



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

**DETERMINACIÓN DE PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS EN LA
QUEBRADA DE MACUL, CUENCA DE SANTIAGO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

NATALIA PAULINA GARRIDO URZÚA

PROFESOR GUÍA: SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁNGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS**

SANTIAGO DE CHILE

JULIO, 2012

Los Incas, a los Picunches que habitaban las quebradas del Valle de Santiago los llamaban ***Huaicoches***, derivado del quechua: wayku/quebrada y del mapudungun che/gente.

Wayku o Huaico es una violenta inundación de aluvión donde gran cantidad de material del terreno de las laderas es desprendido y arrastrado por el agua vertiente abajo hasta el fondo de los valles, causando enormes sepultamientos a su paso.

Según el Proyecto Multinacional Andino, **un huayco se conoce como flujo de detritos**, o flujo de escombros, esto depende de la cantidad de sedimento y bloques que traiga.

Cuenta la historia que al llegar los Incas al Valle de Santiago, les llamó la atención la distribución demográfica de sus habitantes y su tendencia a vivir en las quebradas alledañas, zona de huaicos.

Estas, por sus características son fácilmente defendibles y constituían una fortaleza *per se*, en donde tenían sus moradas y sus cursos de agua. El problema que conllevan estas posiciones es la presencia de huaicos en época de El Niño, en las que llueve sobre los 3000 metros derritiendo abruptamente la nieve y generando corrientes de agua que arrastran tierra y rocas.

RESUMEN

La Quebrada de Macul se encuentra ubicada en el frente precordillerano oriental de la cuenca de Santiago. De orientación este-oeste, se caracteriza por la elevada pendiente de su cauce y el gran área que cubre su hoya. Geológicamente se compone por rocas de la Formación Abanico y por numerosos depósitos cuaternarios de distinta génesis. La afectan la Falla San Ramón, descrita como falla inversa, activa, de orientación norte sur, ubicada a los pies de la quebrada y hacia la cabecera la Falla Pocuro, evidenciada por el cambio de manto de los estratos, lo que favorece la formación de numerosas quebradillas con importante aporte de material detrítico producto de la erosión diferencial de la Fm. Abanico.

Los antecedentes históricos de flujos de detritos ocurridos en la Quebrada de Macul, sumado al gran crecimiento de la población, propiedades y actividades económicas ubicadas en el abanico aluvial de la quebrada, hacen necesario determinar el peligro asociado a estos flujos con el objeto de estimar el riesgo asociado y tomar medidas de mitigación que lo disminuyan. Para ello, en este estudio se abordan las condiciones físicas que condicionan la Quebrada de Macul y se busca, mediante modelaciones, definir las áreas potencialmente afectadas por flujos de detritos. Para esto se utilizan los algoritmos LAHARZ y MSF, los que en base a distintas condiciones de borde determinan áreas afectadas por flujos. Se utiliza como calibración de los modelos el evento aluvial del 3 de Mayo de 1993, fenómeno que fue debidamente registrado en cuanto a sus magnitudes. Por otro lado, proyectando la información disponible respecto a caudales máximos probables de la quebrada en términos de volúmenes de flujos de detritos, se modela el evento máximo probable de la quebrada. Finalmente, se determina el área que es físicamente afectable por efectos de propagación lateral del flujo sobre su abanico aluvial.

Mediante la interpretación de los resultados obtenidos se elabora un mapa de peligro con tres categorías del peligro, siendo éste mayor hacia el cauce de la quebrada y menor alejándose de ésta, y se sugieren restricciones y recomendaciones a seguir en estos sectores. Complementariamente al mapa de peligros, se propone un conjunto de obras estructurales de mitigación que buscan complementar las actualmente existentes de manera de operar en forma conjunta en la disminución del peligro al que está sujeto el sector del abanico aluvial de la quebrada, disminuyendo de esta forma el riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Habiendo terminado los últimos detalles de esta memoria, antes que se vaya al horno de las impresiones quiero agradecer a muchas personas que me han acompañado en este largo camino.

Agradezco a Sernageomin y la Universidad de Chile por ser sostén intelectual y económico de este trabajo.

Agradezco a Sergio, Ángelo y Sofía por todos sus aportes a este trabajo.

Agradezco a Blanca y María Rosa por todo su tiempo y preocupación.

Agradezco a mis padres la posibilidad que me dieron de ir a la Universidad a estudiar esta carrera hermosa, el apoyo en todos los momentos, el aguante para seguir adelante, el ejemplo de que si se quiere se puede, la confianza que depositaron sobre mis hombros, que en este trabajo rinde sus frutos. A mis hermanos, Victor, Miguel y Benjamín, por su alegría y espontaneidad.

Agradezco a mis amigos y compañeros, a todos, a los de la sección 3, año 2005, en particular a la Coté por todas las noches de estudio y trabajo que pasamos juntas. A los compañeros de la asamblea de izquierda que nos dio tantas alegrías y donde conocí a grandes personas, la Pau, la Tania, Mike, Pabliwi, Martín, René, Diegito, Matías, Buki, Tolvett, Baldera, Palmi, Yerko, la Pancha, la Rebec, a la Irene con quien además de compartir la directiva del cepc 2007, logramos pasar los ramos que parecían más imposibles. A mis compañeros de Geología, Juanaca, Diego, Mauro, Crispi, Jepa, Vivi, Alfaro, Paula, Rafa, Galle, Cartero, Nacho, Tincola, Chapa, Dragón, Panchito y Claudia. Punto aparte a la Dixie, comadre, compañera, amiga y ser fundamental en cada uno de los ramos de la carrera, en cada uno de los momentos de colapsos, siempre poniéndonos el hombro y echándole pa delante, dispuestas a disfrutar del premio merecido que eran las vacaciones, y qué vacaciones!. A mis compañeros de la Jota, a la base Jorge Muñoz, al Demian, la Martina, Rubén, Ariel, Oscar, David, Eva, Ange, la nueva generación, a los compañeros de la Chile, a todos quienes me apoyaron y acompañaron en las campañas cepc 2007, cei 2008, consejería fech 2009, cei 2010, consejería de escuela 2010 y fech 2011, de la que me orgullezco de haber aportado en el triunfo de nuestra compañera Camila, también a mis compañeros de la base Sindical Daniela Arriagada, Gustavo, Isabel, Javi, Pancho, Nacho y Tamara, que me han entendido en todos estos tiempos que exige la memoria y con quienes aceptamos el desafío de reivindicar la sindicalización como herramienta de lucha de los trabajadores. A las amigas, con los que no coincidimos en ningún curso, en ningún espacio común, y sin embargo somos parte de la vida la una de la otra, a la Fran, la Viole y la Milla. A mis amigas del colegio, por las millones de historias, la Fran, la Javi, la Pía y la Caro. Al mono, incondicional amigo desde hace ya tanto tiempo. A Gaspi por la motivación. A la Mane por su aguante a distancia y por su amistad sincera. A mis primas, por saber estar en los momentos precisos. A mis compañeras de trabajo, a la Anita, la Nati, la Francisca, la Paola, la Mónica, la Sandra H., la Sandra V., y a Aníbal, el jefe, por el aguante y apoyo que me han dado en estos meses.

Agradezco sobre todo a Gonzalo, mi compañero, mi amorcito, mi vida, por su infinita paciencia, por su incansable apoyo, por su cariño, su ternura, su incondicionalidad, su preocupación y ocupación por mí, por su aguante, por su alegría y su sonrisa, por su forma tan linda de construir nuestro cotidiano, y especialmente, por su infinito amor.

Con tu puedo y con mi quiero

Vamos juntos compañero

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	ii
Agradecimientos	iii
1. Introducción	1
1.1. Formulación Del Estudio.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3 Metodología de trabajo	5
1.3.1. Antecedentes y Marco teórico.....	5
1.3.2. Elaboración Mapa de Peligro	7
1.3.3. Trabajo de Terreno	9
2. Marco Teórico	10
2.1. Remociones en Masa	10
2.2. Flujos de Detritos.....	12
2.2.1. Definición	12
2.2.2. Morfología.....	13
2.3. Peligro Geológico	14
2.3.1. Definiciones	14
2.4. Factores condicionantes de eventos de Remociones en Masa en la Precordillera de Chile Central	16
2.5. Factores desencadenantes de eventos de Flujos en la Precordillera de Chile Central	18
2.5.1 Precipitaciones.....	18
2.5.2 Sismicidad.....	18
2.6. Medidas de Mitigación	20
2.7.1. Obras que restringen la ocurrencia de flujos	21
2.7.2. Obras de almacenamiento.....	22
2.7.3. Obras controladoras de dirección del flujo	25
2.7.4. Diques desviadores del flujo o barreras deflectoras	26
2.7.5. Obras de depositación.....	27
3. Antecedentes del área de Estudio	28
3.1. Geomorfología y Geología en Quebrada de Macul	28
3.1.2. Geomorfología	28
3.1.2. Geología	30
3.1.3. Depósitos Cuaternarios	31

3.2 Eventos de flujos antecedentes en Quebrada de Macul.....	33
3.2.1. Evento del 3 de Mayo de 1993	34
3.3. Susceptibilidad de Remociones en Masa en la Quebrada de Macul	36
3.4. Medidas de mitigación de flujos existentes en la Quebrada de Macul	41
3.5. Clima e Hidrología	43
4. Peligro de Flujos de detritos en la Quebrada de Macul	47
4.1. Introducción	47
4.2. Modelación Laharz	48
4.3. Modelación MSF	54
4.4. Alcance de Peligro de Flujos de Detritos	56
4.4.1. Peligro Alto.....	57
4.4.2. Peligro Medio	58
4.4.3. Peligro Bajo	58
5. Discusiones	59
5.1. Respecto a los modelos.....	59
5.2 Respecto a las Áreas de Peligro	60
5.3. Respecto a las medidas de mitigación.....	61
5.3.1. Situación actual.....	61
5.3.2. Propuestas de medidas de mitigación complementarias	64
6. Conclusiones y Recomendaciones	66
7. Referencias	68
Anexos	I
A.1 desglose de factores condicionantes de remociones en masa	I
A.1.1 Factores condicionantes de caídas de roca (Lara, 2007).....	I
A.1.2 Factores condicionantes de deslizamientos en suelo (Lara, 2007).....	II
A.2.3 Factores condicionantes de deslizamientos en roca (Lara, 2007).....	III
A.2.4 Factores condicionantes de flujos (Lara, 2007).	IV
A.2. Modelos LAHARZ para flujo de 840.000 m ³ , para distintos valores de c ₁ y c ₂	V
A.2.1. C ₁ =0,10 – C ₂ =20	V
A.2.2. C ₁ =0,10 – C ₂ =40	VI
A.2.3. C ₁ =0,10 – C ₂ =320	VII
A.2.4. C ₁ =0,09 – C ₂ =300	VIII
A.2.5. C ₁ =0,08 – C ₂ =290	IX

A.2.6. $C_1=0,07 - C_2=280$	X
A.2.7. $C_1=0,06 - C_2=250$	XI
A.2.8. $C_1=0,05 - C_2=230$	XII
A.2.9. $C_1=0,04 - C_2=200$	XIII
A.2.10. $C_1=0,03 - C_2=180$	XIV
A.3. Modelos Laharz para caudales máximos probables.....	XV
A.3.1. Volumen = 2.926.950 m ³	XV
A.3.2 Volumen = 3.859.633 m ³	XVI
A.3.3. Volumen = 4.584.009 m ³	XVII
A.3.4 Volumen = 5.841.527 m ³	XVIII
A.4. Modelo MSF	XIX
A.5. Orientación de Laderas	XX
A.6. Pendientes.....	XXI
A.7. Alcance Peligros	XXII

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ubicación quebrada Macul. Se presenta delineada en azul la hoya hidrográfica de Quebrada Macul y con rojo el alcance del evento de flujo del 3 de Mayo de 1993 (tomado de Naranjo y Varela, 1996). Imagen modificada de Google Earth.....	1
Ilustración 2: Imágenes google earth para la zona de descarga de la quebrada de macul, se observa el aumento de la zona poblada entre los años 2000 y 2011	2
Ilustración 3: <i>Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un lahar, que se utilizan en el programa LAHARZ. La razón H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal, a partir del cual comienza la depositación en la simulación (Schilling, 1998).</i>	8
Ilustración 4: <i>Imagen Google Earth, con los puntos de control de salidas a terreno, en verde se muestran los puntos del terreno realizado con fecha 28 de octubre de 2011, en morado los puntos del terreno con fecha 28 de enero de 2012.</i>	9
Ilustración 5: <i>Esquema de flujos canalizados y no canalizados. (Cruden y Varnes, 1996).</i>	12
Ilustración 6: <i>Morfología de un pulso en un flujo de detritos, diagrama de Pierson (1986).</i>	13
Ilustración 7: <i>Esquema de la metodología para realización de los mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo (modificado de Ferrer, 1991).</i>	15
Ilustración 8: <i>Traza de Falla San Ramón (líneas negras) en la zona de descarga de la Quebrada de Macul. En amarillo se presenta el área de vulnerabilidad proyectada, tomado del estudio “Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón” de Territorio y Ciudad consultores (noviembre, 2011). El color amarillo corresponde al grado 2 (de 1 a 5) que se interpreta como baja.</i>	19
Ilustración 9: <i>Relación estadística Magnitud vs distancia máxima desde el epicentro para la ocurrencia de deslizamientos (Keefer, 1984)</i>	19
Ilustración 10: <i>Ejemplo de combinación de distintas soluciones de protección contra aluviones (Seminara y Turbino, 1993).</i>	20
Ilustración 11: <i>Esquema de ubicación y función de presas contenedoras (VanDine, 1996).</i>	21
Ilustración 12: <i>Ejemplo de presas contenedoras. A) Presa llena de sedimentos; B) Vista del canal escalonado aguas debajo de la presa (Chanson, 2001).</i>	22
Ilustración 13: <i>Función de presas permeables: A) La presa permite que los sedientos escurran libremente para condiciones normales; B) Cuando ocurre un flujo detrítico de proporciones, los sedimentos son capturados y retenidos temporalmente previniendo desastres aguas abajo (International Sabonetwork, http://www.sabo-int.org).</i>	23
Ilustración 14: <i>Presa de apertura horizontal (beam-dam) (Mizuyama, 2003).</i>	23
Ilustración 15: <i>Presas de aperturas verticales. A) múltiples aperturas (Fiebiger, 2003). B) una apertura (slit-dam) (Chanson, 2001).</i>	24

Ilustración 16: <i>Barrera flexible posterior a la ocurrencia de un flujo</i> (http://www.warco.com.co/ckfinder/userfiles/images/Control-Flujo-de-detritos.jpg)	25
Ilustración 17: <i>Barreras laterales</i> (VanDine, 1996).	26
Ilustración 18: <i>Diques desviadores</i> (VanDine, 1996).	26
Ilustración 19: <i>Obras de depositación</i> (www.mala.bc.ca/~earles/howesound).....	27
Ilustración 20: <i>Mapa topográfico de la cuenca de la Quebrada de Macul, curvas de nivel cada 50m</i> (Padilla, 2006).....	28
Ilustración 21: <i>Perfil topográfico y pendiente de Quebrada de Macul. Modificado de Naranjo y Varela (1996). (Padilla, 2006).</i>	29
Ilustración 22: <i>Mapa Geológico de la zona de estudio. Modificado de Naranjo y Varela (1996) y Rauld (2002) por Padilla (2006).</i>	30
Ilustración 23: <i>Imágenes de los efectos del evento del 3 de Mayo de 1993, tomados de archivos de TVN.</i>	35
Ilustración 24: <i>Mapa índices de susceptibilidad de flujos</i> (Martínez, 2009).	37
Ilustración 25: <i>Mapa índices de susceptibilidad de deslizamientos de suelo</i> (Martínez, 2009).	38
Ilustración 26: <i>Mapa índices de susceptibilidad de deslizamientos de roca</i> (Martínez, 2009).	39
Ilustración 27: <i>Mapa índices de susceptibilidad de caída de rocas</i> (Martínez, 2009).	40
Ilustración 28: <i>Fotografía de piscinas decantadoras, tomada el 28 de octubre de 2011. Se observan los condominios Las Pircas, Alto Macul y Pétreos Quilín</i>	41
Ilustración 29: <i>Detalle piscina 1, vista al poniente. Fotografía tomada el 28 de octubre de 2011.</i>	42
Ilustración 30: <i>Detalle de piscina 1, vista al este. Fotografía tomada el 28 de octubre de 2011.</i>	42
Ilustración 31: <i>Modelación laharz con valores $c_1 = 0,1$ y $c_2 = 20$ para un volumen de 840.000 m^3, en contraste con la traza del flujo de 1993.</i>	49
Ilustración 32: <i>Modelación laharz con valores $c_1 = 0,1$ y $c_2 = 40$ para un volumen de 840.000 m^3, en contraste con la traza del flujo de 1993.</i>	49
Ilustración 33: <i>Modelación laharz con valores $c_1 = 0,1$ y $c_2 = 320$ para un volumen de 840.000 m^3, en contraste con la traza del flujo de 1993.</i>	50
Ilustración 34: <i>Distribución de valores de la probabilidad de afectación de las celdas, modelo msf.</i>	54
Ilustración 35: <i>Modelo MSF, categorías de probabilidad Alta (1-0,6), media (0,6-0,575) y baja (0,575-0,5)</i>	55
Ilustración 36: <i>Alcance de peligro de flujos de detritos en Quebrada de Macul.</i>	56

Ilustración 37: Detalle de área de peligro alto, dentro de la línea roja, sobre imagen google earth	57
Ilustración 38: <i>Piscinas decantadoras Quebrada de Macul, fotografía tomada el 28 de octubre de 2011.</i>	61
Ilustración 39: <i>Fotografía del cauce de la quebrada en zona de intersección con quebrada el Durazno. Se aprecia el gran número de árboles que crecen en el cauce mismo de la quebrada. Fotografía tomada en enero de 2012.</i>	62
Ilustración 40: <i>Fotografía del cauce de la quebrada al este de intersección con quebrada el Durazno. Se aprecia el gran número de árboles que crecen en el cauce mismo de la quebrada. Fotografía tomada en enero de 2012.</i>	62
Ilustración 41: <i>Fotografía del cauce de la quebrada. Se aprecia el bloque arrastrado por algún evento aluvial anterior. Fotografía tomada en enero de 2012.</i>	63
Ilustración 42: Propuesta esquemática de ubicación de obras de mitigación complementarias	64

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978)</i>	10
<i>Tabla 2: Clasificación de flujos (Hungar, 2001)</i>	11
<i>Tabla 3: Escala de velocidades (Cruden y Varnes, 1996)</i>	12
<i>Tabla 4: Parámetros característicos de la cuenca (Vargas, 1999)</i>	29
<i>Tabla 5: Antecedentes históricos relativos a aluviones en Quebrada de Macul. Modificado de Martínez (2009)</i>	33
<i>Tabla 6: Características de eventos ocurridos (Vargas, 1999)</i>	44
<i>Tabla 7: Caudales de diseño, según isoyetas de precipitación máxima diaria (Vargas, 1999)</i>	45
<i>Tabla 8: Caudal máximo probable en la Quebrada de Macul (Vargas, 1999)</i>	46
<i>Tabla 9: Pares de valores c_1 y c_2 que reproducen la extensión del flujo de 1993 para un volumen de 840.000 m³, superficie asociada y espesor promedio del depósito</i>	51
<i>Tabla 10: Relaciones empíricas para estimar el caudal detrítico máximo (Q_p) en función del volumen de sedimentos (V) o del agua embalsada (V_w) (Tamburrino, 2011)</i>	52
<i>Tabla 11: Valores de n en función de los valores de m</i>	52
<i>Tabla 12: Volúmenes máximos probables en función de los distintos valores de n y m, calculados a partir del caudal máximo probable de 237 m³/s</i>	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1. FORMULACIÓN DEL ESTUDIO

Desde la población del valle de Santiago, existen registros de cómo el límite oriental de la cuenca ha sido frecuente escenario de eventos de remoción en masa, afectando en algunos casos a la población habitante en las actuales comunas de Lo Barnechea, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida, Puente Alto y San José de Maipo. Dentro de los eventos de remoción en masa, los **flujos de detritos**, gatillados por lluvias intensas, son considerados los eventos más peligrosos para la población, dado el alcance que tienen y la energía que transmiten.



ILUSTRACIÓN 1: UBICACIÓN QUEBRADA MACUL. SE PRESENTA DELINEADA EN AZUL LA HOYA HIDROGRÁFICA DE QUEBRADA MACUL Y CON ROJO EL ALCANCE DEL EVENTO DE FLUJO DEL 3 DE MAYO DE 1993 (TOMADO DE NARANJO Y VARELA, 1996). IMAGEN MODIFICADA DE GOOGLE EARTH.

Conocer el alcance y la magnitud que puede tener un evento de flujo de detritos es fundamental para la planificación del Ordenamiento Territorial de zonas expuestas a estos eventos.

Santiago, ciudad en expansión, ha poblado aceleradamente la zona precordillerana donde desembocan numerosas quebradas, sin que exista una política clara y efectiva desde el Estado hacia la protección de la población expuesta frente a las adversidades de la naturaleza, sin desconocer que se han realizados trabajos parcelados, en zonas restringidas, que deben buscar convertirse en política pública de prevención de riesgo y ordenamiento territorial.

Los trabajos recientes realizados desde la academia, que estudian remociones en masa en la cuenca de Santiago (Sepúlveda, 1998; Padilla, 2006; Lara, 2007; Schachter, 2008; Martínez, 2009), no concluyen cuantitativamente respecto a los flujos y basan la determinación del alcance de este peligro de forma cualitativa en base a antecedentes históricos. Sin mirar más lejos, actualmente para la zona de descarga de las quebradas San Ramón y Macul, los planos reguladores señalan (indicativamente) como zona de peligro de flujo la traza de depositación de sedimentos de los flujos



ILUSTRACIÓN 2: IMÁGENES GOOGLE EARTH PARA LA ZONA DE DESCARGA DE LA QUEBRADA DE MACUL, SE OBSERVA EL AUMENTO DE LA ZONA POBLADA ENTRE LOS AÑOS 2000 Y 2011

generados el día 3 de Mayo de 1993, donde un frente de lluvias intensas, sumado a importantes precipitaciones antecedentes y a la línea de altura de nieves sobre los 3.000 m s.n.m., se tradujeron en violentos aluviones en ambas quebradas, dejando una suma de 26 víctimas fatales, 9 desaparecidos y severos daños a la propiedad pública y privada (Naranjo y Varela, 1996).

Este trabajo aborda la Quebrada de Macul, ubicada entre los 33° 28' - 33° 32' latitud sur; 70° 26' - 70° 31' longitud W, UTM sistema WGS84, H19S 353000 - 3670000 E; 6295500 - 628800 S (Ilustración 1) con el objeto de generar una síntesis de los trabajos ya existentes en esta área, de especial interés por las históricas catástrofes que ha generado, y hoy, particularmente urgente por el crecimiento demográfico que ha llevado a la construcción de numerosos condominios en el abanico aluvial de esta quebrada (Ilustración 2).

Se busca en el estudio realizar una evaluación del peligro al que se encuentra expuesto el territorio y la población ubicados en el abanico aluvial de la quebrada, para esto se aborda el marco teórico que rige el estudio de las remociones en masa, los antecedentes del área, y luego mediante el modelamiento con los algoritmos LAHARZ y MSF, diseñados para el software ArcGis, evaluar el alcance que podría tener un eventual flujo, para finalmente interpretar esto en un mapa de peligros orientado a la comunidad y autoridades pertinentes, y proponer medidas de mitigación que puedan complementar el efecto de las piscinas contenedoras existentes.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio es evaluar el peligro de flujos de detritos para la hoya de la Quebrada Macul y su abanico.

Objetivos específicos que se trabajarán para conseguir el objetivo principal son:

1. Definir las condiciones físicas que definen las condiciones de borde para las modelaciones de flujos en la Quebrada.
2. Definir la peligrosidad asociada a las áreas de peligros.
3. Generar mapa de peligro de flujos.
4. Proponer medidas de mitigación.

1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la realización de este documento se dividió el trabajo en dos etapas más una campaña de terreno.

1.3.1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

La primera parte de este trabajo consistió en la recopilación, síntesis y agrupación de toda la información existente, tanto dentro de lo teórico en lo que respecta a los flujos de detritos, la modelación de estos y las obras de mitigación, como dentro del área de estudio: geología y geomorfología de la quebrada; geotecnia de rocas y suelos; eventos antecedentes; clima e hidrología de la zona; susceptibilidad de RM en la Quebrada de Macul y estado de las obras de mitigación existentes.

Las fuentes más relevantes en las que se basa la elaboración de esta primera parte del documento son:

Respecto a los flujos de detritos:

- Apuntes de los cursos: Geología Aplicada, Remociones en Masa (profesor Sergio Sepúlveda) e Hidráulica Ambiental (profesor Aldo Tamburrino).
- Movimientos en Masa en la Región Andina, una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. 2007.
- Ingeniería Geológica. Luis González de Vallejo. Pearson Educación, Madrid 2002.

Respecto a la modelación de flujos:

- Ángelo Castruccio, Comparación y modelación numérica de lahares calientes en el volcán Calbuco (41,3°s) y lahares fríos en el volcán Villarrica (39, 5°s), Andes del sur. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 2008.

Respecto a las obras de mitigación de aluviones:

- Santiago Montserrat, Estudio experimental de obras de protección contra aluviones. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2005.

Respecto a la geología y geomorfología de la Quebrada de Macul:

- Cristóbal Padilla, Análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago. Memoria para optar al Título Profesional de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile, 2006.
- José Naranjo y Juan Varela, Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993. SERNAGEOMIN, Boletín N° 47, 1996.
- Ricardo Thiele, Geología de la hoja de Santiago, Región Metropolitana. Carta Geológica de

Chile N° 39. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1 mapa. 51 p., 1980.

Respecto a la geotecnia:

- Beatriz Martínez, Susceptibilidad de remoción en masa en la Quebrada de Macul, Región Metropolitana. Memoria para optar al título de Geólogo, departamento de Geología, Universidad de Chile. 2009.
- Marisol Lara, Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al grado de Magíster, Mención Geología. Departamento de Geología. Universidad de Chile. 2007.

Respecto a la susceptibilidad de RM:

- Beatriz Martínez, Susceptibilidad de remoción en masa en la Quebrada de Macul, Región Metropolitana. Memoria para optar al título de Geólogo, departamento de Geología, Universidad de Chile. 2009.
- Marisol Lara, Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al grado de Magíster, Mención Geología. Departamento de Geología. Universidad de Chile. 2007.

Respecto a las obras de mitigación existentes:

- Arturo Hauser, Los flujos aluvionales en Chile: causas, efectos y medidas de mitigación. SERNAGEOMIN. Subdirección de Geología. En prensa, 2004.
- Santiago Montserrat, Estudio experimental de obras de protección contra aluviones. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2005.
- Visita en terreno a las piscinas decantadoras.

Respecto al clima e hidrología:

- Cristóbal Padilla, Análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago. Memoria para optar al Título Profesional de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile, 2006.
- René Garreaud, Cambio climático: bases físicas e impactos en Chile. 2011.
- René Garreaud, Impacto de la variabilidad de la línea de nieves en crecidas invernales en cuencas pluvio-nivales de Chile central. XI Congreso Chileno de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, 1992.
- Ximena Vargas, Corrientes de detritos en la Quebrada de Macul, Chile, estudio de caudales máximos. Ingeniería del Agua volumen 6, n° 4, 99. 245-248, 1999.

1.3.2. ELABORACIÓN MAPA DE PELIGRO

Para la elaboración del mapa de peligro, primero se identifican los elementos bajo riesgo, los que corresponden a la población, las propiedades, y las actividades económicas que se encuentran en el abanico de la quebrada.

Luego, en función de los antecedentes, se define el periodo de retorno a trabajar, y los volúmenes de flujos a ser modelados, determinando el alcance de estos, generando un mapa de peligro de flujos.

Para el modelamiento de los flujos de detritos se utilizan los algoritmos LAHARZ y MSF, sobre un modelo de elevación digital, generado en base a las curvas de nivel del Instituto Geográfico Militar, cada 5 m hasta la cota 1500 y cada 50 m en las cotas superiores, se trabaja con el software ArcGIS con un tamaño de pixel de 10 m. Los modelos se caracterizan a continuación.

MODELO DE FLUJO DE DIRECCIÓN ÚNICA MODIFICADO

El modelo MSF (siglas de Modified Single – Flow Direction Model o Modelo de Flujo de Dirección Única Modificado) fue desarrollado por Huggel *et al.* (2003) para determinar las zonas de peligro asociadas a flujos de detritos generados por el desbordamiento de lagos glaciales en alta montaña. Fue aplicado por primera vez en los Alpes suizos (Huggel *et al.*, 2007).

El modelo está integrado en el ambiente ArcGIS y posee 2 componentes: trayectoria y confinamiento. La componente de trayectoria usa el algoritmo D8 que consiste básicamente en que el flujo siga como trayectoria la dirección con mayor pendiente. Para zonas más planas, donde los flujos tienden a expandirse lateralmente, se agregó una función especial que permite al flujo desviarse de la dirección principal de mayor pendiente hasta 45° en ambos lados. Una vez que las zonas potencialmente afectadas por el paso de un flujo son delineadas, el programa también asigna un valor de probabilidad a cada celda del DEM, de ser afectadas por el flujo. Esta probabilidad está descrita por la función F_r que utiliza como principio el hecho que mientras más se desvíe una celda de la trayectoria de mayor pendiente, mayor es la resistencia. La razón H/F_r , donde H representa la distancia horizontal con respecto al punto de partida del flujo, determinado por el usuario, representa una función probabilística, y cada celda del DEM tiene asignada una probabilidad de ser afectada por el flujo, definida por:

$$P_q(i) = H(i) / F_r(i) \quad (\text{Huggel, 2003}) \quad (1)$$

$P_q(i)$ no es una función de probabilidad en sentido estricto, sino más bien una probabilidad cualitativa.

La componente de confinamiento, a su vez, está dada por la relación V/L en que V es la distancia vertical que el flujo desciende y L es la distancia horizontal recorrida. La relación V/L debe ser definida por el usuario y debe corresponder al “peor escenario”, esto es, la máxima extensión que podría tener un flujo en la zona estudiada, de acuerdo a los datos de que se dispongan (Castruccio, 2008).

LAHARZ

LAHARZ es un programa computacional, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1998 (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) que permite delinear zonas de peligro volcánico, asociadas a la posible inundación generada por flujos laháricos a través de un método semi-empírico. El modelo está implementado en el ambiente ArcGIS. El método utiliza una combinación de análisis dimensional y estadístico para determinar áreas de inundación transversal (A) y planimétricas (B) generadas por el flujo en función del volumen de éste. (Ilustración 3).

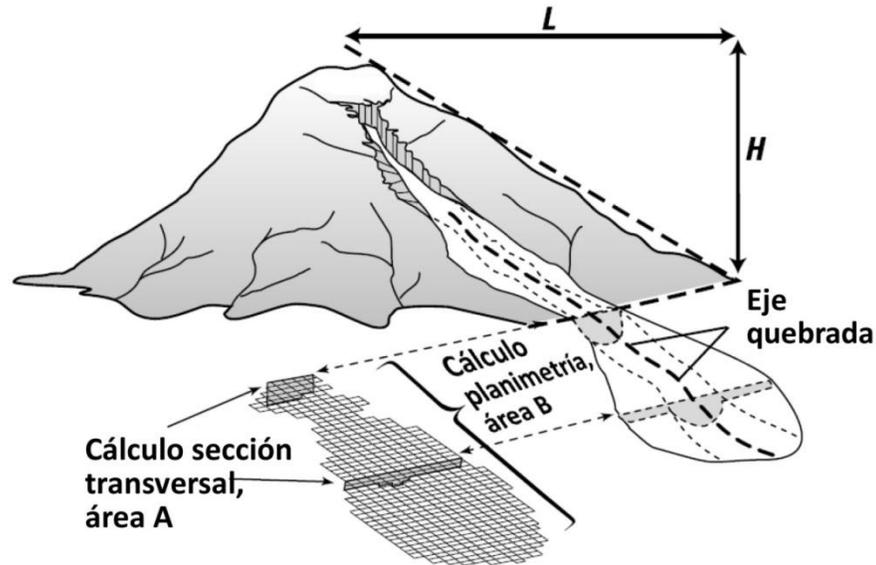


ILUSTRACIÓN 3: SECCIÓN TRANSVERSAL (A) Y PLANIMÉTRICA (B) DEFINIDAS PARA UN LAHAR, QUE SE UTILIZAN EN EL PROGRAMA LAHARZ. LA RAZÓN H/L DESCRIBE EL ALCANCE DE LA ZONA DE PELIGRO PROXIMAL, A PARTIR DEL CUAL COMIENZA LA DEPOSITACIÓN EN LA SIMULACIÓN (SCHILLING, 1998).

Para la aplicación de este modelo se asume una masa y densidad constante, por tanto un volumen constante y a través de una serie de ecuaciones se llega a las siguientes relaciones:

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

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

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

El uso de este programa presenta como ventaja la facilidad y rapidez en el uso del programa, lo que permite obtener resultados en poco tiempo y de forma económica, puesto que sólo se necesita un modelo digital de terreno del área que se desea estudiar. Por otro lado son desventajas del programa la simplificación que significa utilizar un volumen constante, la determinación arbitraria del punto donde comienza la descarga y la consideración del evento como un solo pulso. Este modelo es semi-empírico y no físico, lo que impide estudiar la dinámica del flujo o incorporar sus propiedades reológicas.

1.3.3. TRABAJO DE TERRENO

Durante el proceso del trabajo de memoria se realizaron dos salidas a terreno por el día, la primera con fecha 28 de octubre de 2011 donde se recorrió el lado sur de la Quebrada de Macul, el lado poniente de la quebrada el Durazno y las piscinas decantadoras; la segunda salida tuvo fecha 28 de enero de 2012, durante esta se recorrió el cauce de la quebrada de Macul, obteniendo información respecto al material susceptible a ser removido y al estado del cauce de la Quebrada de Macul. Los puntos de control de ambos terrenos se muestran en la Ilustración 4.

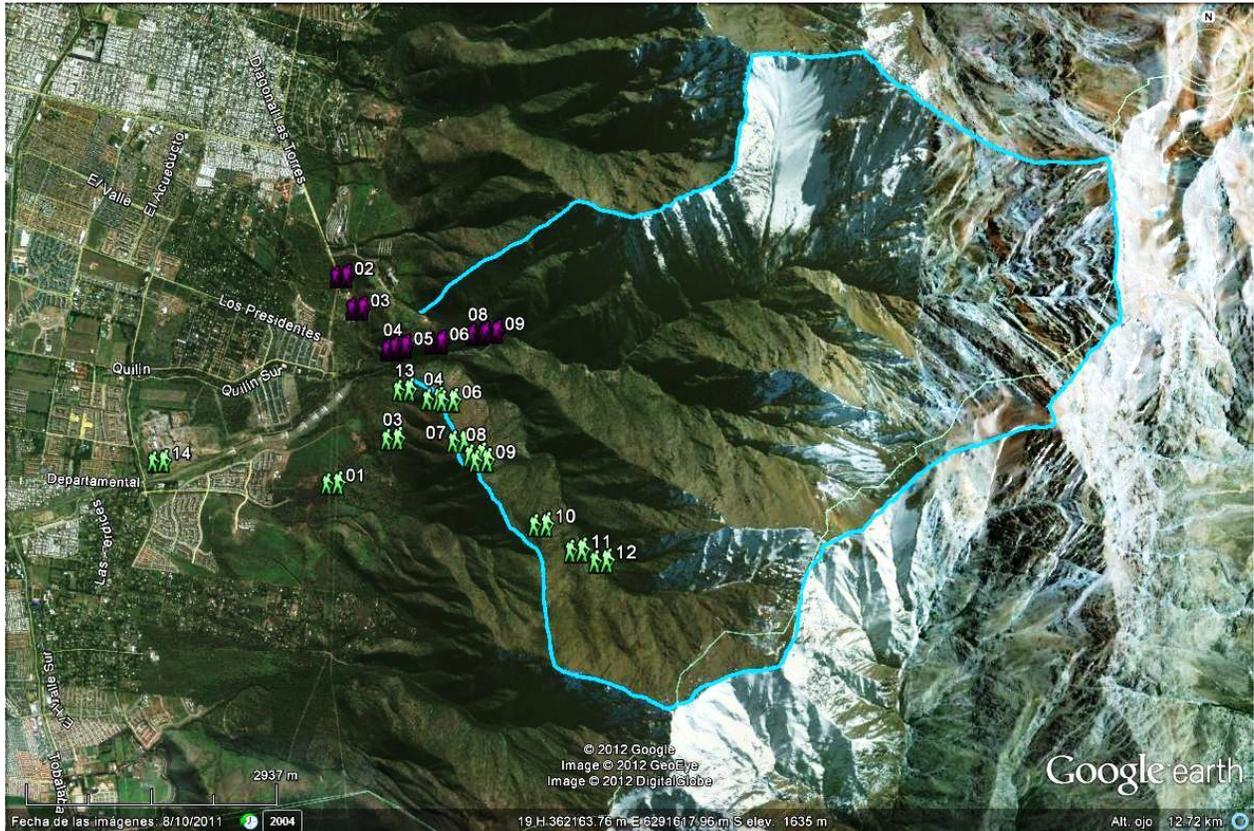


ILUSTRACIÓN 4: IMAGEN GOOGLE EARTH, CON LOS PUNTOS DE CONTROL DE SALIDAS A TERRENO, EN VERDE SE MUESTRAN LOS PUNTOS DEL TERRENO REALIZADO CON FECHA 28 DE OCTUBRE DE 2011, EN MORADO LOS PUNTOS DEL TERRENO CON FECHA 28 DE ENERO DE 2012.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. REMOCIONES EN MASA

Una Remoción en Masa es un movimiento descendente por efectos de la gravedad de un volumen de material constituido por roca, suelo o por ambos (Cruden, 1991).

Las Remociones en Masa (RM) comprenden distintos tipos de eventos donde varían tanto el material involucrado como el mecanismo de desplazamiento. En base a esto se han desarrollado distintas clasificaciones. Varnes (1978) ha desarrollado una clasificación basada en la naturaleza del material involucrado y el tipo de movimiento (Tabla 1).

TABLA 1: Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978)

TIPO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL		
Caída		Roca	Suelo	
Volcamiento				
Deslizamiento	Rotacional			
	Traslacional			
Extensiones laterales			Grano grueso (detritos, < 80% partículas < 2mm)	Grano fino (barro, >80% partículas < 2mm)
Flujos				
Complejos				

El material involucrado se caracteriza respecto a sus propiedades geotécnicas, diferenciando entre roca y suelo. Donde la roca se define como la masa firme, intacta antes del evento. El suelo se diferencia entre tierra o barro (> 80% partículas menores a 2mm), y detritos (20% - 80% partículas mayores a 2mm).

Posteriormente se han realizado sub clasificaciones, por ejemplo, los flujos, según el Proyecto Multinacional Andino 2007, pueden subdividirse en: Flujo de detritos, Crecida de detritos, Flujo de lodo, Flujo de tierra, Flujo de turba, Avalancha de detritos, Avalancha de rocas, Deslizamiento por flujo o Deslizamiento por licuación.

En este estudio se abordan particularmente los fenómenos de flujos, estos procesos afectan a una masa de suelo (detritos y/o barro), en que el material está saturado de agua y puede alcanzar una concentración de partículas tal que se comporte mecánicamente como un fluido no newtoniano (relación stress-strain no lineal), tendiendo a un comportamiento reológico de un fluido plástico-viscoso.

La proporción de la fracción fina es muy importante, puesto que controla el comportamiento de la masa, siendo alrededor del 10% la proporción crítica (puede ser más o menos dependiendo de las características particulares de la fracción fina), donde menor a esta proporción el flujo será del tipo granular (controlado por el choque entre las partículas), y mayor a esta proporción será un flujo controlado por el fluido intersticial.

Por otro lado se considera la concentración de sólidos. Si esta es menor al 50% se considera un “flujo hiperconcentrado”, mientras que sobre el 50% el comportamiento será el de un fluido viscoso.

Según el tipo de material, velocidad y grado de saturación, hay diversas clasificaciones para los flujos. Hungr (2001) ha desarrollado una clasificación basada en el material, el contenido de agua, la velocidad y condiciones espaciales (Tabla 2).

TABLA 2: Clasificación de flujos (Hungr, 2001)

MATERIAL	CONTENIDO DE AGUA	CONDICIONES ESPECIALES	VELOCIDAD	NOMBRE
Limo, arena, grava, detritos.	Seco, húmedo o saturado.	Sin exceso de presión de poros. Volumen limitado.	Variada.	Flujo de arena (limo, grava, detritos) no licuable
Limo, arena, detritos, roca meteorizada y/o poco resistente	Saturado en la superficie de ruptura	Material susceptible a licuefacción. Contenido constante de agua.	Extremadamente rápido.	Flujo de arena (limo, detritos, roca).
Arcillas sensitivas	En o sobre el límite líquido.	Licuefacción <i>in situ</i> . Contenido constante de agua.	Extremadamente rápido.	Flujo de arcilla.
Arcilla o tierra	Cercano al límite plástico.	Movimientos lentos.	< rápido	Flujo de tierra.
Detritos	Saturado	Desplazamiento por canales preexistentes. Contenido de agua en aumento.	Extremadamente rápido.	Flujo de detritos.
Barro	En o sobre el límite líquido.	Flujos de detritos de grano fino.	> muy rápido	Flujo de barro.
Detritos	Presencia libre de agua	Fluidizados.	Extremadamente rápido	Flujo de detritos.
Detritos	Parcial o totalmente saturado	Sin encauzamiento preexistente. Relativamente superficiales, y fuente en zonas altas	Extremadamente rápido.	Avalancha de detritos.
Roca fragmentada	Principalmente saturado	Roca intacta en la fuente. Gran volumen.	Extremadamente rápido.	Avalancha de rocas.

2.2. FLUJOS DE DETRITOS

2.2.1. DEFINICIÓN

Según la definición de Varnes (1978), un **flujo** es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída.

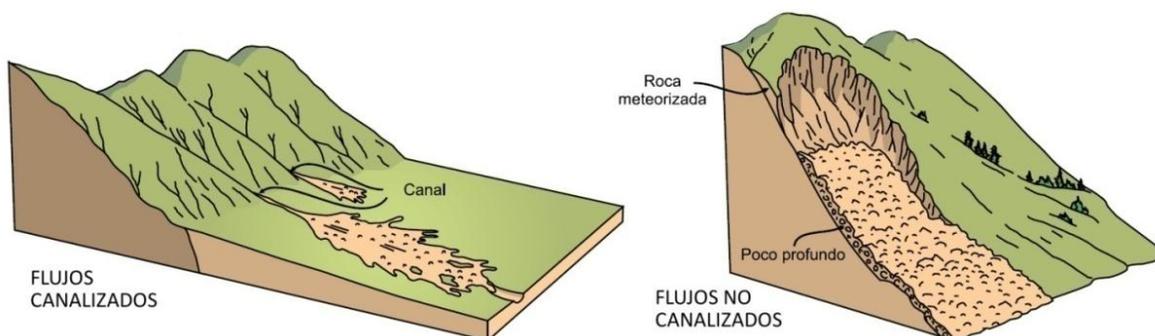


ILUSTRACIÓN 5: ESQUEMA DE FLUJOS CANALIZADOS Y NO CANALIZADOS. (CRUDEN Y VARNES, 1996).

Entendiendo que estos eventos son complejos, es necesario precisar que, un **flujo de detritos** es un movimiento en masa canalizado, mientras que una **avalancha de detritos** es un movimiento que se desliza sobre laderas de alta pendiente (Ilustración 5), el que puede confinarse y desencadenar un flujo. En este sentido, una avalancha en alguna ladera particular podrá considerarse un factor gatillante de un flujo de detritos.

Un **flujo de detritos**, según Cruden y Varnes (1996), es un flujo muy rápido a extremadamente rápido (Tabla 3) de detritos saturados, no plásticos ($IP < 5\%$), transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce preexistente. Cuando el flujo es de detritos saturados plástico ($IP > 5\%$) recibe el nombre de **flujo de lodo** y es en estos casos donde la fracción fina modifica la reología del material entregándole al fluido un comportamiento no newtoniano (relación stress-strain no lineal) (Hung et al., 2001).

TABLA 3: Escala de velocidades (Cruden y Varnes, 1996).

CLASES DE VELOCIDADES	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD (mm/s)	VELOCIDAD TÍPICA
7	Extremadamente rápido	$v > 5 \times 10^3$	$v > 5$ m/s
6	Muy rápido	$5 \times 10^3 > v > 5 \times 10^1$	5 m/s $> v > 3$ m/min
5	Rápido	$5 \times 10^1 > v > 5 \times 10^{-1}$	3 m/min $> v > 1,8$ m/h
4	Moderada	$5 \times 10^{-1} > v > 5 \times 10^{-3}$	1,8 m/h $> v > 13$ m/mes
3	Lenta	$5 \times 10^{-3} > v > 5 \times 10^{-5}$	13 m/mes $> v > 1,6$ m/año
2	Muy lenta	$5 \times 10^{-5} > v > 5 \times 10^{-7}$	1,6 m/año $> v > 16$ mm/año
1	Extremadamente lenta	$5 \times 10^{-7} > v$	16 mm/año $> v$

2.2.2. MORFOLOGÍA

Los eventos de flujos están compuestos por oleadas o pulsos, cada cual presenta una morfología característica como se muestra en el diagrama de Pierson (1986) en la Ilustración 6, donde priman distintos mecanismos de transporte de material fino y granular, niveles de energía y volumen de material.

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

El frente o cabeza del flujo tiene un comportamiento turbulento, transporta material granular, incluyendo grandes bloques (dependiendo del material disponible), es la zona más alta del flujo, pudiendo superar los 10 metros. Esta característica es la que le otorga el gran nivel destructivo a estos eventos (Pierson, 1986).

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

La cola sigue al cuerpo, es la zona de menor altura en un pulso, tiene un comportamiento laminar, transporta partículas finas y en función de la disponibilidad de estas, puede presentarse de líquida a hiperconcentrada (Pierson, 1986).

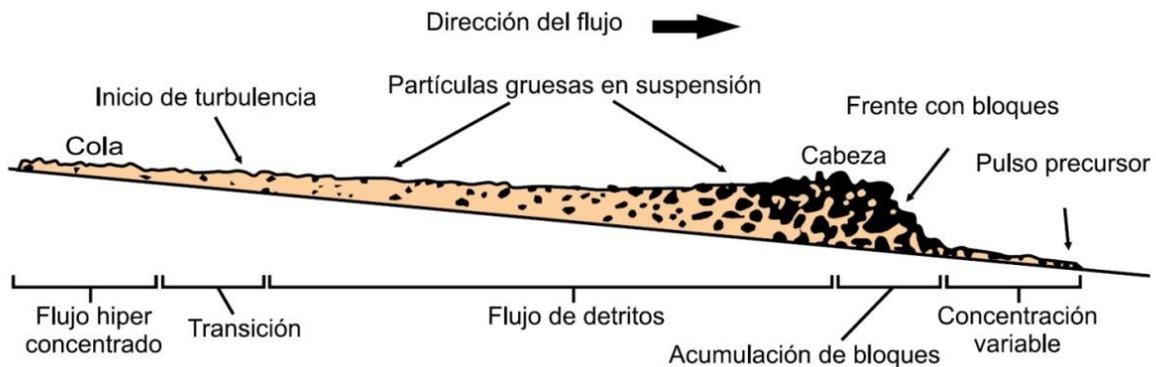


ILUSTRACIÓN 6: MORFOLOGÍA DE UN PULSO EN UN FLUJO DE DETRITOS, DIAGRAMA DE PIERSON (1986).

2.3. PELIGRO GEOLÓGICO

Peligro, riesgo, amenaza, vulnerabilidad y susceptibilidad son términos que se van a utilizar reiteradamente en este trabajo y que hacen referencia a distintos conceptos, su utilización rigurosa es importante para la correcta comprensión del trabajo expuesto.

2.3.1. DEFINICIONES

Peligro o amenaza (H) es una condición o proceso geológico potencialmente catastrófica. Existen dos tipos de peligros distinguibles: **Peligro declarado o actual** que es una condición o proceso geológico que constituye un peligro, y que se ha producido en el pasado o está en evolución, dejando evidencias geomorfológicas, sedimentológicas o de otra naturaleza que permiten identificarlo (Oliver y Renet, 1976). **Peligro potencial** por otro lado es la condición o proceso geológico que potencialmente puede ocurrir en el futuro en una determinada zona, constituyendo un peligro geológico. Se define a través del análisis de factores desfavorables que pueden inducir el peligro o actualizarlo (Oliver y Renet, 1976).

El **grado de peligro o peligrosidad** es la probabilidad de que suceda un evento de este tipo durante cierto periodo de tiempo en un sitio determinado (Oliver y Renet, 1976).

Los **elementos bajo riesgo (E)** corresponden a la población, las propiedades, las actividades económicas u otros, que se encuentran bajo riesgo en un área determinada. Los elementos bajo riesgo son cuantificables y se les puede aplicar una unidad de valor (Oliver y Renet, 1976).

La **vulnerabilidad (V)** corresponde al grado de pérdida de elementos bajo riesgo en caso de ocurrir un evento peligroso. La vulnerabilidad puede ser medida en una proporción (0 a 100%) del costo susceptible a ser perdido por la ocurrencia de un evento peligroso dado (Varnes, 1984).

El **riesgo** comprende dos subdefiniciones: **riesgo específico (Rs)** que corresponde al grado de pérdida esperado debido a un fenómeno peligroso particular. $R_s = H * V$ (Varnes, 1984).

Riesgo total (R) corresponde al número esperado de vidas perdidas, personas damnificadas, daños a la propiedad, daños a la actividad económica u otros, que causaría la ocurrencia de un fenómeno peligroso (Varnes, 1984).

$$R = E * R_s \quad (4)$$

$$R = E * H * V \quad (5)$$

Se entiende por **catástrofe** una perturbación repentina y violenta de la naturaleza, atribuida a causas naturales excepcionales, que afectan las condiciones físicas de la superficie terrestre (Varnes, 1984).

Se entiende por **desastre** la interacción de un fenómeno geológico catastrófico y una comunidad u obra humana, que causa alteraciones intensas en las personas, los bienes, los servicios y/o el ambiente. Un desastre es la ocurrencia efectiva de un fenómeno peligroso que, como

consecuencia de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, causa efectos adversos sobre los mismos.

La **Evaluación de Peligros** es una técnica de naturaleza predictiva cuyo objetivo es identificar los tipos de eventos peligrosos, determinar la frecuencia de tales eventos y definir las condiciones espaciales y temporales de su ocurrencia (Tadashi, 1995).

La **Evaluación o Análisis de Riesgo** es una técnica que, a partir de la evaluación de peligros, trata de cuantificar las informaciones, correlacionando la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos con la probabilidad de consecuencias indeseables, estimándose los daños y realizándose estudios de vulnerabilidad (Tadashi, 1995).

La **susceptibilidad** es la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada o generar un proceso geológico determinado.

Periodo de Retorno es el intervalo de tiempo en el que se puede producir un suceso de un determinado nivel y se calcula por medios estadísticos.

Una metodología para enfrentar estos estudios es a través del esquema conceptual mostrado en la Ilustración 7.

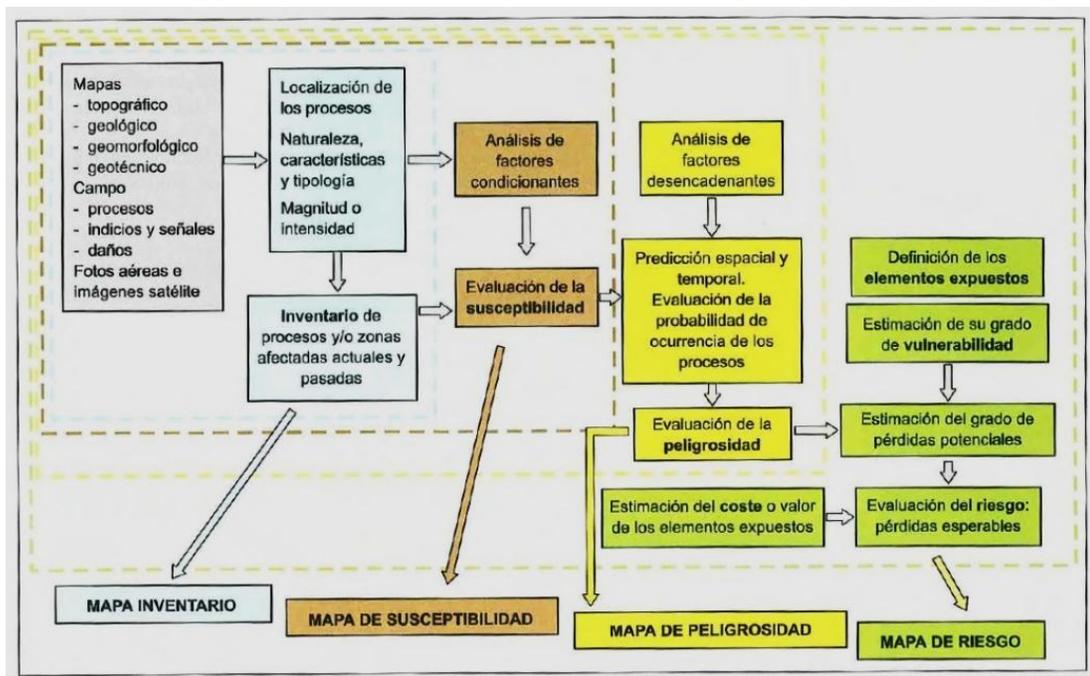


ILUSTRACIÓN 7: ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA PARA REALIZACIÓN DE LOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD, PELIGROSIDAD Y RIESGO (MODIFICADO DE FERRER, 1991).

2.4. FACTORES CONDICIONANTES DE EVENTOS DE REMOCIONES EN MASA EN LA PRECORDILLERA DE CHILE CENTRAL

Factores condicionantes son aquellos que configuran una condición potencialmente inestable, se consideran principalmente la geomorfología, la geología y las condiciones geotécnicas de los materiales, el clima y la vegetación presente en la zona. Adicionalmente, perturbaciones antrópicas del espacio pueden constituir también un factor desencadenante.

Siguiendo la metodología de Lara (2007) se tendrán en consideración los siguientes aspectos para cada factor:

Respecto a la **geomorfología** será importante determinar la geometría de la ladera y de la masa susceptible a ser removida. Los elementos a analizar se componen por:

- Pendiente de la ladera (pendientes medias y quiebres abruptos de pendientes).
- Concavidad de la ladera tanto en la dimensión vertical como horizontal.
- Morfología de la unidad (ladera, acantilado, depósitos antiguos, presencia de cauce al pie de la ladera, forma de cuenca receptora y otros).
- Altura de la ladera.
- Orientación de la ladera, para efectos de la exposición al sol y de la respuesta sísmica.

La **geología** condiciona directamente las cualidades geotécnicas del material y la estructura de la ladera. Por ello deben ser analizados y definidos los siguientes elementos:

- Tipo de roca o suelo.
- Meteorización (definir intensidad y distribución).
- Hidrogeología (redes de drenaje subterráneas y en superficie).
- Estructuras regionales: ambiente tectónico, alzamientos, tasas de erosión, actividad sísmica u otros.
- Estructuras locales: ubicación y disposición de fallas, diaclasas, zonas de cizalle, diques, etc.
- Historia geológica: tener en consideración la posible reactivación de movimientos anteriores.

Respecto a la **geotecnia** siempre es mejor manejar la mayor cantidad de información, pero generalmente no es posible, tanto por el presupuesto que ello requiere, como por la accesibilidad del espacio a estudiar. En la Quebrada de Macul la accesibilidad y la baja ocurrencia de afloramientos constituye un problema no menor que se deberá tener en cuenta durante el estudio.

Los factores más relevantes a la hora de definir la geotecnia son:

- Resistencia del material intacto.
- Resistencia al corte de las estructuras.
- Relleno de las estructuras.
- Densidad del material.
- Grado de saturación.

- Clasificación granulométrica del suelo.
- Plasticidad del suelo.
- Otros (que busquen complementar la información que no es posible obtener directamente).

El **clima** en las RM juega tanto un rol condicionante como un rol desencadenante, por esto haremos la diferencia entre condiciones regulares del clima, las que corresponderán al factor condicionante y condiciones extremas (principalmente de abundantes precipitaciones) que corresponderán a un factor desencadenante. Respecto a lo primero, se deben considerar los siguientes elementos:

- Intensidad y frecuencia de las precipitaciones.
- Estacionalidad.
- Cambios de temperaturas.
- Altura de la isoterma 0°C o altura de línea de nieves (HLN).

La **vegetación** generalmente actúa como elemento estabilizador al proteger la ladera de la erosión por lluvia y escurrimiento; por otra parte las raíces tienden a fortalecer el suelo en pendientes moderadas. Sin embargo la vegetación puede convertirse en un elemento desestabilizador cuando aporta demasiado peso a la ladera (bosques de árboles grandes). Los elementos a considerar serán:

- Densidad de la vegetación.
- Tipo de vegetación.

La **intervención antrópica** debe ser considerada pues genera cambios en las propiedades de los materiales, en los esfuerzos, en los niveles de agua, la capacidad de infiltración, la geometría de las laderas y la permeabilidad de los suelos. Especial atención hay que tener con depósitos susceptibles de movilizarse (áridos, relaves, presas, etc.).

2.5. FACTORES DESENCADENANTES DE EVENTOS DE FLUJOS EN LA PRECORDILLERA DE CHILE CENTRAL

Los principales factores desencadenantes de eventos de flujos corresponden a lluvias intensas y a aceleraciones producidas por sismos, siendo el primero un factor de primer orden y el segundo un factor de segundo orden en términos de la frecuencia de ocurrencia, también pueden contribuir a la desestabilización de taludes y laderas intervenciones antrópicas tales como deforestación y construcción de taludes y caminos.

2.5.1 PRECIPITACIONES

Las lluvias intensas, ya sea de intensas precipitaciones en pocas horas o bien de intensidad media pero de duración de varios días, gatillan remociones en masa, principalmente debido a los efectos de la saturación del suelo y de las fuerzas erosivas de los flujos de agua tanto superficiales (escorrentía) como subsuperficiales (*seepage*).

La saturación del suelo es la condición en la cual los intersticios entre granos de un suelo se encuentran llenos de agua, esta agua entre los granos genera presión de poro, disminuyendo el esfuerzo efectivo del suelo y con ello la resistencia y la estabilidad de la ladera. Los incrementos en la presión de poros pueden estar relacionados con la infiltración y percolación y/o a alzas del nivel de agua subterránea.

En el capítulo “3.5 Clima e hidrología” se presenta un modelo estadístico multivariable realizado por Padilla (2006) y Sepúlveda y Padilla (2008) que relaciona las precipitaciones con las remociones en masa en el sector oriente de Santiago, considerando las precipitaciones diarias, las precipitaciones antecedentes o acumuladas en 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días y la altura de línea de nieve (*HLN*) para los días con precipitaciones, lo que permite estimar probabilidades de ocurrencia de remociones ante escenarios meteorológicos dados.

2.5.2 SISMICIDAD

Los sismos, por su parte, generan fuerzas adicionales a las fuerzas estáticas, generando un cambio temporal en el campo de esfuerzo de la ladera, afectando esfuerzos normales y de corte, pudiendo gatillar la inestabilidad temporal de un talud. Esta fuerza sísmica es dinámica, cíclica y de corta duración, por lo que el comportamiento del suelo, generalmente, es no drenado, aún en suelos gruesos, por lo tanto, un sismo es capaz de desencadenar remociones en masa, sólo al afectar suelos saturados.

El peligro sísmico, es definido por Leyton *et al.* (2010) como la probabilidad de exceder un cierto parámetro sísmico como intensidad de Mercalli modificada o aceleración horizontal máxima (PGA), durante un lapso de vida útil para una zona definida.

En la zona de estudio, el principal sistema de fallas corresponde al Sistema de Falla San Ramón (SFSR), este sistema es responsable de los sismos corticales de la precordillera de la Región Metropolitana, en la Ilustración 8 se presenta la ubicación del SFSR respecto a la hoya de la Quebrada de Macul y el resultado del área de vulnerabilidad proyectada, realizada por Territorio y Ciudad Consultores.

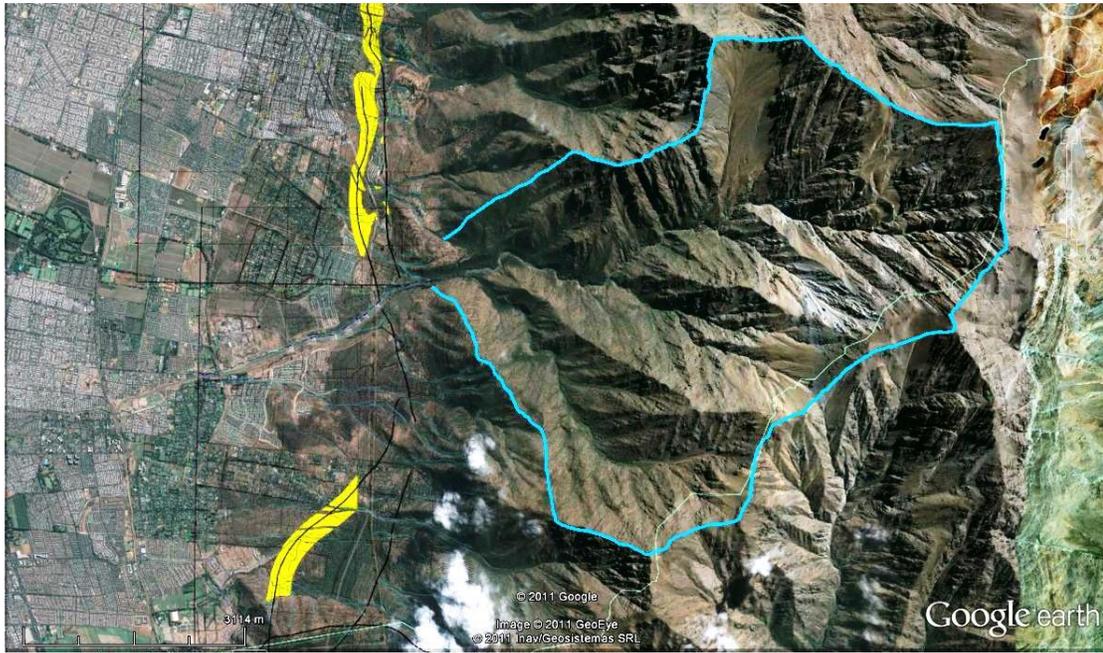


ILUSTRACIÓN 8: TRAZA DE FALLA SAN RAMÓN (LÍNEAS NEGRAS) EN LA ZONA DE DESCARGA DE LA QUEBRADA DE MACUL. EN AMARILLO SE PRESENTA EL ÁREA DE VULNERABILIDAD PROYECTADA, TOMADO DEL ESTUDIO "RIESGO Y MODIFICACIÓN PRMS FALLA SAN RAMÓN" DE TERRITORIO Y CIUDAD CONSULTORES (NOVIEMBRE, 2011). EL COLOR AMARILLO CORRESPONDE AL GRADO 2 (DE 1 A 5) QUE SE INTERPRETA COMO BAJA.

Keffer (1984) estableció una relación estadística entre la magnitud de un sismo y la distancia máxima desde el epicentro para la ocurrencia de deslizamientos (Ilustración 9). La distancia máxima entre el SFSR y la cuenca de la Quebrada de Macul no supera los 8 km, por lo que un sismo sobre los 5 grados de magnitud podría generar todo tipo de remociones en masa.

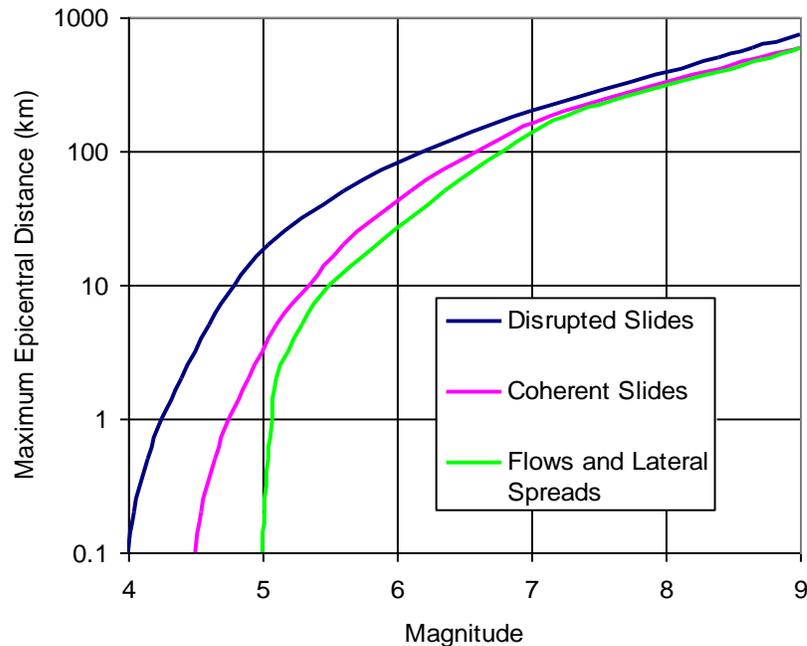


ILUSTRACIÓN 9: RELACIÓN ESTADÍSTICA MAGNITUD VS DISTANCIA MÁXIMA DESDE EL EPICENTRO PARA LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS (KEEFER, 1984)

2.6. MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Debido a los desastrosos efectos que han generado eventos de flujos de detritos, tanto pérdidas humanas como materiales, se han diseñado diversas obras de mitigación destinadas a disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento (estabilización de taludes), disminuir la energía del flujo (presas permeables y modificación de pendientes) y a depositar o contener los sedimentos (barreras y mallas contenedoras, piscinas decantadoras).

Un trabajo detallado de estas obras desde la perspectiva de la ingeniería civil, se encuentra en la memoria de doctorado “Estudio experimental de obras de protección contra aluviones” de Santiago Montserrat Michelini (2005), del cual se extrae la información relevante para este capítulo.

Las obras civiles de mitigación se localizan en distintas partes de la zona afecta al peligro, tal como se muestra en la Ilustración 10.

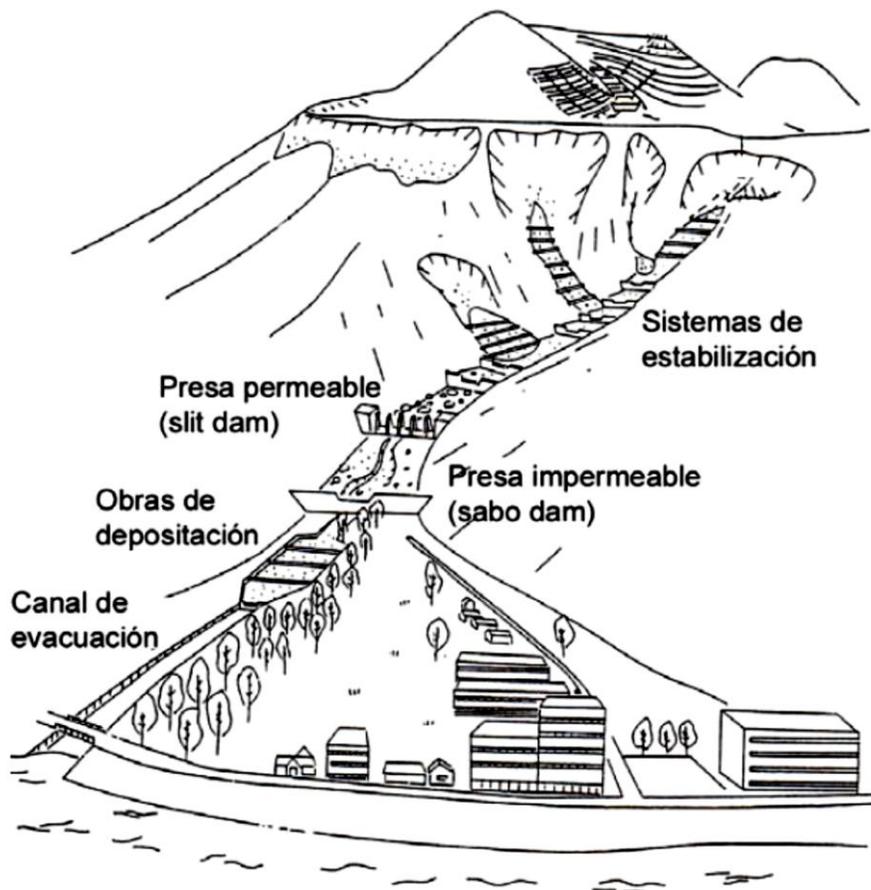


ILUSTRACIÓN 10: EJEMPLO DE COMBINACIÓN DE DISTINTAS SOLUCIONES DE PROTECCIÓN CONTRA ALUVIONES (SEMINARA Y TURBINO, 1993).

El correcto diseño de estas obras se debe realizar teniendo en consideración la geometría de la quebrada, las condiciones de precipitaciones a las que está expuesta, el material susceptible de ser transportado y la zona de descarga de la quebrada.

2.7.1. OBRAS QUE RESTRINGEN LA OCURRENCIA DE FLUJOS

Estas obras están orientadas a prevenir el movimiento de los depósitos en el lecho, según Okubo *et al.* (1997) esto es fundamental para controlar la generación de flujos detríticos en las partes altas de las cuencas o zonas propensas a originarlos. Fiebiger (1997) sostiene la necesidad de una estabilización a gran escala en la zona de inicio de flujos, donde el material es susceptible a ser removido. Esto se puede lograr a través de la vegetación de la ladera y de la construcción de presas contenedoras.

Las presas contenedoras, se construyen en serie con el fin de disminuir la pendiente en forma local, y minimizar la erosión en el fondo y laderas del cauce, (VanDine, 1996) como se muestra en la Ilustración 11.

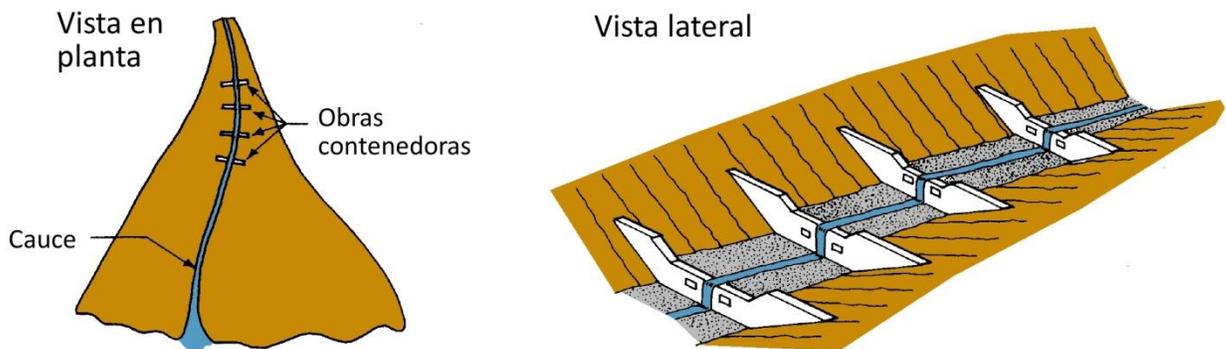


ILUSTRACIÓN 11: ESQUEMA DE UBICACIÓN Y FUNCIÓN DE PRESAS CONTENEDORAS (VANDINE, 1996).

Según Chanson (2001) la presa contenedora más típica corresponde a la presa de pared de concreto vertical, esta tiene como objeto principal atrapar el sedimento y a la vez reducir la pendiente aguas arriba una vez que se ha llenado la presa con los sedimentos, aguas abajo, la cara es vertical y va seguida de una obra disipadora de energía. Estas presas típicamente tienen entre 3 y 15 m de altura, un ejemplo se muestra en la Ilustración 12.

La construcción de presas de esta categoría deben considerar en su diseño, las fuerzas dinámicas y de impacto asociadas a la ocurrencia del flujo, deslizamiento, volcamiento, presiones de levantamiento y cargas sobre las fundaciones, (VanDine, 1996). La erosión al pie de la estructura es uno de los problemas más frecuentes que presentan este tipo de presas, debido al nivel de energía asociado a la caída del flujo, por lo tanto las fundaciones de estas presas deben ser tan profundas como la máxima profundidad capaz de alcanzar la socavación al pie de la estructura. El riesgo de la erosión al pie de la presa puede ser también reducido agregando rocas en el lecho.

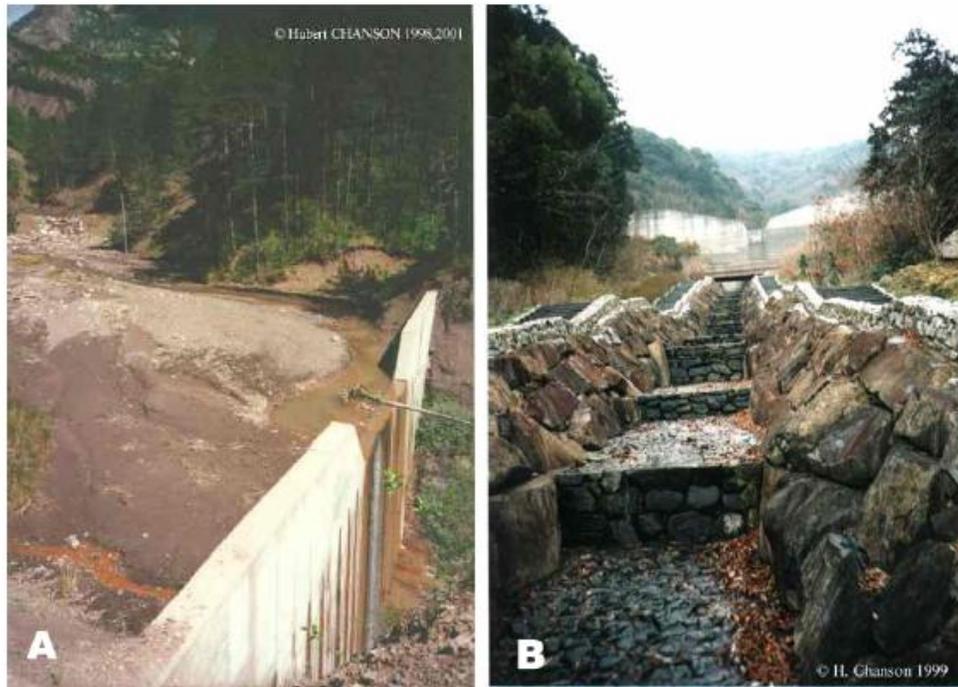


ILUSTRACIÓN 12: EJEMPLO DE PRESAS CONTENEDORAS. A) PRESA LLENA DE SEDIMENTOS; B) VISTA DEL CANAL ESCALONADO AGUAS DEBAJO DE LA PRESA (CHANSON, 2001).

2.7.2. OBRAS DE ALMACENAMIENTO

Las obras de almacenamiento cumplen las siguientes funciones (Okubo *et al.*, 1997):

- Capturar el flujo detrítico de manera de reducir el volumen de la descarga de sedimento.
- Aumentar el período de tiempo entre el inicio del flujo y su arribo.
- Prevenir el movimiento de depósitos en el lecho.
- Capturar rocas y troncos en la cabeza del flujo.
- Disminuir la concentración de sedimentos en el flujo.
- Reducir el máximo de la descarga.

Dentro de esta clasificación se pueden incluir también las estructuras de disipación de energía y sistemas de presas definidos por Fiebiger (1997). Los ejemplos típicos mencionados por Okubo *et al.* (1997), corresponden a presas impermeables y permeables.

Es importante que en las obras de almacenamiento no haya depositación producto de pequeñas o medianas crecidas, para que mantengan así su capacidad de sedimentación, este problema se acentúa más en el caso de las presas impermeables. Por este motivo son recomendables las presas del tipo permeables ya que no entorpecen el arrastre ordinario del cauce ni de los organismos vivos que transitan a lo largo de él (Armanini *et al.*, 1991; Seminara y Turbino, 1993; Fiebiger, 1997; Mizuyama y Mizuno, 1997). El mecanismo de funcionamiento de este tipo de presas se presenta en la Ilustración 13.

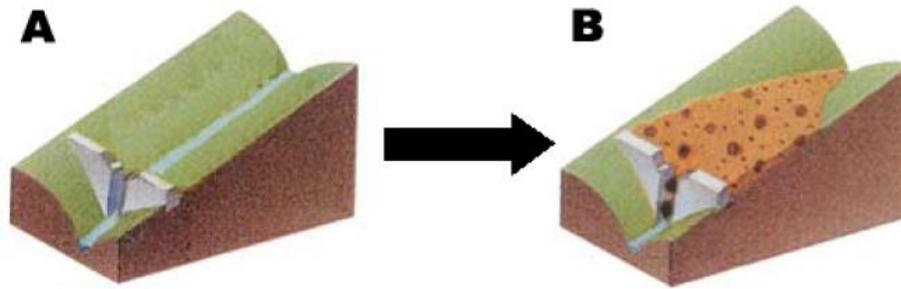


ILUSTRACIÓN 13: FUNCIÓN DE PRESAS PERMEABLES: A) LA PRESA PERMITE QUE LOS SEDIMENTOS ESCURRAN LIBREMENTE PARA CONDICIONES NORMALES; B) CUANDO OCURRE UN FLUJO DE TRÍFICO DE PROPORCIONES, LOS SEDIMENTOS SON CAPTURADOS Y RETENIDOS TEMPORALMENTE PREVIENIENDO DESASTRES AGUAS ABAJO (INTERNATIONAL SABONETWORK, [HTTO://WWW.SABO-INT.ORG](http://WWW.SABO-INT.ORG)).

Las presas impermeables también son utilizadas como obras de almacenamiento, las que tienen por función retener gran parte de los sedimentos arrastrados por el flujo, de tal forma que aguas abajo la concentración de sedimentos sea lo suficientemente baja como para no causar daños y ser conducidos sin mayores problemas. Este tipo de obras deben tener una mantención permanente para que se mantengan operativas.

Una gran cantidad de formas han sido diseñadas y probadas con el fin de optimizar sus objetivos. Dentro de las estructuras permeables pueden ser reconocidas dos formas básicas, las que muchas veces se combinan en una sola estructura (Armanini *et al.*, 1991):

Presas en base a vigas horizontales (beam-dam)

Consisten en estructuras con aperturas horizontales, instaladas, en lo posible, sin provocar estrechamientos en el cauce, cuyo propósito principal es el de filtrar sedimentos y troncos. El ancho de separación de los elementos horizontales debe ser proporcional al tamaño de las rocas más grandes (Armanini *et al.*, 1991). Un ejemplo de estas estructuras se muestra en la Ilustración 22.



ILUSTRACIÓN 14: PRESA DE APERTURA HORIZONTAL (BEAM-DAM) (MIZUYAMA, 2003).

Presas de aperturas verticales (slit-dam)

Estas estructuras poseen una o más aperturas verticales, las que usualmente se prolongan hasta el lecho original del cauce. El efecto principal de es el de dosificar los volúmenes de sedimento transportados en crecidas. Este efecto se obtiene por la aparición de una condición de aguas abajo y la generación de un resalto hidráulico durante la ocurrencia de crecidas, reduciendo así la velocidad del flujo, permitiendo la depositación de las partículas. Las partículas que son depositadas pueden ser arrastradas posteriormente por flujos menores (Armanini *et al.*, 1991). Este tipo de presas se presenta en la Ilustración 15.

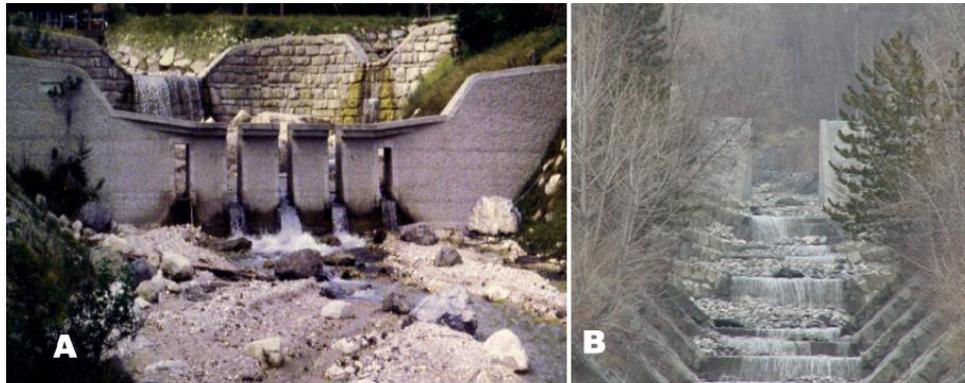


ILUSTRACIÓN 15: PRESAS DE APERTURAS VERTICALES. A) MÚLTIPLES APERTURAS (FIEBIGER, 2003). B) UNA APERTURA (SLIT-DAM) (CHANSON, 2001).

Existen discusiones entre varios autores respecto a la importancia de la apertura de la presa o separación entre los elementos que la componen. En general esta apertura se expresa con relación al tamaño máximo de los sedimentos (Mizuyama y Mizuno, 1997; Fiebigger, 1997; Chen y Ho, 1997; Lin et al., 1997; Johnson y McCuen, 1989).

A partir de experiencias realizadas por Watabanbe et al., Senoo y Mizuyama (1984) establecen que en el caso de presas de apertura vertical, si el tamaño de la apertura es menor que 1,5 veces el tamaño máximo de los sedimentos, todo el sedimento es atrapado por la estructura y éste nunca saldrá de la presa por acción de pequeñas crecidas. Si la apertura es mayor a 2 veces el tamaño máximo de los sedimentos, la mayoría de los granos son atrapados en un principio y luego sacados de la presa por el agua que sigue al flujo detrítico. Estudios posteriores han establecido que la capacidad de retención de sedimentos no sólo depende del tamaño de las aperturas y del sedimento, sino que también de la concentración (Mizuyama *et al.*, 1996; Mizuyama y Mizuno, 1997).

Barreras flexibles

Las barreras de redes de tipo deformable contra caída de rocas, absorben la energía cinética del impacto en virtud de las deformaciones elástico-plásticas de sus componentes; estas barreras son utilizadas también, para contener deslizamientos originados por arrastres de materiales o aluviones.

El criterio de evaluación de la eficiencia de una barrera contra caída de rocas, basado exclusivamente en el nivel de energía cinética absorbible, omite la forma del material que impacta contra la barrera. Dado que las tensiones en los cables de anclaje son proporcionales a la deformación máxima de la red, los esfuerzos dependen del nivel de energía y del tiempo de actuación del fenómeno. A una misma energía, si los tiempos de impacto son mayores, las tensiones que soportan los cables de anclaje son menores. Por lo tanto, una barrera flexible que soporta un impacto de roca con una energía cinética máxima determinada, es capaz de resistir con mayor seguridad el empuje y la carga de un flujo de detritos de igual energía máxima. (<http://www.abianchini.es>)



ILUSTRACIÓN 16: BARRERA FLEXIBLE POSTERIOR A LA OCURRENCIA DE UN FLUJO
([HTTP://WWW.WARCO.COM.CO/CKFINDER/USERFILES/IMAGES/CONTROL-FLUJO-DE-DETRITOS.JPG](http://www.warco.com.co/ckfinder/userfiles/images/control-flujo-de-detritos.jpg))

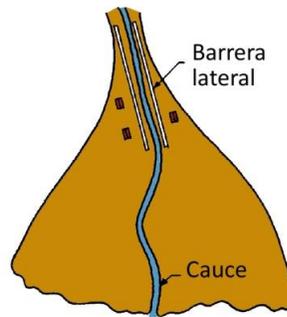
Los diseños de estructuras permeables, cumplen con distintos objetivos dentro de la estrategia de control aluvional; por esto, se pueden combinar con el fin de lograr mejores resultados para dicho control. Una caracterización de los distintos efectos, junto con el diseño estructural adecuado, es presentada por Armanini *et al.*, (1991).

2.7.3. OBRAS CONTROLADORAS DE DIRECCIÓN DEL FLUJO

Este tipo de obras se utilizan para llevar los flujos detríticos a lugares seguros, mediante canales capaces de conducir el máximo de la descarga. Generalmente se conectan con obras de almacenamiento o depositación (Okubo *et al.*, 1997). Los canales pueden materializarse mediante barreras laterales capaces de contener el flujo dentro de ellas, con el objetivo de proteger áreas o estructuras colindantes, como se presenta en la Ilustración 17.

Estas construcciones deben ser, dentro de lo posible, rectas y paralelas a la dirección del flujo. En los casos donde se deban realizar curvas, el radio de curvatura de éstas, debe ser lo más grande posible. Por otro lado estas obras deben estar diseñadas de tal forma que no ocurra sedimentación dentro de ellas, ya que esto disminuiría su capacidad de porteo, por lo que deben ser mantenidas permanentemente. Las consideraciones de diseño que se deben tener, son el caudal máximo y la máxima altura de escurrimiento para las dimensiones y la erosión y estabilidad para la construcción (VanDine, 1996; Okubo *et al.*, 1997).

Vista en planta



Vista lateral

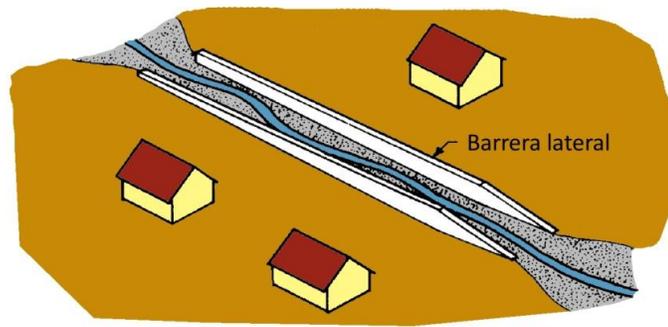
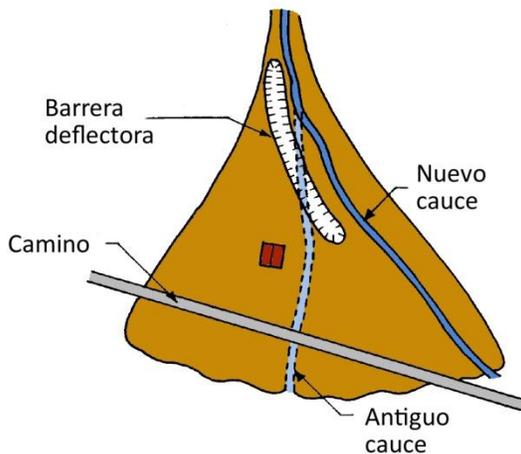


ILUSTRACIÓN 17: BARRERAS LATERALES (VANDINE, 1996).

2.7.4. DIQUES DESVIADORES DEL FLUJO O BARRERAS DEFLECTORAS

Este tipo de obras se utiliza para controlar la dirección de los flujos mediante la construcción de diques lo suficientemente altos como para prevenir rebases (Okubo *et al.*, 1997), se diferencian de las barreras laterales en que este tipo de obras impide que el flujo mantenga su dirección natural desviándolo hacia otra zona y son utilizadas para proteger estructuras, dirigir el flujo hacia otra zona, o aumentar el largo local del cauce, disminuyendo así su pendiente para favorecer la depositación, como se muestra en la Ilustración 18. En cuanto a los criterios de diseño utilizados para la construcción de estas obras,, debido a la curvatura que tendrá el cauce, deben considerarse las fuerzas de impacto, la sobre-elevación y el trepamiento del flujo (VanDine, 1996).

Vista en planta



Vista lateral

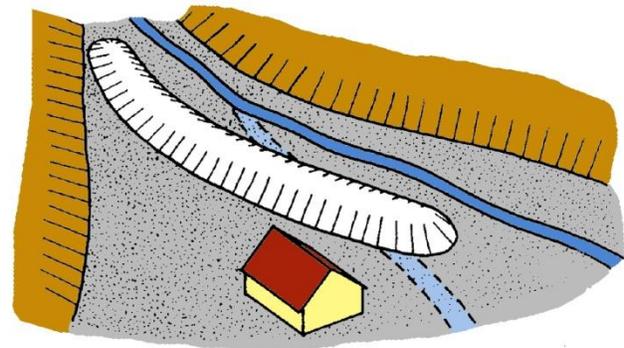


ILUSTRACIÓN 18: DIQUES DESVIADORES (VANDINE, 1996).

2.7.5. OBRAS DE DEPOSITACIÓN

Estas obras se utilizan para forzar la depositación de los sedimentos una vez disminuida la energía del flujo. Fiebiger (1997) plantea que estas estructuras corresponden a grandes trampas que pueden detener y almacenar el volumen del aluvión. Esta solución, generalmente es difícil de implementar, debido a lo costoso que resulta, al tiempo de construcción y al espacio necesario.

Las áreas de depositación pueden ser excavadas y preparadas, con el fin de disminuir la pendiente y así también disminuir la distancia de alcance del flujo y aumentar el volumen de almacenamiento. Generalmente este tipo de control es acompañado por impedimentos para el flujo y barreras terminales, las que son construidas para facilitar la depositación de los sedimentos, ya que presentan una obstrucción física para el flujo (VanDine, 1996).

Algunos de los criterios para el diseño de estas obras son, el volumen del flujo, la distancia de alcance, las fuerzas de impacto, la sobre-elevación, el trepamiento y el ángulo de depositación (VanDine, 1996).

Posterior a la ocurrencia de un flujo, estas obras deben ser limpiadas y mantenidas para prepararlas para un próximo evento (VanDine, 1996; Okubo *et al.*, 1997).



ILUSTRACIÓN 19: OBRAS DE DEPOSITACIÓN (WWW.MALA.BC.CA/~EARLES/HOWESOUND).

3. ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA EN QUEBRADA DE MACUL

3.1.2. GEOMORFOLOGÍA

La zona de estudio de este trabajo corresponde a la hoya hidrográfica de la quebrada de Macul y su desembocadura en la cuenca de Santiago. En esta desembocadura se han construido 7 piscinas de contención y decantación con el objetivo de mitigar los daños generados por flujos provenientes de la quebrada.

La quebrada de Macul se encuentra localizada en el sector suroriente de Santiago (Ilustración 1) tiene una orientación este-oeste. Su cauce mayor se extiende por más de 12 km. La hoya hidrográfica tiene 7 km de longitud y abarca una superficie de 25,57 km². Se encuentra limitada por los cerros: San Ramón 3.253 m s.n.m., Las Minillas 2.488 m s.n.m. y Bandera 2.077 m s.n.m. (Naranjo y Varela, 1996) ver Ilustración 20.

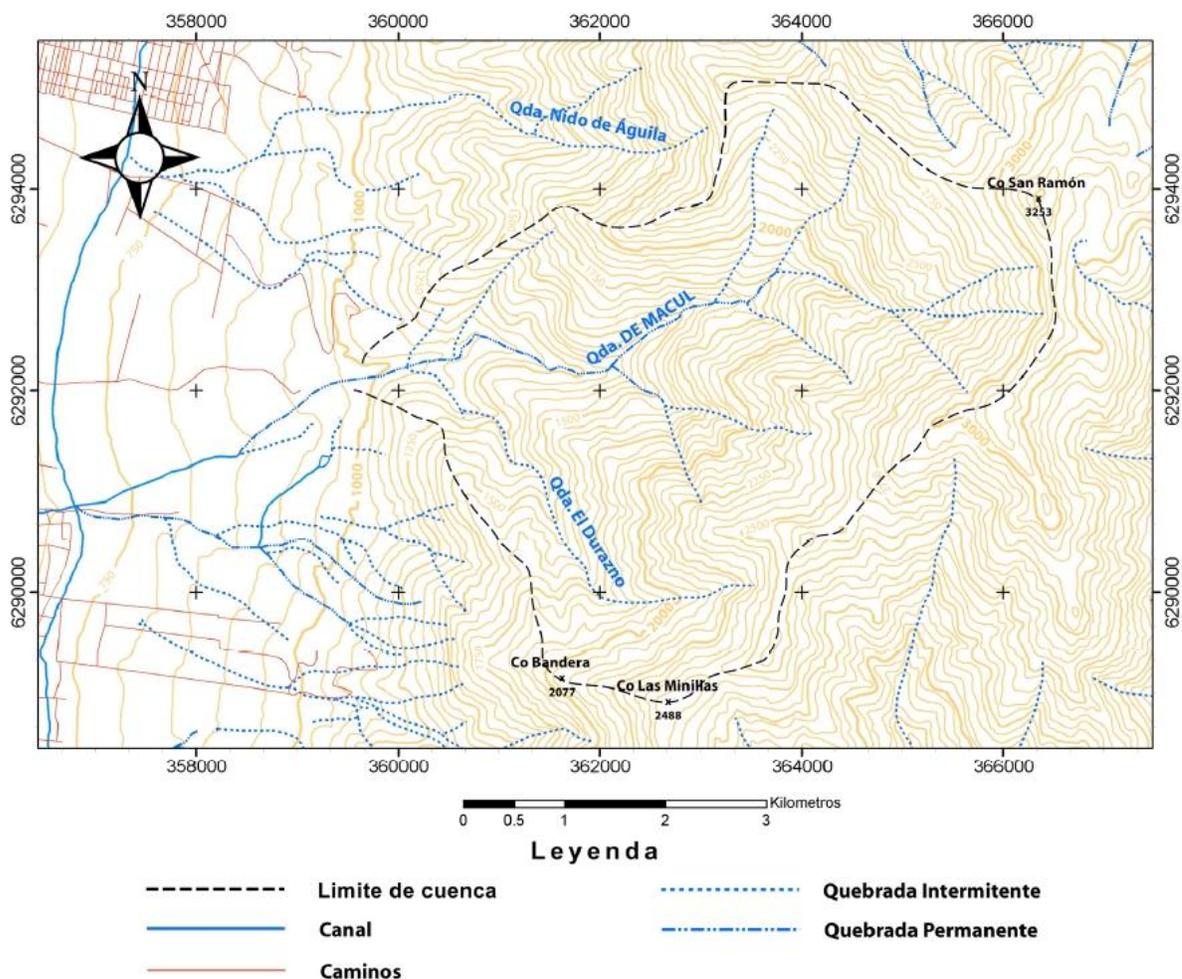


ILUSTRACIÓN 20: MAPA TOPOGRÁFICO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE MACUL, CURVAS DE NIVEL CADA 50M (PADILLA, 2006).

Sobre la zona de descarga, la quebrada tiene un trayecto de más de 5 km a lo largo del límite sur del cono de deyección aluvial, cuyo ápice se ubica a ca. 980 m s.n.m. El segmento más bajo de la quebrada, de 1,5 km comprendido entre los canales Las Perdices y San Carlos, se desarrolla en la zona urbana donde da origen al zanjón de la Aguada. En el trayecto a lo largo del cono aluvial, la quebrada de Macul define el límite de las comunas de Peñalolén, al norte y La Florida, al sur (Naranjo y Varela, 1996).

La hoya hidrográfica incluye numerosas tributarias pequeñas, ubicadas principalmente hacia las cabeceras de la quebrada, estas tributarias están controladas por la estratificación de la Formación Abanico, teniendo una orientación dominante N-S, desarrollando erosión diferencial en las rocas y evidenciando un control estructural en la red de drenaje. La Quebrada el Durazno tributa cerca de la zona de descarga de la hoya, tiene una extensión de ca. 5 km de largo.

Esta hoya se caracteriza, respecto a las hoyas aledañas por sus pendientes elevadas, 32,2% para la zona de tributarios, con un promedio de los tributarios de 33,8%, sobre la zona de descarga la pendiente promedio es de 14,3% (Ilustración 21).

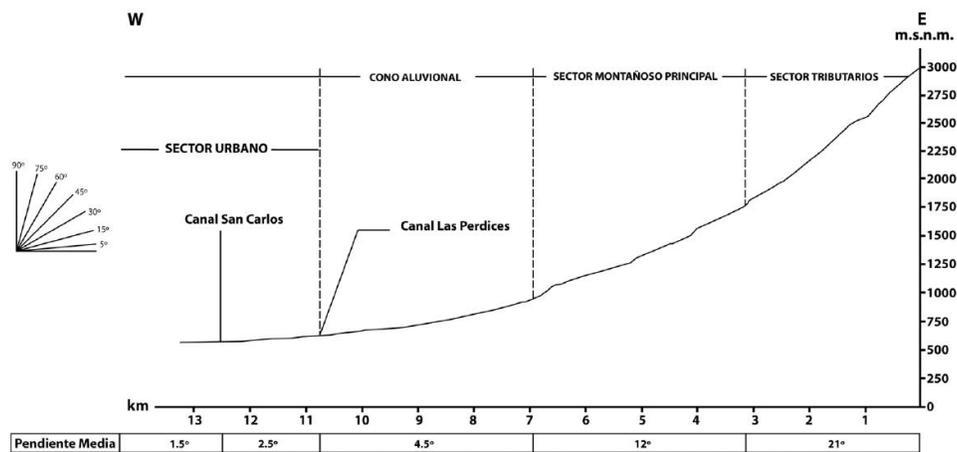


ILUSTRACIÓN 21: PERFIL TOPOGRÁFICO Y PENDIENTE DE QUEBRADA DE MACUL. MODIFICADO DE NARANJO Y VARELA (1996). (PADILLA, 2006).

El área aportante efectiva de esta hoya, en función de la altura de la línea de nieves, se presenta en la Tabla 4, donde también se señala la variabilidad de otras características con la altura, como son: la longitud del cauce principal, L; la distancia desde el centro de gravedad de la cuenca al punto de salida, LG; la pendiente media de la cuenca, S, estimada con la fórmula de Mociornita. (Vargas, 1999).

TABLA 4: Parámetros característicos de la cuenca (Vargas, 1999)

Cota (m s.n.m.)	Área (km ²)	L (km)	LG (km)	S (%)
1500	6,09	5,0	2,0	0,54
2000	12,98	6,8	3,8	0,56
2500	21,59	7,8	5,0	0,53
3000	25,29	8,6	5,2	0,53
3200	25,57	9,0	5,3	0,53

3.1.2. GEOLOGÍA

La totalidad de la zona de estudio corresponde a una secuencia estratificada perteneciente a la Formación Abanico de edad cretácica superior-terciaria probablemente oligocena (Thiele, 1980), la cual está integrada por tobas y brechas volcánicas con intercalaciones de lavas andesíticas y riolíticas y sedimentitas clásticas lacustres. Las rocas de la Formación Abanico están intruidas por cuerpos pequeños de edad miocena y composición que varía de microgranodioritas a andesitas porfídicas (Ilustración 22).

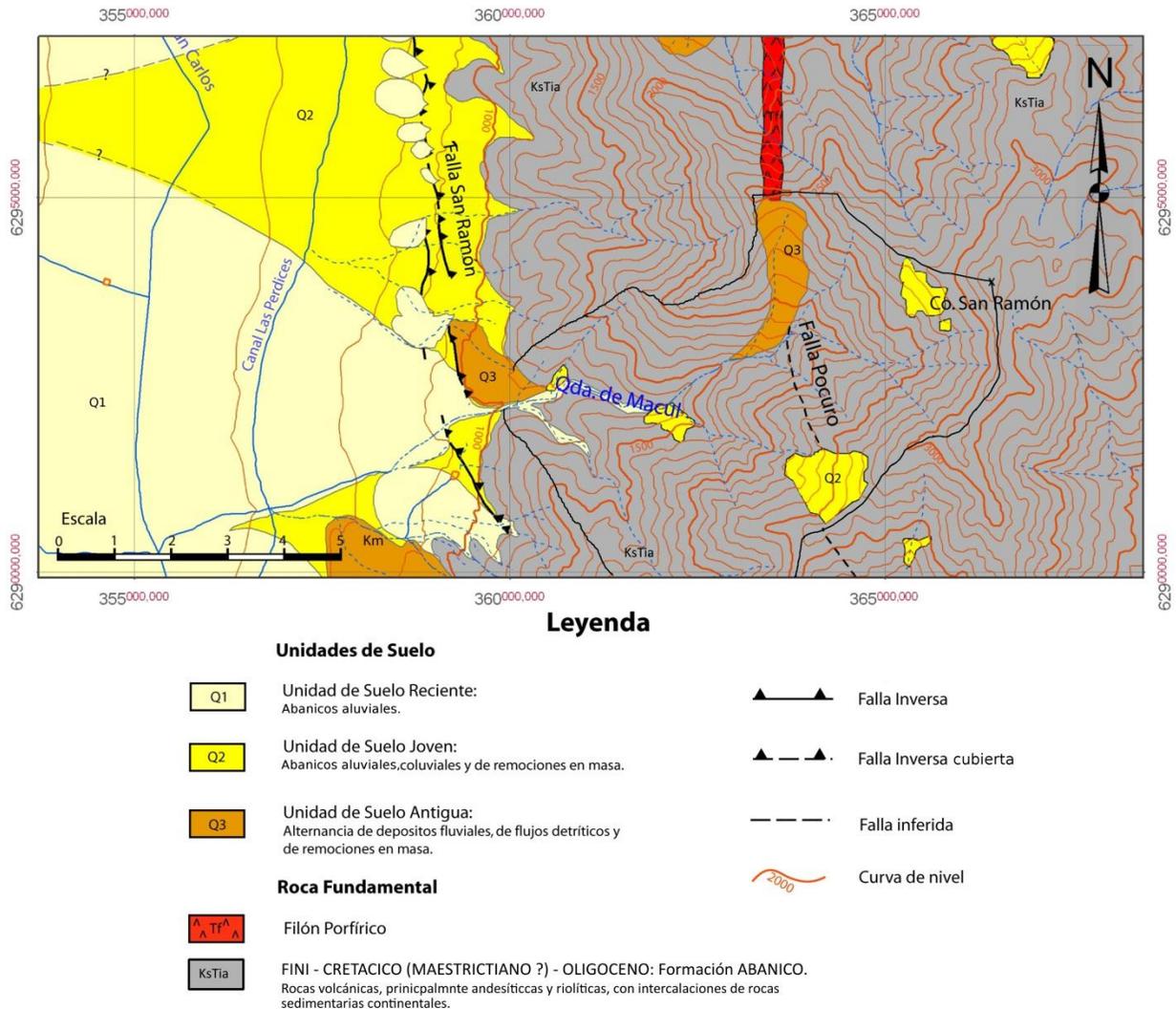


ILUSTRACIÓN 22: MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO. MODIFICADO DE NARANJO Y VARELA (1996) Y RAULD (2002) POR PADILLA (2006).

En cuanto a los aspectos estructurales, el elemento principal lo constituyen las fallas San Ramón y Pocuro, de lineamiento norte – sur a noroeste, tanto la vergencia de estas fallas como su sentido de desplazamiento y su relación con la faja plegada y corrida que forma la Cordillera de los Andes es materia de discusión en el campo de la geología estructural. La falla San Ramón aflora *ca.*

1.000 m s.n.m., mientras que la falla Pocuro aflora ca. los 2.000 m s.n.m. en el sector de la Quebrada de Macul, ascendiendo hacia el sur hasta los ca. 2.600 m s.n.m.

La disposición estructural de los estratos es de rumbo norte-sur presentando dos dominios en sus manteos, al oeste de la falla Pocuro se observan manteos suaves de ca. 25° - 30°, mientras que al este de la falla Pocuro se observan manteos fuertes, verticales a subverticales.

3.1.3. DEPÓSITOS CUATERNARIOS

En base a los trabajos de Naranjo y Varela (1996) y Rauld (2002) en la zona de la Quebrada de Macul y su descarga se distinguen las siguientes unidades de suelo:

Unidad de suelo reciente (Q1): depósitos de piedemonte y abanicos aluviales.

Los depósitos de piedemonte constituyen un plano inclinado que desciende desde la base de los cerros del contrafuerte cordillerano, situada a una cota aproximada de 1.000 - 1.100 m s.n.m. por el oriente, hasta una cota aproximada de 600 m s.n.m., hacia el occidente. Entre estos abanicos destacan los de las quebradas San Ramón y Macul.

Los sedimentos que constituyen el piedemonte corresponden a gravas arenosas con algunos niveles de arenas intercalados que presentan una disminución en el tamaño de los clastos mayores, desde 1 - 1,5 m de diámetro en la zona apical de los conos, hacia el sector medio (área del canal Las Perdices y pozos de extracción de áridos Pétreos Quilín, donde los clastos mayores presentan diámetros del orden de 0,5 m y ocasionalmente de hasta 1,5 m. El tamaño disminuye hacia la zona distal, en la misma medida que aumenta la fracción arenosa, para finalmente engranar con los depósitos de los abanicos aluviales de los ríos Maipo y Mapocho.

Los conos aluviales se forman por el aporte torrencial de cursos de agua intermitentes de gran energía que acarrearón una alta carga relativa de sólidos, los cuales se depositaron rápidamente en el plano. Estos ríos divagan sobre los conos en la medida que los construyen y, a lo menos, en el caso del cono de la quebrada de Macul, se interdigitan con depósitos de remoción en masa muy jóvenes de características similares al producido el día 3 de mayo de 1993. Estos depósitos se disponen radialmente, a partir del ápice del cono.

Aproximadamente a 1 km al este del Canal Las Perdices, en el abanico de Quebrada de Macul, es posible reconocer los depósitos dejados por el aluvión del 3 de mayo de 1993. Corresponden al menos a 5 m de material, en el que predominan los clastos (90%) angulosos a semi-redondeados de tamaño más o menos homogéneo, con tamaño promedio de unos 30 cm y algunos escasos bolones por sobre los 50 cm en su eje mayor. La matriz es de color pardo grisáceo y es limo arcillosa con algo de arena (Rauld, 2002).

Unidad de Suelo Joven (Q2): abanicos coluviales.

Los depósitos coluviales y escombros de falda están constituidos por sedimentos de granulometría variada, desde bloques hasta partículas finas del tipo limo-arcilla. La forma de los clastos es irregular y por lo general muy angulosa, siendo su composición litológica directamente relacionada con las rocas que constituyen el relieve local. El porcentaje de matriz es variable y a

menudo los depósitos presentan una textura caótica y mala selección. La estratificación interna varía desde maciza a levemente estratificada.

Estos depósitos se presentan en gran parte en las laderas de los cordones montañosos constituyendo una cobertura de algunos metros de espesor, con pendientes superficiales comprendidas entre *ca.* 25° - 40° que, además, ocupan canales donde la acumulación sedimentaria puede alcanzar espesores considerables.

A mayor cercanía de los faldeos cordilleranos, mayor es el tamaño de los clastos en la superficie, pero menor es la cantidad de afloramientos. Esta acumulación de depósitos podría definirse como un gran cono coluvial (Rauld, 2002). Las principales acumulaciones de este tipo de depósitos en la zona, se ubican al pie de los cerros que conforman el contrafuerte cordillerano, en la comuna de La Florida, en el margen sur de la zona apical del cono de la quebrada de Macul y a los pies del cerro Bandera, en las nacientes de la quebrada de Macul y en su ladera sur, entre las cotas 1.250 m s.n.m. y de la quebrada La Pichanga 1.750 m s.n.m.

Unidad de suelo antiguo (Q3): depósitos de remoción en masa.

Estos depósitos se originan por fenómenos fluviales y de remoción en masa de rocas o detritos, sobre laderas de fuerte pendiente. La gravedad es el principal agente de remoción, ayudada por factores pasivos, propios de las rocas que constituyen el relieve, entre los cuales se puede señalar la alteración, fracturamiento, disposición estructural, rasgos estratigráficos específicos, etc.

Están constituidos por sedimentos diamicticos, integrados por clastos angulosos de diámetros variados, incluyendo bloques gigantes o megabloques de hasta 10 m de diámetro. Los clastos están englobados en una matriz compuesta por una mezcla de arena-limo-arcilla. Son depósitos macizos con escasos indicios de estratificación interna; aunque es común la presencia de bandas inclinadas de diferentes coloraciones, en tonos pardusco-amarillentos, que constituyen un rasgo distintivo. La composición de los clastos es simple, de tipo monomictico. En superficie, muestran una morfología de montículos y cordones, desarrollando en algunos casos sistemas de escalones rotados y cuencas pequeñas sin desagüe, derivadas de la obstrucción del drenaje. El espesor de estos depósitos alcanza, en muchos casos, varias decenas de metros.

En la ladera norte del curso medio cordillerano de la quebrada de Macul se desarrolla un potente depósito de remoción en masa, el cual alcanza *ca.* 50-100 m de espesor. Este depósito corresponde a un deslizamiento que afectó un sector de las rocas geomecánicamente poco competentes de la Formación Abanico, debido a la falla regional que las corta y a la alteración provocada por el dique basáltico que intruye dicha falla.

Otros depósitos de remoción en masa modelando pequeños cerrillos, se ubican en diferentes puntos al pie de los cerros del contrafuerte cordillerano. Entre éstos, destacan los depósitos ubicados inmediatamente al norte de la zona apical del cono de la quebrada de Macul, así como al pie del cerro Bandera.

3.2 EVENTOS DE FLUJOS ANTECEDENTES EN QUEBRADA DE MACUL

Debido a la poca información sistematizada en cuanto a los eventos antecedentes en la quebrada de Macul, la fuente de información se reduce a los archivos de prensa y a los testimonios de lugareños. Martínez (2009) realizó una síntesis de esta información disponible, particularizando 10 eventos entre 1900 y 2005 (Tabla 5) y en este trabajo se ha complementado con otras fuentes.

TABLA 5: Antecedentes históricos relativos a aluviones en Quebrada de Macul. Modificado de Martínez (2009).

FECHA	DESCRIPCIÓN
1908	Un importante aluvión de barro y piedras transforman el cauce de la quebrada y cruza sobre el canal San Carlos. Se inicia una forestación de riberas para confinar el cauce. Sólo generó daños en terrenos agrícolas
1936	Un aluvión produjo serios daños en el área del cruce con el canal San Carlos, bloqueando la pasada y arrasando terrenos agrícolas.
Abril de 1957	Un aluvión de barro profundiza el cauce de la quebrada unos 2 m, ocupando ca. 20 m de ancho. Sólo daños agrícolas y embanque del canal San Carlos.
27 de Junio de 1982	Chile central fue azotado por un temporal, el que causó grandes daños, principalmente en las zonas cordilleranas. En Santiago se produjo el desborde del río Mapocho en los sectores de Lo Curro, Bellavista y Quinta Normal y crecidas importantes en el sector oriente, en especial de la Quebrada de Macul, lo que generó, aguas abajo, el desborde del Zanjón de la Aguada, que dejó las calles cubiertas de barro. Esta crecida se caracterizó por su gran caudal y el transporte de gran cantidad de sedimento, el que se depositó entre la cota 750 y 1.150 m s.n.m. La línea de nieves se ubicó ca. 2.500 m s.n.m. El canal San Carlos se desbordó en Lo Hermida.
17 de Junio de 1986	Una tormenta afectó desde la V a la VII región del 15 al 17 de junio, generando el desborde de los ríos Mapocho, Maipo y Tinguiririca. El día 17 de junio la situación de mayor peligro lo constituyó el desborde del canal San Carlos y Zanjón de la Aguada, además del río Mapocho. Se destaca un considerable aumento de caudal de las quebradas del sector oriente, la quebrada de Macul depositó entre los 800 y 1.150 m s.n.m. También se desbordó el cauce de la quebrada San Ramón, dejando las calles de la comuna de La Reina con una gran cantidad de depósitos de barro. La línea de nieves se ubicó ca. 2.900 m s.n.m.
14 de Julio de 1987	Lluvias caídas sobre los 2.500 m s.n.m. habrían causado el derretimiento de la nieve acumulada produciendo una crecida importante, con mucho sedimento fino, que se depositó entre las cotas 750 y 1.150 m s.n.m. La comuna de Peñalolén quedó convertida en un lodazal. La línea de nieves se ubicó ca. 2.800 m s.n.m.
25 de Diciembre de 1991	Aluvión de barro con más sedimento que caudal, produjo un embanque generalizado de todo el cauce preexistente sobre la cota 720 m s.n.m. Gran depósito de piedras mayores desde la cota 1.000 a 1.150 m s.n.m. Esta tormenta de verano tuvo línea de nieves sobre la cota 3.200 m s.n.m.
3 de Mayo de 1993	El día anterior al evento se produjeron lluvias sobre los 4.000 m s.n.m., la isoterma 0°C se mantuvo a esa altura, con un peak de precipitaciones de 9,7mm en una hora. El día 3 de mayo la temperatura mínima fue de 16°C en las estaciones de Pudahuel, Cerrillos y Quinta Normal. Alrededor de las 11:40 hrs. se observó un primer flujo de barro y detritos que sobrepasó el cauce del Zanjón comprometiendo desde Av. Departamental por el norte hasta calle María Angélica por el sur. Unos minutos más tarde una segunda ola, que sobrepasó los 3 m de altura y se desplazaba a más de 30 km/hr arrastró camiones, casas, galpones, troncos, etc. Los daños fueron cuantiosos y dejó numerosos muertos y heridos en sectores de las poblaciones La Higuera y Las Perdices.
12 de Noviembre de 2004	Flujos de detritos en el sector de la quebrada de Lo Cañas (inmediatamente al sur de la quebrada de Macul).

<p>28 de Agosto de 2005</p>	<p>Flujos de detritos en la quebrada de Lo Cañas genera un depósito de ca.1 m de potencia, con una extensión en planta de 20 a 25 m en torno al cauce de la quebrada, el depósito está compuesto principalmente por grava arenosa, con bloques de tamaño promedio de 20 cm, que alcanzan los 50 cm y poca cantidad de finos. Los mayores daños se concentran en los sectores donde el cauce ha sido intervenido con la construcción de caminos e instalación de tuberías de drenaje, impidiendo el escurrimiento libre del flujo quebrada abajo.</p>
-------------------------------------	--

3.2.1. EVENTO DEL 3 DE MAYO DE 1993

Características

El 3 de mayo de 1993 se desencadenaron una serie de flujos detríticos en distintas quebradas del sector oriente de Santiago, producto del ingreso súbito de un frente cálido en altura que provocó intensas lluvias sobre las cuencas hidrográficas.

En la quebrada de Macul, el caudal máximo de la corriente de detritos alcanzó los 80 m³/s con una concentración volumétrica de sólidos del orden de un 38%. El volumen del material sólido depositado fue estimado en 840.000 m³, constituido por sedimentos de variados tamaños, comprendiendo rocas de diámetros superiores al metro, hasta arenas y materiales finos (Ayala, 1996; Naranjo y Varela, 1996; Hauser, 2004).

El flujo consistió en dos ondas, la primera de ellas ocurrió poco después del inicio de la lluvia, aproximadamente a las 11:40 hrs, y consistió en una ola de poco más de 1 m de alto que se desplazaba a una velocidad estimada cercana a los 15 km/hr. Cerca de 10 minutos más tarde, y tras un descenso en el nivel del flujo, descendió una segunda ola que sobrepasó los 3 m de altura y que se desplazaba a más de 30 km/hr. El flujo presentaba una apariencia similar a “pintura derramada” y su concentración permitía que vehículos pesados (camiones), galpones, rocas, troncos, etc., pudieran ser arrastrados flotando sobre el flujo (Naranjo y Varela, 1996; Hauser, 2004).

Efectos

En la zona de las cabeceras de la quebrada de Macul se produjeron modificaciones sustanciales asociadas a los cauces tributarios y quebradillas menores. Anteriormente, estos cursos se encontraban cubiertos con clastos y bloques subangulosos, esparcidos en un lecho restringido al ancho de la corriente de agua estacional y bordeados por matorrales y arbustos. Después de los flujos de detritos de mayo de 1993, estos cauces aumentaron su ancho en, a lo menos, un 100%, exhibiendo un canal central profundo, con bancos laterales “colgados” de bloques, principalmente en los tramos cercanos a la quebrada principal. Hasta cierto punto, estas modificaciones constituyen un mayor peligro, por cuanto estos bancos son completamente inestables y están desprotegidos (Naranjo y Varela, 1996).

Los tramos de las gargantas (zonas de transporte) no muestran mayores alteraciones con la sola excepción del arrasamiento de la vegetación lateral. La vegetación de matorrales y arbustos de los sectores encajonados de fondo plano, en cambio, desapareció por completo quedando una cubierta de sedimentos (limos-bloques) de espesor variable sobre las terrazas preexistentes, material fácilmente removible por futuros flujos. Las modificaciones son más notorias en los tramos sobre el cono aluvial. Allí fueron arrasados los bordes con forestación de eucaliptus y las zonas de matorrales laterales. Algunos potreros fueron cubiertos por las ramificaciones esparcidas,

quedando un cauce central de hasta 250 m, notablemente más ancho que el anterior (Naranjo y Varela, 1996).

Los principales daños ocurrieron a partir del ápice del cono aluvial. Afectaron obras como torres de alta tensión, pequeños puentes y estructuras de contención de aguas del Zanjón de la Aguada. Además, gran parte del sistema de postación de tendidos eléctricos y telefónicos de las poblaciones amagadas, fue arrasado. Se produjeron, también, severas averías en las aducciones de la confluencia del zanjón con el canal San Carlos, el cual quedó saturado de materiales (bloques, troncos, maderas y múltiples objetos antrópicos). (Naranjo y Varela, 1996).

De acuerdo a los antecedentes aportados por ONEMI, a principios de junio de 1993 se confirmó que habría habido 26 víctimas fatales y 9 personas desaparecidas, la mayoría de las cuales vivía en el sector urbano (Ilustración 23). Por otra parte, incluyendo el área de inundación hacia el oeste del canal San Carlos (entre las avenidas Departamental y La Florida), el número de damnificados fue mucho mayor, alcanzando a una cifra de 5.000 personas; de éstas, 1.264 fueron trasladadas a albergues. Finalmente, el total de viviendas afectadas fue de 1.169, que corresponde a 755 dañadas y 414 parcial y totalmente destruidas. Las consecuencias de la catástrofe habría sido muchísimo peores si hubiese ocurrido un día domingo o festivo y, peor aún, durante la noche (Naranjo y Varela, 1996).



ILUSTRACIÓN 23: IMÁGENES DE LOS EFECTOS DEL EVENTO DEL 3 DE MAYO DE 1993, TOMADOS DE ARCHIVOS DE TVN.

3.3. SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LA QUEBRADA DE MACUL

Para determinar la susceptibilidad de RM, se utilizó la metodología desarrollada por Lara, 2007, calibrada para deslizamientos rotacionales y traslacionales de suelo y roca, caídas de rocas y flujos en la Quebrada San Ramón, la que se encuentra ubicada *ca.* 8 km al norte de la Quebrada de Macul.

Esta metodología divide la hoya en unidades geomorfológicas, las que son agrupadas según su similitud en base a parámetros como: pendiente, vegetación, exposición al sol, eventos antecedentes, presencia de intervención antrópica, entre otros. Luego de agrupadas las unidades, es definida la susceptibilidad ante los distintos tipos de RM mediante el cálculo del Índice de Susceptibilidad (IS) para cada una de ellas. IS corresponde a la suma de puntajes asociados a factores, ajustada de tal forma que $IS = 0$ corresponde a una probabilidad nula e $IS = 100$ a una probabilidad igual a 1. La distribución de puntajes a partir de los factores, para cada tipo de RM se detalla en el Anexo A.1.

Se determina que las unidades con $IS > 50\%$ son susceptibles a protagonizar eventos de RM y a estas unidades se les calcula la probabilidad de falla. Las unidades con $IS < 50$ no son analizadas.

La aplicación de esta metodología para la Quebrada de Macul no es simple ni rápida y fue materia de trabajo de memoria de Beatriz Martínez el año 2009. Por lo tanto en este trabajo se tomarán como antecedentes los resultados obtenidos por Martínez (Ilustraciones 24 a 27).

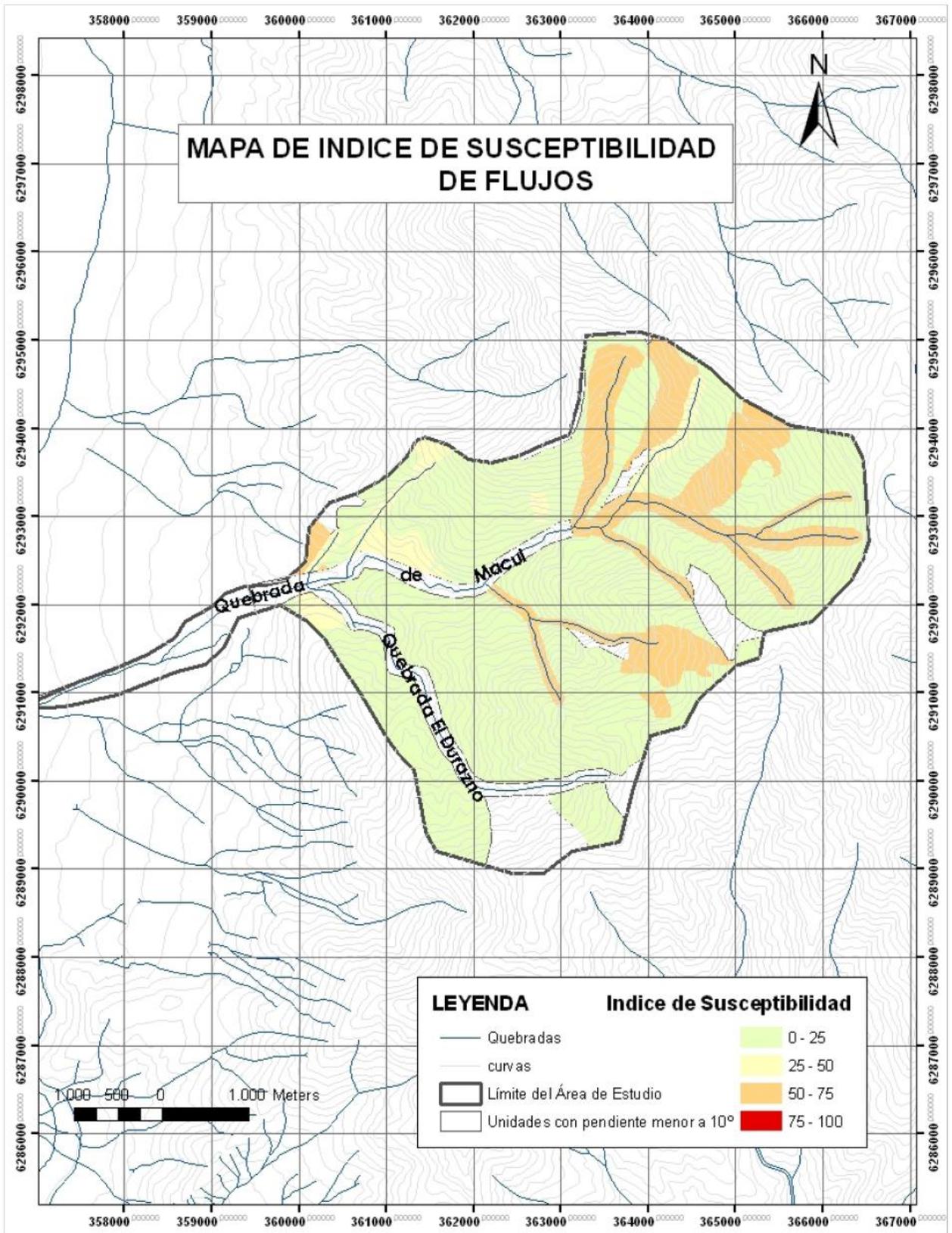


ILUSTRACIÓN 24: MAPA ÍNDICES DE SUSCEPTIBILIDAD DE FLUJOS (MARTÍNEZ, 2009).

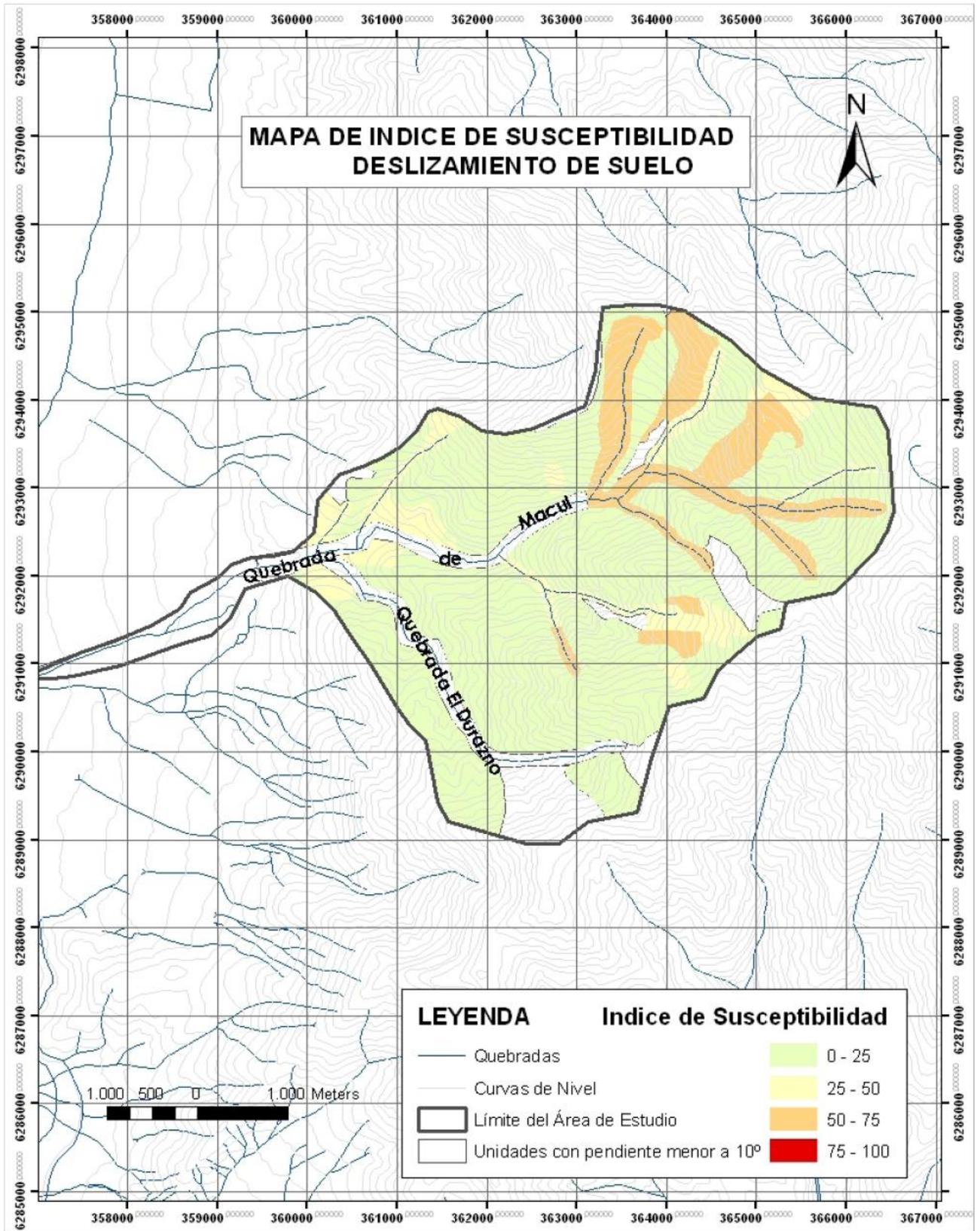


ILUSTRACIÓN 25: MAPA ÍNDICES DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE SUELO (MARTÍNEZ, 2009).

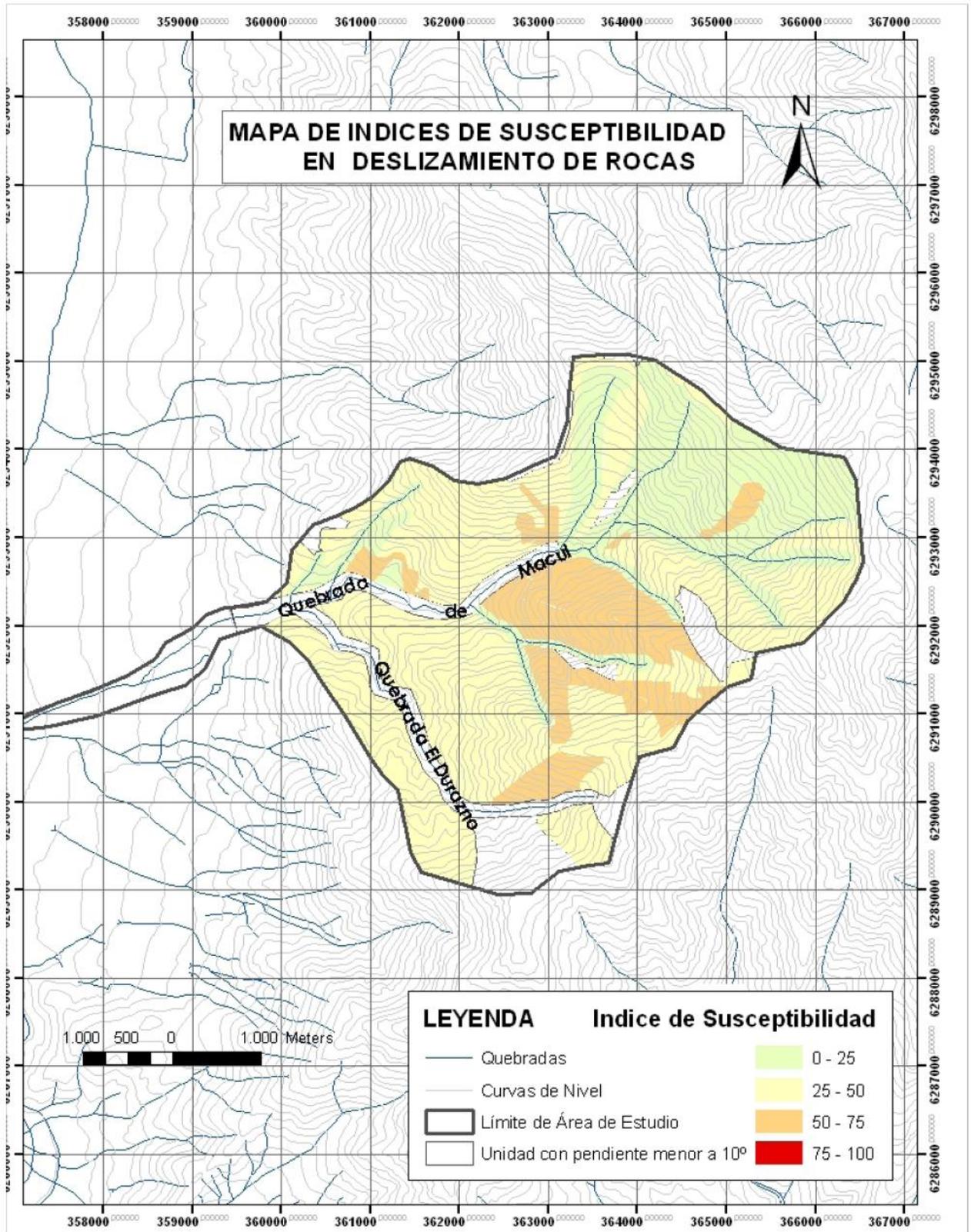


ILUSTRACIÓN 26: MAPA ÍNDICES DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE ROCA (MARTÍNEZ, 2009).

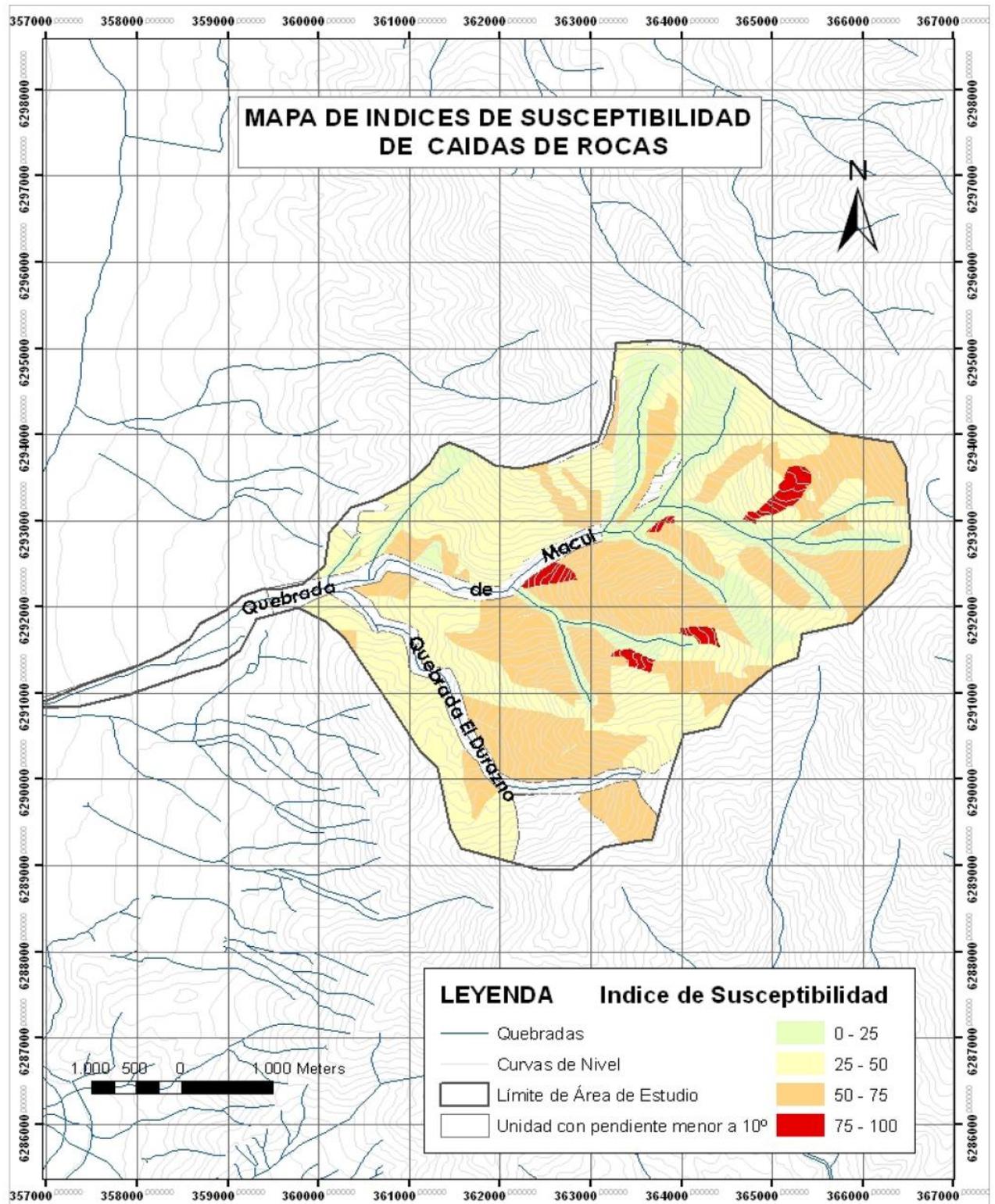


ILUSTRACIÓN 27: MAPA ÍNDICES DE SUSCEPTIBILIDAD DE CÁIDA DE ROCAS (MARTÍNEZ, 2009).

3.4. MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE FLUJOS EXISTENTES EN LA QUEBRADA DE MACUL

En el mes de abril de 1995 se completó la construcción de una serie de estructuras destinadas a mitigar los efectos de flujos aluvionales en el sector de la quebrada de Macul (Ilustración 28), lo que significó una inversión cercana a los US\$ 4,5 millones. La inversión incluyó faenas de limpieza, rectificación y protección de cauces y la construcción de siete pozas decantadoras dispuestas a lo largo de 1.590 m de cauce, entre las cotas 900 y 850 m s.n.m. Estas estructuras se ubican espaciadas entre 55 y 220 m, poseen 50 m de ancho en su base y 80 m en los bordes de las riberas (Ilustración 29). Tienen una capacidad para almacenar un total estimado en 450.000 m³ de sedimento (Hauser, 2004).

Los muros de las diversas cubetas, incorporan vertederos, mientras que ambos paramentos están protegidos con enrocados, con pesos comprometidos entre 500 y 1.000 kg según diseño. Las pozas fueron construidas para el manejo de un caudal de crecida de 90 m³/s, correspondiente a un evento de probabilidad de ocurrencia de 1:100 años. Para efectos de verificar la revancha de las estructuras, que es el efecto que se produce cuando el flujo se enfrenta a la estructura, se consideró un caudal de 150 m³/s (Hauser, 2004).



ILUSTRACIÓN 28: FOTOGRAFÍA DE PISCINAS DECANTADORAS, TOMADA EL 28 DE OCTUBRE DE 2011. SE OBSERVAN LOS CONDOMINIOS LAS PIRCAS, ALTO MACUL Y PÉTREOS QUILÍN



ILUSTRACIÓN 29: DETALLE PISCINA 1, VISTA AL PONIENTE. FOTOGRAFÍA TOMADA EL 28 DE OCTUBRE DE 2011.



ILUSTRACIÓN 30: DETALLE DE PISCINA 1, VISTA AL ESTE. FOTOGRAFÍA TOMADA EL 28 DE OCTUBRE DE 2011.

3.5. CLIMA E HIDROLOGÍA

Factores meteorológicos como intensidad de lluvias [mm/hr] o [mm/día], lluvias antecedentes, altura de línea de nieves [m s.n.m. de la isoterma 0°C], son determinantes de la ocurrencia de eventos de flujos. Estos factores lejos de ser constantes, están determinados por una serie de condiciones mayores, como los eventos de Oscilación Sur y de cambio climático mundial.

Padilla (2006) plantea una metodología estadística multivariable, que permite determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento de remoción en masa, en el Sector Oriente de Santiago, frente a un determinado escenario de factores meteorológicos desencadenantes. Los factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa considerados son: precipitaciones diarias o de evento (P_E), las precipitaciones antecedentes o acumuladas en 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días (PA_{i-d} , para $i=d$ días de acumulación) y la altura de línea de nieve (HNL) para los días con precipitaciones. El modelo que presenta un mejor ajuste con el registro histórico de remociones en masa en la zona de estudio, es el modelo construido con el registro pluviométrico de la estación Antupirén, ubicada en el abanico de la Quebrada de Macul, para un periodo de acumulación de 25 días. La expresión matemática de este modelo se muestra a continuación:

$$P(RM)_{Antupirén} = \frac{1}{1+e^{-(0.107*P_E+0.014*PA_{25-d}+0.005*HNL-23.181)}} \quad (6)$$

Dónde:

$P(RM)$ = Probabilidad de ocurrencia de evento de remoción en masa.

P_E = Precipitaciones del evento para la estación E [mm/día].

PA_{n-d} = Precipitación acumulada en n días [mm].

HNL = Altura de Línea de Nieve [m s.n.m.].

A partir de esta relación Padilla establece umbrales de los factores meteorológicos desencadenantes, para un 20% y 50% de probabilidad de ocurrencia de remociones en masa.

$$P_{E(20\%)} = 203.692 - 0.131 * PA_{25-d} - 0.047 * HNL \quad (7)$$

$$P_{E(50\%)} = 216.665 - 0.131 * PA_{25-d} - 0.047 * HNL \quad (8)$$

En términos de relevancia de factores, el factor de primer orden corresponde a la precipitación diaria, en segundo orden la altura de línea de nieves y estadísticamente hablando las precipitaciones acumuladas PA_{25-d} es el factor menos relevante en el desencadenamiento de remociones en masa, sin embargo ninguno de estos factores debe ser obviado ya que es su combinación la que consigue ajustar el modelo teórico a la realidad observada.

Este modelo de probabilidad respecto a factores meteorológicos fue diseñado a partir de los antecedentes en la región. Ahora, si se quiere realizar un modelo que considere escenarios futuros, es necesario tener en cuenta los efectos del cambio climático, éste ha sido estudiado por Garreaud y Rutllant en numerosas publicaciones.

La principal conclusión respecto al cambio climático en la zona central en Chile (y de relevancia para este estudio) corresponde al aumento de la temperatura asociado a eventos de precipitaciones. Garreaud (2011) sostiene, en base a las variaciones de temperatura de las últimas 3 décadas, un calentamiento global que ha implicado en la zona central de Chile: un aumento de temperatura en la zona cordillerana y una disminución de ésta en la zona costera, asociado a la expansión del anticiclón hacia el sur, intensificando los vientos del sur.

En cuanto a la cantidad de precipitaciones Garreaud (2011) señala que los cambios de precipitaciones a lo largo de Chile son más difíciles de cuantificar, debido a que la precipitación muestra mucha variación interanual, haciendo referencia a los períodos de alta y baja precipitación asociados a El Niño y La Niña respectivamente, en los eventos de Oscilación del Sur. Sin embargo, se pronostica una disminución de la precipitación anual en la zona centro-sur del país, asociado a episodios de precipitaciones intensas o con un nivel mayor de altura de línea de nieves.

La altura de línea de nieves resulta importante como desencadenante de fenómenos de remoción en masa ya que determina el área aportante efectiva (A_p) de la cuenca durante las tormentas. En el caso de la Quebrada de Macul, HLN tiene un valor medio de 2.100 m s.n.m. (Garreaud, 1992, 1996), sin embargo los episodios que han gatillado eventos de flujos han tenido valores de HLN sobre 3.000 m s.n.m. (1993).

Se indica en la Tabla 6 las estimaciones del caudal líquido susceptible de haber ocurrido en los eventos de los años 1982, 1986, 1987 y 1993 presentados por Vargas (1999). Estos caudales fueron obtenidos en función de la precipitación diaria observada ($P_{24}(t)$), la precipitación durante el día anterior al fenómeno ($P_{24}(t-1)$), la intensidad de precipitación máxima en la cuenca durante un tiempo igual al de concentración de la cuenca aportante (i_{tc}), el índice de precipitación antecedente durante los 30 días anteriores al evento (IPA), la altura de la línea de nieves (HLN), usando como relación precipitación-escorrentía el método del hidrograma unitario (Vargas y Lara, 1996), con parámetros calibrados para la región. Los hietogramas de lluvia efectiva en cada evento fueron calibrados basándose en la información fluviométrica registrada en cuencas vecinas de características similares.

TABLA 6: Características de eventos ocurridos (Vargas, 1999).

Fecha	$P_{24}(t)$ (mm)	$P_{24}(t-)$ (mm)	i_{tc} (mm/hr)	IPA (mm)	HLN (m s.n.m.)	Área (km ²)	Q (m ³ /s)
06/27/82	20,2	61,0	11,3	145,0	2300	17,9	22,7
06/16/86	18,6	40,6	10,2	137,0	2230	16,9	18,6
07/14/87	51,1	64,9	13,6	6,9	2170	15,9	24,1
05/03/93	14,6	2,9	23,6	101,7	3240	25,6	50

En el mismo trabajo de Vargas (1999) se han calculado los caudales de diseño y los caudales máximos probables para la quebrada de Macul.

Los caudales de diseño se muestran en la Tabla 7, se han calculado considerando como cuenca aportante promedio, la definida por la cota 2000 m s.n.m., se ha estimado la precipitación máxima diaria asociada al período de retorno de 10 años, basándose en el mapa de isoyetas (DGA, 1990), los valores asociados a los otros periodos de retorno fueron obtenidos sobre la base de coeficientes de frecuencia propios para la región. Para el cálculo de los caudales se escogió como relación precipitación-escorrentía el hidrograma unitario sintético, considerándose una lluvia de duración igual al doble del tiempo de concentración de la cuenca. La intensidad media máxima de precipitación efectiva en dicho intervalo ($i_{\Delta t}$) se estimó usando la fórmula de Grunsky $i_{\Delta t} = i_{24}(24/\Delta t)^{1/2}$, adoptando un índice de infiltración $\phi = 2,5 \text{ mm/hr}$.

TABLA 7: Caudales de diseño, según isoyetas de precipitación máxima diaria (Vargas, 1999).

Período de retorno (años)	Precipitación máxima diaria	Intensidad máxima en @t = te (mm/hr)	Caudal (m ³ /s)
5	70,2	15,1	22,1
10	86,0	18,5	28,6
20	101,8	21,9	35,0
50	123,1	26,5	43,7
100	139,8	30,1	50,5

Estos resultados muestran que el caudal obtenido para el evento de 1993, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, se asocia a un periodo de retorno cercano a los 100 años, cuando según la información histórica Vargas y Lara (1996) le asignan un periodo de retorno de 50 años.

Finalmente en el trabajo de Vargas (1999) se ha calculado la crecida máxima probable susceptible de ocurrir en la cuenca, utilizando un procedimiento basado en la determinación de la precipitación máxima probable a través de la maximización de tormentas observadas; definiendo, para ello, el factor de maximización como la cantidad de agua precipitable máxima disponible en la atmósfera para la época del año en que ocurre la tormenta, considerando a través de las isoyetas de los días de los eventos seleccionados y de las condiciones térmicas definiendo la interface lluvia-nieve. El cálculo del Caudal Máximo Probable (CMP) considera las curvas de distribución de precipitación (Varas, 1987), el mismo valor de infiltración que el cálculo de los caudales de diseño, y la totalidad del área de la cuenca como área aportante, debido a que este escenario constituye el peor caso. En la Tabla 8 se muestran los valores de caudales máximos probables en función de la duración de las precipitaciones, se observa que el caudal máximo probable que puede generarse en la quebrada de Macul corresponde a $Q = 237 \text{ m}^3/\text{s}$, el que se produce para una tormenta de 6 horas de duración.

TABLA 8: Caudal máximo probable en la Quebrada de Macul (Vargas, 1999).

Duración (horas)	Precipitación (mm)	Caudal (m³/s)
2	74,1	172
4	127,4	220
6	166,2	237
8	191,4	221

En función de estos cálculos, Vargas (1999) concluye que *“es conveniente destacar que el caudal máximo estimado para la crecida que ha causado mayor daño en la zona de la quebrada de Macul representa sólo el 20% de la crecida máxima probable, factible de ocurrir en el lugar”*.

4. PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS EN LA QUEBRADA DE MACUL

4.1. INTRODUCCIÓN

La peligrosidad de los flujos tiene relación tanto con la inundación del sector afectado, como con el daño que puede producir el impacto de fragmentos grandes, como rocas, vehículos o árboles, que resulten arrastrados por el flujo. El primer tipo de daño es, en la mayoría de los casos, reparable, mientras que el segundo puede llegar a ser irremediable.

Las medidas de mitigación actuales, descritas en el capítulo 3.4, se encuentran orientadas a acumular los excesos de caudal, con una capacidad de 450.000 m³, mientras que los flujos probables que se proponen en este trabajo tienen volúmenes de hasta 6.000.000 de m³. Considerando que el evento antecedente de 1993 tuvo un volumen de 840.000 m³, no es apresurado sostener que las piscinas decantadoras son insuficientes para mitigar eventos de gran magnitud.

Cuando el flujo arrastra gran cantidad de sedimentos, clastos grandes, árboles y ramas, que se encuentran disponibles en el cauce de la quebrada, existe la probabilidad que se represe en algún estrechamiento del cauce, aumentando el peligro asociado al flujo proveniente del rompimiento de esa presa, el cual es más potente que el flujo asociado al caudal propio del evento. Por otro lado, un represamiento podría causar el desvío del flujo del canal existente, poniendo en peligro las zonas aledañas al cauce.

A partir de los estudios de susceptibilidad de remociones en masa de Martínez (2009) es posible identificar los sectores de la Quebrada de Macul donde es probable que se generen los flujos (Ilustración 24), ésta ubicación permite concluir en función de las zonas donde se pueden instalar obras de mitigación complementarias.

Con el objeto de determinar el alcance del peligro de flujos de detritos y luego poder proponer medidas de mitigación complementarias, se realizaron dos tipos de modelaciones de flujos, utilizando los algoritmos LAHARZ y MSF, descritos en la metodología. Los resultados de estas modelaciones se presentan a continuación, y en detalle en el Anexo 2.

4.2. MODELACIÓN LAHARZ

El programa LAHARZ fue desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos, en 1998, con el objetivo de delinear zonas de peligro volcánico, asociadas a la posible inundación generada por flujos laháricos, a través de un método semi-empírico. El modelo se trabaja desde el modo Arc del programa ArcGis, utilizando la elevación topográfica ya levantada a partir de las curvas de nivel, se trabaja con una precisión de 10m por pixel.

Primero se determina la relación H/L (Ilustración 3) que define el inicio de la sedimentación, en este caso:

$$H = 3100 \text{ m} - 1000 \text{ m} = 2100 \text{ m} \quad L = 7000 \text{ m}$$

$$\text{Por lo tanto } H/L = 0.3$$

Al utilizar este valor, la sedimentación se inicia alrededor de los 1200 m s.n.m., por lo que para este estudio se ajusta a **0.35**, para que la depositación comience a los 1070 m, y sea coincidente con el ápice del abanico aluvial.

El modelo no considera la existencia de las piscinas decantadoras, con los efectos hidráulicos que estas pueden tener ante un evento de flujo, sin embargo, las curvas de nivel representan la canalización que conforman las piscinas. Otro aspecto importante a considerar es que la capacidad de estas es de 450.000 m³.

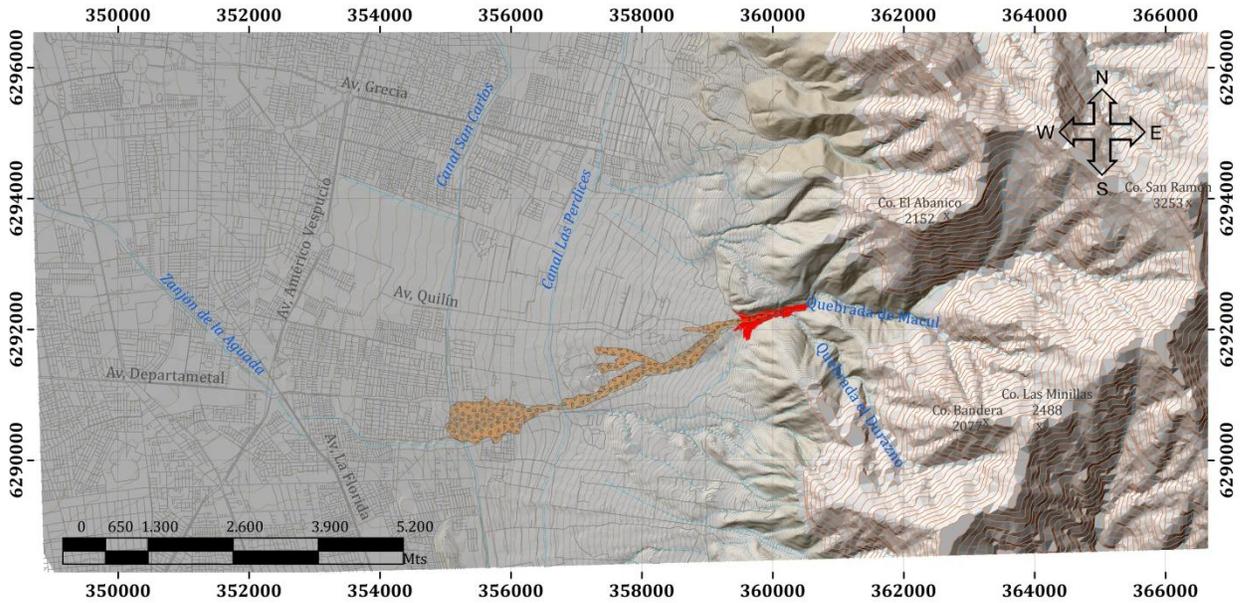
Como se explica en el capítulo 1.3.2., el algoritmo utiliza una combinación de análisis dimensional y estadístico para determinar áreas de inundación transversal (A) y planimétricas (B), generadas por el flujo, en función del volumen de éste (V), se asume una masa y densidad constante, por tanto un volumen constante, y, a través de una serie de ecuaciones, se llega a las siguientes relaciones:

$$A = c_1 V^{2/3} \quad (9)$$

$$B = c_2 V^{2/3} \quad (10)$$

Para lahares, Iverson *et al.*, (1998) encontró que $c_1 = 0.05$ y $c_2 = 200$ produce resultados bastantes cercanos a lo observado en la realidad, luego Griswold e Iverson (2008) extienden esta metodología de la modelación de lahares a la de flujos de detritos en general, y utilizan datos de distintos flujos registrados alrededor del mundo, para concluir que la mejor proporcionalidad de coeficientes para flujos de detritos, es $c_1 = 0.1$ y $c_2 = 20$. El mismo año Webb *et al.*, (2008) encuentra que, utilizando los datos de un flujo de detritos del sureste de Arizona, los valores que mejor se aproximan son $c_1 = 0.1$ y $c_2 = 40$.

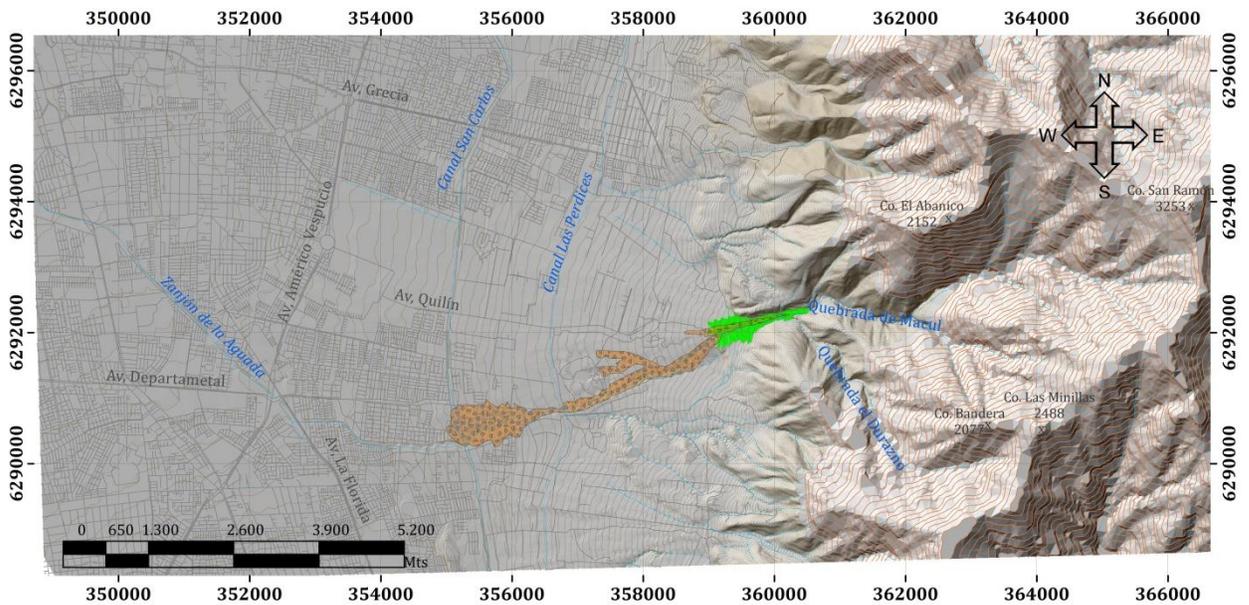
Para este trabajo entonces se busca ajustar los valores de c_1 y c_2 según el volumen del flujo de 1993 que corresponde a 840.000 m³ (Naranjo y Varela, 1996). Según los valores presentados anteriormente se realiza la modelación con los valores propuestos $c_1 = 0.1$ y $c_2 = 20$, cuyo resultado se muestra en la Ilustración 31, y con los valores $c_1 = 0.1$ y $c_2 = 40$, que se muestra en la Ilustración 32.



Leyenda

- Red de drenaje
- Curvas IGM 50 m
- Flujo 3 de Mayo 1993
- Flujo V=840.000 m³ / c₁=0,1; c₂=20
- Curvas IGM 5 m
- Calles

ILUSTRACIÓN 31: MODELACIÓN LAHARZ CON VALORES $C_1 = 0,1$ Y $C_2 = 20$ PARA UN VOLUMEN DE 840.000 M³, EN CONTRASTE CON LA TRAZA DEL FLUJO DE 1993.



Leyenda

- Red de drenaje
- Curvas IGM 50 m
- Flujo 3 de Mayo 1993
- Flujo V=840.000 m³ / c₁=0,1; c₂=40
- Curvas IGM 5 m
- Calles

ILUSTRACIÓN 32: MODELACIÓN LAHARZ CON VALORES $C_1 = 0,1$ Y $C_2 = 40$ PARA UN VOLUMEN DE 840.000 M³, EN CONTRASTE CON LA TRAZA DEL FLUJO DE 1993.

Se observa en las figuras que los flujos resultantes son bastante menores en alcance que el flujo de 1993 y a la vez más anchos en su base. El área que ocupa la modelación con $c_2=20$ es de 179.900m^2 , lo que implica un depósito con una potencia promedio de 4,6 m, mientras que el área del modelo con $c_2 = 40$ es 359.000 m^2 y el espesor promedio del depósito es 2,3 m. Estas modelaciones podrían reproducir eventos de mayor densidad.

Para alcanzar el área buscada se trabaja el valor de c_2 que guarda relación con el área planimétrica del depósito, se tiene entonces que para los valores de $c_1 = 0,1$ y $c_2 = 320$ el flujo se extiende aproximadamente hasta donde se extiende el flujo de 1993, este modelamiento se presenta en la Ilustración 33 y en detalle en el Anexo2.

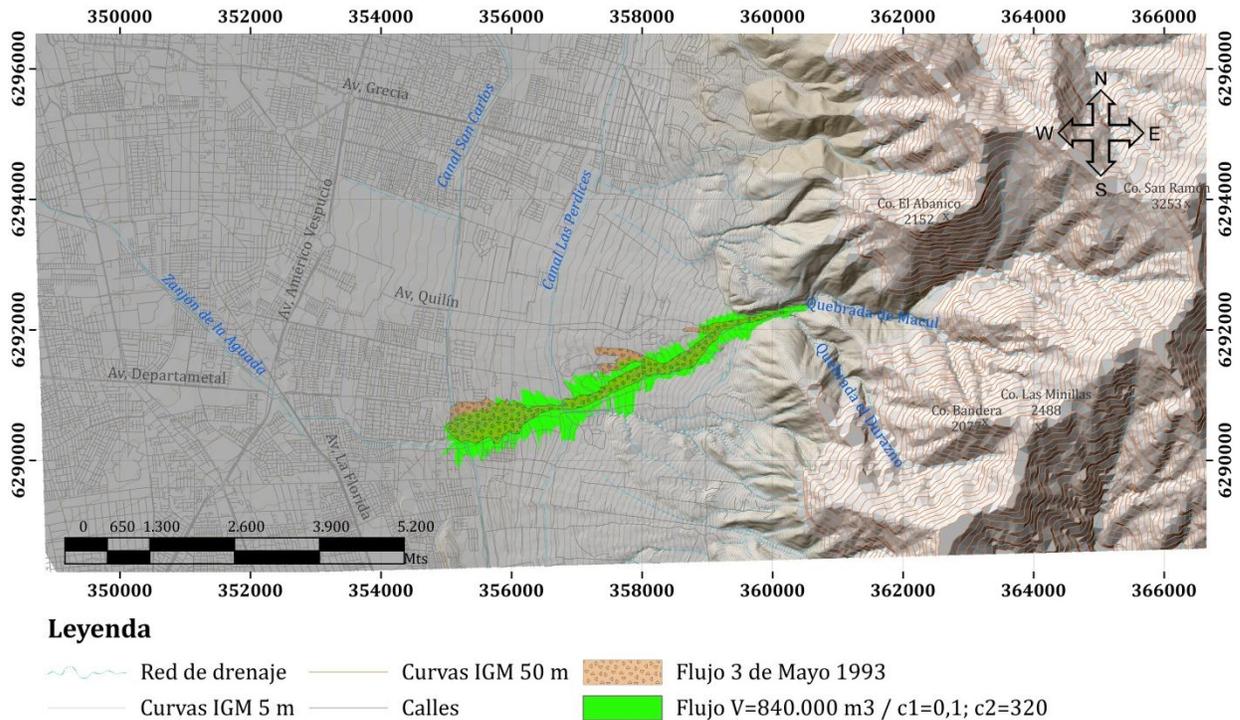


ILUSTRACIÓN 33: MODELACIÓN LAHARZ CON VALORES $C_1 = 0,1$ Y $C_2= 320$ PARA UN VOLUMEN DE 840.000 M^3 , EN CONTRASTE CON LA TRAZA DEL FLUJO DE 1993.

En esta modelación se observa que el flujo alcanza aproximadamente la extensión del flujo de 1993, sin embargo la propagación lateral que presenta es mayor en algunos sectores. Este modelamiento del flujo ocupa un área de $2.850.900 \text{ m}^2$, por lo que el espesor promedio del depósito es 0,29 m.

Al reducir el valor de c_1 se reduce también el área transversal y aumenta el área planimétrica, se encontraron pares de valores c_1 y c_2 que reproducen flujos con la extensión del flujo de 1993, para un volumen de 840.000 m^3 estos pares de valores se presentan en la Tabla 9, junto con el área que cubre cada modelo y la potencia promedio asociada al depósito, las figuras de cada modelo se presentan en el Anexo 2.

TABLA 9: Pares de valores c_1 y c_2 que reproducen la extensión del flujo de 1993 para un volumen de 840.000 m³, superficie asociada y espesor promedio del depósito.

c_1	c_2	Superficie cubierta (m ²)	Espesor promedio del depósito (m)
0.03	180	1.605.500	0,52
0.04	200	1.783.800	0,47
0.05	230	2.047.700	0,41
0.06	250	2.226.200	0,37
0.07	280	2.498.600	0,33
0.08	290	2.584.000	0,32
0.09	300	2.672.900	0,31
0.10	320	2.850.900	0,29

En las figuras es posible observar que ningún par de valores para c_1 y c_2 logra reproducir precisamente el depósito que generó el flujo de 1993, el que tiene dos ramificaciones hacia el norte, en el sector de Av. Quilín y en el sector de Áridos Petreos Quilín y un ensanchamiento hacia el final del flujo. Se observa también que dependiendo de los valores utilizados, el área asociada al flujo es mayor o menor y dado que el volumen es constante, varía también la potencia del depósito que se modela.

Se admite que todos los pares de valores presentados reproducen parcialmente el flujo de 1993 y que, para mayor valor de c_1 , (caso $c_1=0,1 - c_2=320$) mayor tiene que ser el valor de c_2 para cubrir el área correspondiente, en estos casos se observa una mayor propagación lateral del depósito y menor espesor, mientras que, a menores valores de c_1 , (caso $c_1=0,03 - c_2=180$) menor es el valor de c_2 para cubrir el área, menor es la propagación lateral y mayor es la potencia del depósito.

De cualquier forma, los valores aceptados en este trabajo se asemejan más a los valores propuestos para lahares, que a los valores propuestos para flujos de detritos, esto se podría deber a que según la densidad del flujo, el evento de 1993, que es el que se busca reproducir, se asemeje más a una inundación de detritos que a un flujo propiamente tal.

En adelante se trabaja con los valores extremos $c_1=0,1 - c_2=320$, $c_1=0,03 - c_2=180$ y con el valor medio $c_1=0,06 - c_2=250$, con el objetivo de representar tanto los flujos más concentrados como los menos.

Para buscar el área afectable en caso del peor evento climático se utilizan los valores presentados en el capítulo 3.5 respecto a los caudales máximos probables de la Quebrada (Vargas, 1999), ahora bien, como LAHARZ opera con volúmenes de flujos, es preciso establecer una relación entre caudal y volumen para flujos.

Esta relación se establece siguiendo la forma de las relaciones empíricas para estimar el caudal máximo en función del volumen de sedimentos, presentada en la Tabla 10 estas son del tipo:

$$Q = n V^m \tag{11}$$

Donde Q es el caudal máximo, V el volumen de sedimentos, n y m constantes.

Tabla 10: Relaciones empíricas para estimar el caudal detrítico máximo (Q_p) en función del volumen de sedimentos (V) o del agua embalsada (V_w) (Tamburrino, 2011).

Base de Datos	Fórmula	r^2	Fuente
Flujo de detritos granular (Japón)	$Q_p = 0.135 V^{0.780}$	-	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
Flujo de barro y escombros (Japón)	$Q_p = 0.0188 V^{0.790}$	-	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
Volcán Merapi (Indonesia)	$Q_p = 0.00558 V^{0.831}$	0.95	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
Volcán Sakurajima (Japón)	$Q_p = 0.00135 V^{0.870}$	0.81	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
Deslizamiento por rompimiento de presa	$Q_p = 0.293 V_w^{0.560}$	0.73	Costa (1988b)
Deslizamiento por rompimiento de presa glaciar	$Q_p = 0.0163 V_w^{0.640}$	0.80	Costa (1988b)

Si se contara con datos de caudales y volúmenes de 3 o más eventos para la Quebrada de Macul se podría construir una relación empírica entre ambas variables, sin embargo con un solo par de valores, cualquier relación que se establezca será imprecisa y tan sólo una aproximación a un valor real.

En las relaciones presentadas en la Tabla 10, la constante m es la que entrega la forma a la ecuación, y la que representa la variación dependiendo del tipo de remoción, entonces tomando los distintos valores presentados se calcula el valor de n, despejando a partir de la información disponible del evento de 1993, para el que Naranjo y Varela (1996) describen un volumen de sedimentos de 840.000m³ y le asignan un caudal máximo de 80 m³/s, por lo tanto:

$$80 = n \cdot 840.000^m \quad (12)$$

Entonces dependiendo de los valores de m, se obtienen valores de n para cada relación, los valores se presentan en la Tabla 11.

TABLA 11: Valores de n en función de los valores de m.

Q	n	V	m
80	0,001915	840000	0,78
80	0,001671	840000	0,79
80	0,000955	840000	0,831
80	0,000561	840000	0,87
80	0,038503	840000	0,56
80	0,012929	840000	0,64

Calculando entonces los volúmenes para un caudal de $237\text{m}^3/\text{s}$, que corresponde al caudal máximo probable de la quebrada, se obtiene:

TABLA 12: Volúmenes máximos probables en función de los distintos valores de n y m, calculados a partir del caudal máximo probable de $237\text{ m}^3/\text{s}$

n	m	Q_{max probable} (m³/s)	V_{max probable} (m³)
0,001915	0,78	237	3.380.411
0,001671	0,79	237	3.321.354
0,000955	0,831	237	3.103.549
0,000561	0,87	237	2.926.950
0,038503	0,56	237	5.841.527
0,012929	0,64	237	4.584.009

Entendiendo que estos valores son referenciales, se calculó el promedio de los volúmenes que es $3.859.633\text{ m}^3$, y se escogieron cuatro valores para ser modelados, esto son: el menor valor, el promedio y los dos mayores.

Estos valores se modelan utilizando las constantes $c_1 = 0,10 - c_2 = 320$, $c_1 = 0,06 - c_2 = 250$, y $c_1 = 0,03 - c_2 = 180$, los resultados se presentan en el Anexo 3.

4.3. MODELACIÓN MSF

El modelo MSF (Modelo de Flujo de Dirección Única Modificado) fue desarrollado para determinar las zonas de peligro asociadas a flujos de detritos generados por el desbordamiento de lagos glaciales en alta montaña. Posee dos componentes:

Trayectoria: utiliza un algoritmo que consiste básicamente en que el flujo siga como trayectoria la dirección con mayor pendiente. Para zonas más planas, donde los flujos tienden a expandirse lateralmente, se aplica una función especial que permite al flujo desviarse de la dirección principal de mayor pendiente hasta 45° en ambos lados. El programa delinea las zonas potencialmente afectadas por el paso de un flujo y luego asigna un valor de probabilidad a cada celda del DEM, de ser afectadas por el flujo, con valores de 0 a 1 a cada pixel, el tamaño del pixel utilizado es de 10 x 10 m.

Confinamiento: está dada por la relación V/L donde V es la distancia vertical que el flujo desciende y L es la distancia horizontal recorrida. La relación V/L es definida por el usuario para cada caso y debe corresponder al “peor escenario”, esto es, la máxima extensión que podría tener un flujo en la zona estudiada, de acuerdo a los datos de que se dispongan.

Al aplicarse, en este caso, a un flujo de detritos en la descarga de una quebrada, el programa asume la pendiente de la zona de depositación como baja pendiente, por lo tanto lo dispersa 45° a un lado y a otro, de la dirección principal, delineando como resultado, de las zonas probablemente afectadas, prácticamente el mismo abanico aluvial de la quebrada.

En este caso la mayoría de las probabilidades se concentran en el rango 0,5 – 0,625 como se muestra en la Ilustración 34, para distinguir cuales son las orientaciones principales del flujo, se reclasificó en 3 categorías como se muestra a continuación.

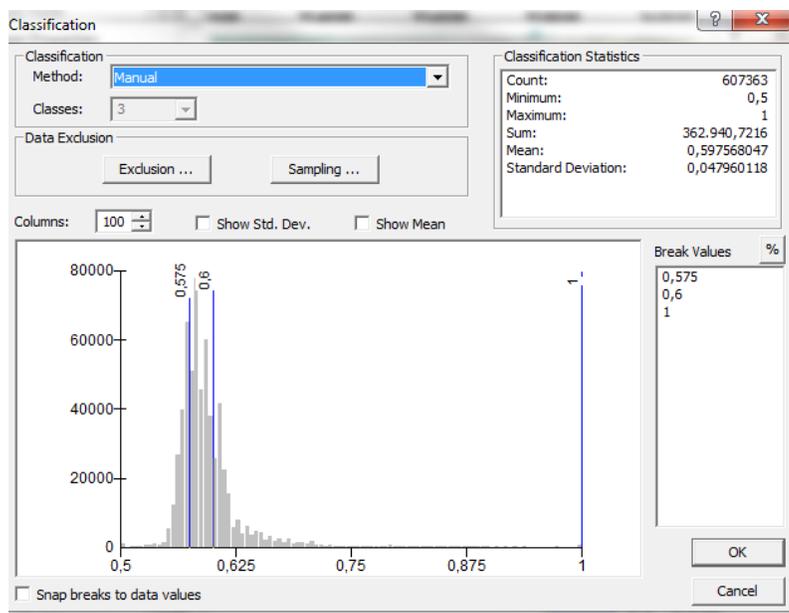


ILUSTRACIÓN 34: DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE LA PROBABILIDAD DE AFECTACIÓN DE LAS CELDAS, MODELO MSF

Esta reclasificación se representa en la Ilustración 35, donde es posible observar que existen tres direcciones principales (color rojo), de direcciones noroeste, este-oeste y suroeste, siendo sólo la de dirección suroeste el actual drenaje de la quebrada.

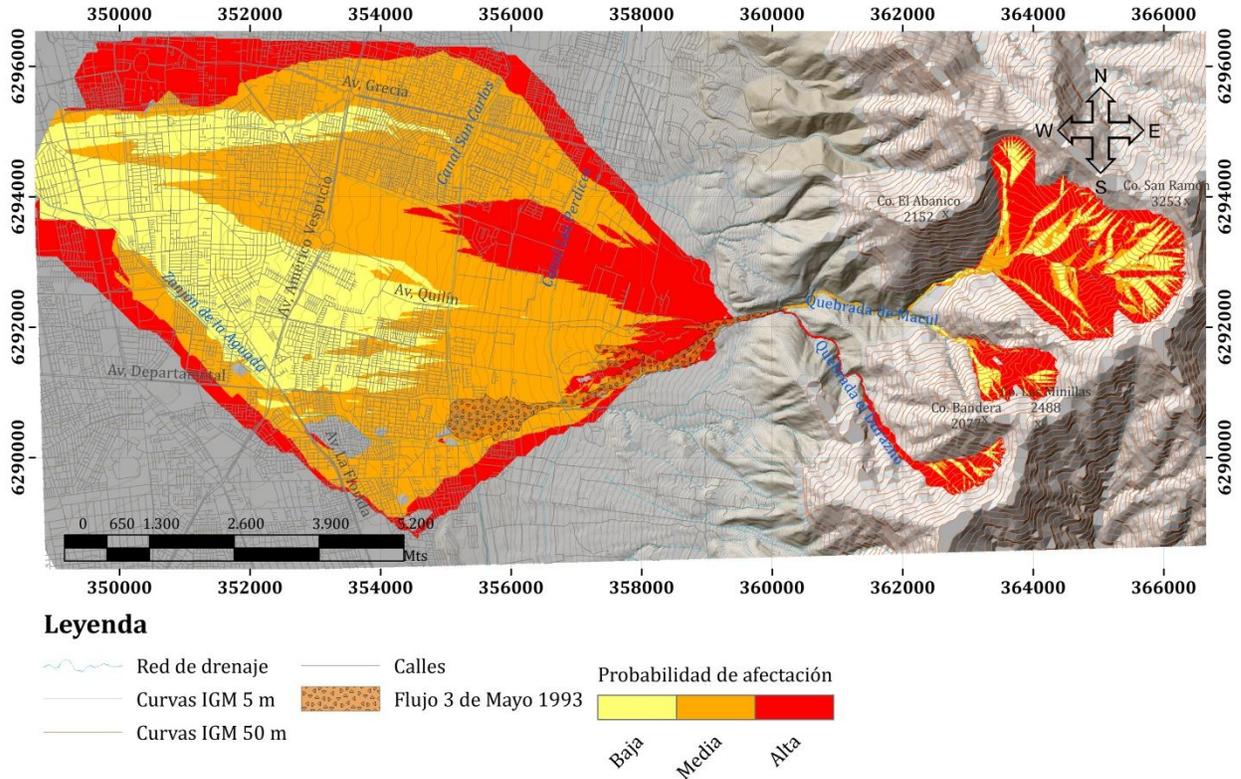


ILUSTRACIÓN 35: MODELO MSF, CATEGORÍAS DE PROBABILIDAD ALTA (1-0,6), MEDIA (0,6-0,575) Y BAJA (0,575-0,5).

El detalle de la Ilustración 35, se presenta en el Anexo 4.

Estas orientaciones presentan una interesante correlación con la orientación de las laderas, que se presentan en el Anexo 5.

La modelación permite sostener que el peligro de esta quebrada no es solamente en el sector actual del drenaje, sino que existen otras dos orientaciones por donde el flujo también tiene una alta probabilidad de fluir y las que hay que analizar.

4.4. ALCANCE DE PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS

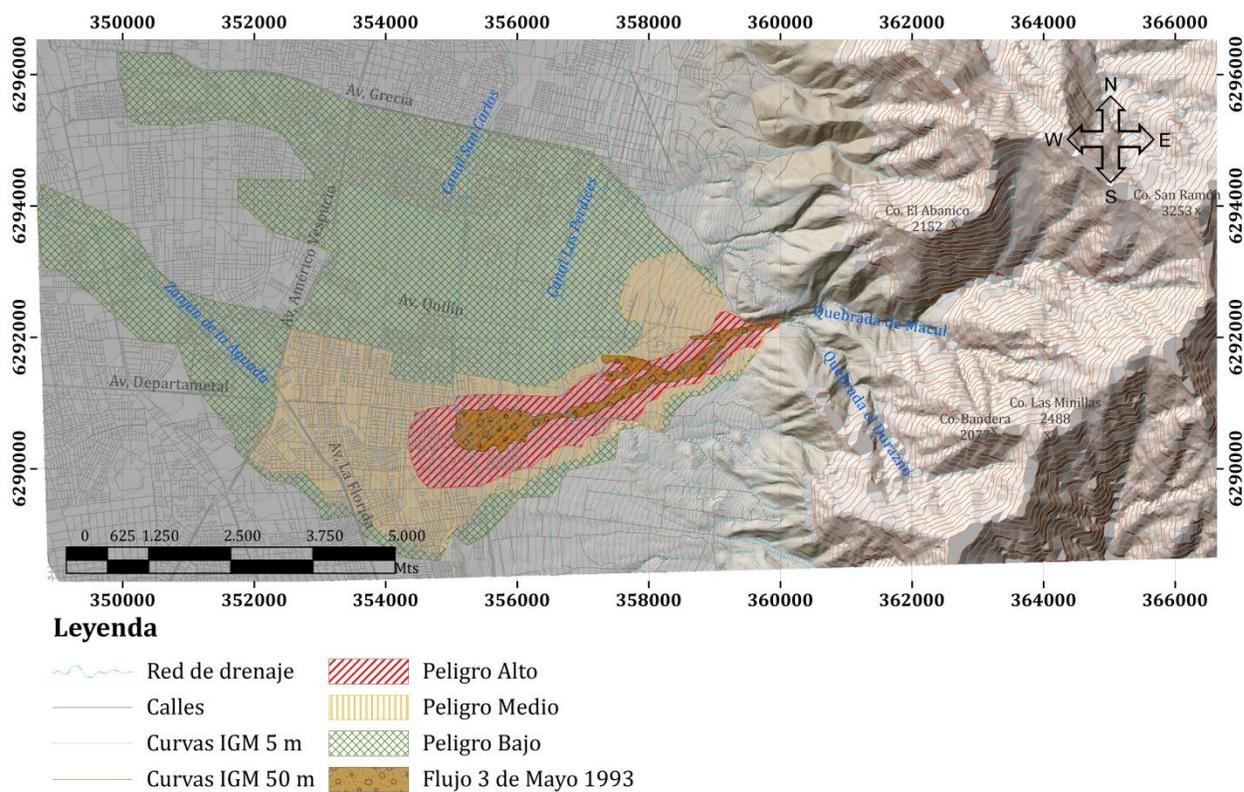
Mediante la integración de toda la información anteriormente presentada se construye un mapa de alcance de peligro de flujos, para un período de retorno de 100 años, con tres categorías del peligro: alto, medio y bajo.

El peligro alto corresponde a las zonas más cercanas a la quebrada, se construye considerando el depósito del evento de 1993 y las distintas formas que puede adoptar un flujo con el volumen de ese evento, esto se consigue utilizando los modelos con los distintos valores de c_1 y c_2 (Anexo 2), se consideran también las redes viales y las pendientes del terreno.

El peligro medio rodea al peligro alto y se extiende hacia el noroeste y el sur, según las direcciones principales resultantes del modelo MSF, y hacia el poniente se acorde los modelos de máximos probables (Anexo 3).

El peligro bajo, finalmente corresponde a las zonas externas ubicadas aproximadamente en las categorías medio y alto del modelo MSF.

En la limitación de las áreas se consideran también las redes viales y las pendientes del terreno. La sectorización de los peligros se presenta en la lustración 36 y en detalle en el Anexo 7.



LUSTRACIÓN 36: ALCANCE DE PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS EN QUEBRADA DE MACUL.

4.4.1. PELIGRO ALTO

Corresponde a las zonas más próximas a la quebrada susceptibles de recibir el material detrítico proveniente de ésta, y el impacto de los pulsos aluvionales. El área corresponde a una franja de aproximadamente 6 km de largo y 500 a 1200 m de ancho, se extiende desde los 1070 m s.n.m. hasta los 620 m s.n.m., ribera abajo del canal San Carlos.

Los conjuntos habitacionales expuestos a este peligro se muestran en la Ilustración 37, algún trabajo posterior podría abordar el estado en el que se encuentran estas construcciones (vulnerabilidad) con el objeto de cuantificar los daños, probables de ocurrir, como consecuencia de un flujo de detritos, y determinar de esta manera el riesgo ante este peligro.



ILUSTRACIÓN 37: DETALLE DE ÁREA DE PELIGRO ALTO, DENTRO DE LA LÍNEA ROJA, SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH

Esta área es susceptible a:

- Transporte de material de gran tamaño como rocas, árboles y otros elementos antrópicos, que pueden impactar la infraestructura, provocando daños.
- Sobreconcentración del fluido, pudiendo tapan y colapsar la canalización y la red de colección de aguas lluvias.
- Aislamiento de sectores de la población.
- Inundación por desborde de cauce.

4.4.2. PELIGRO MEDIO

El peligro medio en el sector alto cubre las zonas más próximas a la desembocadura de la quebrada, cubre también la totalidad del flujo de 1993 y se extiende hacia el poniente hasta la circunvalación Américo Vespucio, en esa extensión, el límite norte lo conforma una ligera loma en el sector de Avenida Quilín, el límite sur y suroeste se construye a partir de la forma del modelo MSF.

Esta área es susceptible a:

- Inundación por desborde de cauce.
- Depositación de material fino a grueso, dependiendo de la magnitud del evento.
- Inundación por colapso de red colección de aguas lluvias.

4.4.3. PELIGRO BAJO

Corresponde a parte del abanico aluvial de la Quebrada de Macul, se extiende desde la desembocadura de la quebrada en 45º hacia el noroeste, hasta Avenida Grecia; hacia el sur, el margen del área se extiende desde la desembocadura de la quebrada, en 30º hacia el suroeste hasta Avenida La Florida y finalmente se extiende bordeando el zanjón de la aguada.

Esta área es susceptible a:

- Inundación por desborde de cauce
- Inundación por colapso de red colección de aguas lluvias.

5. DISCUSIONES

5.1. RESPECTO A LOS MODELOS

Los modelos utilizados, LAHARZ y MSF, presentan bastantes limitantes a la hora de querer hacer una modelación fidedigna de un flujo de detritos, sobretodo porque el primero opera sobre la base de la conservación del volumen y el segundo sobre los componentes trayectoria y confinamiento, sin incorporar la variable mecánica que define el comportamiento de un fluido altamente saturado, ni el efecto que producen las piscinas ubicadas en la desembocadura de la quebrada, no se puede calcular la velocidad del flujo, la erosión que puede generar, ni su comportamiento frente a obras de mitigación. Sin embargo, ambos programas, son buenas herramientas para obtener una primera aproximación de las áreas susceptibles de ser afectadas por un evento de flujo.

LAHARZ, es un modelo, que refleja de mejor manera el comportamiento de un flujo canalizado, que colapsa al transportar un volumen importante de sedimentos en un gran caudal de fluidos. Se ajustó según las constantes c_1 y c_2 , encontrando pares de valores que satisfacen con cubrir el área asociada al flujo de 1993, con su volumen (840.000m^3), estos pares cubren distintas áreas, observando que, por conservación de volumen, áreas más pequeñas implican potencias mayores, esto si bien es indicativo que hacia el cauce el peligro es mayor, no implica que hacia las zonas extremas que cubren los pares de valores asociados a áreas mayores y por tanto con menores potencias promedios de depósito, el peligro sea menor, porque ya un depósito de 5 cm genera daños mayores en numerosos sectores.

Los valores válidos de c_1 y c_2 , encontrados en este trabajo, se asemejan más a los valores válidos para lahares que para flujos, esto podría estar indicando que el flujo de 1993, con el que fue calibrado el modelo, tiene un comportamiento predominantemente fluido, por lo tanto quizás se podría hablar mejor de una inundación de detritos en lugar de flujo de detritos, aunque probablemente el evento haya sido del tipo compuesto, iniciándose como un flujo denso y culminando como una inundación más fluida.

En el caso de la modelación mediante MSF, si bien domina la amplia propagación que modela del flujo y los resultados están concentrados en un pequeño rango, muestra una importante sensibilidad con las pendientes de las laderas, de esta forma, representa mejor un evento de inundación no canalizada.

5.2 RESPECTO A LAS ÁREAS DE PELIGRO

Si bien se buscó determinar las áreas de manera cuantitativa, la conclusión final del alcance del peligro (Anexo 7) es una determinación cualitativa, que toma como importante referencia las modelaciones realizadas, por lo tanto hay límites que son más fiables que otros, en función de los modelos mediante los cuales se definen.

De esta manera, el peligro alto, determinado a partir de los modelos con el volumen del flujo de 1993 tiene un límite bien definido, porque el volumen que se modela es conocido, sin embargo el límite del peligro medio, construido a partir de la modelación de los volúmenes máximos probables, los que por su parte, son una proyección sobre los datos de caudales máximos probables, son finalmente, valores de referencia, en el resultado, y para los efectos de este trabajo, el límite entre el peligro medio y bajo podría ser un límite gradual, porque lo que representa, es, finalmente la orientación y propagación de un mega flujo.

El límite del peligro bajo, guarda mejor relación con las pendientes y hacia dónde puede escurrir un flujo o inundación, interpretación recogida del modelo MSF.

En todos los límites se considera el efecto de calles importantes que actúan como verdaderos canales durante inundaciones, y de condominios que tienen sólo uno o dos accesos, lo que los hace susceptibles a sufrir atochamientos o aislamientos. Aquí se puede hacer un trabajo más fino en terreno que ajuste con precisión el efecto de la red vial.

5.3. RESPECTO A LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN

5.3.1. SITUACIÓN ACTUAL

Como se expuso en el capítulo 2.7, las medidas de mitigación, buscan, complementariamente minimizar el peligro de un evento que puede llegar a ser catastrófico sin mitigación, debido a la alta urbanización cercana a la quebrada.

En este caso, la Quebrada de Macul cuenta hoy con 7 piscinas decantadoras (Ilustración 38), diseñadas con una capacidad de almacenar 450.000 m³, por lo que eventos como los de los años 1982, 1986 y 1987 podrían ser contenidos en su totalidad, pero no así un evento como el del año 1993, que aportó 840.000 m³ de sedimentos y que es sólo un cuarto del máximo probable, estimado para la quebrada, mediante la maximización de condiciones climáticas desfavorables (Vargas, 1999).



ILUSTRACIÓN 38: PISCINAS DECANTADORAS QUEBRADA DE MACUL, FOTOGRAFÍA TOMADA EL 28 DE OCTUBRE DE 2011.

Por lo tanto las piscinas son una medida de mitigación suficientes para ciertos tipos de eventos, pero insuficiente para eventos mayores. Por lo que, en función de la morfología de la quebrada, de la susceptibilidad de sus unidades a generar remociones en masa alimentadoras o gatillantes de flujos y del material susceptible de ser arrastrado, es que se debiesen considerar medidas de mitigación complementarias, construidas sobre la quebrada, que disminuyan el peligro de flujos de detritos.

La morfología de la quebrada ha sido expuesta en el capítulo 3.1, y la susceptibilidad de las unidades a generar remociones en masa en el capítulo 4.4, a continuación se presenta el material susceptible de ser arrastrado:

Árboles:

En el cauce de la quebrada abundan árboles de eucaliptus de 5 a 20 años, los que ante un evento de flujo podrían fácilmente ser removidos y arrastrados con el flujo, esto se observa en la Ilustración 39 y en la Ilustración 40.



ILUSTRACIÓN 39: FOTOGRAFÍA DEL CAUCE DE LA QUEBRADA EN ZONA DE INTERSECCIÓN CON QUEBRADA EL DURAZNO. SE APRECIA EL GRAN NÚMERO DE ÁRBOLES QUE CRECEN EN EL CAUCE MISMO DE LA QUEBRADA. FOTOGRAFÍA TOMADA EN ENERO DE 2012.



ILUSTRACIÓN 40: FOTOGRAFÍA DEL CAUCE DE LA QUEBRADA AL ESTE DE INTERSECCIÓN CON QUEBRADA EL DURAZNO. SE APRECIA EL GRAN NÚMERO DE ÁRBOLES QUE CRECEN EN EL CAUCE MISMO DE LA QUEBRADA. FOTOGRAFÍA TOMADA EN ENERO DE 2012.

Rocas:

El abanico aluvial que conforma el cauce de la quebrada se encuentra compuesto por depósitos polimícticos, con segmentos matriz soportado y segmentos clasto soportado, los clastos que se pueden encontrar, llegan a alcanzar los 4 m como lo muestra la Ilustración 41, por lo que todo tipo de tamaños de rocas son susceptibles de ser arrastradas por un evento potente de flujo.

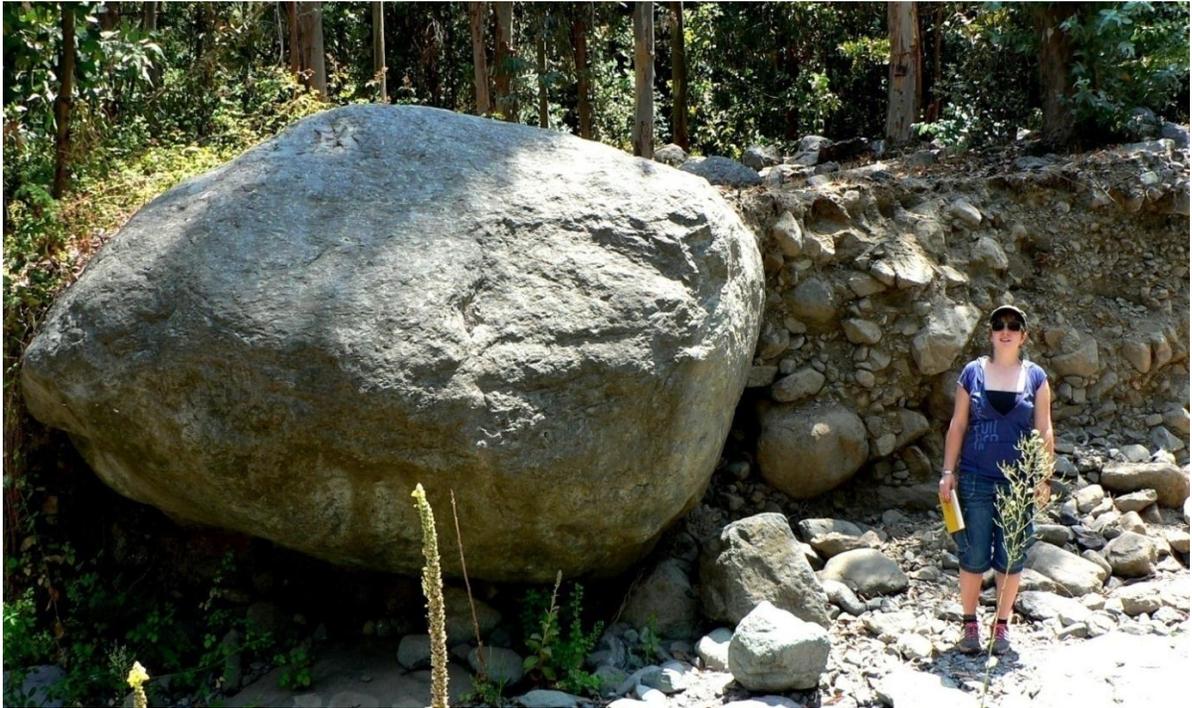


ILUSTRACIÓN 41: FOTOGRAFÍA DEL CAUCE DE LA QUEBRADA. SE APRECIA EL BLOQUE ARRASTRADO POR ALGÚN EVENTO ALUVIAL ANTERIOR. FOTOGRAFÍA TOMADA EN ENERO DE 2012.

5.3.2. PROPUESTAS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN COMPLEMENTARIAS

En la Ilustración 10 (capítulo 2.7) se presenta cómo distintos tipos de obras complementarias, deben implementarse, cuando la población está habitando tan cerca de la desembocadura de la quebrada y del cauce, como es el caso de la Quebrada de Macul.

Las piscinas hoy construidas, son obras de depositación, las que si bien son un aporte, no son suficiente y deben complementarse con medidas del tipo:

- **Obras de Almacenamiento**

Estas obras deben ser construidas quebrada arriba, en las quebradas secundarias que alimentan la quebrada de Macul, donde según lo presentado en el capítulo de susceptibilidad de remociones en masa (cap 3.3, Ilustración 24), se ubica la mayor susceptibilidad de generación de flujos. Las obras tienen como objetivo almacenar la mayor cantidad de sedimentos, rocas y árboles, para quitarle densidad a un posible flujo y excluir los elementos que puedan impactar otras estructuras quebrada abajo. Tanto presas permeables como barreras flexibles son buenas estructuras para cumplir este objetivo.

Es importante tener en consideración que la Quebrada de Macul es un atractivo turístico del sector, teniendo en su cauce sectores de picnic y camping durante todo el año. Por lo tanto, las obras que se proyecten en este sector no deben intervenir este carácter social de la quebrada.

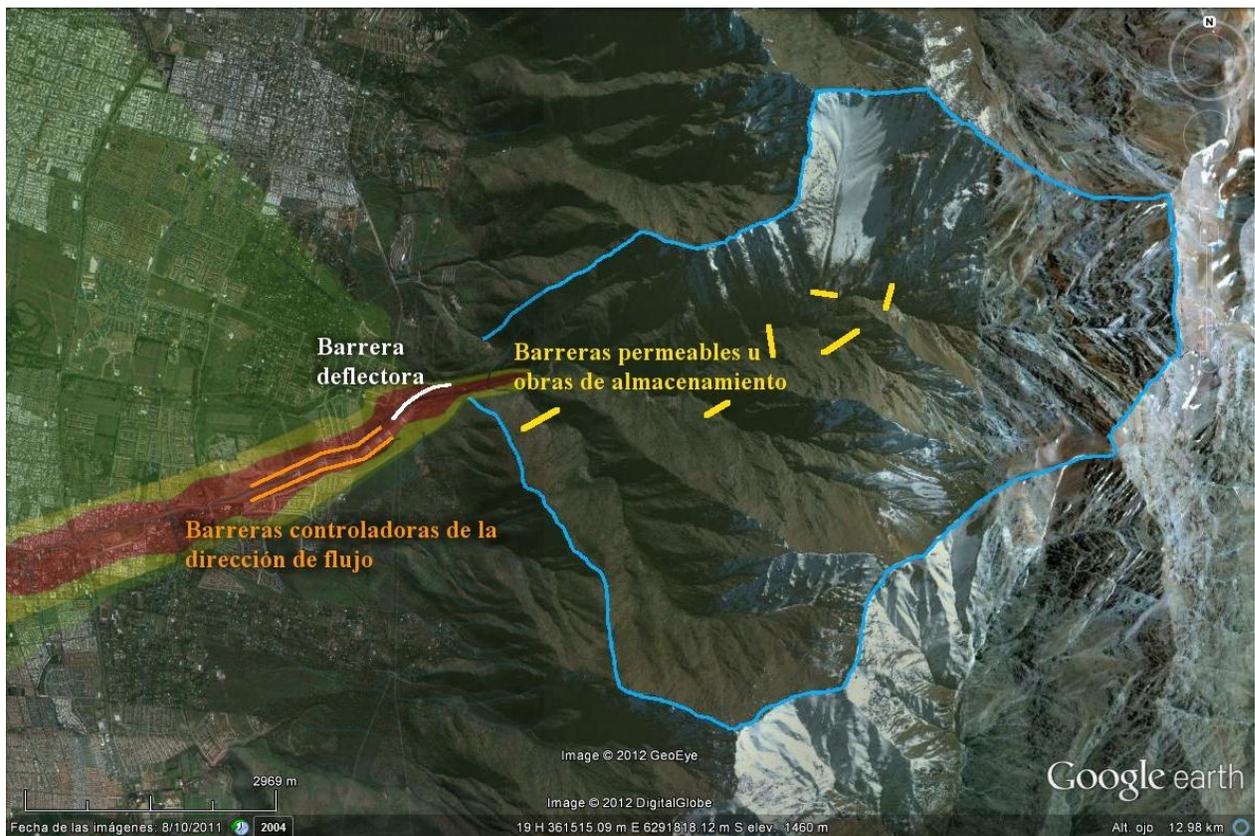


ILUSTRACIÓN 42: PROPUESTA ESQUEMÁTICA DE UBICACIÓN DE OBRAS DE MITIGACIÓN COMPLEMENTARIAS

En la Ilustración 42 se presenta una propuesta de ubicación de obras de almacenamiento que no alteran el carácter turístico de la Quebrada. Las obras se distribuyen de tal forma de que cada una almacena los sedimentos provenientes de las quebradas alimentadoras de la Quebrada de Macul.

- **Obras controladoras de la dirección del flujo**

Estas obras deben ser construidas posteriores a las piscinas e incluso en los bordes de las piscinas para evitar el desborde en este sector, lo que podría afectar principalmente los condominios Las Pircas, el sector de Alto Macul y los Áridos “Petreos Quilín”. La propuesta de ubicación de estas obras se presenta en la Ilustración 42.

- **Diques desviadores o barreras deflectoras**

Estas obras deben ser construidas entre los 1000 m s.n.m. y los 1070 m s.n.m., donde el cauce de la quebrada desemboca sobre las piscinas, para evitar que ante una crecida el flujo se desborde hacia el noroeste, por la calle Quilín, lo que afectaría principalmente el condominio Las Pircas y las viviendas ubicadas en ese sector. En la Ilustración 42 se indica la propuesta de ubicación de esta obra.

Debido a que el comportamiento de flujos de detritos es estudiado tanto desde el ámbito de la geología como del ámbito de la ingeniería civil hidráulica, es necesario explicitar en este trabajo que es esta última disciplina la que tiene más herramientas para realizar cálculos particulares de esfuerzos y parámetros de diseño a la hora de proyectar estructuras para medidas de mitigación complementarias.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a todo lo presentado se concluye que:

- La geomorfología de la Quebrada de Macul, las elevadas alturas que alcanzan las cimas que la delimitan, las elevadas pendientes de sus cauces, las numerosas tributarias que presenta hacia la cabecera, controladas por la estratificación de la formación Abanico y las malas condiciones geotécnicas de las rocas, constituyen el factor de primer orden de susceptibilidad de remociones en masa de la zona.
- Los eventos antecedentes de flujos de detritos en la Quebrada de Macul, sostienen su condición de peligro declarado.
- Las medidas de mitigación existentes son capaces de reducir el peligro de eventos de magnitudes menores a 450.000 m³ de sedimentos, pero para eventos mayores son insuficientes.
- El modelo Laharz reproduce fiablemente un flujo canalizado, permitiendo ser ajustado según eventos antecedentes, cuando se tiene información de la delimitación de los sedimentos depositados y el volumen del flujo.
- Las relaciones entre caudal y volumen pueden ser mejor ajustadas de tener más antecedentes que permitan concluir una relación empírica.
- El modelo MSF, más sensible a las pendientes que a la canalización, indica tres direcciones principales de dirección de flujos.
- El peligro definido como alto, además de corresponder a un evento con período de retorno entre 50 y 100 años, corresponde al área afectada por el flujo de detritos del 3 de mayo de 1993, por lo que resulta crítica la urbanización que se ha llevado a cabo en esta área.

Se han propuesto 3 categorías para clasificar el peligro: alto, medio y bajo. Se recomienda para cada una de estas las siguientes medidas:

Peligro Alto

- Evitar se continúe la utilización de estos terrenos para construcción de viviendas.
- Dimensionar adecuadamente las estructuras que deban construirse en este sector, considerando que las consecuencias de un flujo son la inundación del terreno, la erosión del suelo y los impactos de materiales grandes.
- Evaluar la capacidad del Zanjón de la Aguada, trabajando con el caudal máximo probable de 237 m³/s (Vargas, 1999), para evitar el desborde del Zanjón.
- Delimitar el terreno, a través de señaléticas, como área de peligro de aluviones.
- Definir vías de evacuación e indicarlas adecuadamente a través de señaléticas.
- Generar mecanismos de alerta temprana que permitan evacuar preventiva y oportunamente a la población habitante del sector.
- Educar a la población respecto a los aluviones, las zonas de seguridad y las zonas de peligro.

Peligro Medio

- Reforzar las construcciones en este sector, procurando que inundaciones o flujos puedan avanzar por las calles sin ingresar a las viviendas.
- Realizar mantenimiento y limpieza constante de la red de alcantarillado y control de aguas lluvias.
- Educar a la población respecto a los aluviones, las zonas de seguridad y las zonas de peligro.

Peligro Bajo

- Realizar mantenimiento y limpieza constante de la red de alcantarillado y control de aguas lluvias.

Complementariamente se recomienda construir las obras civiles de mitigación propuestas en el capítulo 5.3.3., con el objeto de disminuir el peligro en la zona urbana. Cualquier medida complementaria que persiga la estabilidad de la quebrada, como podría ser la reforestación de las laderas con vegetación de baja altura que impida el escurrimiento del suelo, son también recomendables.

De ser construidas estas obras, se recomienda reevaluar el peligro y rehacer el mapa de peligros aquí presentado.

Se recomienda difundir este trabajo entre la población y las autoridades pertinentes con el objeto de que se tome conciencia del peligro que implican los flujos de detritos y se tomen las medidas adecuadas que ayuden a prevenir una posible catástrofe.

Se recomienda realizar este mismo tipo de mapas en otras quebradas que susceptibles de generar flujos de detritos sobre sectores urbanos.

7. REFERENCIAS

- **ARMANINI, A.; DELLAGIACOMA F.; FERRARI, L. 1991.** FROM THE CHECK DAM TO THE DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL CHECK DAMS. FLUVIAL HYDRAULICS OF MOUNTAIN REGIONS. Lecture notes in earth sciences, n.37, Springer-Verlag, pp. 331-344.
- **AYALA, L. 1996.** HIDRÁULICA DE LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA: CORRIENTES DE DETRITOS Y FLUJOS DE BARRO. Curso Pre- XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador.
- **CASTRUCCIO, A., 2008.** COMPARACIÓN Y MODELACIÓN NUMÉRICA DE LAHARES CALIENTES EN EL VOLCÁN CALBUCO (41,3°S) Y LAHARES FRÍOS EN EL VOLCÁN VILLARRICA (39, 5°S), ANDES DEL SUR. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- **CHANSON, H. 2001.** SABO CHECK DAMS: MOUNTAIN PROTECTION SYSTEMS IN JAPAN. <http://www.uq.edu.au/~e2hchans/sabo.html>.
- **CHEN, R.; HO, M. 1997.** THE EFFECT OF OPEN DAMS ON DEBRIS FLOWS. En: Debris –Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, First International Conference, August 7-9, San Francisco, California. Pp. 626-635
- **CRUDEN, D. M., 1991.** A SIMPLE DEFINITION OF A LANDSLIDE. IAEG Bull., 43, 27-29.
- **CRUDEN, D.; VARNES, 1996.** LANDSLIDE TYPES AND PROCESSES. In Turner A.K. & Schuster R.L., 1996. Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.
- **FERRER, M., 1991.** MAPAS DE PELIGROSIDAD DE MOVIMIENTOS DE LADERA. I Biental Española de Ingeniería Geológica y Minera. Tomo 1, IGME.
- **FIEBIGER, G., 1997.** STRUCTURES OF DEBRIS FLOW COUNTERMEASURES, En: Debris –Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, First International Conference, August 7-9, San Francisco, California. pp 596-605
- **FIEBIGER, G. 2003.** Comunicación personal, tomada de Montserrat 2005.
- **GARREAUD, R., 1992.** IMPACTO DE LA VARIABILIDAD DE LA LÍNEA DE NIEVES EN CRECIDAS INVERNALES EN CUENCAS PLUVIO-NIVALES DE CHILE CENTRAL. XI Congreso Chileno de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- **GARREAUD, R.; RUTLLANT, J., 1996.** ANÁLISIS METEOROLÓGICO DE LOS ALUVIONES DE ANTOFAGASTA Y SANTIAGO DE CHILE EN EL PERÍODO 1991-1993. *Atmósfera*, 9, p. 2251-271
- **GARREAUD, 2011.** CAMBIO CLIMÁTICO: BASES FÍSICAS E IMPACTOS EN CHILE. *Revista Tierra Adentro – INIA*. N°93, Marzo-Abril 2011.
- **GOOGLE EARTH, 2007.** BASE MUNDIAL ONLINE DE REGISTROS DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS. <http://earth.googlepages.com>
- **GONZALEZ DE VALLEJO, L., 2002.** INGENIERÍA GEOLÓGICA, Editorial Prentice Hall.
- **HAUSER, A. 2004.** LOS FLUJOS ALUVIONALES EN CHILE: CAUSAS, EFECTOS Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN. Servicio Nacional de Geología y Minería. Subdirección Nacional de Geología. En prensa.
- **HUGGEL, C.; KÄÄB, A.; HAEBERLI, W.; KRUMMENACHER, B., 2003.** REGIONAL-SCALE GIS-MODELS FOR ASSESSMENT OF HAZARDS FROM GLACIER LAKE OUTBURSTS: EVALUATION AND APPLICATION IN THE SWISS ALPS. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3(6), p. 647-662.
- **HUGGEL, C.; SCHNEIDER, D.; JULIO, P.; DELGADO, H.; KÄÄB, A., 2007.** EVALUATION OF ASTER AND SRTM DEM DATA FOR LAHAR MODELING: A CASE STUDY ON LAHARS FROM POPOCATEPETL VOLCANO, MEXICO, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. En prensa.
- **HUNGR, O.; EVANS, S.G.; BOVIS, M.; HUTCHINSON, J.N., 2001.** REVIEW OF THE CLASSIFICATION OF LANDSLIDES OF THE FLOW TYPE: *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 7, p. 22-238.

- **IVERSON, R.; SCHILLING, S.; VALLANCE, J., 1998.** OBJECTIVE DELINEATION OF LAHAR-HAZARD ZONES DOWNSTREAM FROM VOLCANOES: Geological Society of America Bulletin, Vol. 110, p. 972-984.
- **JOHNSON, P.; MCCUEN, R. 1989.** SLIT DAMS DESIGN FOR DEBRIS FLOW MITIGATION. Journal of Hydraulic Engineering. V. 115. pp. 1293-1296.
- **KEEFER, D., 1984.** LANDSLIDES CAUSED BY EARTHQUAKES. Geol. Soc. Am. Bull., 95: 406-421.
- **LARA, M., 2007.** METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA CON APLICACIÓN EN QUEBRADA SAN RAMÓN, SANTIAGO ORIENTE, REGIÓN METROPOLITANA. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Geología. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- **LEYTON, F.; RUIZ, S.; SEPÚLVEDA S., 2010.** REEVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO EN CHILE CENTRAL. Revista Geológica de Chile, 18 p.
- **LIN, P.; CHANG, W.; LIU, K. 1997.** RETAINING FUNCTION OF OPEN-TYPE SABO DAMS, En: Debris -Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, First International Conference, San Francisco, California. pp 636-645
- **MARTÍNEZ, B., 2009.** SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIÓN EN MASA EN LA QUEBRADA DE MACUL, REGIÓN METROPOLITANA. Memoria para optar al título de geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- **MIZUYAMA, T.; KOBASHI, S.; MIZUNO, H. 1996.** DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF OPEN DAMS. Proc. Int. Symp. Interpraevent, Garmisch- Partenkirchen, Alemania, V. 5, pp. 59-65
- **MIZUYAMA, T. AND MIZUNO, H. 1997.** PREDICTION OF DEBRIS FLOW HYDROGRAPHS PASSING THROUGH GRID TYPE CONTROL STRUCTURES. En: Debris -Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, First International Conference, August 7-9, San Francisco, California. pp 74-82
- **MIZUYAMA, T. 2003.** Comunicación Personal, tomado de Montserrat 2005.
- **MONTSERRAT, S., 2005.** ESTUDIO EXPERIMENTAL DE OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA ALUVIONES. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- **NARANJO, J.A.; VARELA, J., 1996.** FLUJOS DE DETRITOS Y BARRO QUE AFECTARON EL SECTOR ORIENTE DE SANTIAGO EL 3 DE MAYO DE 1993. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No.47.
- **OKUBO, S.; IKEYA, H.; ISHIKAWA, Y.; YAMADA T., 1997.** Development of New Methods for Countermeasures against Debris Flows, En: Recent Developments on Debris Flows. Armanini and Michieu (Eds.), Springer-Verlag, Berlin. pp 166-185
- **OLIVER G.; RENET J.P., 1976.** ESSAI DE CARTOGRAPHIE DES RISQUES LIÉS À DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA RÉGION DE SAINT-MARTIN-DE-BELLEVILLE. Bull. Liason Lab. P. et Ch., spécial, mars 1976, 40-55.
- **PADILLA, C., 2006.** ANÁLISIS DE FACTORES METEOROLÓGICOS DESENCADENANTES DE REMOCIONES EN MASA EN EL SECTOR ORIENTE DE SANTIAGO. Memoria para optar al Título Profesional de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- **PIERSON, T. C., 1986.** FLOW BEHAVIOR OF CHANNELIZED DEBRIS FLOWS, MOUNT ST. HELENS, WASHINGTON, in Hillslope Processes, edited by A. D. Abrahams, pp. 269-277, Allen and Unwin, Winchester, Mass.
- **RAULD, R. 2002.** ANÁLISIS MORFOESTRUCTURAL DEL FRENTE CORDILLERANO DE SANTIAGO ORIENTE, ENTRE EL RÍO MAPOCHO Y LA QUEBRADA DE MACUL. Memoria para optar al Título Profesional de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- **SCHACHTER, P., 2008.** EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN EL SECTOR NORORIENTE DE LA CUENCA DE SANTIAGO MEDIANTE MÉTODOS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS. Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- **SCHILLING, S., 1998.** LAHARZ: GIS PROGRAMS FOR AUTOMATED MAPPING OF LAHAR-INUNDATIONS

- HAZARD ZONES: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-638, 80 p.
- **SEMINARA, G.; TUBINO, M. 1993.** DEBRIS FLOWS: MECCANICA, CONTROLLO E PREVISIONE. MONOGRAFIA DELLE UNITÀ OPERATIVA DEL GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DALLE CATASTROFI IDROGEOLOGICHE, Istituto di Idraulica, Universidad de Genova.
 - **SENOO, K.; MIZUYAMA, T. 1984.** FUNCTION OF STRUCTURES AGAINST DEBRIS FLOW. Proc. Int. Symp. Interpraevent, Villach, Austria, Vol. 3, pp 113-120.
 - **SEPÚLVEDA, S., 1998.** METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS EN AMBIENTES MONTAÑOSOS: APLICACIÓN EN LA QUEBRADA LO CAÑAS, REGIÓN METROPOLITANA. Memoria para optar al Título Profesional de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
 - **SEPÚLVEDA, S.; PADILLA, C., 2008.** RAIN-INDUCED DEBRIS AND MUDFLOW TRIGGERING FACTORS ASSESSMENT IN THE SANTIAGO CORDILLERAN FOOTHILLS, CENTRAL CHILE. Natural Hazards 47(2): 201-215.
 - **TADASHI, A., 1995.** RIESGOS GEOLÓGICOS URBANOS. In: Aspectos geológicos de protección ambiental. Repetto, F., Santiago, C., editores. UNESCO, Montevideo, Vol. 1, pp. 89-101.
 - **TAMBURRINO, A., 2011.** Apuntes del curso Hidráulica Ambiental, departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile.
 - **THIELE, R., 1980.** GEOLOGÍA DE LA HOJA DE SANTIAGO, REGIÓN METROPOLITANA. Carta Geológica de Chile No. 39. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1 mapa. 51 p.
 - **VANDINE, D., 1996.** DEBRIS FLOW CONTROL STRUCTURES FOR FOREST ENGINEERING. British Columbia.
 - **VARGAS, X.; LARA P., 1996.** CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A EVENTOS ALUVIONALES EN CUENCAS DEL PIEDEMONTE DE SANTIAGO. Sociedad Chilena de la Ingeniería Hidráulica. XII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile. Vol. 1 pp. 243-253.
 - **VARGAS, X., 1999.** CORRIENTES DE DETRITOS EN LA QUEBRADA DE MACUL, CHILE. ESTUDIO DE CAUDALES MÁXIMOS. Ingeniería del Agua Vol. 6, Num. 4, pp. 245-248.
 - **VARNES D. J., 1978.** SLOPE MOVEMENTS, TYPE AND PROCESSES. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. (Eds.), Landslides analysis and control. Washington Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences, WA, 11-33.
 - **VARNES, D.J., 1984.** LANDSLIDE HAZARD ZONATION: A REVIEW OF PRINCIPLES AND PRACTICE. Natural Hazards 3, UNESCO, 63 p.

Un campesino apacentaba su ganado, junto a la laguna de Kojup. Al aclarar el día, oyó ensordecedores ruidos, como si se desprendieran gigantescas piedras desde alturas considerables. Asustado, miró por todas partes y vio surgir de las aguas a un hombre pequeño y muscolosísimo, de pelo ardiente y piel rojísima, armado de un ancho machete que relucía.

El monstruo se puso a danzar con locura alrededor de la laguna y, de rato en rato, arrojaba a la profundidad peñas y pedrones de descomunal tamaño. Durante casi dos horas, estuvo haciendo lo mismo, hasta que las aguas empezaron a enfurecerse, se encresparon y comenzaron a formar espumantes olas. Al final de su danza loca, el mismo monstruo se arrojó al caudal. De inmediato, reapareció montado en un gigantesco caballo negro de fauces chispeantes, con una crin que parecía candela y cola refulgente. Empezó a galopar, y tras suyo se desbordaron las aguas estremeciendo la tierra, barriendo todo lo que encontraba en su camino. El jinete oropelado, armado con su machete candente, presidía el salvaje caudal que rugía como mil reses cerriles, levantaba polvo y arrojaba peñones y árboles, devoraba animales, colinas y casas. El monstruo con su asesina arma segaba los bosques más fuertes, como si fuesen trigales y destruía viviendas y hombres.

En el momento en que el aluvión iba a cubrir Huaraz, en la colina de Pumakayán, apareció un niño de inmaculada vestidura, que con un movimiento de su brazo derecho torció su curso, salvando la ciudad.

El jinete siguió avanzando sobre su caballo feroz que saltaba y volaba por momentos. Cuando llegó a Uchpakoto, donde en una cueva grande vivía un Inca, el caballero tuvo que librar una colosal batalla.

El Inca saltó de su vivienda, loco de cólera y, lanza en mano, desafió al jinete. Se trabó el duelo que fue a muerte. Ambos campeones eran fuertes y muy bravos. La lucha se encarnizó por una hora muy larga. El caballero recibió muchas heridas. Al final, el Inca cayó fulminado por una criminal estocada. Libre el paso, el jinete continuó su devastadora carrera, arrasando casas, gentes y plantas.

No se escapó la morada del Inca.

Yahuri Montero

ANEXOS

A.1 DESGLOSE DE FACTORES CONDICIONANTES DE REMOCIONES EN MASA

A.1.1 FACTORES CONDICIONANTES DE CAÍDAS DE ROCA (LARA, 2007).

FACTOR	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
Pendientes de laderas f_1	Promedio de la Unidad.	15°-20°	4%
		20°-25°	10%
		25°-30°	18%
		30°-40°	25%
		40°-60°	32%
		>60°	35%
Características geológicas-geotécnicas del material f_2	Será más favorable a medida que presente estructuras subverticales el macizo, alta frecuencia de fracturas y orientación de fracturas en el sentido de la ladera. Se consideran además los factores generadores de deslizamientos de roca.	Muy favorable	35%
		Favorable	24%
		Medianamente favorable	15%
		Poco favorable	9%
		Muy poco favorable	3%
Acumulación de nieve f_3	Asociado a procesos de hielo/deshielo, que contribuyen en la caída de roca debido a la generación de esfuerzos en tracción en la roca.	Siempre	10%
		Estacional	4%
		Esporádica	2%
		Nula	0%
Desestabilización artificial de laderas f_4	Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	5%
		Poco importante	3%
		No observado	0%
Caídas de roca declaradas en la ladera f_5	Presencia de bloques caídos.	Presente	15%
		No observado	0%
Tipo de material f_6	En este caso, el material suelo no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores.	Suelo	0
		Roca (cobertura aprox <1-1,5 m de suelo)	1

A.1.2 FACTORES CONDICIONANTES DE DESLIZAMIENTOS EN SUELO (LARA, 2007).

FACTOR	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
Pendientes de laderas f_1	Promedio de la Unidad.	15°-20°	9%
		20°-25°	15%
		25°-30°	21%
		30°-40°	26%
		>40°	30%
Exposición al sol f_2	Para el caso de Chile central, alta exposición: laderas mirando al N, al estar expuestas al sol durante todo el año. Parcial: laderas mirando al E-W. Baja: laderas mirando al S.	Alta	5%
		Parcial	3%
		Baja	1%
Características geológicas-geotécnicas del material f_3	Condiciones muy favorables para generación de deslizamiento son, entre otros, baja densidad (< 1,6-1,8 kN/m ³), baja resistencia, alta cantidad de material fino en su composición; además de la estructura y estratificación del suelo. La generación de material removible a partir de roca se ve favorecido por alta meteorización y alteración.	Muy favorable	20%
		Favorable	14%
		Medianamente favorable	10%
		Poco favorable	6%
		Muy poco favorable	2%
Condiciones de humedad y saturación f_4	Considerar: (1) Capacidad de saturación por abajo (profundidad nivel freático) y por arriba (infiltración por precipitación). (2) Capacidad de almacenaje de agua en la estructura de suelo (asociado a presencia de niveles impermeables). Saturación y mayor almacenaje favorecen la generación de deslizamientos. La relación (profundidad N.F./ espesor suelo) cercana a 0 indica condiciones muy favorables de generación. ~ 0,5 es favorable.	Favorable	7%
		Poco favorable	3%
		Sin antecedentes	2%
Acumulación de nieve f_5	Según estacionalidad	Siempre	5%
		Estacional	2%
		Esporádica	1%
		Nula	0%
Cobertura vegetal f_6	Densidad en la ladera	Nula a baja	5%
		Moderada	2%
		Alta	0%
Desestabilización artificial de laderas f_7	Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	10%
		Poco importante	5%
		No observado	0%
Deslizamientos declarados en la unidad geomorfológica f_8	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	Presente	10%
		Sin antecedentes	3%
		No observado	0%
Deslizamientos declarados en la unidad geológica de suelo f_9	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	Presente	10%
		Sin antecedentes	3%
		No observado	0%
Tipo de material f_{10}	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores	Suelo	1
		Roca (cobertura aprox <1-1,5 m de suelo)	0

A.2.3 FACTORES CONDICIONANTES DE DESLIZAMIENTOS EN ROCA (LARA, 2007).

FACTOR	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
Pendientes de laderas f_1	Promedio de la Unidad	15°-20°	11%
		20°-25°	15%
		25°-30°	20%
		30°-40°	25%
		40°-60°	30%
		>60°	35%
Características geológicas-geotécnicas del material f_2	Su generación se ve favorecida por alto grado de fracturamiento, alta meteorización y presencia de agua en el macizo. La orientación de fracturas permitirán identificar el tipo de deslizamiento plano (superficie de deslizamiento en el sentido de la ladera), cuña (por intersección de estructuras) o toppling (fracturas opuestas al sentido de la ladera). Puede considerarse valores bajos de RMR (<30) -modificado según orientación de estructuras en laderas- como indicativo aproximado de condiciones muy favorables para generación de deslizamientos.	Muy favorable	35%
		Favorable	28%
		Medianamente favorable	18%
		Poco favorable	11%
		Muy poco favorable	4%
Acumulación de nieve f_3	Según estacionalidad	Siempre	5%
		Estacional	2%
		Esporádica	1%
		Nula	0%
Desestabilización artificial de laderas f_4	Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	10%
		Poco importante	5%
		No observado	0%
Deslizamientos declarados en la ladera f_5	Información escrita y/u observación de superficies de deslizamiento	Presente	15%
		Sin antecedentes	5%
		No observado	0%
Tipo de material f_6	En este caso, el material suelo no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores. Suelo muy superficial en unidades mapeadas como roca no se considera.	Suelo	0
		Roca (cobertura aprox <1-1,5 m de suelo)	1

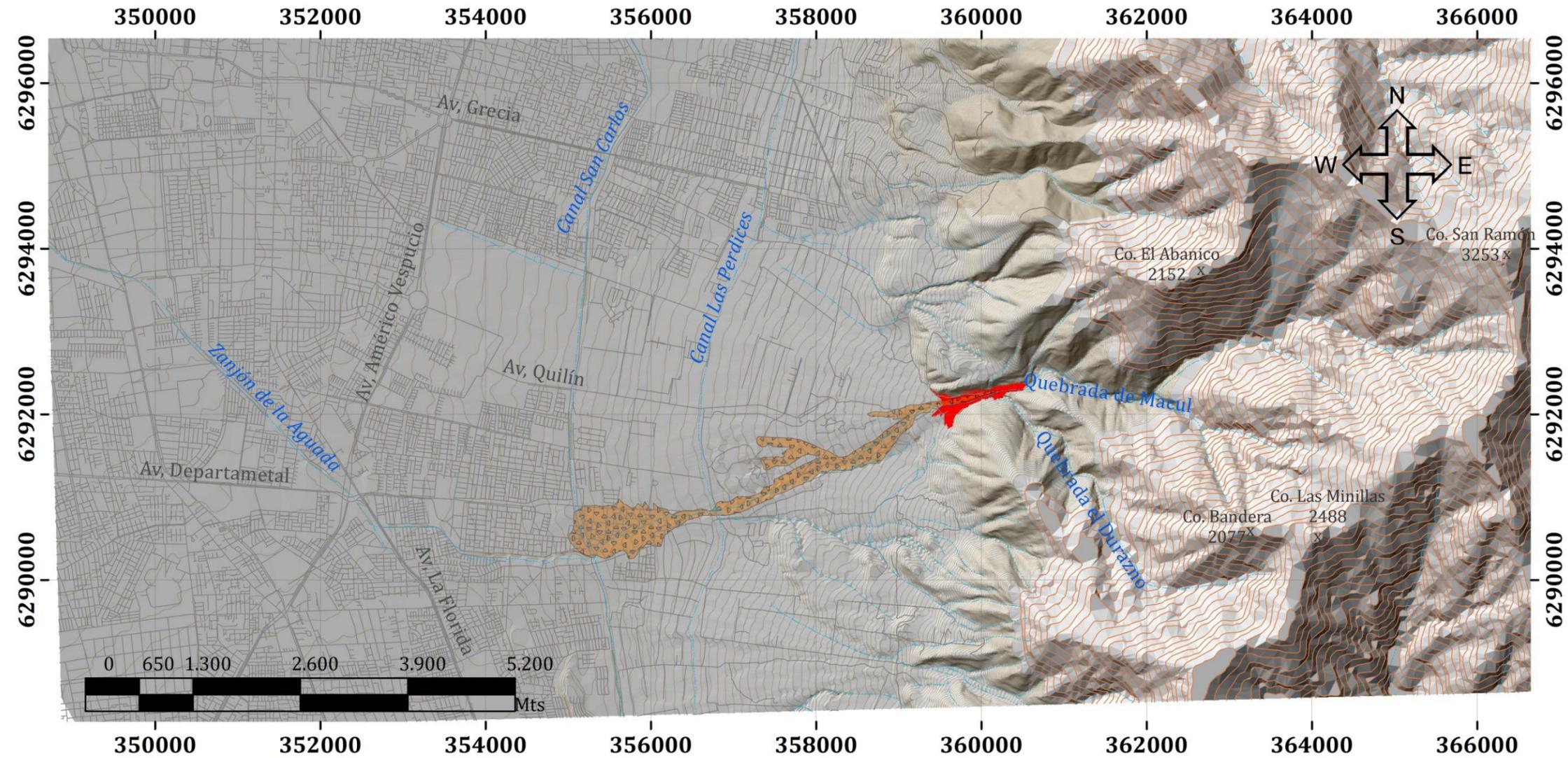
A.2.4 FACTORES CONDICIONANTES DE FLUJOS (LARA, 2007).

FACTOR	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
Pendientes de laderas f_1	Promedio de la Unidad	10°-25°	3%
		15°-20°	6%
		20°-25°	9%
		25°-30°	11%
		30°-40°	13%
Pendiente canal de drenaje al pie de la ladera f_2	Promedio de la Unidad, si la unidad es sólo canal de drenaje, el puntaje f_2 se asocia a f_1 quedando sólo como un puntaje otorgado como "pendiente del canal".	>40°	15%
		<5°	1%
		5°-10°	5%
Encajamiento canal de drenaje f_3	Dado por la geomorfología y la relación profundidad/ancho del canal. Un encajamiento alto puede reflejarse, entre otros, en un valor alto de esta razón. Puede considerarse un valor mayor a 0,7 como encajamiento alto.	>10°	10%
		Alto	7%
Exposición al sol f_4	Para el caso de Chile central, alta exposición: laderas mirando al N, al estar expuestas al sol durante todo el año. Parcial: laderas mirando al E-W. Baja: laderas mirando al S.	Medio	4%
		Baja	1%
		Alta	3%
Características geológicas-geotécnicas del material f_5	La generación de flujos se ve favorecida, entre otros, por suelos de baja compacidad, permeabilidad, y espesores críticos de sueño, presencia de estructuras y presencia de finos. En roca: alta meteorización y frecuencia de fracturas (valores bajos de GSI a nivel de ladera), litología (rocas menos resistentes) y alteraciones.	Parcial	2%
		Baja	0%
		Muy favorable	25%
		Favorable	18%
		Medianamente favorable	13%
Condiciones de humedad y saturación f_6	Asociado a : (1) Capacidad de saturación por abajo (profundidad nivel freático <2m es muy favorable para generación de flujos, >2m poco favorable ~ 2m favorable) y por arriba (infiltración por precipitación). (2) Capacidad de almacenaje de agua en la estructura de suelo. (3) Variaciones estacionales de humedad. Mayor almacenaje y humedad alta favorecen generación de flujo.	Poco favorable	8%
		Muy poco favorable	3%
		Muy favorable	10%
		Favorable	7%
Acumulación de nieve f_7	Según estacionalidad	Poco favorable	3%
		Sin antecedentes	2%
		Siempre	5%
		Estacional	2%
Cobertura vegetal f_8	Densidad en la ladera	Esporádica	1%
		Nula	0%
		Nula a baja	5%
Obstrucción de canal de drenaje f_9	No considera estructuras destinadas a contener los flujos	Moderada	3%
		Alta	0%
		Importante	5%
		Moderada	4%
Desestabilización artificial de laderas f_{10}	Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Baja	2%
		No observado	0%
		Importante	5%
Aluviones declarados en hoya hidrográfica f_{11}	Información escrita y/u observación de depósitos de flujos en la zona de estudio. Considerar como eventos frecuentes aquellos con recurrencia ≤ 10 años.	Poco importante	3%
		No observado	0%
		Históricos frecuentes	10%
		Históricos poco frecuentes	7%
Tipo de material f_{12}	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores	Prehistóricos	4%
		Sin antecedentes	1%
		Suelo	1
		Roca (cobertura aprox <1-1,5 m de suelo)	0

A.2. MODELOS LAHARZ PARA FLUJO DE 840.000 M3, PARA DISTINTOS VALORES DE C1 Y C2

A.2.1. $C_1=0,10$ - $C_2=20$

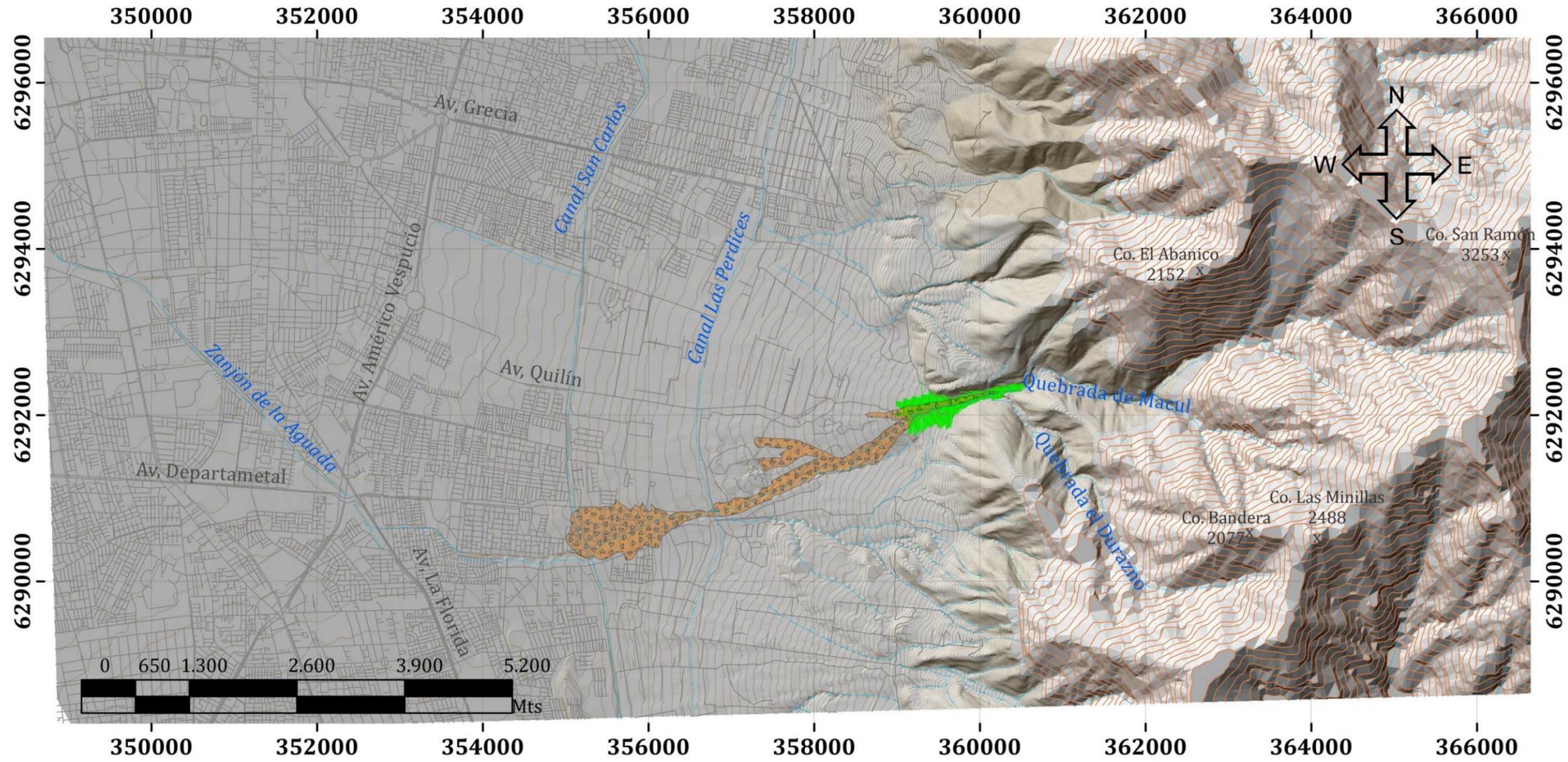
Modelo LAHARZ



Leyenda

- | | | |
|--|--|---|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 50 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Curvas IGM 5 m |  Calles |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,1; c_2=20$ |

Modelo LAHARZ

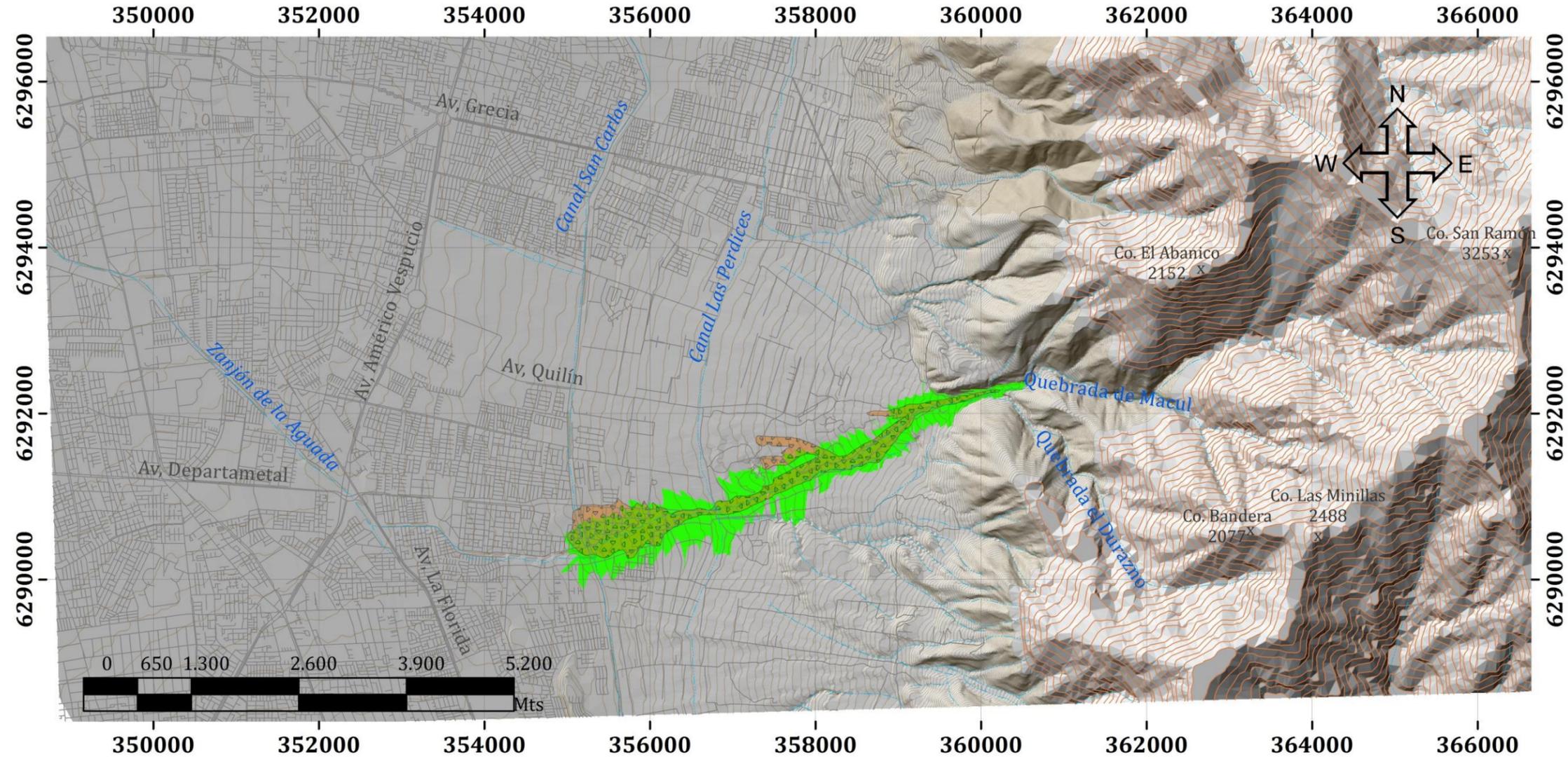


Leyenda

- | | | |
|--|--|--|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 50 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Curvas IGM 5 m |  Calles |  Flujo V=840.000 m3 / c1=0,1; c2=40 |

A.2.3. $C_1=0,10 - C_2=320$

Modelo LAHARZ

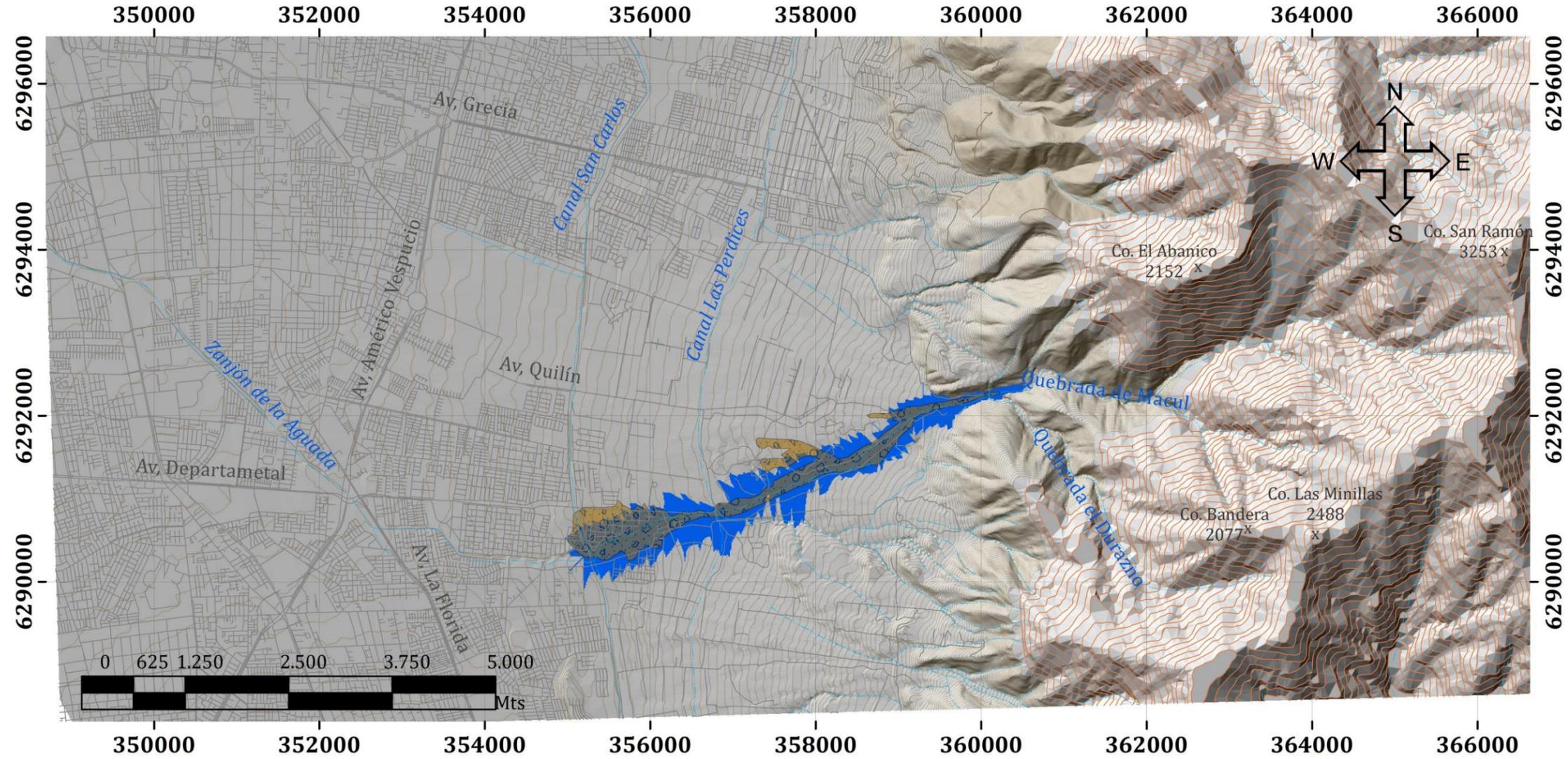


Leyenda

- | | | |
|--|--|--|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 50 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Curvas IGM 5 m |  Calles |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,1; c_2=320$ |

A.2.4. $C_1=0,09 - C_2=300$

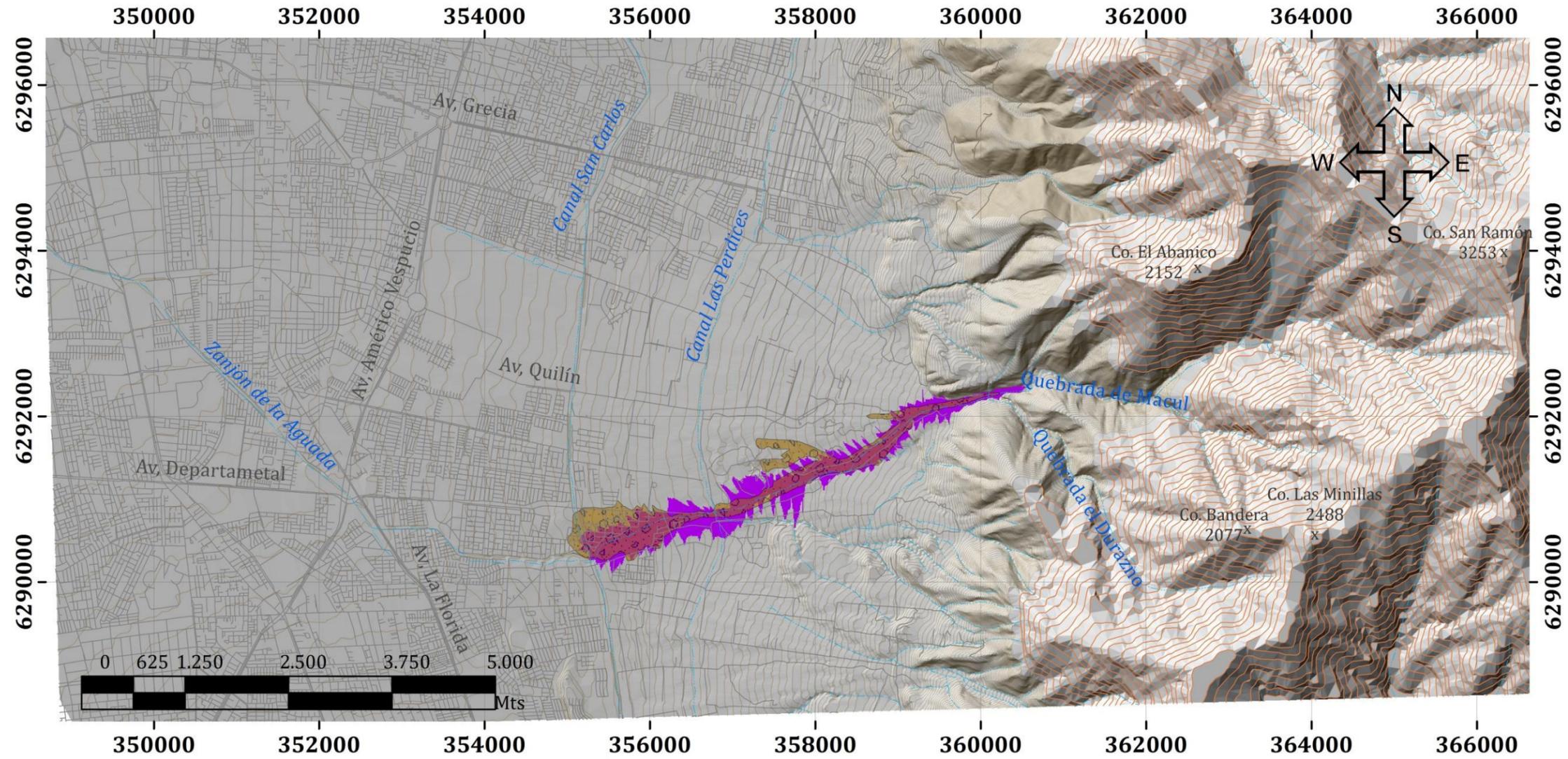
Modelo LAHARZ



Leyenda

- | | | |
|--|--|---|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 5 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Calles |  Curvas IGM 50 m |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,09; c_2=300$ |

Modelo LAHARZ

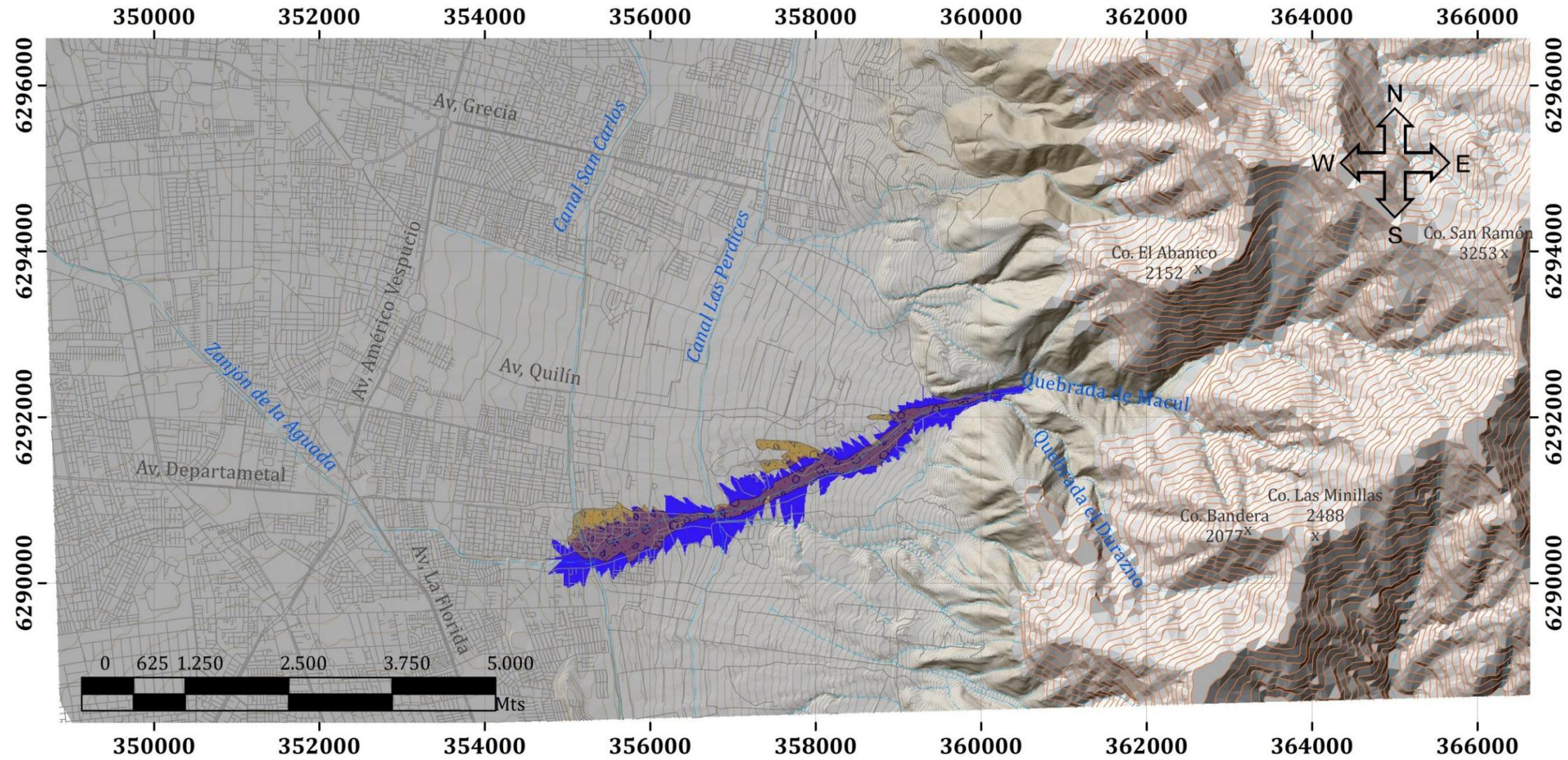


Leyenda

- | | | |
|--|--|---|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 5 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Calles |  Curvas IGM 50 m |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,04; c_2=200$ |

A.2.6. $C_1=0,07 - C_2=280$

Modelo LAHARZ

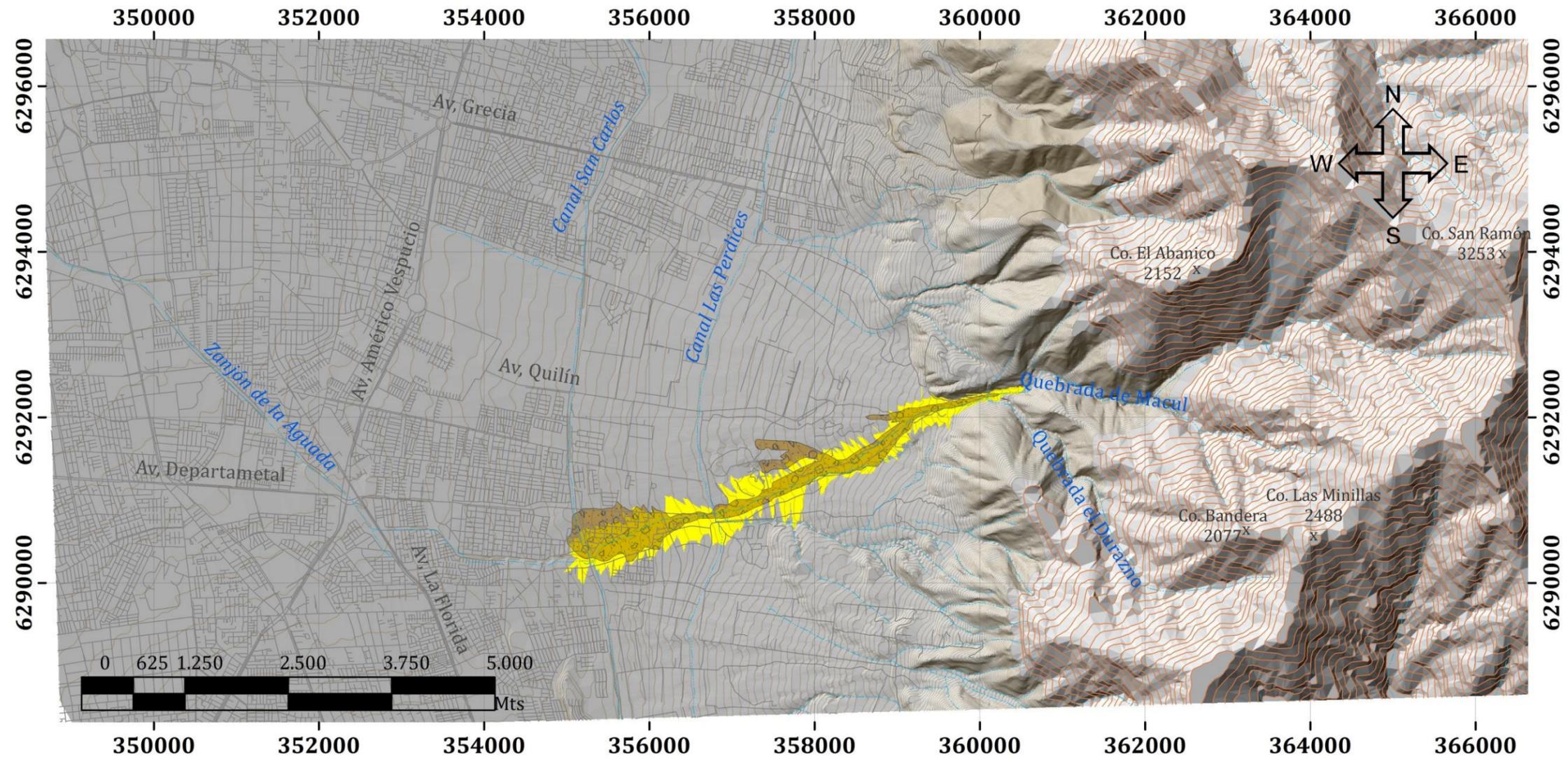


Leyenda

- | | | |
|--|--|---|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 5 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Calles |  Curvas IGM 50 m |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,07; c_2=280$ |

A.2.7. $C_1=0,06 - C_2=250$

Modelo LAHARZ

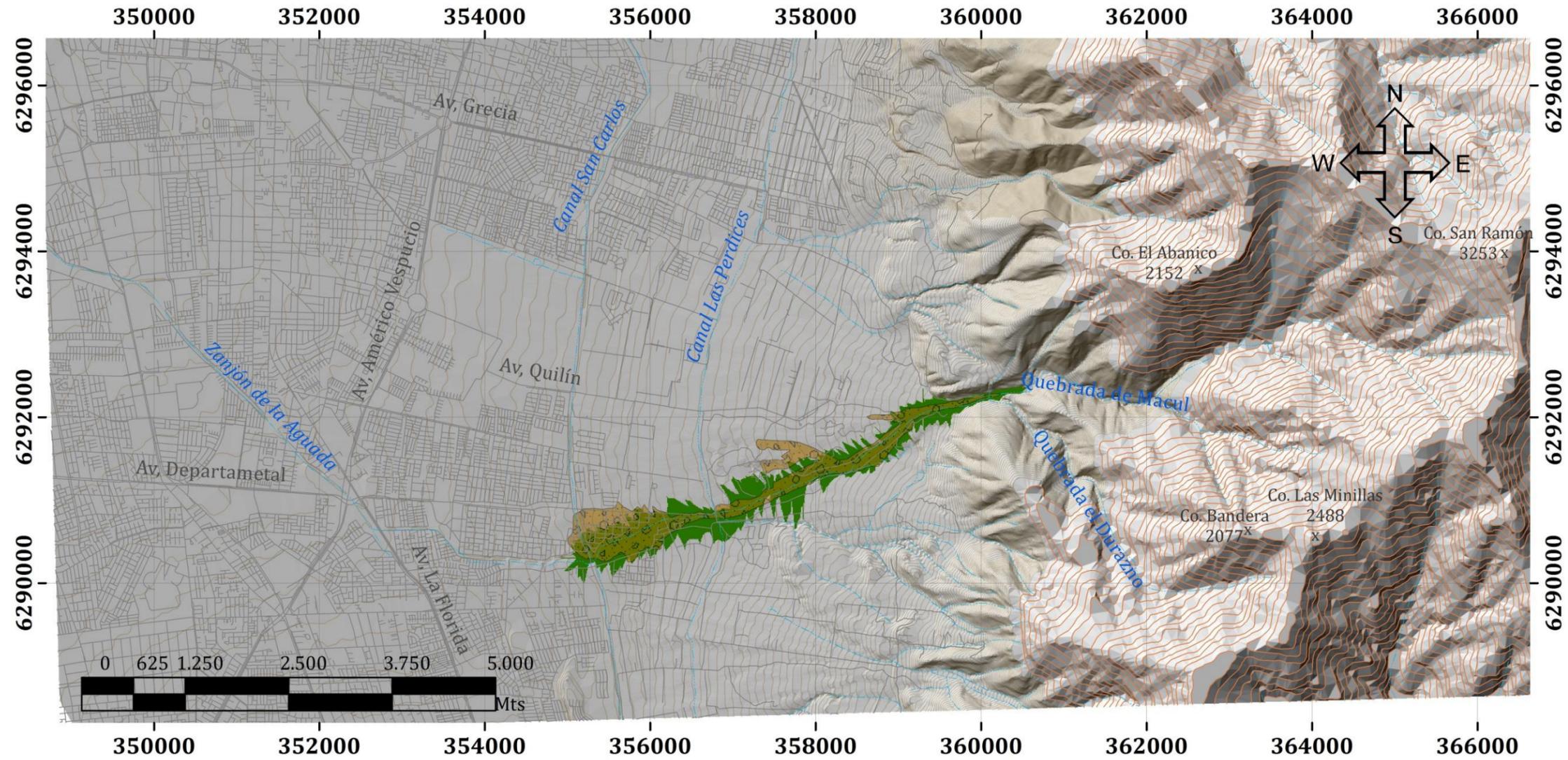


Leyenda

- | | | |
|--|--|---|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 5 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Calles |  Curvas IGM 50 m |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,06; c_2=250$ |

A.2.8. $C_1=0,05 - C_2=230$

Modelo LAHARZ

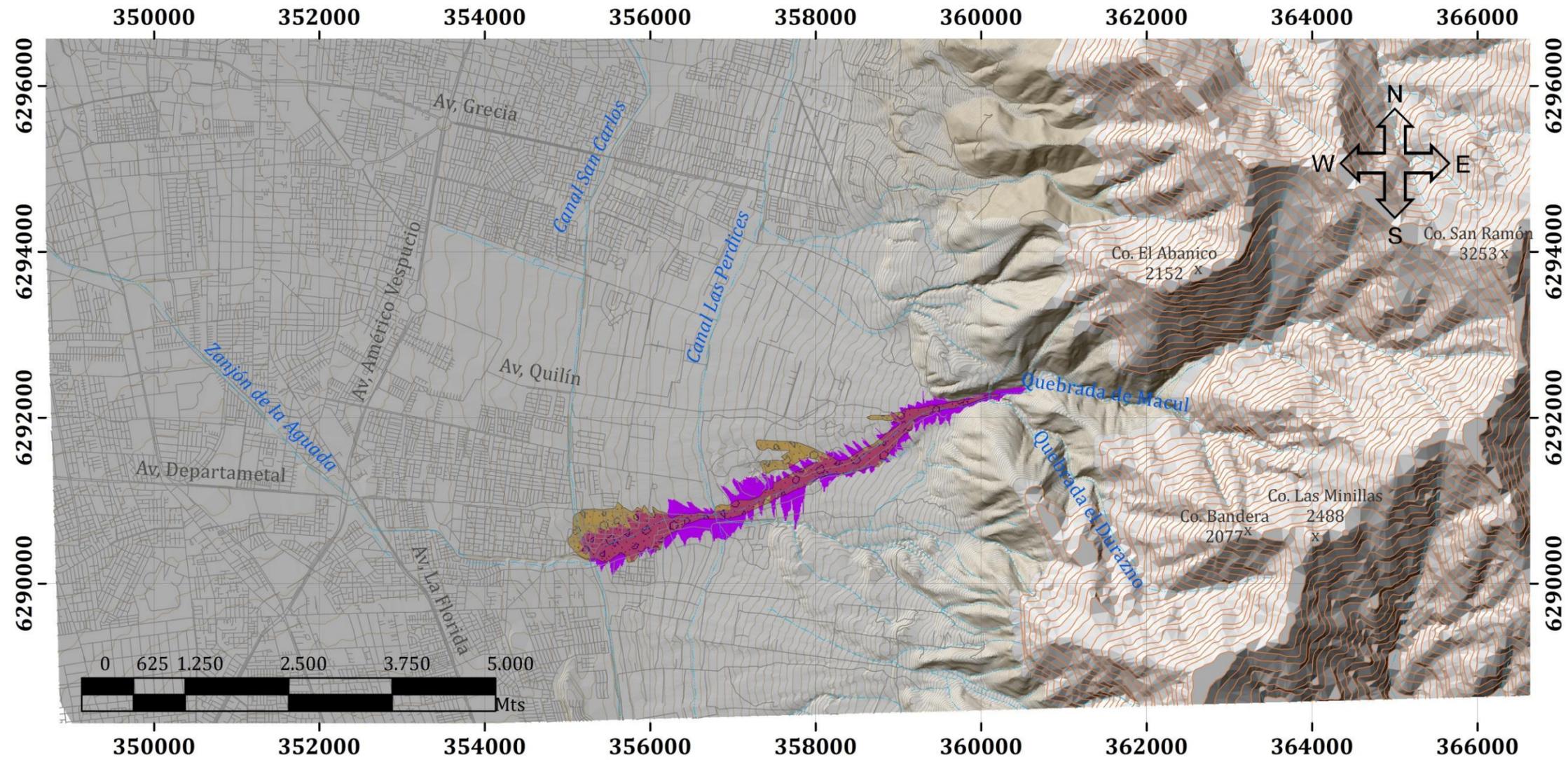


Leyenda

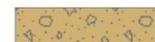
- | | | |
|--|--|---|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 5 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Calles |  Curvas IGM 50 m |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,05; c_2=230$ |

A.2.9. $C_1=0,04 - C_2=200$

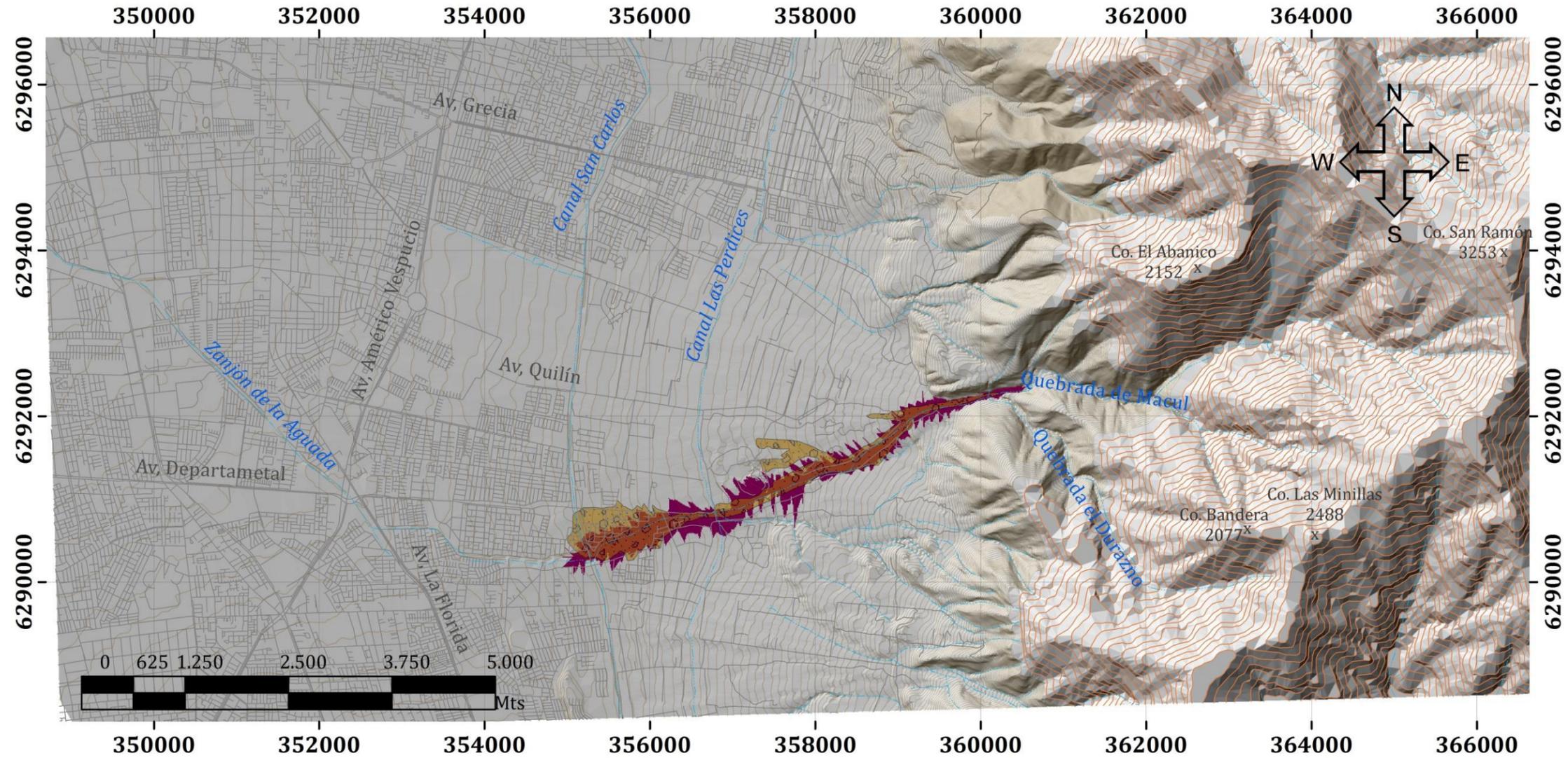
Modelo LAHARZ



Leyenda

- | | | |
|--|--|---|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 5 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Calles |  Curvas IGM 50 m |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,04; c_2=200$ |

Modelo LAHARZ



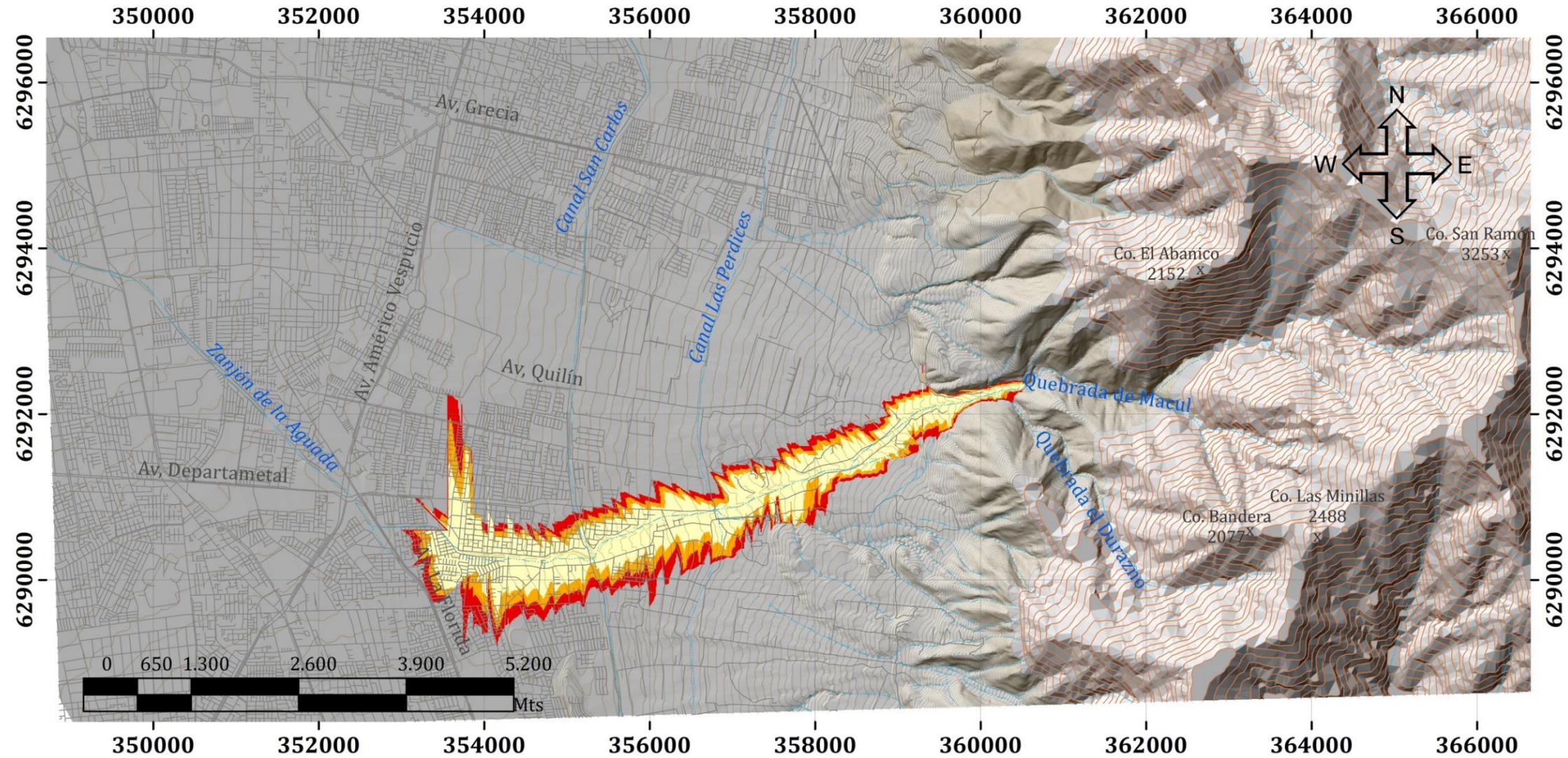
Leyenda

- | | | |
|--|--|---|
|  Red de drenaje |  Curvas IGM 5 m |  Flujo 3 de Mayo 1993 |
|  Calles |  Curvas IGM 50 m |  Flujo $V=840.000 \text{ m}^3 / c_1=0,03; c_2=180$ |

A.3. MODELOS LAHARZ PARA CAUDALES MÁXIMOS PROBABLES

A.3.1. VOLUMEN = 2.926.950 m³

Modelo LAHARZ

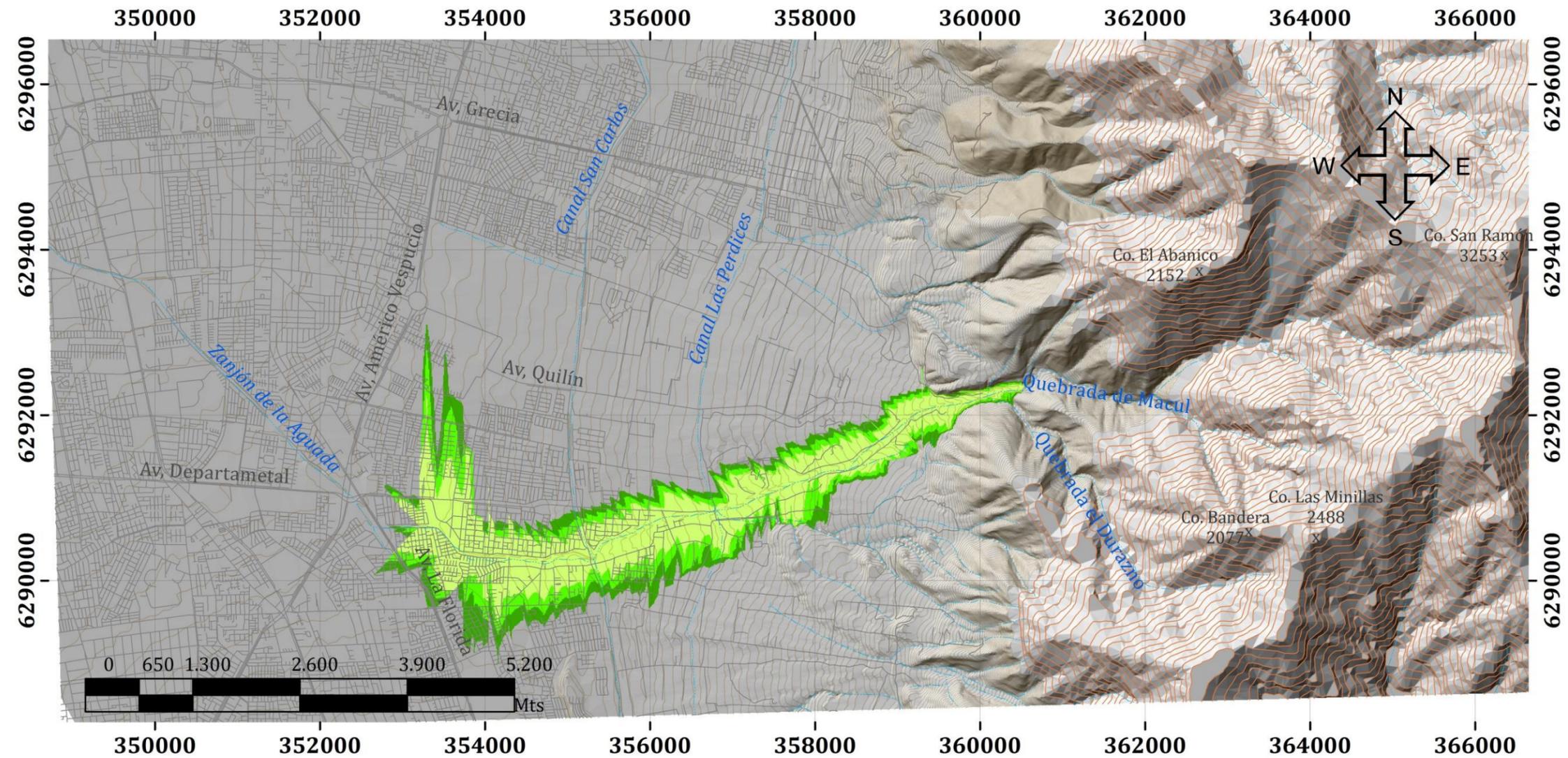


Leyenda

- | | | | |
|---|-----------------|--|--|
|  | Red de drenaje |  | Flujo V=2.926.950 m ³ / c1=0,03 c2=180 |
|  | Curvas IGM 5 m |  | Flujo V=2.926.950 m ³ / c1=0,06 c2=250 |
|  | Curvas IGM 50 m |  | Flujo V=2.926.950 m ³ / c1=0,10; c2=320 |
|  | Calles | | |

A.3.2 VOLUMEN = 3.859.633 m³

Modelo LAHARZ

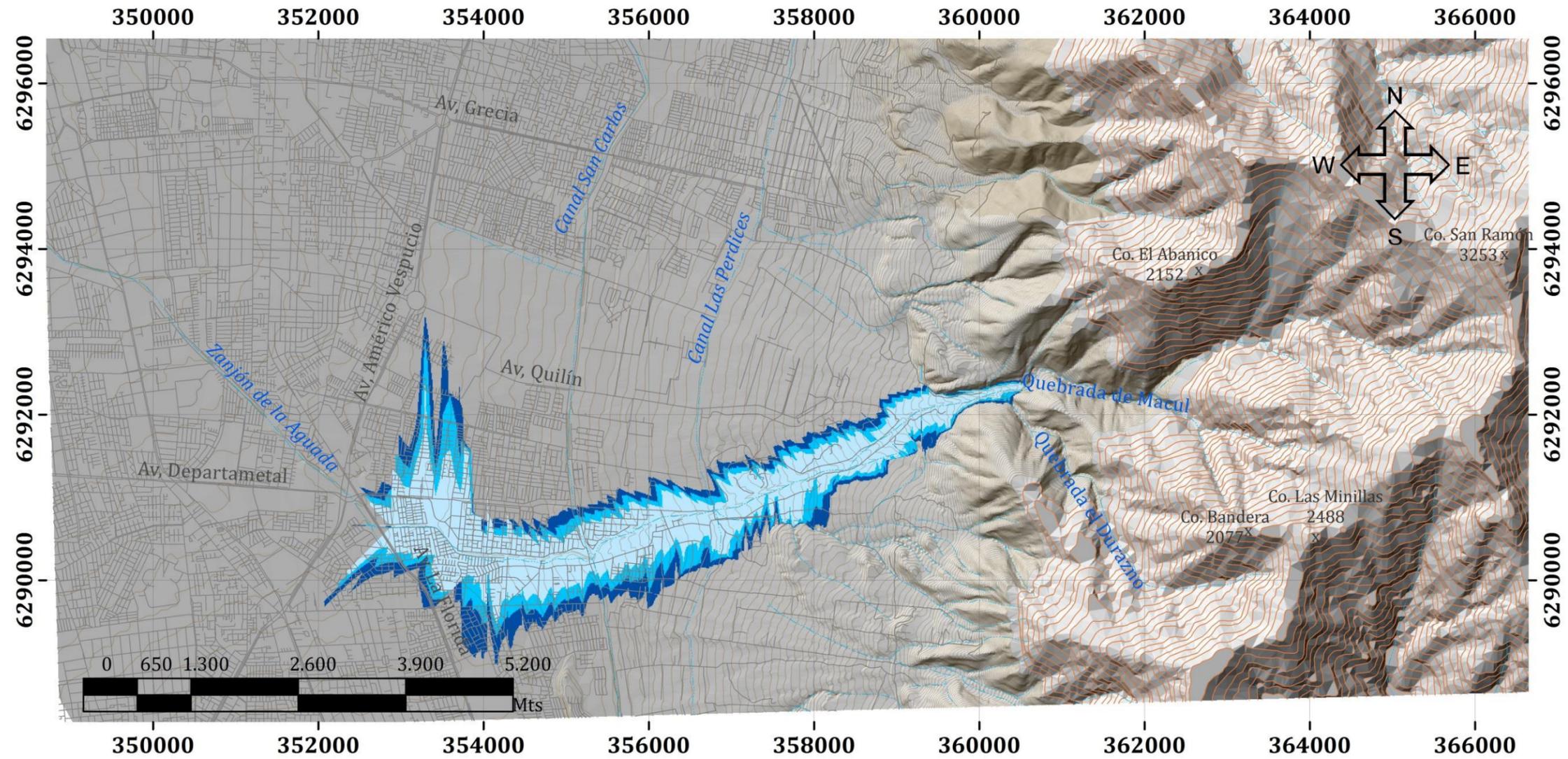


Leyenda

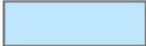
- | | | | |
|---|-----------------|--|--|
|  | Red de drenaje |  | Flujo V=3.859.633 m ³ / c1=0,03; c2=180 |
|  | Curvas IGM 5 m |  | Flujo V=3.859.633 m ³ / c1=0,06; c2=250 |
|  | Curvas IGM 50 m |  | Flujo V=3.859.633 m ³ / c1=0,10; c2=320 |
|  | Calles | | |

A.3.3. VOLUMEN = 4.584.009 m³

Modelo LAHARZ

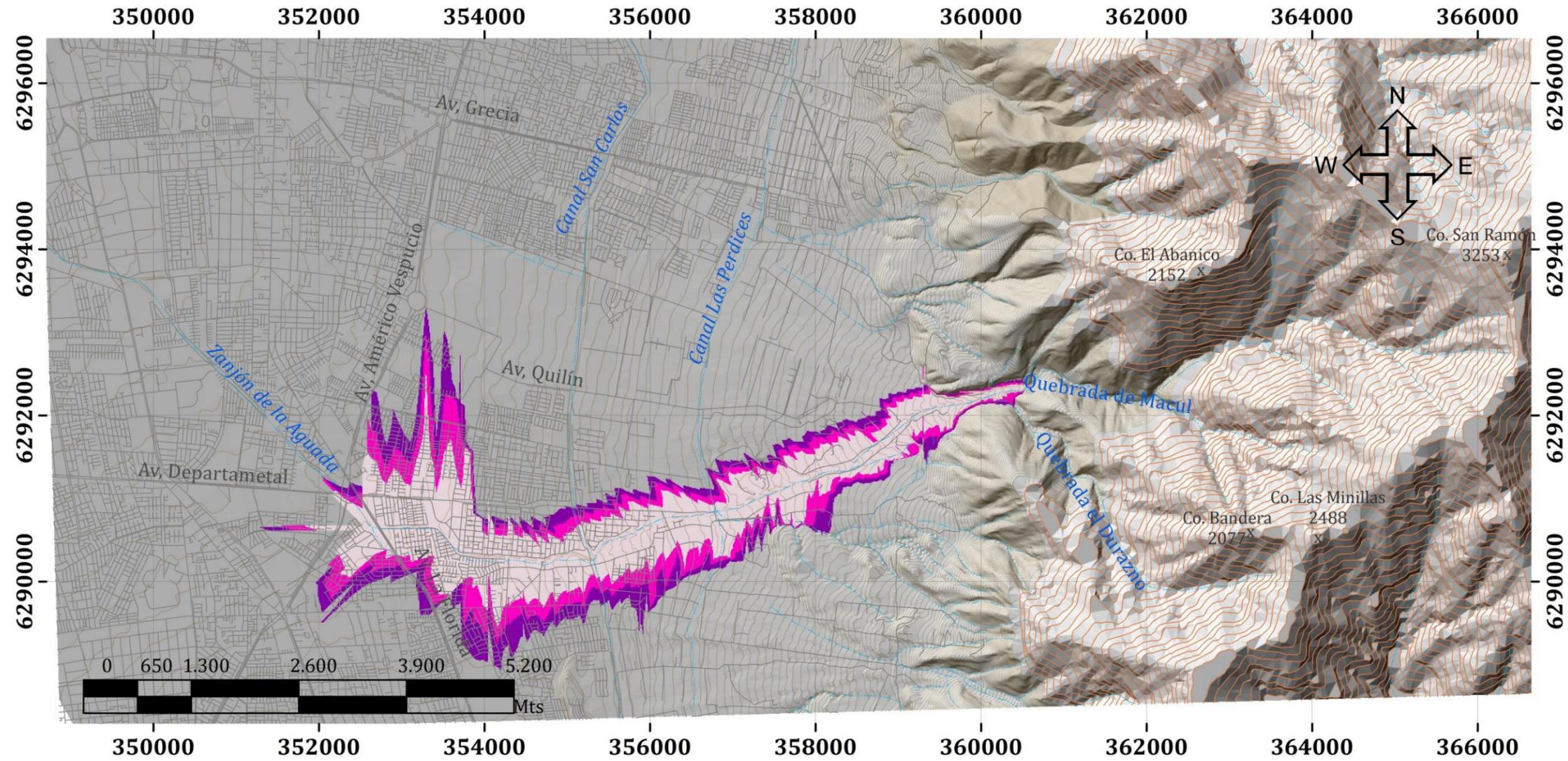


Leyenda

- | | | | |
|---|-----------------|--|--|
|  | Red de drenaje |  | Flujo V=4.584.009 m ³ / c1=0,03; c2=180 |
|  | Curvas IGM 5 m |  | Flujo V=4.584.009 m ³ / c1=0,06; c2=250 |
|  | Curvas IGM 50 m |  | Flujo V=4.584.009 m ³ / c1=0,10; c2=320 |
|  | Calles | | |

A.3.4 VOLUMEN = 5.841.527 m³

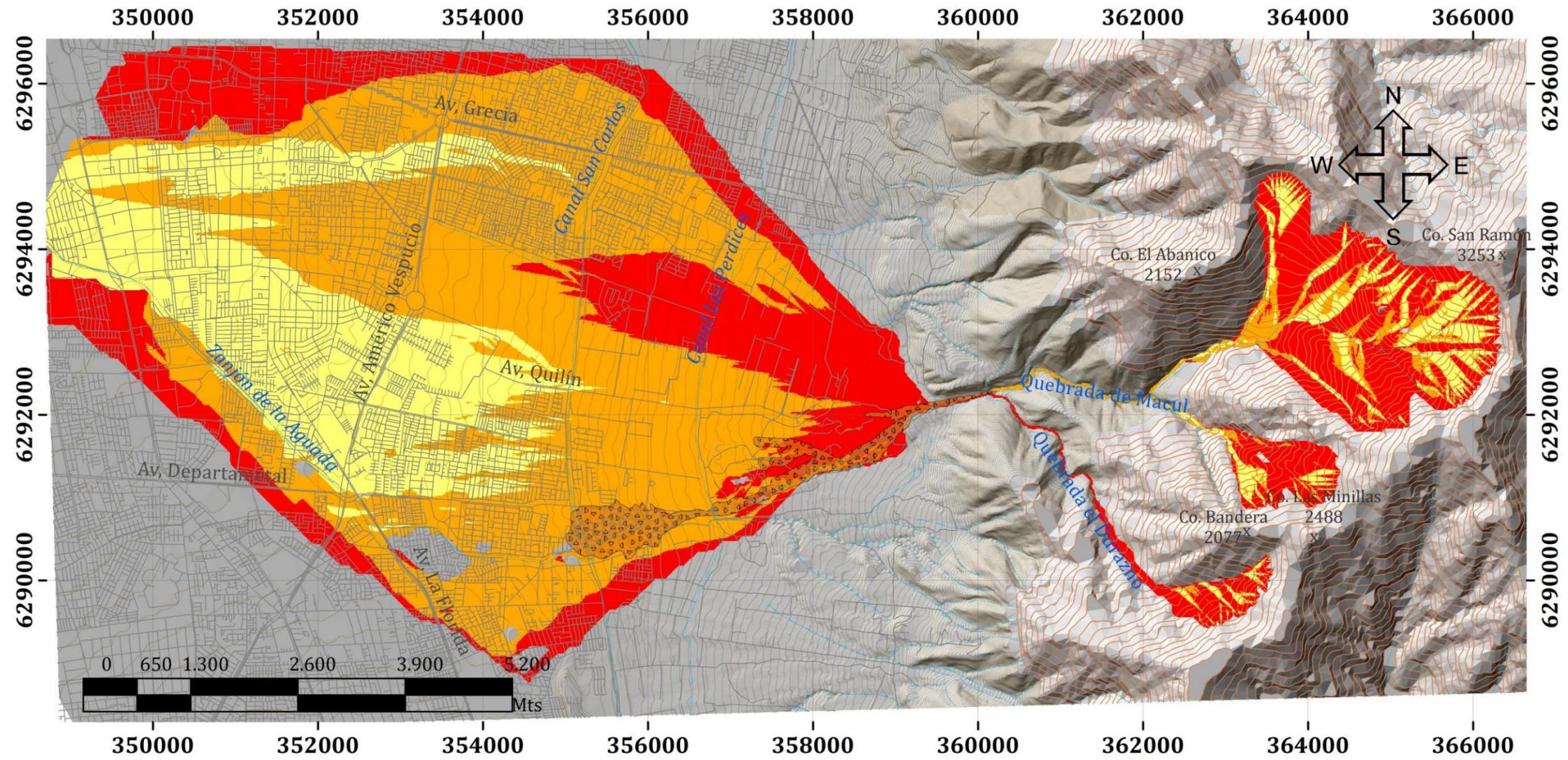
Modelo LAHARZ



Leyenda

- Curvas IGM 5 m
- Curvas IGM 50 m
- Red de drenaje
- Calles
- Flujo V=5.841.527 m³ / c1=0,03; c2=180
- Flujo V=5.841.527 m³ / c1=0,06; c2=250
- Flujo V=5.841.527 m³ / c1=0,10; c2=320

Modelo MSF

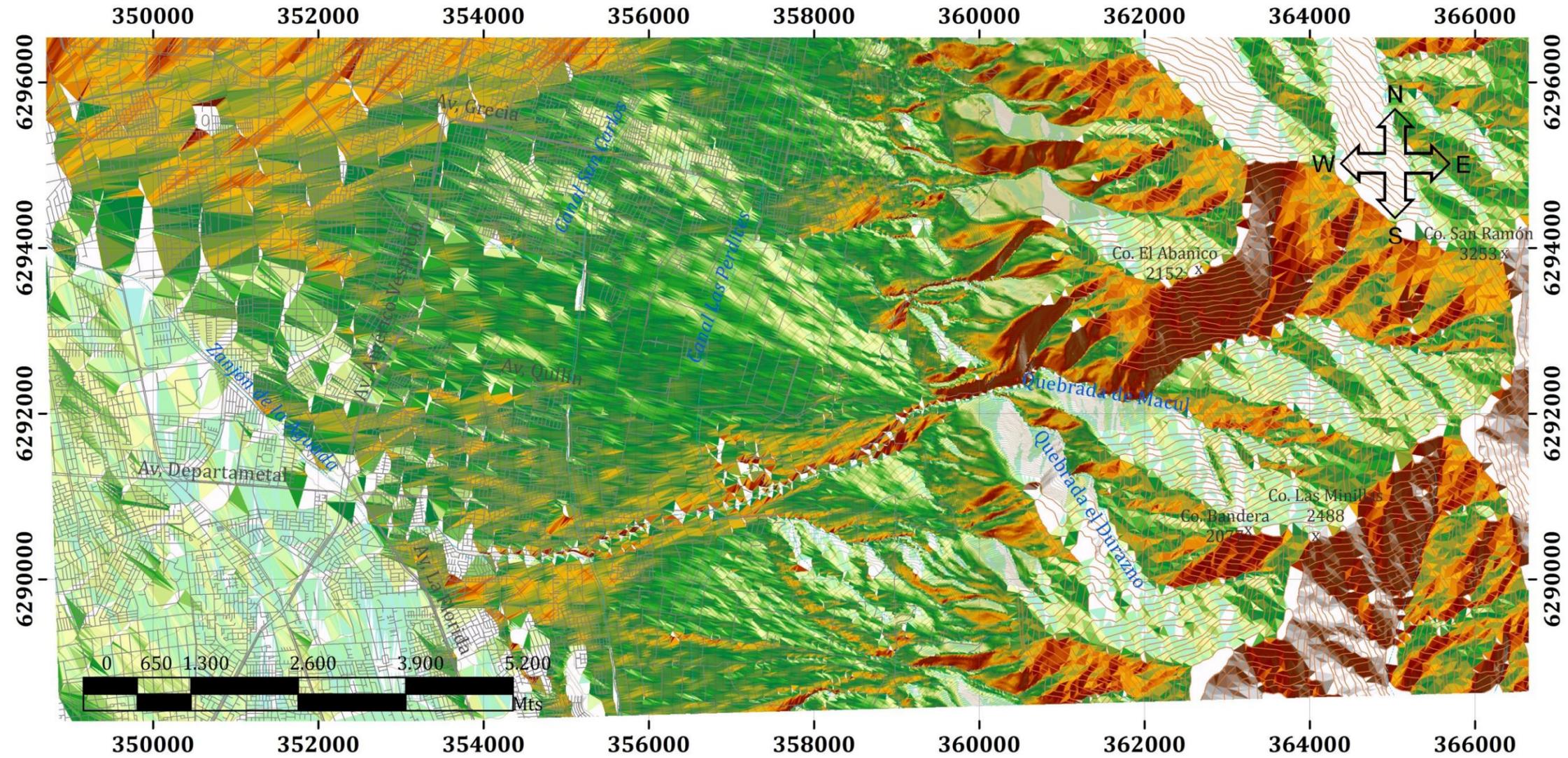


Leyenda

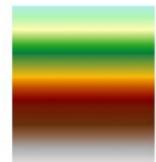
- | | | | | |
|---|-----------------|--|----------------------|---|
|  | Red de drenaje |  | Calles | Probabilidad de afectación

Baja Media Alta |
|  | Curvas IGM 5 m |  | Flujo 3 de Mayo 1993 | |
|  | Curvas IGM 50 m | | | |

Orientación Ladera

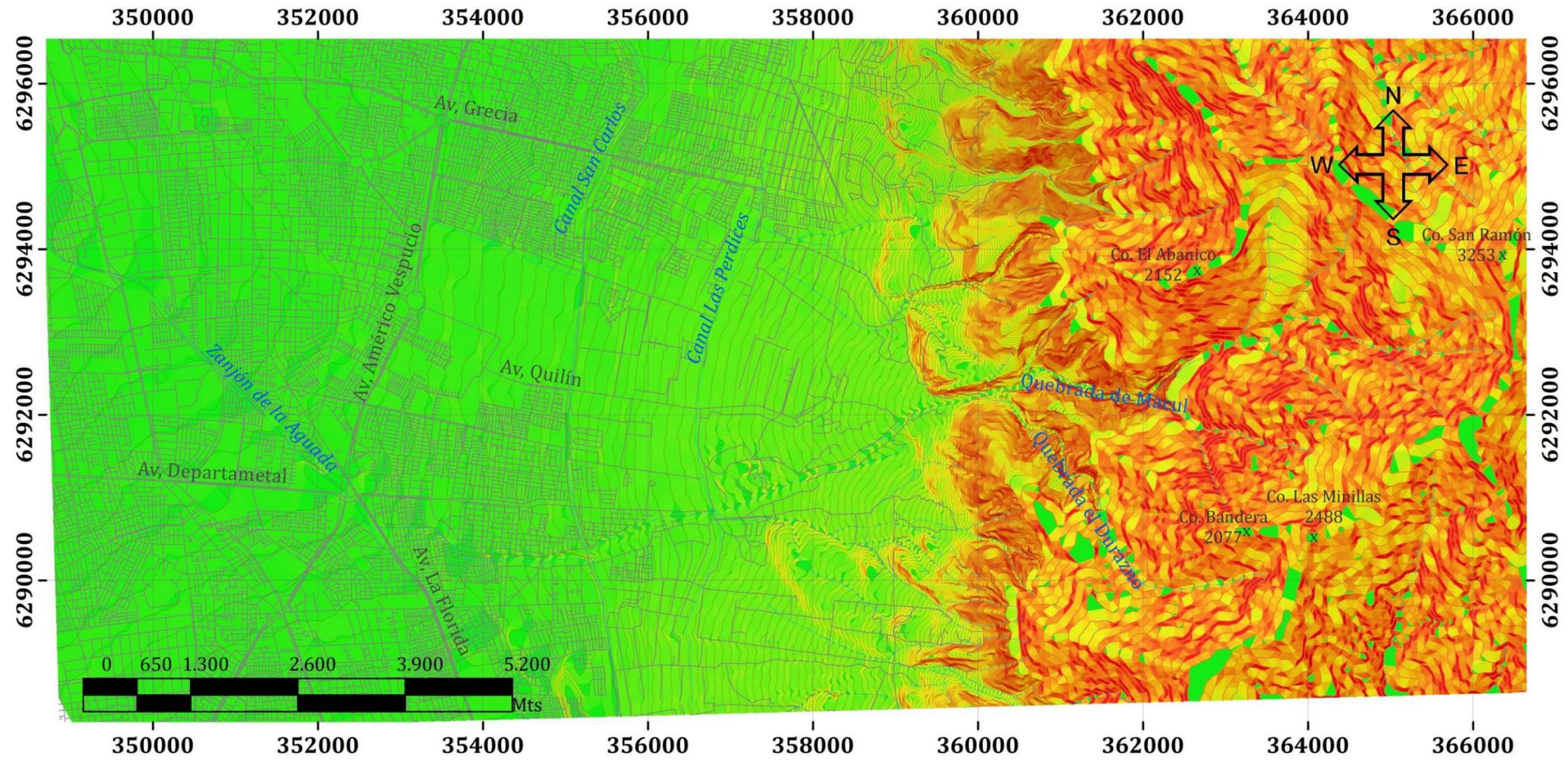


Leyenda

-  Red de drenaje
 -  Curvas IGM 5 m
 -  Curvas IGM 50 m
 -  Calles
- Orientación de ladera**
- 
- 360
0

A.6. PENDIENTES

Pendientes

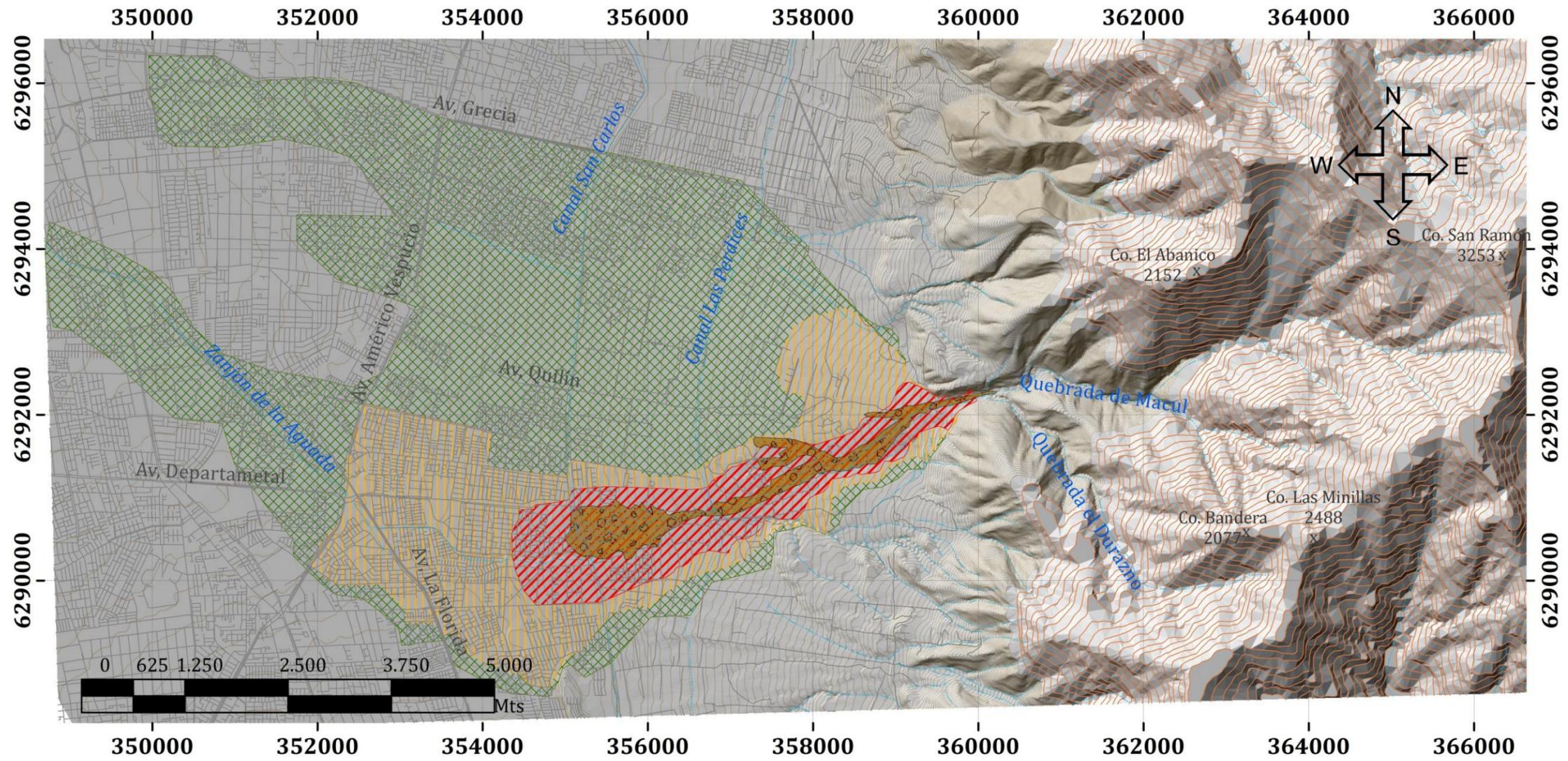


Leyenda

- | | | | |
|---|-----------------|--|-----------|
|  | Red de drenaje |  | Pendiente |
|  | Curvas IGM 5 m | | Alta: 78° |
|  | Curvas IGM 50 m | | Baja: 0 |
|  | Calles | | |

A.7. ALCANCE PELIGROS

Peligros



Leyenda

- | | | | |
|---|-----------------|--|----------------------|
|  | Red de drenaje |  | Peligro Alto |
|  | Calles |  | Peligro Medio |
|  | Curvas IGM 5 m |  | Peligro Bajo |
|  | Curvas IGM 50 m |  | Flujo 3 de Mayo 1993 |

