10).

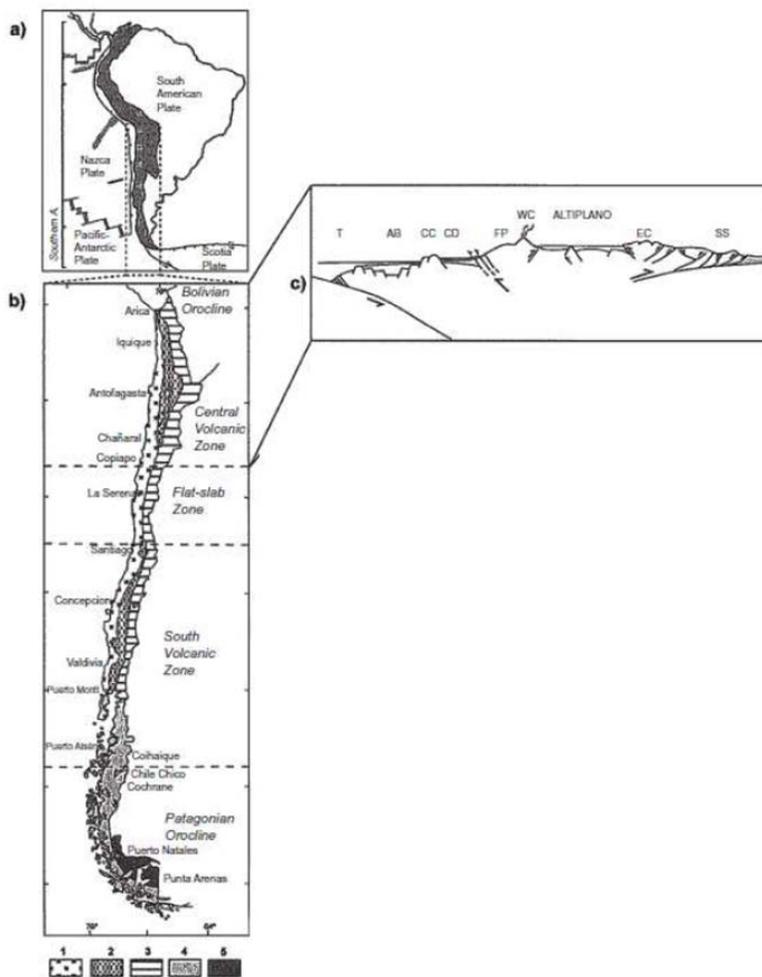
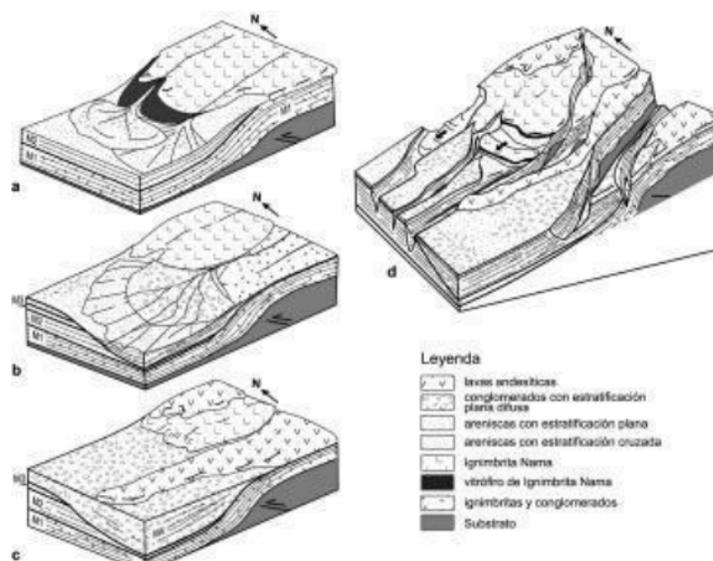


FIGURA 10. LOCALIZACIÓN DE LOS ANDES CENTRAL Y SUR EN RELACIÓN A SUDAMÉRICA, MAYORES ELEMENTOS MORFOLÓGICOS DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES, Y PLACAS OCEÁNICAS FRENTE AL MARGEN OESTE DE SUDAMÉRICA. (A) LOCALIZACIÓN DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES EN RELACIÓN A SUDAMÉRICA, MAYORES SUBDIVISIONES A LO LARGO DE ELLA, Y MAYORES ELEMENTOS TECTÓNICOS Y MORFOLÓGICOS EN LAS PLACAS OCEÁNICAS FRENTE AL MARGEN OESTE DE SUDAMÉRICA: PLACA DE NAZCA Y PACÍFICA-ANTÁRTICA, SEPARADA POR EL RIDGE DE CHILE. (B) MAYORES RASGOS MORFOLÓGICOS DEL CENTRO Y SUR DE LOS ANDES EN CHILE ( $17^{\circ}45'$  TO  $56^{\circ}S$ ): OROCLINO BOLIVIANO Y PATAGÓNICO, SEGMENTACIÓN DE LOS ANDES Y UNIDADES MORFOESTRUCTURALES: 1, CORDILLERA DE LA COSTA (ENTRE  $27^{\circ}$  Y  $33^{\circ}S$ ); 2, DEPRESIÓN CENTRAL; 3, ANTEARCO DE LA PRECORDILLERA Y CORDILLERA OESTE, ENTRE  $18^{\circ}$  Y  $27^{\circ}S$ , ANDES ALTOS, ENTRE  $27^{\circ}$  Y  $33^{\circ}S$  (SEGMENTO DE SUBDUCCIÓN FLAT-SLAB), CORDILLERA PRINCIPAL, ENTRE  $33^{\circ}S$  Y  $42^{\circ}S$ , 4, CORDILLERA PATAGÓNICA, 5, ANTEARCO ANDINO EN LA PATAGONIA SUR. (C) SECCIÓN ESQUEMÁTICA DEL SEGMENTO DE SUBDUCCIÓN NORTE DE ALTO ÁNGULO (ZONA VOLCÁNICA CENTRO) MOSTRANDO DISTRIBUCIÓN DE LAS UNIDADES MORFOESTRUCTURALES. IMAGEN TOMADA DEL LIBRO GEOLOGÍA DE CHILE. CAPÍTULO 3 TECTONOSTRATIGRAPHIC EVOLUTION OF THE ANDEAN OROGEN IN CHILE (R. CHARRIER *ET AL* 1993).

En la Pampa del Tamarugal, el principal mecanismo de transporte de material corresponde al fluvial, seguido del aluvial y finalmente el eólico. Existe escorrentía en las cuencas hidrográficas y en particular esta sería permanente durante el año en la Quebrada de

Tarapacá. Además durante los años de lluvias extremas se desarrollan flujos aluvionales o inundaciones. Estos vendrían a ser los mecanismos de transporte de sedimentos de mayor energía para la deposición de la cuenca de la Pampa del Tamarugal, y modelan la cobertura de la cuenca en forma de abanicos; que es de particular interés en este estudio para el abanico de la Quebrada de Tarapacá. En la figura 11, se puede ver una secuencia de tiempo de como el transporte fluvial fue rellenando la cuenca.



**FIGURA 11. MODELO TEÓRICO DE LOS MECANISMOS Y ETAPAS DE RELLENO DE LA CUENCA SEDIMENTARIA DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL. A) ABANICOS RELLENAN LA PAMPA CON MATERIAL VOLCÁNICO CONTINENTAL, B) DIFERENTES ETAPAS FLUVIALES RELLENAN Y EROSIONAN ANTIGUOS NIVELES, C) NUEVA ACTIVIDAD VOLCÁNICA CUBRE EL PAISAJE; Y D) PAISAJE Y NIVEL DE EROSIÓN ACTUAL. (PINTO, 1999).**

### 3.2.3 Suelos

La cuenca de la Quebrada de Tarapacá posee tres unidades taxonómicas correspondientes a suelos del orden Histosoles, Molisoles y Entisoles (IGM, 1984).

El tipo de suelo Histosol se encuentra alrededor de las quebradas, oasis y zonas húmedas en general. Generalmente se dan en la alta cordillera, sobre los 3.000 metros de altitud. Corresponden a suelos derivados de tejidos vegetales, se encuentran en los bofedales cuyos suelos orgánicos o minerales, muy estratificados, poseen altos contenidos de materia orgánica y elevada salinidad.

Los suelos del tipo Molisol son suelos en los que se han producido la descomposición y acumulación de grandes cantidades de materia orgánica que da origen a humus rico en calcio. Esto implica que la descomposición se produce en el interior y no sobre el suelo. Por estas razones son características de zonas subhúmedas o semiáridas, con vegetación en pradera que asegura este aporte de materia orgánica en profundidad.

Los suelos Entisoles se caracterizan por su carencia de horizontes bien desarrollados, poco evolucionados por la aridez de la zona. Pueden ser suelos jóvenes que no han tenido tiempo

de desarrollarse o bien viejos, en sentido geológico, pero que no han desarrollado horizontes por corresponder a materiales resistentes a la meteorización. Se presentan virtualmente en todos los climas sobre superficies fisiográficas recientes, ya se trate de empinadas pendientes sujetas a intensa erosión o sobre planos de sedimentación en donde se han depositado los materiales recién transportados. También pueden encontrarse sobre superficies fisiográficas antiguas, en donde por la intervención del hombre se ha destruido el perfil del suelo o bien cuando se trata de materiales resistentes que no han permitido su desarrollo. En el sector de la Pampa del Tamarugal este tipo de suelos derivan de sedimentos gruesos con alto contenido salino y pH elevado.

### 3.2.4 Vegetación

Según Gajardo (1997) se han identificado tres tipos de formaciones vegetales:

- Estepa Altoandina subdesértica: Formación vegetacional heterogénea, que se encuentra ubicada inmediatamente al sur del Altiplano, con la cual comparte muchos de sus elementos florísticos y parcialmente su geomorfología de extensas mesetas, aunque aquí son frecuentes las formas montañosas. Las asociaciones más características son: Lletilla – ojo de agua (*Pycnophyllum molle* – *oxalis exigua*); Tola – Lampayo (*Baccharis incarum* – *Lampaya medicinalis*); Paja iro – Pata de pizaca (*Festuca Chrysophylla*- *Fabiana bryoides*).
- Estepa arbustiva pre-altiplánica: Formación vegetacional que se ubica en los sectores montañosos de la pre-cordillera, también denominada Cordillera Central, la cual a pesar de ocupar una posición intermedia respecto al eje longitudinal del país, en ciertos lugares alcanza altitudes de más de 5.000 m s.n.m. Constituye un medio ambiente esencialmente montañoso con gran diversidad de condiciones de hábitat, lo que se refleja en una fisionomía vegetal muy variada. Predominan en el paisaje los arbustos bajos (tolares), pero también se encuentran interpenetrados elementos altiplánicos y desérticos posible causa de su diversidad florística, donde son abundantes las especies endémicas. Las asociaciones más características son: Queñoa – Checal (*Polylepis besseri* – *Fabiana densa*) y Checal – Suico (*Fabiana densa*- *Tagetes multiflora*).
- Matorral desértico con suculentas columnares: Es la continuación de una formación vegetal que presenta un mayor desarrollo y riqueza florística en situaciones ecológicas correspondientes a regiones más nortinas, en especial el sur del Perú. La comunidad más típica para la cual se encuentran referencias es la siguiente: Candelabro (*Browningia candelaris*); verbena (*verbena gynobasis*) y Añahuilla – Pupuña (*Adesmia spinosissima* – *Balbisia stitchkinii*).

### 3.3 Marco Geológico

#### 3.3.1 Geología Regional

Las rocas que se conocen de esta zona corresponden a edades pertenecientes al Precámbrico, Mesozoico y Cenozoico. Los Esquistos o Complejo Metamórfico de Belén (Montecinos, 1969) son las rocas más antiguas de esta región, corresponden a esquistos y gneises de bajo grado con edades de 1000 Ma (Pacci et al., 1980) y afloran en el borde occidental del Altiplano entre Socoroma y Ticnamar cabalgando a rocas más jóvenes, a través de un sistema de fallas inversas de alto ángulo y vergencia occidental (Muñoz y Charrier, 1996).

Durante el Triásico Superior y Jurásico Inferior se generó a lo largo de la actual Cordillera de la Costa un arco volcánico, conocido como la Fm. La Negra, el que junto con los depósitos de la cuenca marina de trasarco de Perú-Chile engranaron hacia el Este (Muñoz et al., 1988, 1989; Harambour, 1990). La regresión marina comenzó en el Jurásico Superior (Kimmeridgiano). La sedimentación continuó en algunos sectores de la cuenca durante el Neocomiano Inferior, acumulándose gruesos espesores de sedimentos clásticos arenosos con niveles que contienen especies de Trigonias del Cretácico Inferior (Fm. Livicar; MUÑOZ et al., 1988, 1989) y conglomerádicos (Fm. Chusmiza; Harambour, 1990). La regresión definitiva del mar coincidió con la deriva hacia el Este de América del Sur al separarse Gondwana. La inversión de la cuenca ocurrió en el Neocomiano Superior, la cual desarrolló una extensa faja plegada y corrida con vergencia oriental en la cuenca de trasarco (Muñoz y Charrier, 1996).

Recubriendo discordantemente los depósitos del Jurásico Superior de la cuenca de trasarco (Fm. Quebrada Honda) se encuentra la Fm. Panjuacha (Pachica, Quebrada de Tarapacá) que corresponde a rocas volcánicas de edad cretácica superior, intruidas por cuerpos datados en 80 Ma (Harambour, 1990). Esto indica un corrimiento del arco volcánico hacia el Este.

Durante el Eoceno tardío y Oligoceno temprano se desarrollan dos cuencas simétricas a ambos lados de la Cordillera Incaica debido a la contracción tectónica contra el bloque rígido formado por el alzamiento de esta cordillera. Las cuencas que se desarrollaron son la Pampa del Tamarugal al Oeste de la Cordillera Incaica y la Cuenca del Altiplano (Charrier, 2012). En el Mioceno se desarrollaron mantos ignimbríticos asociados a una actividad volcánica explosiva, que recubrieron a los depósitos anteriores (Fm Oxaya, en el Altiplano de Arica, Salas *et al.*, 1966; Fm Altos de Pica en el Altiplano de Iquique, Galli 1957, 1968; Galli y Dingman, 1962).

Sobre la Formación Oxaya se depositó la Fm. Lupica a lo largo de la Franja Socoroma, Zapahuira, Chapiquiña, Belén, Lupica, Ticnamar.

En el Mioceno Medio-Superior el bloque altiplánico cabalgó hacia el Oeste debido a un sistema de fallas inversas (Muñoz y Sepúlveda, 1992; Muñoz y Charrier, 1996).

Sobre la superficie del Altiplano, sobre la Fm Oxaya, se desarrolló actividad volcánica que dio origen a los campos geotérmicos de Jurase, Surire, Puchuldiza y El Tatio, entre otros (Lahsen, 1976), a importantes depósitos de Azufre y a los yacimientos de Cobre y metales preciosos, junto con sedimentos plio-pleistocenos de la Fm. Lauca y los depósitos evaporíticos acumulados en los salares.

### 3.3.2 Geología Local

La zona de estudio se encuentra ubicada al Noreste de la ciudad de Iquique, en la parte Baja de la quebrada de Tarapacá, aproximadamente entre los 7782909N y 435209E (Figura 12).

Dada la falta de información presente en esta área, el marco geológico local ha sido basado en el Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000, versión digital N°4 (Sernageomin, 2003) y su correlación con trabajos cercanos a la zona. De tal manera se obtendrán las Formaciones acá descritas.

Las unidades geológicas presentes en esta zona contemplan edades que van desde el Jurásico Superior hasta el Cuaternario.

#### 3.3.2.1 Rocas estratificadas

##### a) Secuencias Mesozoicas

##### **JK1 Jurásico Superior-Cretácico Inferior**

Secuencias sedimentarias transicionales: areniscas, lutitas, calizas, conglomerados.

- **Formación Quebrada Coscaya** (Harambour, 1990): Fue definida como una serie de más de 1000 m de espesor de rocas sedimentarias volcanoclásticas asignadas al Sinemuriano –Oxfordiano y separadas en dos miembros entre los cuales existe un contacto transicional. El Miembro Inferior corresponde a conglomerados y conglomerados arenosos y localmente calcáreos.

El Miembro Superior se compone de areniscas, fangolitas, calizas y conglomerados subordinados (Harambour, 1990). Agrupa a una serie de unidades que habían sido designadas por otros nombres en estudios anteriores al de Harambour (1990): Cauquima, Guaviña, Estratos de Paguanta y Luja por Sayés (1978); Gualchagua y parte de Cerro Empexa por Thomas (1967).

Aflora ampliamente en la parte oriental de la zona de estudio.

##### **Ks1c Cretácico Superior**

Secuencias sedimentarias continentales aluviales y lacustres: conglomerados, brechas, areniscas y limolitas rojas con intercalación de tobas riolíticas y lavas andesíticas.

- **Formación Chusmiza** (Harambour, 1990): Agrupa una serie estratos de areniscas, conglomerados y tobas de colores pardos y verdosos que afloran en el sector oriental del área de estudio y que fueron asignados al Jurásico Superior – Cretácico Inferior. Sobreyace en discordancia de erosión y en concordancia transicional al miembro superior de la Formación Quebrada Coscaya, en discordancia de erosión a la Formación Noasa y en discordancia angular a los estratos de Chullucane. En la región de Aroma está cubierta en discordancia angular por lavas cenozoicas del volcán Tatajachura (Harambour, 1990).

## **Ks2c Cretácico Superior**

Secuencias volcanosedimentarias continentales: rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas.

- **Formación Noasa** (Harambour, 1990): Esta unidad ha sido acotada al Jurásico Inferior. Es el equivalente al Miembro Inferior de la Formación Chacarilla, definida por Thomas (1967): Corresponde a una secuencia de areniscas cuarcíferas medias a gruesas. En la base de la secuencia se intercalan areniscas finas y fangolitas silíceas, y hacia el techo, calizas negras. El espesor expuesto es inferior a 350 m. Aflora en una franja longitudinal en la parte oriental de la zona de estudio. Su base no está expuesta. Subyace concordantemente a la Formación Quebrada Coscaya y en discordancia a la Formación Chusmiza, con la cual también se encuentra en contacto por falla inversa (Harambour, 1990).

Secuencias Cenozoicas Om3 Oligoceno-Mioceno

Secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesíticos a riolíticos.

### **Om3t Oligoceno-Mioceno**

Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso.

### **M3t Mioceno Inferior-Medio**

Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso.

- **Formación Altos de Pica** (Galli, 1957; Galli y Dingman, 1962): Corresponde a una secuencia de sedimentos continentales intercalados por niveles de tobas. La localidad tipo se ubica en los Altos de Pica, una meseta homoclinal de hasta 4.500 m s.n.m, ubicada a los 20°30'S, cuya topografía, aplanada por numerosos flujos de ignimbrita, se distingue dentro del relieve longitudinal de la Precordillera (Fig. 1.1 A).

En dicha localidad, la secuencia fue subdividida en 5 miembros (Galli, 1957; Galli y Dingman, 1962, Victor, 2000; Victor et al, 2004). Comprende unidades sedimentarias, constituidas por materiales clásticos gruesos de piedemonte en ambiente de oxidación, y volcánicas, las que corresponden a rocas piroclásticas riolíticas (tobas soldadas).

- Miembro 1 (322 m): se compone de conglomerados pardo amarillento de grano medio, polimíctico; areniscas pardo amarillentas medias a gruesas, con estratificación cruzada; tobas y tufitas.
- Miembro 2 (17 m): corresponde a una toba soldada riolítica, rosado- anarajada o gris oscura, que en sus niveles basales pasa a tobas poco consolidadas.
- Miembro 3 (173 m): areniscas amarillentas medias a gruesas, uniforme, con estratificación cruzada y conglomerados polimícticos.
- Miembro 4 (23 m): toba riolítica rosado-anaranjado gris a blanca y porosa.

- Miembro 5 (200 m): arena gris oscura a gris verdosa, media a fina con estratificación cruzada (Galli y Dingman, 1962).

Esta formación se encuentra en discordancia angular con rocas paleozoicas y mesozoicas. Además se observan discordancias dentro de la secuencia y entre los miembros. Su disposición en la región de Pica es levemente inclinada hacia el oeste y su espesor es variable, aumentando hacia el norte, llegando a los 1000 m de potencia en las cercanías de la zona de estudio.

Se definió como una unidad de probable edad Terciaria Superior a Pleistocena. Antecedentes publicados con posterioridad han permitido asignarle una edad Oligoceno Superior-Mioceno Inferior, en base a dataciones de los flujos de ignimbritas intercalados en la secuencia (Baker, 1977; Lahsen, 1982; Naranjo y Paskoff, 1985; Victor et al., 2004), entre las cuales, las más antiguas corresponden a una ignimbrita del Miembro 2 (24,33 + 0,26; Victor et al, 2004) y a una lava riolítica que sobreyace a los depósitos clásticos del Miembro 1 (26 + 0,4; Farías et al., 2005).

Extrapolando la tasa de sedimentación estimada para el Miembro 3 (0,008 mm/año), Victor et al. (2004) le asignó al Miembro 1 una edad máxima de 27 a 29 Ma. Esta edad es coherente con la edad máxima estimada por García (2002) para la Formación Azapa, lo que concuerda a su vez con la edad propuesta por Haschke y Günter (2003) para la inconformidad de la base de las Gravas de Atacama (29 Ma), que sobreyacen al mismo tipo de substrato hacia el sur de la región de Altos de Pica (Victor et al, 2004).

Por otra parte, los miembros 2-4 se correlacionan con la Formación Oxaya (e.g. Naranjo y Paskoff, 1985; Perez, 1972; Victor, 2000; Victor et al, 2004), mostrando el desarrollo de una secuencia con mayor contenido de aportes clásticos que la que se describe hacia el norte.

El techo de esta formación, de acuerdo a las correlaciones planteadas por Farías (2003) y Farías et al. (2005), corresponde al Miembro 4 de la definición de Galli y Dingman (1962), mientras que el Miembro 5 correspondería a la Formación El Diablo. La edad mínima que se ha obtenido para el Miembro 4, es de 16,2 Ma (Victor et al, 2004), que puede correlacionarse con la edad de la Ignimbrita Nama de la Formación Latagualla.

### **M3i Mioceno Inferior-Medio**

Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas.

- **Ignimbrita Huasco:** ignimbritas riolíticas y dacíticas de color gris y rosado. Vitrófiros basales negros.

### **Ms3i Mioceno Superior**

Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.

### **P3t Plioceno**

Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados que afloran en los sectores topográficamente altos de las cabeceras de la Quebrada de Tarapacá.

Su descripción en muestra de mano indica una toba cristalina de biotita, compuesta por 80% de matriz tamaño ceniza de fina a gruesa; 10% de líticas sub-angulosos grisáceos, desde 1 mm a 2 cm; 12% de cristales compuestos en su mayoría por Biotita (color pardo oscuro a claro, brillo micáceo, tamaño menor a 3 mm) y cuarzo (traslúcido, brillo vítreo, sub-redondeado, tamaño menor a 4 mm). Su espesor oscila entre 20 y 100 m.

### **P3i Plioceno**

Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesítico-basálticas

### **Qa Pleistoceno-Holoceno**

Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. En la Depresión Central, regiones I a III: abanicos aluviales.

### **Q3i Cuaternario**

Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos; adakíticos al sur de los 47°S.

#### **3.3.2.2 Rocas intrusivas**

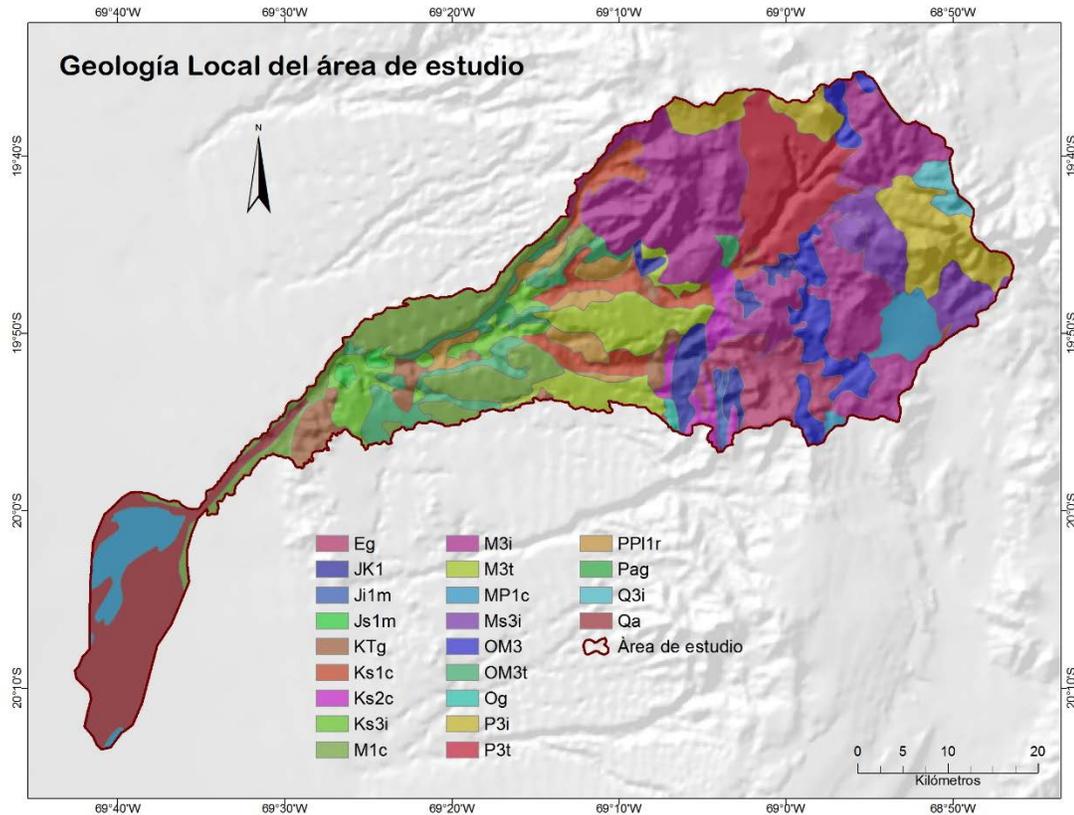
Las rocas intrusivas presentes en la zona de estudio, según las edades K-Ar disponibles y las relaciones de contacto, van desde el Cretácico Superior al Eoceno (Pérez, 1972; Harambour, 1990).

Se componen de dioritas, tonalitas, granodioritas y granitos de grano grueso que intruyen a la secuencia paleozoica y mesozoica, así como también a rocas intrusivas hipabisales que afloran en las quebradas de Choja, Munujna y Tarapacá.

Estos cuerpos plutónicos tienen geometría tabular y afloran en franjas longitudinales que se desarrollan principalmente hacia el sur de la Quebrada de Tarapacá.

### **KTg Cretácico Superior-Terciario Inferior**

Granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos.



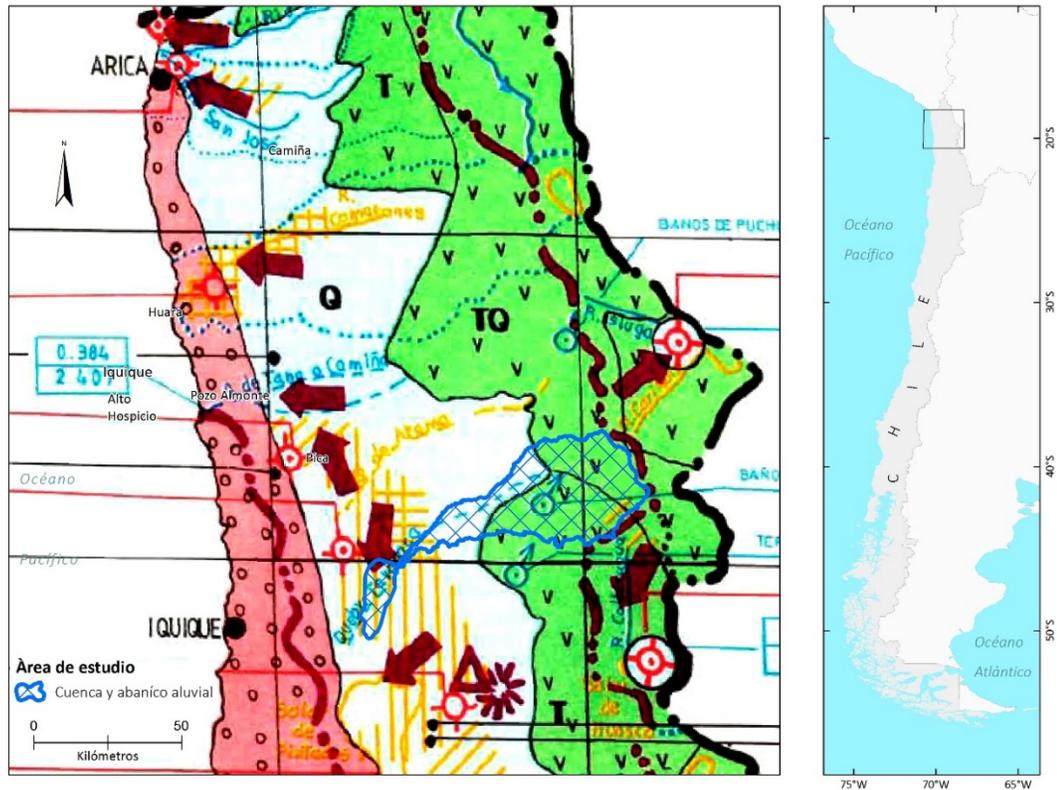
**FIGURA 12. GEOLOGÍA LOCAL DE LA ZONA DE ESTUDIO (ADAPTADO DE SERNAGEOMIN, 2003).**

### 3.3.3 Hidrogeología

La cuenca hidrogeológica de la Quebrada de Tarapacá, forma parte de una estructura hidrogeológica mayor, la Pampa del Tamarugal. En la parte alta, desde su nacimiento en la Cordillera de los Andes, destacan rocas volcánicas fracturadas formadas por coladas, brechas, y tobas andesíticas de permeabilidad media que corresponden al período Terciario y Cuaternario que coincide con el período de formación del macizo andino. El acuífero en esta sección se mueve en dirección este-oeste, hasta la gran depresión conocida como Pampa del Tamarugal.

En esta depresión, existen litologías acuíferas formadas por un lecho de depósitos no consolidados y rellenos de alta permeabilidad. Las aguas al no poder franquear las rocas del sector poniente – cordillera de la Costa – drenan subterráneamente en sentido norte - sur hasta desembocar por la cuenca del río Loa.

La figura 13 obtenida desde el Mapa Hidrogeológico de Chile de la DGA (DGA, 1986) representa las características hidrogeológicas generales de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá. En el Anexo 14-A se muestra la leyenda completa del mapa.



TIPO DE PERMEABILIDAD	SIMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	PRINCIPALES FORMACIONES INTERESADAS	CARACTERISTICAS GENERALES
PRIMARIA (En formación porosa)		ALTA A MEDIA	Q, Qy, T	DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS, RELLENO. Sedimentos fluviales, aluviales, lacustres y eólicos. Acuíferos de extensión muy variable, generalmente estrofractados. Negras, filitas y semiconcretadas. Permeabilidad variable, calidad química variable. Son los acuíferos más explotados en Chile. LANAS POROSAS, en Isla de Pascua.
		BAJA	T	DEPOSITOS CONSOLIDADOS O ROCAS SEDIMENTARIAS. Arenas, filitas y arcillas de deposición lacustre o marina. Espesores del Tostungal en el acuífero confinado del borde Oriental del Salar de Atacama, deficiente calidad química. Pampa Magallánica sugiere buena calidad química.
SECUNDARIA (En roca)		MEDIA	T	ROCAS CAPONARIADAS. Calizas, areniscas y lutitas estratónicas. Acuíferos semi-confinados e impermeables en el Cuerno Galatena.
		ALTA A BAJA	TQ, T, C	ROCAS VOLCANICAS FRACTURADAS. Coladas, lavas, brechas andesíticas con intercalaciones de sedimentos clásticos con fragmentos de lavas y dacítos. Se atribuyen acuíferos a estas rocas en el Altiplano chileno. Calidad química buena.
MUY BAJA A AUSENTE (Roca)		MUY BAJA	Qy, TQ, T, C	ROCAS VOLCANICAS. Coladas y depósitos piroclásticos. Filitas, dacítos, andesitas y basáltos. Asociados a volcans antiguos bien conservados o activos. Cordillera de Los Andes.
		MUY BAJA	Q, Q, J, JKT	AFLORAMIENTOS DE ROCAS MIXTAS. Roca sedimentaria - volcánica con cubierta discontinua de depósitos no consolidados. Acuíferos inexistentes por falta de recarga. Monte Grande.
		MUY BAJA	T, K, J, M, P, H	ROCAS MIXTAS SEDIMENTARIO-VOLCANICAS. Coladas, brechas y gneissos con intercalaciones de filitas, areniscas y conglomerados. Se consideran baseamento de los acuíferos. Abarcan zonas cordilleranas.
		NULA	Kg, KTg, JKg, Jlg, Mg, P2g	ROCAS PELITICAS E HIPABSALES. Lutitas granulares. Baseamento impermeable Cordillera de la Cacha, Cordillera de los Andes.
		NULA	Pz	ROCAS METAMORFICAS. Meta-reñicos, pizarras, filitas, esquistos, gneiss, amphibolitas. Baseamento impermeable. Cordillera de la Cacha, Cordillera Andina Patagónica.
		NULA		

FIGURA 13. MAPA HIDROGEOLOGICO DE CHILE (DGA, 1986) ADAPTADO PARA LA ZONA DE ESTUDIO DE ESTE TRABAJO MEDIANTE ELABORACION PROPIA.



## 4. ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICA DEL SONDAJE DGA HUARA

La Dirección General de Aguas ha llevado a cabo la ejecución de un sondeaje diamantina con recuperación continua de muestras (HQ) en la zona de estudio, con el fin de conocer la configuración sedimentológica del relleno del sondeaje DGA Huara. Para llevar a cabo esto, se ha realizado un análisis sedimentológico que consiste en la descripción del testigo de sondeaje, la obtención de la conductividad hidráulica y la interpretación de ambientes sedimentarios.

### 4.1 Descripción del testigo de sondeaje

En el Laboratorio de Sólidos MECESUP, de la Universidad de Chile, se ha llevado a cabo la descripción sedimentológica y estratigráfica de los testigos del sondeaje. La descripción se llevó a cabo analizando y describiendo por cada metro de sondeaje. En las figuras 15, 16 y 17 se observan algunos de los testigos de sondeaje descritos. La descripción detallada del sondeaje se encuentra en el Anexo 12-A.



FIGURA 15. GRAVAS SUeltas CORRESPONDIENTES A LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE 35 M Y 39.5 M DE PROFUNDIDAD.



FIGURA 16. TESTIGOS DE ARENAS MEDIAS MODERADAMENTE CEMENTADAS CORRESPONDIENTES A LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE 75.5 M Y 80 M DE PROFUNDIDAD.



**FIGURA 17. TESTIGOS CORRESPONDIENTES A LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE 98 M Y 102.5 M DE PROFUNDIDAD.**

En términos generales se observó que los testigos muestran tipos de granulometrías que van desde tamaño limo, arcilla, arenas hasta granulometrías tamaños bloque. Se observaron importantes cambios en los tamaños de los paquetes, lo cual es la base para subdividir en dos grandes unidades sedimentarias: Unidad Superior y Unidad Inferior. A continuación se describe cada una de las unidades sedimentarias definidas para el sondaje DGA Huara:

### **Unidad Superior**

Se ubica en el tramo desde la superficie del sondaje hasta los 64 m. Se compone principalmente de gravas y en menor medida de arena, limo y arcilla. Tiene una cubierta de arena fina de selección moderada en superficie, de 3.5 m de potencia.

Bajo la cubierta de arena se encuentra un paquete de gravas sueltas con una potencia de 39.5 m. Estas gravas se componen en su mayoría por clastos subredondeados de esfericidad mediana a baja, de pobre a muy pobre selección, 20-30% de matriz arenosa y tamaños de clastos de hasta 22 cm. Los clastos son principalmente de andesita afanítica gris con magnetismo, tobas soldadas de color morado a rosado, y andesitas porfídicas. Cabe destacar que en este tramo no hay presencia de finos, esto probablemente debido a que estos fueron lavados por el proceso de la perforación.

Entre los 43 m y 45.7 m de profundidad, se encuentran depósitos de arena fina levemente cementada, con menor presencia de gravilla, la selección es de moderada a buena.

Debajo de estas arenas, se encuentra una subunidad de gravas y guijarros sueltos de aproximadamente 18.5 m de potencia. La selección de esta unidad es de pobre a muy pobre, con clastos mayormente sub-redondeados de esfericidad media a baja. La composición de los clastos es similar a la descrita anteriormente para las gravas a menor profundidad.

### **Unidad Inferior**

Esta unidad se caracteriza por múltiples subunidades con potencias mucho menores a las de la Unidad Superior, las cuales van desde un par de centímetros a un par de metros de intercalaciones de gravas con arenas y limos. Además es observable un notorio aumento en paquetes sedimentarios de arenas medias a finas.

Se observan gravas de matriz arenosa con una selección moderada a muy pobre de clastos, cuyos tamaños alcanzan máximos de 40 cm. Los clastos no muestran una imbricación en particular y en las unidades no se logran identificar estructuras sedimentarias observables. La

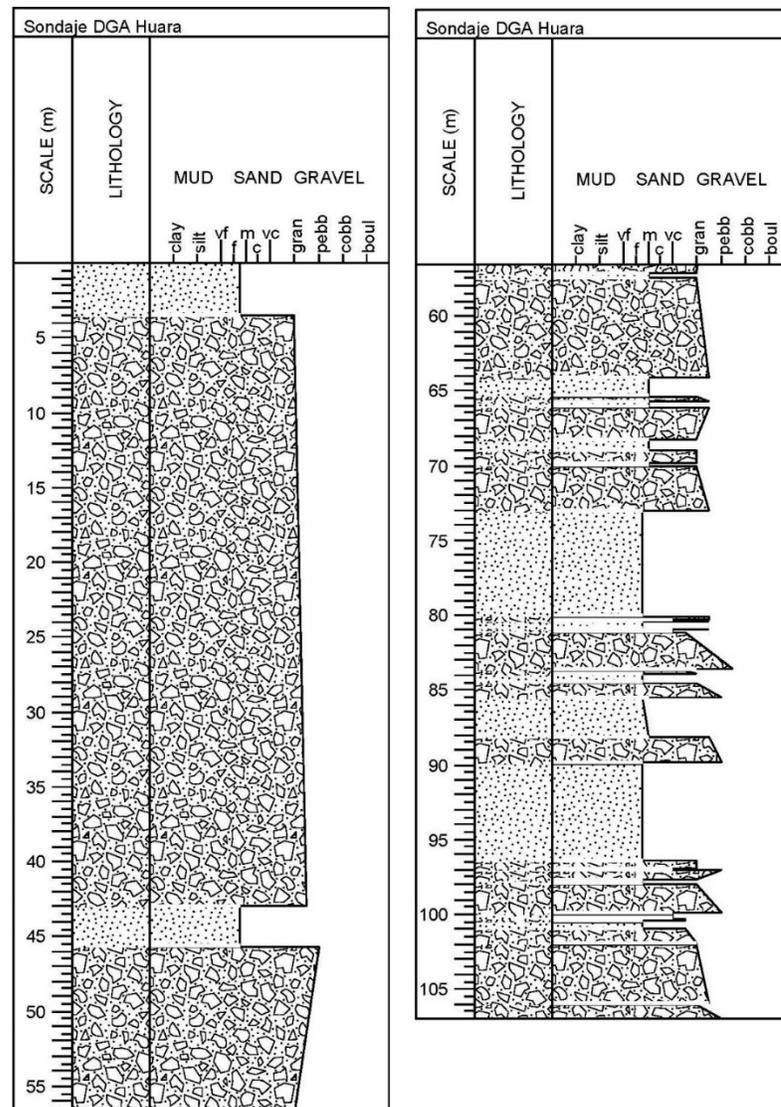
composición de los clastos es principalmente andesita afanítica gris principalmente con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado y andesitas porfídicas.

Los paquetes sedimentarios de arenas medias a finas de selección buena a moderada. No se logran identificar estructuras sedimentarias.

Es importante destacar que a medida que se avanza en profundidad, los grados de compactación y cementación aumentan notoriamente en gravas y arenas en esta unidad.

### Columna estratigráfica

Como parte de la descripción sedimentológica y estratigráfica del sondaje, se ha construido una columna estratigráfica mostrando las distintas unidades de gravas y arenas descritas anteriormente. La columna estratigráfica muestra los paquetes sedimentarios presentes en el sondaje Huara, donde se ha clasificado su granulometría en base a la moda de los tamaños de granos (Figura 18). En esta columna es apreciable la diferencia entre las Unidades Inferior y Superior en cuanto los espesores que poseen.



**FIGURA 18. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL SONDAJE DGA HUARA. EL TAMAÑO DE GRANO REPRESENTADO CORRESPONDE A LA MODA.**

## 4.2 Caracterización hidráulica del sondaje DGA Huara

En 2014 para el estudio de DGA (2014), el IDIEM, realizó un ensayo de permeabilidad tipo Lefranc en el sondaje DGA Huara para medir conductividad hidráulica.

La teoría del Ensayo Lefranc considera que el estrato ensayado se encuentra completamente saturado, es decir bajo el nivel freático. Para el caso de este sondaje, no se pudo detectar el nivel freático en las profundidades exploradas, es por esto que no se puede asegurar que las zonas ensayadas se encontraran bajo esta condición por lo que los resultados podrían no representar la conductividad hidráulica saturada del suelo entregando así valores más bajos que los esperados. (Fredlund y Xing, 1994).

El ensayo ha sido realizado en los tramos 11.5-13 m y 57.5-59 m (Figuras 19 y 20).



FIGURA 19. TRAMO DE 9-13 M DEL SONDAJE DONDE FUE REALIZADO EL ENSAYO DE LEFRANC.



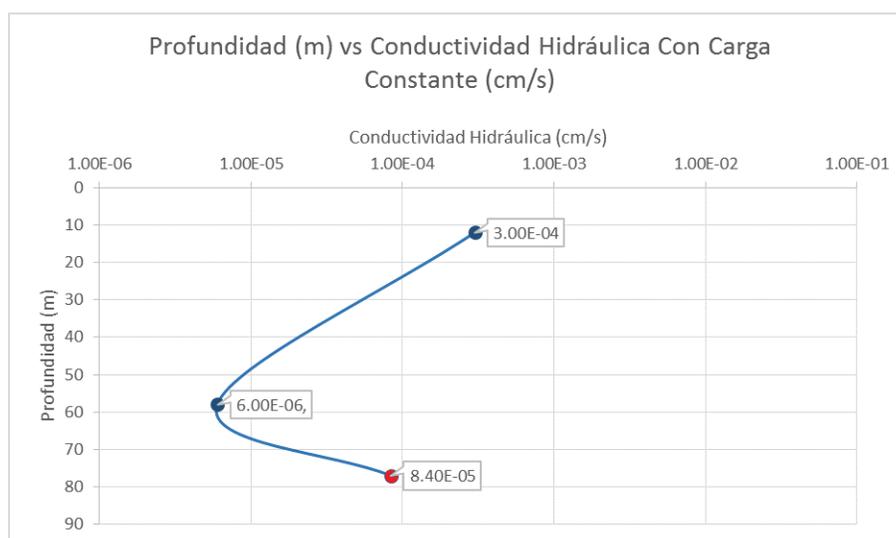
FIGURA 20. TRAMO DE 57.5-62 M DEL SONDAJE DONDE FUE REALIZADO EL ENSAYO DE LEFRANC.

Además, se ha realizado un ensayo de permeabilidad en los laboratorios del IDIEM. Este ensayo de permeabilidad es bajo carga constante y se ha realizado en el tramo 77.5 y 78 m de profundidad del sondaje Huara, la cual corresponde a arenas medias de compacidad densa. El informe de este ensayo está en el Anexo 13-A.

Los resultados obtenidos en el ensayo se muestran en la tabla 1 han sido graficados en la figura 21.

**TABLA 1. RESULTADOS ENSAYOS LEFRANC EN EL SONDAJE PARA LOS TRAMOS ENTRE 11.5-13 M Y 57,5-59 M BAJO CARGA CONSTANTE Y CARGA VARIABLE. ENSAYO DE PERMEABILIDAD BAJO CARGA CONSTANTE PARA EL TRAMO ENTRE 77.5-78 M DE PROFUNDIDAD.**

Profundidad Ensayo (m)	Conductividad Carga Constante (cm/s)	Conductividad Carga Variable (cm/s)
11.5-13.0	3.00E-04	1.00E-04
57.5-59.0	6.00E-06	5.00E-06
77.5-78.0	8.40E-05	-



**FIGURA 21. GRÁFICO DE LA PROFUNDIDAD EN EL SONDAJE HUARA Y LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA MEDIDA CON CARGA CONSTANTE. EN EL PUNTO ROJO SE PRESENTA EL DATO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA CALCULADO POR IDIEM PARA ESTE TRABAJO.**

Los resultados del ensayo de permeabilidad muestran una disminución en 2 órdenes de magnitud para los valores de conductividad hidráulica al avanzar en profundidad hasta casi los 60 m, luego se observa un leve aumento en un orden de magnitud hasta llegar a los 77 m de profundidad (Figura 21). La disminución en la conductividad hidráulica desde los primeros metros es sustentada con el hecho de que a mayor profundidad se han descrito muestras con mayor compacidad y grado de cementación.

### **4.3 Interpretación de subambientes sedimentarios aluviales en el sondeo DGA Huara**

Con la descripción sedimentológica y estratigráfica llevada a cabo, en conjunto de los valores de conductividad hidráulica obtenidos para el Sondeo DGA Huara, se han efectuado interpretaciones de subambientes sedimentarios aluviales para las unidades definidas.

## **Unidad Superior**

Esta unidad ha sido interpretada como depósitos sedimentarios de flujos de detritos, esto debido a la potencia que poseen las unidades (de hasta casi 40 m de potencia) y la gran presencia de gravas dentro de la unidad. Este tipo de características granulométricas y estratigráficas son consistentes con las de un depósito de flujos de detritos, donde los depósitos de gravas se encuentran asociados a eventos de alta energía cubiertos con posteriores depósitos de arenas de tamaño medio a fino con escasa presencia de limo y arcilla, los cuales representan la etapa final y de menor energía de un depósito de flujo de detritos (Nichols 2009). Esta subunidad de gravas, relativamente potente, representa múltiples eventos en los que depósitos de alta energía, como las gravas, se sobreponen y modifican la parte más superficial de los depósitos de arenas medias y finas que se depositan posteriormente a las gravas.

En general, la alta presencia de clastos tamaño bloque, de hasta 37 cm, serían consistentes con zonas distales de flujos de detritos (Pierson, 1986). Además, se observa que los tamaños de clastos cambian notoriamente metro a metro, lo cual podría indicar una serie de distintos depósitos de flujo de detritos que componen las gravas de gran potencia.

## **Unidad Inferior**

La Unidad Inferior posee una apreciable configuración diferente de tamaños en los paquetes sedimentarios, siendo estos de menor potencia con respecto a Unidad Superior. La unidad se interpreta como intercalaciones de depósitos de subambientes aluviales de planicies de inundación, las cuales se caracterizan por unidades con espesores de 10 cm hasta un par de metros, lo cual es consistente con las unidades aquí presentes (Nichols 2009) junto con depósitos de flujos de detritos, los cuales son claramente notorios en los tramos con clastos tamaño bloque.

En cuanto a la conductividad hidráulica obtenida para tramos correspondientes a esta unidad, se interpreta que, en base al trabajo de Viguiet *et al.* (2015), son consistentes con los valores de este parámetro encontrado en ambientes de llanuras de inundación para la zona del abanico aluvial. De todas formas hay que tener en cuenta que la alta compacidad y cementación que presentan los sedimentos a medida que se profundiza en el sondaje, disminuye los valores de conductividad hidráulica.

## 5. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Con el fin de llevar a cabo una caracterización hidrogeológica que sirva como base para el análisis hidrológico posterior, se ha realizado un análisis hidrogeológico que permita definir unidades de importancia hidrogeológica relativa.

La caracterización hidrogeológica de la zona se ha realizado mediante la metodología presentada en el Capítulo 2.2. A continuación se presentan y describen las distintas áreas de la zona, las cuales se diferencian en cuanto a la importancia relativa hidrogeológicamente. Esta importancia proviene de la virtud de sus propiedades hidráulicas (permeabilidad) en superficie, la cual tiene una influencia característica en el almacenamiento y la circulación de las aguas subterráneas (ANS, 1980).

### 5.1 Mapeo Hidrográfico

La red hidrográfica es un elemento importante para aproximarse al conocimiento de las relaciones entre la hidrología y la hidrogeología, particularmente aquí esta se utilizó para definir unidades de importancia hidrogeológica relativa.

Como resultado de la representación y jerarquización de drenes de la red hídrica utilizando SIG y teledetección, como se hizo referencia en la metodología, se han alcanzado a identificar hasta 5 categorías de drenes de acuerdo a la clasificación propuesta por Strahler (1964). El mapa de la red hidrográfica para la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá se presenta en la figura 22.

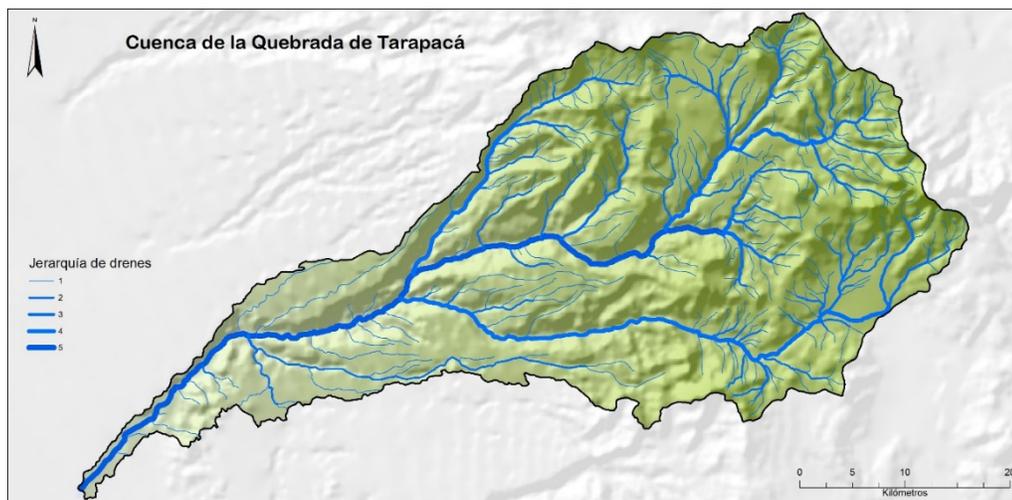


FIGURA 22. MAPA DE LA RED HIDROGRÁFICA PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ. ELABORACIÓN PROPIA.

### Unidades de Importancia Hidrogeológica Relativa

Las unidades de importancia hidrogeológica relativa definidas se detallan a continuación describiendo sus depósitos que la componen. El valor de la Curva Número adoptado para cada una de ellas se ha asignado a partir de los valores propuestos por Soil Conservation Service (SCS) (Anexo 1-A).

## **Unidad de Alta a Moderada Importancia Hidrogeológica**

Esta unidad se compone por los depósitos aluviales y fluviales de la cuenca.

- **Depósitos fluviales**

Corresponden a acumulaciones de material que es transportado por los ríos de la cuenca, los cuales conforman el relleno de los cauces de la Quebrada de Tarapacá. El origen de estos sedimentos se encuentra en las variaciones del caudal superficial, cambios en las escorrentías y eventuales crecidas.

- **Depósitos aluviales**

Estos son depósitos no consolidados gravitacionales y acción del agua. Principalmente gravas, guijarros y bloques, con intercalaciones de arena.

El valor de la Curva Número es de 76, el cual corresponde al promedio los valores de las tres categorías de barbecho de clase A.

## **Unidad de Moderada a Baja Importancia Hidrogeológica**

- **Depósitos coluviales**

Depósitos gravitacionales no consolidados, ubicados en las laderas de las quebradas. La proveniencia de estos depósitos es de rocas que producto de la erosión se desprenden de los macizos rocosos en zonas con elevada pendiente. Se componen de gravas, guijarros y bloques con escasez de matriz de arena de tamaño medio a fino con limos y arcillas.

- **Depósitos piroclásticos**

Estos depósitos corresponden principalmente a las Unidades Ignimbritas Huasco, Maricunga y Vega Helada. Estas se componen de tobas riolíticas a dacíticas.

El valor de la Curva Número es de 85, el cual corresponde al promedio los valores de las tres categorías de barbecho de clase B.

## **Unidad de Baja a Nula Importancia Hidrogeológica**

- **Depósitos piroclásticos parcialmente soldados**

Estos depósitos corresponden a la Unidad P3t, la cual es definida en el Capítulo 3.3.2. Estos se componen de ignimbrita riolítica de gran potencia, los cuales afloran en los sectores topográficamente altos de las cabeceras de la Quebrada de Tarapacá.

El valor de la Curva Número es de 90, el cual corresponde al promedio los valores de las tres categorías de barbecho de clase C.

## **Unidad de Nula Importancia Hidrogeológica**

- **Basamento rocoso**

El basamento rocoso consiste en unidades que van desde el Jurásico Superior al Cuaternario y corresponden a rocas estratificadas e intrusivas. Se asume que no existe fracturamiento importante en estas rocas.

Dentro de las rocas estratificadas, se encuentran secuencias sedimentarias continentales a transicionales compuestas por conglomerados, brechas, areniscas, limolitas, areniscas, lutitas y

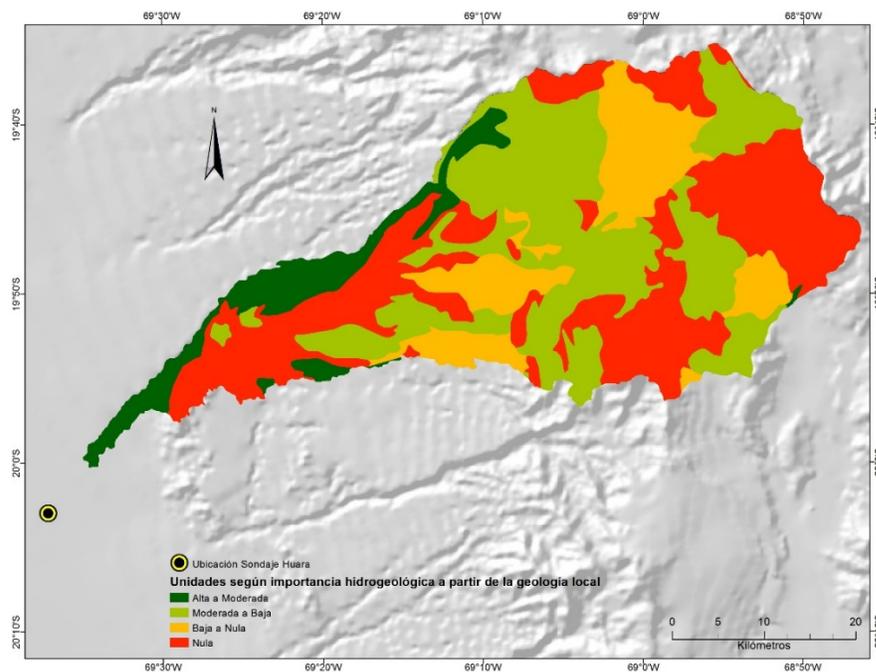
calizas. También hay presencia de secuencias volcánicas y volcanosedimentarias, tales como lavas, brechas volcánicas, domos, rocas pirlásticas y epiclásticas andesíticas a riolíticas y andesítico basálticas a dacíticas.

El valor de la Curva Número es de 93, el cual corresponde al promedio los valores de las tres categorías de barbecho de clase D.

## 5.2 Unidades de importancia hidrogeológica relativa

### Unidades de importancia hidrogeológica relativa a partir de la geología local

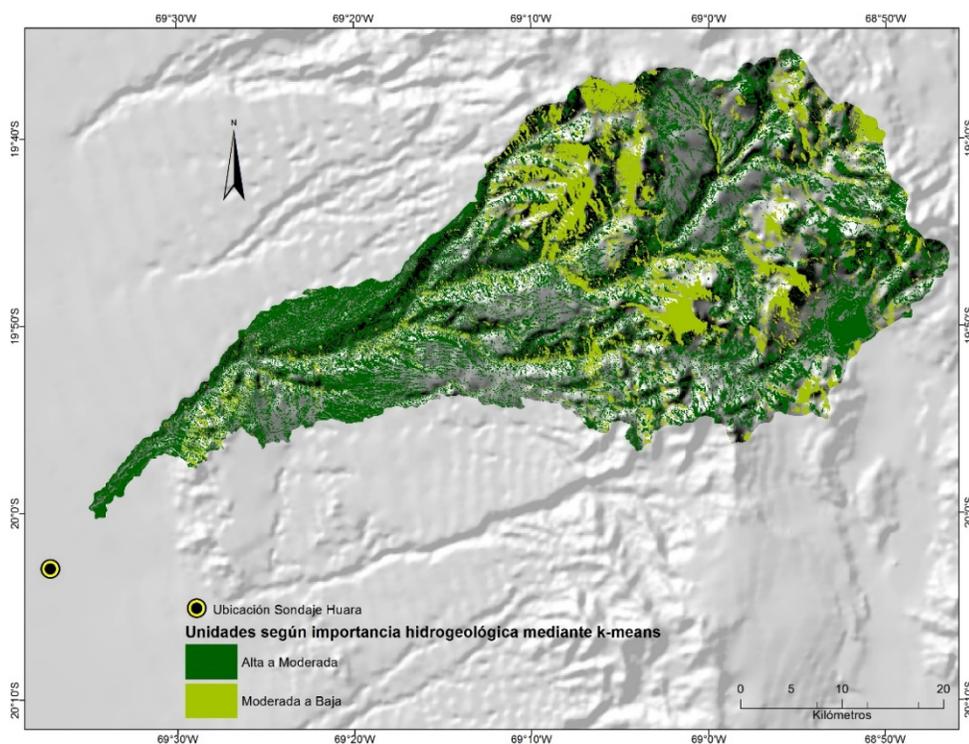
Mediante la geología local (Sernageomin, 2003) en formato *shapefile*, se ha adaptado mediante el uso de ArcGis para la cuenca de la Quebrada de Tarapacá. Según el tipo de depósito definido en esta geología se ha clasificado en unidades de importancia hidrogeológica relativa en base a lo expuesto en 8.1. En la figura 23 se muestra el resultado de este mapeo.



**FIGURA 23. MAPA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ CON LAS UNIDADES DE IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA DEFINIDAS A PARTIR DE LA GEOLOGÍA LOCAL A ESCALA 1.000.000 DE SERNAGEOMIN (2003).**

### Unidades de importancia hidrogeológica relativa a partir de la clasificación no supervisada

A partir del método de clasificación no supervisada *k-means*, se ha mapeado mediante ENVI 4.8 las zonas que representen sedimentos aluviales, coluviales y fluviales, de modo de incorporar estos depósitos, según lo expuesto en 8.1, en las categorías de Unidades de Moderada a Baja (para depósitos coluviales, es decir depósitos no consolidados en alta pendiente) y Unidades de Alta a Moderada para depósitos aluviales y fluviales. En la figura 24 se muestra el resultado de este mapeo.



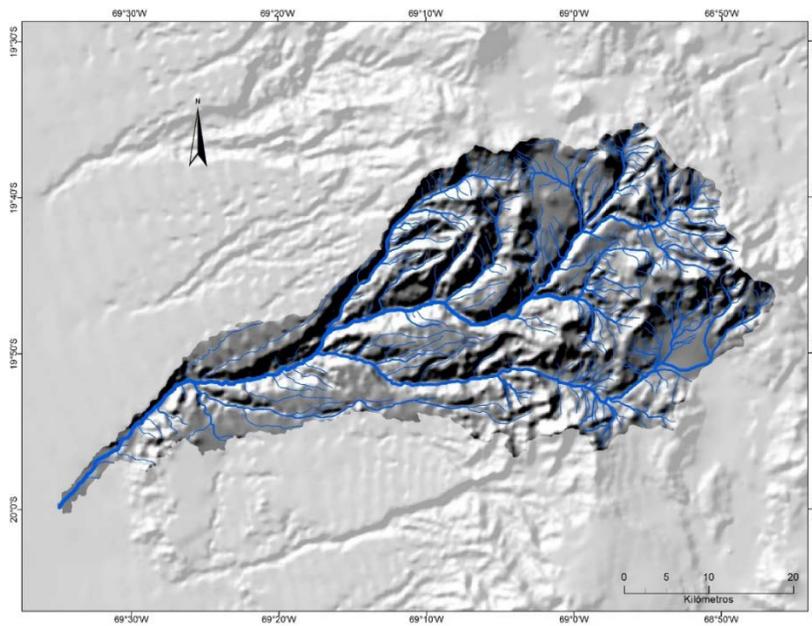
**FIGURA 24. MAPA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ CON LAS UNIDADES DE IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA, DEFINIDAS A PARTIR DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA K-MEANS. ELABORACIÓN PROPIA.**

### **Unidades de importancia hidrogeológica relativa de acuerdo a la red hidrográfica**

A partir de la red hidrográfica elaborada y descrita al comienzo de este capítulo, se ha creado un buffer mediante ArcGis (Figura 25) que representaría un aporte al área de mapeo de depósitos fluviales asociados a los cauces de la cuenca. El tamaño de este buffer según la jerarquía del dren se muestra en la tabla 2.

**TABLA 2. TAMAÑOS DE BUFFER UTILIZADOS SEGÚN LA JERARQUÍA DEL DREN.**

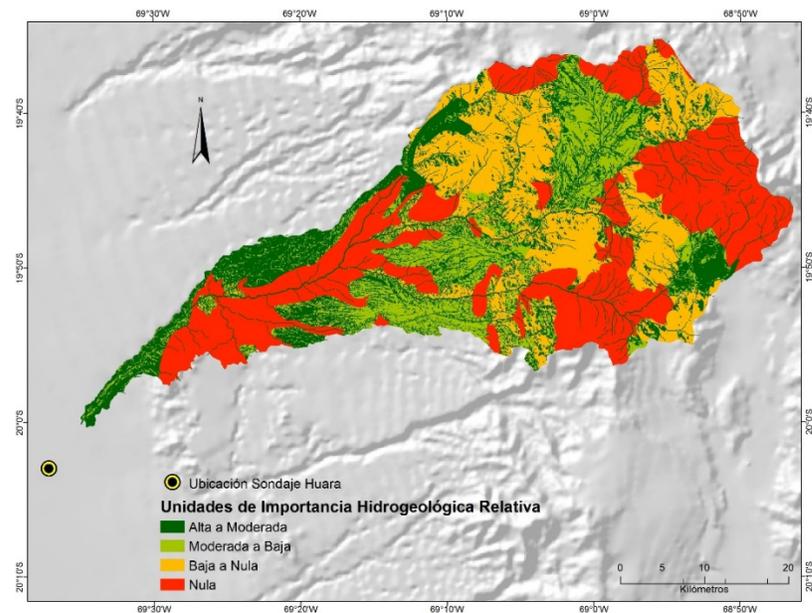
Jerarquía	Buffer (m)
1	5
2	10
3	20
4	30
5	50



**FIGURA 25. BUFFER CREADO A PARTIR DE LA RED HIDROGRÁFICA. ELABORACIÓN PROPIA.**

### **Unidades de importancia hidrogeológica relativa**

Utilizando los mapas de importancia hidrogeológica relativa en base a la geología local, clasificación no supervisada *k-means* y el buffer hidrográfico para depósitos fluviales, se ha conjugado y unificado en un único mapa de unidades de importancia hidrogeológica relativa que se presenta en la figura 26. Esto ha sido realizado mediante la unión de los polígonos para cada Unidad de importancia hidrogeológica creados anteriormente. Las áreas correspondientes a cada unidad se muestran en la tabla 3.



**FIGURA 26. MAPA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ CON LAS UNIDADES DE IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA DEFINIDAS. ELABORACIÓN PROPIA.**

**TABLA 3. ÁREAS PARA LAS DISTINTAS UNIDADES DE DE IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA RELATIVA DEFINIDAS.**

Unidad de Alta a Moderada importancia hidrogeológica relativa (Km <sup>2</sup> )	Unidad de Moderada a Baja importancia hidrogeológica relativa (Km <sup>2</sup> )	Unidad de Baja a Nula importancia hidrogeológica relativa (Km <sup>2</sup> )	Unidad de Nula importancia hidrogeológica relativa (Km <sup>2</sup> )	TOTAL (Km <sup>2</sup> )
0.00	0.00	2.14	12.17	14.31
0.69	0.02	4.06	15.16	19.93
15.01	0.86	2.28	6.89	25.03
32.99	0.55	1.58	8.61	43.73
63.23	0.00	2.86	19.97	86.05
33.49	1.89	5.42	34.49	75.28
25.60	3.95	9.06	30.30	68.91
19.39	2.36	18.07	18.28	58.10
18.59	6.23	18.79	18.75	62.36
10.95	8.26	22.45	20.38	62.03
6.12	16.40	23.53	26.88	72.93
12.72	29.25	26.52	31.72	100.21
17.73	39.06	19.82	37.65	114.26
45.55	57.44	27.90	40.46	171.35
72.58	94.79	66.95	84.95	319.27
72.23	76.36	4.54	23.65	176.78
61.61	42.06	1.53	14.28	119.48
60.08	16.05	0.34	7.44	83.91
21.93	1.19	0.01	1.66	24.78
11.29	0.00	0.00	0.56	11.85
5.62	0.00	0.01	0.23	5.86
1.51	0.00	0.00	0.01	1.52
0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
			TOTAL	1717.942

Finalmente, mediante una ponderación realizada para la superficie de las unidades de importancia hidrogeológica relativa pertenecientes a cada banda hipsométrica con cada valor de Curva Número asignado a estas unidades asignadas según define Soil Conservation Service (SCS) (Anexo A1), se calculan los valores de Curva Número para cada banda hipsométrica y se presentan en la tabla 4.

**TABLA 4. VALOR DE LA CURVA NÚMERO PARA CADA UNA DE LAS BANDAS HIPSOMÉTRICAS DEFINIDAS EN ESTE TRABAJO.**

Banda	Altitud	CN
1	1222-1400	62
2	1400-1600	64
3	1600-1800	80
4	1800-2000	83
5	2000-2200	83
6	2200-2400	75
7	2400-2600	75
8	2600-2800	76
9	2800-3000	76
10	3000-3200	74
11	3200-3400	73
12	3400-3600	75
13	3600-3800	76
14	3800-4000	79
15	4000-4200	77
16	4200-4400	83
17	4400-4600	84
18	4600-4800	86
19	4800-5000	88
20	5000-5200	89
21	5200-5400	89
22	5400-5600	90
23	5600-5800	87

## 6. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

De forma de caracterizar la hidrología de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá es necesario emplear los resultados obtenidos de la caracterización hidrogeológica llevada a cabo en el capítulo 5. En base a estos, se ha realizado un análisis que involucra en primer lugar recopilación de antecedentes meteorológicos como la precipitación y la evaporación de estaciones meteorológicas de la DGA en la zona. Posteriormente, se abordan estos antecedentes de forma de poder determinar probabilidades de excedencia y períodos de retorno de las precipitaciones para el conjunto de estaciones utilizadas, con esto y a través del método de la Curva Número, estimar la recarga y escorrentía superficial. Dentro del análisis también se incorpora un breve análisis del evento de crecidas del año 2012 ocurrido en la zona de estudio. Finalmente se caracteriza la morfometría de la cuenca, lo cual abre paso a los estudios que sea realizan en el capítulo siguiente.

### 6.1 Antecedentes Meteorológicos

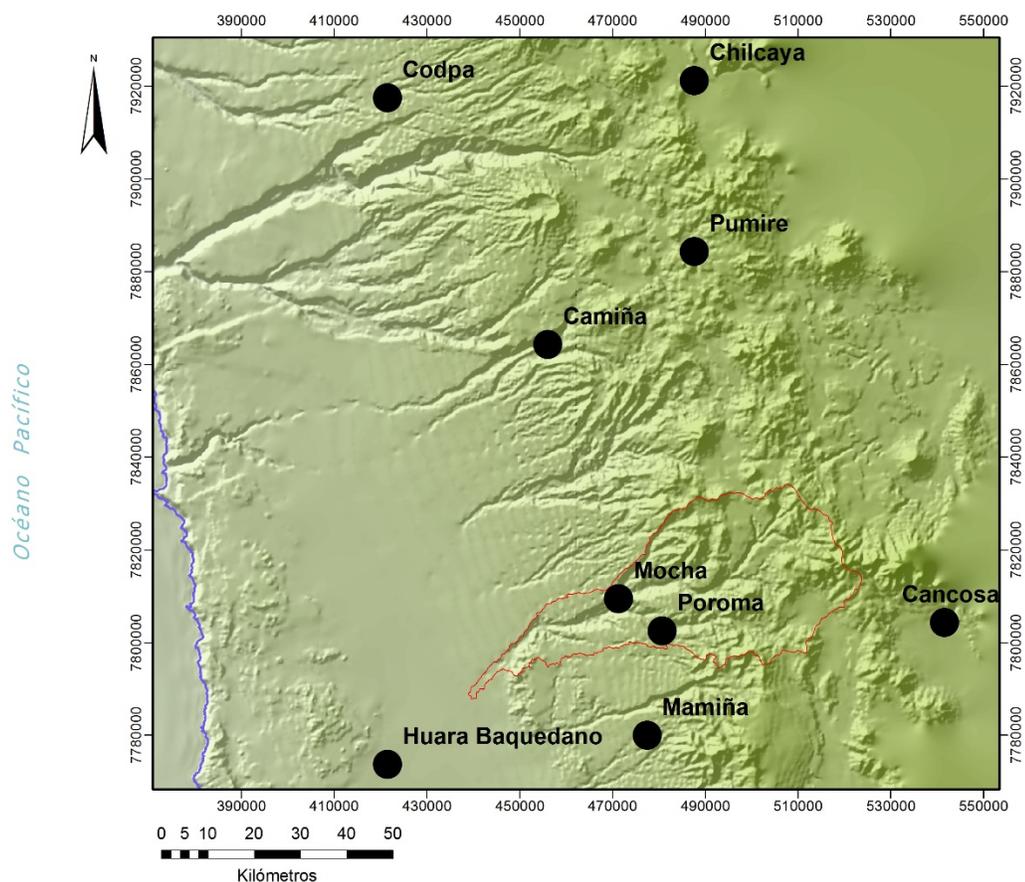
Se han recopilado antecedentes meteorológicos de la DGA que logren caracterizar a la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá, si bien estas estas estaciones tienen una distribución espacial bastante extensa, representan los datos disponibles en la zona como para llevar a cabo este tipo de análisis. Los antecedentes meteorológicos corresponden a las siguientes variables:

- **Precipitaciones**

Para las precipitaciones de la zona se han tomado datos de 9 estaciones meteorológicas de la DGA. Estas 9 estaciones se encuentran a distintas cotas y su distribución y cercanía a la zona de estudio es lo óptimo que se logró recopilar dado la falta de estaciones meteorológicas vigentes. En la tabla 5 y figura 27 se muestran las estaciones, su ubicación en coordenadas UTM y la altitud a la que se encuentran. Sólo las estaciones Mocha y Poroma se encuentran dentro de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá.

**TABLA 5. ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA DGA EMPLEADAS PARA OBTENER LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN.**

Estación	Cota (msnm)	Coordenada N (UTM)	Coordenada E (UTM)
Huara Baquedano	1100	7773836	421635
Codpa	1870	7917546	421622
Mocha	2150	7809524	471401
Camiña	2500	7864392	456168
Mamiña	2730	7780115	477548
Poroma	2880	7802651	480835
Cancosa	3930	7804456	541707
Chilcaya	4190	7921276	487730
Pumire	4200	7884389	487730



**FIGURA 27. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DE LA DGA UTILIZADAS EN ESTE TRABAJO.**

- **Evaporación**

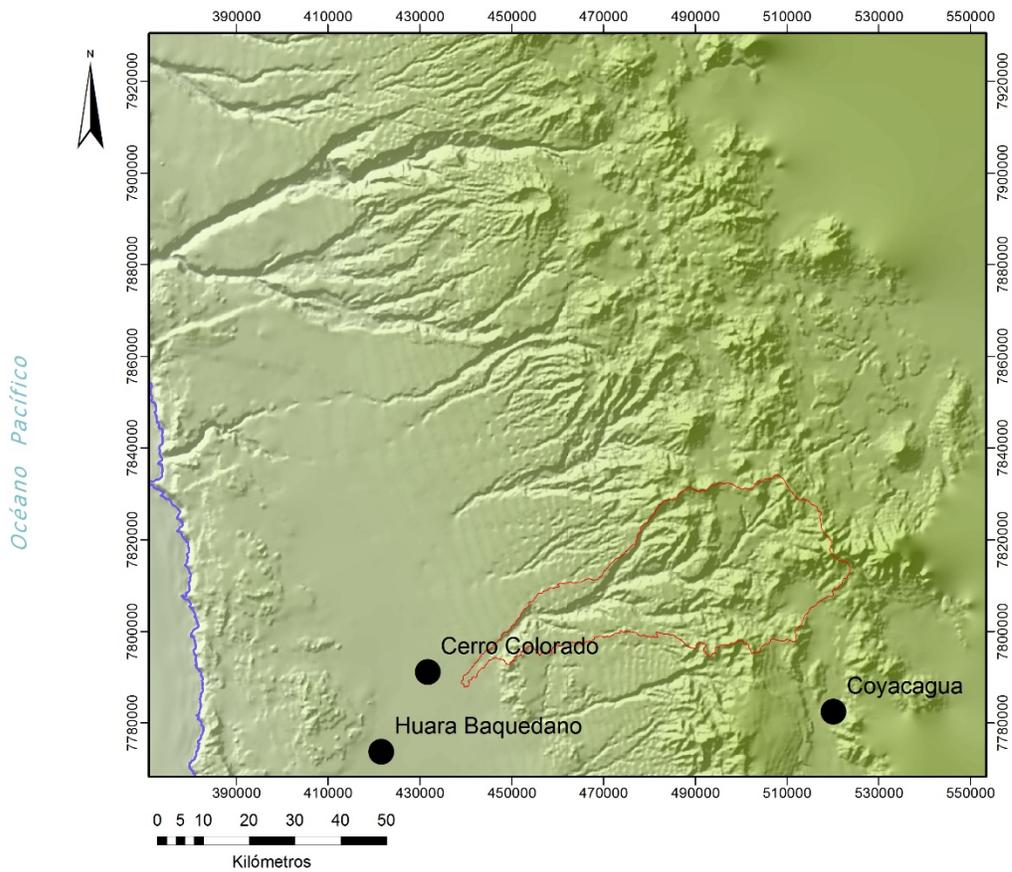
Los datos de evaporación de la zona de estudio han sido registrados por estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas. Estas estaciones se encuentran ubicadas en los alrededores de la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá y en la Pampa del Tamarugal, las cuales corresponden a las estaciones más cercanas a la zona de estudio.

Los datos de evaporación que aquí se emplean son un promedio diario de las medidas en los meses de verano, los cuales en este caso corresponden a los meses de noviembre a abril. Esto se debe a que en ellos es cuando ocurren las precipitaciones máximas en 48 hrs.

Las ubicaciones de las estaciones se presentan en la tabla 6 y figura 28.

**TABLA 6. ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA DGA EMPLEADAS PARA OBTENER LOS DATOS DE EVAPORACIÓN.**

Estación	Cota (msnm)	Coordenada N (UTM)	Coordenada E (UTM)
Huara-Baquedano	1062	7773839	421635
Cerro Colorado	2525	7791275	431737
Coyacagua	4025	7782608	520130



**FIGURA 28. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE EVAPORACIÓN DE LA DGA UTILIZADAS EN ESTE TRABAJO.**

## 6.2 Estimación de la escorrentía y recarga mediante la Curva Número

Se ha empleado el método de la Curva Número para lograr caracterizar los recursos hídricos de la cuenca. Han sido utilizadas las precipitaciones máximas en 48 horas para un período de retorno de 10 años. Se ha determinado utilizar precipitaciones máximas en 48 horas puesto que en este lapso de tiempo se alcanzaría a registrar completamente eventos importantes.

A partir de las precipitaciones que se han recopilado para la zona, se han calculado probabilidades de excedencia y períodos de retorno en años. En este caso se utiliza la expresión de Weibull para el cálculo de las probabilidades de excedencia mediante la siguiente expresión:

$$P_{bex} = \frac{m}{n+1} \quad (8)$$

Los valores de la precipitación máxima en 48 horas de las estaciones son ordenados de mayor a menor y designando con "m" el número de orden asignado a cada precipitación y con "n" el total de datos de la estadística, la probabilidad de excedencia (P) que la precipitación sea igualada o superada queda definido en porcentaje.

Es necesario también determinar el período de retorno, el cual corresponde al inverso de la probabilidad de excedencia, cuyo resultado se expresa en años. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Pret = \frac{1}{Pbex} \quad (9)$$

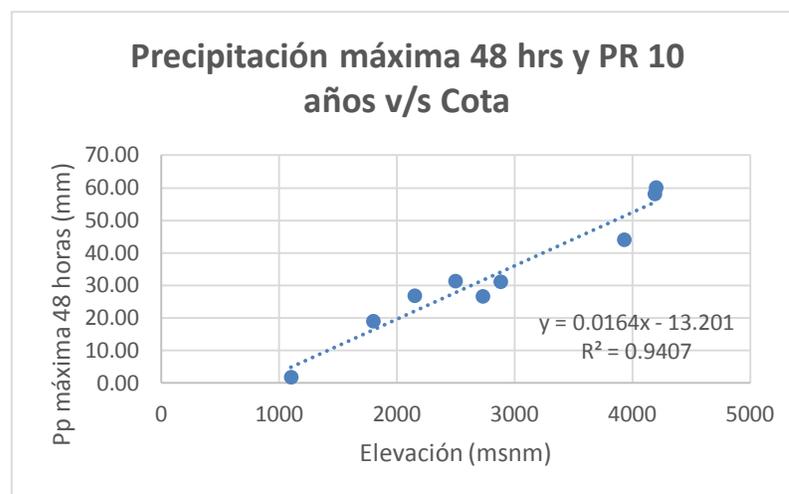
A partir de los datos de precipitación máxima en 48 horas para un período de retorno de 10 años en las estaciones, calculado mediante las expresiones de Weibull, se obtiene la siguiente ecuación:

$$y = 0.0164x - 13.201 \quad (10)$$

Donde y corresponde a la precipitación máxima en 48 hrs en mm para un período de retorno de 10 años, y x es la altitud (Tabla 7 y Figura 29). Esta ecuación se ha obtenido mediante una distribución Log-Normal debido a que es la que muestra una mejor correlación entre los datos.

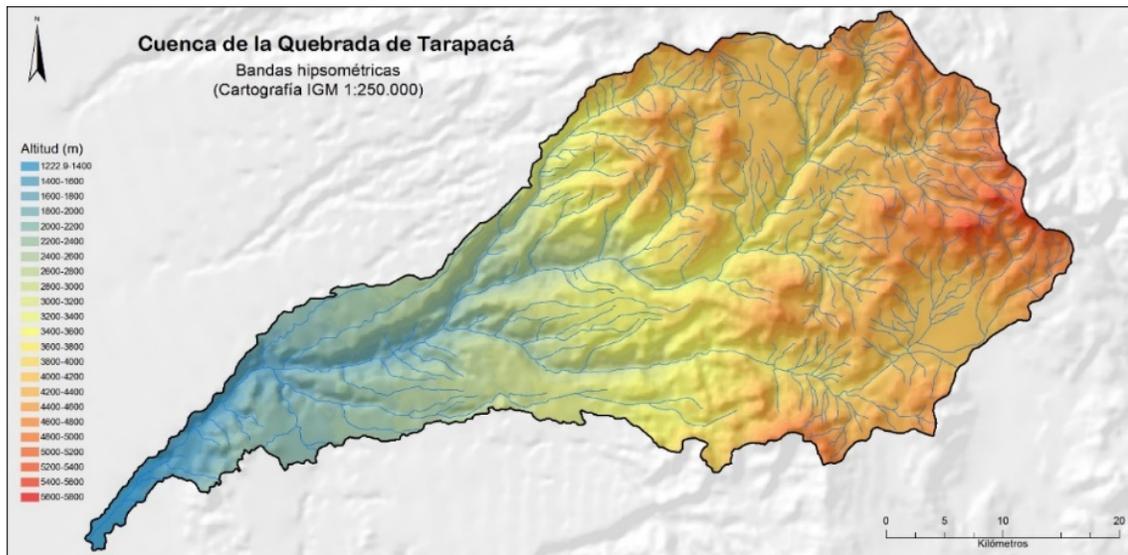
**TABLA 7. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DE LA DGA CON SU COTA Y PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 48 HORAS PARA UN PERÍODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.**

Estación	Cota (msnm)	PR 10 años Max pp 48 hrs
Huara Baquedano	1100	1.79
Codpa	1870	19.04
Mocha	2150	26.91
Camiña	2500	31.32
Mamiña	2730	26.68
Poroma	2880	31.25
Cancosa	3930	44.06
Chilcaya	4190	58.12
Pumire	4200	60.12



**FIGURA 29. GRÁFICO DE LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 48 HRS PARA UN PERÍODO DE RETORNO DE 10 AÑOS VERSUS LA ALTITUD.**

A partir de un modelo digital de elevación de la zona, se ha clasificado la altitud mediante ArcGis 10 para obtener bandas hipsométricas de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá. La cuenca se ha subdividido en 23 bandas hipsométricas separadas por 200 metros cada una (Figura 30), las cuales van desde los 1200 hasta los 5600 msnm.



**FIGURA 30. MAPA DE BANDAS HIPSOMÉTRICAS PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ. ELABORACIÓN PROPIA.**

Con la construcción de esta clasificación de la altitud en las bandas hipsométricas y los valores de precipitaciones máximas en 48 horas para períodos de retorno de 10 años en todas las estaciones utilizadas, se establece la relación entre precipitación y altitud mediante la ecuación 10. Se muestran en la tabla 8 los resultados precipitaciones y altitud correspondiente a cada una de las 23 bandas establecidas para la cuenca de la Quebrada de Tarapacá.

**TABLA 8. PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 48 HORAS PARA UN PERÍODO DE RETORNO DE 10 AÑOS EN CADA BANDA HIPSOMÉTRICA.**

Banda	Altitud	PR 10 años Max pp 48 hrs
1	1200	6.08
2	1400	9.38
3	1600	12.68
4	1800	15.98
5	2000	19.28
6	2200	22.58
7	2400	25.88
8	2600	29.19
9	2800	32.48
10	3000	35.78
11	3200	39.08
12	3400	42.38
13	3600	45.68
14	3800	48.98
15	4000	52.28
16	4200	55.58
17	4400	58.88
18	4600	62.18
19	4800	65.48
20	5000	68.78
21	5200	72.08
22	5400	75.38
23	5600	78.68

Otra de las variables utilizadas en este método es la evaporación, cuyos datos obtenidos de la DGA (Tabla 5). Los datos de evaporación medida por la DGA es una evaporación potencial, la cual corresponde a lo que se evaporaría de una superficie de agua libre. Debido a que la evaporación desde la superficie del suelo es menor, se emplea un factor de corrección igual a 0.75 para este tipo de suelo (Tabla 9).

TABLA 9. EVAPORACIÓN EN 48 HORAS POTENCIAL Y CORREGIDA PARA CADA UNA DE LAS BANDAS HIPSOMÉTRICAS.

Banda	Altitud	Evaporación 48 hrs potencial	Evaporación 48 hrs corregida
1	1200	17.68	13.26
2	1400	16.91	12.68
3	1600	16.24	12.18
4	1800	15.66	11.74
5	2000	15.13	11.35
6	2200	14.66	10.99
7	2400	14.22	10.67
8	2600	13.82	10.37
9	2800	13.45	10.09
10	3000	13.11	9.83
11	3200	12.79	9.59
12	3400	12.49	9.37
13	3600	12.20	9.15
14	3800	11.93	8.95
15	4000	11.68	8.76
16	4200	11.44	8.58
17	4400	11.20	8.40
18	4600	10.98	8.24
19	4800	10.77	8.08
20	5000	10.57	7.93
21	5200	10.37	7.78
22	5400	10.18	7.64
23	5600	10.00	7.50

El valor que se le asigna a la Curva Número dependerá de las características del suelo sobre el cual precipita. El valor que se le asigna pertenece a un rango que va de 0 a 100, en el cual cada extremo representa medios de permeabilidad infinita (0) y nula (100) (USCS, 1985, 1986).

$$Es = \begin{cases} \frac{(Pp-0.2*S)^2}{(Pp+0.8*S)} & , Pp > 0.2 * S \\ 0 & , Pp \leq 0.2 * S \end{cases} \quad (11)$$

Donde la precipitación (Pp) se expresa en pulgadas y S es la retención máxima potencial de la cuenca que se relaciona con el parámetro Curva Número a través de la siguiente expresión:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (12)$$

La infiltración (Inf) y recarga se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$Inf = Pp - Es \quad (13)$$

$$Recarga = Inf - Evap \quad (14)$$

Donde Evap es la evaporación en 48 hrs corregida.

Finalmente, con estas expresiones se calcula la recarga en base a precipitaciones máximas en 48 horas para períodos de retorno de 10 años. Los resultados de la recarga, escorrentía e infiltración se muestran en la tabla 10. Con estos resultados, es posible calcular la escorrentía total de la siguiente forma

$$Es\ total = Es + Recarga \quad (15)$$

Aplicando la ecuación 15 para los resultados de escorrentía y recarga obtenidos anteriormente, se obtiene un resultado para la escorrentía total una valor de 408.9 l/s.

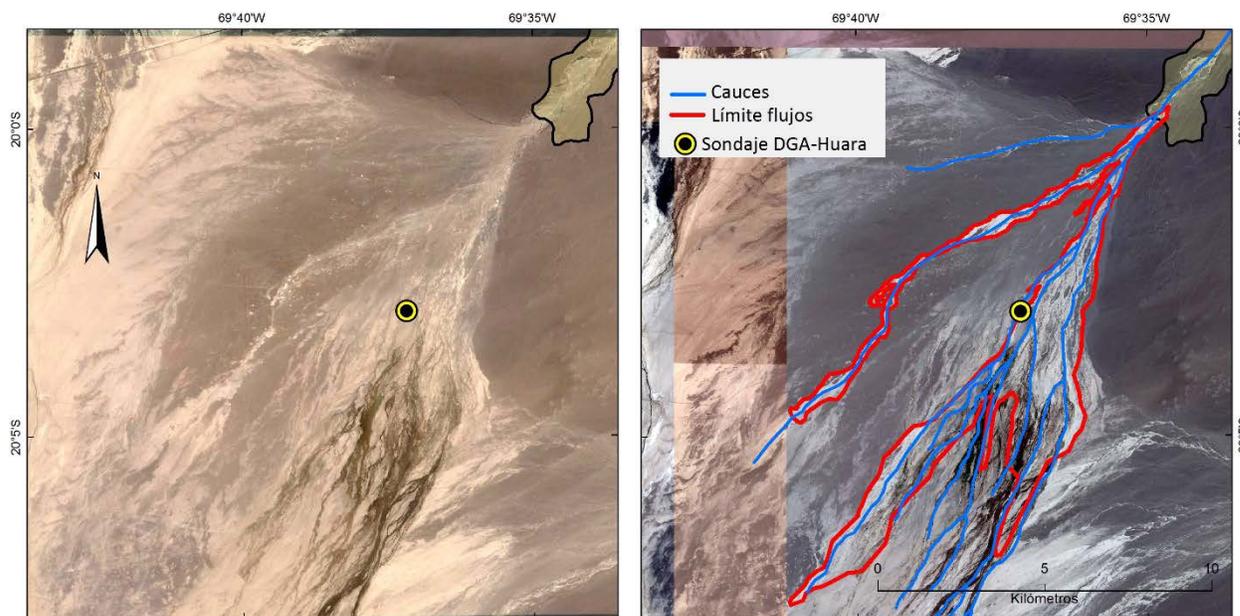
**TABLA 10. RESULTADOS DE ESCORRENTÍA, INFILTRACIÓN Y RECARGA EN L/S OBTENIDOS PARA UN PERÍODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.**

Banda	Altitud (msnm)	Pp Max 48 hrs (mm)	Pp (pulgadas máx en 48 hrs)	CN	S	ES (pulgadas)	ES (mm)	Área (km2)	ES (l/s)	Evaporación 48 hrs corregida	Infiltración (l/s)	Recarga (l/s)
1	1200	6.08	0.24	63	3.67	0.00	0.00	14.27	0.00	13.26	0.55	0.00
2	1400	9.38	0.37	65	3.66	0.00	0.00	19.92	0.00	12.68	1.19	0.00
3	1600	12.68	0.50	81	3.68	0.00	0.00	25.05	0.00	12.18	2.01	0.08
4	1800	15.98	0.63	87	3.54	0.00	0.00	43.69	0.00	11.74	4.43	1.17
5	2000	19.28	0.76	86	3.35	0.09	2.30	86.07	1.26	11.35	9.33	3.14
6	2200	22.58	0.89	77	3.65	0.06	1.62	75.19	0.77	10.99	10.43	5.19
7	2400	25.88	1.02	76	3.44	0.11	2.67	68.88	1.17	10.67	10.79	6.13
8	2600	29.18	1.15	77	2.80	0.19	4.86	58.04	1.79	10.37	9.93	6.11
9	2800	32.48	1.28	77	3.06	0.26	6.53	62.31	2.58	10.09	11.54	7.55
10	3000	35.78	1.41	75	3.40	0.30	7.67	62.04	3.02	9.83	12.75	8.88
11	3200	39.08	1.54	74	3.90	0.35	8.84	72.95	4.09	9.59	16.29	11.85
12	3400	42.38	1.67	76	3.83	0.47	11.91	100.25	7.57	9.37	22.84	16.88
13	3600	45.68	1.80	77	4.02	0.56	14.11	114.22	10.22	9.15	26.80	20.17
14	3800	48.98	1.93	80	3.86	0.74	18.74	171.42	20.37	8.95	38.61	28.88
15	4000	52.28	2.06	79	3.78	0.79	20.04	319.26	40.57	8.76	77.93	60.20
16	4200	55.58	2.19	86	4.52	1.09	27.81	176.68	31.16	8.58	34.64	25.03
17	4400	58.88	2.32	87	4.48	1.23	31.30	119.25	23.67	8.40	22.26	15.90
18	4600	62.18	2.45	89	4.32	1.40	35.66	83.87	18.97	8.24	13.57	9.19
19	4800	65.48	2.58	91	3.95	1.56	39.74	24.75	6.24	8.08	3.44	2.17
20	5000	68.78	2.71	92	3.29	1.72	43.64	11.79	3.26	7.93	1.49	0.90
21	5200	72.08	2.84	93	2.80	1.85	47.01	5.79	1.73	7.78	0.72	0.43
22	5400	75.38	2.97	94	1.93	2.03	51.59	1.48	0.48	7.64	0.16	0.09
23	5600	78.68	3.10	91	1.49	1.97	50.05	0.01	0.00	7.50	0.00	0.00
<b>TOTAL</b>									<b>178.92</b>		<b>331.69</b>	<b>229.95</b>

### 6.3 Evento del 11 de marzo de 2012

En la tarde del 11 de marzo de 2012 se produjeron intensas lluvias en el valle de Tarapacá. El evento fue principalmente captado por la estación Chuzmiza de la DGA, la cual registró precipitaciones en 24 hrs de 5 mm, 50 mm y 45 mm para los días 12, 13 y 14 de marzo de 2012 respectivamente.

Datos de la DGA indican que el caudal máximo que se produjo el día de la tormenta fue de 137 m<sup>3</sup>/s (DGA, 2014).



**FIGURA 31. COMPARACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES DE LOS AÑOS 2009 Y 2012 PARA LA ZONA DEL ABANICO ALUVIAL A LA SALIDA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ. PARA LA IMAGEN DEL 2012 SÓLO SE PUDO OBTENER UNA UN SECTOR ACOTADO DEL ABANICO. EN ROJO SE DELIMITA A LOS FLUJOS QUE CORRESPONDERÍAN AL EVENTO DE CRECIDA DEL AÑO 2012.**

En la figura 31 se comparan dos imágenes del abanico aluvial obtenidas de Google Earth, una del año 2009 y la otra del año 2012. La imagen del 4 de abril de 2012 es posterior al evento de crecida, en la cual es posible identificar depósitos de flujo producto de las intensas lluvias ocurridas en dicho evento. Estos depósitos se interpretan mayormente como flujos que generan depósitos de planicies de inundación. El área calculada para estos depósitos es de 29.365.506 m<sup>2</sup>. En base a esta fotointerpretación se pueden detectar dos principales cauces por los cuales hubo inundaciones y flujos. Se puede observar además que existen 2 principales brazos en los flujos, uno en dirección SW y el otro en dirección SSW.

## 6.4 Determinación De Los Parámetros Morfométricos de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá

La determinación de los parámetros morfométricos es esencial para los posteriores cálculos de caudales máximos generados a la salida de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá y además lograr una caracterización acabada de la hidrología de la esta.

### 6.4.1 Tiempos de Concentración

A continuación, en la tabla 11, se presentan los mapas utilizados en el cálculo de los tiempos de concentración mediante el cálculo realizado con el software Idrisi 17 en conjunto con ArcGis 10.

**TABLA 11. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS OBTENIDOS PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ.**

Parámetro morfométrico	Registro
Longitud del eje del río principal (Km)	105.62
Área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )	1717.94
Longitud directa del río principal (Km)	84.4
Coefficiente de sinuosidad hidráulico	1.25
Altitud inicial (msnm)	4835.02
Altitud media (msnm)	1235.18
Pendiente promedio del río principal	3.73
Tiempo de concentración de California Highways and Public Works (hrs)	8.81

Se ha generado mediante el software Idrisi un perfil topográfico del cauce principal de la cuenca, el cual se muestra en la figura 32.

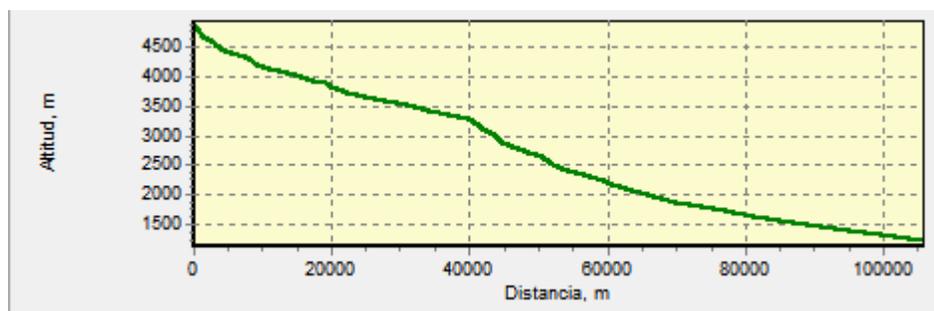


FIGURA 32. PERFIL TOPOGRÁFICO DEL CAUCE PRINCIPAL. ELABORACIÓN PROPIA.

## 6.5 Cálculo de caudales máximos mediante el método de la Curva Número

A partir de este método se determina la precipitación efectiva en la cuenca, de modo de poder calcular finalmente los caudales máximos que se generan en la cuenca para distintos períodos de retorno.

El suelo de la cuenca ha sido clasificado en base a Unidades de importancia hidrogeológica relativa en el Capítulo 5.2, en base a esta clasificación y asignación de valores de Curva Número, se ha obtenido un promedio para el total de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá. El valor de la Curva Número que se obtiene de los valores del SCS (Anexo 1-A).

Luego, se convierte de curva número II a curva número I:

$$CN(I) = \frac{4.2 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)} = 73.24 \quad (16)$$

El máximo valor de retención del suelo (S) se calcula mediante:

$$S(mm) = \frac{25400}{CN(I)} - 254 = 92.81 \text{ mm} \quad (17)$$

Finalmente el valor de precipitación efectiva se obtiene a partir de:

$$P_e(mm) = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{P + 0.8 * S} \quad (18)$$

Donde P corresponde al promedio de precipitaciones de la cuenca en 24 horas para las estaciones meteorológicas utilizadas en el capítulo 6.1, con períodos de retorno de 5, 10, 15, 50 y 100 años.

Posteriormente, se procede a utilizar el hidrograma unitario triangular propuesto por el Soil Conservation Service (SCS) en 1969 (Figura 33), con el cual se puede establecer la relación entre la precipitación efectiva y los caudales máximos. Para ello se calcula el tiempo de lluvia efectiva en horas ( $t_r$ ) a partir del tiempo de concentración ( $t_c$ ), mediante la siguiente expresión:

$$t_r = 2 * \sqrt{t_c} = 5.93 \text{ (hrs)} \quad (19)$$

Luego se calcula el tiempo de retardo ( $t_p$ ), el cual es medido en horas:

$$t_p = 0.6 * t_c = 5.29 \text{ (hrs)} \quad (20)$$

El tiempo máximo o “peak”, que corresponde al tiempo desde el exceso de lluvia (“rainfall excess” en la figura 33) hasta que se produzca el caudal máximo. Este tiempo se mide en horas y se calcula según la siguiente expresión:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p = 8.25 \text{ (hrs)} \quad (21)$$

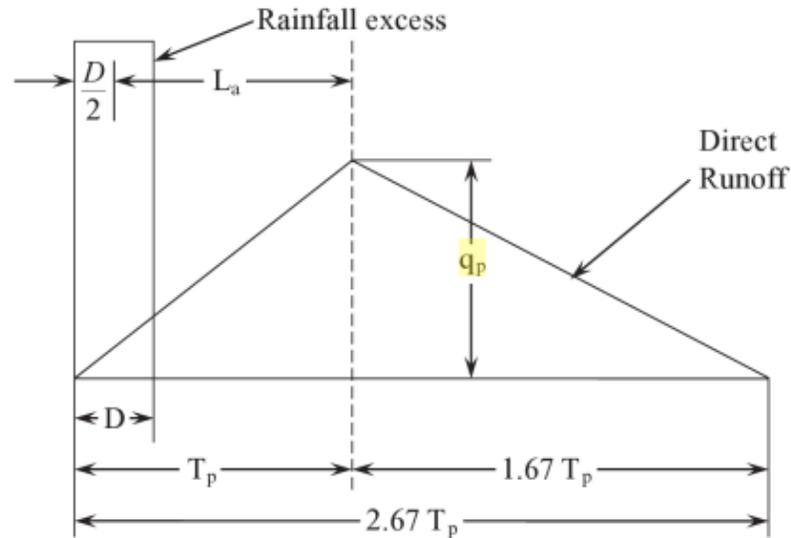


FIGURA 33. ESQUEMA DEL HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR DEL SCS (MUJUMDAR P.P, NAGESH KUMAR, 2013).

Finalmente, el caudal máximo ( $Q_p$ ) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_p \left( \frac{m^3}{s} \right) = 0.208 * \frac{A * P_e}{T_p} \quad (22)$$

Los resultados de caudales máximo ( $Q_p$ ) calculados para distintos períodos de retorno se muestran en la tabla 12.

TABLA 12. CAUDALES MÁXIMOS ( $Q_p$ ) PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO.

CN(II)	Período de retorno (años)	Pp 24 hrs (mm)	CN(I)	S (mm)	Pe (mm)	Qp (m3/s)
87	5	19.19	73.76	90.37	0.01	0.59
87	10	26.28	73.76	90.37	0.68	29.58
87	20	33.51	73.76	90.37	2.25	97.50
87	50	43.56	73.76	90.37	5.61	242.73
87	100	52.81	73.76	90.37	9.65	417.55

## 7. MODELO DE FLUJOS DETRÍTICOS EN LA SALIDA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ

Los parámetros morfométricos y caudales máximos calculados para la cuenca de la Quebrada de Tarapacá en el Capítulo 6 mediante el método de la Curva Número, abren paso para poder realizar estimaciones de caudales y volúmenes detríticos generados a la salida de la cuenca.

### 7.1 Cálculo de caudales detríticos máximos mediante el método de Takahashi

El procedimiento para calcular el flujo de detritos es descrito por Takahashi (1978, 1981) y también por Montserrat (2005). La expresión para el flujo de detritos descrita por Takahashi (1978, 1981) es:

$$Q_d = Q_0 \frac{C^*}{C^* - C_d} \quad (23)$$

Donde  $Q_d$  corresponde al máximo flujo de detritos,  $Q_0$  es el máximo caudal líquido que en este caso correspondería al caudal máximo  $Q_p$  calculado en el Capítulo 6,  $C_d$  es la concentración volumétrica teórica y  $C^*$  es la concentración máxima de sólidos, la cual generalmente toma valores del orden del 65%.  $C_d$  se puede estimar como sigue:

$$C_d = \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\phi) - \tan(\alpha)} \quad (24)$$

Donde  $\alpha$  corresponde al ángulo de inclinación del lecho, y  $\phi$  al ángulo de fricción interna del material depositado (entre 30° y 40°) (Ayala, 1996; Armanini *et al.*, 2000). El parámetro  $C_d$  es definido por Takahashi (1981) como la concentración de equilibrio del flujo, la cual se alcanza en condiciones estacionarias. Los resultados obtenidos mediante esta ecuación presentan una buena correlación con los datos experimentales (Takahashi, 1981).

**TABLA 13. PARÁMETROS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DETRÍTICO. OBTENIDOS DEL ESTUDIO “DIAGNÓSTICO DE RIESGO EN QUEBRADAS LATERALES A LOS CAUCES DE LAS QUEBRADAS DE CAMIÑA Y TARAPACÁ” (IDIEM - DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS DEL MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. 2012-2013, SEPÚLVEDA ET AL., 2014)**

Rango	1		2		3		4		5	
Parámetro	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
$\phi$	30	40	30	40	30	40	30	40	30	40
Tan( $\phi$ )	0.58	0.84	0.58	0.84	0.58	0.84	0.58	0.84	0.58	0.84
A	3.68	3.85	5.75	8.26	8.96	9.87	12.39	14.98	0.16	0.25
Tan( $\alpha$ )	0.06	0.07	0.1	0.15	0.16	0.17	0.22	0.27	0.16	0.26
$\rho_{\text{agua}}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\rho_{\text{sólido}}$	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
$C^*$	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
$C_d$	0.05	0.08	0.08	0.2	0.14	0.26	0.21	0.52	0.14	0.48
P	1.08	1.14	1.15	1.46	1.27	1.49	1.49	5.13	1.29	3.84

Los parámetros para la estimación de caudales detríticos (Tabla 13) se obtienen del estudio sobre las quebradas laterales en los cauces de las quebradas de Camiña y Tarapacá (Sepúlveda *et al.*, 2014), por lo cual presentan una limitante importante al momento de realizar los cálculos posteriores, sin embargo, estos son los únicos antecedentes sobre estos parámetros para la cuenca de la Quebrada de Tarapacá que se tienen al momento de realizar las estimaciones.

Se han calculado valores máximos y mínimos de caudales y volúmenes detríticos en función de las combinaciones mínimas y máximas para la estimación de  $C_d$  (Tabla 13), las cuales se producen cuando los ángulos de fricción ( $\phi$ ) e inclinación ( $\alpha$ ) presentan valores extremos opuestos. Así también, el mínimo valor de  $C_d$  se obtiene cuando  $\phi$  es máximo y  $\alpha$  mínimo y viceversa. Los resultados se muestran en la tabla 14.

**TABLA 14. RESUMEN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DETRÍTICOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO EN LA SALIDA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ.**

Período de retorno (años)	Qp (m3/s)	Qd min (m3/s)	Qd max (m3/s)	Vd min (m3)	Vd max (m3)
5	0.59	0.62	0.80	1087.55	2321.77
10	29.58	31.26	40.35	54516.17	116384.46
20	97.50	103.03	133.00	179704.70	383644.61
50	242.73	256.49	331.09	447372.75	955078.78
100	417.55	441.23	569.56	769590.15	1642968.23

## 7.2 Modelamiento de flujo de detritos

Con el propósito de relacionar los procesos de deposición en el abanico con los ambientes sedimentarios interpretados para el sondaje DGA Huara, se ha realizado un modelo flujos con el programa Laharz mediante el software ArcGis 10.

Se ha realizado un modelamiento de flujos de detritos mediante el programa computacional Laharz. Este programa se implementa en ArcGis 10, en el cual se utiliza un modelo de elevación digital (DEM) de la zona cuyo tamaño de celda es de 25 m, y se le entrega un valor constante de volumen y las coordenadas iniciales de donde se iniciaría el depósito, que para este caso se ha elegido arbitrariamente una zona cercana al borde de cuenca con el abanico.

Se considera que el inicio de la sedimentación se produzca en el ápice del abanico aluvial, a una altitud de 1300 msnm.

En 1998 Iverson *et al.*, encontró correlaciones entre el volumen de depósitos de lahar, área planimétrica de deposición, y la mayor área transversal sobre la cual es transportado el lahar. La relación entre área y volumen se expresan mediante las ecuaciones:

$$A = c_1 * V^{2/3} \quad (25)$$

$$B = c_2 * V^{2/3} \quad (26)$$

Donde  $V$  es el volumen,  $A$  es el mayor área transversal del lahar,  $B$  es el área planimétrica total,  $c_1$  y  $c_2$  son coeficientes adimensionales.

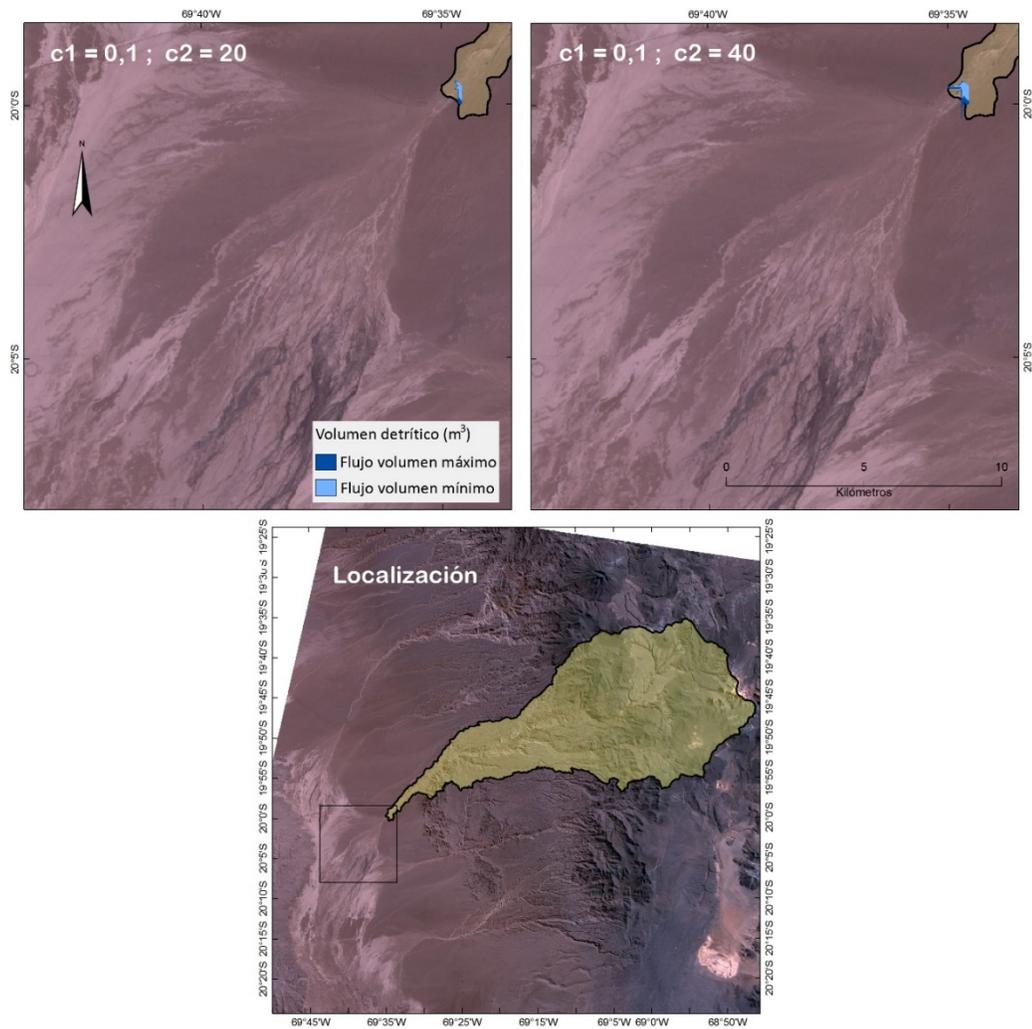
Para lahares, Iverson *et al.*, (1998) encontró que  $c_1=0.05$  y  $c_2=200$  reproducían los resultados más cercanos a los datos observados. Posteriormente, Griswold e Iverson (2008) extendieron esta metodología desde lahares hacia flujos de detritos. Mediante datos de flujos de detritos de todo el mundo, Griswold e Iverson (2008) encontraron que los coeficientes  $c_1=0.1$  y  $c_2=20$  eran los que mejor reproducían los flujos de detritos.

Por otra parte, Webb *et al.*, (2008), utilizando datos de flujos de detritos del sudeste de Arizona, encontró que el coeficiente  $c_1=0.1$  se ajusta a estos datos, coincidiendo con lo encontrado por Griswold e Iverson (2008), sin embargo el encuentra un valor  $c_2=40$ . La diferencia en el coeficiente  $c_2$  probablemente sea explicada por el contenido de agua en los flujos de detritos, así como sus distribuciones de tamaño de partículas.

Se han llevado a cabo dos escenarios en este modelo, en base a los volúmenes estimados a partir los caudales máximos para períodos de retorno de 100 años y al volumen correspondiente al evento de crecida del año 2012, se generan modelos de flujos de detritos para distintos coeficientes  $c_1$  y  $c_2$ .

Con los valores de los coeficientes encontrados por Griswold e Iverson (2008) y por Webb *et al.*, (2008) se han modelado dos flujos de detritos correspondiente a cada uno de estos. Los volúmenes detríticos de estos flujos corresponden a los calculados a partir del caudal máximo del evento de crecida del año 2012 en la Quebrada de Tarapacá, el cual ha sido estimado por la DGA en  $137 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los modelos creados a partir de Laharz para estos flujos se presentan en la figura 34.

Se puede observar en la figura 34 que los flujos modelados abarcan un área muy pequeña y no logran cubrir zonas del abanico por donde sería esperable, a partir de la imagen satelital, que haya depósitos de flujos de detritos. Por otra parte, ya que los valores de volumen se mantienen constantes para el modelo de Laharz, es posible calcular los espesores de los depósitos modelados a partir del área del flujo. Los valores de los espesores van desde casi 2 m hasta más de 6 m (Tabla 15).



**FIGURA 34. FLUJOS DETRÍTICOS MODELADOS A PARTIR DE VALORES DE COEFICIENTES  $c_1$  Y  $c_2$  SEGÚN LO RECOMENDADO POR GRISWOLD E IVERSON (2008) ( $c_1=0.1$  Y  $c_2=20$ ) Y POR WEBB ET AL., (2008) ( $c_1=0.1$  Y  $c_2=40$ ). DE FONDO SE UTILIZA UNA IMAGEN SATELITAL LANDSAT TM 8, CON FECHA DEL 28 DE MARZO DE 2013 ELABORACIÓN PROPIA.**

**TABLA 15. ÁREAS Y ESPESORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS PARA FLUJOS MODELADOS A PARTIR DE LOS COEFICIENTES PROPUESTOS POR GRISWOLD E IVERSON (2008) Y WEBB ET AL., (2008).**

	Área mínima (m <sup>2</sup> )	Área máxima (m <sup>2</sup> )	Espesor mínimo (m)	Espesor máximo (m)
$c_1=0.1$ y $c_2=20$	48125	85625	5.25	6.30
$c_1=0.1$ y $c_2=40$	128750	166250	1.96	3.24

Para este modelo, se ajustan los valores de  $c_1$  y  $c_2$  de tal forma que los flujos guarden alguna relación con el mapeo de flujos para el evento del 2012 mostrado en el capítulo 6.3 (Figura 31) con el trabajo de Viguier *et al.*, 2015, en el cual se realiza un perfil topográfico (Figura 35) que atraviesa la zona de estudio del abanico aluvial y con los flujos de detritos encontrados en el sondaje Huara. Si bien el depósito de flujos de detritos mostrado en la figura

35 no necesariamente representa un solo evento de flujos de detritos, ni tampoco proveniente de un evento de una magnitud conocida, es posible acotarlo a una serie de eventos importantes de crecidas que puedan ser similares a las modeladas para grandes períodos de retorno, como el de 100 años como se hace aquí.

Es posible apreciar que los depósitos de flujos de detritos para la zona de estudio, según Viguier *et al.*, 2015, tienen una extensión cercana a los 10 km, mientras que los flujos mostrados en la figura 34 alcanzan extensiones menores a 1 km, por lo cual los flujos mostrados en la figura 35 no logran adaptarse a lo que podría esperarse para eventos con período de retorno tan grandes.

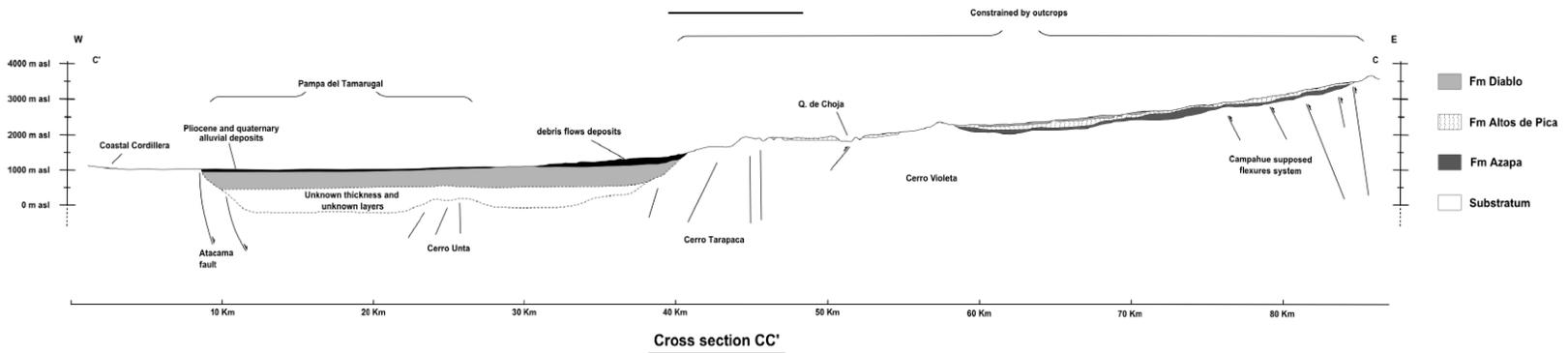
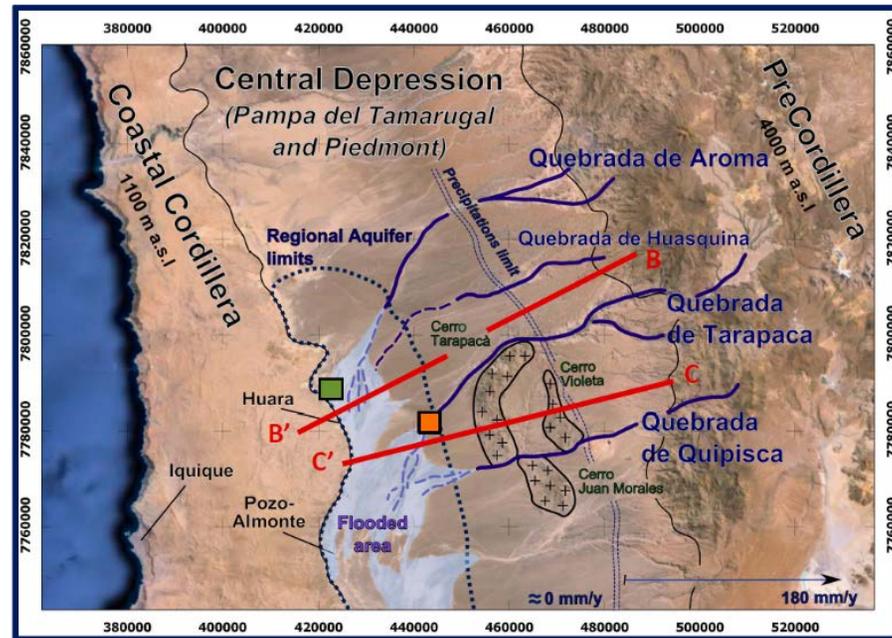


FIGURA 35. MAPA DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ Y PERFIL TOPOGRÁFICO C-C' (VIGUIER ET AL., 2015).

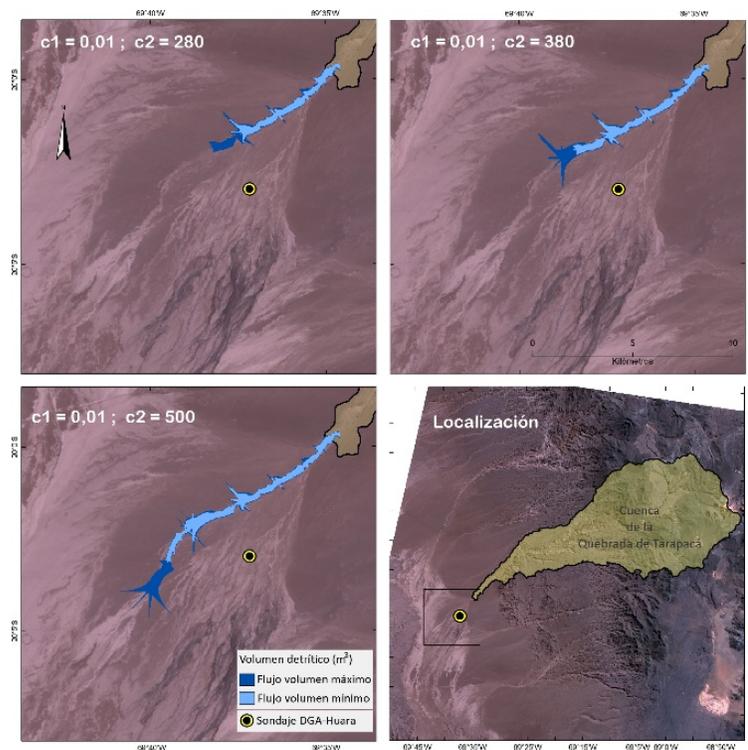
### 7.2.1 Flujos para períodos de retorno de 100 años en la salida de la Quebrada de Tarapacá

Los valores utilizados para los coeficientes  $c_1$  y  $c_2$  son  $c_1=0.1$ ,  $c_2=280$ ;  $c_1=0.01$ ,  $c_2=380$  y  $c_1=0.01$ ,  $c_2=500$ . Los resultados del modelo para el escenario de un período de retorno de 100 años se muestra en la figura 36.

Se observa que los depósitos modelados mediante estos coeficientes y para los volúmenes detríticos correspondientes a un período de retorno de 100 años, los espesores varían desde 30 cm hasta los 77 cm (Tabla 16).

**TABLA 16. ÁREAS Y ESPESORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS PARA FLUJOS MODELADOS A PARTIR DE LOS VOLÚMENES DETRÍTICOS PARA PERÍODOS DE RETORNO DE 100 AÑOS.**

	Área mínima (m <sup>2</sup> )	Área máxima (m <sup>2</sup> )	Espesor mínimo (m)	Espesor máximo (m)
$c_1=0.01$ y $c_2=280$	1403750	2143125	0.55	0.77
$c_1=0.01$ y $c_2=380$	1928125	2900000	0.40	0.57
$c_1=0.01$ y $c_2=500$	2563125	3814375	0.30	0.43



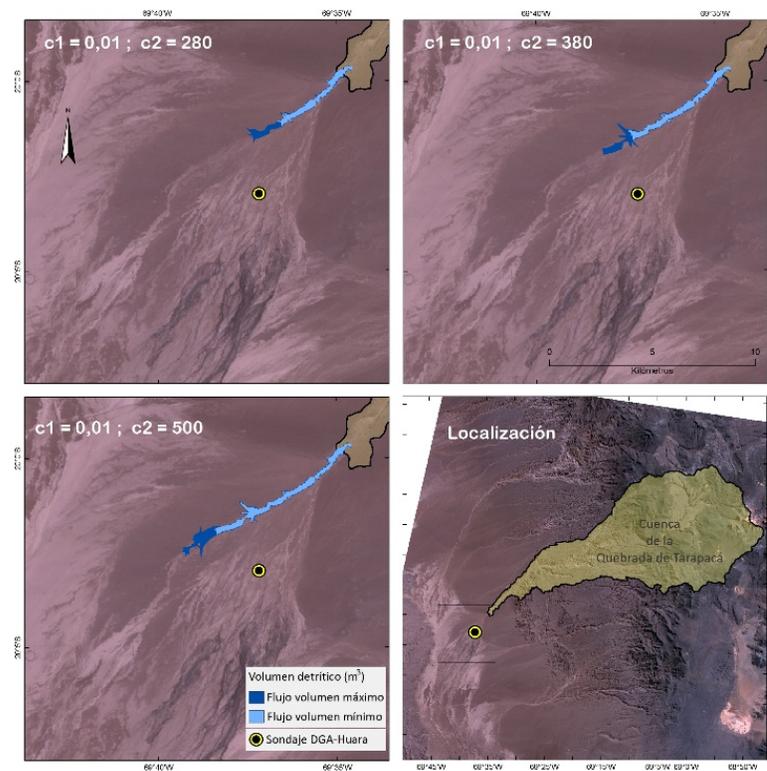
**FIGURA 36. FLUJOS DE DETRITOS PARA VOLÚMENES MÁXIMOS Y MÍNIMOS CORRESPONDIENTES A UN PERÍODO DE RETORNO DE 100 AÑOS. DE FONDO SE UTILIZA UNA IMAGEN SATELITAL LANDSAT TM 8, CON FECHA DEL 28 DE MARZO DE 2013 ELABORACIÓN PROPIA.**

### 7.2.2 Flujos para el evento de crecida de 2012 en la salida de la Quebrada de Tarapacá

En los depósitos modelados mediante estos coeficientes y para los volúmenes detríticos correspondientes lo calculado en base a los caudales máximos registrados para el evento de crecida de 2012, los espesores varían desde 19 cm hasta los 48 cm (Tabla 17). Los flujos modelados a partir de Laharz en base a este evento de 2012 se muestran en la figura 37.

**TABLA 17. ÁREAS Y ESPESORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS PARA FLUJOS MODELADOS A PARTIR DE LOS VOLÚMENES DETRÍTICOS PARA QUE REPRODUCEN EL EVENTO DE CRECIDA DE 2012.**

	Área mínima (m <sup>2</sup> )	Área máxima (m <sup>2</sup> )	Espesor mínimo (m)	Espesor máximo (m)
c <sub>1</sub> =0.01 y c <sub>2</sub> =280	756250	1118750	0.33	0.48
c <sub>1</sub> =0.01 y c <sub>2</sub> =380	995625	1523750	0.25	0.35
c <sub>1</sub> =0.01 y c <sub>2</sub> =500	1318750	1998125	0.19	0.27



**FIGURA 37. FLUJOS DE DETRITOS PARA VOLÚMENES MÁXIMOS Y MÍNIMOS CORRESPONDIENTES AL EVENTO DE 2012. DE FONDO SE UTILIZA UNA IMAGEN SATELITAL LANDSAT TM 8, CON FECHA DEL 28 DE MARZO DE 2013 ELABORACIÓN PROPIA.**

## 8. DISCUSIÓN

La relación que existe entre los procesos hidrológicos e hidrogeológicos en la cuenca de la Quebrada de Tarapacá con la sedimentología y estratigrafía del sondaje DGA Huara, queda en evidencia con los ambientes sedimentarios que han sido interpretados para este sondaje.

### **Conductividad hidráulica en el sondaje Huara**

A modo de comparar los resultados obtenidos para la conductividad hidráulica del sondaje Huara, se tiene información de la conductividad hidráulica del sondaje JICA-D obtenido del estudio de JICA en 1995. En el sondaje JICA-D los valores de la conductividad hidráulica van desde  $6.7 \cdot 10^{-3}$  cm/s hasta  $2.9 \cdot 10^{-2}$  cm/s. Estos valores son entre 2 y 3 órdenes de magnitud mayores a los medidos para el sondaje Huara (presentados en el capítulo 4.2). Parte de esta notoria diferencia puede estar dada por el hecho de que los ensayos de conductividad hidráulica realizados por el IDIEM asumen que el sondaje se encuentra bajo el nivel freático, sin embargo, este nivel no fue observado en el sondaje Huara. Es debido a esto que los valores de conductividad hidráulica del sondaje Huara pueden estar representando un valor menor al esperado.

### **Hidrogeología e hidrología**

Con respecto a la hidrogeología en la cuenca, se han logrado definir unidades de importancia hidrogeológica relativa. En base a estos resultados expuestos en el capítulo 5 y en comparación a lo expuesto en el marco hidrogeológico (capítulo 3.3.3) se aprecia que las unidades de importancia hidrogeológicas definidas por DGA (1986) para parte de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá están descritas de baja a alta importancia hidrogeológica relativa, mientras que las unidades definidas en este trabajo definen en mayor detalle con rangos que van desde nula a alta y moderada en la zona descrita por DGA (1986). Es esperable obtener diferencias importantes puesto que el mapa de unidades de importancia hidrogeológica de DGA (1986) es a escala muy gruesa (1:500.000).

Los resultados de la caracterización de la hidrología de la cuenca, dan cuenta de caudales máximos de 0.59 a 417 m<sup>3</sup>/s para períodos de retorno entre 5 y 100 años respectivamente. Estos valores de caudales máximos son entre  $10^3$  a  $10^6$  veces los valores medios de escorrentía total calculada mediante el método de la Curva Número, por lo cual son caudales vinculados a eventos de crecida importantes. Con respecto a este método de la Curva Número, existen limitantes importantes al momento de realizar estimaciones de escorrentía superficial y recarga, las cuales vienen condicionadas por la falta de mapeos geológicos y de suelos de escala más fina. Además, la escasez de estaciones meteorológicas de monitoreo en la zona de estudio, dificultan modelos óptimamente adecuados a la realidad de la dinámica tanto hidrológica como hidrogeológica.

### **Dinámica de los flujos asociados a eventos de precipitaciones extremas y su relación con la sedimentología**

Los resultados de las caracterizaciones hidrogeológicas e hidrológicas finalmente se conjugan con lo sedimentológico evidenciado en el sondaje DGA Huara. Este enlace viene dado por las relaciones de caudales máximos líquidos generados en períodos de crecidas importantes, con los caudales y volúmenes mínimos y máximos detríticos descritas por Takahashi (1978, 1981, 1991), las cuales vienen directamente conectadas con los resultados de hidrología e

hidrogeología, puesto que son parte de sus variables de entrada. Este enlace es de suma importancia, pues los volúmenes detríticos permiten, mediante el programa Laharz (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 1998), crear modelos de flujos, en este caso a la salida de la Quebrada de Tarapacá. Los valores de los coeficientes  $c_1$  y  $c_2$  que modelan flujos de detritos que puedan acomodarse con mayor consistencia a la geometría esperada son similares a los valores de un flujo con dominio de fluido, lo que podría tener explicación en una transformación desde un flujo de detritos a un flujo hiperconcentrado (Scott, 1988). Lamentablemente Laharz no es capaz de modelar la dinámica reológica de los flujos, por lo cual es posible que estos flujos sean transicionales.

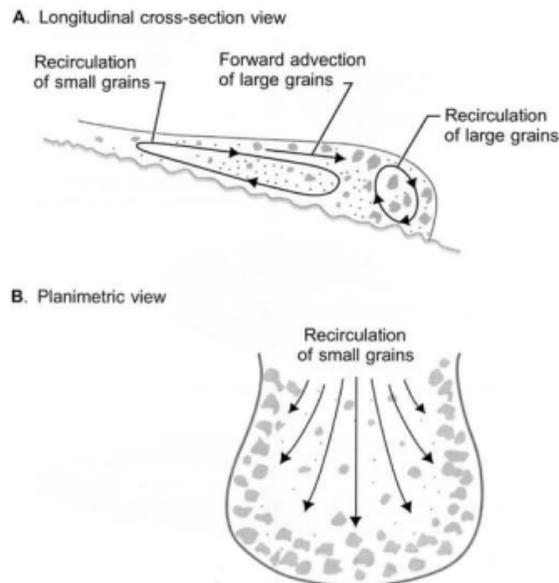
Además, cabe destacar que, en cuanto a la distribución espacial de los flujos modelados por Laharz, se observa que estos siguen un cauce en particular. La preferencia de estos cauces puede ser atribuida a la calidad del DEM para esta zona. Además, el disponer de parámetros como la inclinación de estratos y ángulo de fricción pertenecientes a quebradas laterales de la Quebrada de Tarapacá como única fuente de datos actualmente para la estimación de caudales detríticos a la salida de la quebrada (capítulo 7) genera limitantes importantes a tener en cuenta.

Finalmente, las evidencias provenientes de la relación descrita en los párrafos anteriores, se ven reflejadas a través de las variaciones en la sedimentología y estratigrafía del sondaje DGA Huara, con lo cual se ha hecho posible la identificación de los ambientes y subambientes sedimentarios que lo componen. Como se detalló en el capítulo 4, para la Unidad Superior se ha interpretado un subambiente predominante de flujos de detritos, mientras que para la Unidad Inferior se ha interpretado una intercalación de ambientes de planicies de inundación y de flujos de detritos. Según Nichols (2009), en los depósitos de flujos de detritos se caracterizan por tener clastos de hasta tamaño bloque, espesores de estratos de hasta varios metros, y depósitos matriz soportados. En los testigos de sondaje de esta unidad, todas estas características sedimentológicas y estratigráficas coinciden con lo descrito para la Unidad Superior. Además, Nichols (2009), describe el las planicies de inundación en abanicos aluviales como depósitos con estratos de espesores de decenas de centímetros a un par de metros, los cuales son bien estratificados y con paquetes distintivos de arenas y gravas, presenta imbricación de clastos comúnmente y la selección es pobre pero es ampliamente ausente el tamaño arcilla. Características como el tamaño de los estratos, los tamaños de clastos y la pobre selección son consistentes con lo encontrado a lo largo de la Unidad Inferior, los cuales se intercalan con depósitos de flujos de detritos. Características como la imbricación de clastos y ausencia de arcillas no se lograron identificar, en particular la presencia de arcillas se dificulta los estudios granulométricos que se puedan realizar debido a los altos grados de compacidad y cementación que presentan los testigos en la Unidad Inferior. Esto es apoyado por los resultados obtenidos de la conductividad hidráulica en distintos tramos del sondaje, los cuales disminuyen notoriamente con la profundidad.

Transiciones y cambios en la mecánica de fluidos desde un flujo denso a un flujo hiperconcentrado (Scott, 1988) abre la posibilidad de que a lo largo de la Unidad Inferior y sus depósitos intercalados de gravas y arenas, se represente justamente una serie de eventos de flujos que se encuentran en esta transición con un predominancia de subambientes sedimentarios de llanuras de inundación.

También es importante destacar que, según Pierson (1986) e Iverson (2005), existe un desarrollo de segregaciones de tamaño de grano en los flujos de detritos. Como producto de estas segregaciones, el frente de los flujos de detritos tiene una mayor amplitud debido a la recirculación de granos de gran tamaño como consecuencia de resistencias friccionales no

uniformes que se producen en esta zona del flujo (Figura 38). A consecuencia de esto es que los depósitos correspondientes a esta zona del flujo se componen principalmente de clastos de tamaño grava y mayor, lo cual en el sondaje DGA Huara es observable en los primeros 20 m, sin embargo la ausencia de granos de tamaño arena y menores puede ser atribuida a que posiblemente estos fueron lavados por el proceso de la perforación por lo cual no se puede asegurar con precisión que ese tramo del sondaje corresponda a la zona descrita por Iverson (2005).



**FIGURA 38. ESQUEMA DE LAS TRAYECTORIA DE GRANOS Y LAS RESULTANTES SEGREGACIONES GRANULOMÉTRICAS EN LOS FLUJOS DE DETRITOS (IVERSON, 2005).**

### **Paleoclimas del Norte Grande, sus implicancias la sedimentología**

A partir de los depósitos de flujos de detritos con un período de retorno de 100 años modelados en el capítulo 7, es posible establecer como primera aproximación una temporalidad de eventos para la zona de estudio, en particular para el cambio de ambientes sedimentarios desde la Unidad Inferior hacia la Unidad Superior. En base a la descripción e interpretación del sondaje DGA Huara realizado en el capítulo 4, y en conjunto con los modelos de flujos de detritos presentados en el capítulo 7, se estima que la Unidad Superior se compondría de aproximadamente 200 eventos de depósitos con potencias estimadas en 50 cm en promedio, en base a lo modelado con Laharz. Por lo tanto, a partir de esta estimación de la cantidad de eventos correspondientes a la Unidad Superior, se obtiene una estimación para la edad de los depósitos que componen esta Unidad, la cual correspondería a aproximadamente 12.000 años AP. Esta edad sería la que marca la transición desde la Unidad Inferior hacia la Unidad Superior. Esta edad está dentro del período post-glacial en el Norte Grande de Chile (Ortlieb, 1993), y la presencia de esta transición de subambientes sedimentarios puede estar vinculada con las condiciones de máxima pluviosidad que se habrían generado en la zona del Norte Grande de Chile entre los 14000 y 11000 años Antes del Presente (AP) (Zech *et al.*, 2006).

También cabe señalar la posibilidad de que entre la Unidad Inferior y la Unidad Superior hubo una migración importante de los cauces en el abanico aluvial, la cual sea responsable del notorio cambio de subambientes sedimentarios interpretados en el capítulo 4.3. Esta transición que ocurriría para eventos como el del 2012 o para eventos con períodos de retorno de 100 años implicaría que los flujos que nacen en la salida de la Quebrada de Tarapacá genera zonas con

depósitos con marcadas intercalaciones de sedimentos gravo arenosos y sedimentos de arena y limo arcillosos. Debido a lo explicado anteriormente y a lo descrito para la Unidad Inferior, es que se clasifica a los rellenos aluviales de esta unidad, y a las zonas donde se pueda evidenciar esta transición de flujos, como poco propicias para conformar un acuífero. Esto además es apoyado por los descendentes valores de conductividad hidráulica con la profundidad presentados en el capítulo 4.2.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través de los enfoques metodológicos con los cuales ha sido abordado este trabajo, se obtuvieron resultados desde las perspectivas hidrológica, hidrogeológica, sedimentológica y estratigráfica, las cuales permiten plantear que las interacciones que existen entre el acuífero de la Pampa del Tamarugal y la Quebrada de Tarapacá se ven reflejadas en los depósitos aluviales.

- La interpretación de los ambientes sedimentarios observados en el sondaje Huara a través de su disposición vertical y sus variaciones de tamaño de grano en la secuencia sedimentaria que rellenan el abanico, evidencian eventos hidrológicos extremos que se generan en episodios de crecidas en la cuenca.
- La secuencia sedimentaria de la aquí denominada Unidad Inferior muestra variaciones que dificultarían la recarga en esta sección sondeada, puesto que sus capas se disponen alternadamente una secuencia que transitan entre gravas arenosas y arenas limosas. No obstante para cuantificar de manera más precisa el comportamiento de esta recarga es necesario integrar valores de conductividad hidráulica que se presentan en esta Unidad.
- Las estimaciones realizadas de la recarga son hidrológicamente consistentes para la cuenca, puesto que la escorrentía total calculada de 408.9 l/s es bastante cercana al caudal de 331 l/s calculado por DICTUC (2006b) y al de 390 l/s calculado por DGA (1987).
- Las condiciones sedimentológicas y estratigráficas en el sondaje tienen relación a su vez con la cosa hidrológica, puesto que esta, manifestada en los eventos de crecidas y precipitaciones extremas, es determinante en el comportamiento de la mecánica de fluidos que se manifiesta en el área del abanico aluvial, cuyas variaciones espaciales se han modelado y discutido en el transcurso de este trabajo. Mediante los resultados obtenidos mediante el modelo realizado con Laharz se puede plantear que los coeficientes que mejor se ajustan son consistentes con flujos predominantemente fluidos o en una transición desde flujos de detritos a flujos hiperconcentrados.
- Los rangos de variabilidad de los volúmenes detríticos calculados mediante el método de Takahashi son ligeramente elevados, obteniéndose una razón aproximada de 1:2 entre mínimo y máximo.
- El método de estimación de flujos de detritos realizado mediante Laharz es útil para identificar de un modo grueso la morfología y eventos que componen el abanico aluvial de la Quebrada de Tarapacá. Además entrega estimaciones de las potencias esperadas para depósitos de este tipo, lo que aporta como primera aproximación a una temporalidad de eventos que se pueda realizar para los depósitos del abanico aluvial a la salida de la Quebrada de Tarapacá.
- Es recomendable la confección de un mapa geológico de detalle para la zona estudiada, puesto que el mapa geológico 1.000.000 (Sernageomin, 2003) es de escala demasiado gruesa y arrastra imprecisiones en los modelos que lo incorporan, las cuales pueden implicar resultados alejados a los realizados por otros estudios.
- Un estudio detallado de suelos en la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá que permitan poder definir Unidades Hidrogeológicas con mayor precisión que la existente realizada por DGA (1986).
- Se requiere implementar una mayor cobertura de estaciones pluviométricas y fluviométricas en la Quebrada de Tarapacá. Es esencialmente necesaria la existencia de estaciones fluviométricas a la salida de la Quebrada de Tarapacá.

- Estudios detallados de la geología del abanico aluvial a la salida de la Quebrada de Tarapacá resultan muy necesarios para comprender de mejor manera la evolución de los rellenos sedimentarios que lo componen.
- Se recomienda realizar datación por luminiscencia de los sedimentos que conforman el abanico aluvial a la salida de la Quebrada de Tarapacá, en particular los testigos del sondaje Huara.
- Para obtener una mayor comprensión del acuífero así como una mayor certeza en la construcción de escenarios, la dinámica reológica es un factor que debe integrarse en el análisis y síntesis de resultados de estudios que busquen aportar en el conocimiento hidrogeológico en la zona de estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

**Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). 1995.** Estudio sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la Parte Norte de Chile. DGA-MOP.

**American Nuclear Society ANS, 1980.** American national standard for evaluation of radionuclide transport in groundwater for nuclear power sites: La Grange Park, Illinois, ANSI/ANS-2.17-1980, American Nuclear Society

**Armanini, A., Dellagiacomma F., Ferrari, L. 1991.** From The Check Dam To The Development Of Functional Check Dams. Fluvial Hydraulics Of Mountain Regions. Lecture notes in earth sciences, n.37, Springer-Verlag, pp. 331-344.

**Ayala, L. 1996.** Hidráulica De Los Fenómenos De Remoción En Masa: Corrientes De Detritos Y Flujos De Barro. Curso Pre- XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador.

**Blair, T.C., McPherson, J.G. 1994.** Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes and facies assemblages. Journal of Sedimentary Research, A64, 450–589.

**Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos CIDERH, CONICYT REGIONAL Proyecto R09I1001, Iquique - Chile. Centro de Geosistemas. Instituto Técnico Superior, Lisboa - Portugal. Córdoba M.D, Lictevout E, Amaro S, Rodriguez J, Aguilera J y Ribeiro L. 2014.** Reproducción de la Piezometría del Acuífero Pampa del Tamarugal, Norte de Chile.

**Charrier, R., Muñoz, N. 1993.** “Geología y tectónica del Altiplano Chileno.” Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos: El Altiplano: Ciencia y Conciencia en los Andes: 19 al 21 de Octubre de 1993. pp. 23-29.

**Chow, V.T., D.R. Maidment, L.W. Mays, 1988.** Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York.

**Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). 2012.** Consumo De Agua En Laminaria Del Cobre 2011.

**Coussot P, Meunier M. 1996.** Recognition, classification and mechanical description of debris flows. Earth-Science Review, Vol. 40, No 3, p. 209-227.

**Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. 2014.** Investigación Y Análisis De Los Mecanismos De Recarga De La Pampa Del Tamarugal. DGA-MOP.

**de Haas T, Ventra D, Carbonneau P, Kleinhans M. 2014.** Debris-flow dominance of alluvial fans masked by runoff reworking and weathering, Geomorphology, doi: 10.1016/j.geomorph.2014.04.028.

**Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile. DICTUC. 2008.** Levantamiento Hidrogeológico Para El Desarrollo De Nuevas Fuentes De Agua en Áreas Prioritarias De La Zona Norte De Chile, Regiones XV, I, II Y III.

- Fredlund D.G., Xing A. 1994.** Equation for the Soil Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 521-532.
- Gajardo, R. 1994.** “La vegetación Natural de Chile, Clasificación y Distribución Geográfica”. CONAF. Editorial Universitaria.
- Garreaud RD. 2000.** Intraseasonal variability of moisture and rainfall over the South American Altiplano. *Mon Weather Rev* 128:3379–3346
- Griswold, J.P., e Iverson, R.M. 2008.** Mobility statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches (ver. 1.1, April 2014): U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5276, 59 p
- Harvey, A.M., Mather, A.E. & Stokes, M. (Eds). 2005.** Alluvial Fans: Geomorphology, Sedimentology, Dynamics. Special Publication 251, Geological Society Publishing House, Bath.
- IDIEM. 2013.** Diagnóstico de la situación de riesgo en quebradas laterales a los cauces de las quebradas de Camiña y Tarapacá. Report N° 762.474-C. Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM), Universidad de Chile.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P. & Vallance, J.W. 1998.** Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geol. Soc. Of America Bull.*, 110, 972-984
- Japan International Cooperation Agency (JICA), Pacific Consultants International, Dirección General de Aguas (DGA). 1995.** The study on the development of water resources in northern Chile. Gobierno de la República de Chile.
- MacQueen, J. 1967.** Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Volume 1: Statistics, 281--297, University of California Press, Berkeley, Calif. <http://projecteuclid.org/euclid.bsm/1200512992>.
- Ministerio de Obras Públicas (Dirección General de Aguas). 1986.** Mapa hidrogeológico de Chile 1:2500000.
- Montserrat, S. 2005.** Estudio Experimental de Obras de Protección Contra Aluviones. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Mujumdar P.P, Nagesh Kumar D. 2013.** Floods in a Changing Climate, *Hydrologic Modeling*, p 5-9.
- Mueller, J. 1968.** An Introduction to the Hydraulic and Topographic Sinuosity Indexes1. *Annals of the Association of American Geographers* 58: 371
- Nichols G. 2009.** *Sedimentology and Stratigraphy*, 2nd Edition, p 141-146.
- Ortlieb, L. 1995.** Paleoclimas cuaternarios en el norte grande de Chile. In *Cambios cuaternarios en América del Sur* (Argollo, J.; Mourgiart, Ph.; editors): 225-246. La Paz.
- Pierson, T.C., Costa, J.E. 1987.** A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Reviews in Engineering Geology*, Vol. 7, p. 1-12.

**Sernageomin. 2003.** Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital 4.

**Sepúlveda S, Rebolledo S, McPhee J, Lara M, Cartes M, Rubio E, Silva D, Correia N, Vásquez J. 2014.** Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapacá, Atacama Desert, northern Chile [J]. *Landslides*, 11(3):481-491.

**Strahler, A. 1964.** "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks". En: Chow, V. (ED), *Handbook of applied Hydrology*, McGraw-Hill. New York, EE.UU.

**Takahashi, T. 1978.** Mechanical characteristics of debris flow, *Journal of the Hydraulic Division, Proceedings ASCE* 104 HY8, p 1153-1163.

**Takahashi, T. 1981.** Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. *J Nat Disaster Sci* 3(1):57-89

**Takahashi, T. 1991.** Debris flows. *IAHR Monograph*, Rotterdam, 165 p.

**Troger y Gerstner. 2004.** Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica. DGA-MOP.

**United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1985.** *National Engineering Handbook*, Section 4-Hydrology. United States Government Printing Office. Washington D.D., Estados Unidos.

**United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1986.** *Urban Hydrology For Small Waterheds*. Technical Release n° 55. United States Government Printing Office. Washington D.D., Estados Unidos.

**Webb, R.H., Magirl, C.S., Griffiths, P.G., Boyer, D.E. 2008.** Debris Flows and Floods in Southeastern Arizona from Extreme Precipitation in Late July 2006: Magnitude, Frequency, and Sediment Delivery. U.S. Geological Survey, Reston, VA. Open-File Report 2008-1274.

**Zech, R., Kull, C., Veit, H., 2006.** Late Quaternary history in the Encierro Valley, northern Chile (29 S), deduced from <sup>10</sup>Be surface exposure dating. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.

# ANEXOS

## 1-A. VALORES CN EN CONDICIÓN II DE HUMEDAD Y P0=0,2S. SCS.

Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición Hidrológica	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	Desnudo	-	77	86	91	94
	CR	Pobre	76	85	90	93
	CR	Buena	74	83	88	90
Cultivos alineados	R	Pobre	72	81	88	91
	R	Buena	67	78	85	89
	R + CR	Pobre	71	80	87	90
	R + CR	Buena	64	75	82	85
	C	Pobre	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	C + CR	Pobre	69	78	83	87
	C + CR	Buena	64	74	81	85
	C + T	Pobre	66	74	80	82
	C + T	Buena	62	71	78	81
	C + T + CR	Pobre	65	73	79	81
	C + T + CR	Buena	61	70	77	80
Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobre	65	76	84	88
	R	Buena	63	75	83	87
	R + CR	Pobre	64	75	83	86
	R + CR	Buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	C + CR	Pobre	62	73	81	84
	C + CR	Buena	60	72	80	83
	C + T	Pobre	61	72	79	82
	C + T	Buena	59	70	78	81
	C + T + CR	Pobre	60	71	78	81
	C + T + CR	Buena	58	69	77	80
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia	R	Pobre	66	77	85	89
	R	Buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	C + T	Pobre	63	73	80	83

	C + T	Buena	51	67	76	80
Pastizales o pastos naturales	-	Pobres	68	79	86	89
	-	Regulares	49	69	79	84
	-	Buenas	39	61	74	80
Pastizales	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	-	-	30	58	71	78
Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante	-	Pobres	48	67	77	83
	-	Regulares	35	56	70	77
	-	Buenas	≤30	48	65	73
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos	-	Pobres	57	73	82	86
	-	Regulares	43	65	76	82
	-	Buenas	32	58	72	79
Montes con pastos (aprovechamientos silvopastorales)	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
	-	Buenas	25	55	70	77
Bosques	-	I Muy pobre	56	75	86	91
	-	II Pobre	46	68	78	84
	-	III Regular	36	60	70	76
	-	IV Buena	26	52	63	69
	-	V Muy buena	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Caminos en tierra	-	-	72	82	87	89
Caminos con firme	-	-	74	84	90	92

## 2-A. PONDERACIÓN DE VALORES DE CURVA NÚMERO PARA CADA BANDA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ.

Altitud	Área Nula importancia hidrológica (m2)	Área Baja importancia hidrológica (m2)	Área Moderada importancia hidrológica (m2)	Área Alta importancia hidrológica (m2)	ÁREA TOTAL (m2)	CN Nula ponderado	CN Baja ponderado	CN Moderada ponderado	CN Alta ponderado	Curva Número Ponderado para cada banda
1222-1400	0	0	2.140.000	12.174.400	14.314.400	0	0	13	65	77
1400-1600	686.000	18.000	4.057.200	15.164.400	19.925.600	3	0	17	58	78
1600-1800	15.008.800	856.400	2.282.800	6.886.800	25.034.800	56	3	8	21	87
1800-2000	32.990.000	551.600	1.577.200	8.606.800	43.725.600	70	1	3	15	89
2000-2200	63.227.600	1.200	2.856.800	19.968.400	86.054.000	68	0	3	18	89
2200-2400	33.494.000	1.889.600	5.415.600	34.485.200	75.284.400	41	2	6	35	85
2400-2600	25.601.200	3.948.000	9.059.600	30.298.400	68.907.200	35	5	11	33	84
2600-2800	19.385.200	2.364.800	18.066.800	18.280.000	58.096.800	31	4	26	24	85
2800-3000	18.592.400	6.230.400	18.786.800	18.752.400	62.362.000	28	9	26	23	85
3000-3200	10.945.600	8.262.000	22.445.600	20.375.600	62.028.800	16	12	31	25	84
3200-3400	6.118.800	16.402.400	23.531.600	26.879.600	72.932.400	8	20	27	28	83
3400-3600	12.718.400	29.251.600	26.521.200	31.723.200	100.214.400	12	26	22	24	85
3600-3800	17.725.200	39.061.600	19.819.600	37.652.800	114.259.200	14	31	15	25	85
3800-4000	45.553.200	57.443.200	27.895.200	40.456.000	171.347.600	25	30	14	18	87
4000-4200	72.583.200	94.787.200	66.946.800	84.950.400	319.267.600	21	27	18	20	86
4200-4400	72.226.800	76.355.200	4.539.600	23.653.600	176.775.200	38	39	2	10	89
4400-4600	61.605.200	42.063.200	1.534.800	14.279.200	119.482.400	48	32	1	9	90
4600-4800	60.080.400	16.049.200	338.000	7.441.200	83.908.800	67	17	0	7	91
4800-5000	21.929.200	1.185.200	5.600	1.664.000	24.784.000	82	4	0	5	92
5000-5200	11.285.600	0	2.400	562.000	11.850.000	89	0	0	4	92
5200-5400	5.620.800	0	8.800	226.400	5.856.000	89	0	0	3	92
5400-5600	1.506.000	0	1.600	8.000	1.515.600	92	0	0	0	93
5600-5800	13.600	0	0	1.600	15.200	83	0	0	8	91
				TOTAL	1.717.942.000				PROMEDIO	87

## 3-A. HUARA BAQUEDANO

Año	Max 48 hrs	Nº orden	Max 48 hrs	Pbex	Pretorno	Max 24
1993	0	1	4	0,04	23,00	0
1994	0	2	3	0,09	11,50	0
1995	0	3	1,5	0,13	7,67	0
1996	3	4	1,5	0,17	5,75	3
1997	0	5	1	0,22	4,60	0
1998	0	6	0	0,26	3,83	0
1999	0	7	0	0,30	3,29	0
2000	0	8	0	0,35	2,88	0
2001	0	9	0	0,39	2,56	0
2002	0	10	0	0,43	2,30	0
2003	0	11	0	0,48	2,09	0
2004	0	12	0	0,52	1,92	0
2005	0	13	0	0,57	1,77	0
2006	0	14	0	0,61	1,64	0
2007	0	15	0	0,65	1,53	0
2008	1,5	16	0	0,70	1,44	1,5

2009	0	17	0	0,74	1,35	0
2010	0	18	0	0,78	1,28	0
2011	4	19	0	0,83	1,21	4
2012	1	20	0	0,87	1,15	1
2013	0	21	0	0,91	1,10	0
2014	1,5	22	0	0,96	1,05	1,1

#### 4-A. CODPA.

Año	Max 48 hrs	Nº orden	Max 48 hrs	Pbex	Pretorno	Max 24
1961	0	1	35	0,02	54,00	0
1962	0	2	32,5	0,04	27,00	0
1963	0	3	23	0,06	18,00	0
1965	0	4	21,5	0,07	13,50	0
1966	0	5	16,3	0,09	10,80	0
1967	0	6	14,5	0,11	9,00	0
1968	0	7	14,4	0,13	7,71	0
1969	8	8	14	0,15	6,75	8
1970	2,5	9	13,5	0,17	6,00	2
1971	5	10	13	0,19	5,40	3
1972	14,5	11	13	0,20	4,91	11,5
1973	11	12	12	0,22	4,50	9
1974	11,8	13	11,8	0,24	4,15	11,8
1975	8	14	11,5	0,26	3,86	8
1976	9	15	11	0,28	3,60	5,5
1977	10	16	11	0,30	3,38	7,5
1978	1	17	10	0,31	3,18	1
1979	2,5	18	9,5	0,33	3,00	2,5
1980	6	19	9	0,35	2,84	3,5
1981	1	20	8	0,37	2,70	1
1982	1,5	21	8	0,39	2,57	1,5
1983	2,5	22	7,6	0,41	2,45	2
1984	23	23	7,5	0,43	2,35	12,5
1985	0,5	24	6,5	0,44	2,25	0,5
1986	13	25	6,5	0,46	2,16	8
1987	6,5	26	6	0,48	2,08	6,1
1988	3	27	5,5	0,50	2,00	3
1989	7,6	28	5	0,52	1,93	4
1990	3	29	5	0,54	1,86	3
1991	2	30	4,5	0,56	1,80	1,5
1992	3,5	31	3,5	0,57	1,74	3,5
1993	13	32	3,5	0,59	1,69	8,5

1994	7,5	33	3	0,61	1,64	4,5
1995	5,5	34	3	0,63	1,59	4
1996	2,5	35	2,5	0,65	1,54	2,5
1997	16,3	36	2,5	0,67	1,50	15,1
1998	6,5	37	2,5	0,69	1,46	5
1999	5	38	2,5	0,70	1,42	5
2000	11	39	2	0,72	1,38	10,5
2001	14	40	1,5	0,74	1,35	9,5
2002	12	41	1,5	0,76	1,32	11,5
2003	14,4	42	1	0,78	1,29	7,6
2004	35	43	1	0,80	1,26	27,5
2005	1,5	44	1	0,81	1,23	1,5
2006	4,5	45	1	0,83	1,20	4
2007	9,5	46	0,5	0,85	1,17	8
2008	11,5	47	0	0,87	1,15	6
2009	1	48	0	0,89	1,13	1
2010	3,5	49	0	0,91	1,10	2
2011	21,5	50	0	0,93	1,08	20
2012	32,5	51	0	0,94	1,06	29,5
2013	13,5	52	0	0,96	1,04	12,5
2014	1	53	0	0,98	1,02	1

#### 5-A. MOCHA.

Año	Max 48 hrs	Nº orden	Max 48 hrs	Pbex	Pretorno	Max 24
1988	7,7	1	56,5	0,04	25,00	5,5
1989	9,9	2	49	0,08	12,50	5,5
1990	12,3	3	20,1	0,12	8,33	11,1
1991	1,5	4	17	0,16	6,25	1,5
1992	0,1	5	17	0,2	5,00	0,1
1993	0,6	6	12,3	0,24	4,17	0,3
1994	12	7	12	0,28	3,57	12
1995	17	8	12	0,32	3,13	9
1998	9,8	9	11,1	0,36	2,78	9
2000	11,1	10	11	0,4	2,50	6
2001	20,1	11	10	0,44	2,27	11
2002	11	12	9,9	0,48	2,08	11
2003	2	13	9,8	0,52	1,92	2
2004	17	14	7,7	0,56	1,79	12
2005	12	15	6	0,6	1,67	8
2006	6	16	5,7	0,64	1,56	6
2007	5,7	17	3,8	0,68	1,47	3,6

2008	56,5	18	2,5	0,72	1,39	31,5
2009	2,2	19	2,2	0,76	1,32	2
2010	1,5	20	2	0,8	1,25	1,5
2011	2,5	21	1,5	0,84	1,19	2,5
2012	49	22	1,5	0,88	1,14	49
2013	10	23	0,6	0,92	1,09	10
2014	3,8	24	0,1	0,96	1,04	3,8

#### 6-A. CHILCAYA.

Año	Max 48 hrs	Nº orden	Max 48 hrs	Pbex	Pretorno	Max 24
1971	15	1	87	0,03	33,00	15
1972	25,5	2	79,1	0,06	16,50	20
1973	29,5	3	55	0,09	11,00	19
1975	22	4	44	0,12	8,25	12
1976	32	5	42	0,15	6,60	26
1977	42	6	42	0,18	5,50	25
1978	31	7	42	0,21	4,71	20
1979	35	8	36,5	0,24	4,13	18
1980	35	9	36	0,27	3,67	20
1981	25	10	36	0,30	3,30	17
1982	15	11	36	0,33	3,00	12
1983	17	12	35	0,36	2,75	10
1984	44	13	35	0,39	2,54	24,5
1985	79,1	14	35	0,42	2,36	45
1986	35	15	34	0,45	2,20	31
1987	55	16	34	0,48	2,06	32
1999	87	17	33	0,52	1,94	77
2000	42	18	32	0,55	1,83	37
2001	42	19	31	0,58	1,74	37
2002	33	20	29,5	0,61	1,65	32
2003	36	21	29	0,64	1,57	23
2004	22	22	28,1	0,67	1,50	12
2005	36	23	25,5	0,70	1,43	23
2006	34	24	25	0,73	1,38	21
2007	34	25	22	0,76	1,32	26
2008	36,5	26	22	0,79	1,27	23
2009	19	27	20,9	0,82	1,22	16
2010	20,9	28	20	0,85	1,18	13,9
2011	29	29	19	0,88	1,14	18
2012	36	30	17	0,91	1,10	25,5
2013	28,1	31	15	0,94	1,06	27,9

2014	20	32	15	0,97	1,03	12
------	----	----	----	------	------	----

#### 7-A. PUMIRE.

Año	Max 48 hrs	Nº orden	Max 48 hrs	Pbex	Pretorno	Max 24
1962	10	1	88	0,03	31	10
1963	35,4	2	65,5	0,06	15,5	27,7
1964	30,9	3	60,4	0,1	10,33	18,4
1965	19,5	4	52,5	0,13	7,75	19,5
1966	20,1	5	42,5	0,16	6,2	10,5
1967	36,1	6	42	0,19	5,17	19,4
1968	42	7	41,7	0,23	4,43	24
1969	40	8	40	0,26	3,88	24
1970	41,7	9	38,5	0,29	3,44	27
1971	35	10	36,1	0,32	3,1	24,5
1972	38,5	11	35,4	0,35	2,82	29,5
1973	42,5	12	35	0,39	2,58	33,5
1974	60,4	13	30,9	0,42	2,38	48
1975	65,5	14	28	0,45	2,21	41
1976	52,5	15	27	0,48	2,07	28,5
1977	88	16	26	0,52	1,94	46
1978	25	17	25	0,55	1,82	15
1979	27	18	25	0,58	1,72	16
1980	7,5	19	20,1	0,61	1,63	4
1981	12	20	19,5	0,65	1,55	8
1982	19	21	19	0,68	1,48	19
1983	4,5	22	18,5	0,71	1,41	4,5
1984	28	23	18	0,74	1,35	25
1985	15	24	15	0,77	1,29	10
1986	26	25	12	0,81	1,24	16
1987	25	26	12	0,84	1,19	15
1988	12	27	10	0,87	1,15	12
1989	0	28	7,5	0,9	1,11	0
1990	18	29	4,5	0,94	1,07	10
1991	18,5	30	0	0,97	1,03	10

#### 8-A. POROMA.

Año	Max 48 hrs	Nº orden	Max 48 hrs	Pbex	Pretorno	Max 24
1968	27	1	43	0,02	44,00	15
1969	43	2	40	0,05	22,00	35
1972	0	3	35	0,07	14,67	0

1975	35	4	34	0,09	11,00	35
1976	17	5	27	0,11	8,80	9
1977	8	6	25	0,14	7,33	6
1978	10,5	7	24,4	0,16	6,29	7,5
1979	0	8	24	0,18	5,50	0
1980	0	9	24	0,20	4,89	0
1981	20	10	23,5	0,23	4,40	12
1982	1	11	23	0,25	4,00	1
1983	11	12	23	0,27	3,67	11
1984	24	13	20,5	0,30	3,38	16
1985	5,1	14	20	0,32	3,14	5,1
1986	10	15	19	0,34	2,93	5
1987	15	16	19	0,36	2,75	8
1988	23,5	17	17,5	0,39	2,59	21,5
1989	10	18	17	0,41	2,44	9
1990	25	19	17	0,43	2,32	16
1991	10	20	16	0,45	2,20	9
1992	12,5	21	16	0,48	2,10	12,5
1993	19	22	15	0,50	2,00	13
1994	17,5	23	15	0,52	1,91	17
1995	14	24	14	0,55	1,83	8
1996	12,8	25	13,5	0,57	1,76	12
1997	16	26	12,8	0,59	1,69	16
1998	9	27	12,5	0,61	1,63	5
1999	23	28	12,4	0,64	1,57	23
2000	12,4	29	11	0,66	1,52	12
2001	24,4	30	11	0,68	1,47	24
2002	19	31	10,5	0,70	1,42	19
2003	2	32	10	0,73	1,38	1
2004	20,5	33	10	0,75	1,33	16,5
2005	13,5	34	10	0,77	1,29	11
2006	16	35	9	0,80	1,26	16
2007	17	36	8	0,82	1,22	9
2008	24	37	8	0,84	1,19	14
2009	15	38	5,1	0,86	1,16	8
2010	8	39	2	0,89	1,13	5
2011	40	40	1	0,91	1,10	25
2012	34	41	0	0,93	1,07	22
2013	23	42	0	0,95	1,05	13
2014	11	43	0	0,98	1,02	7

9-A. CANCOSA.

Año	Max 48 hrs	Nº orden	Max 48 hrs	Pbex	Pretorno	Max 24
1976	18	1	54	0,03	37,00	18
1977	32	2	44	0,05	18,50	22
1978	11	3	43	0,08	12,33	11
1979	31	4	43	0,11	9,25	29
1980	17	5	41	0,14	7,40	17
1981	39	6	40,5	0,16	6,17	29
1982	39	7	39	0,19	5,29	23
1983	5	8	39	0,22	4,63	4
1984	54	9	39	0,24	4,11	32
1985	43	10	38	0,27	3,70	31
1986	31	11	32	0,30	3,36	22,5
1987	39	12	31	0,32	3,08	30
1988	25	13	31	0,35	2,85	25
1989	25	14	30,4	0,38	2,64	25
1991	43	15	30	0,41	2,47	22
1992	30	16	30	0,43	2,31	20
1993	30	17	26	0,46	2,18	17
1994	26	18	26	0,49	2,06	20
1995	15	19	25,9	0,51	1,95	10
1996	20	20	25,7	0,54	1,85	13
1997	16	21	25	0,57	1,76	12
1998	26	22	25	0,59	1,68	15
1999	30,4	23	23	0,62	1,61	19,2
2000	23	24	20	0,65	1,54	18
2001	40,5	25	19	0,68	1,48	22
2002	17,5	26	18	0,70	1,42	12,5
2003	16,8	27	18	0,73	1,37	11
2004	25,7	28	17,5	0,76	1,32	17,5
2005	44	29	17	0,78	1,28	30
2006	41	30	16,8	0,81	1,23	23
2007	18	31	16	0,84	1,19	10
2008	15	32	15	0,86	1,16	8
2009	9	33	15	0,89	1,12	5
2010	19	34	11	0,92	1,09	15
2011	38	35	9	0,95	1,06	22
2012	25,9	36	5	0,97	1,03	24,1

**10-A. MAMIÑA.**

Año	Max 48 hrs	nº Orden	Max 48 hrs	Pbex	Pretorno	Max 24
1986	3	1	36	0,03	30,00	3
1987	20,9	2	26	0,07	15,00	17,9
1988	0	3	25,3	0,10	10,00	0
1989	10,4	4	25	0,13	7,50	6,7
1990	8	5	24,9	0,17	6,00	4,5
1991	0	6	22	0,20	5,00	0
1992	9	7	20,9	0,23	4,29	7,5
1993	36	8	18,1	0,27	3,75	25
1994	3	9	17	0,30	3,33	3
1995	8	10	15,8	0,33	3,00	5
1996	24,9	11	12,5	0,37	2,73	24,9
1997	25,3	12	11,3	0,40	2,50	17
1998	22	13	10,4	0,43	2,31	22
1999	26	14	9,5	0,47	2,14	18
2000	7	15	9	0,50	2,00	7
2001	18,1	16	8,5	0,53	1,88	14,5
2002	12,5	17	8	0,57	1,76	12,5
2003	3	18	8	0,60	1,67	3
2004	3,5	19	7	0,63	1,58	3,2
2005	17	20	5,8	0,67	1,50	10
2006	8,5	21	5	0,70	1,43	5
2007	5	22	3,5	0,73	1,36	4
2008	25	23	3	0,77	1,30	17
2009	9,5	24	3	0,80	1,25	5
2010	2,7	25	3	0,83	1,20	2,6
2011	15,8	26	2,7	0,87	1,15	9,3
2012	11,3	27	2	0,90	1,11	10
2013	5,8	28	0	0,93	1,07	3,3
2014	2	29	0	0,97	1,03	2

**11-A. CAMIÑA.**

Año	Max 48	nº Orden	Max 48	Pbex	Pretorno	Max 24
1971	4	1	115	0,02	42,00	4
1972	12	2	72	0,05	21,00	8,5
1974	53,1	3	53,1	0,07	14,00	42,1
1975	3	4	35,5	0,10	10,50	3
1976	35	5	35	0,12	8,40	35
1977	0	6	31	0,14	7,00	0

1978	0	7	24	0,17	6,00	0
1979	0	8	20,2	0,19	5,25	0
1980	5	9	17,5	0,21	4,67	5
1981	4	10	17	0,24	4,20	2
1982	2	11	16,5	0,26	3,82	2
1983	6	12	15	0,29	3,50	4
1984	31	13	15	0,31	3,23	26
1985	5	14	13	0,33	3,00	3
1988	0	15	12	0,36	2,80	0
1989	10,4	16	10,4	0,38	2,63	6,7
1990	115	17	10	0,40	2,47	95,5
1991	5	18	8,5	0,43	2,33	4
1992	8,5	19	8	0,45	2,21	5,5
1993	2,5	20	8	0,48	2,10	1,5
1994	0,5	21	7	0,50	2,00	0,5
1995	8	22	6	0,52	1,91	4
1996	17,5	23	5,2	0,55	1,83	16
1997	24	24	5	0,57	1,75	18,5
1998	0	25	5	0,60	1,68	0
1999	15	26	5	0,62	1,62	15
2000	10	27	5	0,64	1,56	7
2001	15	28	4	0,67	1,50	10
2002	17	29	4	0,69	1,45	15
2003	8	30	4	0,71	1,40	5
2004	13	31	3	0,74	1,35	7
2005	5	32	2,5	0,76	1,31	5
2006	7	33	2	0,79	1,27	4
2007	4	34	2	0,81	1,24	4
2008	16,5	35	0,5	0,83	1,20	9
2009	0	36	0	0,86	1,17	0
2010	2	37	0	0,88	1,14	2
2011	35,5	38	0	0,90	1,11	18,5
2012	72	39	0	0,93	1,08	48
2013	20,2	40	0	0,95	1,05	13,6
2014	5,2	41	0	0,98	1,02	5,2

## 12-A. DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE DGA HUARA.

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
0	1	Arena fina suelta y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	<0.6	Moderada	0,5	Líticos, fragmentos volcanicos andesiticos, tobas	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
1	2	Arena fina con gravilla intercalada sueltas	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	<0.5	Moderada	0,5	Líticos, fragmentos volcanicos andesiticos, tobas	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
2	3	Arena fina con gravilla intercalada sueltas	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	<0.5	Moderada	0,5	Líticos, fragmentos volcanicos andesiticos, tobas	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
3	4	Arena fina con gravilla intercalada. Gravas sueltas desde 3,5m.	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	gravilla de hasta 0.8. Gravas con tamaños hasta 1cm.	Moderada	0,5	Líticos, fragmentos volcanicos andesiticos, tobas	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
4	5	Gravas sueltas	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	0,1-0,9	Moderada	20%*	Líticos, fragmentos volcanicos andesiticos, tobas	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
5	6	Gravas sueltas	bajo a nulo	Media a baja	mayormente subredondeados	0,1-12	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba soldada, morada rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
6	7	Gravas sueltas	bajo a nulo	Media a baja	mayormente subredondeados	0,1-12	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba soldada, morada rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
7	8	Gravas sueltas	bajo a nulo	Media a baja	mayormente subredondeados	0,1-7	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba soldada, morada rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
8	9	Gravas sueltas	bajo a nulo	Media a baja	mayormente subredondeados	0,1-5,5	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba soldada, morada rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
9	10	Gravas sueltas	bajo a nulo	media a baja	mayormente subangulosos	0,1-6	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba soldada, morada rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
10	11	Gravas sueltas	bajo a nulo	media a baja	mayormente subangulosos	0,1-14	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba soldada, morada rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
11	12	Gravas sueltas	bajo a nulo	media a baja	mayormente subangulosos	0,1-12	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba soldada, morada rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
18	19	Gravas sueltas	bajo a nulo	media a baja	mayormente subangulosos	0,1-7	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
19	20	Gravas sueltas	bajo a nulo	media a baja	mayormente subangulosos	0,1-6,5	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
20	21	Gravas sueltas	bajo a nulo	media a baja	mayormente subangulosos	0,1-9	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
21	22	Gravas sueltas	bajo a nulo	media a baja	mayormente subangulosos	0,1-14	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
22	23	Gravas sueltas	bajo a nulo	Baja a media	mayormente subangulosos	0,1-8	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
23	24	Gravas sueltas	bajo a nulo	Baja a media	mayormente subangulosos	0,1-14	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litolología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
24	25	Gravas sueltas	bajo a nulo	Baja a media	mayormente subangulosos	0,1-12,5	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
25	26	Gravas sueltas	bajo a nulo	Baja a media	mayormente subangulosos	0,1-37	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
26	27	Gravas sueltas	bajo a nulo	Baja a media	mayormente subangulosos	0,1-8,5	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
27	28	Gravas sueltas	bajo a nulo	Baja a media	mayormente subangulosos	0,1-9,5	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Mayormente toba moradas y rosácea y tobas moradas rosáceas soldadas. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
28	29	Gravas sueltas	bajo a nulo	Baja a media	mayormente subangulosos	0,1-12	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.
29	30	Gravas sueltas	bajo a nulo	Baja a media	mayormente subangulosos	0,1-9,5	Pobre	20%*	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	*Granparte de la matriz se pierde en el proceso de realización del sondaje. Tramo muy molido.

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
30	31	Gravas sueltas	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	0,1-22	Muy pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobs soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	
31	32	Gravas sueltas	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	0,1-5,5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobs soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	
32	33	Gravas sueltas	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	0,1-5,5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobs soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	
33	34	Gravas sueltas	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	0,1-6	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobs soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	
34	35	Gravas sueltas	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	0,1-6,5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobs soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	
35	36	Gravas sueltas	bajo a nulo	media	bien redondeados a subredondeados	0,1-8	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobs soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
36	37	Gravas sueltas	moderado a bajo	media	bien redondeados a subredondeados	0,1-12	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobas soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	
37	38	Gravas y guijarros arenosos sueltos	moderado a bajo	media	bien redondeados a subredondeados	<15	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobas soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	
38	39	Gravas y guijarros arenosos sueltos	moderado a bajo	media	bien redondeados a subredondeados	<10	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado. Tobas soldadas Mayormente toba moradas y rosácea. Andesitas porfídicas.	
39	40	Gravas y guijarros arenosos sueltos y presencia de un bloques.	moderado a bajo	media	mayormente subredondeados	<18	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
40	41	Gravas y guijarros arenosos sueltos	moderado a bajo	media	mayormente subredondeados	0,1-15	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
41	42	Gravas y guijarros arenosos sueltos	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	0,1-8	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	Intenso fracturamiento

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
42	43	Gravas y guijarros arenosos sueltos	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	0,1-7	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	Intenso fracturamiento
43	44	Arena fina levemente cementada con menor presencia de gravilla	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	<0,1	Buena	60-70%	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
44	45	Arena fina levemente cementada con menor presencia de gravilla	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	<0,2	Buena a moderada	60-70%	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
45	46									Tramo sin recuperación
46	47	Gravas arenosas y en menor presencia guijarros y bloques sueltos	bajo a nulo	media	mayormente subredondeados	<25	Muy pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
47	48	Gravas y guijarros arenosos sueltos	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	<12	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
48	49	Gravas y guijarros arenosos sueltos	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	<8,5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
49	50	Gravas arenosas sueltas con presencia menor de bloques sueltos	bajo a nulo	baja	mayormente subredondeados	<17,5	Muy pobre	0,3	Andesita afanítica gris y moradas, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
50	51	Gravas arenosas sueltas con presencia menor de bloques sueltos	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-15,5	Muy pobre	0,3	Andesita afanítica gris y moradas, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
51	52	Gravas arenosas sueltas con presencia menor de bloques sueltos	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-16	Muy pobre	0,3	Andesita afanítica gris y moradas, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
52	53	Gravas y guijarros arenosos sueltos	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-12	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris, con magnetismo moderado, Tobas soldadas. Andesitas porfídicas.	
53	54	Gravas y guijarros arenosos sueltos	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-11,5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
54	55	Gravas y guijarros arenosos sueltos	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-8	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
55	56	Gravas arenosas sueltas	moderado a bajo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-4,5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
56	57	Gravas arenosas sueltas	moderado a bajo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-5,5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
57	58	Gravas arenosas sueltas 57-57,17 y 57,5-58. arena media limosa levemente cementada en 57,17-57,5.	moderado a alto	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-5	Pobre en gravas. Buena en arenas.	30% en gravas. 50% en arenas y limos.	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
58	59	Gravas arenosas sueltas con menor presencia de guijarros y un bloque.	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-13,5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
59	60	Gravas arenosas sueltas	moderado a bajo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-5	Pobre	0,3	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
60	61	Gravas arenosas sueltas con menor presencia de guijarros y un bloque.	moderado a bajo	baja	mayormente subredondeados	0,1-15	Muy pobre	0,4	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
61	62	Gravas arenosas sueltas con menor presencia de guijarros y un bloque.	bajo a nulo	baja	mayormente subredondeados	0,1-15	Muy pobre	0,4	Andesita afanítica gris principalmente, con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
62	63	Gravas arenosas sueltas y menor presencia de guijarros.	bajo a nulo	media a baja	mayormente subredondeados	0,1-10,5	Pobre	0,4	Andesita afanítica gris principalmente (70%), con magnetismo moderado, Tobas (no soldadas). Andesitas porfídicas.	
63	64	Gravas arenosas sueltas y menor presencia de guijarros.	bajo a nulo	media a buena	mayormente subredondeados	0,1-11	Pobre	0,4	Andesita afanítica gris principalmente (70%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
64	65	Gravas levemente sueltas 64-64,17. Arena media limosa de 64,17-65.	bajo a nulo	Media a buena en gravas. Media en arenas y limo.	Mayormente subredondeados en gravas. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	0,1-5 en gravas. 0,1-0,2 en arenas y limos.	Pobre en gravas. Buena en arenas y limos.	30% en gravas. 50% en arenas y limos.	Andesita afanítica gris principalmente (70%), con magnetismo moderado y en menor medida tobas de color morado en gravas. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
65	66	Arena fina a media levemente cementada de 65-65,34 y de 65,74-66. Gravos arenosas densas y menor presencia de guijarros en 65,34-65,74.	bajo a nulo	Media a buena en guijarros. Media en arenas.	Mayormente subredondeados en guijarros. Mayormente subangulosos en arenas.	0,1-7 en guijarros. 0,1-0,2 en arenas.	Pobre en Gravas. Buena en arenas.	30% en guijarros. 50% en arenas.	Andesita afanítica gris principalmente (70%), con magnetismo moderado y en menor medida tobas de color morado en guijarros. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
66	67	Arena fina a media levemente cementada de 66-66,13. Gravas arenosas densas y menor contenido de guijarros de 66,13-67.	bajo a nulo	Media guijarros. Media en arenas.	Mayormente subredondeados en guijarros. Mayormente subangulosos en arenas.	0,1-6 en guijarros. 0,1-0,2 en arenas.	Pobre en Gravas. Buena en arenas.	20% en guijarros. 40% en arenas.	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en guijarros. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	Clastos >4,5cm son más redondeados
67	68	Gravas arenosas densas y menor contenido de guijarros de 67-67,88. 67.88-68 gravas arenosas sueltas.	bajo a nulo	Mala a media.	Mayormente subredondeados.	0,1-10	Pobre	40% en guijarros. 30% en arenas y limos.	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en guijarros. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
68	69	Arena media limosa levemente cementada con menor presencia de gravilla de 68,25-69. Gravas arenosas sueltas de 68-68,25.	bajo a nulo	Mala a media en gravas. Media en arenas y limo.	Mayormente subredondeados en gravas. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	0,1-5 en gravas. 0,1-0,2 en arenas y limos.	Pobre en Gravas. Buena en arenas.	40% en gravas. 30% en arenas y limos.	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en gravas. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
69	70	Arena fina a media levemente cementada con menor presencia de gravilla de 69,85-70. Gravas arenosas densas de 69-69,85.	bajo a nulo	Mala a media en gravas. Media en arenas.	Mayormente subredondeados en gravas. Mayormente subangulosos en arenas.	0,1-5 en gravas. 0,1-0,2 en arenas.	Pobre en Gravas. Buena en arenas.	40% en gravas. 30% en arenas.	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en gravas. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
70	71	Gravas arenosas densas y menor presencia de guijarros de 70-70,92. Gravas sueltas en 70.92-71.	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subredondeados.	0,1-11	Pobre	0,6	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en gravas. Clastos >6cm corresponden a andesitas porfíricas.	
71	72	Gravas arenosas sueltas y menor presencia de guijarros	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-9	Pobre	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfíricas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
72	73	Gravas arenosas sueltas y menor presencia de guijarros	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-7	Pobre	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
73	74	Arena media de compacidad densa cementada y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-2,5	Pobre.	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
74	75	Arena media de compacidad densa cementada y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-2,5	Pobre.	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
75	76	Arena media de compacidad densa cementada y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-1	Moderada.	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
76	77	Arena media de compacidad densa cementada y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-1	Moderada.	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
77	78	Arena media de compacidad densa cementada y con presencia menor de gravilla	alto	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-1	Moderada.	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	Humedad alta en 77,25-78,25.

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Eficiencia de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
78	79	Arena media de compacidad densa cementada y con presencia menor de gravilla	moderado	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-1	Moderada.	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
79	80	Arena media cementada y con presencia menor de gravilla	alto	Media a mala.	Mayormente subangulosos.	0,1-1	Moderada.	0,5	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	Humedad alta en 79,03-79,57.
80	81	Gravas y guijarros arenosos densos en 80,09-80,33; 80,37-80,43; 80,92-81. Arena media limosa levemente cementada en 80-80,09; 80,33-80,37; 80,43-80,92.	bajo a nulo	Media a mala en gravas y guijarros. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados en gravas y guijarros. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	0,1-8 en gravas y guijarros. <0,2 en arenas y limos.	Pobre en Gravas. Buena en arenas.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en gravas y guijarros. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
81	82	Gravas arenosas densas en 81,17-82. arena media y limo levemente cementados en 81-81,17.	bajo a nulo	Media a mala en gravas. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados en gravas. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	0,1-6 en gravas. <0,2 en arenas y limos.	Pobre en Gravas. Buena en arenas.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en gravas. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
82	83	Bloques y guijarros arenosos densos	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subredondeados.	0,1-20	Muy pobre.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
83	84	Guijarros arenosos densos en 83-83,70, Gravas arenosas cementadas en 83,70-83,95 arena y limo en 83,95-84.	bajo a nulo	Media a mala en guijarros y gravas. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados en guijarros y gravas. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	<14 en guijarros, <5 y gravas y <0,2 en arenas y limos.	Pobre en Gravas. Buena en arenas.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en guijarros y gravas. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
84	85	Guijarros arenosos densos en 84,5-85. arena y limo en 84-84,5.	bajo a nulo	Media a mala en guijarros. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados en guijarros. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	0,1-7 en guijarros.<0,2 en arenas y limos.	Pobre en guijarros y buena en arenas y limos.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en guijarros. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
85	86	Gravas arenosas densas gradando a clastos tamaños guijarro en 85-85,5. arena muy gruesa y limo en 85,5-86.	bajo a nulo	Media a mala en gravas y guijarros. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados en gravas y guijarros. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	<15 en gravas y guijarros.<0,2 en arenas y limos.	Muy pobre en gravas y guijarros. Buena en arenas y limos.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en gravas y guijarros. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
86	87	Arena muy gruesa limosa de compacidad densa cementadas	bajo a nulo	Media	Mayormente subredondeados.	<0,2.	Buena	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
87	88	Arena muy gruesa limosa de compacidad densa cementadas	bajo a nulo	Media	Mayormente subredondeados.	<0,2.	Buena	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
88	89	Guijarros arenosos densos y gravas arenosas cementadas en 88,17-89. Arena muy gruesa limosa en 88-88,17.	bajo a nulo	Media a mala en guijarros y gravas. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados en guijarros y gravas. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	<8 en guijarros y gravas. <0,2 en arenas y limos.	Muy pobre en guijarros y gravas. Buena en arenas y limos.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en guijarros y gravas. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
89	90	Gravas arenosas cementadas en 89-89,85, bloque andesítico de 8cm en 89.85. Arena media cementada y con presencia menor de gravilla 89.93-90.	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subredondeados.	<5 y bloque de 8cm. <1 en arenas medias y gravas finas.	Pobre	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfidicas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
90	91	Arena media cementada de compacidad densa y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subredondeados.	<0,6	Moderada.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (80%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
91	92	Arena media cementada de compacidad densa y con presencia menor de gravilla	alto	Media a mala.	Mayormente subredondeados.	<1,5	Pobre	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (80%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
92	93	Arena media cementada de compacidad densa y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subredondeados.	<1	Pobre	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (80%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
93	94	Arena media cementada de compacidad densa y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subredondeados.	<1,5	Pobre	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (80%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
94	95	Arena media cementada de compacidad densa y con presencia menor de gravilla	bajo a nulo	Media a mala.	Mayormente subredondeados.	<0,7	Moderada.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (80%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado.	
95	96	Arena media cementada de compacidad densa y con presencia menor de gravilla	alto en 95,52-96,11. bajo en el resto del tramo	Media a mala.	Subangulosos.	<2	Moderada.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
96	97	Arena media cementada de compacidad densa y con presencia menor de gravilla de 96-96.4. Gravillas arenosas levemente sueltas de 96.4-97.	alto en 95,52-96,11. bajo en el resto del tramo	Media a mala.	Subangulosos.	<3 en gravas levemente sueltas. <2 en gravas levemente cementadas	Moderada.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
97	98	Gravas y guijarros densos 97,05-97,7. arena muy gruesas limosas cementadas en 97-97,05 y 97,7-98.	bajo a nulo	Media a mala en gravas y guijarros. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados en gravas y guijarros. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	0,1-7 en gravas y guijarros. <0,2 en arenas y limos.	Pobre en gravas y guijarros. Buena en arenas y limos.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en guijarros. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
98	99	Gravas arenosas densas en 98-98.5. Guijarros arenosos densos en 98.5-99.	bajo a nulo	Buena.	Mayormente subredondeados.	<10 en guijarros, <4 en gravas	Pobre en guijarros, pobre en gravas.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
99	100	Gravas, guijarros sueltos y presencia de un bloque de andesita porfídica.	bajo a nulo	Buena.	Mayormente subredondeados.	<40	Muy pobre.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
100	101	Gravas arenosas finas cementadas en 100,2-100,48. Arena muy gruesa limosa cementada en 100-100,2 y 100,48-101.	alto	Media a mala en gravas. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados en gravas. Mayormente subangulosos en arenas y limos.	<2 en gravas. <0,2 en arenas y limos.	Pobre en gravas. Buena en arenas y limos.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en gravas. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
101	102	Gravas arenosas finas cementadas.	2	Media.	Subangulosos.	0,1-0,7	Moderada.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	

Tramo (m)		Descripción Litológica	Grado de humedad	Esfericidad de clastos	Redondeamiento de clastos	Tamaño de clastos (cm)	Selección	Porcentaje matriz	Litología de clastos	Observaciones
Desde	Hasta									
102	103	Gravas arenosas levemente cementadas de 102-102,5. Guijarros arenosos densos de 102,5-103.	bajo a nulo	Baja.	Mayormente subredondeados.	<10 en guijarros, <4 en gravas	Pobre en guijarros y pobre en gravas	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
103	104	Gravas en matriz arenosa media a fina levemente cementadas y en menor presencia guijarros arenosos densos.	bajo a nulo	Baja.	Subangulosos.	<10	Pobre.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
104	105	Arenas medias a gruesas de compacidad densa cementadas con presencia de gravas intercaladas y en menor presencia guijarros arenosos densos.	bajo a nulo	Baja.	Mayormente subredondeados.	<10	Pobre.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	
105	106	Gravas arenosas sueltas en 105-105,35 y 105,7-106. arena media a fina y limo de compacidad densa cementadas en 105,35-105,7.	bajo a nulo	Media a mala en gravas. Media a buena en arenas y limos.	Mayormente subredondeados.	<5 en gravas. <0,2 en arenas y limos.	Pobre en gravas, y buena en arenas.	40-60%	Andesita afanítica gris (50%), con magnetismo moderado y tobas de color morado en gravas. En arenas se distinguen solamente las andesitas.	
106	107	Arenas medias a gruesas de compacidad densa cementadas con presencia de grava.	bajo a nulo	Baja.	Mayormente subredondeados.	<2	Pobre.	40-60%	Andesita afanítica gris principalmente (60%), con magnetismo moderado. En menor medida tobas de color morado. Andesitas porfídicas.	

**13-A. INFORME DE PERMEABILIDAD REALIZADO POR EL IDIEM PARA LOS TRAMOS 77.5-78 M DEL SONDAJE HUARA.**



**INFORME DE ENSAYO N° 1.041.712-A**  
MECÁNICA DE SUELOS

**PERMEABILIDAD TARAPACÁ**  
OT N° 28-0000159-15-00

<b>SECCIÓN LABORATORIO DE GEOTECNIA</b>		<b>REF.: SLG.PRE.AC 354</b>	<b>EJEMPLAR N°: 1</b>	<b>N° DE PÁGINAS: 4</b>
<b>ELABORADO POR:</b>	<b>REVISADO POR:</b>	<b>APROBADO POR:</b>	<b>CLIENTE: UNIVERSIDAD DE CHILE</b>	
Carolina Smith G.	Juan Pablo Vásquez B.	Iván Bejarano B.	Dirección: Plaza Ercilla # 803, Santiago.	
			<b>DESTINATARIO: William Godoy</b>	
<b>FECHA DE MUESTREO: ---</b>		<b>LUGAR DE MUESTREO: (Realizado por el Cliente)</b>		
<b>FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS :</b> 02/07/2015	<b>FECHA DE INICIO DE LOS TRABAJOS:</b> 18/08/2015	<b>FECHA DE TÉRMINO DE LOS ENSAYOS:</b> 19/08/2015	<b>FECHA DE EMISIÓN : 31 / 08 / 2015</b>	

Nota:  
La reproducción parcial del presente informe debe ser hecha con la autorización de la Sección Ensayos Geomecánicos de IDIEM.  
Los resultados son aplicables sólo a las muestras ensayadas.  
Plaza Ercilla N°883 / Arturo Prat N°1171, Santiago.  
Informe N° **1.041.712-A** PERMEABILIDAD TARAPACÁ  
Página 1 de 4  
SLG –FOR – 153 Versión: 11





## 1. Antecedentes

Informe de ensayos realizados según los siguientes documentos recibidos por la Sección Ensayos Geomecánicos

- Aceptación de presupuesto SLG.PRE.AC 354/15

De acuerdo a esto, se ejecutaron los siguientes ensayos:

- Ensayo Permeabilidad Carga Constante ASTM D5084-03





**2. Identificación de muestras.**

La(s) muestra recibida(s) y ensayada(s) corresponden al detalle indicado en la tabla N°1.

Tabla N°1.- Muestras recibida(s) y ensayada(s)

Identificación de Muestra	Calicata [N°]	Cotas [m]	Tipo	Recibida	Ensayada
ARENISCA	---	---	CD	X	X

La definición del tipo de muestras corresponde a:

- P: muestra perturbada
- NP: muestra no perturbada en bloque inalterado
- SH: muestra tubo Shelby
- CN: muestra cuchara normal
- CD: muestra corona diamantina
- C: colpa

Las muestras son almacenadas por IDIEM hasta 15 días luego de emitido este informe. Posterior a este tiempo serán eliminadas, a menos que exista una solicitud escrita del cliente para su resguardo y la ejecución de ensayos adicionales por un tiempo determinado.

**Carolina Smith G.**  
Ingeniero Revisor  
Sección Ensayos Geomecánicos  
IDIEM



**Iván Bejarano B.**  
Jefe División  
Geotecnia Laboratorios  
IDIEM

CSG/eds

Nota:  
La reproducción parcial del presente informe debe ser hecha con la autorización de la Sección Ensayos Geomecánicos de IDIEM.  
Los resultados son aplicables sólo a las muestras ensayadas.  
Plaza Ercilla N°883 / Arturo Prat N°1171, Santiago.  
Informe N° 1.041.712-A. PERMEABILIDAD TARAPACÁ  
Página 3 de 4  
SLG – FOR – 153 Versión: 11



**INFORME ENSAYO PERMEABILIDAD CARGA CONSTANTE**  
(ASTM D5084 03)

Proyecto	PERMEABILIDAD TARAPACÁ
Inf. Ensayo	N° 1.041.712-A
Orden de Trabajo	28-0000159-15-00
Fecha de Inicio	10/00/2015
Fecha de término	19/00/2015
Muestra	ARENSCA

**DATOS INICIALES**

Dímetro Inicial	[cm]	6,09
Altura Inicial	[cm]	11,60
Volumen Inicial	[cm <sup>3</sup> ]	337,90
Densidad Húmeda	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,63
Humedad Natural	[%]	1,50
Densidad Seca	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,80

**DATOS CORREGIDOS POR CONSOLIDACION**

Contrapresión	[kg/cm <sup>2</sup> ]	3,00
ΔVolumen por Consolidación	[cm <sup>3</sup> ]	0,40
Altura Corregida	[cm]	11,60
Dímetro Corregido	[cm]	6,09
Área Corregida	[cm <sup>2</sup> ]	29,11

**LECTURAS DE ENSAYO**

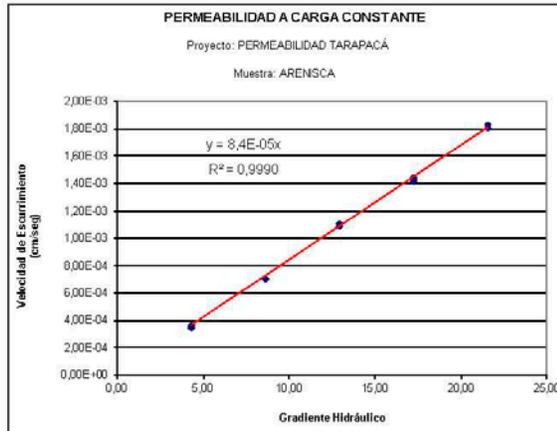
Determinación N°	Tiempo Escurrimiento Promedio [s]	Altura Carga Hidráulica [cm]	Volumen Escurrimiento [cm <sup>3</sup> ]	Velocidad de Escurrimiento [cm/s]	Gradiente Hidráulico	Coef. Permeabilidad K [cm/s]
1	376,00	50,00	4,00	3,66E-04	4,31	8,48E-05
2	373,00	50,00	3,80	3,50E-04	4,31	8,12E-05
3	416,00	50,00	4,20	3,47E-04	4,31	8,04E-05
4	253,00	100,00	5,20	7,06E-04	8,62	8,19E-05
5	195,00	100,00	4,00	7,05E-04	8,62	8,17E-05
6	195,00	100,00	4,00	7,05E-04	8,62	8,17E-05
7	124,00	150,00	4,00	1,11E-03	12,94	8,57E-05
8	124,00	150,00	4,00	1,11E-03	12,94	8,57E-05
9	145,00	150,00	4,60	1,09E-03	12,94	8,43E-05
10	95,00	200,00	4,00	1,45E-03	17,25	8,39E-05
11	96,00	200,00	4,00	1,43E-03	17,25	8,30E-05
12	97,00	200,00	4,00	1,42E-03	17,25	8,21E-05
13	76,00	250,00	4,00	1,81E-03	21,56	8,60E-05
14	76,00	250,00	4,00	1,81E-03	21,56	8,39E-05
15	76,00	250,00	4,00	1,81E-03	21,56	8,39E-05

**Observaciones:**

1. Permeabilidad realizada según método de PARED FLEXIBLE
2. Permeabilidad realizada a presión de confinamiento = 5,00 kg/cm<sup>2</sup>
3. Ensayo efectuado en probeta NATURAL

**Estimación de Permeabilidad (K)**

8,4E-05	cm/seg
---------	--------



Nota:  
La reproducción parcial del presente informe debe ser hecha con la autorización de la Sección Ensayos Geomecánicos de IDIEM.  
Los resultados son aplicables sólo a las muestras ensayadas.  
Plaza Ercilla N°803 / Arturo Prat N°1171, Santiago.

Informe N° 1.041.712-A PERMEABILIDAD TARAPACÁ

Página 4 de 4

SLG - FOR - 153 Versión: 11

A-14. LEYENDA GENERAL DEL MAPA HIDROGEOLÓGICO DE CHILE DE LA DGA (DGA, 1986).

LEYENDA GENERAL

HIDROGEOLOGIA				
1 OCURRENCIA DE AGUAS SUBTERRANEAS				
TIPO DE PERMEABILIDAD	SIMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	PRINCIPALES FORMACIONES INTERESADAS	CARACTERISTICAS GENERALES
PRIMARIA (En formación porosa)		ALTA A MEDIA	Q Or T	DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS, RELLENO. Sedimentos: fluviales, glaciares, aluviales, lacustres y eólicos. Acuíferos de extensión muy variable, generalmente estratificados. Nopos, lías a semiconfinados. Permeabilidad variable, calidad química variable. Son los acuíferos más conocidos en Chile. LAVAS POROSAS, en Isla de Pascua.
		BAJA	T	DEPOSITOS CONSOLIDADOS O ROCAS SEDIMENTARIAS. Arenas, limos, limolitas y arcillas de deposición lacustre o marina. Espuma del lapilli y cenizas en el acuífero confinado del borde Oriental del Salar de Atacama, del Cuerno Occidental químico. Pampa Magallánica, surgente, buena calidad química.
SECUNDARIA (En roca)		MEDIA	T	ROCAS CARBONATADAS. Calizas, areniscas y lutitas calcáreas. Acuíferos semi confinados sin escape de calidad química deficiente. Cuenca Calama.
		ALTA A BAJA	TQ T C	ROCAS VOLCANICAS FRACTURADAS. Óxidos, lías y brechas andeíticas con intercalaciones de sedimentos clásticos confinados y brechas sulfúricas y dacíticas. Se observan características acuíferas a estas rocas en el Altiplano chileno. Calidad química buena.
MUY BAJA A AUSENTE (Roca)		MUY BAJA	Or TQ T C	ROCAS VOLCANICAS. Cobetas y depósitos piroclásticos volcánicos, dacíticos, andesíticos y basálticos, asociados a volcanes antiguos bien conservados o activos. Cordillera de Los Andes.
		MUY BAJA	Q, Q J JKT	AFIRMAMENTOS DE ROCAS MIXTAS. Rocas sedimentario-volcánicas con cubierta discontinua de depósitos no consolidados. Acuíferos inexistentes por falta de recarga. Norte Grande.
		MUY BAJA	T K J M Pz, M	ROCAS MIXTAS SEDIMENTARIO-VOLCANICAS. Cobetas, brechas y gravitas con intercalaciones de lías, arenas y conglomerados. Se observan basamento de los acuíferos. Abrazan zonas cordilleranas.
		NULA	Kg, Ktg JKg, Jtg Mg, Pz	ROCAS PLUTONICAS E HIPABASICALES. Intrusivos graníticos. Basamento impermeable. Cordillera de la Costa, Cordillera de los Andes.
		NULA	Pz	ROCAS METAMORFICAS. Metareniscas, pizarras, filitas, esquistos, gneiss, amphibolitas. Basamento impermeable. Cordillera de la Costa, Cordillera Andina Patagónica.

### 2 PRODUCTIVIDAD DE LOS POZOS (m<sup>3</sup>/h/m)

- > 10 m<sup>3</sup>/h/m Muy elevada
- 4-10 m<sup>3</sup>/h/m Elevada
- 1-4 m<sup>3</sup>/h/m Elevada a media
- 0.13-1 m<sup>3</sup>/h/m Media a baja
- < 0.13 m<sup>3</sup>/h/m Muy baja
- Sin información

### 4 PERFILES HIDROGEOLOGICOS ESQUEMATICOS

Identificación de los estratos aprovechados. Se agrupa características específicas.

Espesor de los estratos aprovechados en m.

### 3 DATOS DE POZOS

Mapa Índice: Cantidad de pozos cosechados por región administrativa de Chile hasta 1975

1 donde:  
 Pozo representativo no surgente  
 Pozo individual no surgente  
 Pozo representativo surgente  
 Pozo individual surgente

1 Unidad acuífero aptada  
 2 Profundidad del Pozo en m  
 3 Profundidad del nivel estático en m  
 4 Productividad en m<sup>3</sup>/h/m  
 5 Cantidad del agua subterránea en mg/l TSD

Pozo en acuífero deficiente no consolidado de reducida distribución areal.

### 5 INFORMACION HIDROGEOLOGICA GENERAL

Límite entre provincias hidrogeológicas (también Mapa Índice)

Límite entre subprovincias hidrogeológicas (también Mapa Índice)

Sentido de escurrimiento de las aguas subterráneas.

Zona de aguas surgentes

Zona de explotación intensiva a crítica

### INFORMACION REFERENCIAL

#### 1 DATOS GEOGRAFICOS

- Límite Internacional
- Capital
- Ciudades
- Elevaciones mayores

#### 3 HIDROLOGIA SUPERFICIAL

Isohielos (mil período: 1951-1960 (Mapa Índice))

Caudal (m<sup>3</sup>/s) y área aportante (Km<sup>2</sup>) en puntos representativos de las principales cuencas del país.

#### 2 DATOS HIDROGRAFICOS

- Límite entre cuencas hidrográficas
- Cursos permanentes
- Cursos permanentes sólidos
- Cursos Intermitentes
- Lagos, Lagunas
- Salares
- Embalses
- Glaciares
- Zonas pantanosas o sajeles a frecuentes inundaciones
- Vertientes calientes y geysers.

#### 4 GEOLOGIA

Líneas de contacto entre formaciones

Fórmulas importantes

- Q Cuaternario no consolidado
- Or Cuaternario volcánico
- T Terciario (Cuaternario, generalmente volcánico, localmente marino)
- T Terciario sedimentario volcánico, localmente marino
- C Cenozoico volcánico
- C Cretácico mioceno sedimentario-volcánico
- K Cretácico plútonico
- Kg Cretácico-Terciario plútonico
- J Jurásico mixto sedimentario-volcánico
- JKg Jurásico-Cretácico plútonico
- Jtg Jurásico-Terciario plútonico
- M Mesozoico mixto Volcánico-Sedimentario
- Mg Mesozoico plútonico
- PzH Paleozoico-Mesozoico mixto sedimentario-volcánico
- Pzg Paleozoico plútonico
- Pz Paleozoico metamórfico