

**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y GENERACIÓN DE
INFORMACIÓN METEOROLÓGICA PARA PREVENCIÓN DE
RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS
CUENCAS SALADO Y COPIAPÓ**

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

MODELACIÓN AMBIENTAL SPA

S.I.T. N° 401

Santiago, Noviembre 2016

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Sr. Carlos Estévez Valencia

Director General de Aguas Región de Atacama
Sr. Rodrigo Alegría Méndez

Jefe de División de Estudios y Planificación
Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspectores Fiscales
Sr. Raúl Cisternas Novoa
Sr. Juan Carlos Salgado González

Profesionales Dirección General de Aguas
Sr. Miguel Caro Hernández
Sr. Alfonso Pinto Castillo
Sr. Sebastián Vicente Pérez

Modelación Ambiental SpA

Jefe de Proyecto
Sr. Alberto de la Fuente Stranger

Coordinadora de Proyecto
Sra. Carolina Meruane Naranjo

Profesionales
Sr. Luis Acevedo López
Sr. Juan Arias Arias
Sr. Pedro Montero Munita
Sr. David Pineda Osorio
Sr. Edison Riquelme Reyes

RESUMEN

La región de Atacama se caracteriza por un clima semiárido caracterizado por escasas precipitaciones líquidas de carácter estacional concentradas en la época invernal, alta amplitud térmica, baja humedad atmosférica y altura de la isoterma 0°C elevada, condiciones que determinan la presencia de desiertos. Pese a estas condiciones, el aumento de las precipitaciones y la presencia de nieve en las altas cumbres permiten el desarrollo de importantes cursos de agua. En efecto, en marzo de 2015 estas cuencas se vieron gravemente afectadas por un evento hidrometeorológico extremo. Después de un intenso período de sequía, en el norte de Chile se desencadenaron intensas precipitaciones las que comenzaron el 24 de marzo de 2015. Estas lluvias se debieron a un **sistema de baja presión denominado "cut of low", el que habitualmente se presenta en esta región durante el invierno (Fuenzalida et al., 2005), pero que ahora fue inusualmente fuerte.** El elevado caudal que pasó por las quebradas y ríos erosionó el lecho, generándose un transporte de material sólido, con flujos de aluviones que arrasaron con los centros poblados, los que no alcanzaron a reaccionar por falta de información oportuna. Se hace necesario entonces, desarrollar un sistema de alerta temprana que permitan alertar a los centros poblados de estas localidades del desarrollo de un posible evento aluvional. Para esto, se requiere tener una red de monitoreo hidrometeorológico, junto con un sistema de alerta temprana que permita pronosticar el peligro asociado a los eventos hidrometeorológicos. Para la correcta implementación del sistema de alerta se requiere, además de un modelo conceptual adecuado, una completa caracterización de suelos (infiltración, textura, etc.) y de la distribución espacial de los principales parámetros hidrometeorológicos (temperatura, precipitación, etc.).

Este estudio corresponde a la primera etapa en la implementación de un sistema de alerta temprana en la región de Atacama, cuyo objetivo principal es levantar información base para la implementación de un plan de alerta temprana de eventos hidrometeorológicos extremos en las subcuencas de río Salado Alto y Quebrada Paipote, ubicadas en las cuencas de los ríos Salado y Copiapó, respectivamente. Para esto, se diseñó un sistema de alerta temprana, el cual se fundamenta sobre dos premisas fundamentales. Por una parte, la alerta debe ocurrir antes de que suceda el desastre, y por otra, la evaluación de la magnitud del desastre se debe efectuar en un tiempo razonable. Sobre la base de esta propuesta, se diseñó e implementó una red con 4 estaciones hidrometeorológicas telemétricas enviando datos de temperatura, precipitación, infiltración y evaporación en tiempo real vía GPRS. También, se levantó información de suelos en 50 puntos distribuidos en ambas subcuencas, relacionada con la granulometría, textura y conductividad hidráulica de los lechos de los cursos de agua principales. Finalmente, se desarrolló un análisis morfométrico de las subcuencas de Quebrada Paipote y Salado Alto, para implementar en el futuro los modelos hidrológicos e hidráulicos necesarios para construir el sistema de alerta temprana. Toda la información generada en este estudio se entrega sistematizada en un Geodatabase (GDB) sobre un Sistema de Información Geográfico (SIG), información que permitirá en una próxima etapa implementar el sistema de alerta temprana propuesto en este estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	II
1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	8
1.2 OBJETIVOS.....	11
1.2.1 Objetivo general	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
1.3 LISTADO DE ACTIVIDADES.....	11
DISEÑO DEL PLAN DE ALERTA TEMPRANA.....	12
2 DISEÑO DEL PLAN DE ALERTA TEMPRANA	13
2.1 MARCO TEÓRICO	13
2.1 PROPUESTA DE PLAN DE ALERTA TEMPRANA	14
2.1.1 Generación de base de datos de eventos extremos probables.....	15
2.1.1 Seguimiento en tiempo real y alerta temprana.....	19
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA	23
3 DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA.....	24
3.1 PARÁMETROS A MONITOREAR	24
3.2 UBICACIÓN	24
3.3 COMPONENTES DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS	29
3.4 SISTEMA DE ENERGIZACIÓN.....	31
3.1 CHIP ENTEL TRANSMISIÓN DE DATOS.....	32
3.1 MONTAJE DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS	32
3.1 CONFIGURACIÓN FINAL DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS.....	34
3.2 HERRAMIENTAS RECOMENDADAS PARA EL TRABAJO EN TERRENO.....	36
3.3 ENVÍO DE INFORMACIÓN A BNA	36
LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE SUELOS	43
4 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE SUELOS.....	44
4.1 CALICATAS Y GRANULOMETRÍA	47
4.1.1 Lista de materiales.....	47
4.1.2 Procedimiento	48
4.1.1 Resultados Quebrada Paipote	50
4.1.2 Resultados Salado Alto	64
4.1 ENSAYOS DE INFILTRACIÓN.....	78
4.1.1 Resultados Quebrada de Paipote.....	79
4.1.1 Resultados Salado Alto	80
ANÁLISIS MORFOLÓGICO	82
5 ANÁLISIS MORFOLÓGICO	83
5.1 OBJETIVOS.....	83
5.2 FUENTES DE INFORMACIÓN	83
5.3 METODOLOGÍA	83
5.3.1 Análisis SIG.....	83
5.3.2 Parámetros de relieve.....	84
5.3.3 Parámetros de forma.....	85
5.3.4 Parámetros relativos a la red hidrográfica.....	85
5.1 RESULTADOS.....	86
5.1.1 Uso y tipo de suelo.....	86
5.1.1 Revisión de curvas de nivel	86
5.1.2 Revisión de red de drenaje.....	86
5.1.3 Delimitación de cuencas.....	86

5.1.1	Interpolación de cuencas	89
5.1.2	Unión del drenaje principal.....	89
5.1.1	Extracción del drenaje solo contenido en la cuenca.....	91
5.1.1	Ubicación del punto de descarga de la cuenca.....	91
5.1.1	Pendientes	93
5.1.1	Stream Order	93
5.1.2	Parámetros morfométricos	96
6	REFERENCIAS	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mapa mostrando las subcuencas del río Salado Alto y Quebrada Paipote, ubicadas en las cuencas de los ríos Salado y Copiapó, respectivamente.	9
Figura 2.2 Imágenes de la catástrofe ocurrida durante los días 24, 25 y 26 de marzo del 2015 en las localidades de la región de Atacama (Fuente: Diarios nacionales).	10
Figura 2.1 Esquema de generación de la base de datos de eventos extremos probables.	14
Figura 2.2 Esquema de funcionamiento del sistema de alerta temprana.	15
Figura 2.3 Esquema detallado de generación de la base de datos de eventos extremos probables.	16
Figura 2.4 Esquema detallado del funcionamiento del sistema de alerta temprana.	19
Figura 2.5 Precipitación acumulada entre el 19 y 31 de marzo de 2015 medida por los satélites.	21
Figura 2.6 Comparación entre la precipitación estimada por los sensores y la precipitación medida en las estaciones de la DGA.	22
Figura 3.1 Mapa mostrando la subcuenca Quebrada Paipote, los puntos con antena de telefonía móvil y las estaciones meteorológicas de la DGA cercanas al área de estudio.	24
Figura 3.2 Mapa mostrando la subcuenca Salado Alto, los puntos con antena de telefonía móvil y las estaciones meteorológicas de la DGA cercanas al área de estudio.	25
Figura 3.3 Ubicación de estaciones MET-QP1 y MET-QP2 en quebradas Paipote.	26
Figura 3.4 Ubicación de estaciones MET-RS1 y MET-RS2 en río Salado.	27
Figura 3.5 Vista de las estaciones hidrometeorológicas instaladas en Quebradas Paipote (MET-QP1 y MET-QP2) y Río Salado (MET-RS1 y MET-RS2).	28
Figura 3.6 Esquema de energización de datalogger Em50G.	31
Figura 3.7 Identificación de tornillos cruz a remover para recambio de chip Entel para transmisión de datos.	32
Figura 3.8 Vista del montaje final de la estación hidrometeorológica.	33
Figura 3.9 Vista del lisímetro antes de ser completamente cubierto por tierra.	34
Figura 3.10 Vista del software ECH2O Utility, con puntos identificados en texto.	35
Figura 4.1 Ubicación de puntos de monitoreo en Quebrada Paipote.	44
Figura 4.2 Ubicación de puntos de monitoreo en Salado Alto.	46
Figura 4.3 Vista de los tamices finos y gruesos.	48
Figura 4.4 Vista del equipo trabajando en el levantamiento de las calicatas.	50
Figura 4.5 Curva granulométrica MET-QP1.	51
Figura 4.6 Curva granulométrica MET-QP2.	51
Figura 4.7 Curva granulométrica QP1.	52
Figura 4.8 Curva granulométrica QP2.	52
Figura 4.9 Curva granulométrica QP3.	53
Figura 4.10 Curva granulométrica QP4.	53
Figura 4.11 Curva granulométrica QP5.	54
Figura 4.12 Curva granulométrica QP6.	54
Figura 4.13 Curva granulométrica QP7.	55
Figura 4.14 Curva granulométrica QP8.	55
Figura 4.15 Curva granulométrica Q9.	56
Figura 4.16 Curva granulométrica Q10.	56
Figura 4.17 Curva granulométrica Q11.	57
Figura 4.18 Curva granulométrica Q12.	57
Figura 4.19 Curva granulométrica Q13.	58
Figura 4.20 Curva granulométrica Q14.	58
Figura 4.21 Curva granulométrica Q15.	59
Figura 4.22 Curva granulométrica Q16.	59
Figura 4.23 Curva granulométrica Q17.	60

Figura 4.24 Curva granulométrica Q18.	60
Figura 4.25 Curva granulométrica Q19.	61
Figura 4.26 Curva granulométrica Q20.	61
Figura 4.27 Curva granulométrica Q21.	62
Figura 4.28 Curva granulométrica Q22.	62
Figura 4.29 Curva granulométrica Q23.	63
Figura 4.30 Curva granulométrica MET-RS1.	65
Figura 4.31 Curva granulométrica MET-RS2.	65
Figura 4.32 Curva granulométrica RS0.	66
Figura 4.33 Curva granulométrica RS1.	66
Figura 4.34 Curva granulométrica RS2.	67
Figura 4.35 Curva granulométrica RS3.	67
Figura 4.36 Curva granulométrica RS4.	68
Figura 4.37 Curva granulométrica RS5.	68
Figura 4.38 Curva granulométrica RS6.	69
Figura 4.39 Curva granulométrica RS7.	69
Figura 4.40 Curva granulométrica RS8.	70
Figura 4.41 Curva granulométrica RS9.	70
Figura 4.42 Curva granulométrica RS10.	71
Figura 4.43 Curva granulométrica RS11.	71
Figura 4.44 Curva granulométrica RS12.	72
Figura 4.45 Curva granulométrica RS13.	72
Figura 4.46 Curva granulométrica RS14.	73
Figura 4.47 Curva granulométrica RS15.	73
Figura 4.48 Curva granulométrica RS16.	74
Figura 4.49 Curva granulométrica RS17.	74
Figura 4.50 Curva granulométrica RS18.	75
Figura 4.51 Curva granulométrica RS19.	75
Figura 4.52 Curva granulométrica RS20.	76
Figura 4.53 Curva granulométrica RS21.	76
Figura 4.54 Curva granulométrica RS22.	77
Figura 4.55 Infiltrómetro de minidisco Decagon Devices Inc.	78
Figura 5.1 Diagrama mostrando los pasos metodológicos del análisis.	84
Figura 5.2 Uso y tipo de suelo en el área de estudio.	87
Figura 5.3 Delimitación de las cuencas.	88
Figura 5.4 Ejemplo de interpolación de cuencas.	89
Figura 5.5 Drenaje principal.	90
Figura 5.6 Drenaje de la cuencas y ubicación del punto de descarga.	92
Figura 5.7 Clasificación de la red de drenaje de de Horton-Strahler, 1957.	93
Figura 5.8 Mapa de pendientes.	94
Figura 5.9 Strem order.	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Coordenadas de estaciones hidrometeorológicas. Uso WGS84-19S.	26
Tabla 3.2 Listado de sensores estación hidrometeorológica.	29
Tabla 3.3: ID de estaciones y sus respectivas claves para acceder a servicio web de Decagon para visualizar información en tiempo real.	36
Tabla 3.4: Código para ejecutar periódicamente rutina read.py.	37
Tabla 3.5: Código rutina read.py para rescatar información de servidores Decagon y transmitirla a servidores DGA.	37
Tabla 4.1 Coordenadas UTM de puntos de levantamiento de información de suelos en Quebrada Paipote.	45
Tabla 4.2 Coordenadas UTM de puntos de levantamiento de información de suelos en Salado Alto.	46
Tabla 4.3 Diámetros característicos en puntos de Quebrada Paipote. En algunos casos no fue posible obtener el diámetro particular desde la curva granulométrica obtenida, por lo que el casillero vacío.	63
Tabla 4.4 Diámetros característicos en puntos de Salado Alto. En algunos casos no fue posible obtener el diámetro particular desde la curva granulométrica obtenida, por lo que el casillero vacío.	77
Tabla 4.5 Textura y conductividad hidráulica en los puntos de monitoreo de Quebrada Paipote.	79
Tabla 4.6 Textura y conductividad hidráulica en los puntos de monitoreo de Salado Alto	80
Tabla 5.1 Coordenadas de los puntos de salida de cada subcuenca.	91
Tabla 5.2 Parámetros para cuenca Quebrada Paipote.	96
Tabla 5.3 Parámetros para cuenca río Salado Alto.	97

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento presenta los resultados asociados al estudio titulado "Caracterización de suelos y generación de información meteorológica para prevención de riesgos hidrometeorológicos cuencas Salado y Copiapó", **el cual fue solicitado por parte de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile, a la empresa Modelación Ambiental SpA.** El objetivo principal que persigue este estudio es el de levantar información base para la implementación de un plan de alerta temprana de eventos hidrometeorológicos extremos en las subcuencas del río Salado Alto y Quebrada Paipote, ubicadas en las cuencas de los ríos Salado y Copiapó, respectivamente.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El área de estudio corresponde a las cuencas de los ríos Salado y Copiapó, ubicadas en la región de Atacama (ver Figura 2.1).

La región de Atacama se caracteriza por un clima semiárido caracterizado por escasas precipitaciones líquidas de carácter estacional concentradas en la época invernal, alta amplitud térmica, baja humedad atmosférica, altura de la isoterma 0°C elevada, condiciones que determinan la presencia de desiertos. Pese a estas condiciones, el aumento de las precipitaciones y la presencia de nieve en las altas cumbres permiten el desarrollo de importantes cursos de agua. En efecto, en marzo de 2015 estas cuencas se vieron gravemente afectadas por un evento hidrometeorológico extremo. Después de un intenso período de sequía, en el norte de Chile se desencadenaron intensas precipitaciones las que comenzaron el 24 de marzo de 2015. Estas lluvias se debieron a un sistema de baja presión denominado "cut of low", **el que habitualmente se presenta en esta región durante el invierno (Fuenzalida et al., 2005), pero que ahora fue inusualmente fuerte.**

El elevado caudal que pasó por las quebradas y ríos erosionó el lecho, generándose un transporte de material sólido, con flujos de aluviones que arrasaron con los centros poblados localizados aguas abajo de los cursos generadores (Figura 2.2).

Lamentablemente, la cuenca del río Salado – poco estudiada debido al carácter intermitente de sus cursos de agua – cuenta con escasa información hidrometeorológica. Sin embargo, su respuesta ante eventos de tormenta es un tema de interés, ya que existen importantes asentamientos humanos en las zonas de inundación del cauce principal. Se hace necesario, entonces, contar con un monitoreo efectivo de los parámetros hidrometeorológicos que sirva de input para un eventual sistema de alerta temprana.

La cuenca del río Copiapó, por su parte, ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones que han permitido avanzar en el conocimiento de la oferta y la demanda del sistema, poniendo en evidencia un escenario de déficit hídrico que se mantiene en el tiempo. Sin embargo, aún existen importantes brechas que deben ser cubiertas para mejorar el manejo de sus recursos hídricos, principalmente en lo referido a su respuesta ante eventos hidrológicos extremos, ya que, al igual que en la cuenca del río Salado, existen importantes asentamientos humanos en las zonas de inundación del cauce principal y en zonas de desagüe de conos aluviales y quebradas intermitentes.

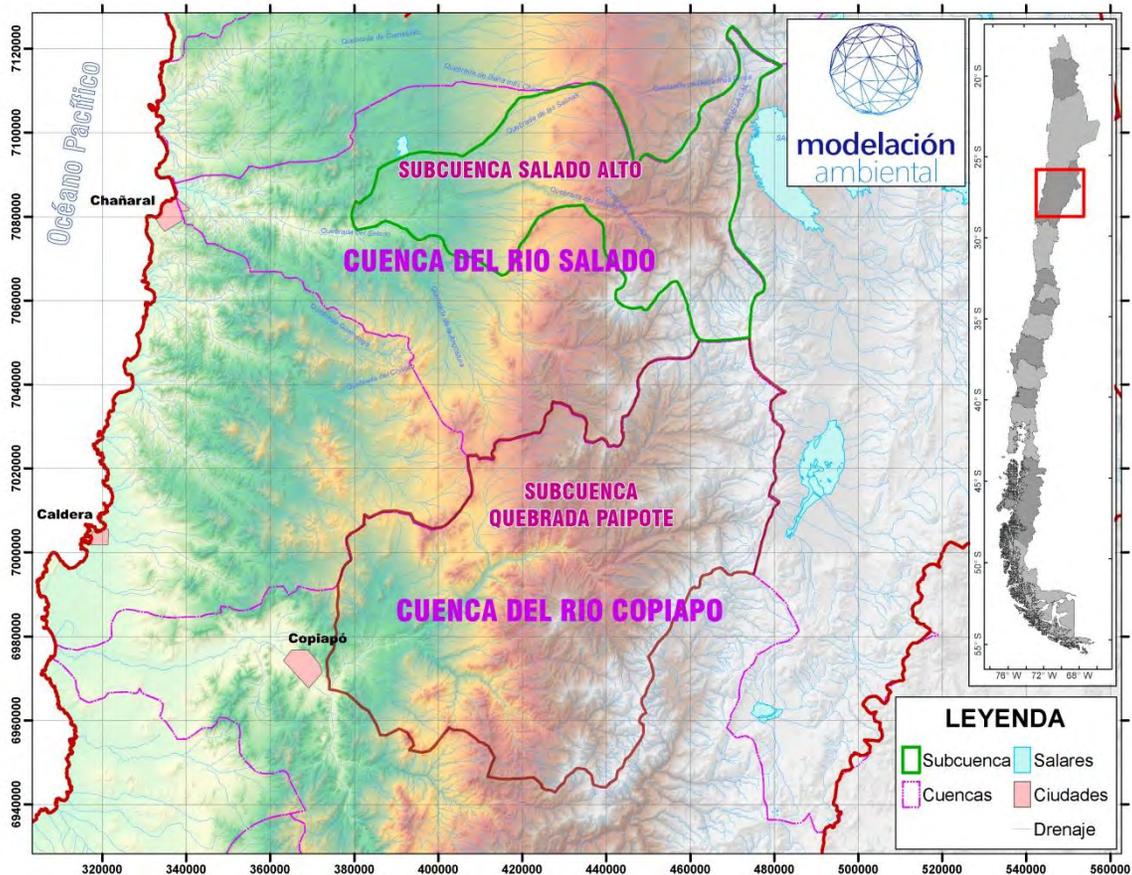


Figura 2.1 Mapa mostrando las subcuencas del río Salado Alto y Quebrada Paipote, ubicadas en las cuencas de los ríos Salado y Copiapó, respectivamente.

Se hace necesario entonces, desarrollar sistemas de alerta temprana que permitan alertar a los centros poblados de estas localidades del desarrollo de un posible evento aluvional. Para esto, se requiere tener una red de monitoreo hidrometeorológico continuo y ojalá que idealmente envíe datos en tiempo real. Junto a esto, la modelación hidrológica de estos sistemas es indispensable para el desarrollo de un plan de alerta temprana. Para la correcta implementación del modelo se requiere, además de un modelo conceptual adecuado, una completa caracterización de suelos (infiltración, textura, etc.) y de la distribución espacial de los principales parámetros hidrometeorológicos (temperatura, precipitación, etc.). Es así, como en este estudio se busca caracterizar los suelos de las subcuencas Salado Alto (río Salado) y Quebrada Paipote (río Copiapó), como también implementar una red de monitoreo hidrometeorológico, constituyéndose en la primera etapa en la implementación de un plan de alerta temprana.



Figura 2.2 Imágenes de la catástrofe ocurrida durante los días 24, 25 y 26 de marzo del 2015 en las localidades de la región de Atacama (Fuente: Diarios nacionales).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Levantar información base para la implementación de un plan de alerta temprana en las subcuencas del río Salado Alto y Quebrada Paipote, ubicadas en las cuencas de los ríos Salado y Copiapó, respectivamente.

1.2.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general del estudio, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Proponer un sistema de alerta temprana en las principales quebradas afectadas.
- ✓ Mejorar la información base para su correcta implementación (hidrometeorología y suelos).

1.3 LISTADO DE ACTIVIDADES

Para lograr los objetivos específicos, se hizo fundamental desarrollar las siguientes actividades:

- ✓ **Actividad 1:** Proponer un sistema de alerta temprana compuesto por una red de estaciones hidrometeorológicas enviando datos en tiempo real, y un modelo hidrológico y de flujos de detritos que permitan alertar de la ocurrencia de inundaciones y aluviones.
- ✓ **Actividad 2:** Diseñar e implementar estaciones hidrometeorológicas telémétricas en las subcuencas de Salado Alto y Quebrada Paipote.
- ✓ **Actividad 3:** Levantar y caracterizar información de suelos en las subcuencas de Salado Alto y Quebrada Paipote.
- ✓ **Actividad 4:** Generar y definir parámetros morfométricos e información geomorfológica en las subcuencas de Salado Alto y Quebrada Paipote, para la generación de un modelo precipitación-escorrentía.
- ✓ **Actividad 5:** Sistematizar la información e implementar un Geodatabase (GDB) sobre un Sistema de Información Geográfico (SIG).



DISEÑO DEL PLAN DE ALERTA TEMPRANA

2 DISEÑO DEL PLAN DE ALERTA TEMPRANA

2.1 MARCO TEÓRICO

Dado el impacto destructivo que tienen los eventos hidrometeorológicos extremos como aluviones e inundaciones, en las últimas décadas se ha puesto mayor énfasis en el estudio de su dinámica, punto de partida para el desarrollo de cualquier herramienta de manejo y prevención, dado que al tener la capacidad de predecir la trayectoria del flujo, su velocidad y la distancia de alcance, entonces es posible determinar zonas de alto riesgo o alta vulnerabilidad para el asentamiento de las personas (Forterre and Pouliquen, 2008).

La dinámica de estos flujos geofísicos involucra aspectos de mecánica de fluidos, teoría de plasticidad, mecánica de suelos y reología (Wang and Hutter, 2001), es así como su estudio se ha abordado combinando estudios experimentales, teóricos, observaciones en terreno y simulación numérica (Ancey, 2007). Si bien bajo ciertas configuraciones particulares, la dinámica de los flujos aluvionales ha tenido grandes progresos, no existe aún un equivalente a las ecuaciones de Navier-Stokes que permita modelar el movimiento de estos flujos (Meruane et al., 2010). La mayor dificultad en describir estos flujos geofísicos radica en la incertidumbre que existe sobre las ecuaciones constitutivas (Ancey et al., 1999). Pese a ello, habitualmente se utiliza la aproximación de Saint-Venant (1871) para modelar estos flujos geofísicos, en donde se supone que el medio es incompresible y las ecuaciones de conservación de masa y momentum se escriben en forma promediada sobre la profundidad del flujo. Este análisis sólo es válido bajo la hipótesis de que la mezcla es homogénea y que la capa que fluye es muy delgada comparada a su extensión horizontal, de modo que las velocidades verticales son despreciables. La ventaja de esta aproximación, es que al hacer un promedio sobre la profundidad, la reología del material granular se incorpora en un solo término que describe el esfuerzo friccional entre la interfaz del material que fluye y la superficie rugosa del fondo (Forterre and Pouliquen, 2008).

Las ecuaciones de Saint-Venant fueron introducidas en el contexto de flujos geofísicos por Savage and Hutter (1989, 1991). En su modelo, la interacción entre el material granular y la superficie áspera es descrita por una ley de fricción tipo Mohr-Coulomb. Se ha mostrado en estudios de laboratorio sobre mezclas homogéneas de partículas, que este modelo da buenos resultados cuando la superficie de fondo es bastante lisa y la pendiente es elevada (>40) (Denlinger and Iverson, 2001; Iverson and Denlinger, 2001; Hutter et al., 2005). También, se han realizado experimentos con buenos resultados en trayectorias curvas, permitiendo así hacer analogías a flujos sobre topografía compleja (Pudasaini et al., 2005a,b).

En conclusión, una buena aproximación para la modelación de flujos de aluviones son las ecuaciones de Saint-Venant, en donde la reología de la mezcla de agua y partículas sólidas se incorpora en un solo término que describe el esfuerzo friccional entre la interfaz del material que fluye y la superficie rugosa del fondo. Para esto, es preciso caracterizar rugosidad y granulometría del material que componen los lechos fluviales.

2.1 PROPUESTA DE PLAN DE ALERTA TEMPRANA

Para que un sistema de alerta temprana sea realmente efectivo, se deben cumplir dos condiciones básicas. Por una parte la alerta debe ocurrir antes de que suceda el desastre y por otra, la evaluación de la magnitud del desastre se debe efectuar en un tiempo razonable.

Considerando estas restricciones, nuestra propuesta para el plan de alerta de aluviones e inundaciones se basa en una primera instancia en los resultados del pronóstico meteorológico global, el que luego se sigue en tiempo real a través de las observaciones hidrometeorológicas. Estos datos en tiempo real pueden utilizarse de varias formas para evaluar los riesgos y emitir las alertas. Sin embargo, correr un modelo numérico en tiempo real para evaluar el posible desastre, podría tomar más del tiempo razonable para generar una alerta. Es así como parece sensato pensar en un sistema que contenga una base de datos con los resultados de velocidad, alcance del flujo y áreas de inundación, para eventos ocurridos en el pasado, los que llamamos eventos extremos probables (EEP). Así, el pronóstico de intensidad de precipitación se asocia a un EEP particular contenido en la base de datos, cuyos impactos fueron previamente modelados, de modo que una vez identificada una intensidad de precipitación, se obtiene de forma casi instantánea la magnitud del impacto asociado al posible desastre que podría generar la tormenta.

En la Figura 3.1 y Figura 3.2 se presentan los esquemas asociados a la generación de la base de datos de eventos extremos probables y del funcionamiento del sistema de alerta temprana, respectivamente. En las siguientes secciones se explican en detalle estos dos procesos.



Figura 2.1 Esquema de generación de la base de datos de eventos extremos probables.



Figura 2.2 Esquema de funcionamiento del sistema de alerta temprana.

2.1.1 Generación de base de datos de eventos extremos probables

La base de datos de eventos extremos probables (EEP) se genera mediante la modelación de episodios extremos pasados. Para esto, proponemos utilizar los datos de las estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA), del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), datos que se deberían combinar los datos de los reanálisis atmosféricos NCEP-NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>), para caracterizar las variables meteorológicas relevantes para el análisis hidrometeorológico histórico.

Esta propuesta de generar una bases de datos con los eventos extremos probables (EEP) es nueva para el caso de inundaciones; sin embargo, los sistema de alerta temprana de stunamis se utiliza una metodología similar, en donde a partir de los registros históricos de sismos y el análisis sectorial de las áreas afectadas por los stunamis, se genera una base de datos que permite una evaluación del peligro asociado a tsunamis ante la ocurrencia de un sismo real de manera rápida, precisa y de forma sectorizada. Recientemente el SHOA implementó un sistema de este tipo, denominado Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunamis (SIPAT).

Entonces, con la información hidrometeorológica histórica, se identifican eventos extremos que han ocurrido en el pasado, los que se modelan para obtener una base de datos de eventos extremos probables como se explica a continuación.

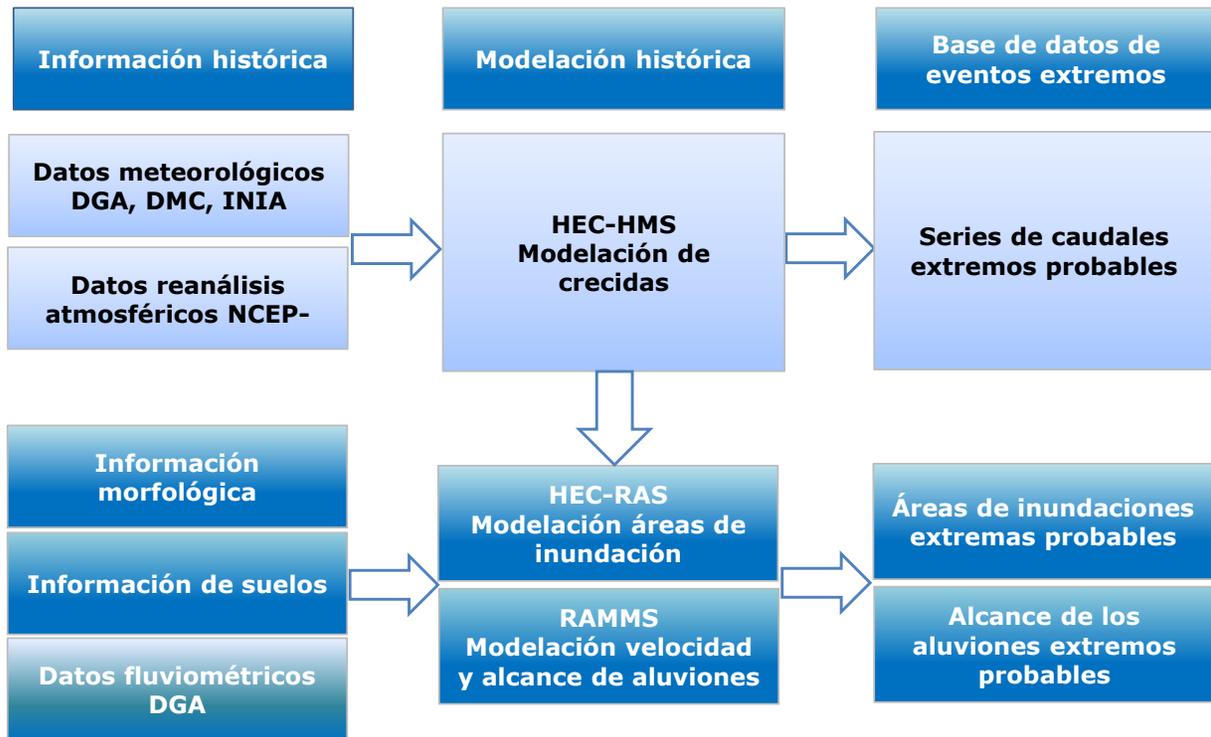


Figura 2.3 Esquema detallado de generación de la base de datos de eventos extremos probables.

2.1.1.1 Modelo precipitación-escorrentía

La serie de intensidad de precipitación asociada a cada evento extremo probable, se utiliza para estimar la escorrentía a través de un modelo de precipitación-escorrentía. Para esto, proponemos utilizar el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centers - Hydrologic Modeling System, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>), desarrollado a partir de 1992 por el US Army Corps of Engineers. HEC-HMS es un modelo 2D diseñado para modelar los procesos hidrológicos a nivel de cuenca, y tiene la ventaja de ser un software libre en continuo desarrollo, y compatible con HEC-RAS. De hecho, los hidrogramas producidos por el programa se utilizan directamente con HEC-RAS para el estudio de inundaciones. Este software se utiliza de forma rutinaria para el estudio de inundaciones de la Agencia de Manejo de Emergencias Federal de EEUU.

Recientemente, la DOH presentó un análisis de los eventos del pasado marzo, en donde implementa el modelo HEC-HMS en el río Salado, mostrando que los resultados son bastante aceptables cuando se comparan con otras metodologías para estimar el caudal asociado a esa tormenta (Estellé et al., 2015).

2.1.1.2 Modelo de inundaciones

La modelación hidrodinámica del área inundable se debería llevar a cabo con el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers - River Analysis System, U.S. Army Corps of Engineers, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>). HEC-RAS es una herramienta de cálculo de ejes hidráulicos en cauces naturales en base a la metodología de escurrimiento gradualmente variado (unidimensional) y a los factores de conducción

hidráulica (Brunner, 2010; Warner et al., 2010). Esta herramienta tiene una amplia utilización tanto a nivel internacional como a nivel nacional para problemas de cálculo de ejes hidráulicos en cauces naturales. En particular, este software es aceptado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), siendo mencionado en el Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del MOP como herramienta para el cálculo hidráulico fluvial. Esto, sumado a que es un software de libre acceso, ha hecho que sea ampliamente utilizado en Chile. Para el cálculo del eje hidráulico HEC-RAS requiere de la siguiente información:

1. **Morfología del cauce:** el cauce debe caracterizarse a través de perfiles transversales, descritos como distancias y elevaciones.
2. **Resistencia al escurrimiento:** se ingresa parámetros de rugosidad del cauce, como números de Manning.
3. **Caudales:** pueden establecerse escenarios de modelación en régimen permanente, con diferentes valores de caudales, o bien ingresarse series de tiempo para modelación en régimen impermanente.
4. **Tipo de modelación:** se puede especificar el cálculo en régimen subcrítico, supercrítico o mixto (el software calcula tanto escurrimientos subcríticos como supercríticos, y entrega el resultado de acuerdo a las condiciones de simulación).
5. **Condiciones de borde:** se pueden imponer alturas críticas, normales, series de tiempo de niveles de agua o curvas de descargas. Los perfiles en los que se deben imponer las condiciones de borde dependen del tipo de modelación que se realice (asumiendo régimen subcrítico, supercrítico o mixto). En caso de que existan otros controles hidráulicos más relevantes dentro del modelo construido, el resultado de la modelación podría cambiar las condiciones de borde impuestas inicialmente.
6. **Condiciones iniciales:** aplican en caso de modelación en régimen impermanente, debiendo definirse alturas de escurrimiento para iniciar en forma estable el cálculo.

Dentro de la información requerida por HEC-RAS, un parámetro fundamental para el cálculo del eje hidráulico es la resistencia al escurrimiento, dada por la rugosidad del cauce, la que se representa a través del coeficiente de Manning, n , el cual se obtiene de la ecuación de Strickler, dada por:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6} S_t}{\sqrt{g}}$$

donde S_t es el número de Strickler, d_{90} es el diámetro 90 y g es la gravedad. De esta manera, se deben levantar calicatas a lo largo del cauce del río, para caracterizar la granulometría y obtener el d_{90} .

2.1.1.3 Modelo de aluviones

La modelación con HEC-RAS se considera como una primera aproximación, dado que como se explicó en la sección de marco teórico, los flujos de detritos tienen un mayor volumen por el material transportado, además de tener una reología distinta producto de la mezcla de agua con partículas sólidas. Es por esto, que una mejor estimación del nivel de inundación y el área de influencia, se obtiene de la implementación de modelos desarrollados específicamente para modelar aluviones.

En este sentido, nuestra propuesta es utilizar el modelo de última generación RAMMS (Rapid Mass Movement System, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape

Research WSL, <http://ramms.slf.ch/ramms/>). RAMMS es un modelo 2D desarrollado para modelar avalanchas, flujos de detritos y caídas de rocas en terrenos complejos. Este modelo permite predecir la velocidad, trayectoria, alcance y área de influencia del flujo, de modo que permite evaluar el área de influencia y la magnitud del impacto para diferentes escenarios de modelación.

El modelo RAMMS resuelve las ecuaciones de Saint-Venant, en donde la reología de la mezcla de agua y partículas sólidas se incorpora en un solo término que describe el esfuerzo friccional entre la interfaz del material que fluye y la superficie rugosa del fondo. El modelo que utiliza para esta representación se denomina Voellmy-fluid model:

$$S = \mu \rho H g \cos \phi + \frac{\rho g U^2}{\epsilon}$$

donde ρ es la densidad de flujo, g aceleración de la gravedad, ϕ el ángulo de inclinación, H la altura del flujo y U la velocidad del flujo. Este modelo divide la resistencia a la fricción en dos partes: un tipo de fricción tipo Coulomb (coeficiente μ) que escala con la presión y el ángulo de fricción interna de las partículas sólidas, y una fuerza de arrastre entre fluido y partículas (coeficiente ϵ). Los coeficientes μ y ϵ se calibran con eventos históricos.

Como condición de borde para correr el modelo, se utiliza un hidrograma de la crecida. Nuestra propuesta es utilizar el hidrograma generado con HEC-HMS, en donde el caudal se corrige para considerar el mayor volumen transportado producto de la mezcla fluido-partículas, de acuerdo a la siguiente expresión (Armanini et al., 2010):

$$Q_a = Q \frac{1}{1 - C_v}$$

donde Q es el caudal de agua y C_v es la concentración volumétrica de sólidos en la mezcla, cuyo valor debe ser calibrado con eventos históricos. Una alternativa para calibrar el valor de la concentración de sólidos, es desarrollar un análisis del transporte de sedimentos para las situaciones hidráulicas e hidrológicas determinadas para cada tormenta, a objeto de definir las tasas de arrastre de sedimentos.

Si bien RAMMS es un software comercial, el esquema de generación de una base de datos de simulaciones de eventos extremos probables, permite comprar la licencia del software por un período acotado, por ejemplo 6 meses.

2.1.1 Seguimiento en tiempo real y alerta temprana

Un esquema detallado del funcionamiento del sistema de seguimiento en tiempo real se presenta en la Figura 2.4. Como se esquematiza, el sistema de alerta temprana se basa en la utilización del pronóstico meteorológico global GFS en tiempo real, en combinación con la medición de intensidad de precipitación que se obtiene de los sensores remotos de precipitación TRMM-TMPA. Así, el pronóstico de intensidad de precipitación se asocia a un EEP particular contenido en la base de datos, cuyos impactos fueron previamente modelados, de modo que una vez identificada una intensidad de precipitación, se obtiene de forma casi instantánea la magnitud del impacto asociado al posible desastre que podría generar la tormenta. En este contexto, los datos de las estaciones hidrometeorológicas locales se utilizan para verificar y seguir la tormenta, más que para generar la alerta temprana.

Actualmente existen experiencias internacionales que emplean metodologías similares a la propuesta. Un ejemplo es el sistema denominado Global Flood Monitoring System (GFMS, <http://flood.umd.edu/>), desarrollado en la Universidad de Maryland y financiado por la NASA. Este sistema utiliza la información en tiempo real de los sensores TRMM-TMPA de precipitación, información que entra en un modelo hidrológico cuasi-global (50°N - 50°S). Las estimaciones y detección de las inundaciones se basan en 13 años de modelación histórica.

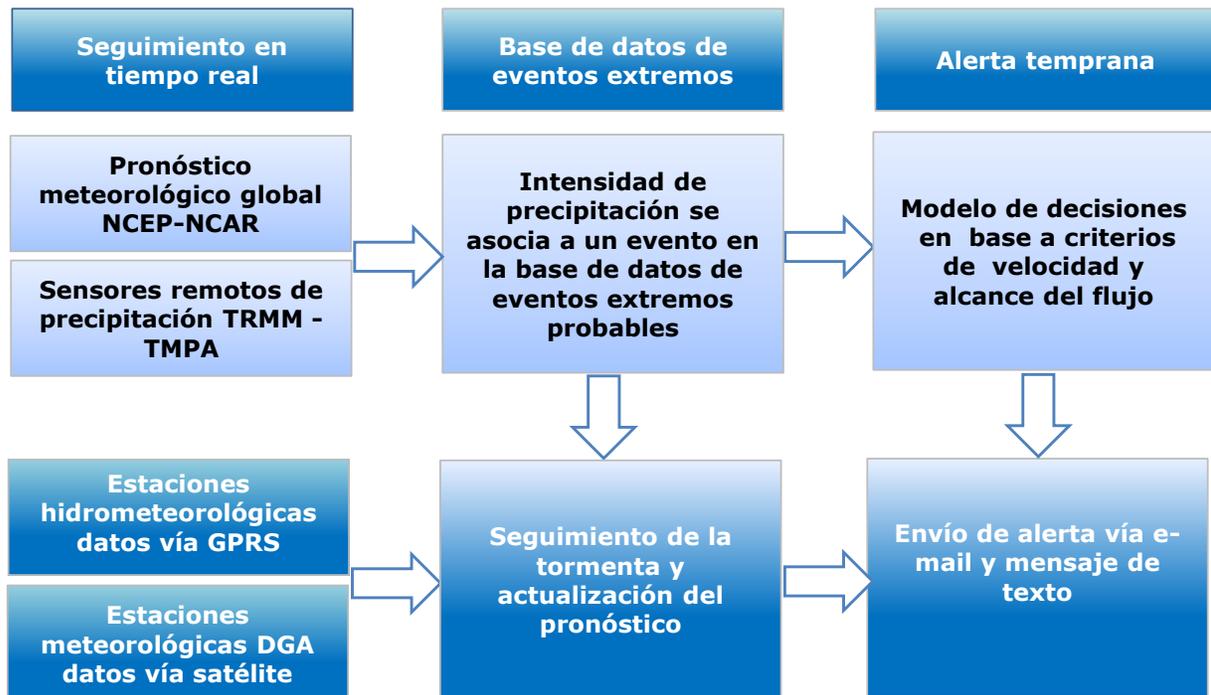


Figura 2.4 Esquema detallado del funcionamiento del sistema de alerta temprana.

2.1.1.1 *Pronóstico meteorológico global GFS*

El Global Forecast System (GFS) o sistema de pronóstico meteorológico de la NOAA (http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php?name=access#hires_weather_datasets), es uno de los cuatro modelos más utilizados para la predicción meteorológica a mediano plazo y a escala sinóptica.

El modelo GFS ofrece dos tipos de salidas. La primera corresponde a predicciones de hasta 7 días (192 horas) o predicción a una semana, de mayor resolución y por lo tanto mayor precisión; y la segunda de menor resolución pero con predicción de 7-15 días (192-382 horas). La resolución del modelo varía entre 35 a 70 kilómetros por celda horizontal; mientras que en la vertical la atmósfera está dividida en 64 capas y en la dimensión temporal, las predicciones son cada 3 horas para las proyecciones a 7 días, y cada 12 horas para las proyecciones entre 7 y 15 días.

2.1.1.2 *Sensores remotos de precipitación TRMM-TMPA*

La Misión para Medir la Lluvia Tropical (TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission), lanzada en 1997 por la NOAA, fue concebida como una misión satelital para estudiar las lluvias tropicales para estudios del clima y es precursora de la misión de Medición de Precipitación Global (GPM, Global Precipitation Measurement). Las dos misiones más importantes son un radar de precipitación a bordo (o PR) y el generador de imágenes de microonda TRMM (http://mirador.gsfc.nasa.gov/collections/TRMM_3B42__007.shtml).

El Análisis Multi-satelital de Precipitación (TMPA, Multi-satellite Precipitation Analysis) de la Misión para Medir la Lluvia Tropical (TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission) combina estimaciones de precipitación determinadas por microondas con estimaciones infrarrojas de satélites geoestacionarios. Las intensidades de lluvia determinadas por **microondas son usadas para "calibrar" las estimaciones de los GOES. El producto de la Técnica de Morfismo de CPC de la NOAA (CMORPH) está construido por completo a partir de estimaciones de precipitación determinadas por microondas pasivos. En momentos y en sitios donde no se cuenta con datos de microonda de satélites polares, el CMORPH propaga las estimaciones de microondas en los espacios de tiempo usando tendencias observadas en los datos infrarrojos de los satélites geoestacionarios. A esta propagación se le conoce como "morfismo".**

Este algoritmo del Hidro-Estimador del Centro de Aplicaciones Satelitales de NOAA/NESDIS ha producido automáticamente estimaciones de lluvia operacionales en tiempo real desde 2002 a partir de datos de la banda 4 (ventana IR) de Imágenes del GOES-11 y -12. Los productos finales son campos digitales de intensidades de lluvia instantáneas cada 15 minutos. Estas estimaciones de lluvia son la principal fuente de datos de precipitación para varios sistemas de pronóstico de crecidas en EEUU.

Con el objeto de mostrar la calidad de esta herramienta para el caso de la región en estudio, en la Figura 2.5 se presenta la precipitación acumulada entre el 19 y 31 de marzo de 2015 medida por los sensores TRMM. Se observa una buena distribución espacial de la precipitación, en donde la precipitación aumenta de norte a sur y de mar a cordillera.

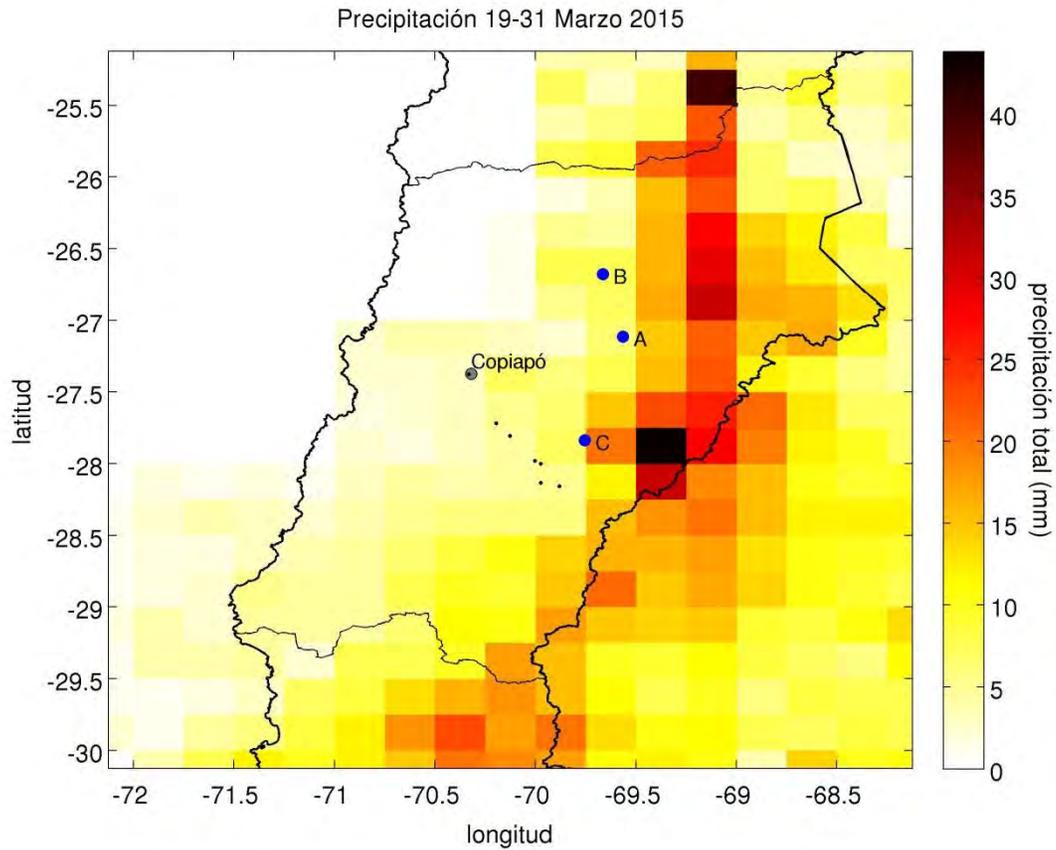


Figura 2.5 Precipitación acumulada entre el 19 y 31 de marzo de 2015 medida por los satélites.

En cuanto a la magnitud de la precipitación respecto de los datos medidos, en la Figura 2.6 se presenta una comparación entre la precipitación estimada por los sensores y la precipitación medida en las estaciones de la DGA. Se observa una buena correspondencia entre la precipitación medida y estimada por estos sensores; sin embargo, para mejorar esta correspondencia, es preciso calibrar los datos de estos satélites con las mediciones históricas en el período concurrente de datos.

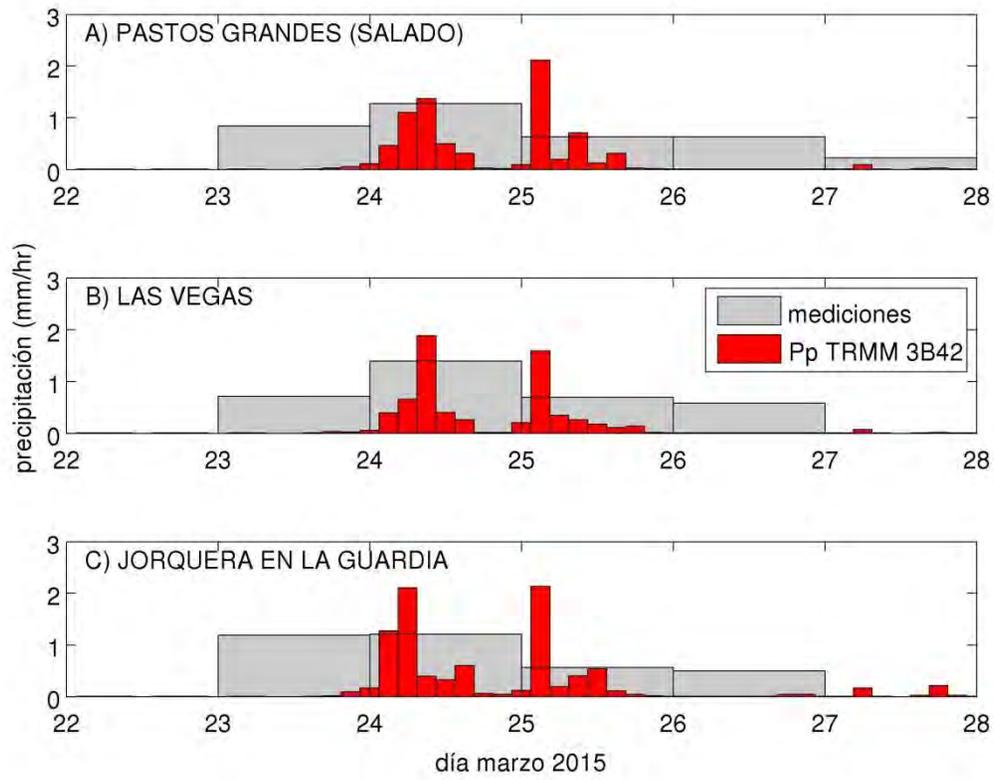


Figura 2.6 Comparación entre la precipitación estimada por los sensores y la precipitación medida en las estaciones de la DGA.



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA

3 DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA

3.1 PARÁMETROS A MONITOREAR

La red de estaciones hidrometeorológicas telemétricas midiendo en tiempo real servirá de base para la verificación y seguimiento de la tormenta detectada en el pronóstico meteorológico. En este contexto, para la estimación de la escorrentía superficial, es preciso conocer la tasa de precipitación, la temperatura ambiente, y la tasa de evapotranspiración y/o infiltración, por lo que estos parámetros serán medidos con las estaciones hidrometeorológicas.

3.2 UBICACIÓN

La ubicación de las estaciones se fundamenta en base a dos criterios. Por una parte se requiere caracterizar toda la cuenca aportante, de modo que los puntos de ubicación de las estaciones deberían cubrir diferentes bandas de elevación, para así caracterizar un gradiente de precipitación con la altura. Por otra parte, se requiere tener señal GPRS, por lo que además los puntos se deben ubicar en la cercanía de una antena celular.

En la Figura 3.1 y Figura 3.2 se presentan las subcuencas de Quebrada Paipote y Salado Alto, mostrando además los puntos de ubicación de las antenas de telefonía móvil, y las estaciones meteorológicas de la DGA cercanas a las áreas de estudio.

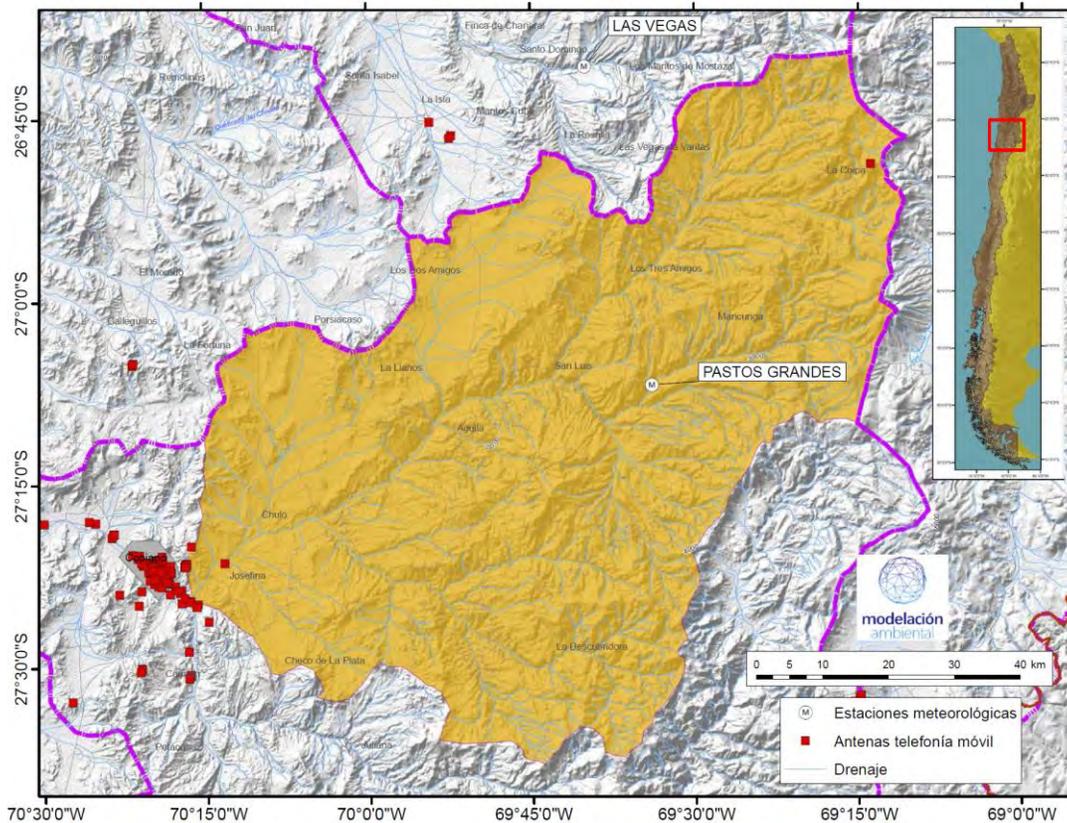


Figura 3.1 Mapa mostrando la subcuenca Quebrada Paipote, los puntos con antena de telefonía móvil y las estaciones meteorológicas de la DGA cercanas al área de estudio.

En la subcuenca de Quebrada Paipote (Figura 3.1), actualmente se encuentra operativa la estación Pastos Grandes (2.260 msnm), por lo que parece razonable instalar una estación en la parte alta, cercana al sector de la Coipa (4.000 msnm), y otra cercana al punto de cierre de la subcuenca en el sector de Josefina (570 msnm). En estos puntos no sólo se logra cubrir las diferentes bandas de elevación de la subcuenca, sino que además ambos puntos tienen cobertura GPRS.

En el caso de la subcuenca Salado Alto (Figura 3.2), actualmente se encuentra operativa la estación Las Vegas (2.250 msnm), por lo que se propone también instalar una estación en la parte alta cercana a alguna de las antenas celulares ubicadas a 3.000 msnm, y otra en un nivel más bajo cercana a la localidad de Diego de Almagro (790 msnm). Del mismo modo anterior, además de tener cobertura GPRS en estas localidades, en estos puntos se cubrirían las diferentes bandas de elevación, permitiendo así la estimación de un gradiente de precipitación con la altura.

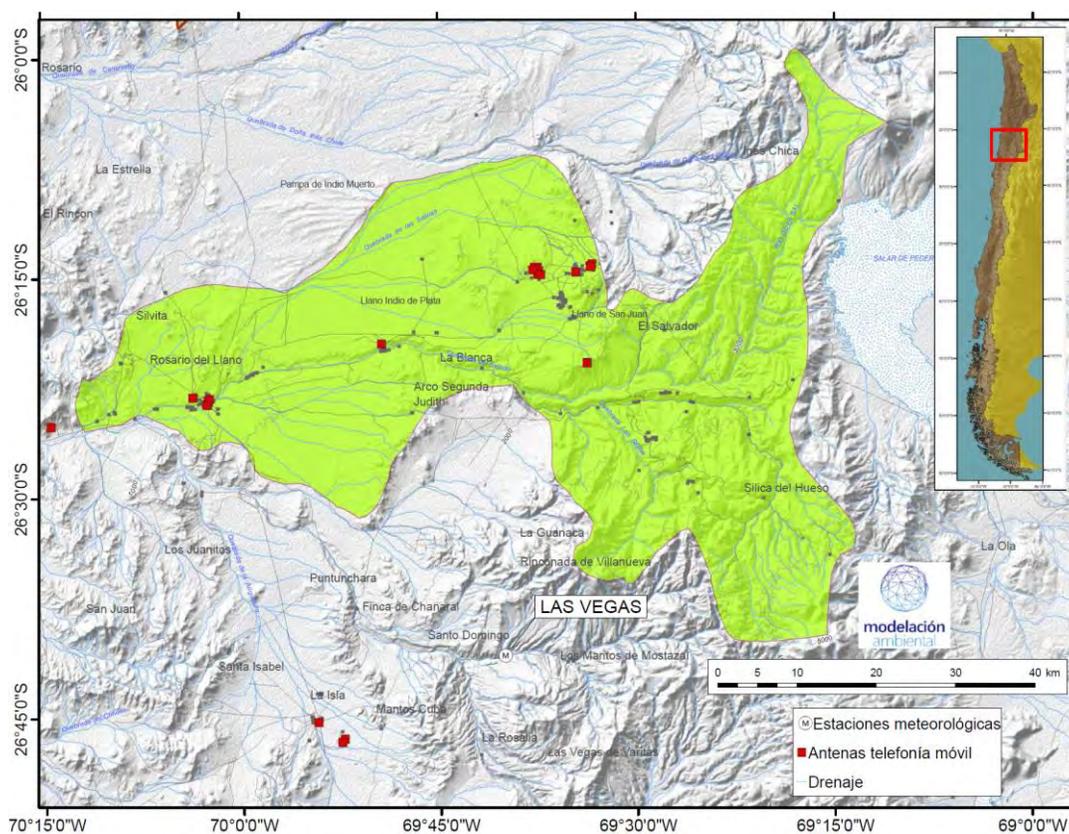


Figura 3.2 Mapa mostrando la subcuenca Salado Alto, los puntos con antena de telefonía móvil y las estaciones meteorológicas de la DGA cercanas al área de estudio.

De acuerdo a este análisis y la verificación real de instalación en terreno, se seleccionaron los puntos detallados en la Tabla 3.1, los que se indican en la Figura 3.3 para el caso de Quebrada Paipote, y la

Figura 3.4 para río Salado. Finalmente, la Figura 3.5 muestra una vista general de cada una de las estaciones.

Tabla 3.1: Coordenadas de estaciones hidrometeorológicas. Uso WGS84-19S.

Estación	Coordenada E	Coordenada N	Altitud (msnm)
MET-QP1	475282	7025929	3.835
MET-QP2	384449	6977709	6.51
MET-RS1	449014	7082720	2.338
MET-RS2	418785	7087738	1.200

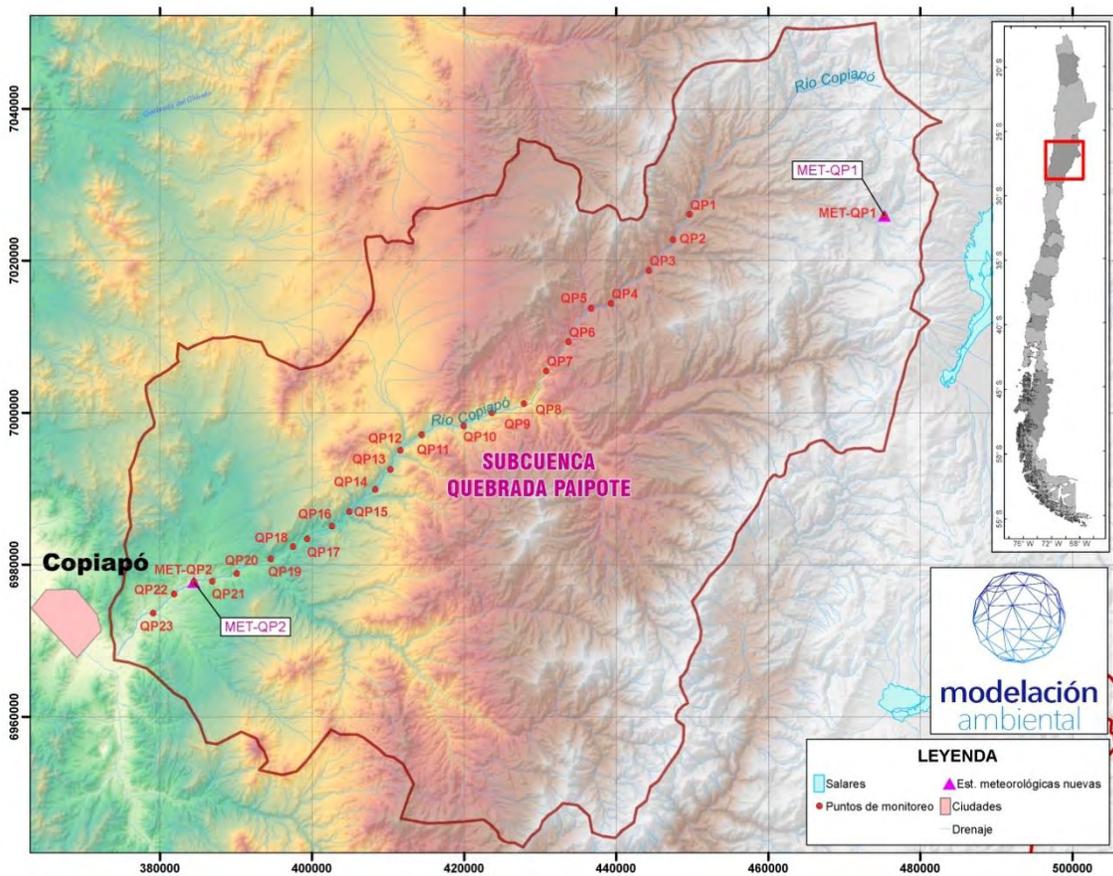


Figura 3.3 Ubicación de estaciones MET-QP1 y MET-QP2 en quebradas Paipote

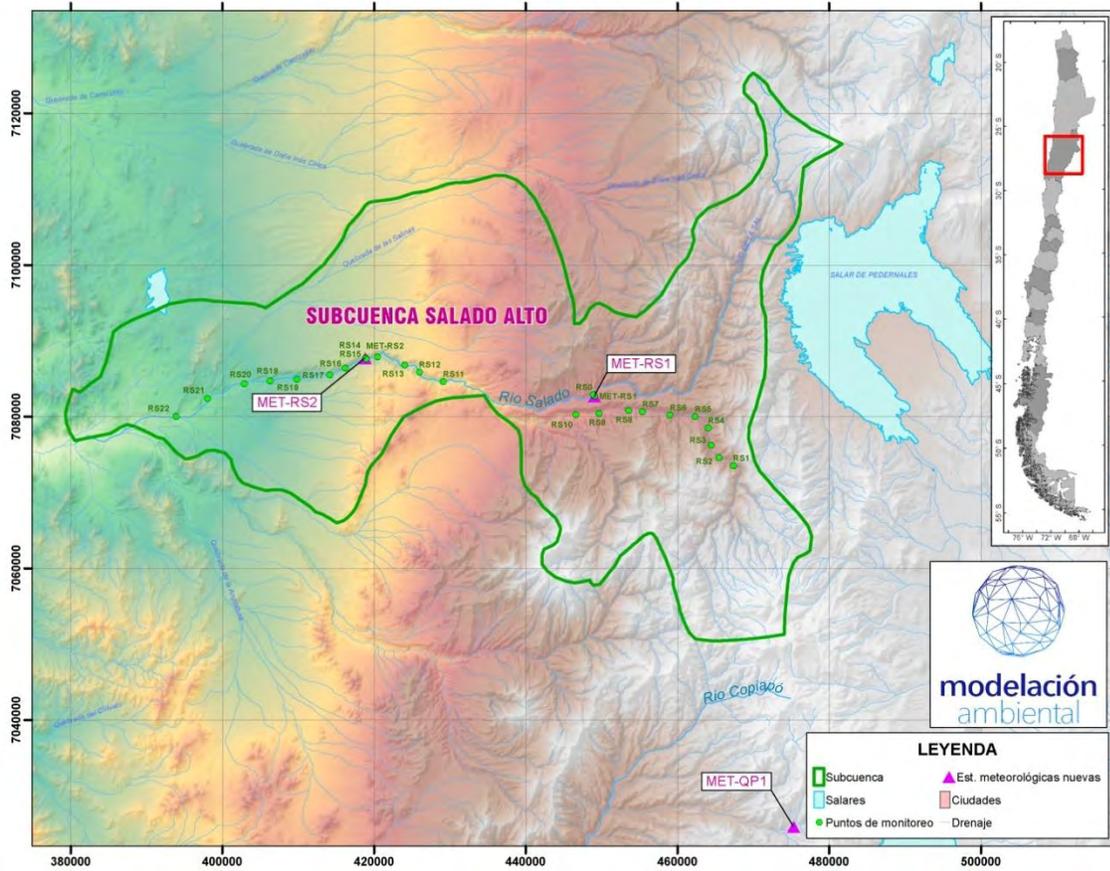


Figura 3.4 Ubicación de estaciones MET-RS1 y MET-RS2 en río Salado.

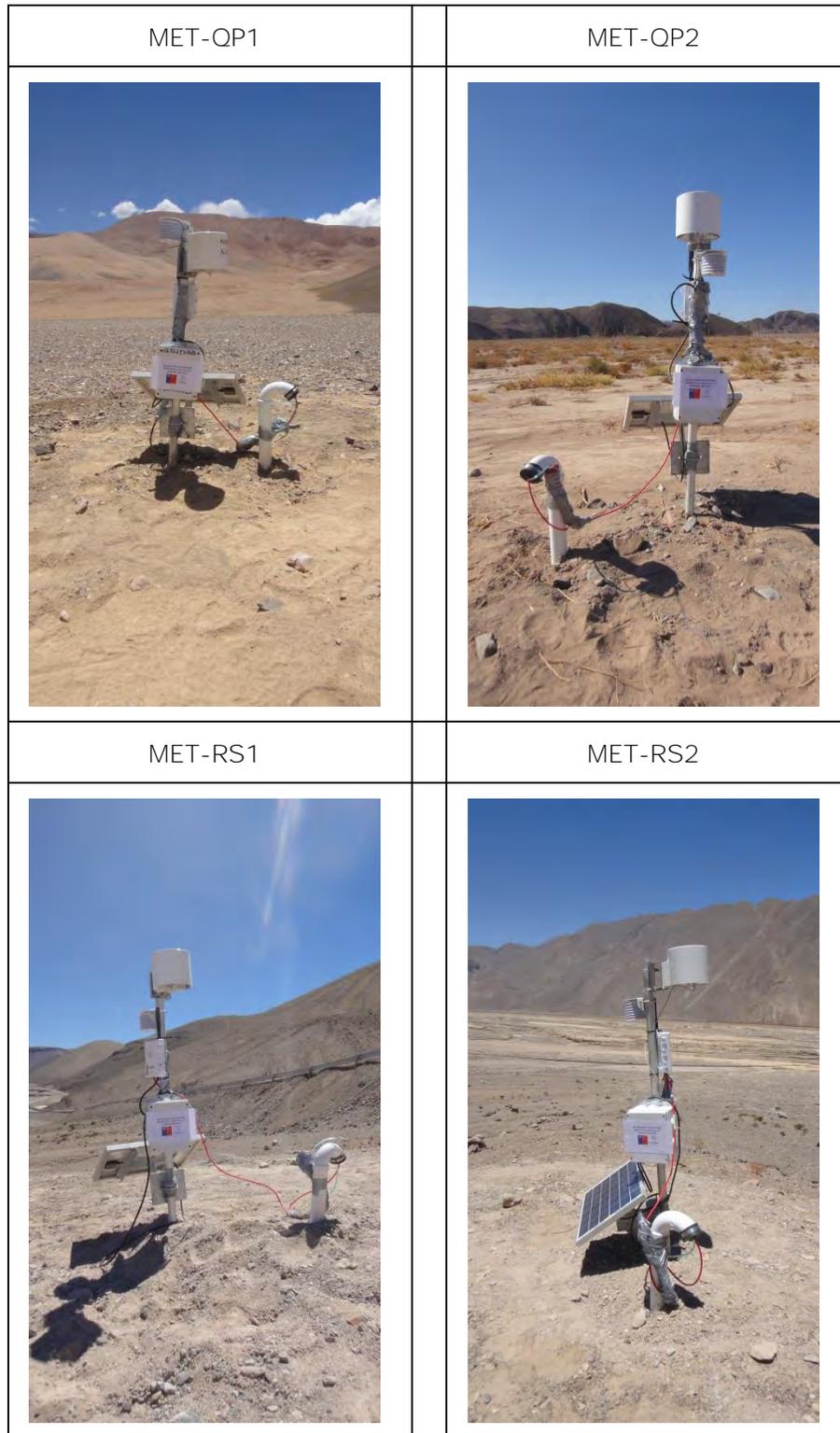


Figura 3.5 Vista de las estaciones hidrometeorológicas instaladas en Quebradas Paipote (MET-QP1 y MET-QP2) y Río Salado (MET-RS1 y MET-RS2).

3.3 COMPONENTES DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS

Las estaciones hidrometeorológicas se diseñaron sobre la base del datalogger Em50G de Decagon¹. Este datalogger es el que por una parte almacena y controla los sensores, y por otra tiene incorporado la antena GPRS para la transmisión de datos. La instrumentación se detalla en la Tabla 3.2, mientras que los aspectos relacionados con los sensores utilizados, la energización de la estación y la transmisión de información se detalla en las siguientes secciones.

Tabla 3.2 Listado de sensores estación hidrometeorológica.

Imagen Equipo	Modelo	Características
	<p>Lisímetro G3 Decagon Devices, Inc.</p> <p>http://www.morph2ola.com/index.php/hidrologia-4/lisimetro-g3</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Material cuerpo del infiltrómetro: PVC. ✓ Material del disco poroso: Acero inoxidable Longitud total: 32,7 cm. ✓ Diámetro del tubo: 3,1 cm. ✓ Dimensiones del disco poroso: 4,5 cm de diámetro y 3 mm de grosor. ✓ Longitud del tubo que regula la succión 10,2 cm. ✓ Rango de succión: 0,5 - 6 cm de succión. ✓ Longitud del reservorio de agua: 21,2 cm. ✓ Longitud del tubo Mariotte: 28 cm. ✓ Volumen de agua necesario para funcionar: 135 ml.

¹<https://www.decagon.com/en/data-loggers-main/data-loggers/em50g-wireless-cellular-data-logger/>

Imagen Equipo	Modelo	Características
	<p>Pluviómetro ECRN-100 Decagon Devices, Inc.</p> <p>http://www.morph2ola.com/index.php/sensores/sensores-ambientales/pluviometro-ecrn-100</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Resolución: 0,2 mm ✓ Tipo de Sensor: Doble cuchara de balancín ✓ Temperatura de operación: 0°C a 60°C ✓ Cable de conexión: 3.5 mm conector estéreo ✓ Longitud del cable: 5m área de captación:
	<p>Sensor Temperatura ECT Decagon Devices, Inc.</p> <p>http://www.decagon.com/products/canopy-atmosphere/canopy-environment/ect-air-temperature/</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rango -40°C-50°C - Resolución 0,1°C
	<p>Datalogger EM50G Decagon Devices, Inc.</p> <p>http://sensoresdehumedad.com/index.php/registrator-de-datos-5/registrator-de-datos-em50g</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 5 canales ✓ 1MB memoria ✓ Se programa la frecuencia de envío de datos vía GPRS. ✓ Operacion entre -30°C y 60°C. ✓ Alimentación eléctrica con 5 pilas AAA alcalinas, o con panel solar. ✓ Servicio de datos y website a través de un software especializado.

3.4 SISTEMA DE ENERGIZACIÓN.

El datalogger funciona con 7.5V y este voltaje puede ser entregado con 5 pilas alcalinas AA que se instalan directamente en el equipo, o bien con una única entrada de corriente alternativa. Para favorecer la autonomía de las estaciones, se utilizó esta última forma de energizar el datalogger donde se conectó una batería de 12V y 7.2Ah que se recarga con un panel solar de 20W. Para lograr lo anterior se requirió lo siguiente (ver Figura 3.6):

- Regulador de carga de 12V.
- Panel solar 20W.
- Batería de plomo de 12V y 7.2Ah.
- Módulo regulador de voltaje variable.

La conexión se centra en el regulador de carga, que recibe como entrada el panel solar, y como salida va a la batería de 12V y 7.2Ah. La dirección de la corriente en la conexión entre el regulador de carga y la batería es bidireccional en función del voltaje de la batería respecto del panel solar. Como la salida es de 12V, en esta última conexión se instaló un módulo regulador de voltaje que se ajustó para que el voltaje de salida fuera de 7.5V requerido por el datalogger.

NOTA: cables color café o rojo tienen carga positiva, y color azul o verde carga negativa. Cables fueron recubiertos con cinta americana (cinta plateada) para reducir deterioro por exposición a luz solar.

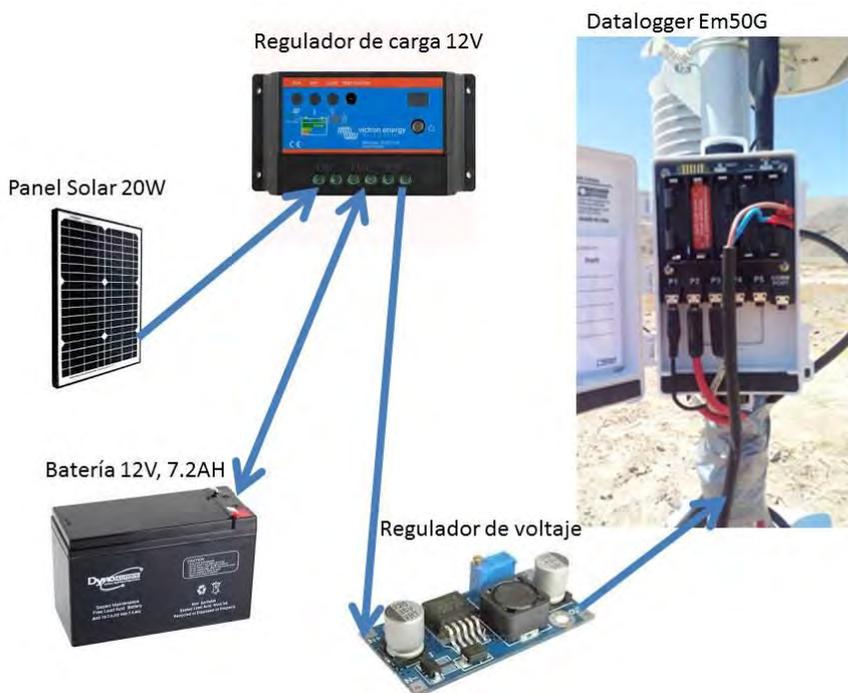


Figura 3.6 Esquema de energización de datalogger Em50G.

3.1CHIP ENTEL TRANSMISIÓN DE DATOS.

La transmisión de datos se realiza con una antena celular y un chip Entel, que es la compañía que tiene cobertura en los puntos donde se instalaron los equipos. El chip Entel puede ser reemplazado fácilmente en terreno. Para lo anterior, se requiere llevar un atornillador cruz, con el que se deben remover los cuatro tornillos que sostienen la placa con el sistema electrónico del datalogger y pilas alcalinas (ver Figura 3.7). El chip se ubica en el reverso de la placa con el sistema electrónico de color negro de la Figura 3.7. Se requiere desconectar la conexión a la antena, lo que se hace tirando levemente la conexión, sin necesidad de contar con herramientas específicas.



Tornillos a remover para recambio de chip Entel

Figura 3.7 Identificación de tornillos cruz a remover para recambio de chip Entel para transmisión de datos.

3.1MONTAJE DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS

El montaje de la estación se realizó en un mástil de un tubo de aluminio de unos 1.4 m de longitud. Este mástil se ancló sobre una base de piedra de 20 cm x20 cm x20cm que a su vez se enterró hasta quedar completamente cubierta. Una vista del montaje final de la estación se entrega en la Figura 3.8.

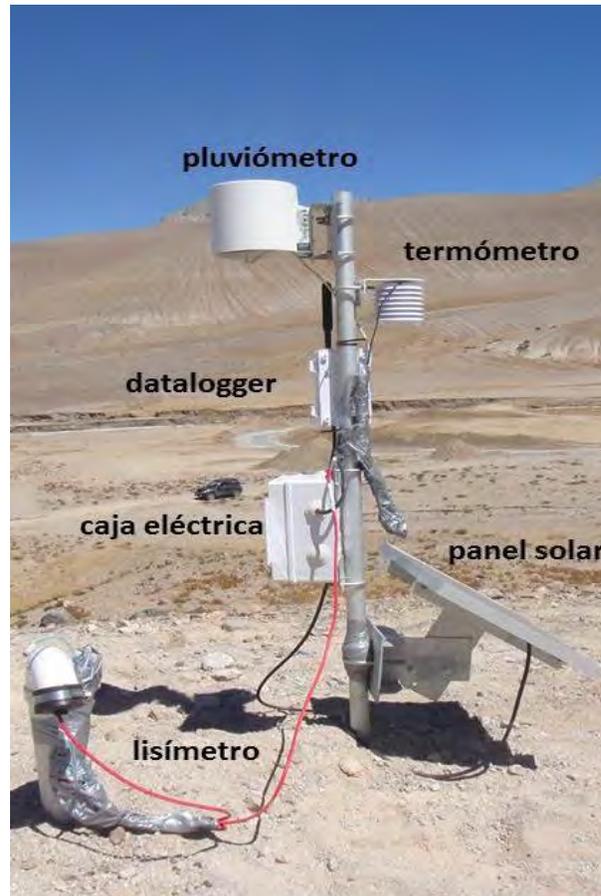


Figura 3.8 Vista del montaje final de la estación hidrometeorológica.

En el extremo superior del mástil se instaló el pluviómetro. Bajo éste se instaló el sensor de temperatura, seguido con el datalogger que se orientó hacia donde existiese mejor señal GPRS. Inmediatamente bajo el datalogger se instaló una caja para conexiones eléctrica en el exterior, en cuyo interior se encuentra el sistema eléctrico de energización del datalogger. Finalmente, en la base de la estación se colocó el panel solar de 20W, orientado al norte.

El lisímetro se debe instalar en el subsuelo, a un costado del mástil de la estación. Para esto se excavó un hoyo de 1.6m de profundidad y 1m de diámetro, en cuyo interior se instaló el lisímetro según la guía de instalación del fabricante². La Figura 3.9 muestra una vista de la parte superior del lisímetro, antes que fuera completamente cubierto de tierra, donde se destaca el tubo de color verde (que es el que recibe el agua) y un tubo de menor diámetro de color blanco, por donde se instala el sensor de presión/temperatura y salinidad. Este último tubo blanco es el que sobresale en el montaje final de la estación de la Figura 3.8. El lisímetro fue llenado con 6L de agua para medir la evaporación potencial desde el subsuelo.

²<https://www.decagon.com/en/hydrology/lysimeters/drain-gauge-g3-passive-capillary-lysimeter/>



Figura 3.9 Vista del lisímetro antes de ser completamente cubierto por tierra.

3.1 CONFIGURACIÓN FINAL DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS

Las estaciones Decagon se configuran con el software gratuito ECH2O Utility³. Este software permite testear sensores e intensidad de la señal GPRS, configurar hora, tipo de sensores, y descargar información que está almacenada en el datalogger. La configuración de las estaciones considera:

- Mediciones cada 10 minutos.
- Envío de información cada una hora. Este envío es de toda la información recolectada con posterior al último envío, de manera que se cuenta con un registro de mediciones cada 10 minutos. Al servidor de la DGA sólo se envía el último dato medido, ya que éste no permite recibir datos que no sean instantáneos. Sin embargo, toda la información está almacenada en los servidores Decagon.
- Hora UTC.

Para la configuración se requiere el **cable USB-3.5mm (stereo)** que se conecta en la puerta de comunicación del extremo derecho del datalogger. Una vez conectado el cable, **se define el modo de conexión en lista "Connect Via:" (punto 1, Figura 3.10), y posteriormente el botón "Connect" (punto 2, Figura 3.10)**. Si la conexión fue satisfactoria, se desplegará la información la configuración actual del datalogger:

³<https://www.decagon.com/en/data-loggers-main/software/ech2o-utility/>

Name y Device ID (punto 3, Figura 3.10): corresponden al número identificador del datalogger, correspondientes a:

- 5G0F5380: estación MET-QP1.
- 5G0F5384: estación MET-QP2.
- 5G0F5388: estación Met-RS1.
- 5G105547: estación Met-RS2.

Site Name (punto 3, Figura 3.10): corresponde al nombre de la estación del proyecto (MET-QP1, etc.) y su coordenada latitud/longitud. Se especificó que la hora del datalogger es la hora UTM.

Communication Hardware Options (punto 4, Figura 3.10): En este recuadro se configura la frecuencia de envío de información (botón "Configure...") y testea intensidad de señal GPRS (botón "Test...").

Sensor Measurement (punto 5, Figura 3.10): en este recuadro se configura la frecuencia de medición de los sensores (lista "measurement interval") y se especifica qué sensores son los que se encuentran conectados a cada uno de los puertos de entrada. En las estaciones hidrometeorológicas se conectó:

- Puerto 1 (P1). Sensor temperatura EC-TH. Cable negro.
- Puerto 2 (P2). Lisímetro G3. Cable rojo.
- Puerto 3 (P3). Pluviómetro ECRN-100. Cable gris.

Finalmente, en los menú del software ECH2O Utility, es posible descargar datos desde el datalogger y borrar toda la información (menú Data), y otras configuraciones (menú Action) como definir fecha y hora, o volver a configuración de fábrica.

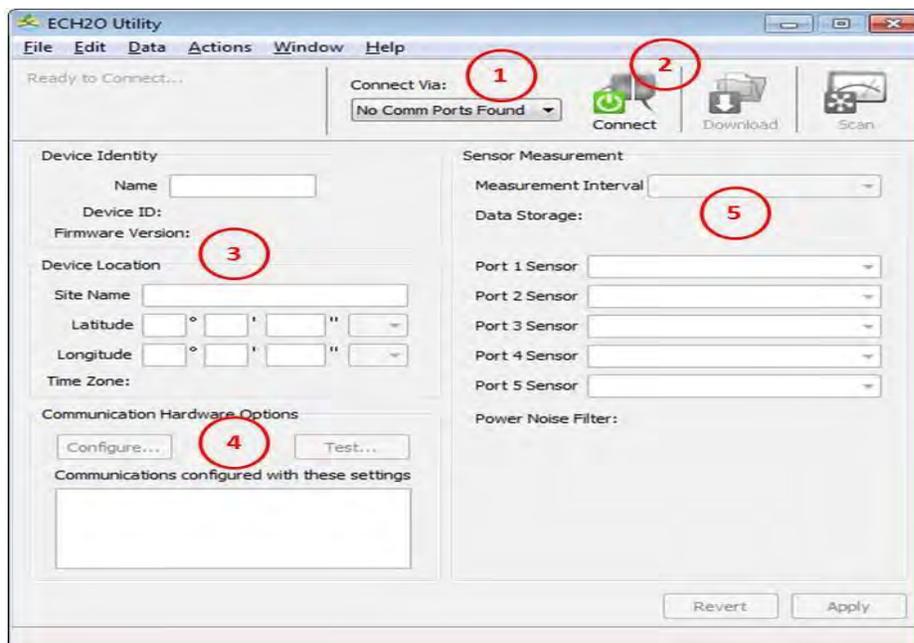


Figura 3.10 Vista del software ECH2O Utility, con puntos identificados en texto.

3.2 HERRAMIENTAS RECOMENDADAS PARA EL TRABAJO EN TERRENO

Se debiera llevar a terreno el siguiente listado de herramientas:

- Computador portátil con software ECH2O Utility (configuración datalogger).
- Cable USB-3.5mm (stereo) Decagon (configuración datalogger).
- Atornillador de cruz de vástago de más de 5cm de longitud (abrir caja eléctrica).
- Atornillador paleta 3mm diámetro (conexiones a regulador de carga).
- Atornillador paleta grande (destapar tubo blanco de lisímetro).
- Medidor de voltaje si se requiere verificar voltaje de salida del circuito regulador de voltaje.
- Teléfono celular con tarjeta Entel.
- Cinta americana.
- Cinta eléctrica.
- Agua para recargar lisímetro.

En caso que sea necesario modificar el montaje al mástil, se debe llevar:

- Caimán
- Llave francesa
- Llave punta corona 10, 14
- Pala

3.3 ENVÍO DE INFORMACIÓN A BNA

La información recolectada por los datalogger se envía a los servidores Decagon donde se almacena, y posteriormente se rescata para ser enviadas a los servidores de la Dirección General de Aguas. Es posible acceder a esta información mediante una plataforma web de Decagon (ECH2Odata.com), ingresando el identificador de los datalogger y las claves que se especifican en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: ID de estaciones y sus respectivas claves para acceder a servicio web de Decagon para visualizar información en tiempo real.

Nombre	ID datalogger	Clave Decagon
MET-QP1	5G0F5380	frocs-atveb
MET-QP2	5G0F5384	obwa-neni
MET-RS1	5G0F5388	iojy-kioc
MET-RS2	5G105547	dakeo-kluo

A partir de esto, se creó una rutina en python read.py que permite rescatar la información de los servidores de Decagon, dar formato adecuado a los datos y

posteriormente retransmitir a los servidores de la Dirección General de Aguas. Esta rutina se ejecuta automáticamente desde un servidor Linux con el comando **watch** de la siguiente forma:

Tabla 3.4: Código para ejecutar periódicamente rutina read.py.

```
watch -n 60 python manage.py read >> tramas.txt
```

El código de la rutina python se muestra en la **Tabla 3.5**, y en síntesis, esta rutina verifica si existen nuevas mediciones en el servidor Decagon, y en caso que existan, extrae la última medición ya que el sistema de la DGA considera que los datos que recibe son mediciones instantáneas, le da el formato adecuado y finalmente envía a la DGA. Esta rutina se ejecuta actualmente en el servidor contratado por la empresa Modelación Ambiental SpA para su página web, pero puede ser ejecutada desde cualquier servidor Linux.

Finalmente, como resultado del procesamiento anterior, a la DGA llega la información con **el siguiente formato: "2016-02-29 05:13:32.0 SELFTIMED ON UNIT: MET-RS2 DATE: 02/29/2016 TIME: 05:10:00 P1_TEMP 19.3 G OK P2_DRAIN 0.0932 G OK P2_TEMP 28.7 G OK P2_EC 2.172 G OK P3_PREP 0.1 G OK BATTERY 12.7 G OK"**, donde:

- 2016-02-29 05:13:32.0 es la fecha y hora a la que fue recibida la información.
- SELFTIMED ON UNIT: MET-RS2: nombre de la estación
- DATE: 02/29/2016 TIME: 05:10:00: Fecha y hora de la medición.
- P1_TEMP 19.3: Temperatura del aire (°C).
- P2_DRAIN 0.0932: Nivel de agua en el lisímetro (m).
- P2_TEMP 28.7: Temperatura del agua en el lisímetro (°C).
- P2_EC 2.172: Conductividad eléctrica en el lisímetro ($\mu S/cm$).
- BATTERY 12.7: Voltaje de la batería (volts).
- P3_PREP 0.1: Precipitación acumulada (mm).

Tabla 3.5: Código rutina read.py para rescatar información de servidores Decagon y trasmitirla a servidores DGA.

```
from django.core.management.base import BaseCommand
from datetime import datetime, timedelta
import xml.etree.ElementTree as ET
import requests
import math
import socket
import json
```

```
correccion_dates = 946684800
estaciones = [{
  'dga': 'MET-QP1',
  'decagon': '5G0F5380',
  'pass': 'frocs-atveb'
}, {
  'dga': 'MET-QP2',
  'decagon': '5G0F5384',
  'pass': 'obwa-neni'
}, {
  'dga': 'MET-RS1',
  'decagon': '5G0F5388',
  'pass': 'iojy-kioc'
}, {
  'dga': 'MET-RS2',
  'decagon': '5G105547',
  'pass': 'dakeo-kluo'
}]

class Command(BaseCommand):
    help = 'Lee todos los loggers'

    def handle(self, *args, **options):
        f = open('last_dates.json', 'r')
        text = f.read()
        f.close()

        last_dates = {}
        if len(text) > 0:
            last_dates = json.loads(text)

        for estacion in estaciones:
            params = {
                'email': 'cmeruane@modelacion.cl',
```

```
'userpass': '12345678',
'deviceid': estacion['decagon'],
'devicepass': estacion['pass'],
'report': '1',
'mrid': '5000'
}
last_date = None
r = requests.get('http://api.ech2odata.com/morph2ola/dxd.cgi', params=params)
if r.status_code != 200:
    return

#print r.text
root = ET.fromstring(r.text)
battery = root[0][1].attrib['batt']
attrib = root[0][2].attrib
scans = root[0][2].text.strip().split("\n")

if int(attrib['scans']) != len(scans):
    return

if estacion['decagon'] in last_dates:
    json_date = datetime.strptime(last_dates[estacion['decagon']], "%m/%d/%Y %H:%M:%S")
else:
    scan = scans[len(scans)-1].strip().split(",")
    date = datetime.fromtimestamp(int(scan[0])+correcion_dates)
    json_date = date-timedelta(hours=1)

datas = []
for scan_text in scans:
    scan = scan_text.strip().split(",")
    date = datetime.fromtimestamp(int(scan[0])+correcion_dates)

    if scan[1] == '0' or scan[2] == '0':
        continue
```

```
if date < json_date:
    continue

R = float(scan[1])
x = math.log((4095/R) - 1)
C = 25.01914 + x * (-22.8437 + x * (1.532076 + (-0.08372 * x)))
C = round(C, 1)

second_sens_binary = "{0:b}".format(int(scan[2]))
D = int(second_sens_binary[20:], 2)
drainage = D * (10.13/506.7)
drainage = round(drainage*10, 1)
RT = int(second_sens_binary[:10], 2)
if RT <= 900:
    T = (RT-400)/10.0
else:
    T = ((900+5*(RT - 900))-400)/10.0
T = round(T, 1)
EC = pow(10, int(second_sens_binary[10:20], 2)/190.0)/1000.0
EC = round(EC, 3)

#tips = int(scan[3])

datas.append({
    'DATE': date,
    'P1_TEMP': C,
    'P2_DRAIN': drainage,
    'P2_TEMP': T,
    'P2_EC': EC,
    'TIPS': int(scan[3])
})

if not last_date or date > last_date:
```

```
last_date = date

'''

# Mandar todo
for index, data in enumerate(datas):
    if index == 0:
        continue

    if datas[index]['TIPS'] >= datas[index-1]['TIPS']:
        P = 0.02 * int(datas[index]['TIPS']-datas[index-1]['TIPS'])
    else:
        # COUNTER RESET
        P = 0.02 * int(datas[index]['TIPS'])

    echo = 'SELFTIMED ON UNIT: ' + estacion['dga'] + \
        ' DATE: ' + datas[index]['DATE'].strftime("%m/%d/%Y") + \
        ' TIME: ' + datas[index]['DATE'].strftime("%H:%M:%S") + \
        ' P1_TEMP '+datas[index]['P1_TEMP']+' G OK' + \
        ' P2_DRAIN '+datas[index]['P2_DRAIN']+' G OK' + \
        ' P2_TEMP '+datas[index]['P2_TEMP']+' G OK' + \
        ' P2_EC '+datas[index]['P2_EC']+' G OK' + \
        ' P3_PREP '+unicode(P)+' G OK' + \
        ' BATTERY '+unicode(battery)+' G OK'

    print echo

    DGA_HOST = 'datosgprs.dga.cl'
    TCP_PORT = 5001
    BUFFER_SIZE = 1024
    s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    s.connect((DGA_HOST, TCP_PORT))
    s.sendall(echo+'\n')
    data = s.recv(BUFFER_SIZE)
    s.close()
    print 'response: '+data
```

```
'''

# Mandar solo ultima medicion con nueva estructura
if len(datas) > 1:
    ultima_medicion = datas[-1]
    P = 0.02 * float(ultima_medicion['TIPS'])
    battery_volts = round(11.6 + 0.011*float(battery), 1)
    echo = 'SELFTIMED ON UNIT: ' + estacion['dga'] + ' DATE: ' +
ultima_medicion['DATE'].strftime("%m/%d/%Y") +\
        ' TIME: ' + ultima_medicion['DATE'].strftime("%H:%M:%S") +\
        ' P1_TEMP ' + "{0:.1f}".format(ultima_medicion['P1_TEMP'])+' G OK' +\
        ' P2_DRAIN ' + "{0:.4f}".format(round(ultima_medicion['P2_DRAIN']/1000, 4))+ ' G OK' +\
        ' P2_TEMP ' + "{0:.1f}".format(ultima_medicion['P2_TEMP'])+' G OK' +\
        ' P2_EC ' + "{0:.3f}".format(ultima_medicion['P2_EC'])+' G OK' +\
        ' P3_PREP '+'{0:.1f}'.format(P)+' G OK' +\
        ' BATTERY '+'{0:.1f}'.format(battery_volts)+' G OK'
    print echo

    DGA_HOST = 'datosgprs.dga.cl'
    TCP_PORT = 5001
    BUFFER_SIZE = 1024
    s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    s.connect((DGA_HOST, TCP_PORT))
    s.sendall(echo+'\n')
    data = s.recv(BUFFER_SIZE)
    s.close()
    print 'response: '+data

if last_date:
    last_dates[estacion['decagon']] = last_date.strftime("%m/%d/%Y %H:%M:%S")
    #persistence
    f = open('last_dates.json', 'w')
    f.write(json.dumps(last_dates))
    f.close()
```



LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE SUELOS

4 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE SUELOS

Se levantó información de suelos en las subcuencas de Quebrada Paipote y Salado Alto, desde una perspectiva de modelación hidrológica (precipitación/escorrentía). Para esto se realizó una campaña en terreno, levantaron calicatas y pruebas de infiltración en 50 puntos distribuidos entre Quebrada Paipote y Salado Alto, para definir los siguientes parámetros:

- Curvas granulométricas
- Textura.
- Coeficiente de infiltración.

Los puntos de monitoreo se detallan en la Figura 4.1 y Figura 4.2, mientras que sus coordenadas UTM se indican en la y Tabla 4.2.

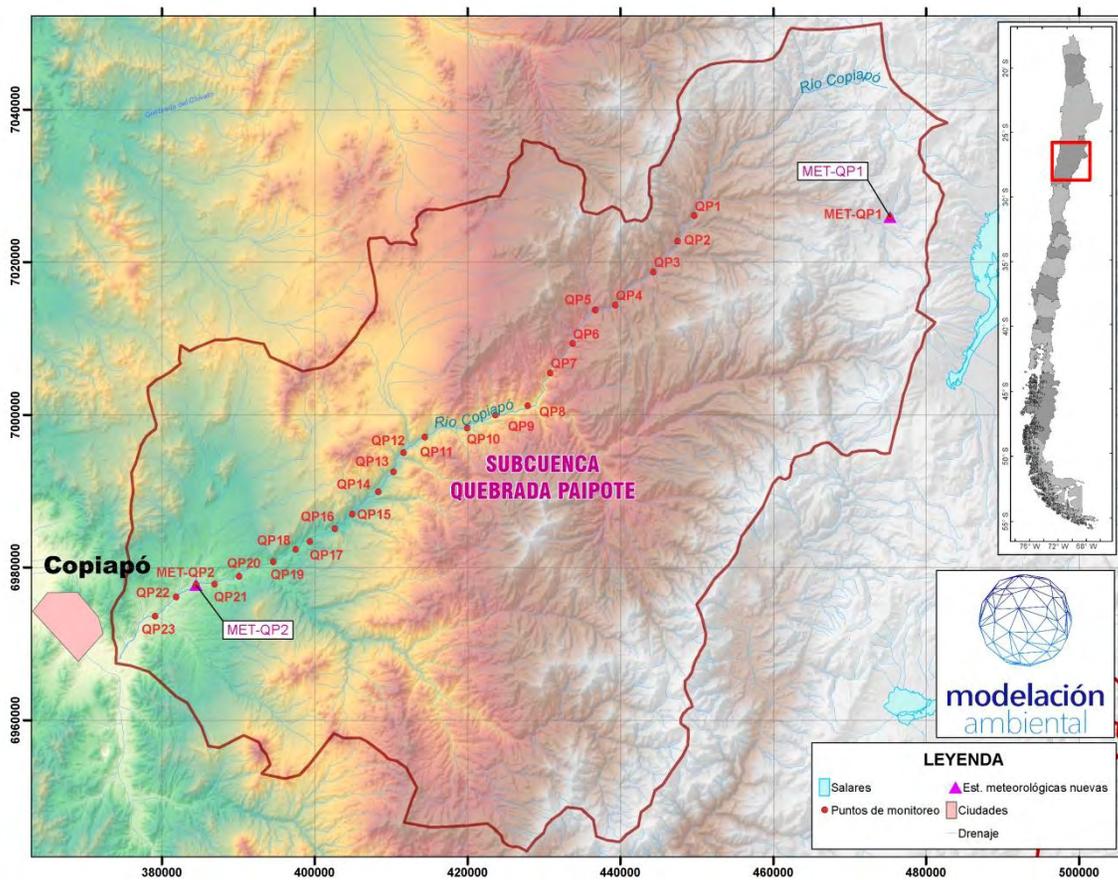


Figura 4.1 Ubicación de puntos de monitoreo en Quebrada Paipote.

Tabla 4.1 Coordenadas UTM de puntos de levantamiento de información de suelos en Quebrada Paipote.

Código	UTM-Norte (WGS-84)	UTM-Este (WGS-84)
MET-QP1	7025929	475282
MET-QP2	6977709	384449
QP1	7026084	449676
QP2	7022761	447461
QP3	7018714	444301
QP4	7014389	439314
QP5	7013707	436689
QP6	7009335	433729
QP7	7005474	430786
QP8	7001212	427852
QP9	6999983	423624
QP10	6998281	419931
QP11	6997087	414421
QP12	6995061	411607
QP13	6992510	410288
QP14	6989902	408293
QP15	6987013	404914
QP16	6985081	402609
QP17	6983408	399360
QP18	6982370	397515
QP19	6980750	394579
QP20	6978846	390101
QP21	6977824	386905
QP22	6976139	381861
QP23	6973644	379117

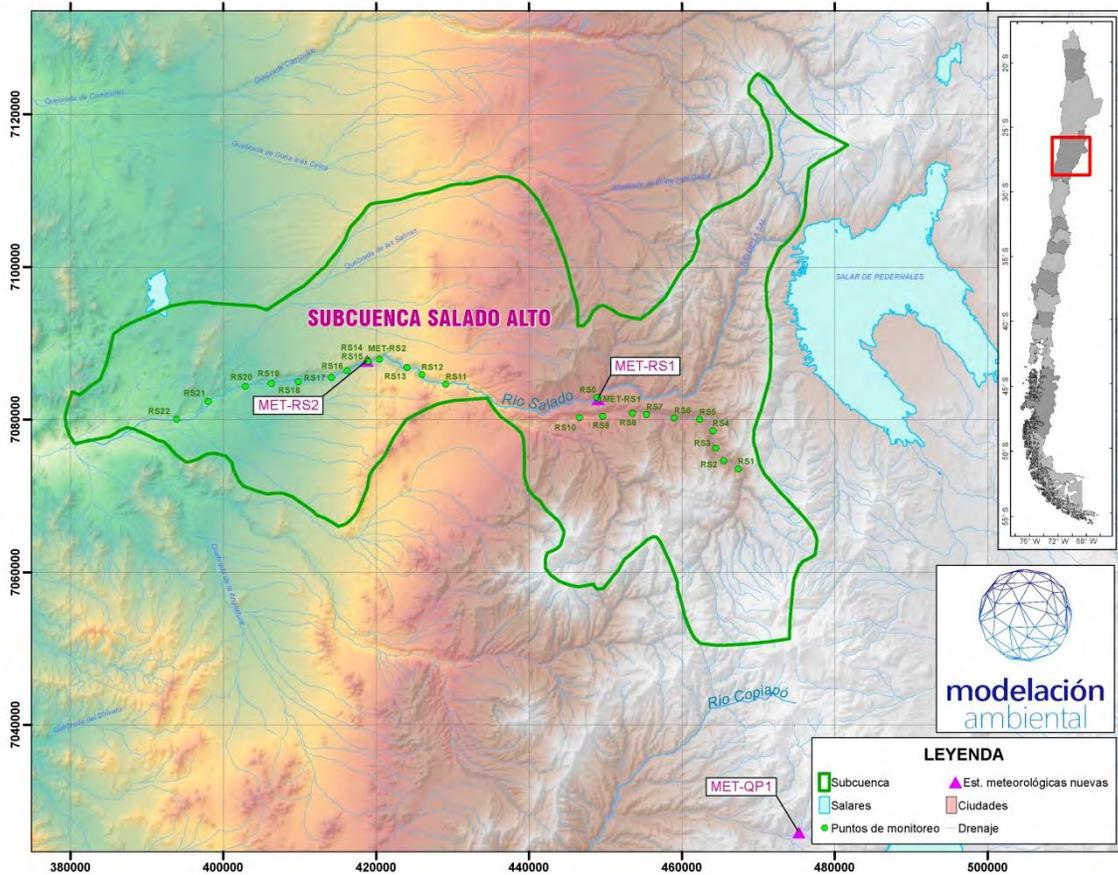


Figura 4.2 Ubicación de puntos de monitoreo en Salado Alto.

Tabla 4.2 Coordenadas UTM de puntos de levantamiento de información de suelos en Salado Alto.

Código	UTM-Norte (WGS-84)	UTM-Este (WGS-84)
MET-RS1	7082725	449005
MET-RS2	7087738	418785
RS0	7082891	448839
RS1	7073554	467291
RS2	7074609	465405
RS3	7076240	464396
RS4	7078524	463985
RS5	7080017	462237
RS6	7080208	458922
RS7	7080648	455289

Código	UTM-Norte (WGS-84)	UTM-Este (WGS-84)
RS8	7080813	453496
RS9	7080433	449554
RS10	7080263	446518
RS11	7084626	429037
RS12	7085864	425887
RS13	7086812	423948
RS14	7087882	420369
RS15	7087623	418896
RS16	7086384	416107
RS17	7085495	414074
RS18	7084930	409728
RS19	7084726	406231
RS20	7084326	402796
RS21	7082372	397989
RS22	7079994	392804

4.1 CALICATAS Y GRANULOMETRÍA

El objetivo de las calicatas es la caracterización de la rugosidad del lecho y del material transportado por el cauce. Una vez seleccionado el área donde se realiza la calicata, se delimitó en el suelo un cuadrado de 1mx1m, en donde se procedió a realizar la excavación de la calicata. En el manual de carreteras del MOP se recomienda utilizar espesores del orden de 0,5 m para macro granulometrías, mientras que para el caso de material bien graduado, se indican valores mínimos de muestra dependiendo del tamaño máximo observado de las partículas. Idealmente la profundidad de la calicata es de un metro (volumen total de 1 m³), pero está condicionada por la presencia de agua o desmoronamiento de las paredes. Es importante recalcar la necesidad de obtener las curvas granulométricas de cada capa para estudiar fenómenos de acorazamiento u otros.

Para realizar el tamizado del suelo, se contó con 3 tamaños de malla para el suelo grueso (15.24 cm > Ø > 2.54 cm) y 3 tamaños para la fracción fina (9.5 mm > Ø > 2 mm), y balanzas de distinta graduación. A continuación se listan los materiales necesarios y el procedimiento para la excavación y fraccionamiento del suelo.

4.1.1 Lista de materiales

- Tamices gruesos, aberturas de 3" (7.62 cm), 2" (5 cm) y 1" (2.54 cm) y bandejas para recibir el material pasante.

- Tamices finos, aberturas de 3/8" (9.5mm), malla N°4 (4.75 mm) y malla N°10 (2 mm).
- Balanzas de 100kg x 20g y 15kg x 2g de capacidad y resolución, respectivamente.
- Palas, chuzos y guantes para la excavación.



Figura 4.3 Vista de los tamices finos y gruesos.

4.1.2 Procedimiento

1. Limpiar el área de excavación, extraer vegetación, basura, etc.
2. Pesarse por separado las rocas muy grandes ($\varnothing > 3''$).
3. Colocar el tamiz de 1" sobre la bandeja metálica y luego montar el de 2" y 3" de manera que quede el tamiz de 3" en la parte superior.

4. Pasar el material de la primera capa de suelo por los tamices y registrar el material retenido en cada uno. Al pasar el material se debe cuidar que el material de diámetro menor al tamiz pase efectivamente a través de éste.
5. **Pesar el material que queda sobre la bandeja ($\varnothing < 1''$) y luego cuartearlo para obtener una muestra de al menos 10 kg.** Es aconsejable dejar la muestra extendida para reducir el contenido de humedad.
6. Tamizar el material obtenido en el punto o en el punto anterior 5, utilizando para esto los tamices finos. Dado que estos tamices tienen una capacidad limitada, se deberá realizar el tamizado por partes, manteniendo separado el material retenido en cada tamiz para luego ser pesado y registrado.





Figura 4.4 Vista del equipo trabajando en el levantamiento de las calicatas.

4.1.1 Resultados Quebrada Paipote

Los resultados del levantamiento de calicatas en Quebrada Paipote se presentan en la Figura 4.5 a la Figura 4.29, mientras que en la Tabla 4.3 se resumen los diámetros característicos de cada calicata. Las planillas de datos con el procesamiento de la información se adjuntan en los anexos digitales de este informe.

Se observa que la distribución de granos es bastante homogénea a lo largo del eje longitudinal de la Quebrada Paipote. El relleno aluvial de la quebrada está compuesto principalmente por arenas y arcillas, con diámetros medios característicos de $d_{50}=0,7\text{cm}$, $d_{84}=4,2$ y $d_{90}=6,7\text{cm}$. En consecuencia, a partir de estas curvas granulométricas se infiere que el lecho de la Quebrada Paipote tendería a la erosión de forma significativa en caso de eventos extremos, como el ocurrido en marzo de 2015.

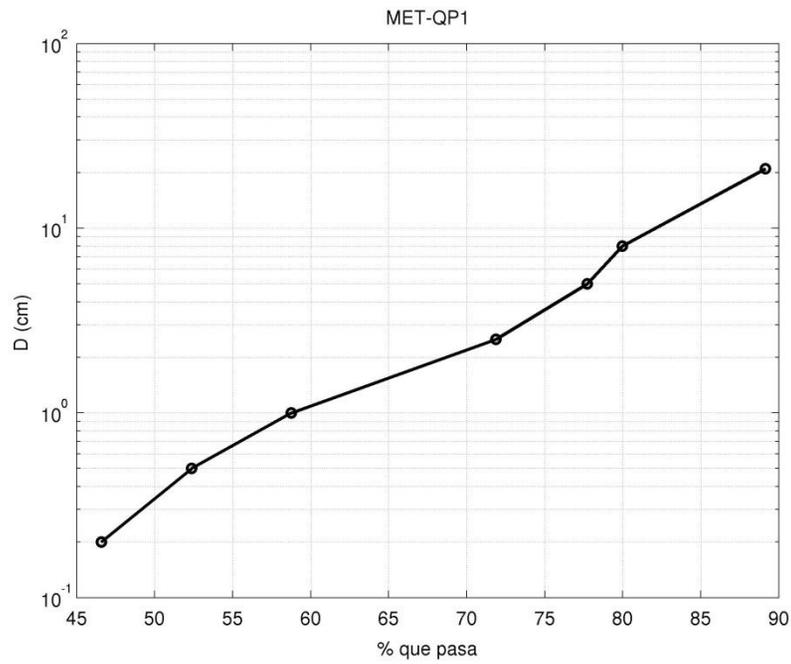


Figura 4.5 Curva granulométrica MET-QP1.

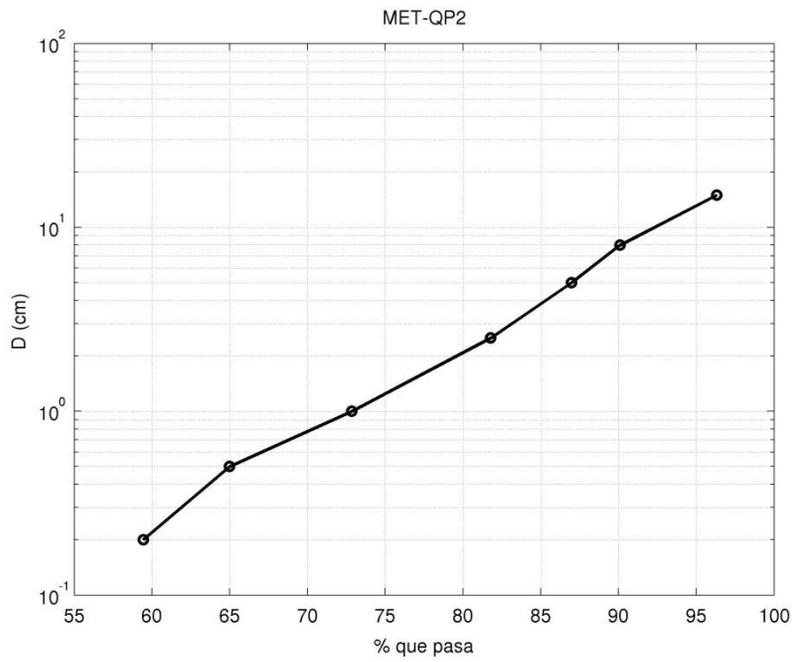


Figura 4.6 Curva granulométrica MET-QP2.

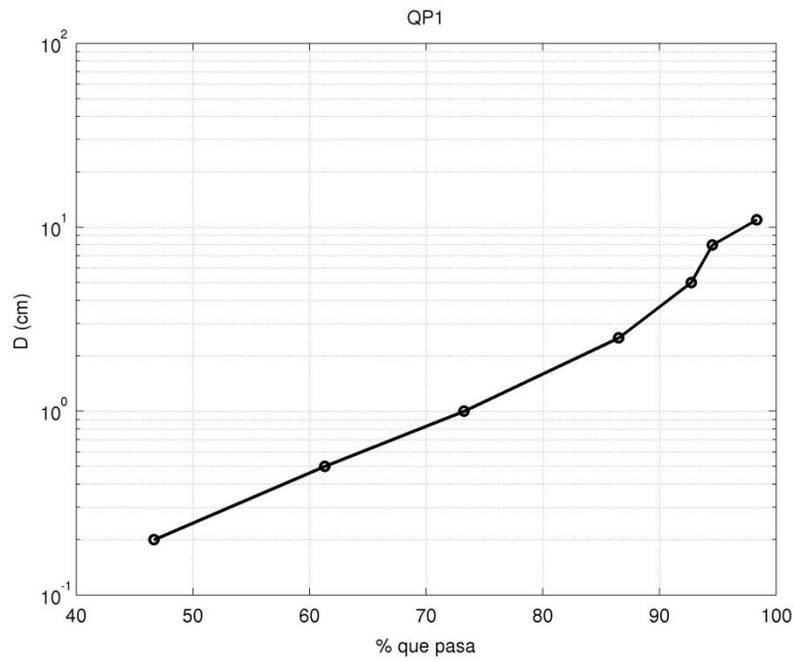


Figura 4.7 Curva granulométrica QP1.

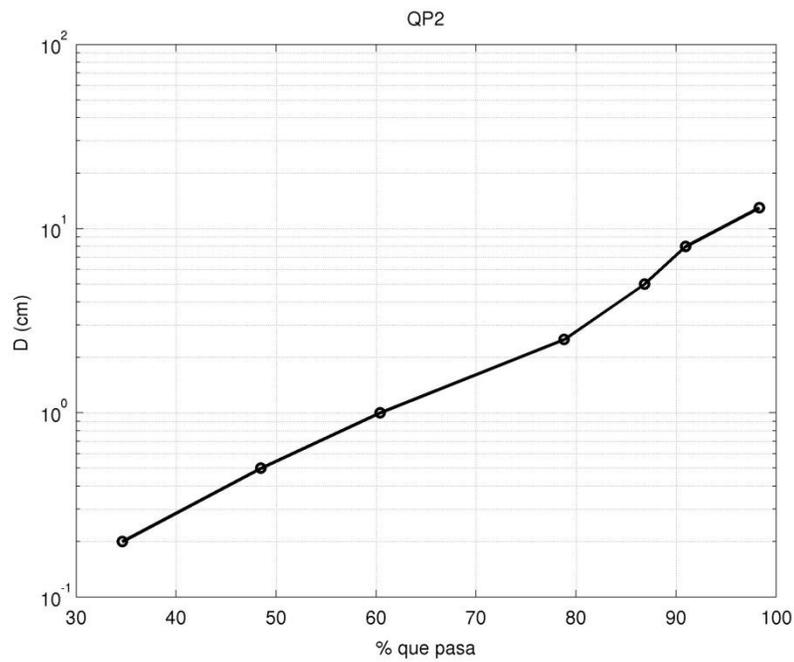


Figura 4.8 Curva granulométrica QP2.

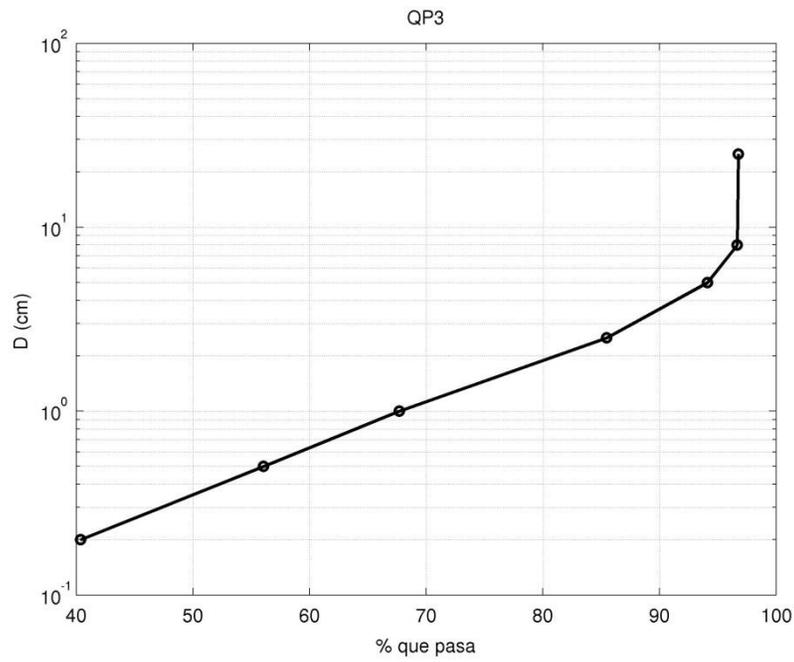


Figura 4.9 Curva granulométrica QP3.

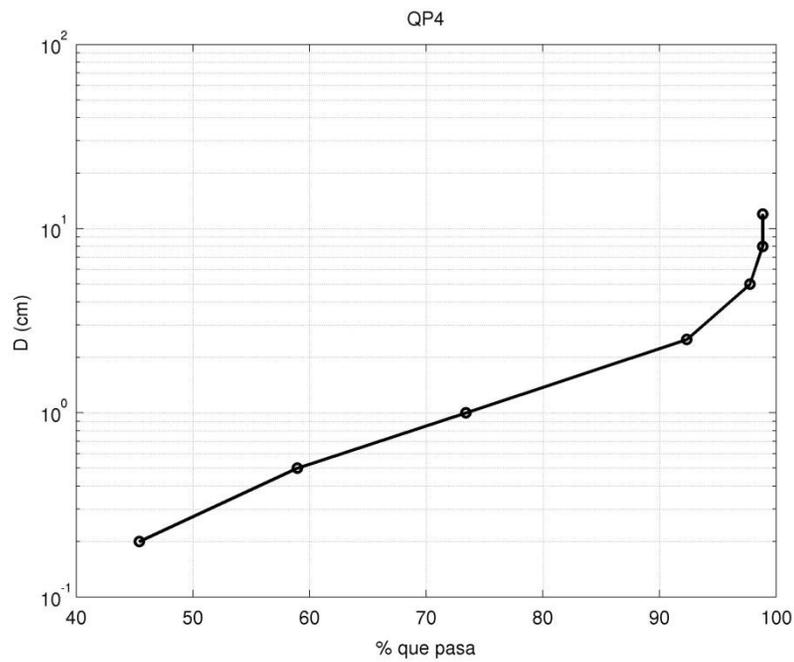


Figura 4.10 Curva granulométrica QP4.

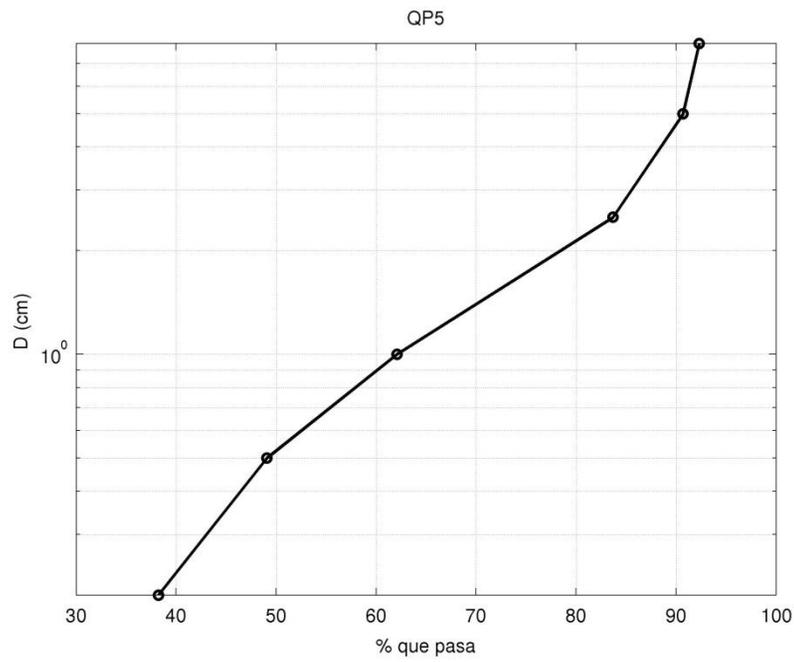


Figura 4.11 Curva granulométrica QP5.

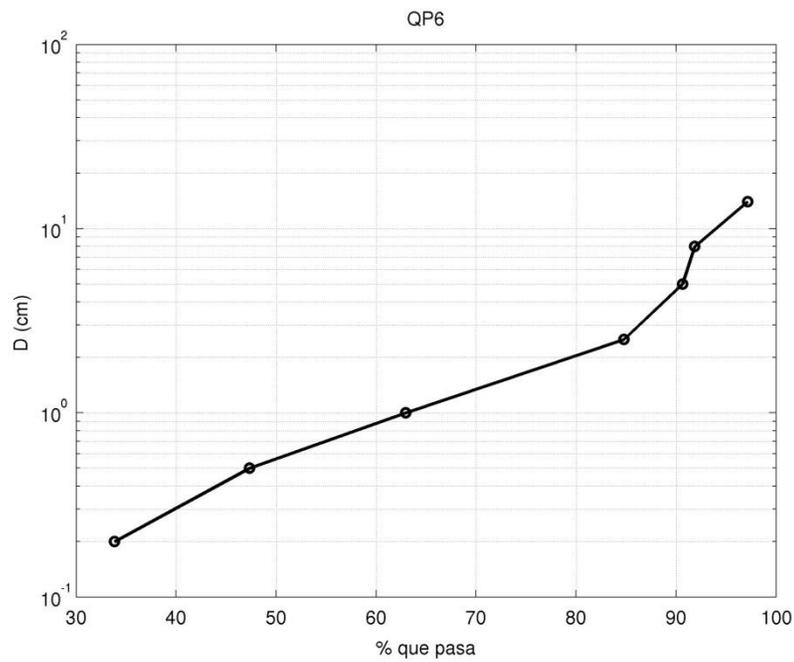


Figura 4.12 Curva granulométrica QP6.

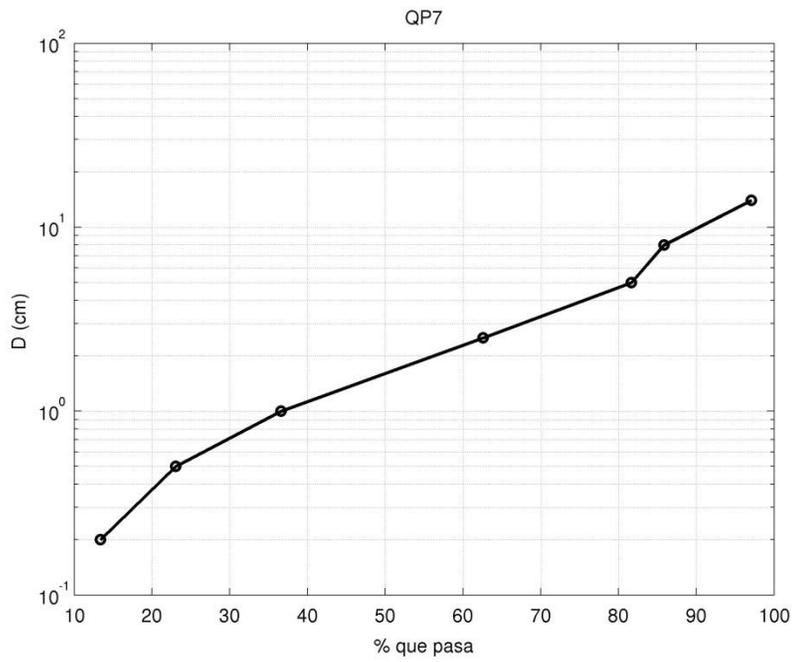


Figura 4.13 Curva granulométrica QP7.

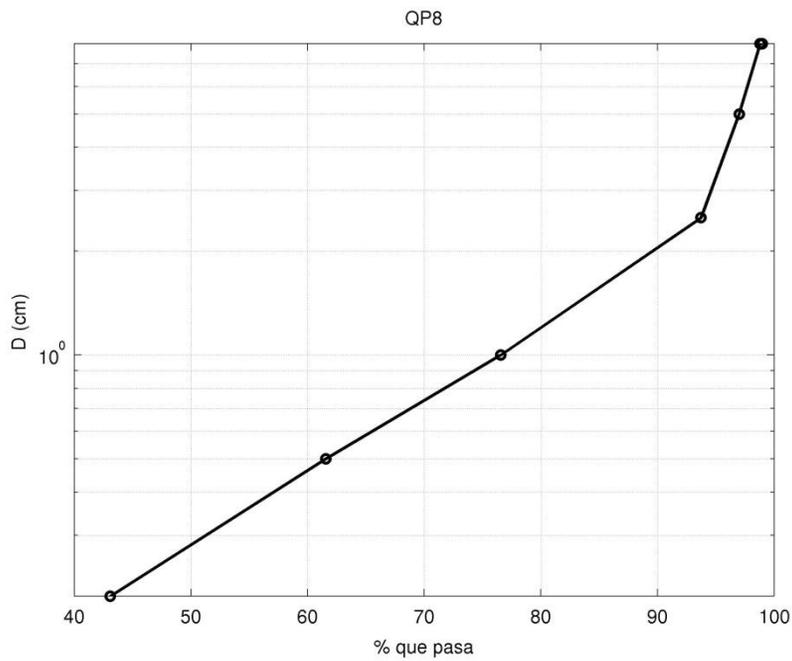


Figura 4.14 Curva granulométrica QP8.

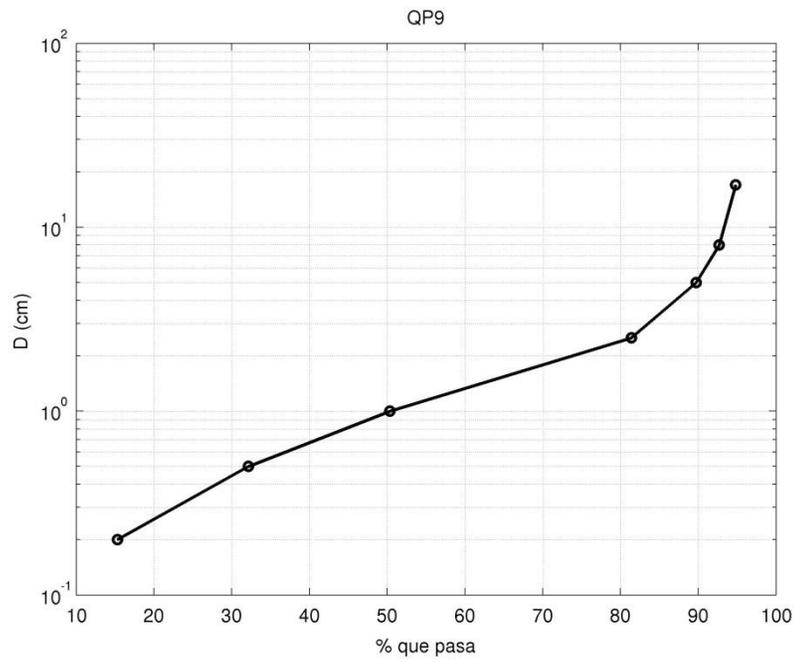


Figura 4.15 Curva granulométrica Q9.

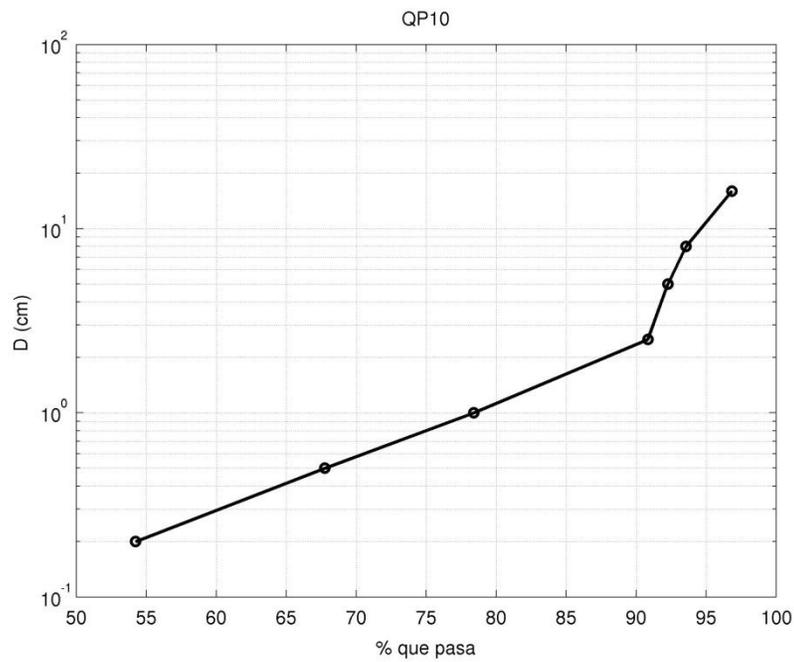


Figura 4.16 Curva granulométrica Q10.

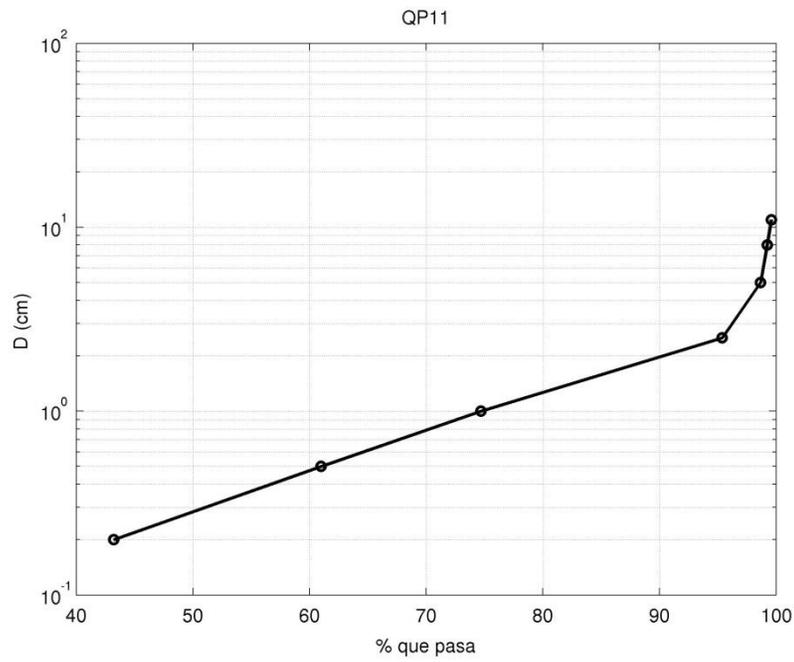


Figura 4.17 Curva granulométrica Q11.

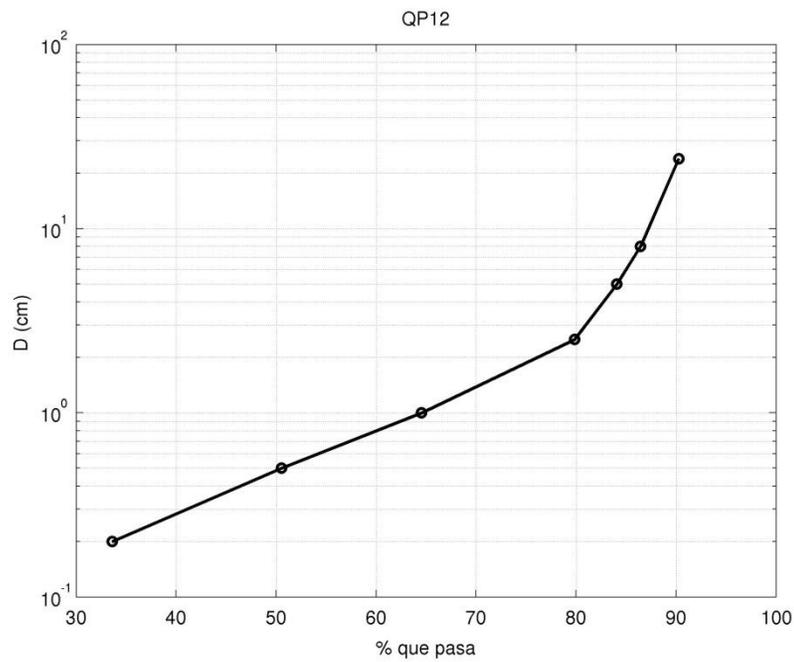


Figura 4.18 Curva granulométrica Q12.

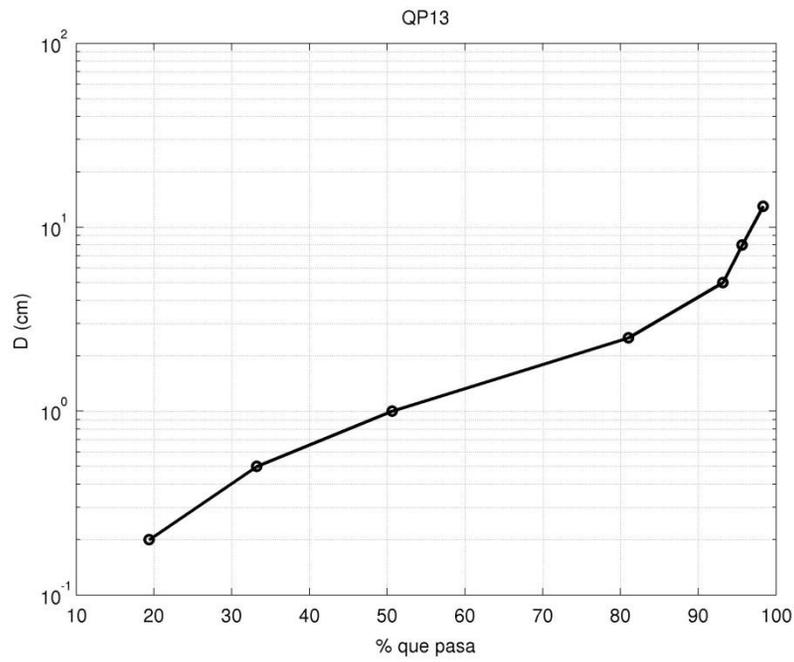


Figura 4.19 Curva granulométrica Q13.

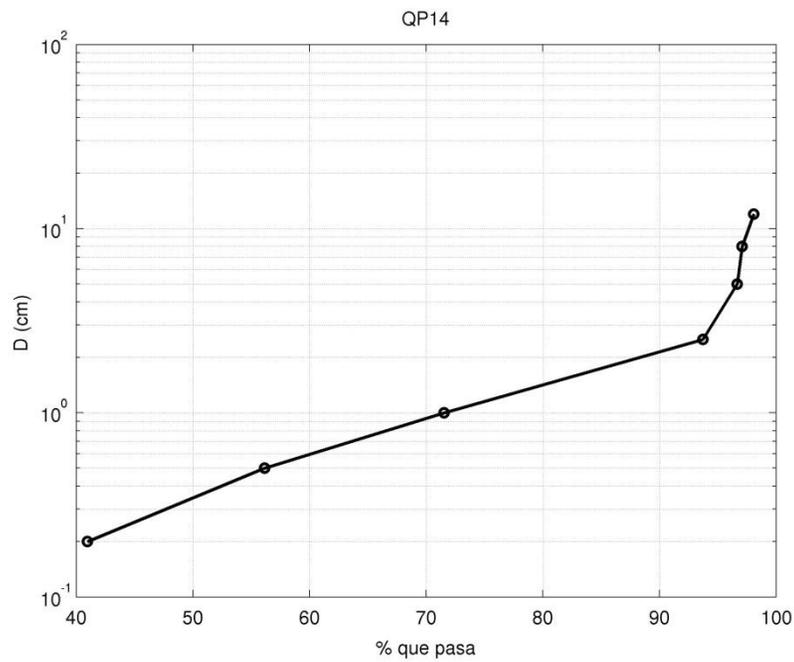


Figura 4.20 Curva granulométrica Q14.

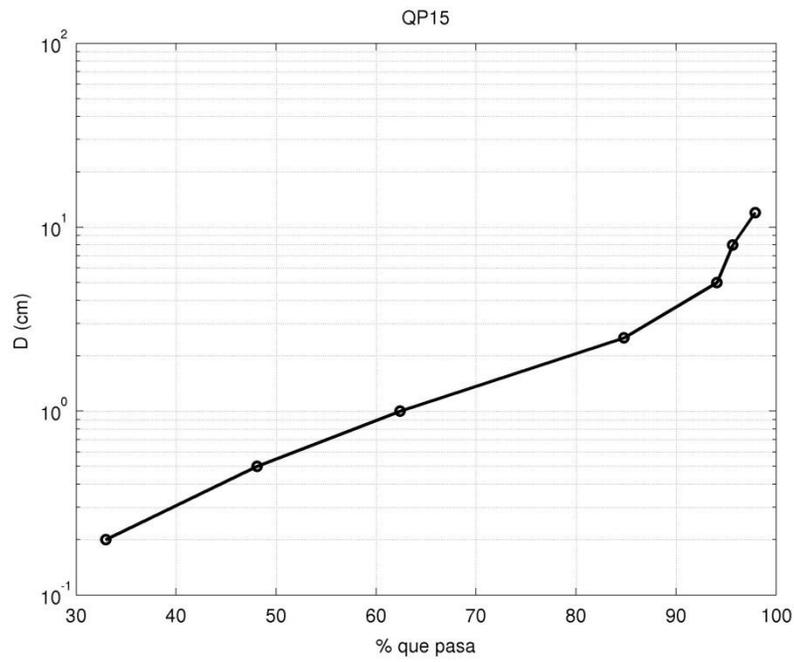


Figura 4.21 Curva granulométrica Q15.

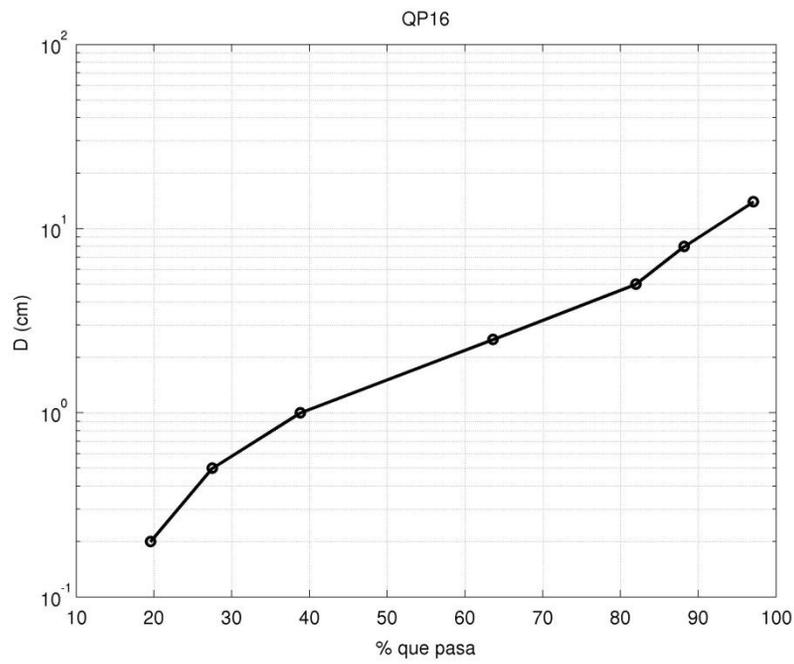


Figura 4.22 Curva granulométrica Q16.

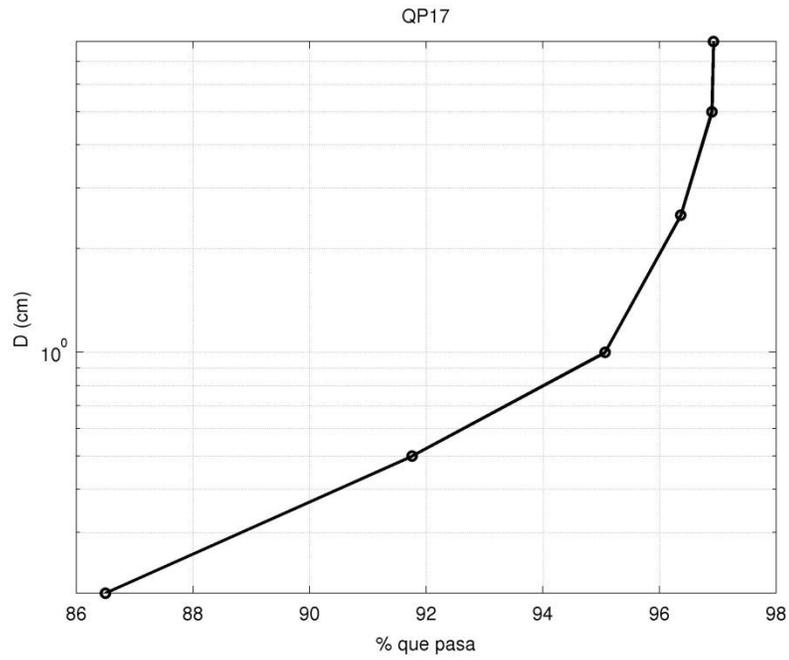


Figura 4.23 Curva granulométrica Q17.

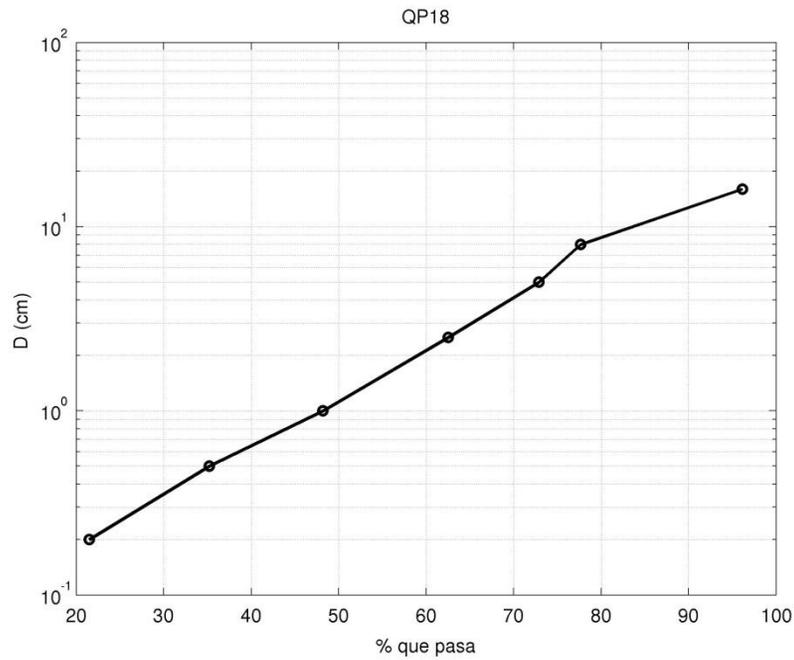


Figura 4.24 Curva granulométrica Q18.

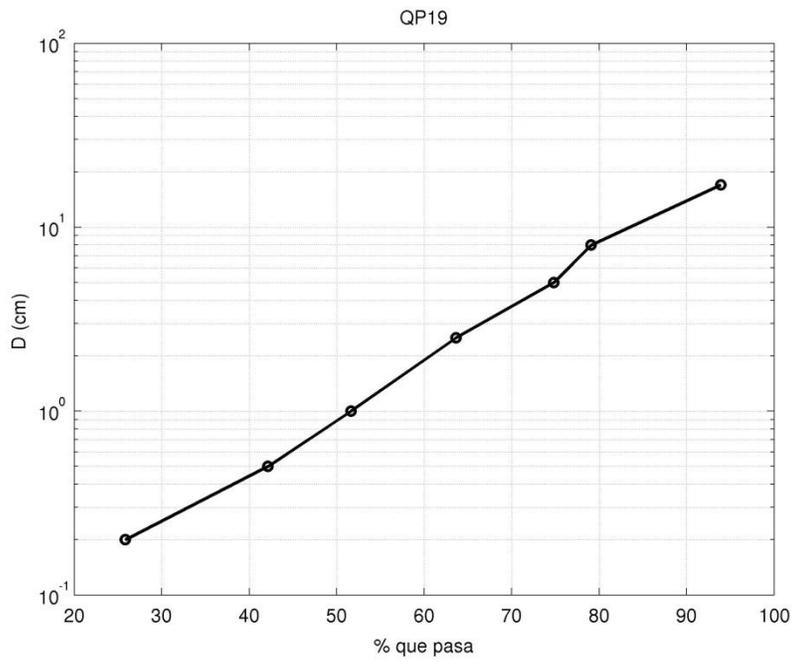


Figura 4.25 Curva granulométrica Q19.

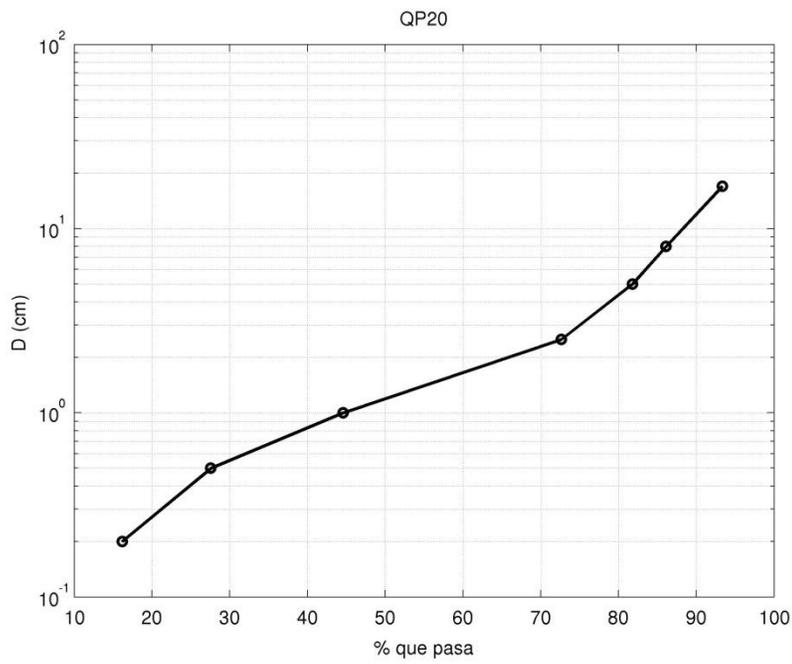


Figura 4.26 Curva granulométrica Q20.

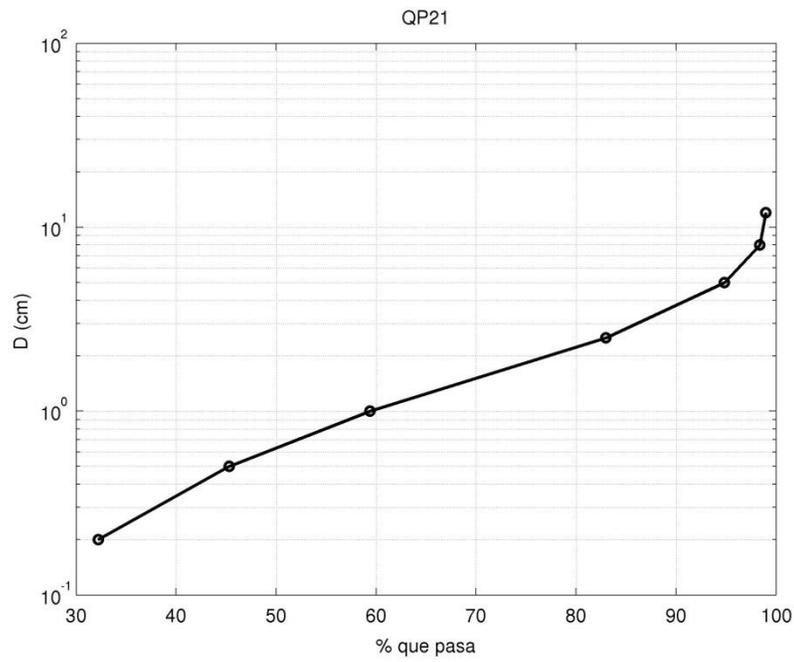


Figura 4.27 Curva granulométrica Q21.

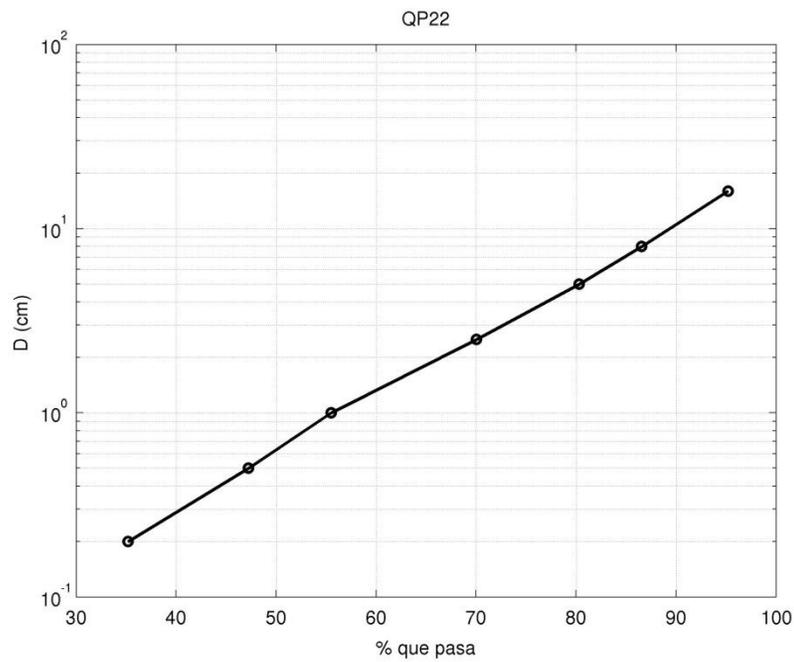


Figura 4.28 Curva granulométrica Q22.

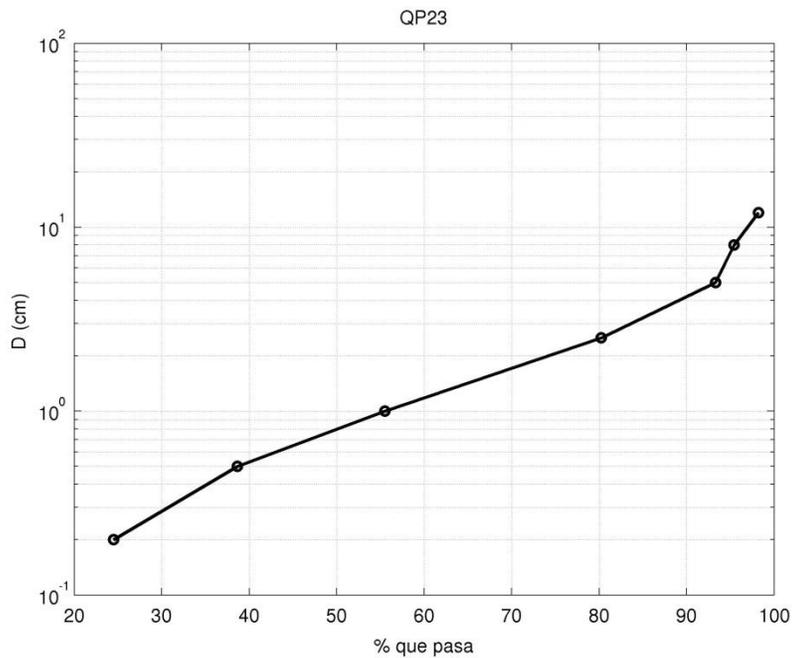


Figura 4.29 Curva granulométrica Q23.

Tabla 4.3 Diámetros característicos en puntos de Quebrada Paipote. En algunos casos no fue posible obtener el diámetro particular desde la curva granulométrica obtenida, por lo que el casillero vacío.

Punto	d50 (cm)	d84 (cm)	d90 (cm)
MET-QP1	0.38	13.72	-
MET-QP2	-	3.57	7.91
QP1	0.27	2.22	3.91
QP2	0.56	4.12	7.31
QP3	0.38	2.38	3.81
QP4	0.30	1.84	2.31
QP5	0.54	2.61	4.75
QP6	0.59	2.45	4.73
QP7	1.77	6.68	10.22
QP8	0.31	1.65	2.17
QP9	0.99	3.29	5.29
QP10	-	1.68	2.40
QP11	0.31	1.67	2.11
QP12	0.49	4.95	22.91

Punto	d50 (cm)	d84 (cm)	d90 (cm)
QP13	0.98	3.12	4.35
QP14	0.38	1.84	2.25
QP15	0.57	2.45	3.90
QP16	1.68	5.98	9.23
QP17	-	0.19	0.40
QP18	1.19	10.75	13.34
QP19	0.91	10.99	14.63
QP20	1.29	6.55	12.86
QP21	0.67	2.71	3.98
QP22	0.67	6.77	11.19
QP23	0.84	3.22	4.37

4.1.2 Resultados Salado Alto

Los resultados del levantamiento de calicatas en Salado Alto se presentan en la Figura 4.30 a la Figura 4.54, mientras que en la Tabla 4.4 se resumen los diámetros característicos de cada calicata. Las planillas de datos con el procesamiento de la información se adjuntan en los anexos digitales de este informe.

Se observa que la distribución de granos es bastante homogénea a lo largo del eje longitudinal del río Salado Alto. El relleno aluvial del río está compuesto principalmente por arenas y arcillas, con diámetros medios característicos de $d_{50}=1,5\text{cm}$, $d_{84}=8,3\text{cm}$ y $d_{90}=9,9\text{cm}$. En consecuencia, a partir de las curvas granulométricas se infiere que si bien el lecho de la cuenca de Salado Alto tendería a la erosión, es menos erosionable que el lecho de Quebrada Paipote, por cuanto está constituido por material más grueso.

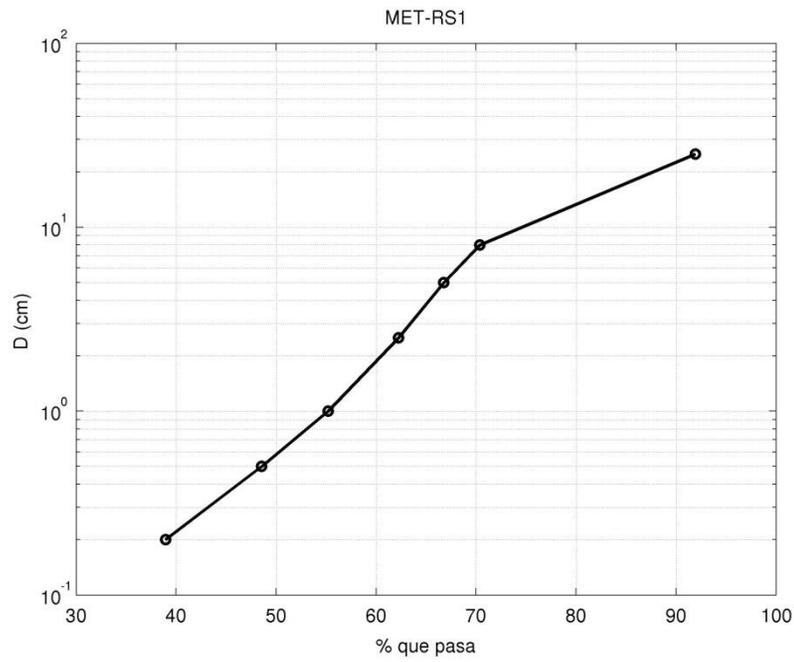


Figura 4.30 Curva granulométrica MET-RS1.

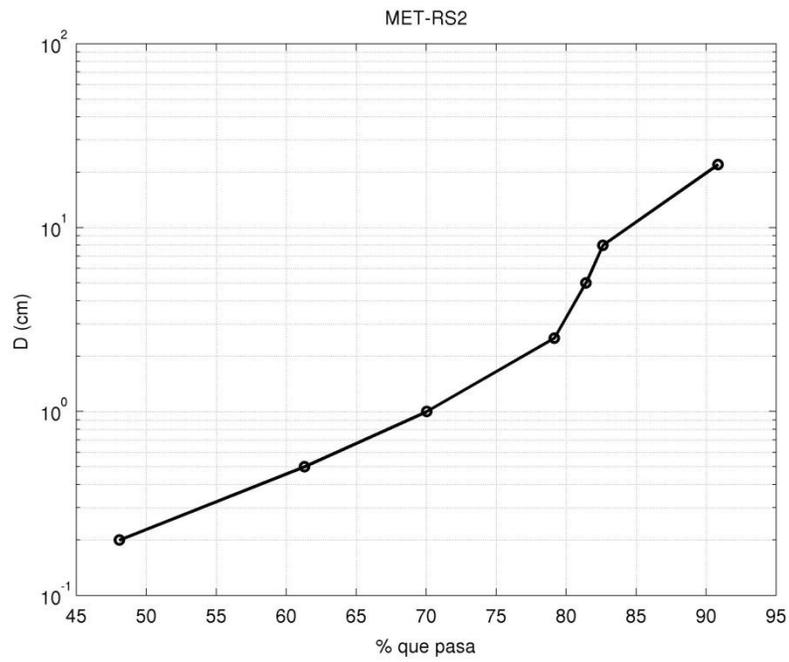


Figura 4.31 Curva granulométrica MET-RS2.

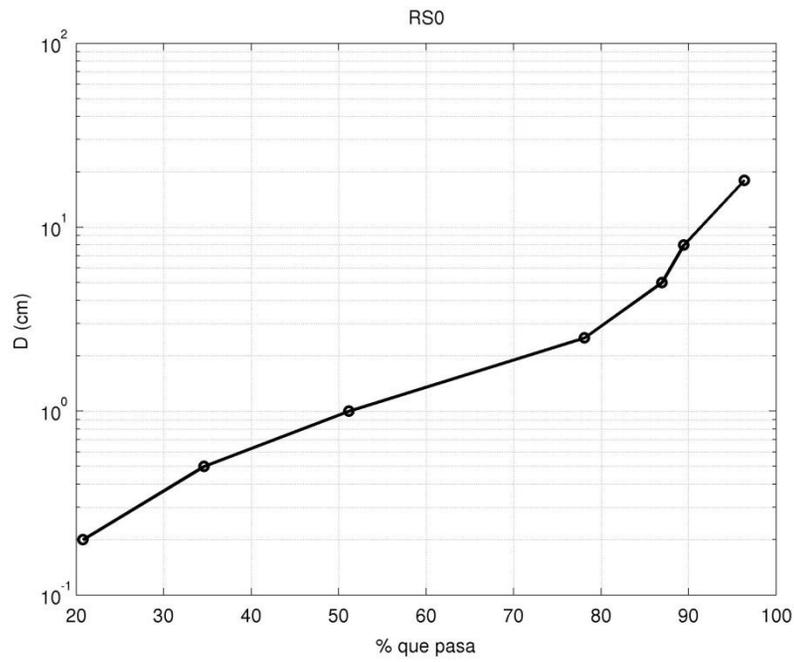


Figura 4.32 Curva granulométrica RS0.

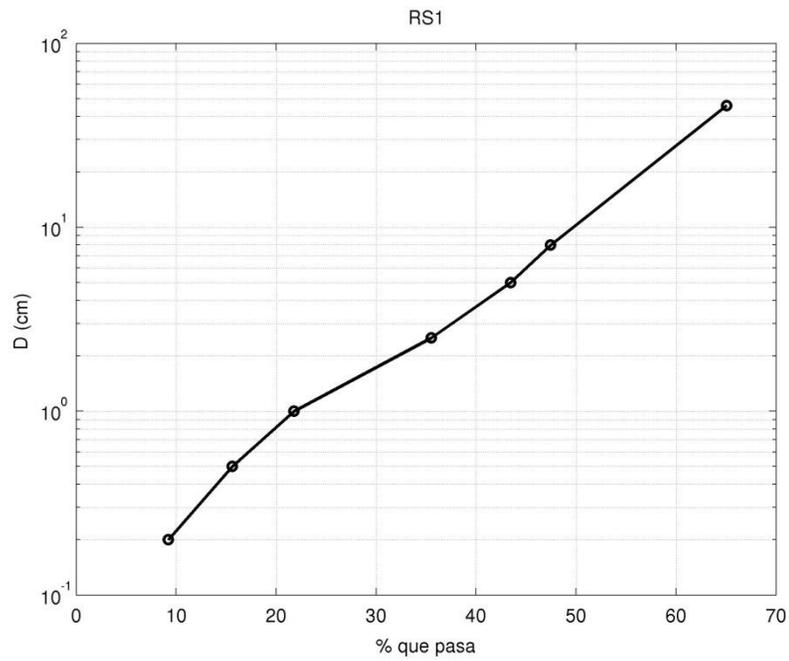


Figura 4.33 Curva granulométrica RS1.

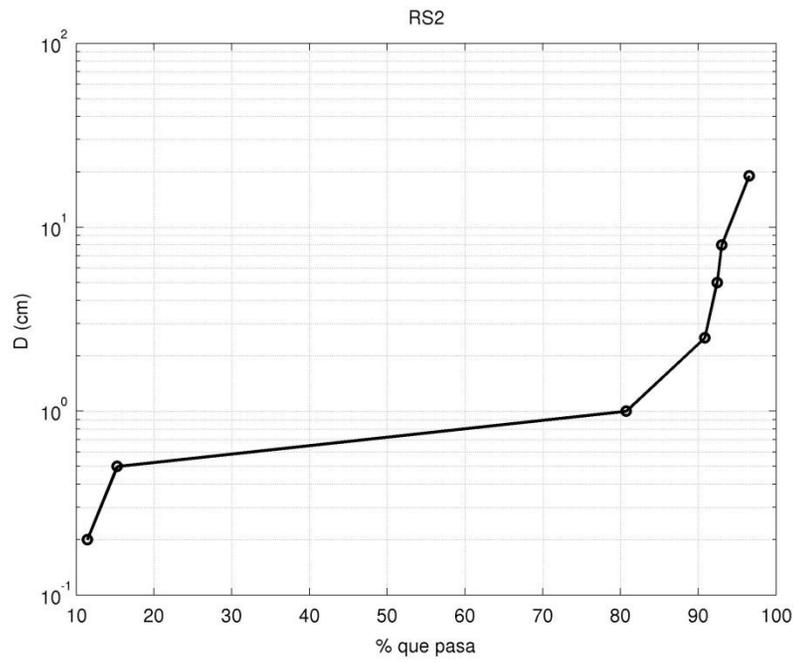


Figura 4.34 Curva granulométrica RS2.

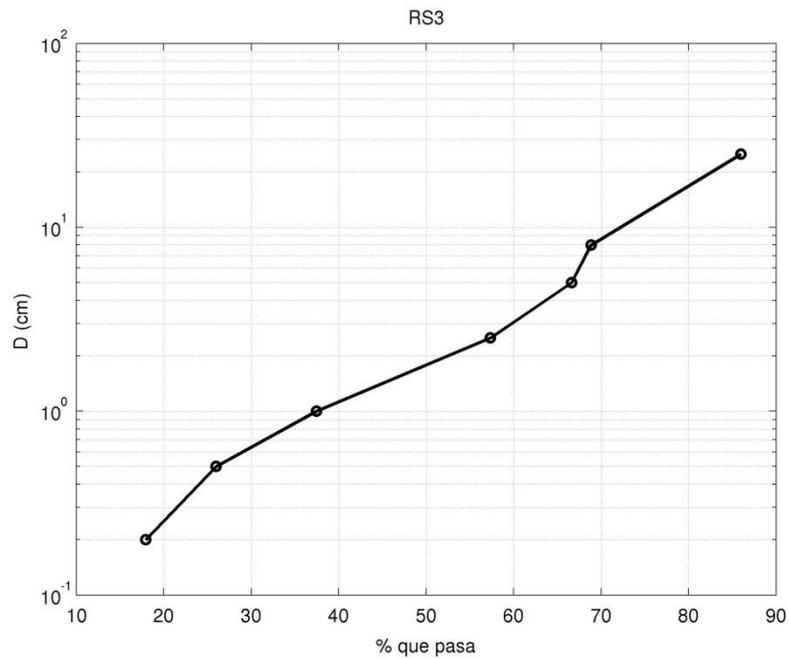


Figura 4.35 Curva granulométrica RS3.

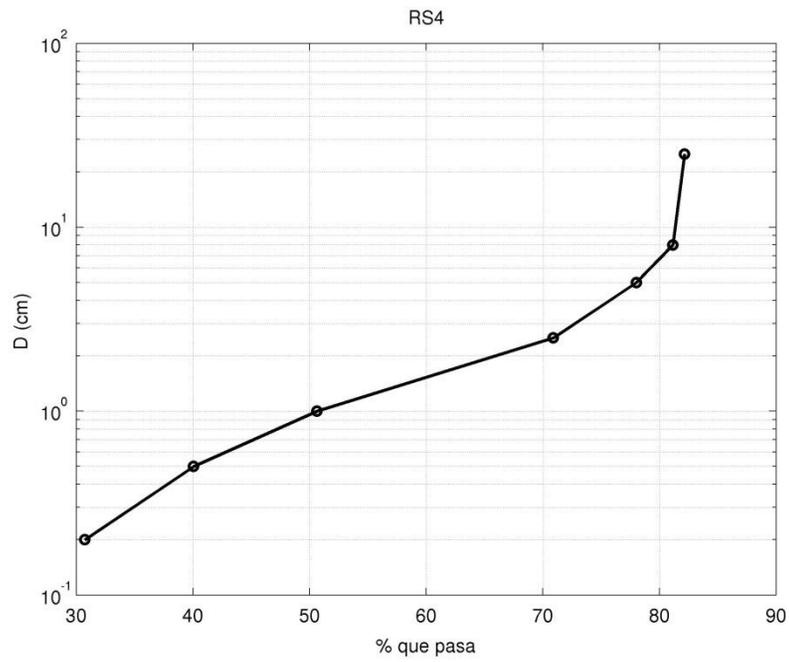


Figura 4.36 Curva granulométrica RS4.

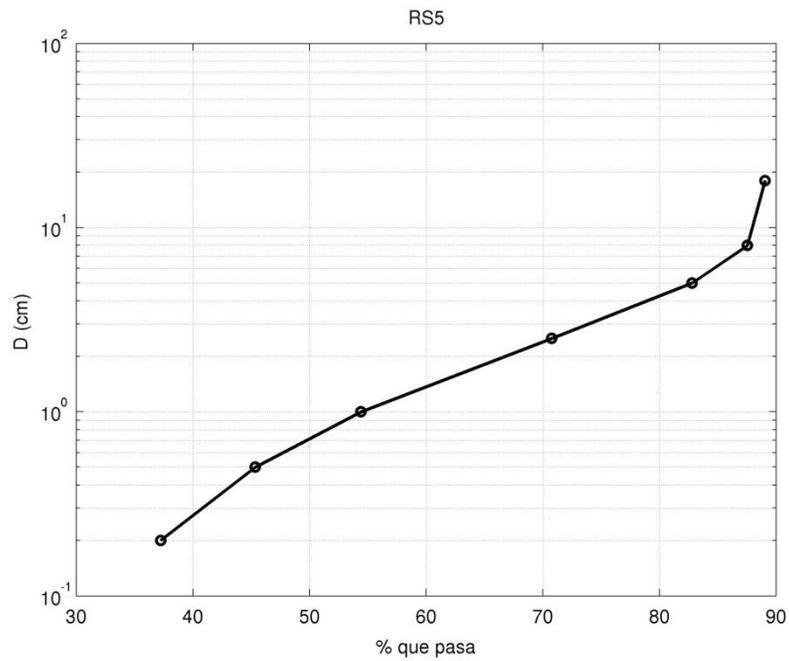


Figura 4.37 Curva granulométrica RS5.

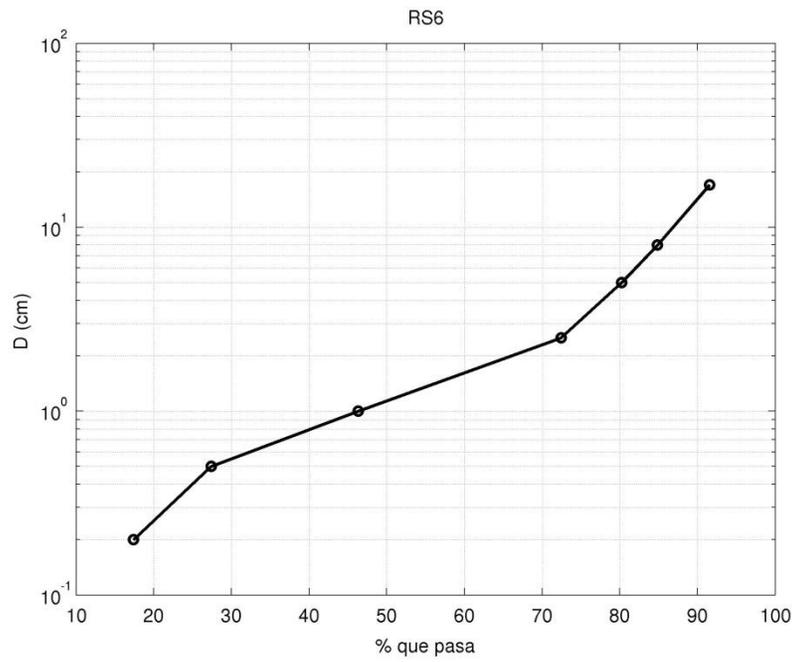


Figura 4.38 Curva granulométrica RS6.

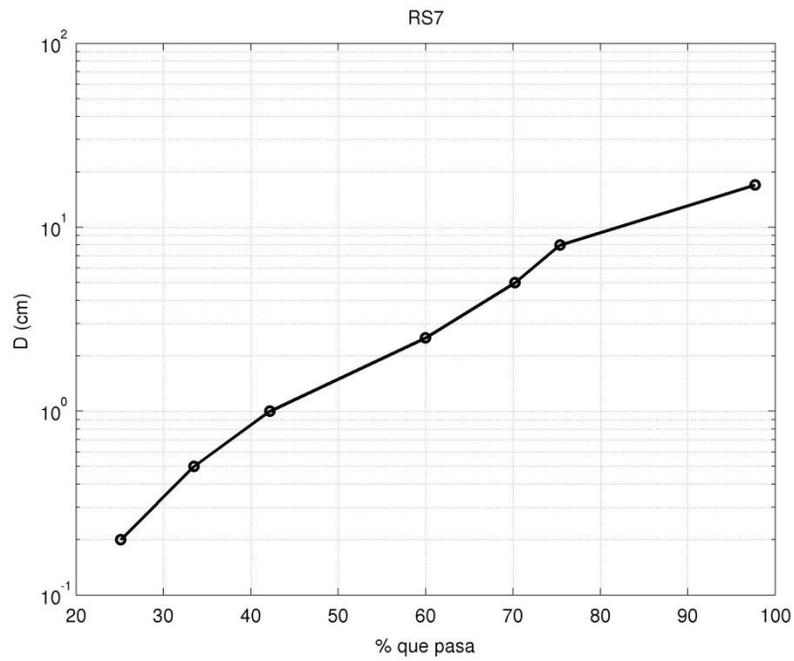


Figura 4.39 Curva granulométrica RS7.

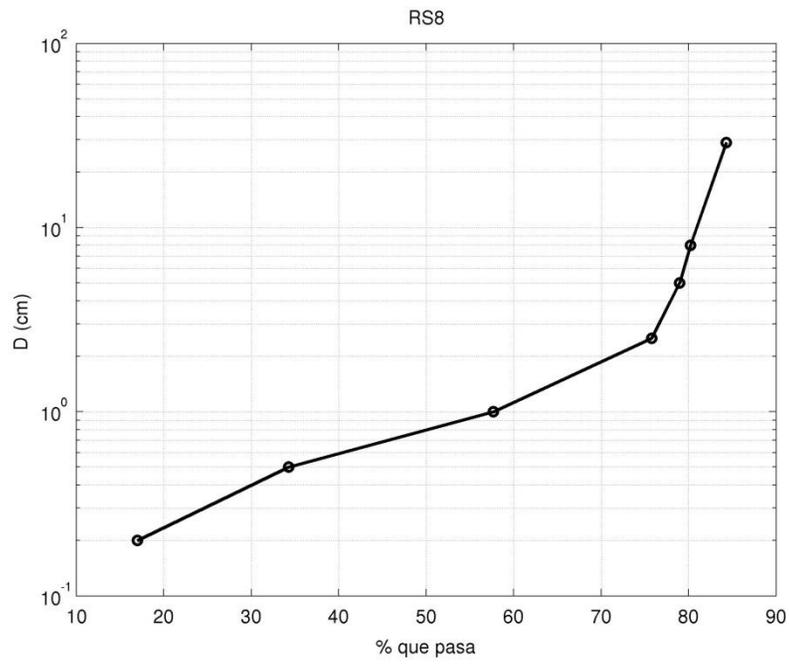


Figura 4.40 Curva granulométrica RS8.

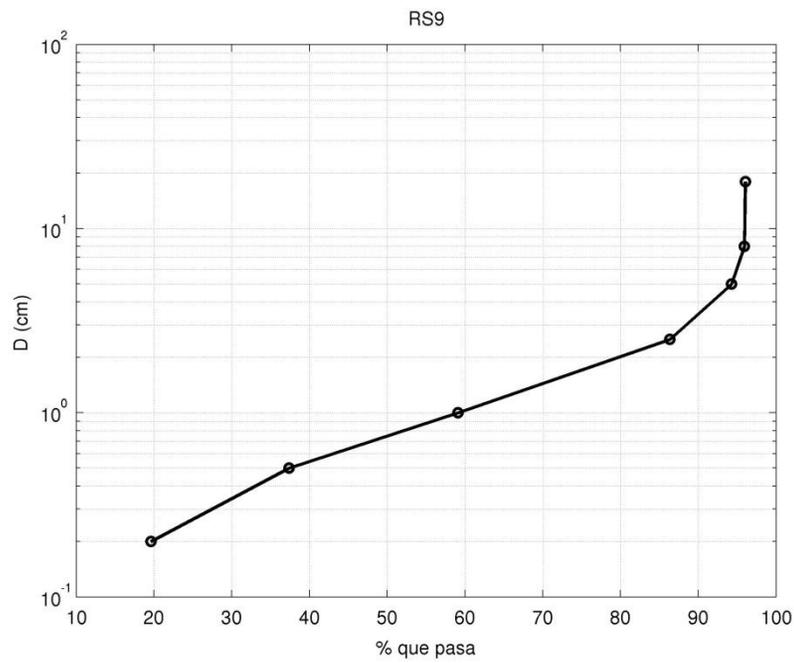


Figura 4.41 Curva granulométrica RS9.

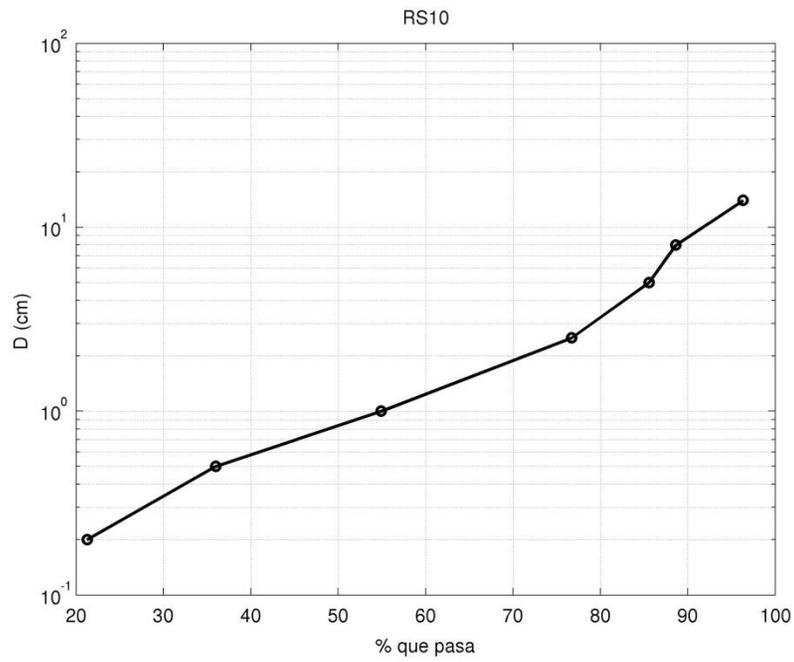


Figura 4.42 Curva granulométrica RS10.

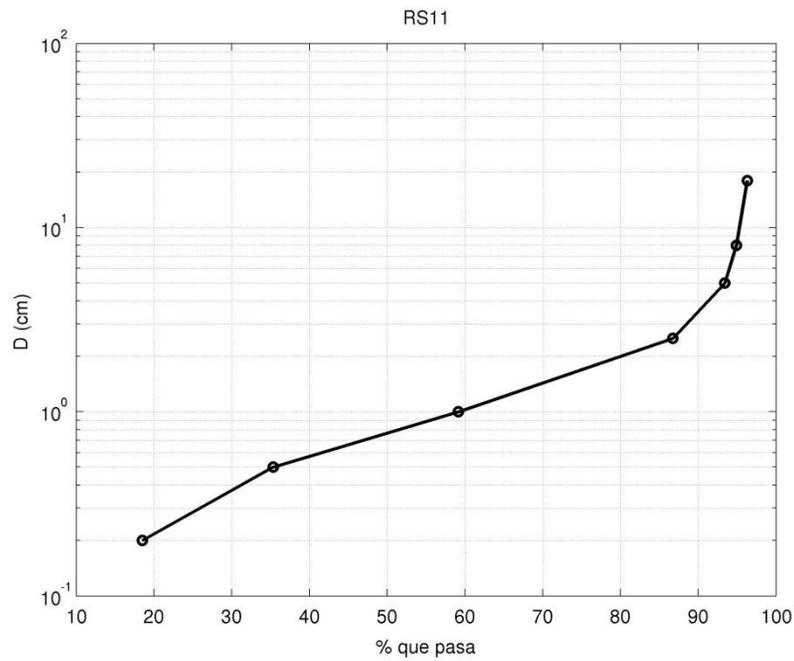


Figura 4.43 Curva granulométrica RS11.

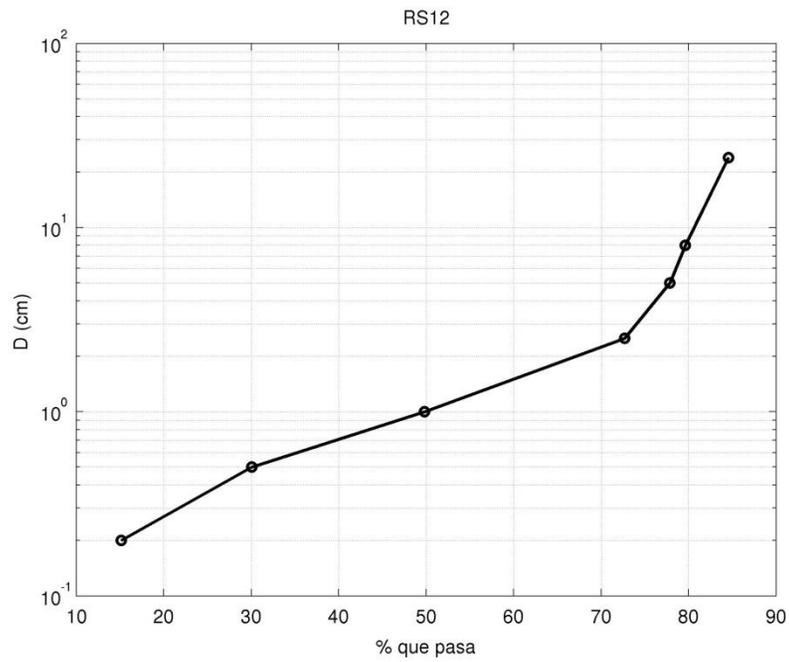


Figura 4.44 Curva granulométrica RS12.

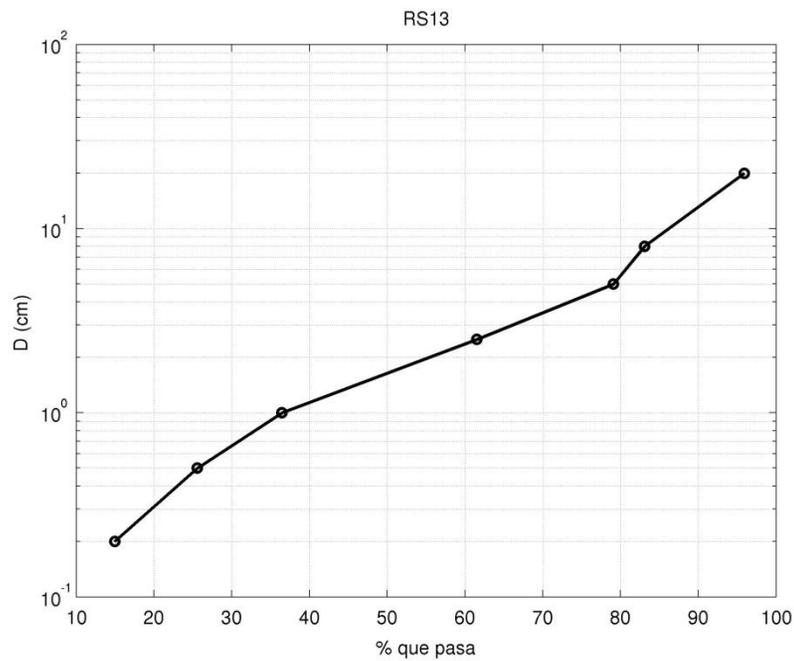


Figura 4.45 Curva granulométrica RS13.

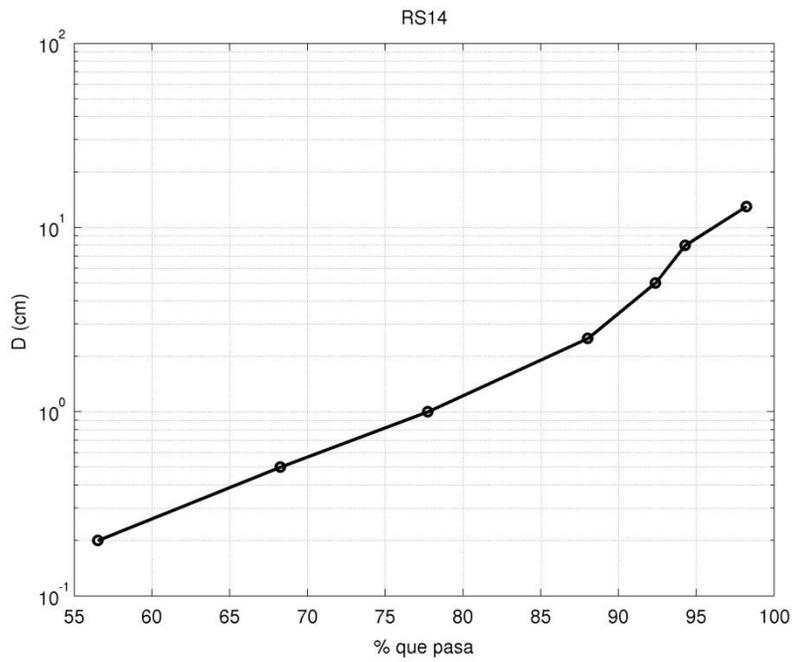


Figura 4.46 Curva granulométrica RS14.

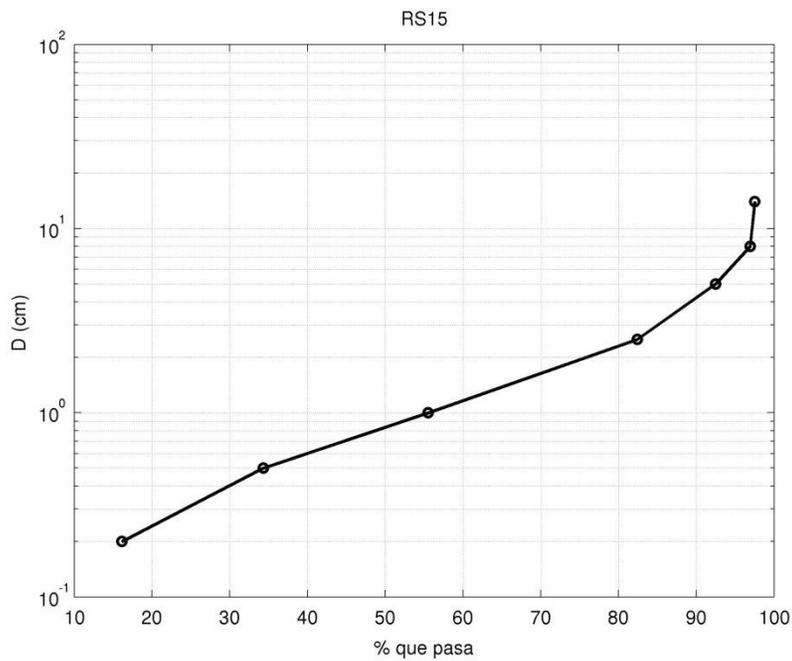


Figura 4.47 Curva granulométrica RS15.

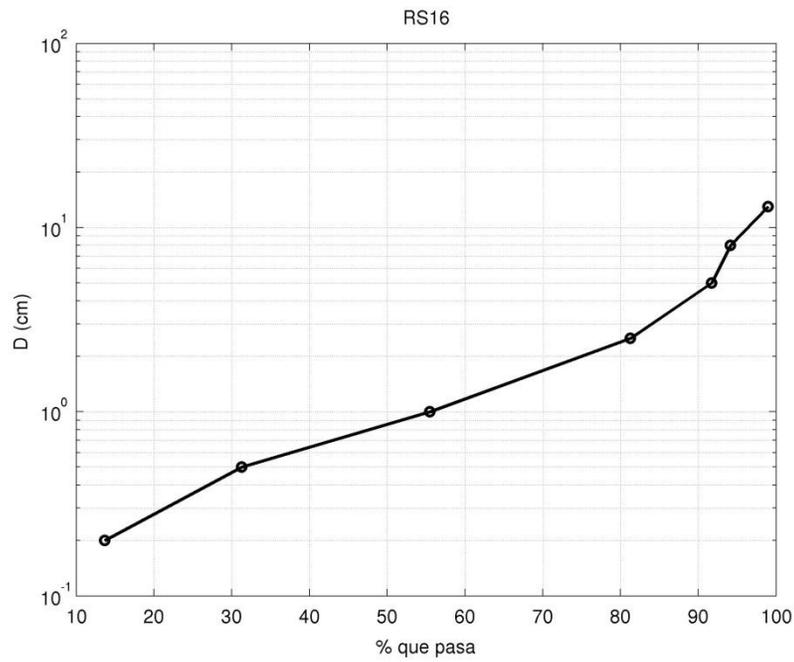


Figura 4.48 Curva granulométrica RS16.

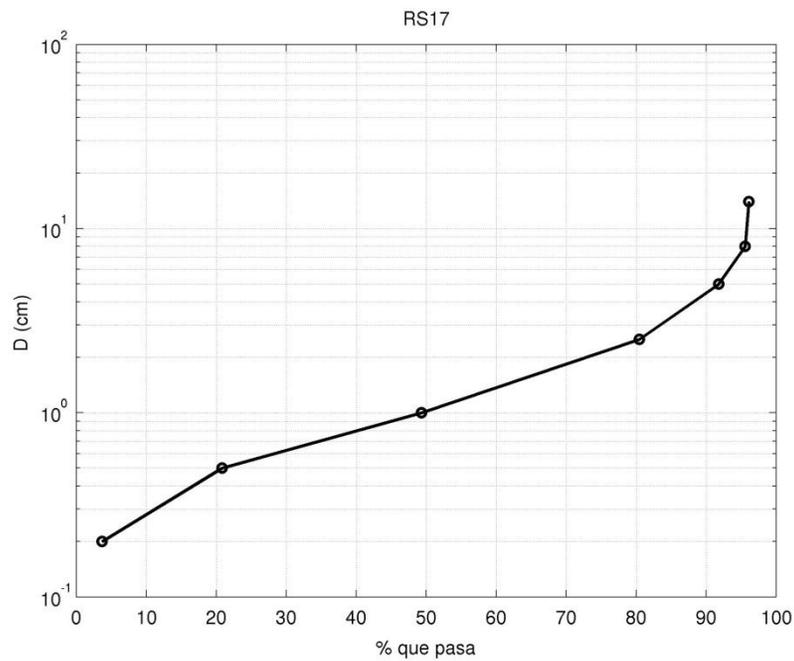


Figura 4.49 Curva granulométrica RS17.

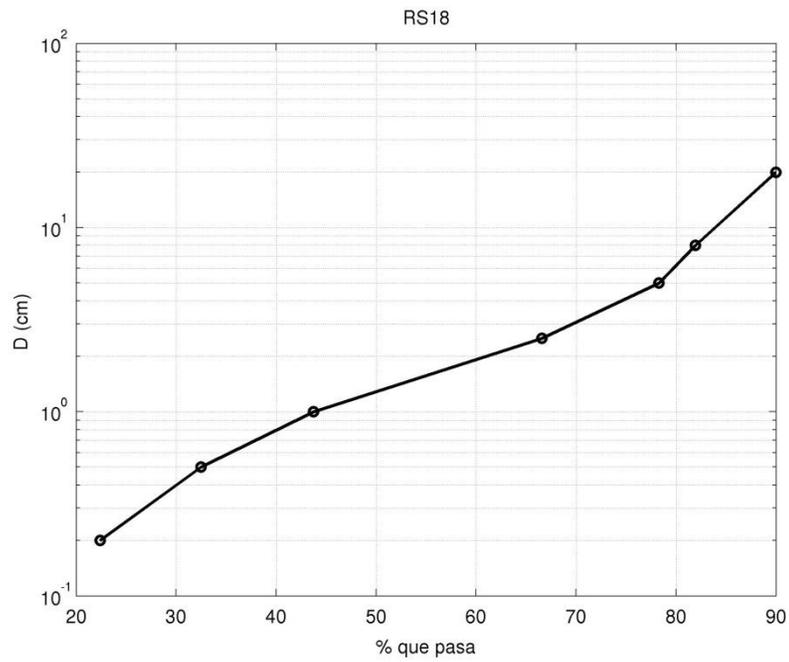


Figura 4.50 Curva granulométrica RS18.

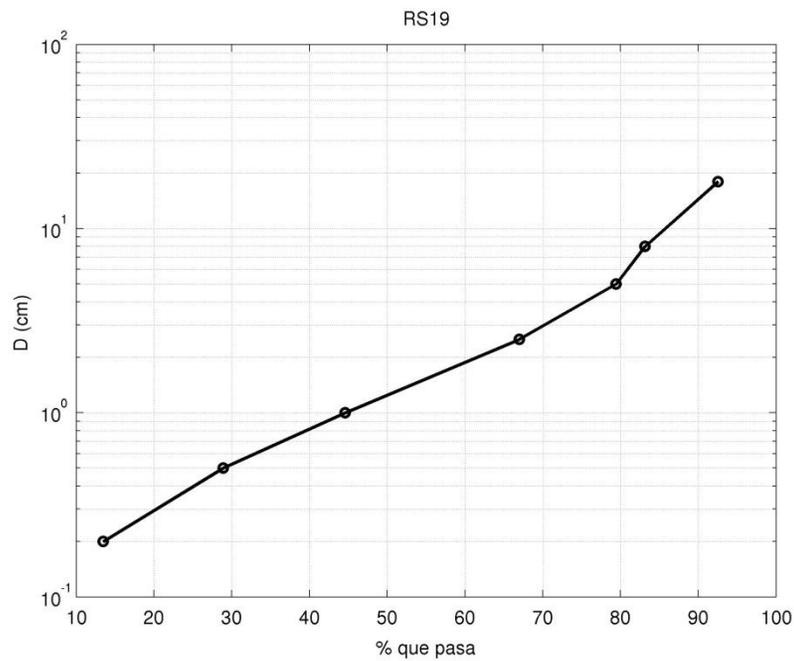


Figura 4.51 Curva granulométrica RS19.

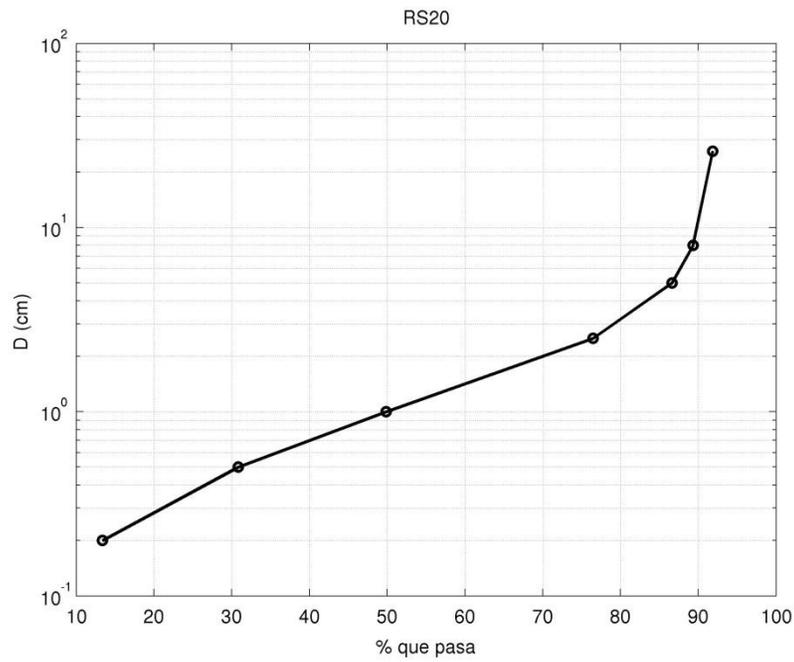


Figura 4.52 Curva granulométrica RS20.

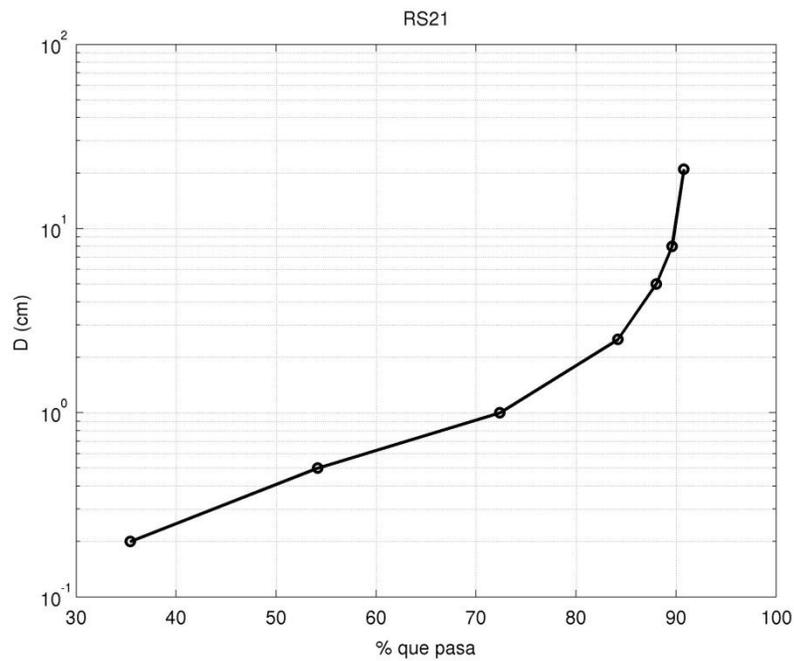


Figura 4.53 Curva granulométrica RS21.

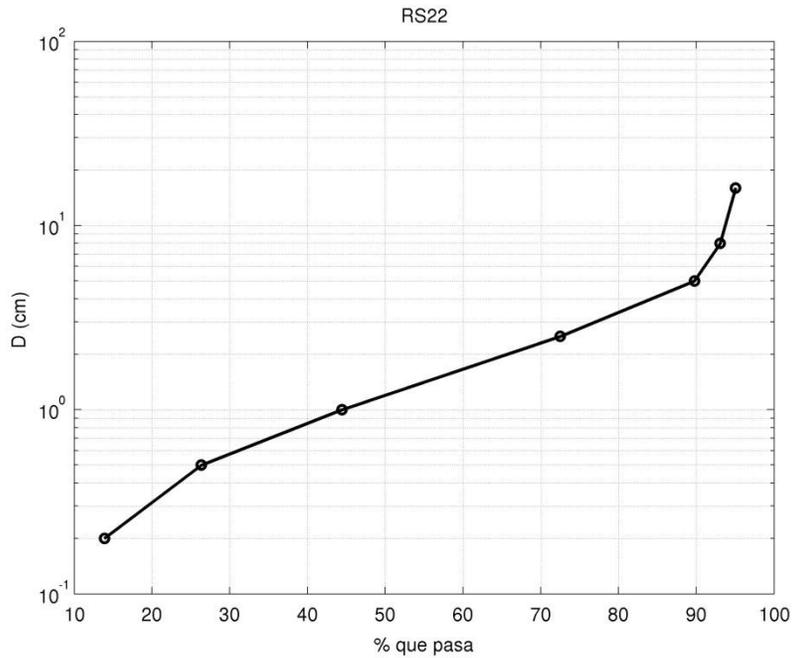


Figura 4.54 Curva granulométrica RS22.

Tabla 4.4 Diámetros característicos en puntos de Salado Alto. En algunos casos no fue posible obtener el diámetro particular desde la curva granulométrica obtenida, por lo que el casillero vacío.

Punto	d50 (cm)	d84 (cm)	d90 (cm)
MET-RS1	0.61	18.76	23.49
MET-RS2	0.24	10.35	20.54
RS0	0.97	4.16	8.79
RS1	13.50	-	-
RS2	0.77	1.49	2.38
RS3	1.95	23.05	-
RS4	0.97	-	-
RS5	0.76	5.77	-
RS6	1.21	7.45	14.94
RS7	1.66	11.48	13.90
RS8	0.84	27.36	-
RS9	0.79	2.37	3.65
RS10	0.87	4.56	9.08
RS11	0.81	2.35	3.73

Punto	d50 (cm)	d84 (cm)	d90 (cm)
RS12	1.01	22.21	-
RS13	1.81	8.87	14.48
RS14	-	1.91	3.64
RS15	0.87	2.90	4.39
RS16	0.89	3.16	4.59
RS17	1.03	3.28	4.60
RS18	1.41	11.09	-
RS19	1.36	8.91	15.29
RS20	1.01	4.35	12.82
RS21	0.43	2.48	12.60
RS22	1.30	4.17	5.22

4.1 ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

En el mismo sector donde se levantaron los puntos de calicatas se desarrolló ensayos de infiltración con el infiltrómetro de minidisco Decagon, el que se muestra en la Figura 4.55.



Figura 4.55 Infiltrómetro de minidisco Decagon Devices Inc.

De los métodos disponibles para medir la conductividad hidráulica del suelo con un infiltrómetro de minidisco disco, Decagon Devices Inc. recomienda usar el método propuesto por Zhang (1997). Este método necesita medir la infiltración acumulada en el tiempo para poder calcular la conductividad hidráulica del suelo.

Para que el infiltrómetro funcione correctamente, tanto la cámara superior (cámara de burbujeo) como la inferior (reservorio de agua) deben llenarse con agua. La cámara de burbujeo controla la succión y el reservorio contiene un volumen de agua que se infiltrará en el suelo. Una vez que el infiltrómetro se coloca sobre el suelo, la matriz del suelo empezará a succionar el agua del reservorio y a infiltrarse en el suelo. A medida que el nivel del agua desciende, se debe empezar a registrar el volumen a intervalos específicos de tiempo.

Especificaciones

- Infiltrómetro de tensión para determinar la conductividad hidráulica no saturada del suelo.
- El cuerpo del infiltrómetro es un tubo de material acrílico que en la parte inferior lleva un disco semipermeable. En la parte superior dispone de un tubo que permite regular la succión
- Es posible regular la succión sobre la superficie de contacto en un rango: 0,5-6,0cm

4.1.1 Resultados Quebrada de Paipote

Los resultados de las pruebas de infiltración en Quebrada Paipote se presentan en la Tabla 4.5, mientras que las planillas de datos con el procesamiento de la información usando el método propuesto por Zhang (1997) se adjuntan en el pendrive anexo a este informe.

Tabla 4.5 Textura y conductividad hidráulica en los puntos de monitoreo de Quebrada Paipote.

Punto	Textura	k (cm/s)
MET-QP1	arcilla	1.03E-04
MET-QP2	arena	1.37E-02
QP1	arena	1.63E-02
QP2	arena	1.92E-02
QP3	arena	6.16E-03
QP4	limo	1.19E-04
QP5	arcilla arenosa	1.59E-03
QP6	arena	6.27E-03

QP7	arena arcillosa	3.88E-03
QP8	arena arcillosa	1.06E-03
QP9	arena limosa	3.59E-04
QP10	arcilla limosa	2.19E-04
QP11	arcilla limosa	2.19E-04
QP12	arcilla limosa	5.13E-05
QP13	arena arcillosa	3.98E-04
QP14	arena	1.14E-02
QP15	arena	3.28E-03
QP16	arena	2.99E-02
QP17	arena arcillosa	2.18E-03
QP18	arena	7.30E-03
QP19	arcilla	3.23E-04
QP20	arcilla arenosa	2.54E-04
QP21	arcilla arenosa	3.87E-04
QP22	arcilla	1.23E-04
QP23	arcilla	1.45E-04

4.1.1 Resultados Salado Alto

Los resultados de las pruebas de infiltración en Salado Alto se presentan en la Tabla 4.6, mientras que las planillas de datos con el procesamiento de la información usando el método propuesto por Zhang (1997), se adjuntan en el pendrive anexo a este informe.

Tabla 4.6 Textura y conductividad hidráulica en los puntos de monitoreo de Salado Alto

Punto	Textura	k (cm/s)
MET-RS1	arcilla	3.97E-04
MET-RS2	arcilla	3.34E-04
RS0	arena arcillosa	4.75E-03
RS1	arena	7.40E-03
RS2	arena	1.16E-03
RS3	arena	4.97E-04
RS4	arena	1.82E-02

RS5	arena	2.20E-02
RS6	arena	4.98E-03
RS7	arcilla arenosa	9.68E-04
RS8	arcilla arenosa	1.54E-03
RS9	arcilla arenosa	1.75E-03
RS10	arcilla arenosa	2.75E-04
RS11	arcilla arenosa	9.97E-04
RS12	arcilla arenosa	4.07E-05
RS13	arcilla arenosa	1.33E-03
RS14	arcilla	1.23E-04
RS15	arena arcillosa	1.78E-03
RS16	arcilla arenosa	5.51E-04
RS17	arcilla	1.03E-04
RS18	arcilla	5.85E-04
RS19	arcilla	2.96E-04
RS20	arcilla	1.18E-05
RS21	arcilla arenosa	1.87E-03
RS22	arcilla	1.98E-04



ANÁLISIS MORFOLÓGICO

5 ANÁLISIS MORFOLÓGICO

5.1 OBJETIVOS

En las subcuencas de Salado Alto y Quebrada Paipote se requiere describir y mapear:

1. Uso y tipo de suelo.
2. Parámetros de relieve.
3. Parámetros de forma.
4. Parámetros relativos a la red hidrográfica.

5.2 FUENTES DE INFORMACIÓN

Para la caracterización morfológica se debe utilizar 3 fuentes de información:

1. Estudios previos de la DGA.
2. El Catastro de Bosque Nativo III Atacama (CONAF, 2005).
3. Imágenes Aster Gdem.

5.3 METODOLOGÍA

5.3.1 Análisis SIG

La presente metodología para el cálculo de parámetros morfométricos, se basó en el uso de información digital provista por la DGA y el análisis 3D a partir de las curvas de nivel de cada una de las cuencas. Toda la información se procesó sobre el SIG ArcGIS 10, con un sistema de referencia WGS84-19S. El diagrama de la Figura 5.1 presenta los pasos de la metodología.

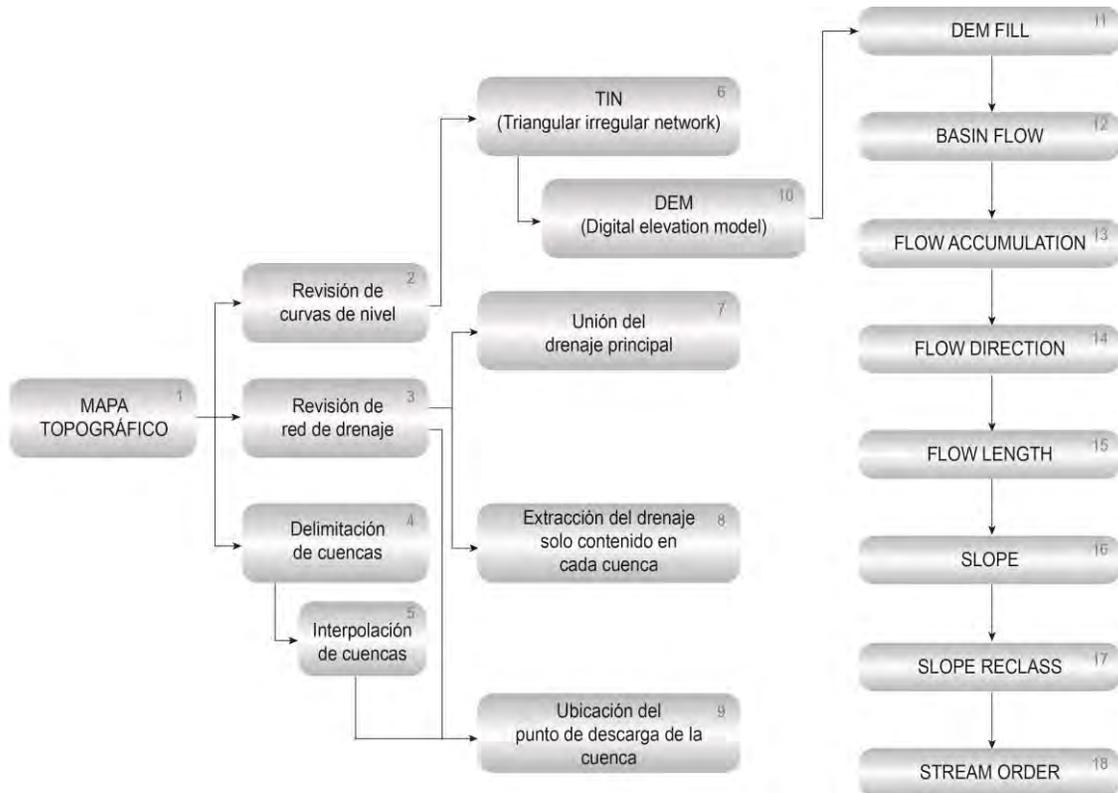


Figura 5.1 Diagrama mostrando los pasos metodológicos del análisis.

5.3.2 Parámetros de relieve

- **Área (A)**
- **Perímetro (P)**
- **Longitud axial (La):** Distancia entre el punto de cierre de la cuenca y el punto más lejano de la cuenca.
- **Ancho promedio (Ap)=A/La**
- **Altura media (h):** diferencia de cotas máxima y mínima dividido por 2.
- **Mapa de pendientes:** Según la clasificación de pendiente de la siguiente tabla:

Pendientes (%)	Tipo de relieve
0-3	Plano
3-12	Suave
12-18	Mediano
18-24	Levemente Accidentado
24-30	Accidentado
>30	Fuerte

- **Curva hipsométrica:** cota media vs porcentaje de área sobre esa cota.

5.3.3 Parámetros de forma.

- **Índice de compacidad (Kc):**

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

donde P es el perímetro y A es el área de la cuenca.

- **Factor de forma (IF)**

$$IF = \frac{Ap}{La}$$

donde $Ap=A/La$ es el ancho promedio de la cuenca, y La es la longitud axial (distancia entre el punto de cierre de la cuenca y el punto más lejano de la cuenca).

5.3.4 Parámetros relativos a la red hidrográfica.

A partir de la descripción geomorfológica y en combinación con el análisis de imágenes satelitales y DEM, se desarrolla un análisis cartográfico que permita determinar áreas, red hídrica, pendientes de los cauces, ancho de los cauces, entre otros parámetros, los que se describen a continuación.

- **Densidad de drenaje (D):**

$$D = \frac{\sum L_i}{A}$$

donde $\sum L_i$ es la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca, y A es el área de la cuenca.

- **Pendiente media del cauce (J)**

$$J = 100 \frac{(h_{max} - h_{min})}{L}$$

donde h_{max} es la cota máxima sobre el curso de agua, h_{min} es la cota mínima, y L es la longitud del cauce principal.

- **Tiempo de concentración (Tc):**

$$Tc = 0,3 \left(\frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76}$$

donde L es la longitud del cauce principal y J es la pendiente definida en la ecuación anterior.

5.1 RESULTADOS

5.1.1 Uso y tipo de suelo

En la Figura 5.2 se presenta el uso y tipo de suelo del área de estudio, mostrando que en las cuencas analizadas el suelo se encuentra prácticamente desprovisto de vegetación.

Revisión de curvas de nivel

Se revisó la altitud de las curvas, que no estén saltadas y que todas posean elevación. El objetivo de esta tarea es que el DEM que se obtenga a partir de esta información contenga información correcta y los posteriores raster de Flujo (Flow) y Acumulación (Accumulation) tengan direcciones de flujo correctas y zonas de acumulación de flujo donde corresponde.

5.1.2 Revisión de red de drenaje

Esta tarea consistió en revisar las líneas de drenaje, que estén unidas sus bifurcaciones y principalmente en unir el curso de agua más importante de cada cuenca, para obtener el valor de la Longitud Axial.

5.1.3 Delimitación de cuencas

Como parte de este estudio se realizó una revisión de las cuencas entregadas por DGA. Esto principalmente para revisar si la línea divisoria de aguas estaba bien trazada y posteriores análisis hidrológicos como el estudio de recarga, tuviesen valores de entrada correctos.

En esta tarea se detectó que la cuenca del río Salado Alto estaba sobredimensionada y que la cuenca de Quebrada Paipote no tenía mayores problemas, como se muestra en la Figura 5.3. Para efectos de este estudio, se decidió trabajar con la delimitación de cuencas de la DGA.

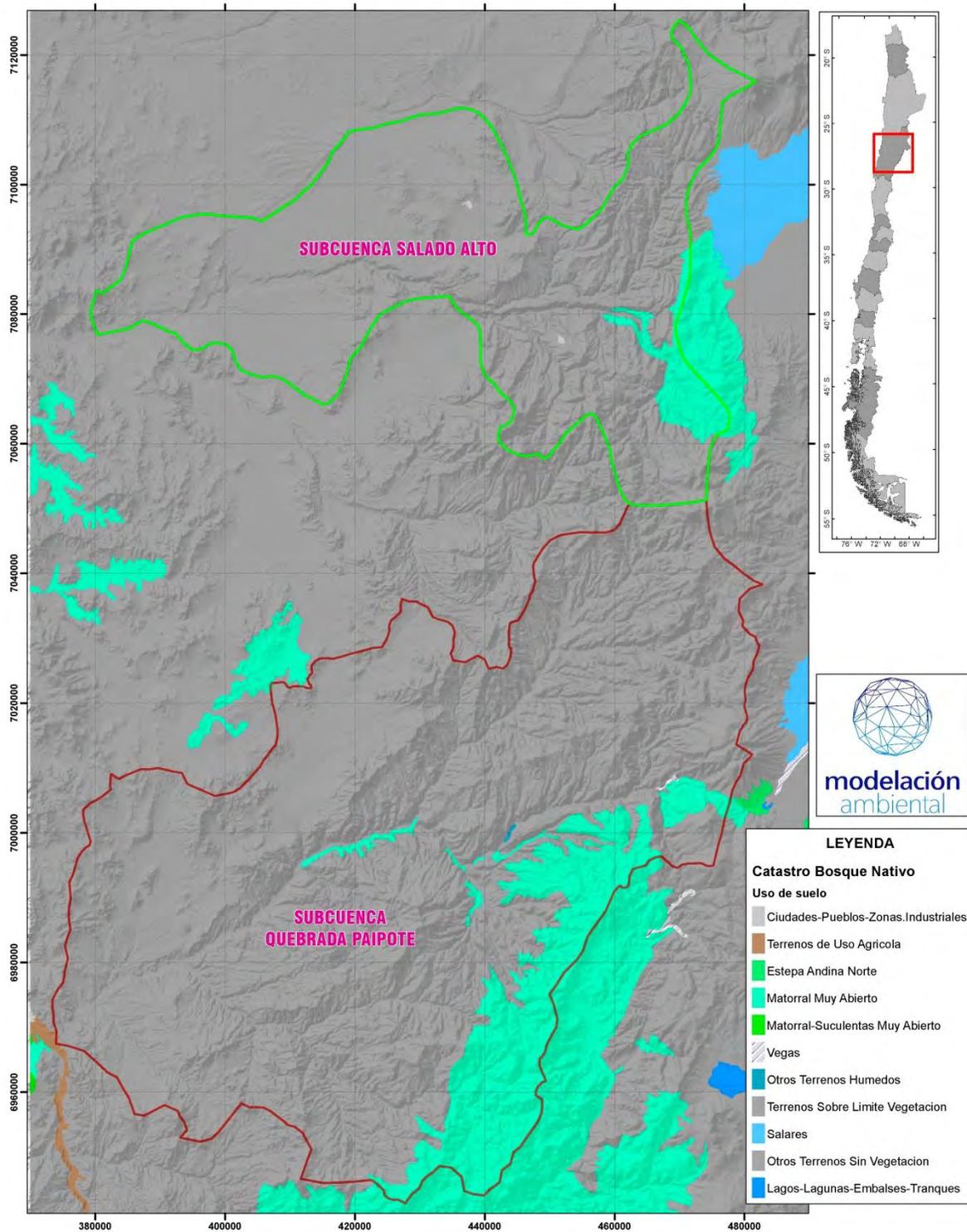


Figura 5.2 Uso y tipo de suelo en el área de estudio.

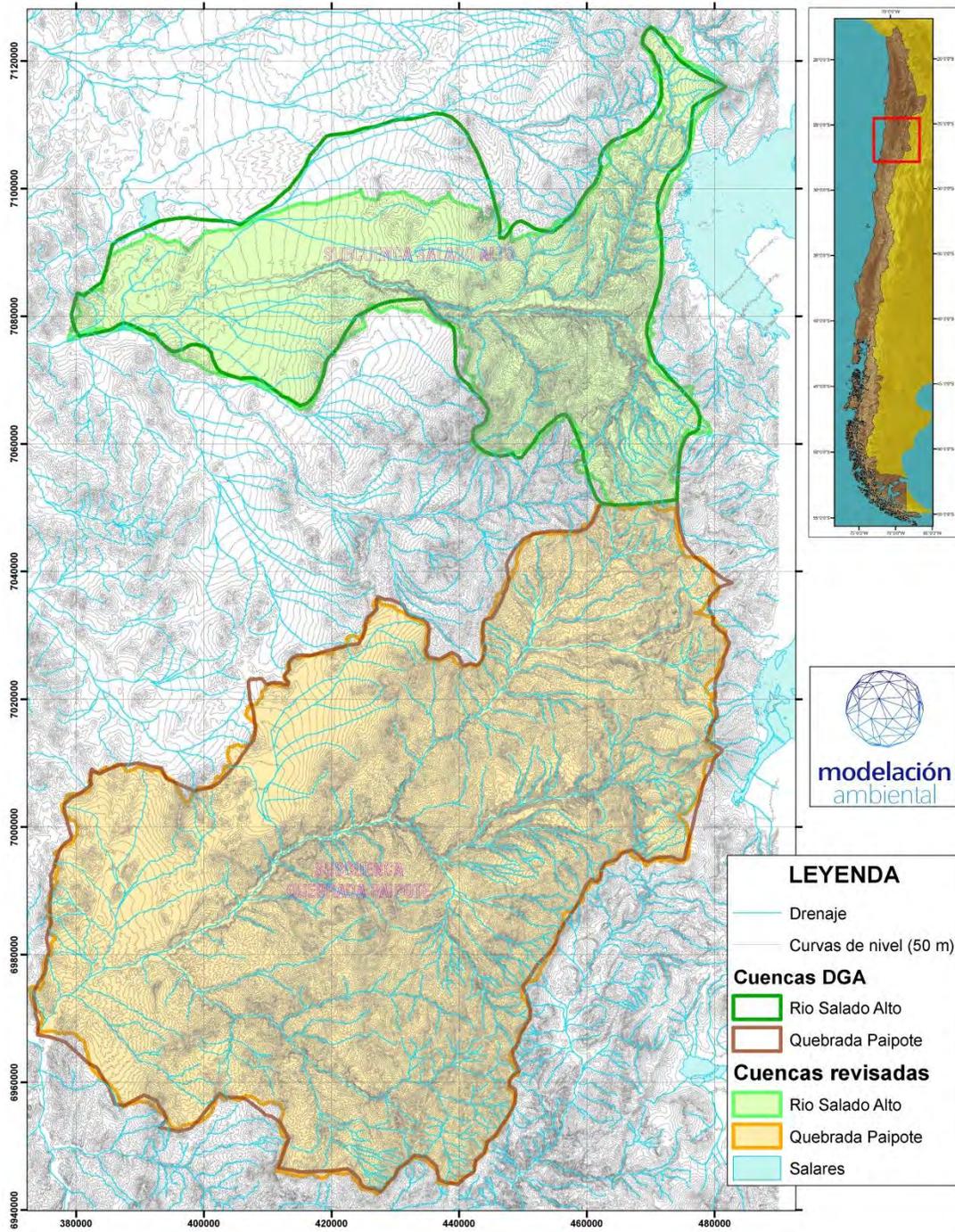


Figura 5.3 Delimitación de las cuencas.

5.1.1 Interpolación de cuencas

La interpolación de cuencas se le llama a un proceso de traspaso de la cuenca delimitada en 2D en la etapa anterior (cuenca DGA), a una entidad 3D; es decir, el software asigna a cada (X,Y) uno nuevo Z que es el valor extraído del DEM para que la curva divisoria de aguas pueda entregar el perímetro y área que corresponde en la realidad.

Este proceso se realiza desde el módulo Arc Toolbox, con el comando:

3d Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape

A continuación se presenta el ejemplo con la Cuenca Río Salado Alto, en 3D (rojo) y la cuenca 2D (verde).

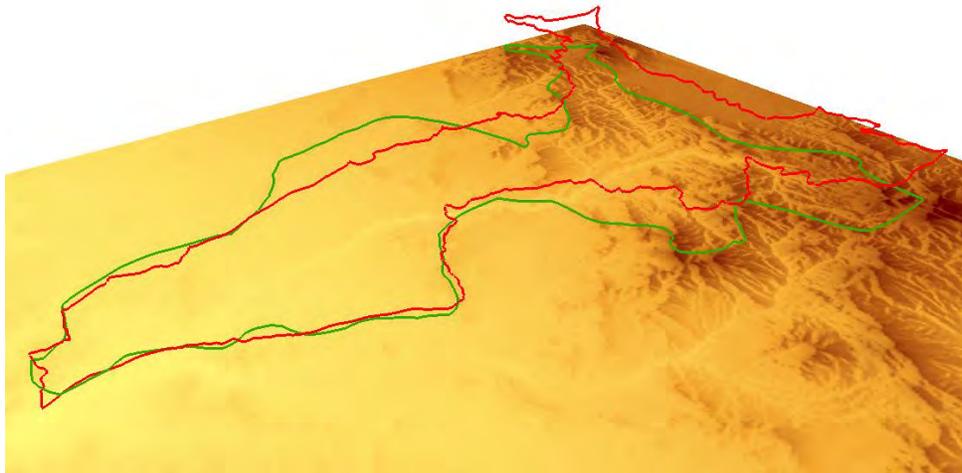


Figura 5.4 Ejemplo de interpolación de cuencas.

5.1.2 Unión del drenaje principal

Esta tarea sirve para confirmar el cálculo de largo del cauce principal de cada cuenca. La unión de la línea del drenaje, se realiza de manera manual, comenzando una sesión de edición sobre dicha cobertura, y luego desde el menú Editor, utilizando el comando 'Merge'. **Una vez unida la entidad, es posible desde la tabla de atributos, calcular el largo sobre el registro, para cada cuenca.**

En la Figura 5.5 se presenta el drenaje principal.

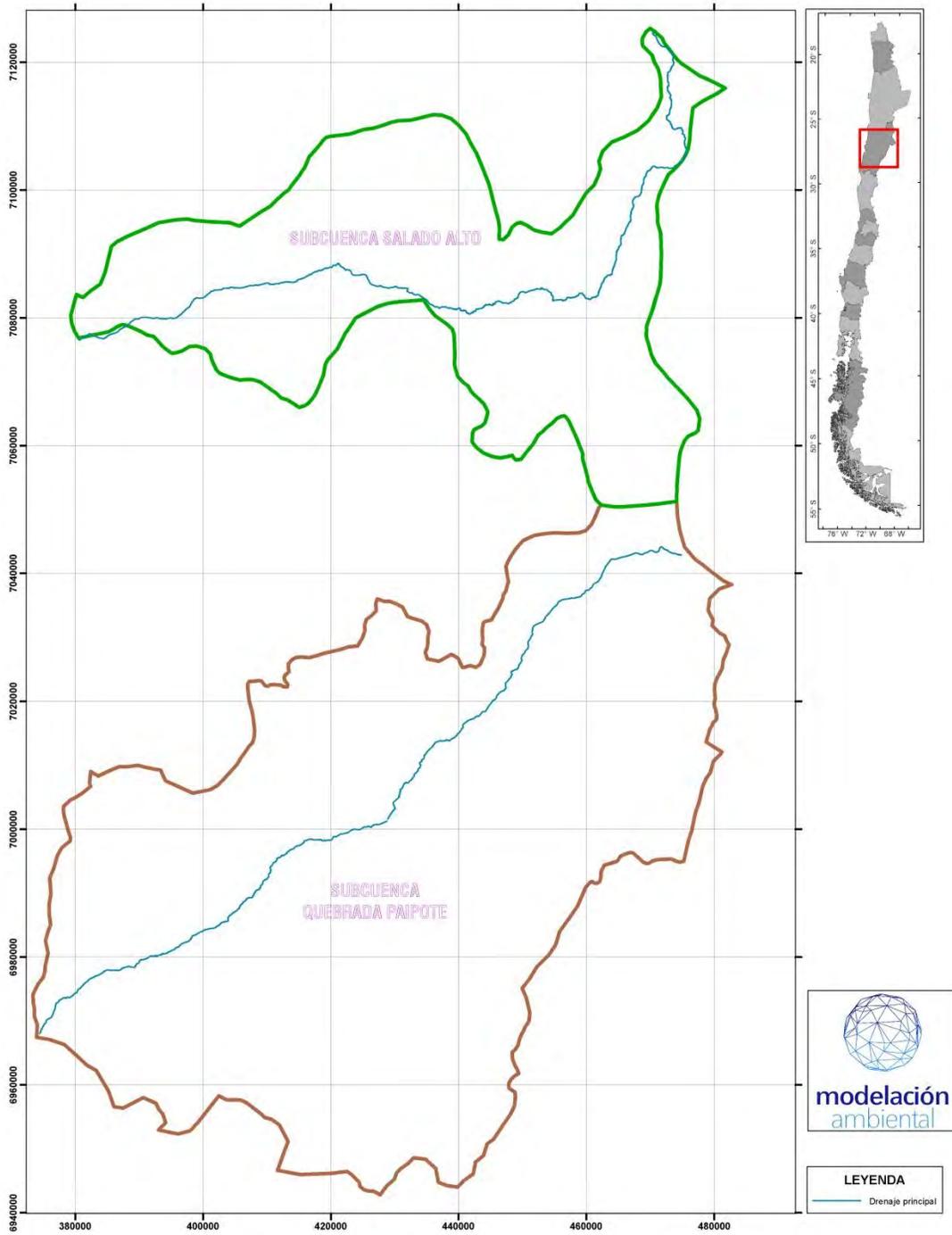


Figura 5.5 Drenaje principal.

5.1.1 Extracción del drenaje solo contenido en la cuenca

La extracción del drenaje contenido en la cuenca se realiza desde Arc Toolbox con el comando:

Analyst Tools > Extract > Clip

Esta definición del nuevo drenaje, permitirá obtener el cálculo de los largos de todos los cursos de agua que están trazados en la topografía, y que se encuentran dentro de cada cuenca. Este cálculo se realiza desde la tabla de atributos de cada cobertura de drenaje extraído y después mediante un Summary o extrayendo los datos a Excel se suman dichas longitudes.

El mapa mostrando el drenaje de las cuencas se presenta en la Figura 5.6.

5.1.1 Ubicación del punto de descarga de la cuenca

La ubicación del punto de descarga se realiza de manera manual utilizando al menos dos coberturas de referencia, el límite de cada cuenca y el drenaje. Este punto se ubica en la cota más baja de la cuenca con la intersección del trazado del curso de agua principal. Teóricamente por este punto pasa toda el agua que descarga la cuenca. Se habla de que es un punto teórico ya que en este ejercicio no existe un análisis de conexiones hidráulicas entre cuencas adyacentes, con flujos laterales, ni tampoco un análisis de flujos de agua subterránea.

La ubicación de los dos puntos de salida o descarga de cada cuenca se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Coordenadas de los puntos de salida de cada subcuenca.

Subcuenca	UTM Norte (WGS84)	UTM Este (WGS84)
Quebrada Paipote	6967661.66	373963.42
Salado Alto	7077311.83	380244.84

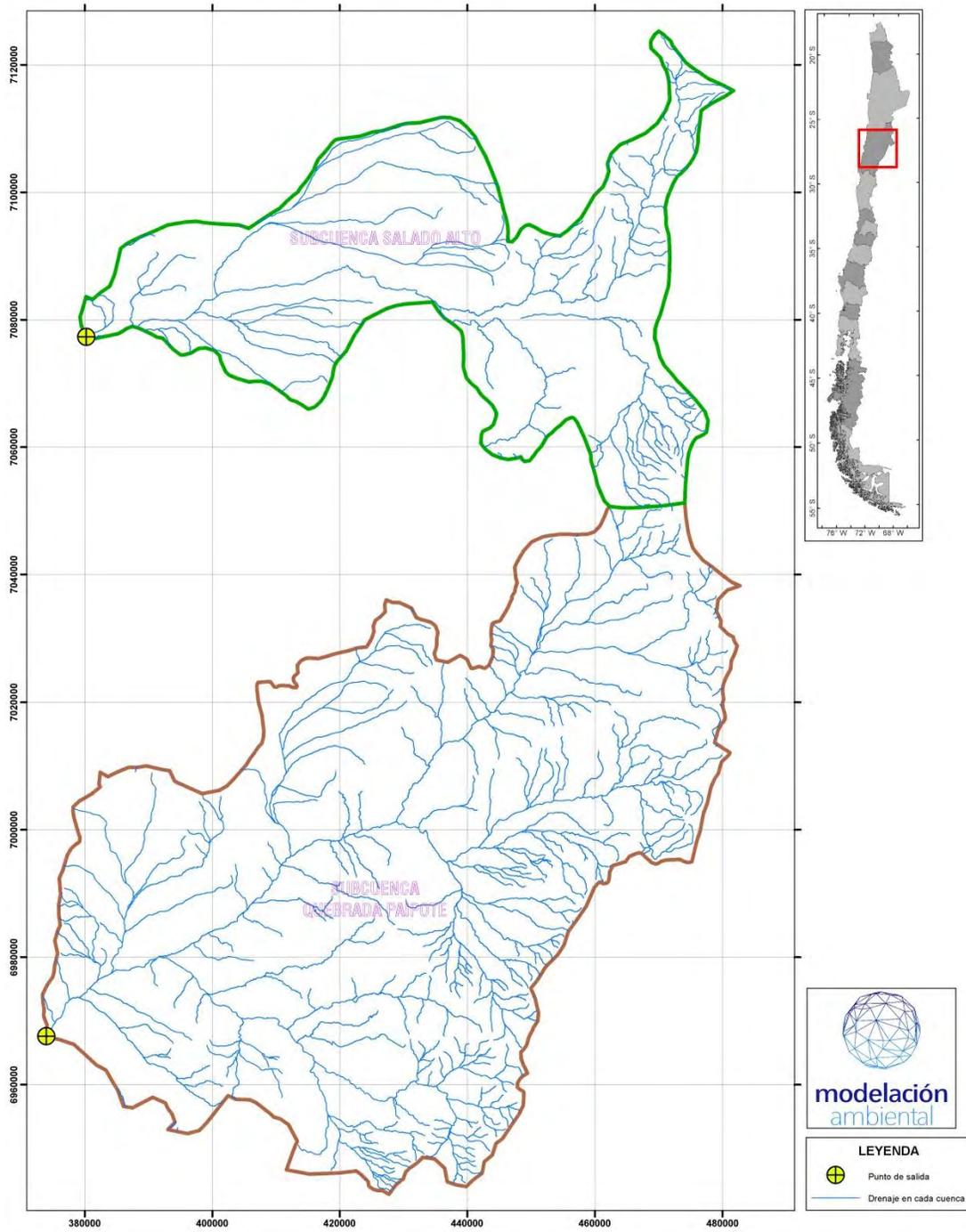


Figura 5.6 Drenaje de la cuencas y ubicación del punto de descarga.

5.1.1 Pendientes

El mapa de pendientes permite extraer datos de la pendiente media, la pendiente máxima y mínima y una visión general de cada cuenca y sus áreas más accidentadas topográficamente.

Este raster se genera a partir del DEM inicial de trabajo, contiene la misma geometría y puede ser generado en grados o en porcentaje (para este trabajo se trabajó en grados).

Spatial Analyst Tools > Surface > Slope

El mapa de pendientes presentan en la Figura 5.8.

5.1.1 Stream Order

Esta herramienta nos permite definir el orden de ramificación o magnitud de la red de drenaje de acuerdo a la clasificación de Strahler (1957) o Shreve (1966), asignando valores numéricos a dicha red (ver siguiente figura).

Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream Order

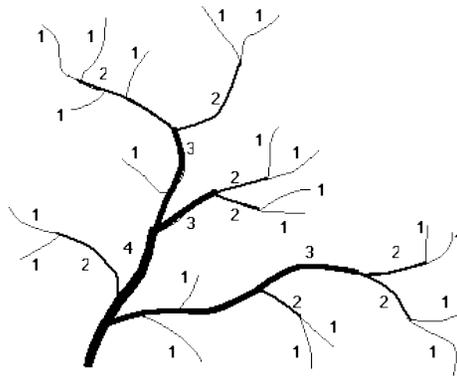


Figura 5.7 Clasificación de la red de drenaje de de Horton-Strahler, 1957.

Los resultados usando la herramienta del stream order se presentan en la Figura 5.9.

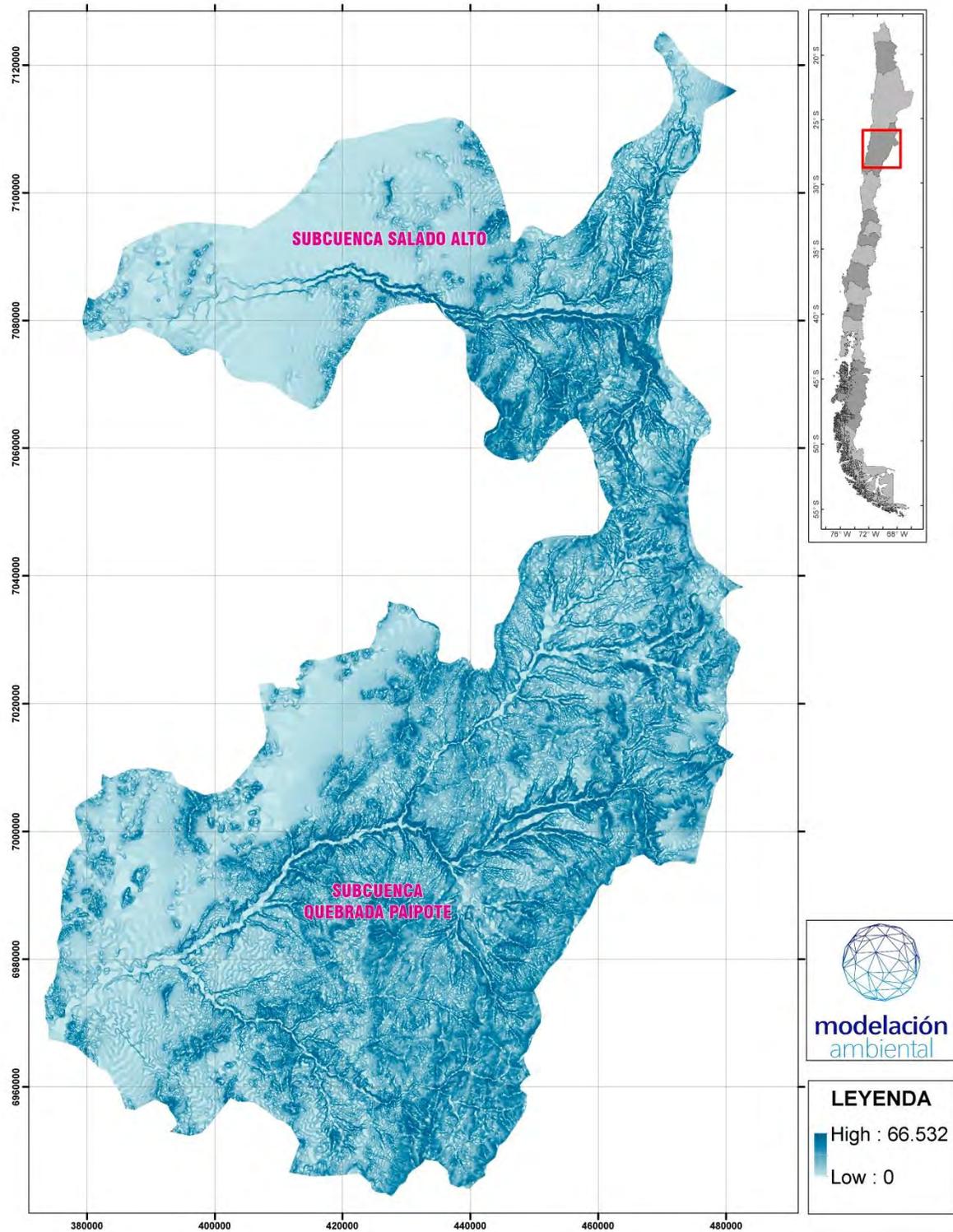


Figura 5.8 Mapa de pendientes.

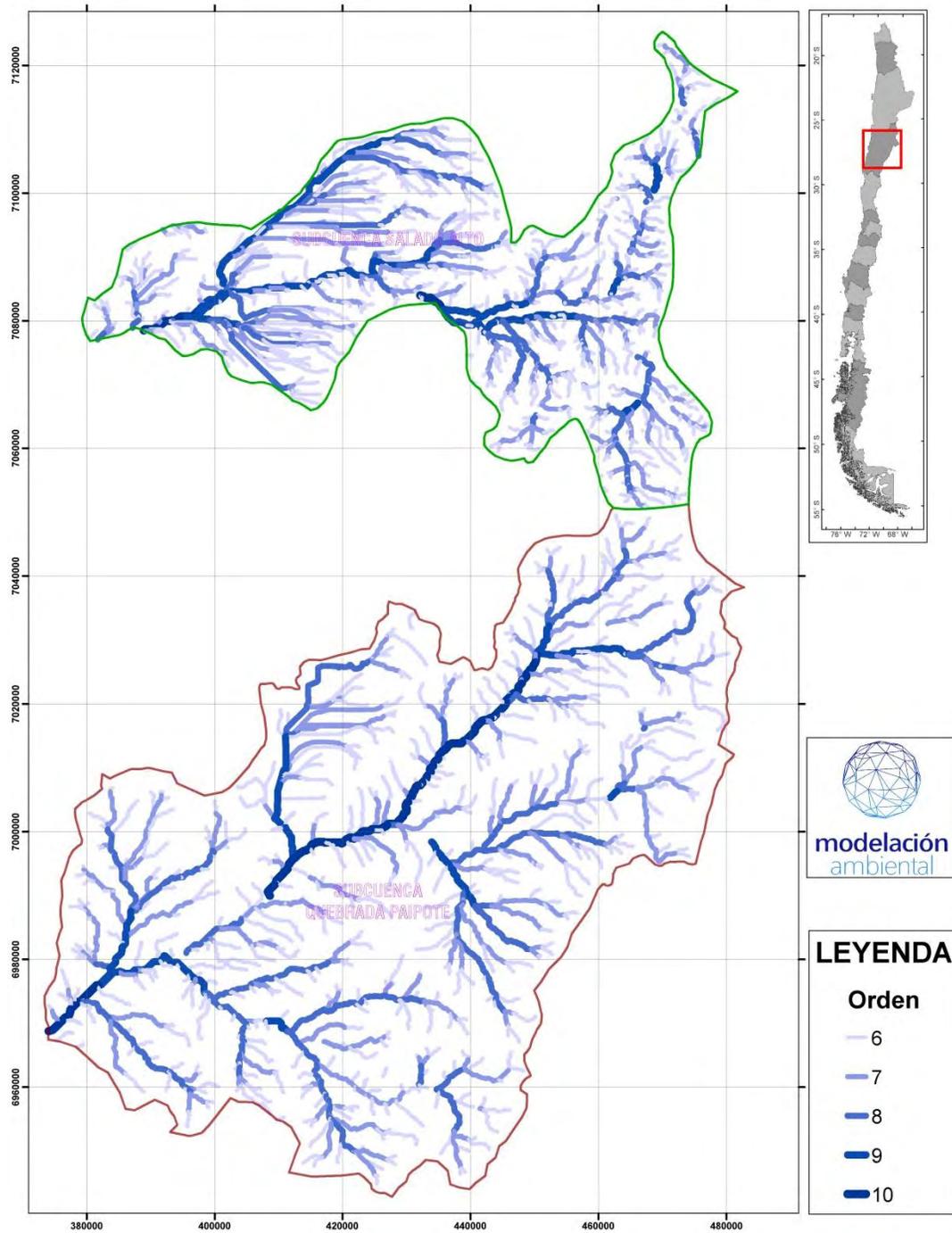


Figura 5.9 Stream order.

5.1.2 Parámetros morfométricos

Finalmente, en las

Tabla 5.3 y Tabla 5.2 se presenta un resumen con los parámetros morfométricos para cada subcuenca.

Tabla 5.2 Parámetros para cuenca Quebrada Paipote.

PARAMETROS DE RELIEVE				
Elemento	Nomenclatura	Deducción	Unidad	Valor
Área	A	-	km ²	6689.33
Perímetro	P	-	km	427.35
Longitud axial	La	-	km	143.81
Ancho promedio	Ap	A/La	km	46.52
Altura media	h	$[Z_{max}/Z_{min}]/2$	m	4850
Mapa de pendientes	Slp		%	Link
Pendiente media cuenca	Slp_C		%	16.87
Curva hipsométrica	Ch	h/% sobre h		Link
PARÁMETROS DE FORMA				
Elemento	Nomenclatura	Deducción	Unidad	Valor
Índice de compacidad	Kc	$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	-	1.46
Factor de forma	IF	$IF = \frac{Ap}{La}$	-	0.32
PARÁMETROS DE LA RED HIDROGRÁFICA				
Elemento	Nomenclatura	Deducción	Unidad	Valor
Densidad de drenaje	D	$D = \frac{\sum L_i}{A}$	-	0.39
Pendiente media del cauce	J	$J = 100 \frac{(h_{max} - h_{min})}{L}$	%	30.95
Tiempo de concentración	Tc	$Tc = 0,3 \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76}$	hr	6.82

Tabla 5.3 Parámetros para cuenca río Salado Alto.

PARAMETROS DE RELIEVE

Elemento	Nomenclatura	Deducción	Unidad	Valor
Área	A	-	km ²	3020.16
Perímetro	P	-	km	385.725
Longitud axial	La	-	km	154.35
Ancho promedio	Ap	A/La	km	19.57
Altura media	h	$[Z_{max}/Z_{min}]/2$	m	2350
Mapa de pendientes	Slp		%	Link
Pendiente media cuenca	Slp_C		%	16.87
Curva hipsométrica	Ch	h/% sobre h		Link

PARÁMETROS DE FORMA

Elemento	Nomenclatura	Deducción	Unidad	Valor
Índice de compacidad	Kc	$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	-	1.97
Factor de forma	IF	$IF = \frac{Ap}{La}$	-	0.13

PARÁMETROS DE LA RED HIDROGRÁFICA

Elemento	Nomenclatura	Deducción	Unidad	Valor
Densidad de drenaje	D	$D = \frac{\sum L_i}{A}$	-	0.36
Pendiente media del cauce	J	$J = 100 \frac{(h_{max} - h_{min})}{L}$	%	28.84
Tiempo de concentración	Tc	$Tc = 0,3 \left(\frac{L}{J^{0.25}} \right)^{0.76}$	hr	7.29

6 REFERENCIAS

- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 58, p. 21-44.
- Ancey, C., 2007. Plasticity and geophysical flows: A review. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 142, 4–35.
- Ancey, C., P. Coussot, and P. Evesque, 1999: A theoretical framework for granular suspensions in a steady simple shear flow. *J. Rheol.*, 43, 1673–1699.
- Denlinger, R. and R. Iverson, 2001: Flow of variably fluidized granular masses across threedimensional terrain 2. numerical predictions and experimental tests. *Journal of Geophysical Research*, 106, 553–566.
- Estellé, L., Chávez, L. y Díaz, R. 2015. Caracterización de los caudales en río Salado, durante los eventos del 24, 25, y 26 de marzo de 2015. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Forterre, Y. and Pouliquen, O. 2008. Flows of dense granular media. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40, 1-24.
- Fuenzalida, H., R. Sanchez and R. Garreaud, 2005: A climatology of cut off lows in the Southern Hemisphere. *J. Geophys. Res.* 110, D1801, doi: 10.1029/2005JD005934
- Hauser A (2000) Remociones en masa en Chile, 2nd edn. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No. 59, Santiago.
- Hutter, K., Y. Wang, and S. Pudasaini, 2005: The Savage-Hutter avalanche model how far can it be pushed?. *Philosophical Transactions A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, the Royal Society, London, Vol. 363(1832), 1507 - 1528.
- Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, 2010: The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). Chapter 1 in *Satellite Applications for Surface Hydrology*, F. Hossain and M. Gebremichael, Eds. Springer Verlag, ISBN: 978-90-481-2914-0, 3-22.
- Iverson, R., 1997: The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35, 245–296.
- Iverson, R., 2005: Debris-flow mechanics. Chapter 6 in: M. Jacob and O. Hungr (eds) *Debris-flow hazards and related phenomena: Springer-Praxis Books in Geophysical Sciences*, p. 105-134.
- Iverson, R. and R. Denlinger, 2001: Flow of variably fluidized granular masses across threedimensional terrain 1. coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106, 537–552.
- Meruane, C., Tamburrino, A. & Roche, O. 2010. On the role of the ambient fluid on gravitational granular flow dynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, 648: 381-404. doi:10.1017/S0022112009993181.
- Pouliquen, O. and Y. Forterre, 2002: Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane. *J. Fluid Mech.*, 453, 133–151.
- Pudasaini, S., Y.Wang, and K. Hutter, 2005a: Modelling debris flows down general channels. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 799–819.
- Pudasaini, S., Y.Wang, and K. Hutter, 2005b: Rapid motions of free-surface avalanches down curved and twisted channels and their numerical simulation. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 363, 1551–1571.

Savage, S. and K. Hutter, 1989: The motion of finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.*, 199, 177–215.

Savage, S. and K. Hutter, 1991: Surge dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part i: Analysis. *Acta Mechanica*, 86, 201–223. 33

Wang, Y. and K. Hutter, 2001: Granular material theories revisited. Chapter 04 in: N.J.

Wu, H., R. F. Adler, Y. Tian, G. J. Huffman, H. Li, and J. Wang (2014), Real-time global flood estimation using satellite-based precipitation and a coupled land surface and routing model, *Water Resour. Res.*, 50, 2693.2717, doi:10.1002/2013WR014710.

Wu H., R. F. Adler, Y. Hong, Y. Tian, and F. Policelli (2012), Evaluation of Global Flood Detection Using Satellite-Based Rainfall and a Hydrologic Model. *J. Hydrometeor.*, 13, 1268.1284.