



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

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE FLUJOS DE DETRITOS EN QUEBRADAS
CARRIZALILLO Y DE MELÉNDEZ, COMUNA DE TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE
ATACAMA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

NATASCHA CAROLINA BUCAREY AICHELE

PROFESOR GUÍA:
MARISOL LARA CASTILLO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

POR: Natascha Carolina Bucarey Aichele

FECHA: Enero 2018

PROFESOR GUÍA: Marisol Lara Castillo

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE FLUJOS DE DETRITOS EN QUEBRADAS CARRIZALILLO Y DE MELÉNDEZ, COMUNA DE TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA

Las precipitaciones anómalas ocurridas a fines de marzo del 2015 en las regiones de Coquimbo, Atacama y Antofagasta desencadenaron eventos aluvionales con consecuencias catastróficas para la población residente en áreas urbanas. En Tierra Amarilla, la quebrada Carrizalillo aportó la mayor cantidad de material en la zona, llegando el flujo hasta el área urbana ubicada a más de 6km de la desembocadura de ésta. De menor longitud es la quebrada De Meléndez, que desemboca directamente al área urbana de la comuna. En este trabajo se estudian los factores condicionantes de generación de flujos de detritos y la caracterización geomorfológica de las cuencas hidrográficas mencionadas, y se aplica una metodología para evaluar la susceptibilidad de generación de flujos de detritos en las hoyas correspondientes a la quebrada Carrizalillo y De Meléndez.

La metodología aplicada se basa en una ponderación de factores condicionantes, tomando como base la de Lara (2007). Los factores condicionantes que se consideran son la geomorfología, la geología y geotecnia, el clima y la vegetación, la intervención antrópica y los antecedentes históricos de eventos aluvionales. El detalle y desglose de cada factor es modificado para adaptarlo al tipo de terreno que se está analizando, descartando algunos subfactores y agregando el de densidad de redes de drenaje. Adicional a la aplicación de la metodología se realiza una caracterización geomorfológica y geológica de ambas cuencas.

Los resultados indican medias a altas susceptibilidades de movilidad de material para la hoya de la quebrada Carrizalillo, con 53,35 km² de aporte de material de un total de 1.110,88 km². La quebrada De Meléndez posee una hoya con poca área aportante, y susceptibilidad media de generar flujos de detritos. Es importante considerar el alcance de cada hoya a zonas altas donde ocurre más precipitación.

A todos los afectados por los aluviones e inundaciones ocurridas el 2015, especialmente al pueblo de Tierra Amarilla, que ha vivido en la adversidad y ha sabido seguir adelante con fuerza y perseverancia. Para ellos, toda mi admiración.

Agradecimientos

Agradezco, en primer lugar, a mi profesora guía, Marisol Lara, por su excelente disposición en todo momento, paciencia y comprensión, en el desarrollo de esta memoria, y por confiar en que se lograría.

A Sofía Rebolledo, por haber sido una muy buena co-guía, y haber compartido sus enseñanzas y buena energía en terreno.

A Sergio Sepúlveda por haber sido un buen profesor durante mi paso por la carrera, y porque su trabajo de título sirvió de mucho sustento a esta memoria.

A mi familia, por haberme apoyado siempre, y haberlos sentido presentes a pesar de la lejanía física.

A mis amigos de geología y de la facultad de ingeniería, quienes hicieron mucho más llevadero y agradable mi paso por Beauchef.

A mis amigos de bachillerato y el colegio, a quienes mantengo hasta hoy y espero seguir con su amistad.

A los profesores de la facultad que inspiraron mi continuación en la carrera y en quienes noté más humanidad.

A los funcionarios del departamento de Geología, que ayudan a que todo avance, y siempre manteniendo un ambiente del cual me sentí parte.

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.2.	Área de estudio	2
1.3.	Objetivos.....	2
1.3.1.	General.....	2
1.3.2.	Específicos.....	3
1.4.	Metodología.....	3
2.	Marco Teórico	4
2.1.	Flujos de detritos.....	4
2.1.1.	Definición.....	4
2.1.2.	Factores condicionantes para la generación de flujos de detritos.....	5
2.1.3.	Factores desencadenantes de flujos de detritos	6
2.2.	Caracterización geomorfológica de cuencas.....	7
3.	Antecedentes Regionales.....	11
3.1.	Marco Geológico Regional.....	11
3.1.1.	Paleozoico.....	13
3.1.2.	Mesozoico.....	14
3.1.3.	Cenozoico.....	16
3.1.4.	Geología estructural.....	17
3.2.	Geomorfología regional del área de estudio.....	18
3.3.	Clima.....	20
3.4.	Hidrología e hidrogeología	21
3.5.	Antecedentes de remociones en masa.....	22
3.5.1.	Descripción del evento de marzo, 2015.....	23
4.	Análisis de susceptibilidad del área.....	29
4.1.	Metodología propuesta para analizar la susceptibilidad de generación de flujos de detritos.....	29
4.2.	Caracterización del área de estudio.....	31
4.2.1.	Geología local.....	31
4.2.2.	Material disponible para ser movilizado	37
4.2.3.	Pendientes.....	43
4.2.4.	Vegetación y clima.....	45
4.2.5.	Factor Antrópico.....	45
4.2.6.	Geomorfometría de las cuencas.....	45

4.3.	Evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos	51
4.3.1.	Carrizalillo	53
4.3.2.	De Meléndez.....	56
5.	Discusiones.....	59
5.1.	Con respecto a la metodología.....	59
5.2.	Con respecto a los resultados.....	60
5.3.	Con respecto a los parámetros morfométricos.....	60
5.4.	Recomendaciones	61
6.	Conclusiones.....	62
7.	Bibliografía.....	63
8.	Anexos.....	65
	ANEXO A: Tablas con los valores correspondientes a cada cuenca para el cálculo de la curva hipsométrica.....	65
	ANEXO B: datos para el cálculo de la densidad de drenaje en la cuenca de la quebrada Carrizalillo.....	66
	ANEXO C: Factores de susceptibilidad para cada polígono definido para cada cuenca, 68	

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Entre los días 24 y 26 de marzo de 2015 se registraron lluvias intensas en las regiones de Coquimbo, Atacama y Antofagasta, producto de un núcleo frío en altura, generando con ello eventos de flujos de detritos e inundaciones, que afectaron las zonas urbanas con grandes pérdidas de vida humana y económicas. Esto se manifestó en la comuna de Tierra Amarilla con la crecida del río Copiapó, y la generación de flujos de detritos y barro en quebradas tributarias a lo largo de toda la comuna, entre ellas, la quebrada Carrizalillo, Los Loros, San Antonio y Lautaro. Los mayores daños en cuanto a pérdidas en la comuna se dieron por la activación de la quebrada Carrizalillo, que se encuentra a 6,6 km aguas arriba por el río Copiapó de la ciudad de Tierra Amarilla y en la zona norte de la comuna homónima.

Desembocando directamente en la ciudad se ubica la quebrada De Meléndez, de menor longitud y área drenada que la Carrizalillo, la cual no se activó para el evento del 25M. A pesar de ello, podría considerarse una amenaza para la población residente en su desembocadura, si es que se llega a probar su capacidad para generar flujos de detritos y barro. Es por ello que se plantea en esta memoria realizar un estudio acabado de ambas quebradas para evaluar la susceptibilidad de generación de flujos de detritos.

La comuna de Tierra Amarilla se ubica principalmente en la cordillera Principal, y los límites urbanos de ésta están en la llanura fluvial del río Copiapó, la cual es una zona con alto riesgo de inundación y ocurrencia de aluviones (flujos de detritos y barro). La minería es la actividad económica preponderante, destacando Compañía Minera Ojos del Salado, Compañía Minera Candelaria, Minera Caserones y la Minera Aurex. También la agricultura es una actividad importante, y los abanicos aluviales son aprovechados como suelo de plantaciones, principalmente, de parras, muchas de las cuales se vieron afectadas por los flujos generados en el 25M. La ocupación habitacional de espacios cercanos a quebradas o flujos de agua extintos, ponen en riesgo a las familias que ahí residen, generalmente en “tomas” por los factores climáticos que puedan generar reavivamiento de cauces y de vías de escurrimiento de lodo y agua (PLADECO, 2014).

En el presente trabajo se realiza una evaluación de susceptibilidad de las quebradas mencionadas. La metodología a utilizar será adaptada la zona a partir de trabajos anteriores similares, especialmente sirviendo de guía el trabajo de título de Sergio Sepúlveda de 1998, “Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos...”, enfocado en la zona centro del país y la tesis de Magister de Marisol Lara de 2007, “Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la quebrada San Ramón...”.

Es de gran importancia que este tipo de trabajos se tomen en cuenta para prevenir tragedias y estar atentos a catástrofes de origen natural, que pudiesen ocurrir en la zona, generando conciencia en la población, a través de educación y planes de alerta temprana.

1.2. Área de estudio

El área de estudio corresponde a las subcuencas de las quebradas De Meléndez y Carrizalillo, en la comuna de Tierra Amarilla (Figura 1-1), ubicada en la III región de Atacama, en el límite sureste de la provincia de Copiapó. Sus límites geopolíticos son:

- Norte: con la comuna de Copiapó
- Sur: con Vallenar y Alto del Carmen
- Oriente: con Argentina
- Poniente: con las comunas de Copiapó y Vallenar.

Se accede a las subcuencas por el norte desde la ruta 5 que atraviesa Copiapó, hasta el camino C-35, que recorre la comuna De Tierra Amarilla por el valle del río Copiapó, donde se encuentra la desembocadura de ambas.



Figura 1-1: Ubicación de la zona de estudio. En rojo están delimitadas las cuencas de las Quebradas De Meléndez (Norte) y Carrizalillo (Sur). Se muestra el mapa base de la comuna (Fuente: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, BCN) con un cuadro que indica la ubicación de la fotografía aérea (Google Earth).

1.3. Objetivos

1.3.1. General

- Evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos en las quebradas Carrizalillo y De Meléndez.

1.3.2. Específicos

- Identificar, describir y analizar los factores geológicos, geomorfológicos y geotécnicos del área de estudio.
- Realizar una caracterización de elementos geomorfológicos de las quebradas en estudio.
- Adaptar y aplicar una metodología “semi-cuantitativa” para la evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos en quebradas Carrizalillo y de Meléndez.

1.4. Metodología

Para la realización de los objetivos señalados se han seguido los pasos que se detallan a continuación:

Revisión de antecedentes: Se consultó la bibliografía pertinente para recopilar información sobre la comuna, revisando cartas geológicas que abarcan la zona, informes de la DGA, y toda clase de estudios anteriores sobre el área de estudio, incluyendo observaciones de imágenes satelitales. Además, se recopiló información para establecer un marco teórico que abarcara lo relacionado con los flujos de detritos y la descripción geomorfológica de cuencas hidrológicas.

Trabajo de terreno: Se visitó la zona de Tierra Amarilla entre los días 18 y 19 de enero de 2016, luego de haber visitado otras áreas afectadas por el evento del 25M la semana anterior, entre el lunes 11 y el viernes 15 de enero de 2016. Se realizó un mapeo geomorfológico de ambas cuencas de estudio. Se recopiló información, a través de observaciones y fotografías, formulando interpretaciones preliminares. Se visitaron, además, otras quebradas afectadas por aluviones al sur de Tierra Amarilla.

Trabajo de gabinete: Consistió, principalmente, en la caracterización geológica y geomorfológica del área, en la formulación de la metodología para evaluar la susceptibilidad de generación de flujos de detritos en cuencas, y luego la aplicación de dicha metodología en las cuencas De Meléndez y Carrizalillo. A partir de ello, se realizó el análisis de la susceptibilidad de ambas cuencas, estudiándolas comparativamente. Finalmente, se elaboró el presente documento.

2. Marco Teórico

2.1. Flujos de detritos

2.1.1. Definición

Son flujos de material no consolidado, que contienen un alto porcentaje de fragmentos gruesos lo suficientemente saturados de agua como para fluir rápidamente a través de canales preexistentes (Varnes, 1978). El término flujo de barro corresponde a una subcategoría de flujos detríticos con menos de 50% de grava (Hauser, 2000). Comúnmente los flujos de detritos resultan de precipitaciones inusualmente intensas, o por derretimiento de nieve. Tienen alta densidad, entre 60 a 70% de sólidos, por lo que pueden llevar grandes elementos (ej. Automóviles). En Chile se les conoce como “aluviones”, y son propios de ambientes montañosos, donde predominan las pendientes altas y disponibilidad de material detrítico. Son muy rápidos (3 m/min) a extremadamente rápidos (5 m/s) según la escala de velocidad de Cruden y Varnes (1996) y su índice de plasticidad es $< 5\%$ de finos (Hung et al., 2001). Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender en el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos (Figura 2-1 y Figura 2-2).

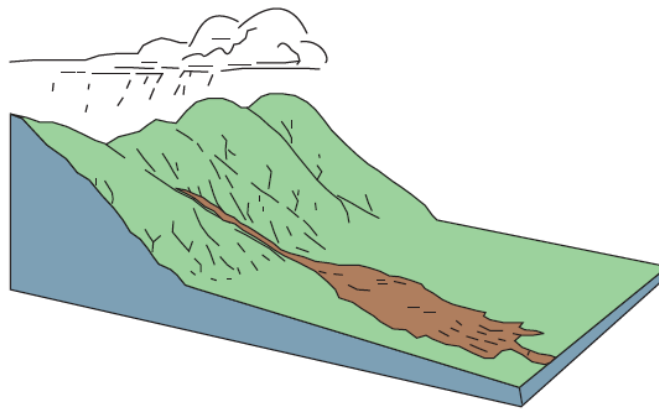


Figura 2-1: esquema de un flujo de detritos canalizado (Fuente: Landslide Handbook USGS).

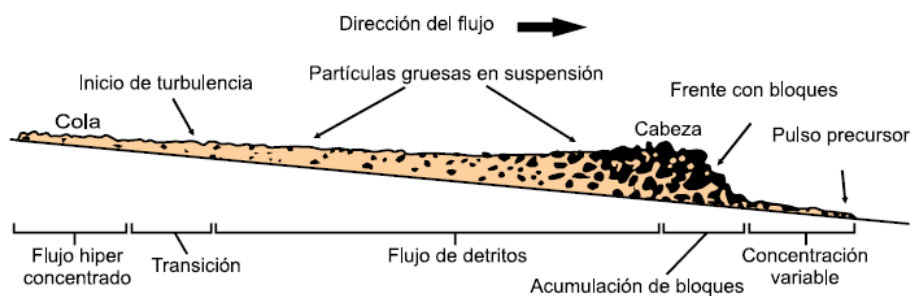


Figura 2-2: Corte esquemático típico de un flujo de detritos. Frente con bloques de un pulso del flujo de detritos (diagrama de Pierson, 1986. Fuente: “Movimientos en masa en la región andina”, 2007)

Los flujos de detritos usualmente se desplazan siguiendo canales preexistentes, si no, rápidamente forman en la ladera un canal abierto con forma de V en el extremo superior (Varnes, 1978). Una vez iniciado, tiene la capacidad de erosionar el canal, si es que son muy viscosos o de gran volumen, incorporando material del cauce.

2.1.2. Factores condicionantes para la generación de flujos de detritos.

Para generar un proceso de flujos de detritos deben estar presentes ciertos factores, que configuren una condición potencialmente inestable tal que al producirse una rápida incorporación de agua se genere la remoción de la masa de suelo (Sepúlveda, 1998). Estos son:

- **Relieve:** Pendientes más elevadas provocarán mayor inestabilidad gravitacional en las laderas aportantes al flujo. Pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las hoyas hidrográficas son favorables para el desarrollo de aluviones, aun cuando algunos pueden generarse sobre pendientes muy débiles que no sobrepasan los 15°. También influye la pendiente del perfil hidráulico en los cauces por los que se desplazaría el flujo sobre su velocidad y capacidad de mantenerse en movimiento (Sepúlveda, 1998).
- **Geología:** Es muy importante que exista material disponible para ser removido, lo cual es controlado por la meteorización *in situ* de las rocas existentes en la cuenca. Aparte del suelo presente en las laderas, también hay que considerar el material que ocupa el lecho de los cauces, que puede ser movilizado, o bien incorporado al flujo por erosión, incrementando la carga sólida. En general, los depósitos aluviales, coluviales, volcanoclasticos, glaciales y de escombros de falda son susceptibles a ser removidos (Sepúlveda, 1998), ya que son depósitos normalmente permeables que infiltran con facilidad, y que al superarse en exceso su capacidad de infiltración, el agua escurre con gran energía, produciéndose las remociones. También hay que considerar la presencia de fallas y/o fracturas que debiliten las rocas.
Se incluyen en este grupo depósitos de flujos de detritos antiguos, que pueden ser removilizados con facilidad. Los materiales de grano fino poseen una escasa capacidad de infiltración, lo que provoca también un escurrimiento rápido. La disgregabilidad de la roca es otro factor relevante, ya que es el generador del material detrítico, donde se consideran varios elementos de control: la litología, por un lado, influye en la resistencia a la deformación y a la meteorización. Hay materiales inherentemente débiles o que llegan a debilitarse por cambios en el contenido de agua u otros. En ese sentido, zonas con intensa alteración hidrotermal son altamente susceptibles a experimentar erosión (Sepúlveda, 1998).
- **Clima y vegetación:** Un clima árido a semiárido, como el de la región de Atacama, favorece la ocurrencia de flujos de detritos, pues las lluvias, aunque escasas, suelen ser intensas y de corta duración. A su vez, la escorrentía y erosión son mayores debido a la poca vegetación, que expone el suelo y la roca a los efectos meteóricos. Mayor vegetación ayuda a aumentar la capacidad de infiltración (Custodio y Llamas, 1996), y a su vez, protege al suelo de la erosión ambiental, lo cual dificulta la ocurrencia de flujos detríticos.
- **Morfología:** La superficie de la cuenca receptora, así como su forma, es importante para determinar el tiempo de concentración del agua, siendo éste mayor en cuencas alargadas que circulares (Garrido, 1987 en Sepúlveda, 1998).

- **Hidrología:** En el caso de los flujos, éstos en su gran mayoría se generan por saturación del material, lo cual al provocar un aumento en la presión de poros disminuye su resistencia efectiva. La identificación de zonas húmedas o saturadas es de gran importancia para la identificación de áreas críticas para la generación éstos. La posición del nivel freático y sus variaciones en este ámbito es importante, ya que al encontrarse a poca profundidad, mediante la incorporación de agua ya sea por lluvias o fusión de nieve, éste puede ascender rápidamente llegando a generar la saturación del material superficial. Asimismo, en suelos arenosos afectados por solicitaciones sísmicas, el nivel freático puede ascender hasta el punto de saturar el material, generando en el suelo un comportamiento del tipo fluido viscoso (licuefacción del suelo) producto de la vibración. Se debe tener en cuenta en el momento de evaluar este factor que la distribución de agua subterránea varía de acuerdo a la topografía y a la condición de meteorización de la roca madre (Lara, 2007). Aunque los flujos de detritos se asocian a un suelo saturado, el flujo puede ir incorporando líquido en el trayecto, generándose en un principio por la inestabilidad del suelo condicionada por la resistencia, el ángulo de fricción interna y el grado de saturación del suelo (Yoshida et al., 1991). Pueden existir movimientos de ladera complejos, que pueden derivar en un flujo de detritos o un flujo seco, dependiendo si hay o no incorporación de agua al material transportado (Varnes, 1978).
- **Factor Antrópico:** Desde el punto de vista de la hidrología, la urbanización tiene grandes efectos sobre el potencial de inundación de las cuencas, debido a que incrementan las zonas impermeables, reduciendo la capacidad de infiltración, y además, debido a los cambios en la eficiencia hidráulica asociados a canales artificiales, cunetas y sistemas de recolección de drenaje de tormentas, los que aumentan la velocidad del flujo y la magnitud de los picos de creciente (Chow Ven Te, 1994). A ello hay que sumarle obstáculos en las redes de drenaje, o material de desecho que pueda incorporarse al flujo, provenientes de los centros urbanos, y obras de minería o ingeniería. Plantaciones en abanicos aluviales son recurrentes en la zona de estudio, lo que favorece la infiltración de las aguas lluvia, e impidiendo la movilización de ese material.

2.1.3. Factores desencadenantes de flujos de detritos

Corresponden a los factores que resultan en el inicio y movilización de material saturado. El principal agente desencadenante de los flujos corresponde al agua, ya que su incorporación induce una pérdida de resistencia en los materiales comprometidos. La gran mayoría de los flujos, independientemente de su naturaleza, se asocian, en su etapa inicial, a deslizamientos y/o desprendimientos activados en períodos lluviosos (Hauser, 2000). La gran mayoría de los flujos asociados a regolitos graníticos se originan en respuesta a lluvias de gran intensidad. Inicialmente se expresan como deslizamientos multirrotacionales, pero posteriores licuefacciones espontáneas, ligadas a la incorporación de mayor cantidad de agua, desencadenan los flujos. Estos se relacionan con un incremento en la presión de poro, descenso en la resistencia al corte y aumento en el peso del material granular suelto (Hauser 2000).

En superficies impermeables de áreas urbanas y superficies naturales con capas delgadas de suelo y baja capacidad de infiltración, como tierras semiáridas y áridas, escurre superficialmente parte de la lluvia que no fue absorbida por el suelo; mientras que en regiones

húmedas, el flujo subsuperficial se convierte en el mecanismo primordial del transporte de agua lluvia hacia las corrientes. Cuando este se ve sobrepasado se produce un flujo superficial de saturación (Chow Ven Te, 1994).

Otro mecanismo de generación, en el cual no se centrará este trabajo, y que incide menos es la sismicidad, la cual genera fuerzas adicionales a las fuerzas estáticas, produciendo un cambio temporal en el campo de esfuerzo de la ladera, afectando así esfuerzos normales y de corte, pudiendo gatillar la inestabilidad temporal de un talud, derivando ello en remociones de suelo o roca sobre suelos saturados o con nieve, lo que produce la fluidización o licuefacción de éstos (Sepúlveda, 1998)

2.2. Caracterización geomorfológica de cuencas

Debido a que la mayoría de los paisajes terrestres son drenados por ríos, las cuencas de drenaje son una unidad fundamental del análisis geomorfológico (Bloom *et al.*, 1998). Las cuencas de drenaje representan la unidad básica para estudiar los procesos de transferencia de materia, debido a la directa relación que existe con los elementos que la componen como con las características morfométricas de la cuenca. La morfometría de cuencas es el resultado de los procesos de transferencia de materia que han ocurrido en el pasado. Cabe destacar que los territorios drenados por canales o afluentes que desembocan en el curso principal de una cuenca son conocidos como subcuencas.

La delimitación física de la cuenca como superficie de drenaje natural se basa en identificar la línea divisoria de aguas, que es una línea curva cerrada que se inicia y llega al punto de captación o salida mediante la unión de todos los puntos altos e interceptando en forma perpendicular a todas las curvas de nivel que representan el relieve en las cartas topográficas (Figura 2-3). La longitud total de la línea divisoria es el **perímetro** de la cuenca y la superficie que encierra dicha curva es el **área** proyectada de la cuenca sobre un plano horizontal (SUBDERE, 2013).



Figura 2-3: Cuenca como sistema hidrológico (Chow Ven Te, 1994)

La morfometría de cuencas de drenaje ha reunido un conjunto numeroso de parámetros que representan propiedades inherentes al sistema fluvial, y que permiten realizar tratamientos estadísticos o matemáticos. Ya se definieron el área y el perímetro, otros de ellos son:

- **Relieve**

Corresponde a la diferencia entre la elevación máxima y la elevación mínima de la cuenca (Hugget, 2007)

$$R = \text{Elevación Máx.} - \text{Elevación Mín.} \quad (1)$$

- **Pendiente media de la cuenca**

Se calcula como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca (Bloom *et al.*, 1998). Puede ser obtenida directamente a través de herramientas morfométricas de softwares. Es un índice de la velocidad media de la escorrentía y, por lo tanto, de su poder de arrastre o poder erosivo. Conforme se incrementa el valor de la pendiente media, mayor será la posibilidad de generar crecidas, ya que la capacidad de arrastre de sedimentos y la velocidad del caudal en caso de tormentas se incrementa en aquellas cuencas que presenten valores altos de pendientes.

- **Densidad de drenaje**

Permite cuantificar el grado de desarrollo de la red hidrográfica. Se define como la relación entre la longitud total de los cauces de una cuenca y el área de esta (Hugget, 2007).

$$D_d = \sum L / A \quad (2)$$

Donde D_d es la densidad de drenaje (en km/km^2), $\sum L$ es la longitud total de cauces (en km) y A es el área total de la cuenca (en km^2).

Si se considera un tiempo dado, los factores que controlan la densidad de drenaje son: (1) litología del sustrato, (2) permeabilidad del suelo y capacidad de infiltración y (3) cobertura vegetal y tipo de la misma. Las mayores densidades de drenaje se encuentran en rocas blandas de baja permeabilidad y en regiones con escasa cobertura vegetal.

Los valores que permiten interpretar la densidad de drenaje, según Delgadillo y Páez (2008), se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Valores interpretativos de la densidad de drenaje (Delgadillo y Páez, 2008).

Densidad de drenaje (km/km^2)	Categoría
<1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
>3	Muy alta

- **Índice de Gravelius (IGRAV)**

También denominado coeficiente de compacidad, es un coeficiente adimensional entre el perímetro de la subcuenca y el perímetro de un círculo de área igual a la de la subcuenca. Este valor siempre es mayor que la unidad y valores cercanos a la unidad de este índice indican subcuencas con formas similares a un círculo (Bloom *et al.*, 1998).

$$I_{GRAV} = 0.28 \frac{PERIMETRO}{\sqrt{AREA}} \quad (3)$$

- **Curvas hipsométricas**

La curva hipsométrica (relación superficie-altura) de una cuenca de drenaje describe la distribución del área de sección transversal de una cuenca de drenaje con una elevación particular (Figura 2-4). Estas curvas se han utilizado para inferir la fase de desarrollo de la red de drenaje y, además, se consideran una poderosa herramienta para diferenciar entre zonas tectónicamente activas e inactivas (Keller y Pinter, 1996).

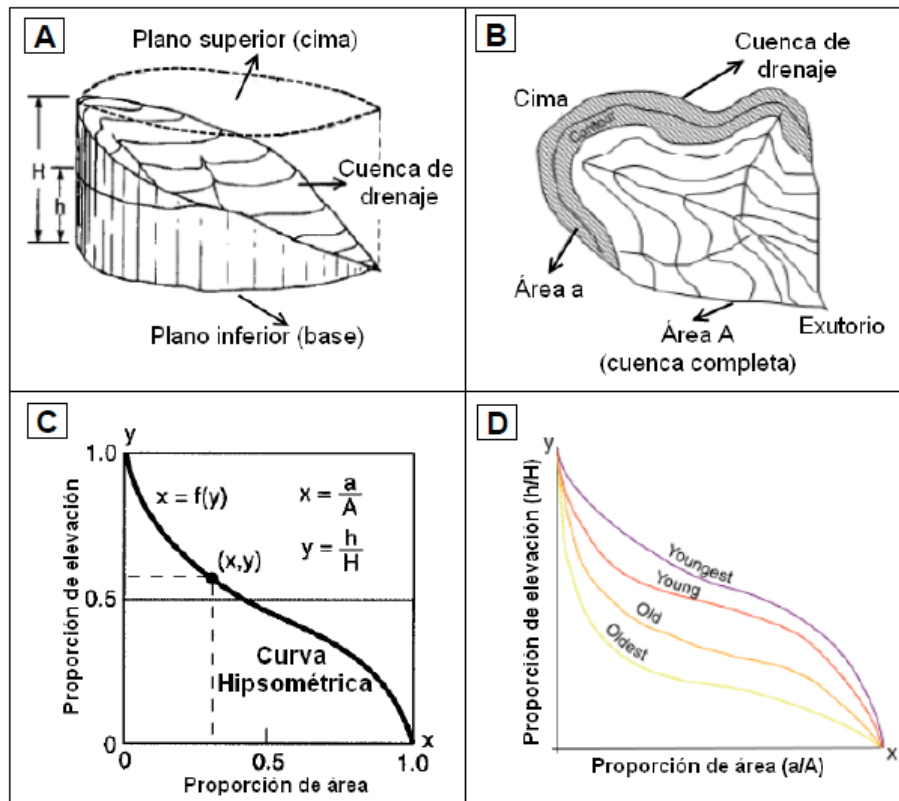


Figura 2-4: Componentes de un análisis hipsométrico (Strahler, 1952). A y B son diagramas que muestran de dónde derivan los parámetros adimensionales usados en los análisis, desde una perspectiva transversal (A) y en planta (B). C. Ploteo de los parámetros para generar la curva hipsométrica. D. Edades del relieve asociadas a las formas y valores obtenidos para cada curva hipsométrica.

La curva hipsométrica se crea mediante el trazado de la proporción de la altura total de la cuenca versus la proporción de la superficie total de la cuenca (C). Los términos propuestos por Davis (1899) para las diferentes etapas del relieve (juvenil, maduro y senil) son asociados a las formas y valores obtenidos para cada curva hipsométrica (D): (1) curvas convexas representan un estado joven ligeramente erosionado; (2) curvas sigmoidales, un estado maduro moderadamente erosionado; y (3) curvas cóncavas, un estado senil altamente erosionado. El área debajo de la curva hipsométrica se conoce como la **integral hipsométrica** (IH), que varía de 0 a 1 o, en términos porcentuales, de 0 a 100%. Se supone que la superficie total del gráfico corresponde al volumen total de roca antes del comienzo de la erosión, mientras que el área bajo la curva representaría el volumen de roca que permanece sin ser erosionado; del mismo modo, el área sobre la curva, denominada integral erosiva, representa el volumen de roca excavado por la erosión. Entonces, se tienen valores cercanos a 0% en las regiones altamente erosionadas y valores cercanos a 100% en regiones ligeramente erosionadas.

La forma de las curvas hipsométricas y los valores de IH proporcionan valiosa información no solo acerca de la etapa de erosión de la cuenca, sino que también sobre los factores tectónicos, climáticos, y litológicos que controlan la evolución del paisaje (Strahler, 1957).

- **Jerarquización de la red de drenaje superficial**

Strahler (1952, 1957), revisó y perfeccionó el esquema de Horton (1945) dando lugar al esquema de clasificación de Horton-Strahler, hoy en día el más utilizado en hidrología. Las redes de drenaje pueden ser modeladas o representadas como árboles, los cuales están conformados por un conjunto de nodos conectados unos a otros por segmentos de recta de manera que cada nodo tiene solo una ruta hacia la salida. Según Strahler una corriente puede tener uno o más segmentos. Un canal es una unión arbitraria de segmentos (ejemplo: canal principal). Entonces, para jerarquizar una red de drenaje se asignan valores numéricos a los órdenes de la siguiente manera (Ver Figura 2-5):

- A los cursos que son las nacientes de la red se les asigna el valor 1.
- La conjunción de dos cauces de orden 1, implica que la red de drenaje aumenta de magnitud por lo que a partir del lugar de confluencia se le asigna el valor 2.
- El lugar de encuentro entre dos cauces de orden 2 implica que la magnitud de la red de drenaje vuelve a ascender por lo que el valor numérico correspondiente a partir de allí es 3.
- Así se procede sucesivamente hasta finalizar con la jerarquización de la red de drenaje. El curso de agua cuyo cauce alcanza la máxima magnitud dentro del área ocupada por la cuenca, es el río principal.

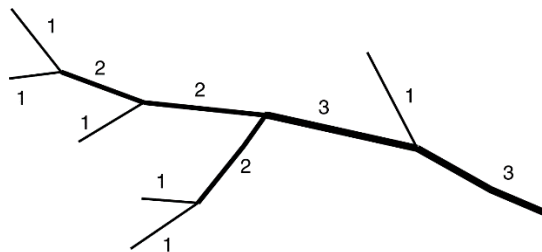


Figura 2-5: Jerarquización de una red hidrográfica según el criterio de Strahler (1957)

3. Antecedentes Regionales

3.1. Marco Geológico Regional

La geología de la comuna de Tierra Amarilla se encuentra estudiada en 3 cartas geológicas de escala 1:100.000, que abarcan el norte de ésta hasta el embalse Lautaro, y son la Carta Copiapó (Arévalo, 2005), Carta Los Loros (Arévalo, 2005) y la Hoja La Guardia (Iriarte et al., 1999). Para el resto de la comuna existe información contenida en el Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 elaborado por Sernageomin (Figura 3-1). Para tener una visión general, se muestra el mapa 1:1.000.000 junto a un resumen de las unidades que afloran en la zona. A continuación de esto, se recopilan las descripciones de las unidades estratificadas e intrusivas ordenadas según era y período geológico, a partir de las cartas 1:100.000.

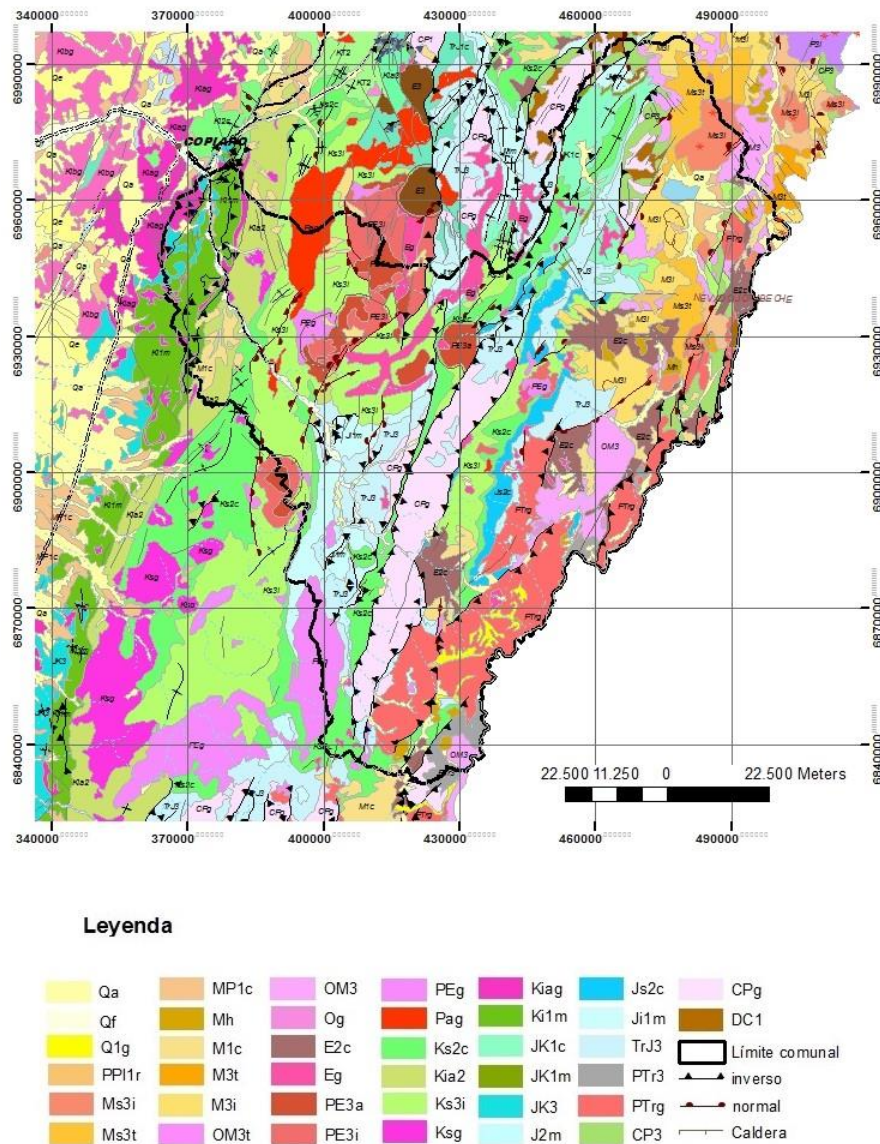


Figura 3-1: Mapa Geológico 1:1.000.000 del área de estudio. Fuente de datos: SERNAGEOMIN

Leyenda 1:1.000.000:

DC1 Devónico-Carbonífero. Secuencias sedimentarias marinas, en parte transicionales: areniscas cuarzo-feldespáticas, lutitas micáceas, conglomerados. En la Precordillera.

CPg Carbonífero-Pérmico. Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: Batolitos compuestos, 'stocks' y cuerpos hipabisales.

CP3 Carbonífero-Pérmico. Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas. Incluye cuerpos hipabisales riolíticos.

PTrg Pérmico-Triásico. Granitos hololeucocráticos, pórfidos graníticos y granodioritas de biotita. En la Cordillera Principal, regiones III y IV: Batolito Elqui-Limarí (Unidad Ingaguás)

PTr3 Pérmico-Triásico. Secuencias volcánicas continentales y complejos subvolcánicos: tobas, brechas, lavas y domos riolíticos y dacíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados. En la Cordillera Principal.

TrJ3 Triásico-Jurásico Inferior. Formación La Ternera. Secuencias volcánicas continentales y transicionales: lavas, domos, brechas, basálticos a riolíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados.

Ji1m Jurásico Inferior-Medio. Formación Lautaro. Secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma: calizas, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas; basaltos almohadillados.

Js2c Jurásico Medio-Superior. Formación Lagunillas. Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales: rocas epiclásticas, piroclásticas, y lavas andesíticas a riolíticas

J2m Jurásico. Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas y brechas, andesíticas y basálticas, calizas y areniscas marinas fosilíferas.

JK3 Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Formación Punta del Cobre. Secuencias volcánicas: lavas basálticas a riolíticas, domos, brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marinas.

JK1c Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y eólicas, en parte transicionales: areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados rojos.

JK1m Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas. En la Precordillera, región III: Formación Pedernales.

Ki1m Cretácico Inferior (Neocomiano) Grupo Chañarcillo. Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, calcarenitas, margas y coquinas

Kiag Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo. Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita.

Ks3i Cretácico Superior. Lavas, domos y brechas basálticos a dacíticos con intercalaciones piroclásticas y epiclásticas.

Kia2 Cretácico Inferior alt-Cretácico Superior bajo. Rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas

Ksg Cretácico Superior. Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda; pórfidos andesíticos y dioríticos

Ks2c Cretácico Superior. Formación Hornitos. Secuencias volcanosedimentarias continentales: rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas

Pag Paleoceno. Plutón Cabeza de vaca. Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y granitos de hornblenda y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos

PE3i Paleoceno-Eoceno Inferior Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y domos andesítico-basálticos a dacíticos, con intercalaciones de rocas piroclásticas y epiclásticas

PEg Paleoceno-Eoceno Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita, dioritas, gabros y pórfidos dacíticos y riolíticos

PE3a Paleoceno-Eoceno Inferior. Caldera Lomas Bayas. Secuencias y complejos volcánicos continentales ácidos

Eg Eoceno Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos

E2c Eoceno Brechas sedimentarias y volcánicas, areniscas e intercalaciones de tobas

Og Oligoceno Granodioritas, monzogranitos, tonalitas, dioritas de hornblenda y biotita; gabros

OM3 Oligoceno-Mioceno Secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos

OM3t Oligoceno-Mioceno Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso

M3i Mioceno Inferior-Medio Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas

M3t Mioceno Inferior-Medio Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso

M1c Mioceno Inferior-Medio. Gravas de Atacama. Secuencia sedimentaria de abanicos aluviales, pedimento o fluviales.

Mh Mioceno Pórfidos dacíticos, andesíticos, monzodioritas y dioritas de hornblenda, piroxeno y biotita

MP1c Mioceno Superior-Plioceno Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas.

Ms3i Mioceno Superior Centro volcánico Copiapó. Lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos

Ms3t Mioceno Superior Ignimbritas dacíticas a riolíticas

PP1r Plioceno-Pleistoceno Depósitos de remoción en masa: brechas polimícticas con matriz de arena/limo en proporción variable

Q1g Pleistoceno-Holoceno Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustres

Qa Pleistoceno-Holoceno Abanicos aluviales

Qf Pleistoceno-Holoceno Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación

3.1.1. Paleozoico

En la Hoja La Guardia (Iriarte, 1999) se describen granitoides del Paleozoico superior que constituyen el basamento. Aparecen en el bloque colgante de bloques limitados por fallas inversas, o bien, en el núcleo de pilares tectónicos. Están compuestos por un grupo heterogéneo de plutones de granitos hololeucocráticos (Plutón Pircas Coloradas), granitos de anfíbola (plutón Las Juntas), granodioritas (plutones Montosa, San Miguel), y tonalitas de biotita-hornblenda (Plutón La Estancilla). Su distribución es la siguiente:

Plutón La Estancilla (~270 Ma) aflora en el valle del río Jorquera, 8 km aguas arriba de Las Juntas.

Plutón Montosa (260 Ma?) se extiende entre las nacientes del río Manflas, por el sur, hasta el río Jorquera, por el norte.

Plutón Las Juntas (~265 Ma) aflora en la confluencia de los ríos Jorquera y Pulido, desde donde se extiende, hacia el norte, como una franja de 10 km de largo por 1 km de ancho.

Plutón Pircas Coloradas (~270 Ma) aflora en el extremo suroriental de la Hoja La Guardia, entre las quebradas Tronquitos de Plaza y el río Pircas Coloradas, desde donde se extiende hacia el norte y sur.

3.1.2. Mesozoico

3.1.2.1. Triásico

Formación La Ternera (Triásico Superior – Lías Inferior) es una secuencia volcánica de unos 200 m de espesor de basaltos, traquibasaltos y andesitas subordinadas, que afloran en ambos flancos del valle del río Copiapó, en el centro de la comuna (Arévalo, 2005). En la Hoja La Guardia se describe como sedimentaria y volcánica de hasta 1200 m de espesor (Iriarte et al., 1999). Se extiende hacia el sur del Tranque Lautaro, donde ocurre la confluencia de los ríos Manflas y Jorquera, y hacia el Oeste del valle del río Copiapó.

3.1.2.2. Jurásico

Formación Lagunillas (Jurásico) es una secuencia de aproximadamente 1.000 m de espesor, que incluye dos miembros: 1. Miembro inferior (Cocambico): conglomerados rojos y brechas conglomerádicas de grano fino a medio. 2. Miembro superior (Peñasco Largo): coladas andesíticas a andesítico-basálticas (Iriarte et al., 1999).

Formación Lautaro (Sinemuriano – Bajociano) es una secuencia marina calcárea arenosa que aflora a la altura del embalse Lautaro en ambos flancos del valle del río Copiapó. Aflora en 3 franjas discontinuas, de dirección NNE.

Estratos de Quebrada Vicuña (Jurásico Superior) es una secuencia de entre 50-100 m de lavas de color gris oscuro a violáceo, en coladas macizas.

Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior – Valanginiano Inferior) aflora en el extremo noroeste de la comuna de Tierra Amarilla, en las laderas de la quebrada Nantoco, y es una secuencia volcánica y sedimentaria, que se compone de (a) una sección basal de lavas andesíticas que a la altura de la quebrada Nantoco engrana, hacia el sur, con conglomerados, areniscas fosilíferas y areniscas con estratificación cruzada; y (b) una sección superior clástica y volcánica de brechas, lutitas laminadas rojas y coladas lenticulares de lavas andesítico basálticas (Arévalo, 2005).

Fomación Quebrada Monardes (Jurásico Superior – Cretácico Inferior) es una secuencia clástica, compuesta por 300 a 700 m de areniscas y conglomerados rojos continentales. Aflora en los valles de los ríos Figueroa y Jorquera y en la zona de La Guardia y Sierra de los Chilenos (Iriarte et al., 1999).

3.1.2.2.1. Cretácico

Inferior

Destaca el grupo Chañarcillo, que incluye rocas sedimentarias marinas representadas por las formaciones Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón. Además, se incluyen rocas intrusivas hipabisales de composición intermedia a básica (Carta Los Loros, Arévalo, 2005).

Formación Abundancia (Valanginiano Superior) es una secuencia de lutitas finamente laminadas ubicada al este de la mina Abundancia en la Carta Copiapó (Arévalo, 2005). La formación se expone en ambos flancos del río Copiapó y al oeste de la sierra El Bronce como una serie calcáreo-arenosa, bien estratificada.

Formación Nantoco (Hauteriviano) es una secuencia monótona de calizas grises de 800 a 1.200 m de espesor, dividida en dos miembros: el Miembro Inferior está formado por calcilutitas y calcilutitas limosas, el Miembro Superior, por calcilutitas negras finamente laminadas y calcarenitas amarillentas.

Formación Totalillo (Barremiano) es una secuencia de calcilutitas, de buena estratificación, y color de meteorización rojizo pálido a amarillento, con abundante contenido faunístico.

Formación Pabellón (Barremiano Superior – Aptiano) es una secuencia calcárea arenosa, en parte volcánica, que yace en concordancia sobre la Fm. Totalillo, y que aparece expuesta al norte y sur del pueblo homónimo, en el valle del río Copiapó.

Intrusivos hipabisales dioríticos porfídicos de clinopiroxeno y olivino (Cretácico Inferior alto) corresponden a intrusivos de composición intermedia a básica y geometría tabular. Intruyen de preferencia a las formaciones Totalillo y Pabellón.

Además afloran otros cuerpos intrusivos hacia el Noroeste de la comuna, tales como **Diorita La Brea (123 – 127 Ma)**, **Monzodiorita San Gregorio (ca. 111 Ma)** y **Granodiorita Los Lirios (ca. 110 Ma)**

Lavas Sierra La Dichosa (Cretácico Inferior) descrita en la Hoja La Guardia (Iriarte et al., 1999) como una secuencia volcánica formada por basaltos a traquibasaltos porfídicos con fenocristales de plagioclasa y piroxeno.

Medio

Formación Cerrillos (Albiano – Turoniano) es una secuencia sedimentaria, volcánica y continental constituida por areniscas bien estratificadas, paraconglomerados, brechas intercaladas con areniscas rojas y lavas andesiticobasálticas.

Superior

En la Carta Los Loros se incluye, de más viejo a más joven, intrusivos hipabisales dioríticos y dacíticos, rocas de la Formación Hornitos, intrusivos hipabisales microdioríticos y stocks dioríticos.

Formación Hornitos (85-65 Ma) es una secuencia sedimentaria y volcánica formada, en la base, por brechas y conglomerados verdosos con intercalaciones de paquetes lenticulares de areniscas rojas, fangolitas calcáreas amarillentas y calizas, y por niveles de tobas blanquecinas.

En la Hoja La Guardia este período está representado por rocas volcánicas, piroclásticas y sedimentarias, y presentan variaciones de facies y relaciones estratigráficas que indican la existencia, al momento de su depositación, de un complejo sistema de cuencas asociadas a sedimentación y volcanismo. Sus productos son los siguientes:

Formación Quebrada Seca (Cretácico Superior) es una secuencia sedimentaria y volcánica expuesta en la zona este de la Hoja. Presenta un Miembro Inferior compuesto por areniscas, conglomerados, brechas volcánicas, ignimbritas y lavas traquíticas, y un Miembro Superior, principalmente volcánico (lavas traquiandesíticas a andesítico-basálticas).

Pórfidos andesíticos de biotita (~68 Ma) son cuerpos intrusivos de pequeño volumen (<1 km²) que afloran en la zona suroriental de la Hoja, donde intruyen las formaciones La Ternera y Quebrada Seca.

Estratos de Sierra Los Leones (Cretácico Superior), hasta 500 m de brechas volcánicas, que afloran en la zona central de la Hoja La Guardia.

3.1.3. Cenozoico

3.1.3.1. Paleógeno

Paleoceno

Las unidades de este período incluyen facies continentales volcánicas y sedimentarias de relleno de caldera de colapso (calderas **Lomas Bayas y Cerro Blanco**) y rocas intrusivas del **Plutón Cabeza de Vaca** y del **stock Los Loros** (Carta Los Loros).

Plutón Cabeza de Vaca (63-59 Ma) es un intrusivo de 1-7 km de ancho, que está formado por un predominio de granodioritas de biotita y hornblenda de color gris claro y grano medio.

Stock Los Loros (ca. 64 Ma) es un cuerpo intrusivo tabular de 2 km de ancho promedio y elongado en sentido norte-sur por unos 11,5 km, que aflora en el valle del río Copiapó, 2 km aguas abajo del pueblo de Los Loros. Está formado por granodioritas.

Caldera Lomas Bayas y Cerro Blanco (62-53 Ma) consisten en dos centros volcánicos de forma subcircular de tamaño mediano (Caldera Lomas Bayas: 13 km de diámetro; Caldera Cerro Blanco: 8 km de diámetro), que se interpretan como calderas de colapso cuyos centros se emplazan al este y sur de la Carta Los Loros, respectivamente.

En la Hoja La Guardia afloran las siguientes unidades:

Estratos de Quebrada El Romero (Paleoceno Inferior), compuesto de 3 miembros: 1. Tobas soldadas riolíticas; 2. Lavas de composición variable; 3. Calizas lacustres.

Ignimbritas de Sierra La Peineta (65-60 Ma?) es una secuencia piroclástica que aflora al norte de la quebrada Carrizalillo, e incluyen, en la base, niveles delgados de toba caída, depósitos de oleada piroclástica y tobas de flujo de pómez. Hacia el techo se reconocen bancos macizos de tobas lítico-pumíceas soldadas con intercalaciones de lavas traquíticas.

Estratos de Pintadas-Esquivel (Paleoceno Inferior) es una secuencia volcánica que aflora en la cumbre de los cordones montañosos de Las Pintadas y Esquivel, al este del río Vizcachas del Pulido.

Domos del río Vizcachas de Pulido (65-60 Ma?) es un conjunto de intrusivos subvolcánicos dacíticos expuesto al oriente del río Vizcachas del Pulido, en la zona sudeste de la Hoja.

Calderas El Durazno Agua Nueva y Jorquera (62-55 Ma). Aquí se incluye, igualmente, la caldera Lomas Bayas, y son calderas de colapso subcirculares de pequeño diámetro, que se ubican en la zona central de la Hoja.

Filones-manto andesíticos de Quebrada Plaza (57-55 Ma) son intrusivos andesíticos afaníticos que intruyen la fm. Quebrada Seca en las cecanías del río Jorquera.

Eoceno

Stock La Presidenta (ca. 51 Ma) corresponde a un cuerpo intrusivo hipabisal de 48 km² de superficie de exposición, emplazado a lo largo del borde noroeste de la caldera Lomas Bayas.

En la Hoja La Guardia afloran los **Estratos de Río Nevado**, correspondiente a una secuencia sedimentaria clástica, compuesta por brechas conglomerádicas; además de una serie de intrusivos correspondientes al Plutón El Gato e intrusivos asociados, Stocks granodioríticos de Quebrada Vizcachas, Pórfidos monzoníticos y dioríticos, Pórfidos dioríticos de Sierra de los Chilenos y Pórfidos dacíticos. Además, para esta época, aflora la Caldera Bellavista.

3.1.3.2. *Neógeno*

Mioceno

Esta época se ve representada por las **Gravas de Atacama (Mioceno Medio)**, que son gravas polimícticas, mal a medianamente consolidadas, con niveles de cenizas intercaladas, que se reconocen como terrazas remanentes y que cubren unidades premiocenas en una amplia extensión, en la Precordillera de Atacama. En la carta Los Loros afloran estos depósitos en las laderas del río Copiapó a la altura del poblado Nantoco. También aflora en el área de la Hoja La Guardia en las cercanías de quebradas.

A finales de esta época e inicios del Plioceno afloran **Depósitos aluviales y coluviales antiguos**, que consisten en una serie de gravas y ripios mal consolidados, que constituyen conos aluviales individuales o coalescentes, depósitos coluviales y llanuras de inundación adosadas a zonas topográficamente altas.

3.1.3.3. *Cuaternario*

Dentro de los depósitos no consolidados de esta época se encuentran **depósitos de Remoción en Masa**, que yacen adosados a ambas laderas del río Copiapó, aguas arriba del poblado de San Antonio, **Depósitos Coluviales**, llenando quebradas cortas y formando taludes o “escombros de falda” de gran pendiente, **Depósitos Fluviales**, asociados directamente a la escorrentía superficial del río Copiapó y que forman el relleno principal del valle, y **Depósitos Aluviales**, que ocupan laderas de baja pendiente y rellenan quebradas, separándose en inactivos y activos.

3.1.4. Geología estructural

En la Carta Los Loros (Arévalo, 2005) se definen 2 dominios estructurales, siendo el dominio precordillera el que cubre la zona noroeste de Tierra Amarilla. En este dominio, las estructuras más antiguas están representadas por fallas normales de bajo y alto ángulo expuestas en el extremo norte. En el flanco este del valle del río Copiapó, aflora la

terminación sur de una falla frágil de bajo ángulo (**Despegue Punta del Cobre**), que en la carta Copiapó despega parcialmente la formación Nantoco de la subyacente formación Punta del Cobre y tiene un carácter extensional. Otra falla extensional está representada por la **Zona de Cizalle Ojancos-La Florida**, expuesta como una franja de rocas miloníticas, de manto moderado al sureste.

Fallas frágiles de alto ángulo y movimiento inverso, con componente sinistral, desplazan estratos de las formaciones Punta del Cobre y Nantoco, y retrabajan las milonitas de la Zona de Cizalle Ojancos-La Florida. Estas estructuras forman parte de la **Faja Plegada y Corrida de Paipote**, un sistema estructural de tipo flor positiva, enraizado en la **Falla Paipote**, que desplaza y deforma las secuencias del Cretácico Inferior a lo largo de la quebrada de Paipote y del valle del río Copiapó, y que genera un anticlinal de escala kilométrica conocido como **Anticlinorio de Tierra Amarilla**. El Despegue Cerrillos forma parte de esta familia de estructuras. En las proximidades del tranque Lautaro, una franja estrecha de fallas inversas de bajo ángulo y pliegues asimétricos volcados hacia el este, involucra rocas del Triásico, Jurásico y Cretácico Inferior (**Faja Plegada y Corrida de Lautaro**).

Los estratos de la Fm. Hornitos constituyen el relleno de una cuenca extensional (cuenca Hornitos), cuyo borde occidental está definido por una superficie de moderado a alto ángulo, la cual habría actuado como una falla de borde de la cuenca, activa al momento de la depositación (**Falla Elisa de Bordos**).

Una serie de fallas normales lítricas involucran principalmente el relleno de la cuenca Hornitos, mientras fallas inversas y pliegues anticlinales y sinclinales deforman estos depósitos.

Fallas normales subverticales, circunscritas a las calderas Cerro Blanco y Lomas Bayas, forman segmentos rectos discretos en torno a dichos aparatos volcánicos (Arévalo, 2005).

Fallas inversas de rumbo NNE de trazas kilométricas 40-100 km constituyen el rasgo estructural más distintivo de la Hoja La Guardia (Iriarte et al., 1999). La más occidental es la **falla La Ternera**, inversa, de vergencia oeste, de medio a bajo ángulo, y que representaría a una de las fallas mayores del **Sistema de Fallas de Domeyko**. Más al este, fallas inversas subparalelas de alto ángulo y vergencias opuestas (fallas Pauna-La Estancilla, La Iglesia, Vizcachas-La Guardia, Quebrada Aránguiz) alcanzan bloques de basamento Paleozoico y Triásico (Iriarte et al., 1999).

3.2. Geomorfología regional del área de estudio

Al observar el cauce del río Copiapó, cuenca a la que pertenece Tierra Amarilla, desde el punto de vista geomorfológico, existe una serie de elementos fisiográficos que se pueden identificar claramente; los grupos principales son: Cordillera de los Andes y Valles Transversales. Alejándose de la comuna hacia el oeste aparece la Cordillera de la Costa y Planicies Litorales (Figura 3-2).

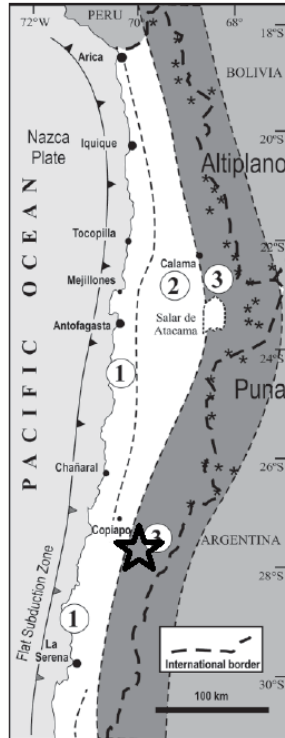


Figura 3-2: Figura: Estrella marca la ubicación del área de estudio en mapa que muestra las principales unidades morfoestructurales. 1) Zona Costera, 2) Depresión Central, 3) Cordillera Principal. También se indica una zona de subducción plana en las latitudes de interés (Imagen modificada de Geology of Chile, 2006).

La Cordillera de los Andes de Tierra Amarilla se presenta con grandes alturas, destacando el cerro Piuquenes (4.591 m.s.n.m.) en el sector alto de la subcuenca del río Manflas; cerro Cárdenas (4.280 m.s.n.m.) en el sector alto de la subcuenca del río Jorquera y cerro Estancilla (3.556 m.s.n.m.) perteneciente a la subcuenca del río Pulido. El sector precordillerano tiene alturas comprendidas entre los 3.000 y 4.500 metros, caracterizado por la continuación hacia el sur de la Cordillera de Domeyko, que presenta un conjunto de serranías en sentido transversal (DGA, 2004). Las alturas más elevadas se alcanzan llegando al límite con Argentina, destacando el cerro Jotabeche con 5.862 m.s.n.m.

Desde su nacimiento en la unión de los tributarios Jorquera, Pulido y río Manflas (28° latitud Sur), el río Copiapó a lo largo de sus 162 Km posee un curso general en sentido noroeste hasta su desembocadura en el mar (27° 17' latitud Sur). En sus primeros kilómetros hasta el sector de la localidad de Lautaro, su cauce presenta un escurrimiento de tipo recto y valle escarpado. La precordillera Andina en este sector presenta alturas comprendidas entre los 2.500 por el poniente a 2.700 m s.n.m. por el sector oriente, destacando el cerro Vizcacha con una altura de 2.744 m s.n.m.

Desde la localidad de Lautaro hasta el sector de Paipote el río sigue con escurrimiento recto, recorriendo sectores del valle central, con terrazas fluviales de mayor amplitud. Las elevaciones (cerros y lomajes) que se presentan en este sector del valle central, están comprendidas entre los 1.200 y 2.700 m s.n.m. por el oriente y entre los 900 y 2.300 m s.n.m. por el sector poniente.

Las quebradas en estudio desembocan en el río Copiapó y se ubican en la cordillera Principal. La hoya hidrográfica de la quebrada Carrizalillo tiene un área de 1110,88 km², y está limitada por el este por los cerros Cárdenas (4.280 msnm, cota máxima de la hoya), El Peñon (4.132 msnm), Cerro de El Gato (4.078 msnm) y Cerro San Miguelito (4.126 msnm). La hoya de la quebrada de Meléndez tiene un área de 55,79 km², con altitudes entre los 498,1 msnm y los 1721,75 msnm.

3.3. Clima

El clima de Tierra Amarilla, al igual que el resto de la Región de Atacama, es árido a semiárido, con escasas precipitaciones en los meses de invierno y presencia de desiertos. Influye la presencia del anticiclón del Pacífico, que es una alta presión que genera masas de aire en extremo secas y de gran estabilidad atmosférica. Sumado a esto, el fenómeno de la corriente fría de Humboldt genera flujos de aire provenientes del sur, que ayudan a la generación de neblinas que penetran hacia el continente aportando humedad, principalmente a los valles de Copiapó y de forma más débil a Tierra Amarilla.

La circulación de los vientos es oeste-este, en un intercambio de altas y bajas de presión local generadas por el calentamiento de las aguas del océano. Por las mañanas y hasta las seis de la tarde, la alta presión se localiza en el mar, el viento sopla desde el océano e ingresa por los valles en dirección a la cordillera donde se ubica la baja presión, por esta razón es normal la presencia de neblina y camanchaca. Luego los flujos de aire se invierten y bajan por los valles en dirección al mar.

Estas características atmosféricas, la sequedad general del ambiente desértico en combinación con la circulación de los vientos son un potencial componente en la contaminación del aire: la suspensión de partículas producto de la actividad minera (PLADECO, 2015).

En la comuna hay 2 subclimas:

- Clima desértico de interior: Se localiza en los relieves de las Pampas, y se caracteriza por las elevadas temperaturas durante el día, ausencia de nubosidad y precipitaciones.
- Clima desértico marginal de altura: Se localiza en la zona andino por sobre los 2.000 metros de altitud. Las precipitaciones son más abundantes, sobre los 250 mm anuales, y en las cumbres predominan las precipitaciones sólidas. La presencia de nieve en esta región permite el desarrollo de ríos de alimentación pluvionival, con cursos permanentes durante todo el año y de carácter exorréicos. Las temperaturas son bajas y la amplitud térmica entre el día y la noche es acentuada (DGA, 2004)

Se identifican claramente las estaciones secas y húmedas. El período seco, se manifiesta en los meses de agosto a mayo con precipitaciones medias mensuales que varían entre 0,1 a 3 mm y temperaturas de 16,6 a 21,4°C (febrero). El período húmedo, se presenta únicamente en los meses de junio y julio con precipitaciones medias mensuales de 6 mm (en ambos meses) y temperaturas de 15 y 15,7°C respectivamente (Figura 3-3).

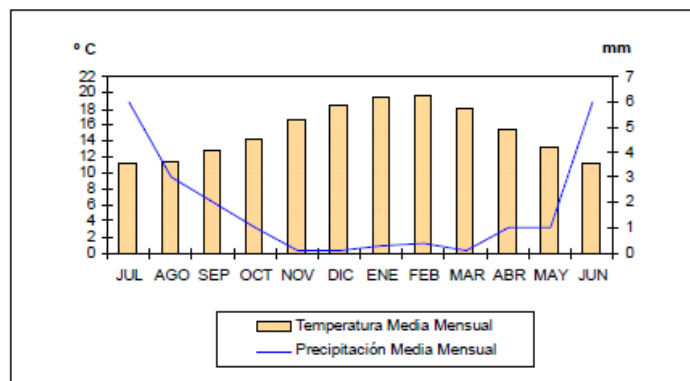


Figura 3-3: Diagrama climático ombrotérmico, sector Embalse Lautaro, río Copiapó (DGA, 2004)

En la Tabla 3-1 se muestra la precipitación media anual para cada una de las estaciones pluviométricas de la cuenca del río Copiapó.

Tabla 3-1: Alturas y precipitaciones medias para estaciones pluviométricas dentro de Tierra Amarilla (Fuente: DGA, 2010)

Estación Pluviométrica	Altura (m.s.n.m.)	Pp media (mm)
Elibor Campamento	745	2,36
Los Loros	950	2,8
Lautaro Embalse	1.110	2,84
Manflas Hacienda	1.410	3,71
Jorquera en La Guardia	1.800	3,81
Iglesia Colorada	1.950	4,26

3.4. Hidrología e hidrogeología

Tierra Amarilla pertenece a la cuenca del río Copiapó, específicamente al inicio de ésta, donde se ubican las subcuencas del río Manflas, río Pulido, Jorquera, y río Copiapó Medio (Figura 3-4). La cuenca abarca una superficie total de 18.400 km².

El río Copiapó se forma en La Junta, a partir de la confluencia del río Jorquera y el río Pulido. Unos kilómetros aguas abajo de La Junta se agrega el río Manflas. El río de mayor aporte es el Pulido pese a que su hoya es aproximadamente la mitad que la del Jorquera. Esto se debe a la existencia de ventisqueros en las cabeceras de los ríos Los Helados y Montosa, dos de los afluentes del Pulido (DGA, 2004). En cuanto a aportes, en la zona alta tiene como principal subcuenca aportante la del río Jorquera, cuya superficie alcanza aproximadamente 4.166 km². A ésta le sigue la subcuenca del río Pulido con alrededor de 2.033 km² y la subcuenca del río Manflas con una superficie de 1.213 km². En el tramo medio del río Copiapó, el afluente que presenta una mayor superficie de drenaje corresponde a la subcuenca quebrada del río Paipote, con una superficie de aproximadamente 6.689 km² y luego la subcuenca del río Copiapó medio que tiene una superficie de 2.943 km² aproximadamente. La superficie restante corresponde a la cuenca del río Copiapó bajo hasta su desembocadura en el mar.

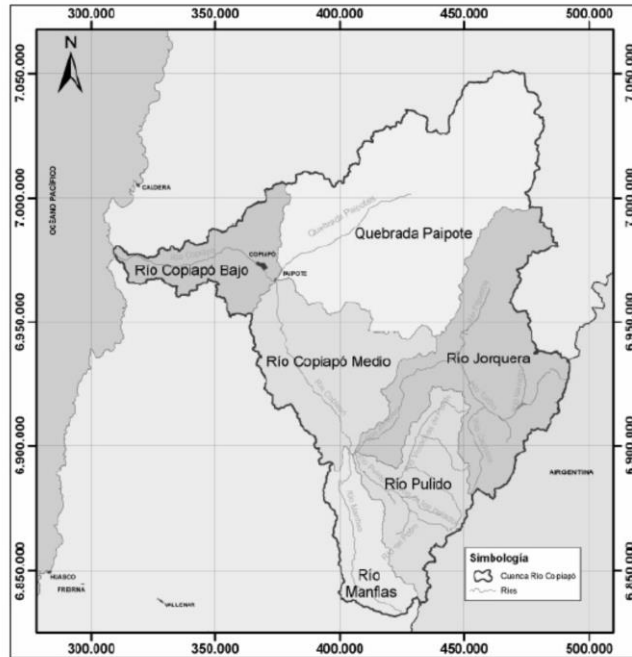


Figura 3-4: Cuenca y subcuencas del río Copiapó. Fuente: DGA, 2009

En el valle de Copiapó existen depósitos aluviales antiguos y recientes. Los primeros están compuestos por una mezcla de bloques y rodados de distintos tamaños con una matriz de limo o cementada por arcilla, arena y grava. El relleno actual está formado por materiales mal gradados y seleccionados, con granulometría variable desde arcillas hasta grandes bloques, y con preponderancia de los materiales finos hacia el oeste. El relleno reciente presenta acuíferos lenticulares que normalmente no sobrepasan los 10 m de espesor, con anchos no mayores a 50 m, que se encontrarían dentro de los primeros 50-70 m de profundidad (DGA, 1986).

La cuenca hidrográfica del río Copiapó, se extiende desde la latitud $26^{\circ}43'$ por el norte, hasta la latitud $28^{\circ}34'$ por el sur. En el sector alto, destaca la existencia de permeabilidad muy baja debido a la existencia de rocas volcánicas, sedimentario – volcánicas y plutónicas e hipabisales. Destacan, además, claramente dos tipos de escurrimientos: uno en dirección SSW que corre paralelo a la quebrada de Paipote por un lecho de rocas del período terciario sedimentario volcánico y cretácico mixto sedimentario y volcánico de muy baja permeabilidad hasta su confluencia con el río Copiapó. El otro acuífero se origina de la confluencia de las aguas subterráneas desde los ríos Manflas a Jorquera que se unen en el sector de Embalse Lautaro. El lecho por el cual escurre las aguas subterráneas son principalmente de rocas plutónicas del paleozoico plutónico y jurásicas sedimentario – volcánicas. A partir del sector Embalse Lautaro, escurre paralelo al río Copiapó en dirección NNW hasta la altura de Copiapó con profundidades freáticas que varían de los 53 a 11 m (Copiapó). Esta zona se destaca por tener un intenso uso para riego (DGA, 2004).

3.5. Antecedentes de remociones en masa

Segestrom (1964) identificó y caracterizó una serie de fenómenos de remoción en masa en la zona andina de la provincia de Copiapó. Allí, los flujos de barro adoptan morfologías, tanto

de conos, en torno al punto donde quebradas de escurrimiento efímero descargan llanos aluvionales, como de verdaderos mantos continuos suprayacentes a segmentos de terrazas fluvio-aluvionales. Unos y otros se asocian, genéticamente, a tormentas que provocan precipitaciones de gran intensidad en zonas de relieve abrupto, desprovistas de cobertura vegetal y/o suelos, conformadas por rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas, generalmente afectadas por importante alteración y/o fracturamiento superficial. Flujos del tipo cono fueron descritos en las quebradas Cerrillos y Paipote, en el extremo sur de la Laguna del Negro Francisco y ladera norte del cerro Bramador. Además, flujos laminares se han detectado en sectores de Quebrada Paipote y en torno al tranque Lautaro, en el valle del río Copiapó (Hauser, 2000).

El 18 de junio de 1991 la lluvia caída en Caldera fue de 39,4 mm en 24 horas; en Copiapó de 31,7 mm y en Chañaral 41,4 mm, según Hauser (1997), a partir de datos de la Dirección Meteorológica de Chile. El mismo autor indica que estos eventos de lluvias intensas, provocaron crecidas y desbordes de los ríos Copiapó y Huasco, causando inundaciones en las calles y viviendas de las ciudades de Copiapó, Vallenar y Huasco. Existen también registros de cortes de caminos y de las líneas férreas ocurridas por activación de las quebradas y generación de flujos con alto contenido de carga sólida (Castro et al., 2010).

Precipitaciones de inusual intensidad, vinculadas al fenómeno de El Niño y ocurridas en diversas partes del territorio chileno, durante la estación invernal de 1997, activaron voluminosos, enérgicos y destructivos flujos de barro y detritos. Adquirieron particular severidad en las regiones III, IV y Metropolitana. En la ciudad de Copiapó, flujos detríticos activados por lluvias con montos de 64 mm/24 horas, ocurridas el día 12 de junio de ese año, provocaron severos daños en diversos sectores de su zona urbana. Los flujos se originaron en el flanco de una cadena rocosa de cerros que participa del flanco norte del casco urbano, los daños se concentraron en torno a segmentos donde los cauces de las quebradas de descarga estaban irracionalmente ocupadas por viviendas. La inmediata construcción de una serie de estructuras de mitigación, decantadores, dispuestos en torno a la parte alta de algunos cauces de descarga, actuaron efectivamente para minimizar y/o controlar la energía destructiva de flujos detríticos, ocurridos el día 17 de agosto de 1997, en respuesta a una precipitación de 60,6 mm/24 horas. (Hauser, 2000)

3.5.1. Descripción del evento de marzo, 2015

Entre los días martes 24 y jueves 26 de marzo del 2015 ocurrió un evento hidrometeorológico que afectó las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo con la ocurrencia de aluviones e inundaciones. Esto fue producto de un núcleo frío en altura alimentado por importantes cantidades de humedad provenientes del norte, en conjunto a condiciones de temperatura altas propias del verano de la zona, desatando precipitaciones anormales. La catástrofe causó, en total, el deceso de 31 personas informadas por el Servicio Médico Legal, 16 desaparecidas y 16.588 damnificados (Fuente: <http://www.onemi.cl/alerta/monitoreo-por-evento-hidrometeorologico/>).

En un informe elaborado por el SERNAGEOMIN en mayo de 2015, se incluyó el análisis de 2 estaciones meteorológicas en Tierra Amarilla (Figura 3-5) para graficar la cantidad de precipitación ocurrida durante este evento (Figura 3-6). Además, se ha consultado información online en Agromet, y en otro informe realizado por CIGIDEN, donde se incluyen las estaciones de Amolanas y Mina Candelaria, respectivamente, las cuales se han

incluido en una tabla en adición a la otra información. La Tabla 3-2 muestra las precipitaciones registradas durante el evento.

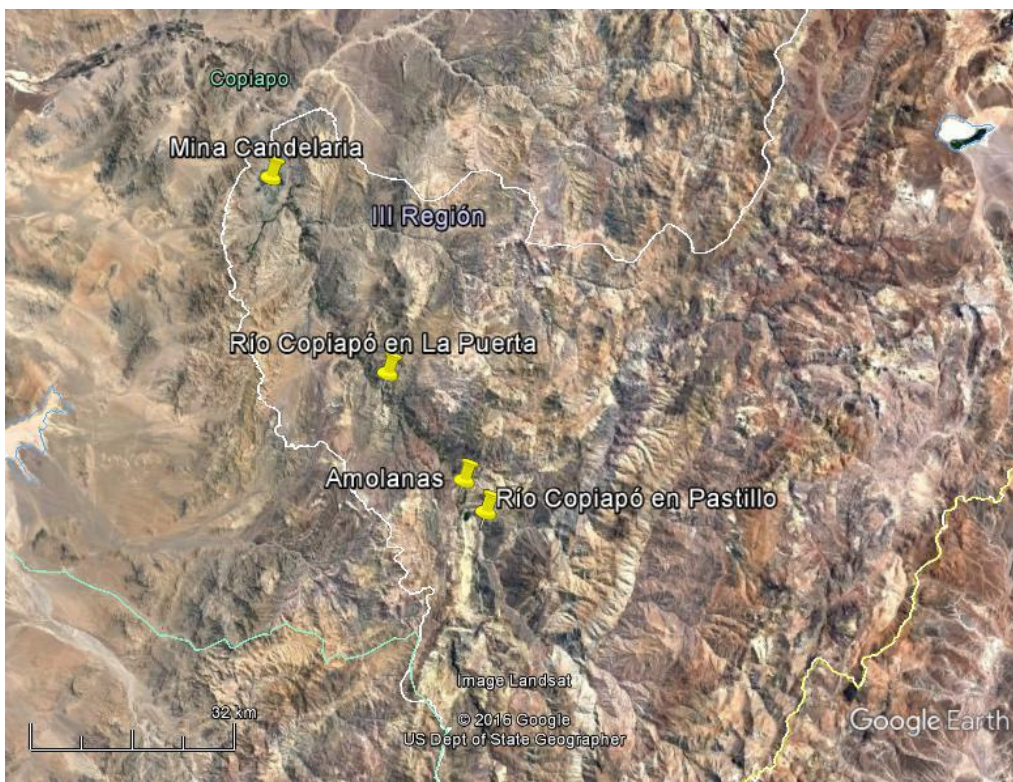


Figura 3-5: Estaciones pluviométricas analizadas para el evento de marzo, 2015 en Tierra Amarilla. Polígono blanco delimita la comuna. Imagen de Google Earth.

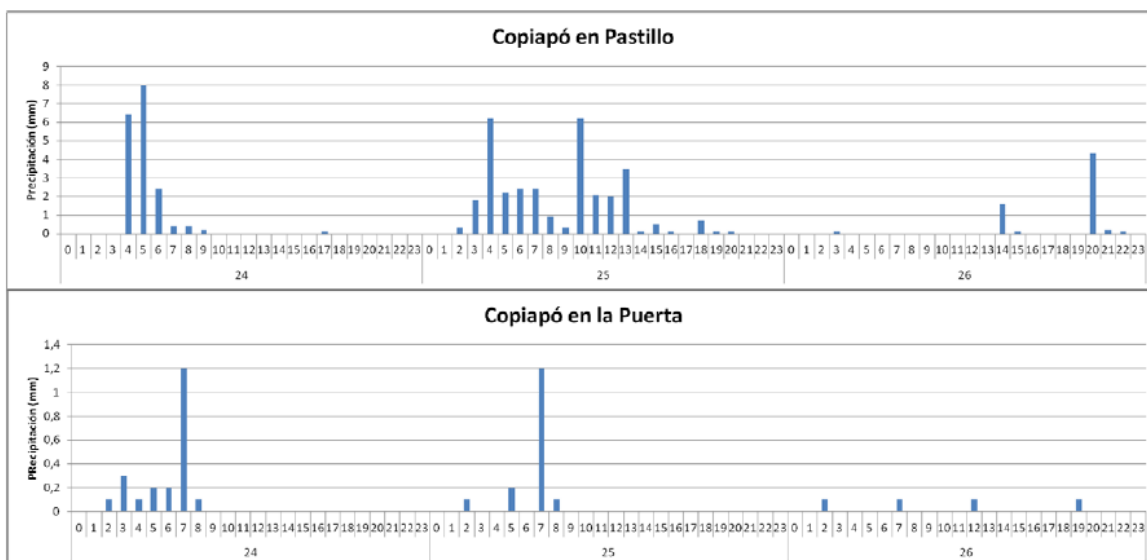


Figura 3-6: Precipitaciones entre el 24 y 26 de marzo del 2015 en estaciones online DGA (Fuente: SERNAGEOMIN, 2015)

Tabla 3-2: Precipitaciones registradas durante los días del evento desde el 24/03 al 26/03.

Estación	Institución	Pp total diaria (mm)			Pp total del evento (mm)
		24-03-2015	25-03-2015	26-03-2015	
Río Copiapó en Pastillo	DGA	17,9	31,6	6,3	55,8
Amolanas	Agromet	14,6	35,2	3,2	53
Río Copiapó en La Puerta	DGA	2,2	0,2	0,2	2,6
Mina Candelaria	Mina	11,9	13,7	0	25,6

Otra estimación de las precipitaciones fueron obtenidas utilizando percepción remota, generando su distribución espacial, como se muestra en la Figura 3-7.

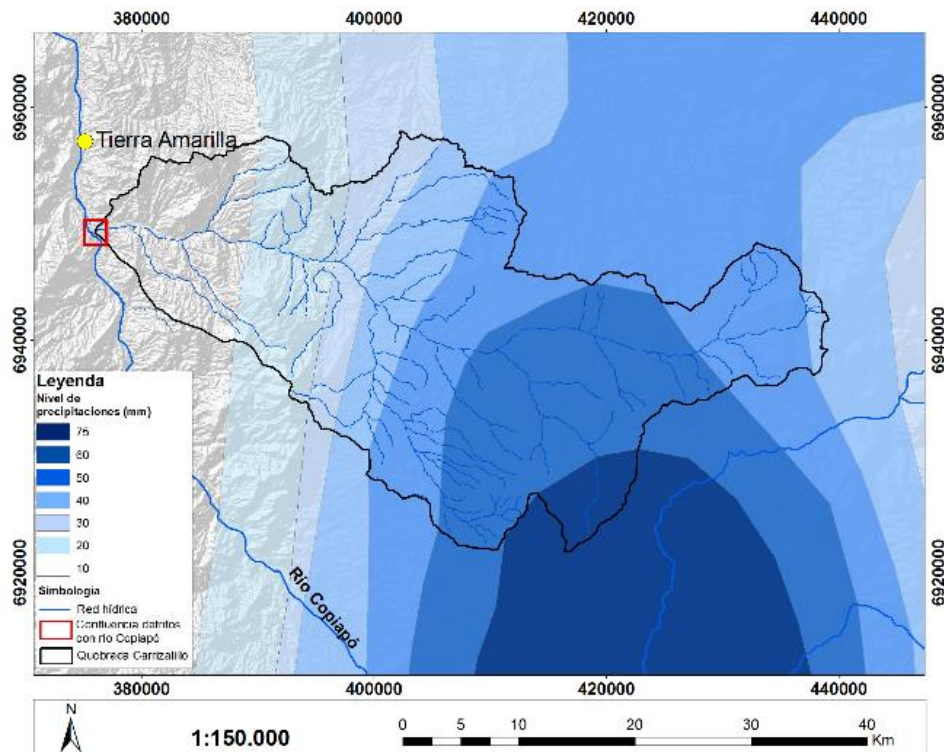


Figura 3-7: Distribución espacial de las precipitaciones acumuladas durante el evento, afectando a la quebrada Carrizalillo (Fuente: imágenes Multi Satellite Retrievals for GPM IMERG en Sánchez et al., 2015).

En cuanto a los daños ocasionados, las localidades de Los Loros, San Antonio, Nantoco y Tierra Amarilla dentro de la comuna en estudio fueron afectadas por inundaciones, debido al desborde del río Copiapó y por aluviones que bajaron por el cauce del mismo río. En general, la cuenca del río Copiapó se vio muy afectada. Uno de sus afluentes, la quebrada Carrizalillo (40 km de largo) fue la de mayor área drenada (Sánchez et al., 2015), y se encuentra 6,6 km aguas arriba de la ciudad de Tierra Amarilla (Figura 3-8). En esa zona, el proceso ocurrió de la siguiente forma, según el estudio realizado por Sánchez et al.: en primer lugar, un flujo de detrito llegó al río Copiapó desde la quebrada Carrizalillo, sobre el cual luego descendió, depositándose, un flujo de barro, marcando una zona de acumulación en el río a la altura de la confluencia de la quebrada Carrizalillo. Finalmente, la incisión de los depósitos por el caudal exportó este material aguas abajo a través de un canal rectilíneo, llegando al área urbana y depositando material allí. El volumen de material transportado por el río y

depositado en el área urbana fue de $1.125.082\text{m}^3$, el cual taponeó puentes, donde luego el escurrimiento de agua y barro se dirigió hacia las calles, inundando casas y llegando el nivel del agua a alturas entre 10 a 75 cm (Sánchez et al., 2015).



Figura 3-8: Efectos de flujo de detritos y barro en parras de la quebrada Carrizalillo, vista hacia el sur

En la Figura 3-9 se resumen los eventos acaecidos durante los tres días de catástrofe, según Informe de emergencia 2 del SERNAGEOMIN, basado en testimonios, videos, registros satelitales y pluviométricos, relacionados con los datos de precipitación.

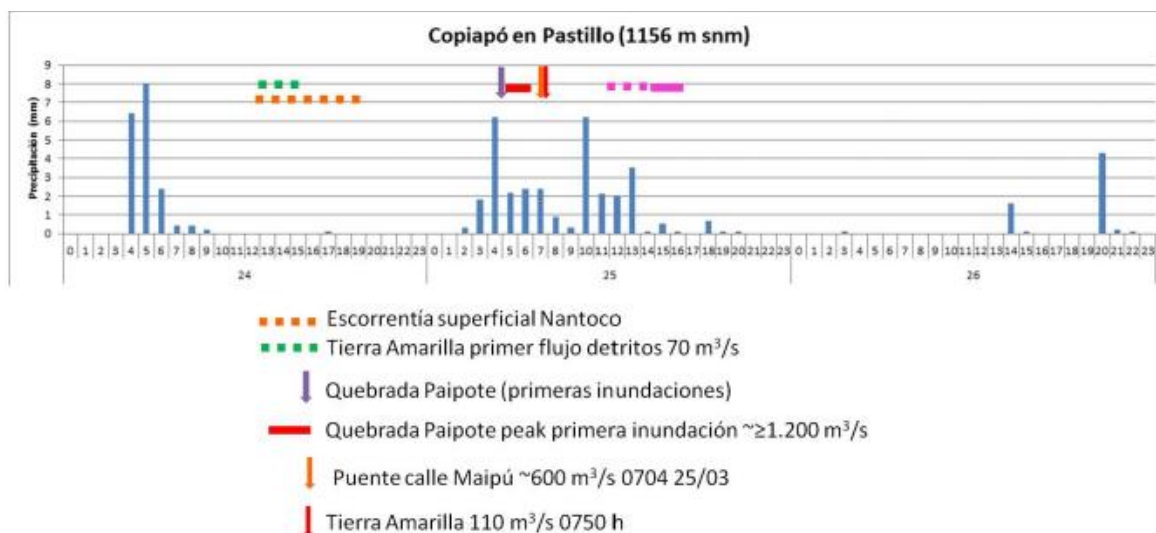


Figura 3-9: se indica la estimación horaria de algunos procesos catastróficos registrados en la zona sobre el gráfico de precipitación instantánea (SERNAGEOMIN, 2015)

En resumen, las localidades de Tierra Amarilla y Nantoco se vieron afectadas por 2 eventos principales de remociones en masa, del tipo flujo de detritos y por inundaciones del tipo flujo de barro. Existió, además un factor antrópico, debido a la intervención del cauce natural del río con acopios de basura o desechos de la industria agrícola que alimentaron con más material los flujos de detritos, además de obras de vialidad como puentes, que produjeron un

efecto de tapón, provocando la colmatación del cauce y la consecuente inundación de las zonas aledañas (Fuentes et al., 2015).

La zona afectada para la zona Norte de la comuna, donde se localiza Tierra Amarilla y Nantoco, se muestra en la Figura 3-10 con color rojo sobre la quebrada Carrizalillo y el valle del río Copiapó.

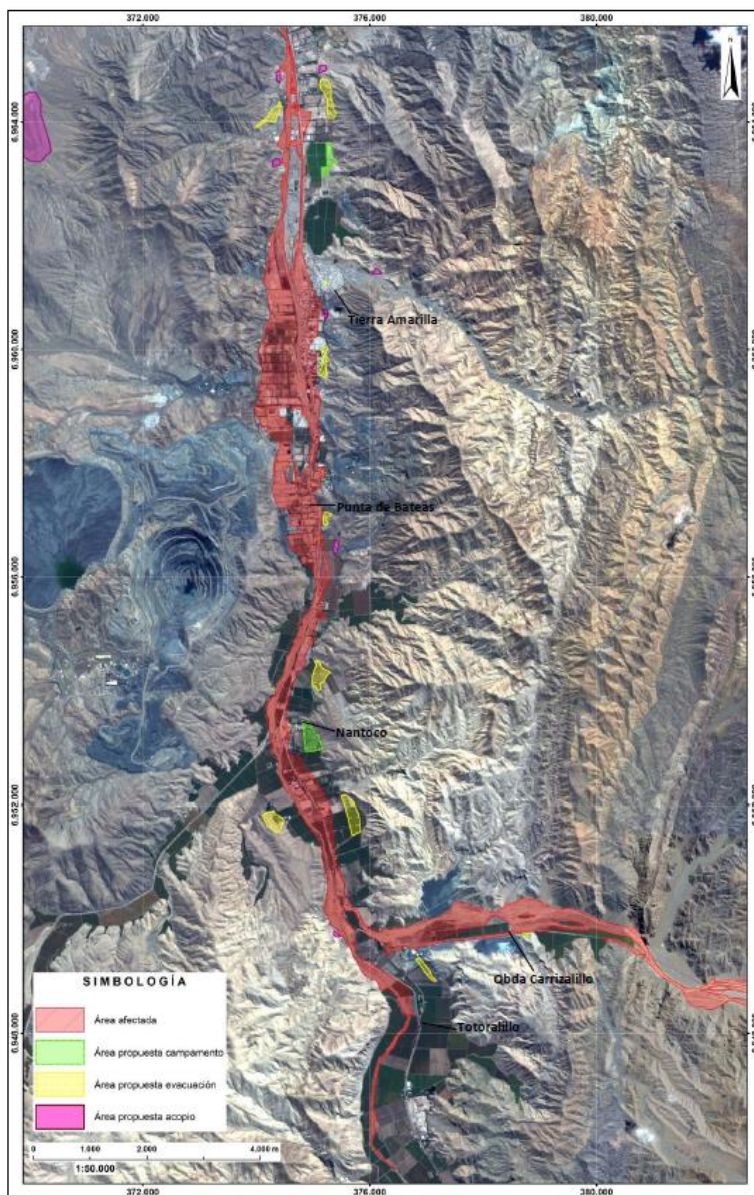


Figura 3-10: Área afectada por el aluvión en la zona norte de la comuna Tierra Amarilla (Fuentes et al., 2015)

Hacia el sur no existe registro de las áreas afectadas, más que por imagen satelital y visitas a terreno, donde se observó que las quebradas tributarias que desembocan en áreas urbanas también fueron activadas generando flujos de detrito y barro, tales como la quebrada Los Loros, San Antonio y Lautaro (Figura 3-11).



Figura 3-11. Arriba: Canal creado para la desembocadura de la quebrada Los Loros, con área urbana asociada, luego del evento. Centro: Poblado de San Antonio al final de la quebrada homónima, con el material del flujo removido. Abajo: Desembocadura de quebrada Lautaro, que queda al este del tranque Lautaro, donde el material ha sido removido, y se aprecian depósitos dejados por el flujo,

4. Análisis de susceptibilidad del área

4.1. Metodología propuesta para analizar la susceptibilidad de generación de flujos de detritos.

La metodología presentada en este capítulo es una modificación a la metodología de Lara, 2007, basada en la memoria de Sepúlveda, 1998. El marco teórico de este trabajo presenta las bases para comprender la metodología, en específico el capítulo “2.1.2. Factores condicionantes para la generación de flujos de detritos”, donde se ha visto cuáles son los factores principales que inciden en la susceptibilidad de una cuenca de generar flujos de detritos.

En este trabajo, la evaluación de susceptibilidad se realiza mediante el cálculo de un índice de susceptibilidad, que corresponde a una ponderación de factores condicionantes escogidos como relevantes para el área de estudio. Para calcular el índice de susceptibilidad se suman los porcentajes de cada factor, detallados en las tablas Tabla 4-1 y Tabla 4-2. Para esto, se han tomado como referencia las ponderaciones usadas en las tablas de susceptibilidad de flujos de detritos en Lara, 2007 y Sepúlveda, 1998.

Tabla 4-1: Ponderación Máxima de factores condicionantes de flujos de detritos

Factor		%	
Geomorfología	Pendiente de ladera	15%	35%
	Pendiente de canal de drenaje	10%	
	Hidrología (Densidad de drenaje)	10%	
Geología y Geotecnia	Características geotécnicas del material: favorables para remoción	35%	35%
Clima y Vegetación	Acumulación de nieve	5%	10%
	Cobertura vegetal	5%	
Intervención Antrópica	Obstrucción de canal de drenaje	10%	10%
Antecedentes históricos	Aluviones declarados en la hoya	10%	10%

En este estudio, se ha realizado una modificación de factores con respecto a la metodología original. Los subfactores fueron seleccionados según su relevancia para la zona estudiada, que corresponde a un ambiente cordillerano y árido. Además las extensiones de las quebradas y sus hoyas son de gran orden, de decenas de kilómetros, lo cual es otro punto a considerar.

Para el factor geomorfología, en las referencias mencionadas se consideraron los subfactores: pendiente de ladera, pendiente de canal de drenaje, encajonamiento de canal de drenaje y exposición al sol. Estos dos últimos no se consideraron en esta metodología, puesto que el primero no influye en quebradas tan largas, y el segundo es equitativo en toda la zona norte. Como representación más fidedigna de la geomorfología de la zona, se decidió integrar la hidrología, pues es necesario disponer de redes que ayuden a canalizar el flujo generado. Para ello se usa el valor de la densidad de drenaje (ecuación (2), Capítulo 2.2), el cual se calcula como la sumatoria de las longitudes de drenaje sobre el área de la cuenca. Considerando las dos cuencas de estudio, existe una diferencia importante de escalas, por lo que para calcular

este parámetro se ha definido que para cuencas con una orden de red de drenaje según Strahler > 4, se dividirán éstas en microcuencas, calculándose así la densidad de drenaje para cada una de ellas.

Las características geológicas y geotécnicas son obtenidas, idealmente, mediante observación en terreno, y a falta de este dato, se utiliza la información contenida en cartas geológicas y observadas por imagen satelital, de si son o no favorables para removerse.

El factor clima y vegetación se consideró bastante relevante, ya que genera las condiciones de meteorización necesarias para la generación de material. El factor antrópico no consideró desestabilización de laderas por ser quebradas muy extensas donde es más importante el efecto que produce la obstrucción del canal de drenaje estudiado. También se consideró importante los aluviones declarados en la hoya, pues es un antecedente de que una cuenca tenga el potencial de generar flujos. Ambos factores son obtenidos mediante revisión bibliográfica.

Tabla 4-2: Desglose de las ponderaciones de cada factor condicionante de flujos de detritos

Factor		Variable	%
Geomorfología	Pendiente de ladera	<5°	0%
		5°-15°	5%
		15,1°-25°	10%
		>25°	15%
	Pendiente de canal de drenaje	<5%	1%
		5°-10°	5%
		>10°	10%
	Hidrología (densidad de drenaje)	<1	0
		1 - 2	5%
		2 - 3	7%
>3		10%	
Geología y Geotecnia	Geología y Geotecnia (favorables para remoción)	Muy poco favorable	5%
		Poco favorable	10%
		Favorable	20%
		Muy favorable	35%
Clima y vegetación	Acumulación de nieve	Nunca	0%
		Esporádicamente	1%
		Estacional	2%
		Siempre	5%
	Cobertura vegetal	Alta	0%
		Moderada	3%
		Nula a baja	5%
Intervención antrópica	Obstrucción de canal de drenaje	Nula a baja	0%
		Moderada	5%

		Importante	10%
Antecedentes históricos	Aluviones declarados en la hoya	Sin antecedentes	1%
		Prehistóricos	5%
		Históricos	10%

La susceptibilidad resultante se calcula sumando el valor asociado a cada subfactor, resultando valores entre 0% a 100%. Se utiliza la nomenclatura de susceptibilidad “baja”, “moderada”, “alta” y “muy alta” según corresponda a las 4 categorías divididas entre rangos de amplitud de 25%.

El resultado principal de esta metodología es generar un mapa de susceptibilidad que indique zonas donde sea probable que se realice movilización de material que derive en un flujo de detritos. Para la realización de esto, primero se debe hacer un estudio de la geología local de la zona analizada utilizando las cartas geológicas disponibles e información de terreno. Sumado a ello, con la ayuda de imágenes satelitales, se deben definir las áreas con material disponible a ser movilizado, siguiendo criterios de calidad, alteración, baja compactación y disgregabilidad. De esta forma, se genera un mapa de material disponible, donde se muestran y clasifican las áreas con material suelto.

A partir del mapa de material disponible, se divide la zona en polígonos, dejando fuera las áreas compuestas de roca de calidad media a alta, pues se asume que estas no aportarán material detrítico para la generación de flujos. La división se hará usando criterios de orientación de laderas, pendientes y tipo de material. A continuación, a cada polígono se le asigna un índice de susceptibilidad, el cual es un valor porcentual, calculado según lo mencionado anteriormente.

Adicional al mapa de susceptibilidad, es útil una descripción geomorfométrica de las cuencas para comparar resultados, y definir si hay otros factores condicionantes además de los mencionados.

4.2. Caracterización del área de estudio

En este capítulo se realiza una caracterización del área de estudio enfocado en características que permitan ponderar los principales factores seleccionados como condicionantes para la generación de flujos de detritos. El límite de las subcuencas de Carrizalillo y Meléndez se obtuvo mediante la herramienta “watershed” de Global Mapper 17, y se exportó en formato shapefile a Arcgis. Para cada una de éstas se describe a continuación, la geología local, el material disponible a ser removido, la distribución de pendientes, clima y vegetación, factor antrópico y se obtienen parámetros geomorfométricos de las cuencas.

4.2.1. Geología local

La geología local de ambas cuencas se utiliza como base para conocer el tipo de material disponible para ser removido eventualmente. Es el primer paso para generar el mapa de susceptibilidad. En el capítulo 3.1 hay una descripción de las principales unidades que afloran en la comuna de Tierra Amarilla, y en este capítulo se darán a conocer más detalladamente

aquellas que afloran en las cuencas de estudio, mediante la información contenida en las 3 cartas geológicas de escala 1:100.000, Los Loros, Copiapó y La Guardia (Figura 4-1).

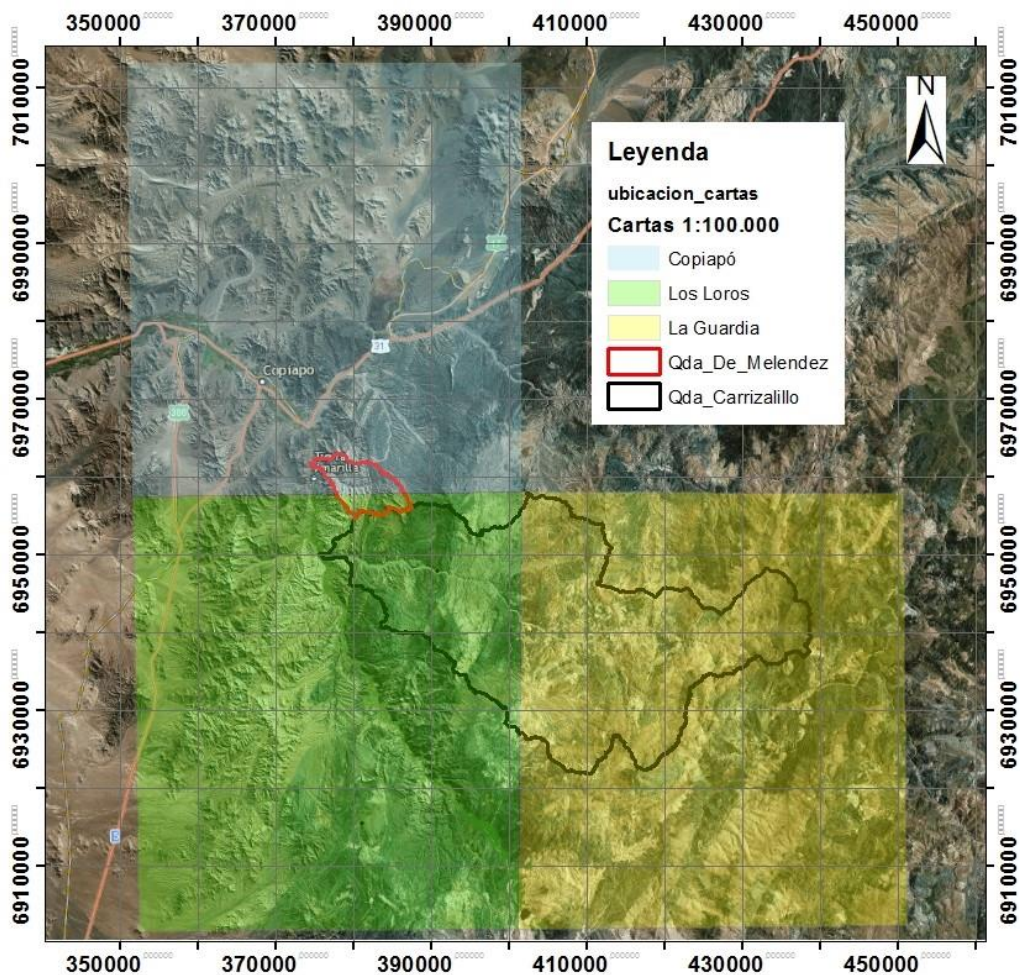


Figura 4-1: Mapa de Ubicación de cada una de las cartas de escala 1:100.000 que entran en la zona abarcada por las cuencas analizadas.

La cuenca de la quebrada Carrizalillo tiene un área de 1110 km², y abarca 2 cartas geológicas: Los Loros y La Guardia (Figura 4-1).

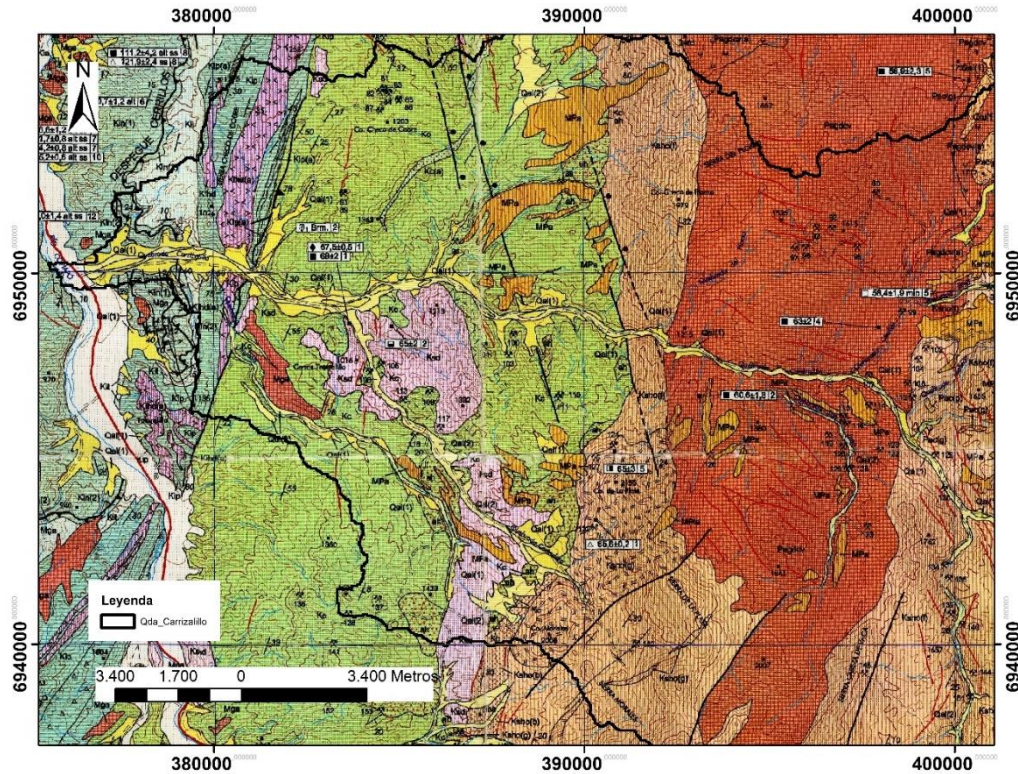


Figura 4-2: Geología local de la zona Oeste de la cuenca Carrizalillo. Modificado de Arévalo, 2005

La quebrada Carrizalillo está cubierta por depósitos aluviales activos e inactivos. La cuenca muestra un basamento cretácico, representado por el grupo Chañarcillo, que se compone de rocas sedimentarias calcáreas y areniscas, repartidas hacia la desembocadura de la cuenca. Son cruzadas por el despegue Cerrillos, de carácter inverso, y por intrusivos hipabisales dioríticos porfíricos de clinopiroxeno y olivino. Su parte Oeste (Figura 4-2 y leyenda en Figura 4-3), descrita por la carta Los Loros, también presenta rocas sedimentarias volcánicas de la formación Cerrillos y areniscas, lavas y domos de la formación Hornitos, intruídas (estas últimas) por el Plutón Cabeza de Vaca. Hacia el sureste de la zona se ubica la caldera de colapso Lomas Bayas, que contiene brechas, tobas, domos y diques, cruzados por fallas producidas por el colapso. Sobreyaciendo estas rocas, se encuentran las Gravas de Atacama y luego Depósitos aluviales y coluviales antiguos (Mioceno), que podrían considerarse como zonas de aporte de material, por la baja resistencia asociada a altas porosidades y mala consolidación. Además, se observan una serie de fallas normales que aportarían inestabilidad en las zonas afectadas.

En la zona Este de la cuenca (Figura 4-4, leyenda en Figura 4-5), descrita en la hoja La Guardia, afloran rocas desde el Jurásico, tales como la Formación Lautaro, Estratos de Quebrada Vicuña y la Formación Quebrada Monardes, que corresponden a areniscas y calizas, lavas y una secuencia clástica, respectivamente. Son cruzadas por la falla inversa Pauna-Estancilla. Del Cretácico afloran el Miembro Superior de la Formación Quebrada Seca, de carácter volcánico, que está en el extremo Este, en el borde de la cuenca; los Estratos de Sierra Los Leones, que se ubican cortados por la falla inversa La Ternera, que los desplaza

sobre estratos de la caldera Agua Nueva; y las Lavas de la Sierra la Dichosa, que están hacia el noroeste de la parte este de la cuenca.

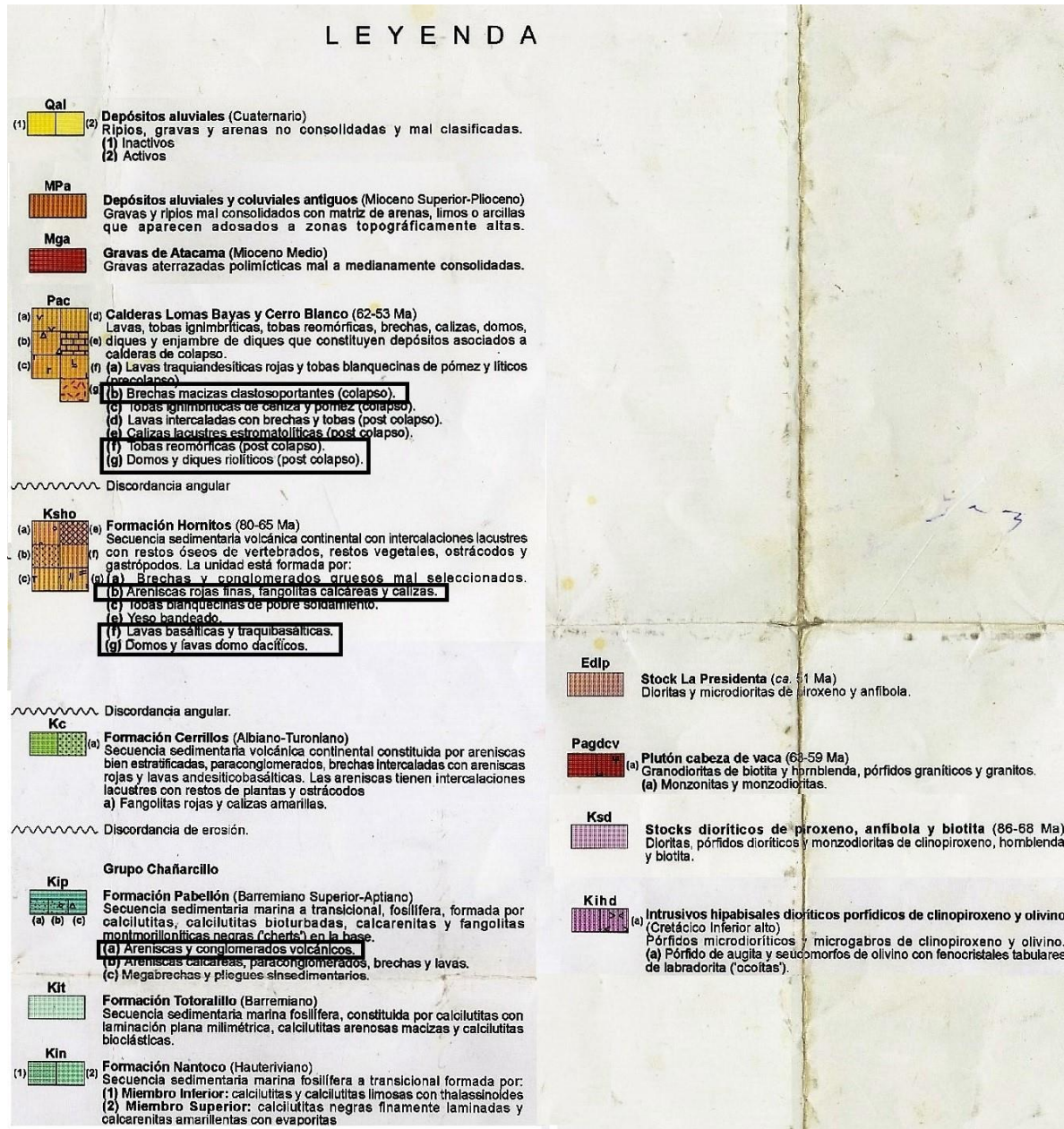


Figura 4-3: Leyenda de la Geología de la zona Oeste de la cuenca Carrizalillo. Sólo se incluyen las unidades que afloran en la zona, y se han encerrado aquellos miembros de las formaciones que afloran en la cuenca. Modificado de Arévalo, 2005.

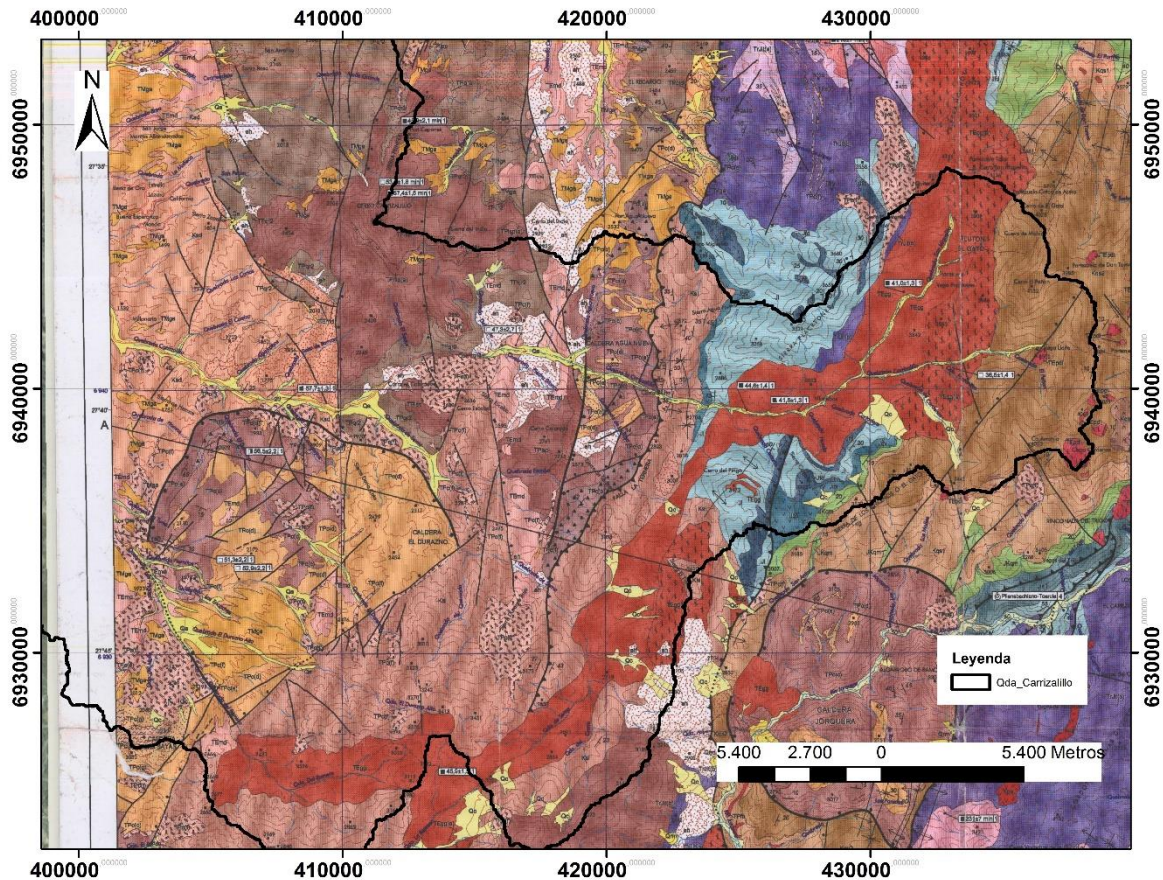


Figura 4-4: Geología local de la zona Este de la cuenca Carrizalillo. Modificado de Iriarte et al., 1999.

También en esta zona hay pequeños afloramientos del Plutón Cabeza de Vaca, correspondiente a monzonitas cuarcíferas, indicativo de baja porosidad y alta resistencia. Otras unidades del Paleoceno son los Estratos de Quebrada el Romero, correspondiente a lavas riolíticas, lavas de dacíticas a andesíticas y calizas y areniscas. En la zona se presenta cruzada por varias fallas y con alteración hidrotermal. Concordante sobre estas, se ubican las Ignimbritas de Sierra la Peineta, que es una secuencia piroclástica que aflora en el cerro Carrizalillo, al norte de la quebrada, e igualmente está cruzada por fallas normales. Hacia el centro, y al sur de la quebrada principal aflora la caldera El Durazno, con fallas normales asociadas, y hacia el norte, abarcando un área menor, se ubica la caldera Agua Nueva. Estas son zonas de gran inestabilidad, con rocas brechosas, tobas, ignimbritas y lavas, que estarían alteradas y diaclasadas debido a las fallas que las cruzan. El Plutón el Gato aflora en una alta extensión, intruyendo las formaciones Lautaro, Quebrada Monardes y Quebrada Seca. Éste corresponde a granodioritas y monzodioritas, que desarrolla en sus bordes una aureola con metamorfismo de contacto caracterizada por silicificación. En menor extensión afloran diversos pórfidos del Mioceno: pórfidos monzoníticos y dioríticos, pórfidos dioríticos en Sierra de los Chilenos y pórfidos dacíticos, todos ellos con altas resistencias, debido a su contenido en sílice. En este lado también afloran las Gravas de Atacama, que podrían aportar material debido a su baja consolidación. Los depósitos cuaternarios son equivalentes a los de la carta Los Loros, y corresponden a coluvios y depósitos aluviales cubriendo las quebradas.

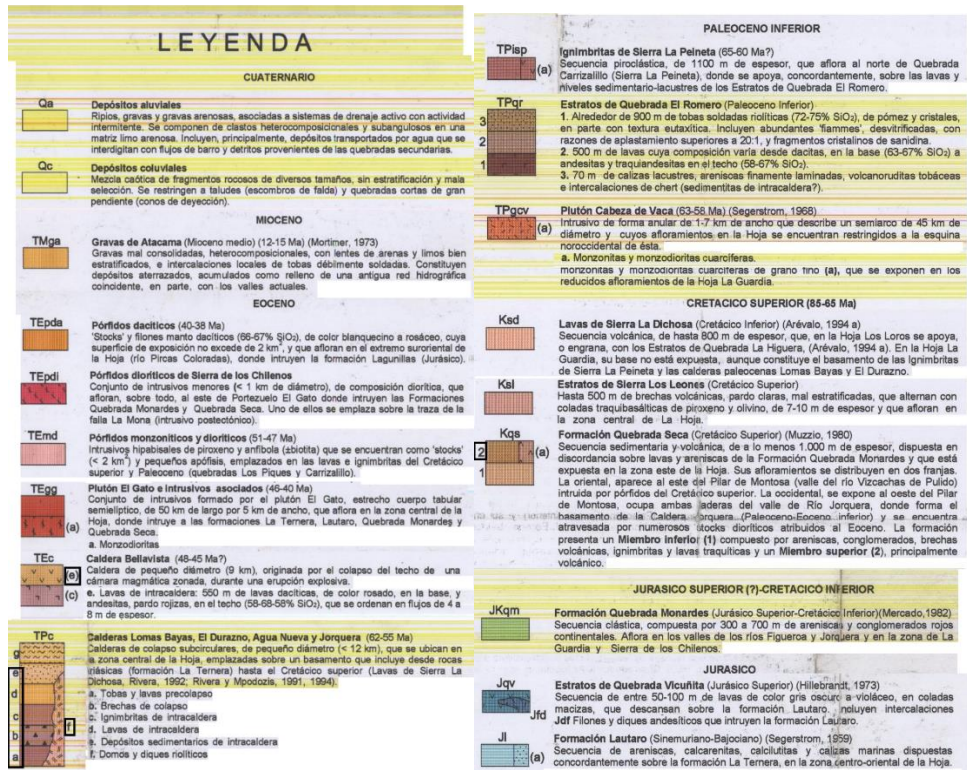


Figura 4-5: Leyenda de la zona oriental de la cuenca Carrizalillo. Modificado de Iriarte et al., 1999.

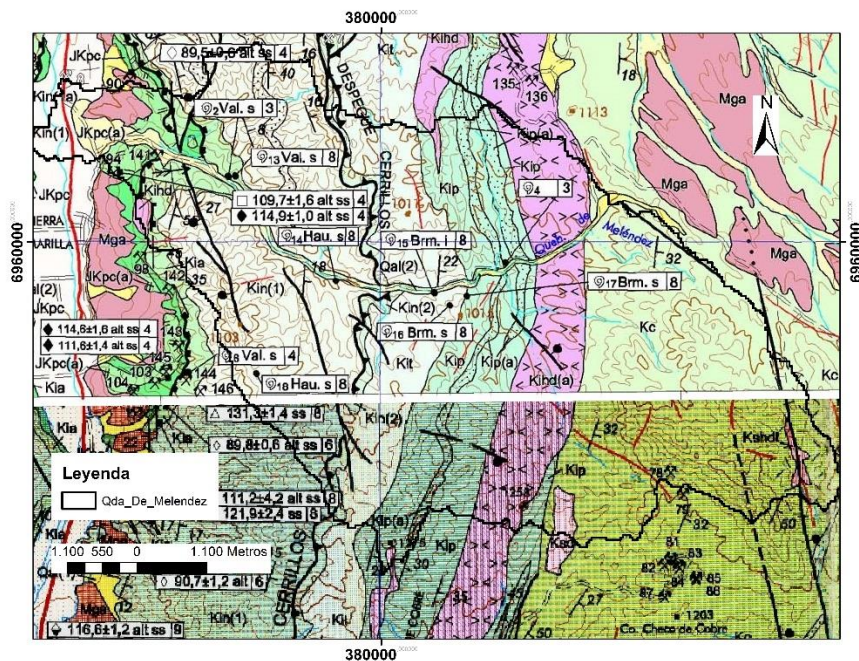


Figura 4-6: Geología local de la cuenca de la quebrada De Meléndez, que intersecta las cartas Copiapó y Los Loros. Modificado de Arévalo, 2005

L E Y E N D A











	<p>Qal Depósitos aluviales (Cuaternario) Ripios, gravas y, en menor proporción, arenas y limos no consolidados y mal clasificados. (1) Inactivos. (2) Activos.</p>
	<p>Mga Gravas de Atacama (Mioceno Medio) Gravas polimicticas, mal a medianamente consolidadas. (a) Arenas y limos bien estratificados.</p>
	<p>Ksd Stocks dioríticos de piroxeno, anfíbola y biotita (86-68 Ma) Dioritas, pórfidos dioríticos y monzodioritas de clinopiroxeno, hornblenda y biotita.</p>
	<p>Kshd Intrusivos hipabisales dioríticos de anfíbola y clinopiroxeno (ca. 96 Ma) Microdioritas, microdioritas porfídicas y dioritas de anfíbola y clinopiroxeno.</p>
	<p>Kc Formación Cerrillos (Albiano-Turoniano) Secuencia sedimentaria volcánica continental constituida por areniscas bien estratificadas, brechas y conglomerados intercalados con lavas andesítico-basálticas. Las areniscas presentan intercalaciones lacustres con restos de plantas y ostrácodos.</p>
	<p>Kihd Intrusivos hipabisales dioríticos porfídicos de clinopiroxeno y olivino (Cretácico Inferior Alto) Pórfidos microdioríticos y microgabros de clinopiroxeno y olivino. (a) Pórfido de augita y pseudomorfos de olivino con fenocristales tabulares de labradorita ('ocóltas').</p>
Grupo Chañarcillo	
	<p>Kip Formación Pabellón (Barremiano Superior-Aptiano) Secuencia sedimentaria marina a transicional, fosilífera, formada por calcilitas con buena estratificación, calcarenitas y calcilutitas bioclásticas. Fangolitas montmoriloníticas negras ('cherts') se intercalan en la base. Hacia el norte se interdigitan areniscas y conglomerados. (a) Areniscas y conglomerados volcánicos.</p>
	<p>Kit Formación Totalillo (Barremiano) Secuencia sedimentaria marina fosilífera constituida por calcilitas con laminación plana milimétrica y calcilutitas arenosas macizas.</p>
	<p>Kin Formación Nantoco (Hauteriviense) Secuencia sedimentaria marina fosilífera a transicional formada por: (1) Calcilutitas, calcilutitas con thalassinoides y calcarenitas. (1a) Areniscas rojas y conglomerados bien estratificados. (2) Calcilutitas finamente laminadas negras y calcarenitas amarillentas.</p>
	<p>JKpc Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Valanginiense Inferior) Secuencia volcánica sedimentaria marina a transicional formada por lavas andesíticas, lavas andesítico-basálticas con 'pillows', domos y lavas domo dacíticas, brechas gruesas verdosas, brechas de 'slump' macizas y lutitas laminadas rojas. (a) Domos y lavas domo dacíticas.</p>

Figura 4-7: Leyenda de geología de la cuenca De Meléndez. Extraído de Arévalo, 2005

La cuenca De Meléndez abarca un área de 55,79 km², y su geología está descrita en las cartas Copiapó y Los Loros (Figura 4-1, Figura 4-6 y leyenda en Figura 4-7). Del Jurásico aflora la formación Punta del Cobre hacia la desembocadura de la cuenca, a ambos lados de la quebrada, donde es cruzada por una falla normal. Del Cretácico aflora el grupo Chañarcillo, constituido por la Formación Nantoco, correspondiente a calcilutitas, areniscas y calcilutitas negras, cruzado por el despegue Cerrillos; la Formación Totalillo, que es una secuencia marina; y la Formación Pabellón, que también corresponde a una secuencia marina fosilífera. A estos estratos los cruzan Intrusivos hipabisales dioríticos porfídicos de clinopiroxeno y olivino. Les sigue una secuencia sedimentaria continental llamada Formación Cerrillos, y a menor escala se asoman cuerpos intrusivos y stocks dioríticos, que indicarían zonas frágiles propicias para el emplazamiento de este tipo de cuerpos. Las Gravas de Atacama se emplazan hacia la desembocadura de la cuenca, bordeando el abanico aluvial. La quebrada principal está cubierta por depósitos aluviales activos, correspondientes en mayor proporción a ripios y gravas.

4.2.2. Material disponible para ser movlizado

A partir de la geología local y la observación de imágenes satelitales, se han realizado dos mapas que indican el material disponible en cada cuenca, a distintas escalas.

La cuenca de la quebrada Carrizalillo, al tener una gran área asociada fue mapeada a una escala de 1:50.000, sin embargo, se muestra a una escala mucho menor para calzarla con el documento, correspondiente a 1:250.000 (Figura 4-8). Cada unidad se describe a continuación de la imagen, y es preciso señalar que el porcentaje de la cuenca que aporta material removible corresponde a un 4,8%, es decir 53,35 km² de 1.110,88 km².

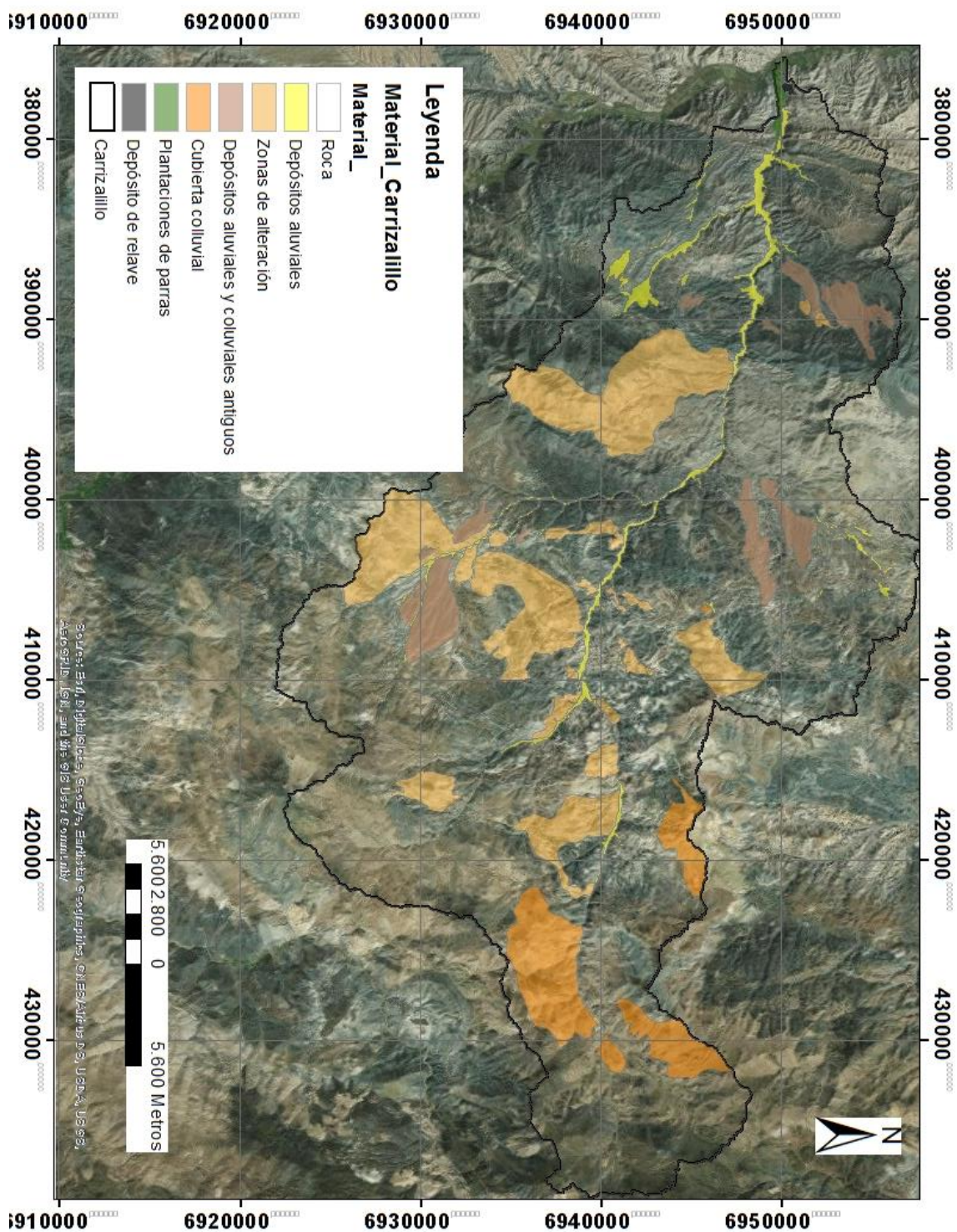


Figura 4-8: Material disponible para ser movilizad de la hoya de la quebrada Carrizalillo. Escala 1:250.000. Imagen generada con Arcgis 10.3.

La unidad **roca** (Figura 4-9) corresponde a 1057 km², y son afloramientos de calidad media a alta, que no presentan material suelto a la escala de trabajo, por lo tanto no es susceptible

de generar flujos de detritos y/o barro. Principalmente, en terreno se observaron laderas susceptibles a generar remociones de tipo roca, como traslacionales, toppling, etc., pero no de suelo en estas unidades.



Figura 4-9. Afloramientos de roca en laderas 8 km adentro de la quebrada Carrizalillo

Los **depósitos aluviales** se ubican a lo largo de las quebradas, en zonas de baja pendiente, y corresponden a arenas a arenas gravosas según observaciones de terreno (ver Figura 4-10 y Figura 4-11), específicamente: D90 Arena Fina, D30 Grava Gruesa y bloques de hasta 0,5-1 m. Estos depósitos están asociados a actividad intermitente del sistema de drenaje activo de la cuenca. Se componen de clastos heterocomposicionales y subangulosos en una matriz limo arenosa. Incluyen, principalmente, depósitos transportados por agua que se interdigitan con flujos de barro y detritos provenientes de las quebradas primarias y secundarias.



Figura 4-10: Depósito aluvial del evento del 2015 en la quebrada Carrizalillo



Figura 4-11: Depósito aluvial de la quebrada Carrizalillo correspondiente a un evento antiguo

Las **zonas de alteración** fueron identificadas por imagen satelital, principalmente, coincidiendo éstas con actividad minera asociada en varias partes. Se observó material suelto de textura suave, que según el tipo de alteración hidrotermal se infiere que aportan material compuesto de altas proporciones de arcillas y limo. Se ubicaron sobre rocas intrusivas, zonas de falla, extendiéndose sobre los depósitos de calderas de colapso.

Los **depósitos coluviales y aluviales antiguos** están descritos en las cartas geológicas y se observan claramente a la escala de estudio. Se describen como gravas y ripio mal consolidados con matriz de arenas, limos o arcillas que aparecen adosados a zonas topográficamente altas. Coinciden con redes de drenaje dentro de la cuenca y se observan flujos recientes sobre éstas, por lo cual se infiere que aportan material y son medianamente favorables de moverse, por su mala consolidación.

La **cubierta coluvial** es material suelto sobre la roca madre, que varía en composición según la geología de la zona en donde se ubican, y que se infiere según observaciones de terreno que incluye material arenoso y bloques (Figura 4-12). Se mapearon analizando las imágenes satelitales. Su ubicación no obedeció a un patrón litológico, sino que coincidió con cumbre hacia el interior de la hoya.



Figura 4-12: Laderas con cubierta coluvial a los costados de la quebrada Carrizalillo

Las **plantaciones de parras** se ubican cerca de desembocadura sobre los depósitos aluviales de la quebrada. Hay muchas a lo largo de la cuenca, pero se han considerado sólo las que son visibles a escala.

El **depósito de relave** se ubica hacia la desembocadura. Hay mucha actividad minera en la cuenca, y este depósito corresponde a desechos de dicha actividad.



Figura 4-13: Vista hacia el Oeste de depósito de relave sobre ladera de quebrada Carrizalillo

Del material disponible de esta cuenca se puede inferir que los depósitos aluviales son favorables a removerse, puesto que son el resultado de aluviones antiguos y es probable que puedan removilizarse.

Por otra parte, en la cuenca de la quebrada de Meléndez, el material disponible para ser movilizado corresponde a $1,96 \text{ km}^2$ de $55,79 \text{ km}^2$, es decir a un 3,51% del total. La escala presentada en este caso es de 1:50.000 (Figura 4-14).

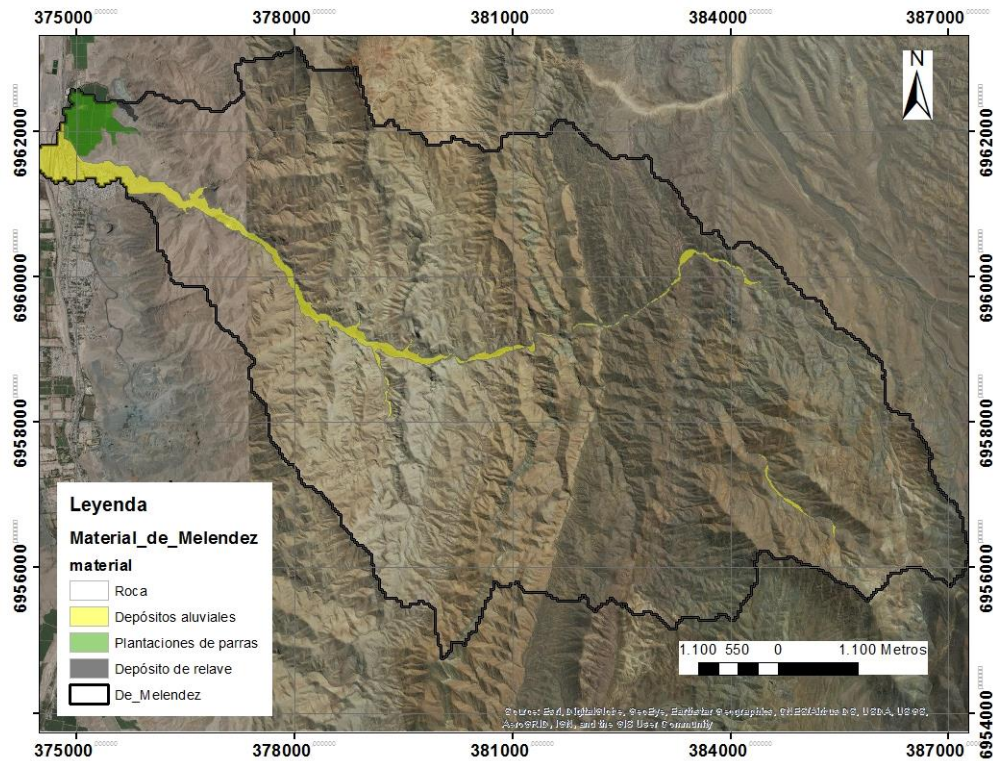


Figura 4-14: Material disponible para ser movilizado de la hoya de la quebrada de Meléndez. Escala 1:50.000. Imagen generada con Arcgis 10.3.

El principal aporte de esta cuenca está dado por los **depósitos aluviales**, tanto de la quebrada principal como de quebradas laterales, ya que en general las laderas presentan rocas de resistencia media a alta (Figura 4-15, Figura 4-16), verificado con golpes de martillo, que aportan poco material coluvial.



Figura 4-15: Ladera de roca caliza en quebrada de Meléndez



Figura 4-16: Laderas con afloramientos de roca a lo largo de la quebrada de Meléndez

Los depósitos aluviales observados corresponden a grava arenosa, específicamente: D90 Grava hasta 0,5 m y D60: Arena Gruesa, con composiciones sedimentarias a volcánicas aportadas por las laderas (Figura 4-17).



Figura 4-17: Tipo de material aportado por la quebrada

4.2.3. Pendientes

Las pendientes para cada cuenca fueron obtenidas a partir de un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución y tamaño de celda de 29,4 x 29,4 m. Usando la herramienta generadora de pendientes del software Arcgis 10.3 se generaron los mapas asociados a cada una.

El mapa de pendientes de la cuenca Carrizalillo (Figura 4-18) indica una predominancia de las pendientes bajo los 20°. Según estimación visual, aproximadamente un 30% de la cuenca tiene pendientes sobre los 30°, y se reparten en las cabeceras de la hoya, y en algunos puntos cercanos a la quebrada principal. Son de especial importancia aquellas zonas que además de poseer altas pendientes, coinciden con una alta densidad de redes de drenaje. La pendiente promedio de toda la cuenca es 17,02° (Tabla 4-4), usando método estadístico proporcionado por el software GIS. Las mayores pendientes alcanzan valores sobre los 60°.

En el caso de la cuenca De Meléndez (Figura 4-19), las mayores pendientes se ubican en el tercio de la hoya hacia la desembocadura, llegando a los 55°. Ésta posee una pendiente promedio de 15,75° (Tabla 4-8)

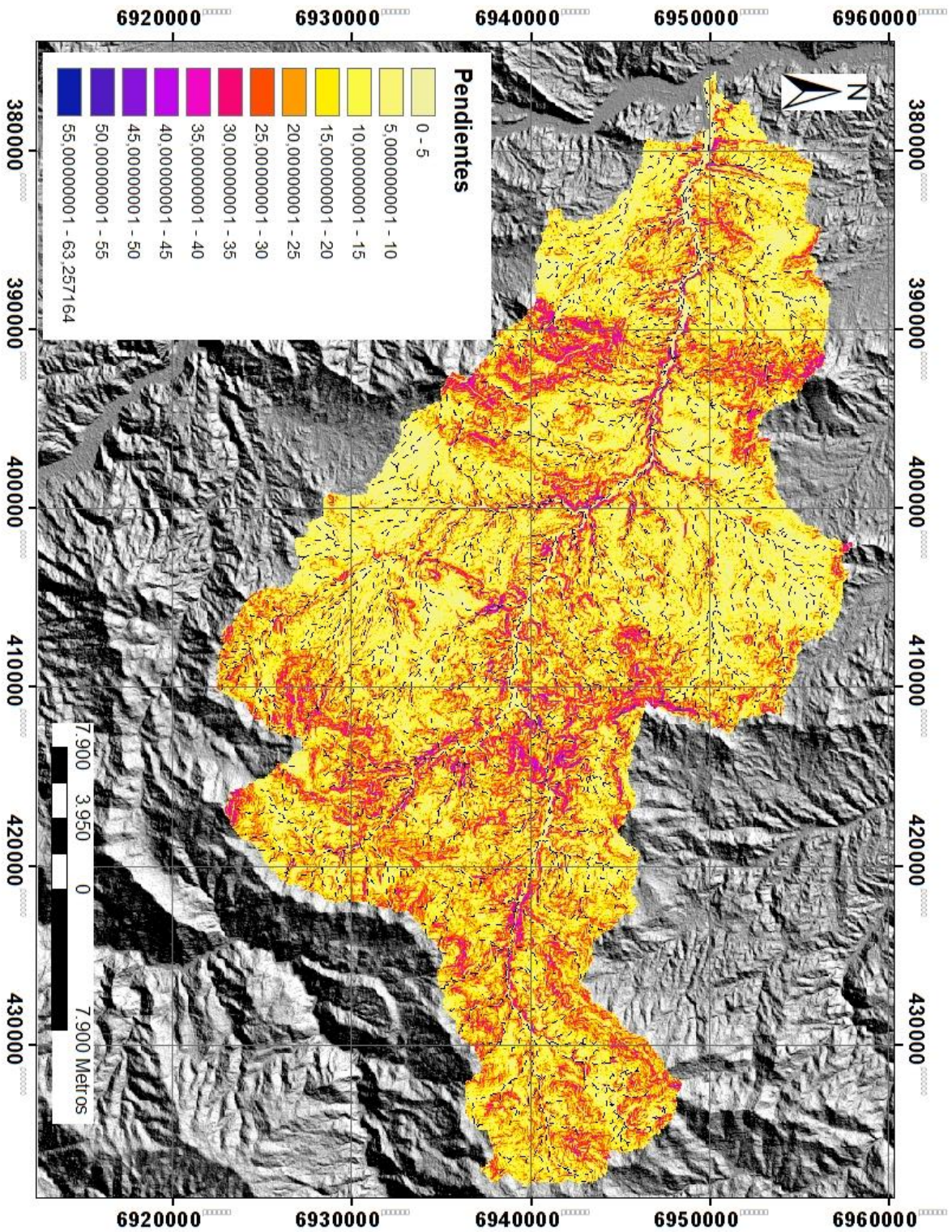


Figura 4-18 Mapa de pendientes de la cuenca Carrizalillo. Imagen generada por software Arcgis 10.3

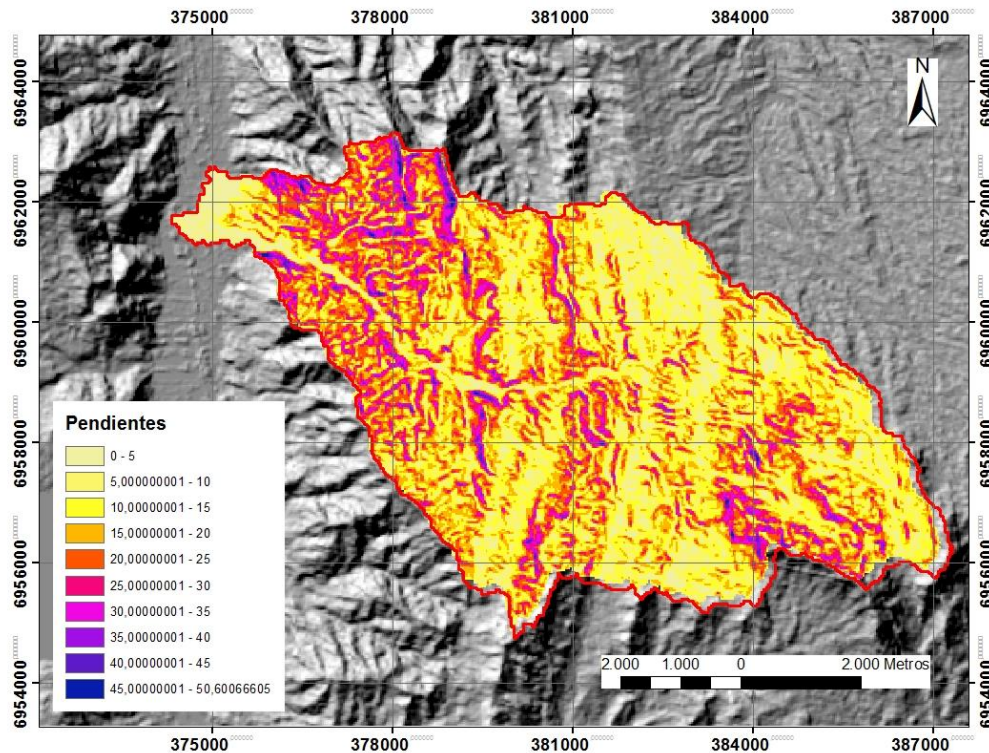


Figura 4-19: Mapa de pendientes de la cuenca de la quebrada De Meléndez. Generada con Arcgis 10.3

4.2.4. Vegetación y clima

La vegetación en ambas cuencas está representada por las plantaciones de parras, que abarcan un área muy pequeña en la desembocadura de ambas quebradas. La mayoría de las cuencas no tienen vegetación.

Respecto a la acumulación de nieve, ésta está definida por la información contenida en los informes revisados, y como se explica en el capítulo 3.3, sobre los 2.000 metros de altitud predomina el clima desértico marginal de altura, donde las precipitaciones son más abundantes, y en las cumbres predominan las precipitaciones sólidas esporádicas. La hoya Carrizalillo alcanza estas altitudes hacia el interior.

4.2.5. Factor Antrópico

La quebrada De Meléndez tiene un asentamiento urbano en su abanico, el cual se considera como obstrucción de la red de drenaje principal. La quebrada Carrizalillo tiene actividad minera en su hoya y un depósito de relave en la ladera norte de su desembocadura, el cual se considera como material de obstrucción.

4.2.6. Geomorfometría de las cuencas

Quebrada Carrizalillo

Los parámetros geométricos principales se obtuvieron a través del software Arcgis, mediante la calculadora de geometría, y son:

Tabla 4-3: Parámetros geométricos principales de la cuenca Carrizalillo

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
De la superficie		
Area	km ²	1110,88
Perímetro de la cuenca	km	277,46
Cotas		
Cota máxima	msnm	4279,94
Cota mínima	msnm	423,96
Centroide (PSC:wgs 1984 UTM Zone 19S)		
X centroide	m	407176,31
Y centroide	m	6940465,00
Z centroide	msnm	2395,04
Altitud		
Altitud media	msnm	2395,04
Altitud más frecuente	msnm	1895,76
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	2254,18
Pendiente		
pendiente promedio de la cuenca	grados	17,02

A partir de estos datos, se pueden obtener los parámetros morfométricos siguientes, descritos en el subcapítulo 2.2.:

Tabla 4-4: Parámetros morfométricos de cuenca Carrizalillo

Parámetro	Unidad	Valor
Relieve	msnm	3855,98
Pendiente media	grados	17,02
Indice de Gravelius		2,33

El índice de Gravelius indica la aproximación de la cuenca a una forma circular mientras más cercano sea el valor a la unidad. Un valor mayor como el que presenta esta cuenca indica que es irregular y alargada, lo cual es evidente según observaciones directas.

- Jerarquización de la red de drenaje superficial:

Para obtener el orden de las redes de drenaje se utilizó la función Clasificación de Arroyos en el software Arcgis, a partir del DEM asignado a la cuenca respectiva. Según la clasificación de Strahler, el máximo orden de drenaje de la cuenca es de 6, correspondiente al de la quebrada principal Carrizalillo. El detalle de los órdenes se grafica en la Figura 4-20 y en la Tabla 4-5 están las longitudes totales de las redes de drenaje según sus órdenes. En la Tabla 4-6 están resumidos los datos sobre la longitud de la red de drenaje.

Tabla 4-5: Detalle de las longitudes totales de la red de drenaje según sus órdenes

orden red	longitud	nº de veces
1	733,6687	872
2	394,9115	430
3	170,9903	203
4	84,25962	125
5	23,3155	41
6	28,56653	51
	1435,712	

Tabla 4-6: Valores de parámetros de la red de drenaje de la cuenca Carrizalillo

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
De la Red Hídrica		
Longitud del curso principal	km	76,41
Orden de la Red Hídrica	UND	6
Longitud de la red hídrica	km	1435,71

Con los datos obtenidos para la red hídrica (longitud de la red hídrica y área de la cuenca), se puede calcular la densidad de la red de drenaje, y da $1,29 \text{ km/km}^2$, que es un valor moderado según la Tabla 2-1, Capítulo 2.2.

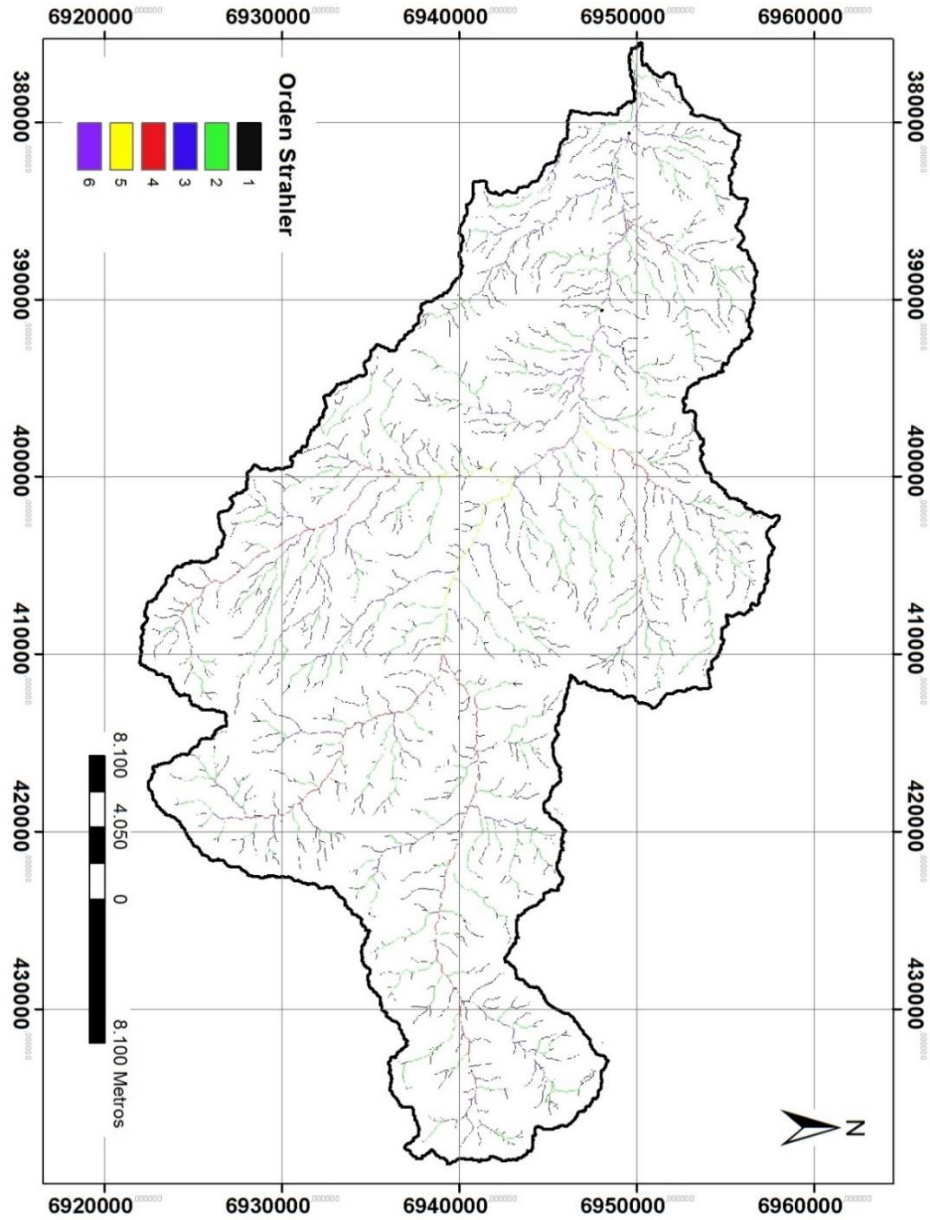


Figura 4-20: Orden de las redes de drenaje de la cuenca de la quebrada carrizalillo, según Strahler

- Curva Hipsométrica**

Los datos se obtuvieron directamente desde el software Arcgis siguiendo una serie de pasos. En primer lugar, se dividió la microcuenca en 12 áreas según rangos de altitud, utilizando la herramienta “reclassify” sobre el archivo ráster. Sobre lo resultante se utilizó la herramienta zonal statistic, que arrojó los valores asociados a cada rango de altitud. Para cada rango se asocia una altitud media y un área, que representa un porcentaje del área total. El área acumulada en porcentajes se graficó versus la altura media para cada intervalo, y así se obtuvo la curva hipsométrica que se muestra en la Figura 4-21. En anexos se encuentra la tabla con los valores específicos para cada cuenca. Además, se incluye en el gráfico la frecuencia de cada altitud media.

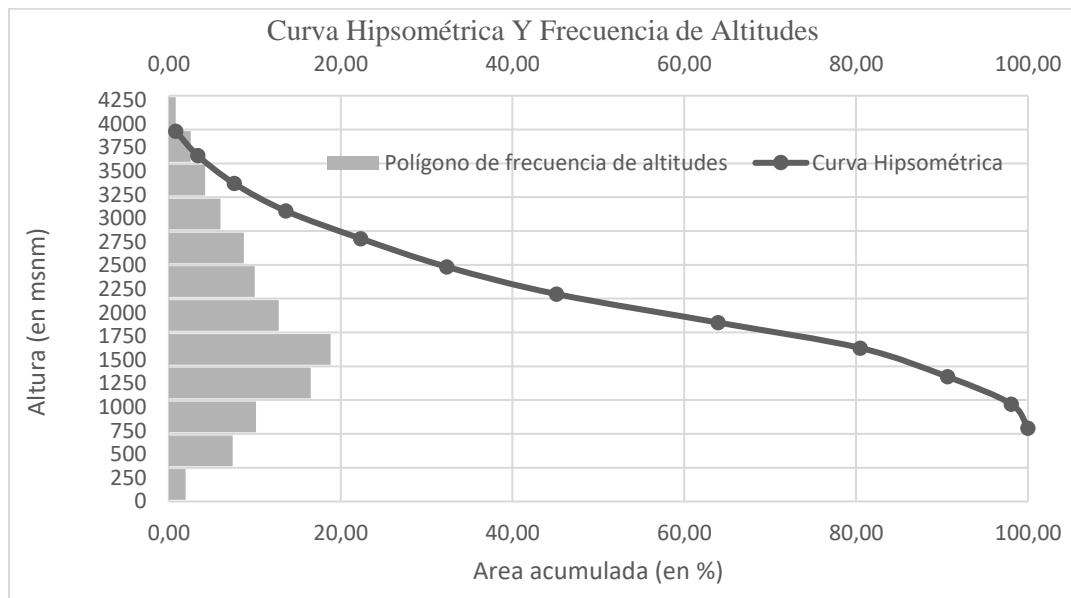


Figura 4-21: Gráfico que incluye la curva hipsométrica y la frecuencia de altitudes para la cuenca de la quebrada Carrizalillo.

La forma de la curva indica que la cuenca está en equilibrio y en fase de madurez, según criterio de Davis (1899), es decir que la deposición y erosión mantienen tasas equivalentes. El promedio de altitudes más frecuentes es 1.895 msnm, con una frecuencia de 18,81%, y un 50% del área de la cuenca está por sobre los 2.250 msnm. Las cotas máxima y mínima son 4279,94 msnm y 423,96 msnm, respectivamente.

Quebrada De Meléndez

Los parámetros geométricos para esta cuenca son:

Tabla 4-7: Parámetros geométricos principales de la cuenca De Meléndez

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
De la superficie		
Area	km ²	55,79
Perímetro de la cuenca	km	51,97
Cotas		
Cota máxima	msnm	1721,75
Cota mínima	msnm	498,10
Centroide (PSC:wgs 1984 UTM Zone 19S)		
X centroide	m	380958,24
Y centroide	m	6958920,41
Z centroide	msnm	1051,10
Altitud		
Altitud media	msnm	1051,10
Altitud más frecuente	msnm	959,13

Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	1034,16
-----------------------------------	------	---------

A partir de estos datos, se pueden obtener los parámetros morfométricos siguientes:

Tabla 4-8: Parámetros morfométricos de cuenca De Meléndez

Parámetro	Unidad	Valor
Relieve	msnm	1223,65
Pendiente media	grados	15,75
Índice de Gravelius		1,95

El índice de Gravelius en este caso es menor al de la cuenca Carrizalillo, por lo que en comparación a ésta, la hoya de la quebrada De Meléndez sería menos alargada, y más aproximada a un círculo, aunque el valor sigue siendo alto.

- Jerarquización de la red de drenaje superficial:
El orden de la quebrada principal De Meléndez es 4. La red de drenaje de la cuenca es mucho más simple y a menor escala que la quebrada Carrizalillo (Figura 4-22).

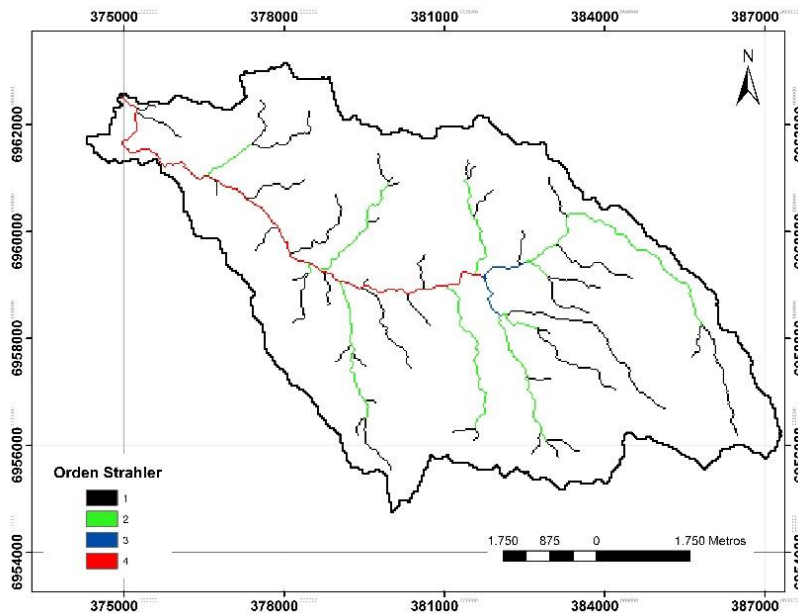


Figura 4-22: Orden de drenaje según Strahler de la cuenca De Meléndez. Arcgis 10.

Tabla 4-9: Detalle de las longitudes totales de la red de drenaje según sus órdenes

orden red	longitud	nº de veces
1	38,44576	44
2	21,2861	21
3	1,876372	4
4	9,815257	18
	71,42349	

Tabla 4-10: Valores asociados a la red hídrica de la cuenca De Meléndez

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
De la Red Hídrica		
Longitud del curso principal	Km	12,03
Orden de la Red Hídrica	UND	6
Longitud de la red hídrica	Km	71,42

En este caso, la densidad de la red de drenaje da $1,28 \text{ km/km}^2$, el cual está dentro del mismo rango que la Carrizalillo, resultando un valor moderado.

- Curva Hipsométrica

Se obtuvo siguiendo los mismos pasos descritos para la cuenca anterior, con la salvedad de que se usaron 10 rangos en vez de 12, debido a su menor escala.

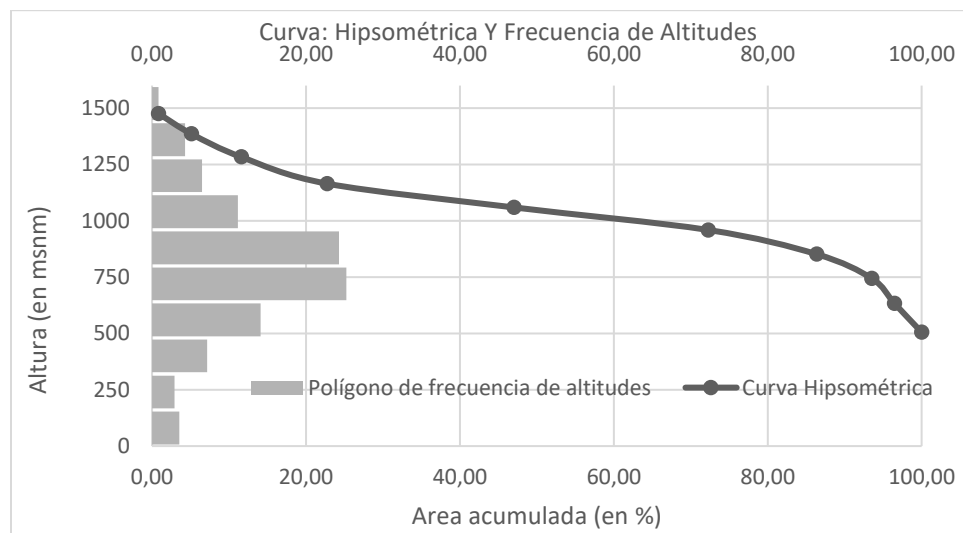


Figura 4-23: Gráfico de la curva hipsométrica y la frecuencia de altitudes de la quebrada De Meléndez

La curva hipsométrica indica una cuenca en etapa de juventud, según criterio de Davis (1899), en comparación con la Carrizalillo. También, las alturas son menores, siendo la cota máxima 1721,75 msnm y la mínima 498,10 msnm. Un 50% de las altitudes están sobre los 1000 msnm, y las altitudes más frecuentes se encuentran en el promedio de 959,13 msnm.

4.3. Evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología de evaluación de susceptibilidad de flujos para las cuencas de Carrizalillo y Meléndez. El cálculo del índice de susceptibilidad se realiza para cada polígono mapeado dentro de las unidades de material disponible de ser removilizado. La Figura 4-24 y la Figura 4-25 muestran los polígonos generados para las cuencas mencionadas.

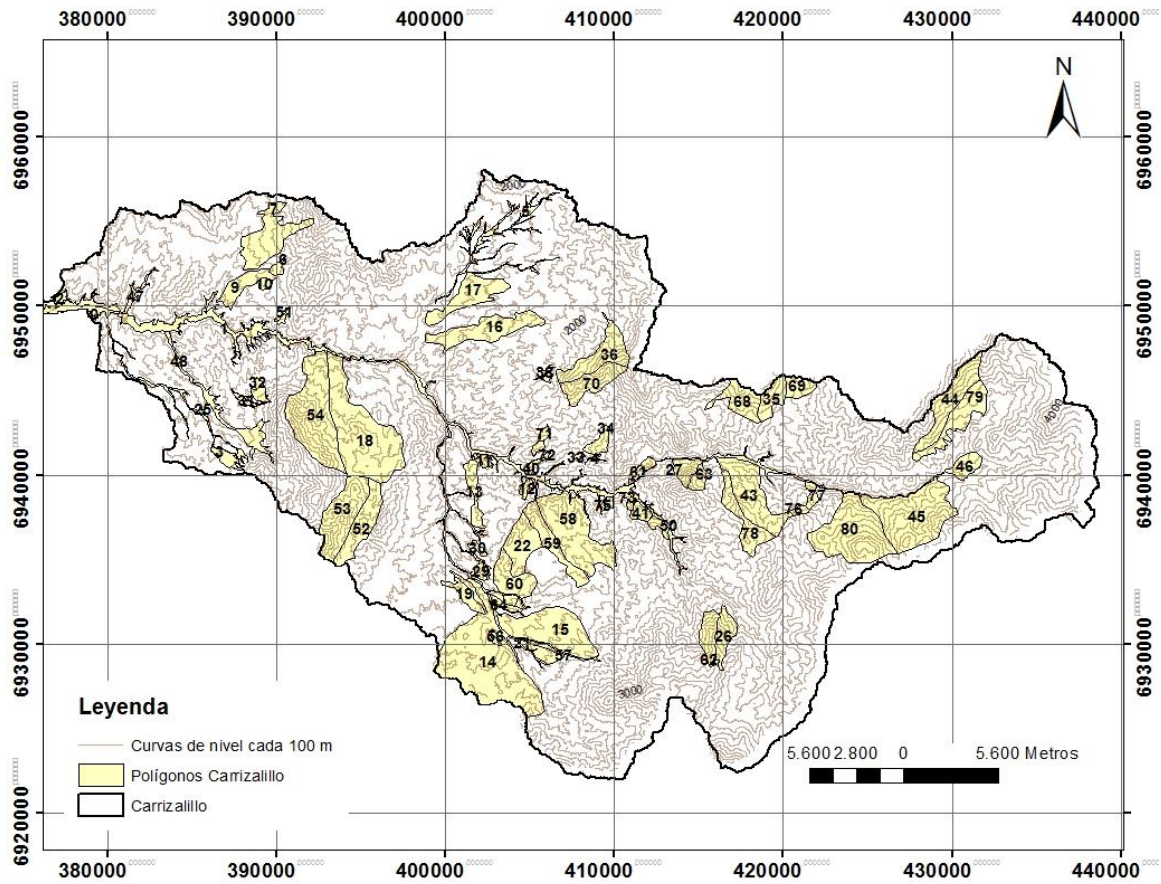


Figura 4-24: Polígonos de cuenca de quebrada Carrizalillo

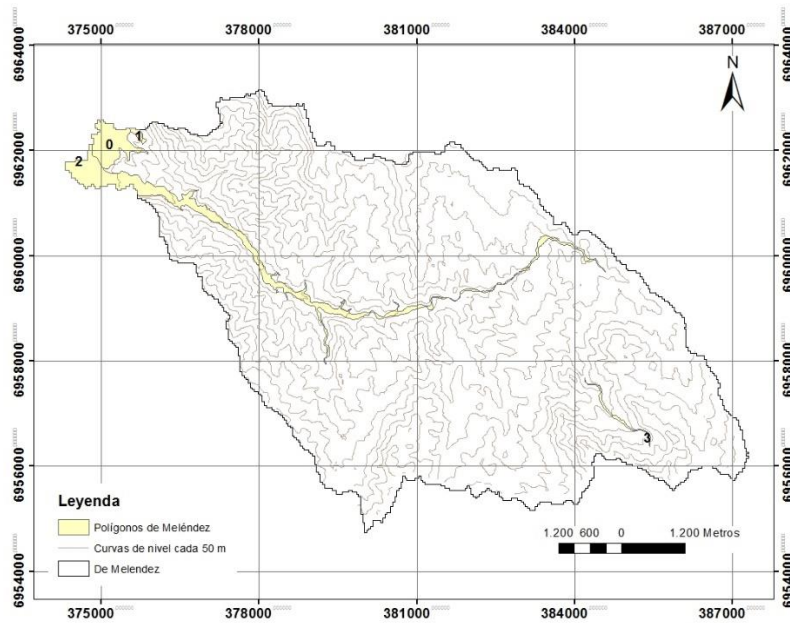


Figura 4-25: Polígonos de cuenca de quebrada de Meléndez

Los criterios para la asignación de las ponderaciones de los factores condicionantes (Ver Tabla 4-2, Capítulo 4.1) se mencionan a continuación. (Los resultados en detalle de esta ponderación se pueden ver en Anexo C).

Para la asignación de la ponderación asociada a pendientes se calculó mediante Arcgis el promedio de pendientes de cada polígono definido.

Para el valor de hidrología, se calculó la densidad de drenaje para cada microcuenca (Anexo B) de la cuenca Carrizalillo, según se explicó en la metodología. Luego, el polígono definido adoptó el valor de densidad de drenaje de la microcuenca en la que cayó. Para este parámetro, la cuenca de la quebrada De Meléndez no fue dividida.

A partir de las características de los materiales mencionados en capítulo de geología local y material disponible, se han asignado los ponderados correspondientes a la geología-geotecnia del material, para la evaluación de la susceptibilidad. De esta forma, los polígonos asociados tienen las siguientes ponderaciones:

Tabla 4-11: Ponderaciones del factor Geología y geotecnia

Polígonos en:	Ponderación
Depósitos aluviales	Favorable 20%
Zonas de alteración	Poco favorable 10 %, y favorable 20% en algunas zonas donde se notaba más material suelto
Depósitos aluviales y coluviales antiguos	Poco favorable 10%
Cubierta coluvial	Poco favorable 10%
Suelo con plantaciones de parras	Muy poco favorable 5%
Depósitos de relave	Favorable 20%

El ponderador de acumulación de nieve fue asignado como estacional (2%) para cumbres mayores a 2.000 metros, y 0% para el resto de la hoya. La cobertura vegetal fue asignada como alta (0%) en los polígonos con material de plantaciones, y nula a baja (5%) para el resto de la hoya.

Se consideró la obstrucción de drenaje de la quebrada principal en ambos casos y se asignó un valor de 10% para los polígonos correspondientes a las quebradas, y 0% para el resto de los polígonos.

Los eventos declarados en la hoya de la quebrada Carrizalillo se consideran como existentes históricos, dada la ocurrencia de los eventos del año 2015.

4.3.1. Carrizalillo

A partir de la descripción de los parámetros morfométricos se puede tener una idea general de la susceptibilidad de la cuenca. Datos como el área indican que esta cuenca tiene una superficie importante y grandes diferencias de altitudes (relieve = 3855,98 msnm), lo que resulta favorable para la generación de flujos de detritos. Además, su hoya alcanza zonas donde ocurre precipitación líquida y sólida (ver capítulo 3.3. Clima), que son gatillantes de

flujos. Sin embargo, este análisis se centrará en la potencialidad de la cuenca de generar, sin aplicar la estadística de que ello ocurra.

Aplicando la metodología propuesta se generó el siguiente mapa de susceptibilidad:

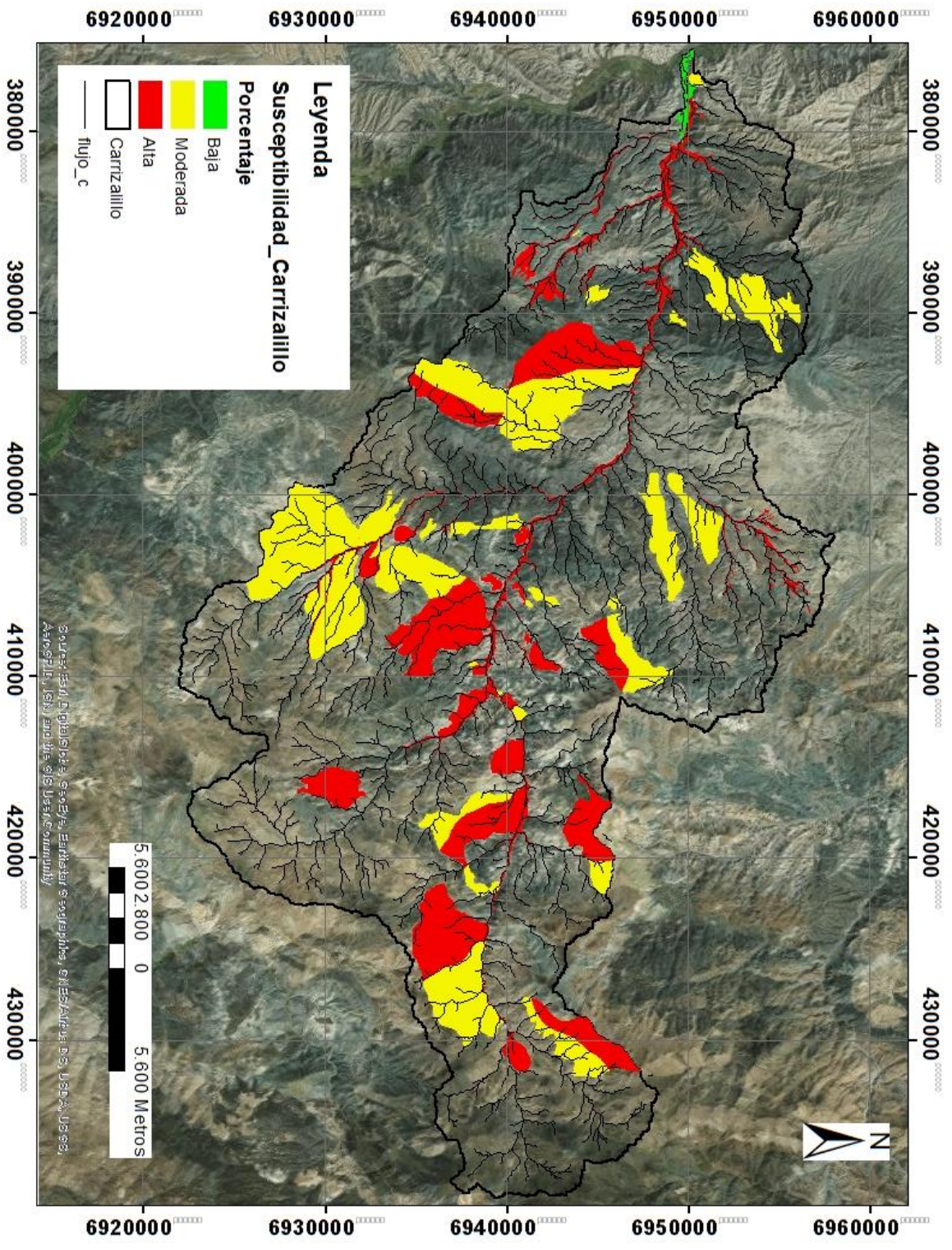


Figura 4-26: Mapa de susceptibilidad de ocurrencia de flujos de detritos en la quebrada Carrizalillo según metodología propuesta. Imagen generada con Arcgis 10.3

En el mapa se indica susceptibilidad baja que corresponde a índices de susceptibilidad entre 0% y 25%, moderada entre 25% y 50%, y alta entre 50% y 75%. Se observa una susceptibilidad de moderada a alta en la mayor parte de la hoya con material removible, influyendo mucho el tipo de material involucrado, siendo los depósitos aluviales los de mayor susceptibilidad de generación. Las pendientes mayores a 25° son un factor condicionante clave, que sólo ocurren en zonas topográficamente altas, por lo que en las quebradas sólo influye el material y la red de drenaje. La intervención antrópica en la quebrada principal se asocia a actividad minera, y se consideró por la presencia de depósitos de relave hacia la desembocadura. Más hacia el interior no se ven depósitos de ese tipo, pero sí existen excavaciones debido a rubros mineros. El material provendría de coluvios, zonas de alteración, y serían arrastrados por las quebradas llevando consigo material aluvial antiguo.

4.3.2. De Meléndez

La cuenca asociada a esta quebrada es de menor área y relieve (55,79 km² y 1223,65 msnm respectivamente), por lo que se infiere de antemano que es considerablemente menos susceptible de generar flujos de detritos en comparación con la quebrada Carrizalillo.

El mapa de susceptibilidades obtenido utilizando la metodología es el siguiente:

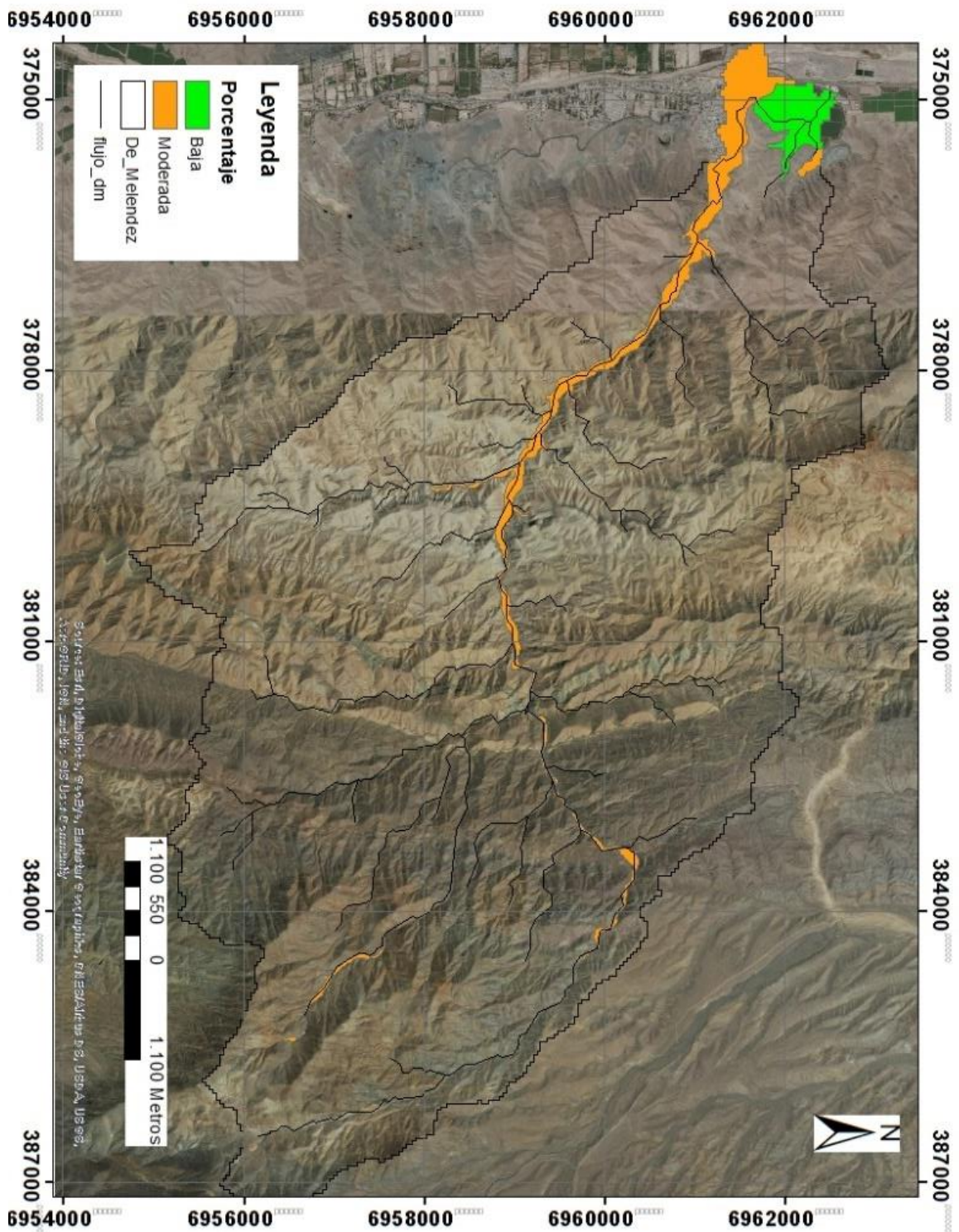


Figura 4-27: Mapa de susceptibilidad de ocurrencia de flujos de detritos en la quebrada de Meléndez según metodología propuesta. Imagen generada con Arcgis 10.3

En el mapa se indica susceptibilidad baja que corresponde a índices de susceptibilidad entre 0% y 25%, y moderada entre 25% y 50%.

Los depósitos aluviales correspondientes a gravas arenosas resultan ser moderadamente susceptibles a generar nuevos flujos si es que ocurre el gatillante, que en este caso es la precipitación líquida. Sin embargo, a lo largo de la quebrada y en una pequeña quebrada en la ladera, las pendientes son menores a 25°, por lo que es muy difícil que el material removible pueda ser movilizado una vez activado.

5. Discusiones

5.1. Con respecto a la metodología

En este trabajo se ha adaptado y aplicado una metodología para evaluar la susceptibilidad de ocurrencia de flujos de detritos en ambientes montañosos, y ha sido aplicada en la comuna de Tierra Amarilla en las quebradas Carrizalillo y de Meléndez, ubicadas en el sector cordillerano y precordillerano. A continuación, se discuten algunos aspectos del trabajo.

Respecto a la metodología, ésta es básicamente una modificación de la metodología de Lara, 2007, alterando los factores condicionantes que se consideraron relevantes para la activación de las cuencas en la zona estudiada. A diferencia de la metodología de referencia, no toda el área estudiada fue dividida en polígonos, sino principalmente mediante observación de imágenes se realizó una selección de áreas con material disponible a ser removido, el cual se dividió en polígonos de características geomorfológicas similares, para luego aplicar sobre éstos la ponderación de factores condicionantes. Se conservaron las ponderaciones para los factores condicionantes pre-desglose (comparar Tabla 4-1 y Tabla 5-1).

Tabla 5-1: Ponderación máxima de factores condicionantes de flujos, según metodología de Lara, 2007

FACTOR		%
GEOMORFOLOGÍA	pendientes de laderas	35%
	pendiente canal de drenaje	
	encajamiento canal de drenaje	
	exposición al sol	
GEOLOGÍA- GEOTECNIA	características geológicas-geotécnicas del material	35%
	condiciones de humedad y saturación	
CLIMA- VEGETACIÓN	acumulación de nieve	10%
	cobertura vegetal	
ANTRÓPICO	obstrucción de canal de drenaje	10%
	desestabilización artificial de laderas	
ANTECEDENTES	aluviones declarados en la hoya	10%

La metodología fue adaptada para ser aplicada en zonas cordilleranas y en cuencas de una cierta extensión con flujo principal kilométrico. El estudio se hizo a escala 1:250.000 para quebrada Carrizalillo y 1:50.000 para quebrada de Meléndez.

Del factor geomorfología se eliminó el subfactor encajamiento de canal de drenaje por no considerarse relevante, ni fácilmente observable a la escala de estudio en las cuencas analizadas. También se descartó el subfactor exposición al sol, ya que en esta región éste es prácticamente equitativo en la superficie terrestre. Se agregó el subfactor hidrología, representado por el valor densidad de drenaje, considerado representativo de la presencia de redes de drenaje que faciliten el transporte de la remoción de suelo en forma de flujo. Los valores en este caso fueron obtenidos directamente del análisis de los modelos de elevación digital para cada cuenca de manera cuantitativa.

Del factor geología-geotecnia sólo se consideró relevante las características geológicas - geotécnicas del material y si son o no favorables para la remoción. Este factor es meramente cualitativo, y al ser cuencas muy extensas, no pudo obtenerse mediante observación directa de terreno, sino más bien por medio de observación de cartas geológicas e imágenes satelitales. Sin embargo, estas últimas proporcionaban imágenes de bastante calidad para poder discernir qué tipo de material cubría las laderas de cada cuenca.

El resto de los factores fueron considerados de manera similar a la metodología original.

5.2. Con respecto a los resultados

Respecto a los resultados, se condicen con lo esperado, sobre que hay mayor susceptibilidad de generación de flujos de detritos en la quebrada Carrizalillo antes que la quebrada de Meléndez. Además, la cuenca Carrizalillo, al ser más extensa y alcanzar zonas donde precipita en estaciones secas, tiene mayor probabilidad, a priori, de desencadenar flujos de detritos y barro. No así la cuenca De Meléndez.. En ambas cuencas son los depósitos aluviales los más susceptibles, a pesar de ubicarse en zonas bajas topográficamente. En estas zonas, el factor geología y geotecnia son los que aumentan la susceptibilidad del área. La Carrizalillo posee, como se observó en el evento del 2015, una gran energía de transporte, que alcanzó distancias kilométricas con el flujo generado, afectando el abanico de deposición en la desembocadura, uniéndose con el río Copiapó. Es esperable ese comportamiento al observar las diferencias de relieve, lo que produce per sé un potencial gravitatorio importante. El relieve de la cuenca De Meléndez es menor, por lo tanto, su potencial sería bajo. Se observa en la desembocadura de esta cuenca, un abanico con asentamiento urbano, el cual podría representar el alcance de un posible flujo.

La cuenca de Meléndez presenta laderas con rocas diaclasadas, y eso podría aportar a otros eventos de remoción en masa como caídas de roca, deslizamientos rotacionales o traslacionales, y toppling.

5.3. Con respecto a los parámetros morfométricos

La descripción geomorfométrica anterior a la generación de mapas de susceptibilidad aporta información sobre el comportamiento general de la hoya hidrográfica, y no debe ser ignorada. Sirve para concluir respecto a la susceptibilidad general sumado a los mapas.

Respecto a la descripción geométrica de ambas cuencas, los valores de área y perímetro aumentan la susceptibilidad en este caso mientras mayores sean, pues ello significa abarcar zonas más altas, con más material disponible para ser movilizado. El relieve, la pendiente media y el índice de Gravelius, expuestos en las tablas Tabla 4-4 para la quebrada Carrizalillo y Tabla 4-8 para la quebrada de Meléndez, indican el potencial gravitatorio de la hoya en general y la geometría de la cuenca, que tiene que ver con su madurez. Se observa entonces, que el valor de relieve para la quebrada Carrizalillo es considerablemente mayor que el de la quebrada De Meléndez, 3855,98 metros vs 1223,65 metros, lo que indica una mayor

susceptibilidad de la primera cuenca de generar eventos gravitatorios de remociones en masa. En el caso de la pendiente media, el valor es bajo para ambas cuencas, 17° y $15,75^\circ$ respectivamente, lo que no aporta información sobre la distribución de pendientes, que son muy bajas en algunas zonas y muy altas en otras, como se vio en el capítulo 4.2.3, pero aporta información sobre la velocidad media de la escorrentía, su poder de arrastre y erosión, y es levemente mayor en la quebrada Carrizalillo. No indica susceptibilidad de generación, pero sí potencial destructivo. El índice de Gravelius es un buen indicador de la geometría de la cuenca. Este valor dio 2,33 en el caso de la quebrada Carrizalillo y 1,95 para la quebrada de Meléndez. Indica que ambas cuencas son alargadas, siendo mayor esta característica en el primer caso. Cuenas más circulares tienden a generar mayores crecidas debido a su simetría, por lo que es un indicador del potencial de inundación, que sería mayor en la quebrada de Meléndez que en la Carrizalillo. Tampoco es un indicador de la susceptibilidad de generación, sino que de la capacidad de captar agua en una cuenca, que se relaciona con el factor gatillante referido a las lluvias.

Las curvas hipsométricas aportan información conjunta del relieve, distribución de altitudes, potencial erosivo y sedimentario de una cuenca. En ambos casos las curvas hipsométricas indican fases de madurez, sin embargo la De Meléndez es más joven, pues el área sobre la curva es menor. El área bajo la curva indica cuánto ha sido erosionada la cuenca, siendo mayor cuando ha sido menos erosionada. La quebrada Carrizalillo ha tenido mayor historia erosiva, lo que indica que el área bajo la curva sería el potencial erosivo que posee. La quebrada de Meléndez tendría mayor potencial erosivo, y puede deberse a que no se han registrado eventos históricos en la hoya que hayan erosionado material.

El análisis geomorfométrico permite complementar los resultados de susceptibilidad obtenidos mediante la metodología presentada.

Este estudio se considera relevante para otorgar información sobre eventuales catástrofes, que puedan ser incluidas en planes de emergencia.

5.4. Recomendaciones

Se recomienda, en primer lugar, realizar análisis de ocurrencia de otro tipo de remociones en masa en la hoya de la quebrada De Meléndez, puesto que presenta condiciones geológicas y geotécnicas de desarrollar otro tipo de eventos como caídas de rocas y deslizamientos. Asimismo, se recomienda análisis estadístico de intensidad de precipitaciones para predecir un eventual peligro de flujos de detritos. Debe considerarse que mayor tiempo de sequía ayuda a aportar más material removible a la hoya.

6. Conclusiones

Finalmente, se puede concluir:

- El área de estudio se ubica en la región de Atacama, hacia la zona cordillerana, donde predomina un clima desértico de interior. La zona se caracteriza por presentar unidades sedimentarias marinas, intrusivas y calderas de colapso, asociadas a zonas de alteración hidrotermal que presentan mineralización. Las unidades de suelo presentes son, principalmente, depósitos aluviales a lo largo de ambas quebradas, coluvios en altitudes mayores, suelos asociados a zonas de alteración, depósitos aluviales y coluviales antiguos descritos en las cartas geológicas y depósitos antrópicos asociados a relaves mineros.
- La metodología propuesta en este trabajo es una modificación de Lara, 2007, y ayuda a predecir el comportamiento de cuencas en cuanto a su susceptibilidad de generar flujos de detritos en ambientes montañosos.
- Se determinó que para el área de estudio los factores condicionantes a considerar en la evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos son la pendiente de laderas, pendiente del canal de drenaje, densidad de drenaje, geología y geotecnia de los materiales, clima y vegetación, intervención antrópica y antecedentes históricos. Entre estos, se considera como más relevantes para la susceptibilidad el relieve, y la geotecnia del material disponible.
- La metodología permite generar mapas de susceptibilidad que indican zonas (polígonos) con distintos grados de susceptibilidad, y debe ser utilizada como parte de un análisis conjunto con datos generales sobre la cuenca.
- La quebrada Carrizalillo posee una hoya que es altamente susceptible a generar nuevos flujos de detritos, removilizando material presente en las quebradas, y transportando material en laderas de alta pendiente y densidad de drenaje.
- La quebrada De Meléndez posee una hoya con poca área aportante, y susceptibilidad media de generar flujos de detritos.
- Los parámetros geomorfológicos cuantitativos aportan información descriptiva de las cuencas, y se correlacionan con los resultados de la metodología, otorgando soporte sobre su confiabilidad.

7. Bibliografía

- Arévalo V., Carlos; SERNAGEOMIN (2005). Carta Copiapó, región de Atacama, Escala 1:100.000 [monografías]. 54 p.: 1 mapa pleg (Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica: 91)
- Arévalo V., Carlos; SERNAGEOMIN (2005). Carta Los Loros, región de Atacama, Escala 1:100.000 [monografías]. 54 h.: il., 1 mapa pleg (Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica: 92)
- Bloom, 1998. *Geomorphology, a systematic analysis of late cenozoic landforms*. Third edition, Department of Geological Sciences, Cornell University.
- Bovis, M., Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth surface processes and landforms* 24, n. 11, p. 1039-1054.
- Castro et al. (2010) “Peligros naturales en geositorios de interés patrimonial en la costa sur de Atacama”
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Mc-Graw Hill. Santa Fé de Bogotá. 584 p.
- CONAMA, DGA (2009). Estrategia nacional de gestión integrada de cuencas hidrográficas. Plan de gestión para la cuenca del río Copiapó.
- Delgadillo, A. y Páez. 2008. Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. En: Ferrer, C. y Dugarte, M. (editores). Inédito.
- DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Copiapó.
- DGA (1986). Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000.
- Fuentes, F., Coloma, F., Ferrando, R., Merino, R. (2015). Efectos geológicos del evento meteorológico del 24 al 26 de Marzo, 2015 en los poblados aledaños a Tierra Amarilla y Nantoco, III Región de Atacama, Chile.
- González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Pearson, 744p.
- Hauser, Arturo (2000), Remociones en masa en Chile. SERNAGEOMIN, 89 p. (Boletín : n° 59)
- Highland, L.M., and Bobrowsky, Peter (2008). *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Iriarte D., S.; Arévalo V., C.; Mpodozis M., C.; SERNAGEOMIN (1999). Hoja La Guardia, región de Atacama, Escala 1 :100.000 [monografías]. 1 mapa pleg. (Mapas Geológicos: n.13)
- Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 212 p.
- Nettleton, I. M., Martin, S., Hencher, S., Moore, R. (2005), *Scottish road network landslides study*.
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, ONEMI. (2015). Monitoreo por evento hidrometeorológico, 25 de Marzo de 2015.

- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas (2007). Movimientos en masa en la región andina, una guía para la evaluación de amenazas. Servicio nacional de geología y minería, publicación geológica multinacional No. 4, 432 p.
- Sánchez, L., Aguilar, G., Börgel, R., Comte, D., Ortega, F., Regard, V. (2015). Estudio de los aluviones e inundación de Tierra Amarilla asociado a las lluvias torrenciales de marzo de 2015.
- Sepúlveda, S.A. (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 de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- SERNAGEOMIN (2015). Caracterización de las principales cuencas afectadas durante el evento meteorológico del 24 y 26 de marzo de 2015. Informe elaborado por Paula Olea y Silvia Arce.
- SERNAGEOMIN (2015). Informe de emergencia Norte 2: Efectos geológicos del evento meteorológico de marzo de 2015: Descargas de flujos aluviales durante la tormenta del 24 al 26 de marzo de 2015.
- SERNAGEOMIN (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- Strahler, A. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. Eos, Transactions American Geophysical Union, 38(6), 913-920.
- SUBDERE (2013). Guía Análisis y Zonificación de Cuencas Hidrográficas para el Ordenamiento Territorial.
- Tarbuck, E., Lutgens, F. (2005). Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física. Prentice Hall, Madrid. 686 p.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33
- Wilford, D., Sakals, M., Innes, J., Sidle, R. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics.

8. Anexos

ANEXO A: Tablas con los valores correspondientes a cada cuenca para el cálculo de la curva hipsométrica

Tabla 8-1: Valores para cálculo de la curva hipsométrica de la cuenca Carrizalillo

Nro	cota (msnm)			ig			
	Mínimo	Máximo	Promedio	Intervalo	Acum	%acum	%inter
1	577	872	778,3955	21,23	1083,04	100,00	1,96
2	873	1167	1032,7	80,29	1061,81	98,04	7,41
3	1168	1462	1321,691	110,08	981,52	90,63	10,16
4	1463	1758	1626,755	178,92	871,45	80,46	16,52
5	1759	2053	1895,763	203,71	692,52	63,94	18,81
6	2054	2349	2197,699	138,54	488,81	45,13	12,79
7	2350	2644	2486,944	108,29	350,27	32,34	10,00
8	2645	2939	2785,989	94,71	241,98	22,34	8,75
9	2940	3235	3079,445	64,97	147,26	13,60	6,00
10	3236	3530	3370,685	45,83	82,29	7,60	4,23
11	3531	3825	3665,829	27,78	36,46	3,37	2,57
12	3826	4121	3924,35	8,67	8,67	0,80	0,80

Tabla 8-2: Valores para cálculo de la curva hipsométrica de la cuenca De Meléndez

Nro	cota (msnm)			ig			
	Mínimo	Máximo	Promedio	Intervalo	Acum	%acum	%inter
1	463	572	505,6235	1,92	54,37	100,00	3,54
2	573	681	633,8425	1,59	52,44	96,46	2,92
3	682	790	743,7172	3,90	50,86	93,54	7,17
4	791	900	851,5145	7,66	46,96	86,37	14,08
5	901	1009	959,1347	13,72	39,30	72,29	25,23
6	1010	1118	1059,123	13,22	25,58	47,06	24,31
7	1119	1228	1164,742	6,06	12,37	22,74	11,15
8	1229	1337	1283,114	3,52	6,30	11,59	6,47
9	1338	1446	1385,517	2,33	2,78	5,12	4,29
10	1447	1556	1475,882	0,45	0,45	0,82	0,82

ANEXO B: datos para el cálculo de la densidad de drenaje en la cuenca de la quebrada Carrizalillo

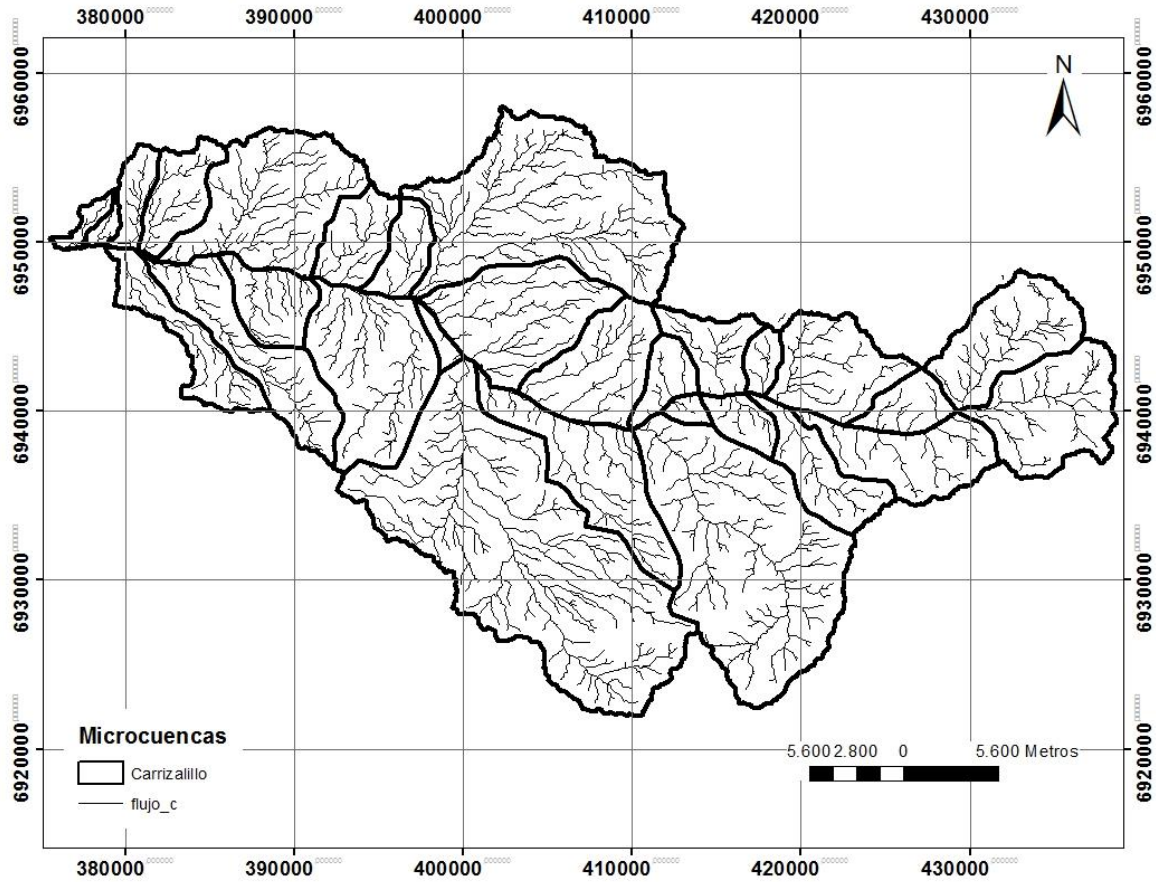


Figura 8-1: División de cuenca Carrizalillo en microcuencas para el cálculo de la densidad de redes de drenaje para cada una

Tabla 8-3: Detalle de los datos usados para el cálculo de la densidad de drenaje (Dd) para cada microcuenca definida para la quebrada Carrizalillo

Microcuenca	Long. red	Área cuenca	Dd
0	33,16	36,62	0,905516
1	4,46	4,18	1,066986
2	2,32	3,19	0,727273
3	47,83	40,42	1,183325
4	50,28	46,8	1,074359
5	151,76	132,03	1,149436
6	253,54	188,6	1,344327
7	37,53	25,85	1,451838
8	13,27	10,38	1,27842
9	24,92	19,8	1,258586
10	53,19	41,67	1,276458

11	31,37	20,32	1,543799
12	83,62	63,66	1,313541
13	74,98	60,9	1,231199
14	1,22	3,93	0,310433
15	58,29	48,12	1,211347
16	25,2	20,27	1,243217
17	16,92	14,16	1,194915
18	155,44	112,35	1,383534
19	40,38	37,73	1,070236
20	68,7	53,11	1,293542
21	2,79	3,63	0,768595
22	10,95	11,99	0,913261
23	11,74	10,51	1,117031
24	19,61	18,15	1,080441
25	24,41	25,36	0,962539
26	8,07	7,14	1,130252
27	40,44	36,03	1,122398
28	12,27	13,97	0,878311

ANEXO C: Factores de susceptibilidad para cada polígono definido para cada cuenca,

Tabla 8-4: Cálculo de susceptibilidad de la hoya de la quebrada Carrizalillo

Poligono	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	IS
1	0%	1%	5%	5%	0%	0%	5%	10%	26%
2	5%	5%	5%	35%	0%	5%	5%	10%	70%
3	5%	1%	5%	10%	0%	5%	10%	10%	46%
4	5%	1%	5%	35%	0%	5%	0%	10%	61%
5	5%	5%	5%	35%	0%	5%	0%	10%	65%
6	5%	5%	5%	35%	0%	5%	0%	10%	65%
7	10%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
8	5%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	50%
9	5%	10%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
10	5%	10%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
11	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
12	15%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
13	15%	1%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	56%
14	10%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
15	5%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	50%
16	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
17	5%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	50%
18	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
19	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
20	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
21	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
22	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
23	5%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	50%
24	5%	1%	0%	20%	0%	5%	0%	10%	41%
25	15%	10%	0%	10%	0%	5%	0%	10%	50%
26	5%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	50%
27	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
28	15%	5%	0%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
29	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
30	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
31	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
32	5%	10%	5%	35%	0%	5%	0%	10%	70%
33	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
34	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
35	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
36	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
37	10%	10%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	50%
38	5%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	50%
39	5%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	50%
40	10%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
41	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
42	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
43	15%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	65%
44	10%	10%	0%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
45	10%	5%	5%	20%	2%	5%	0%	10%	57%
46	10%	10%	0%	10%	1%	5%	0%	10%	46%
47	10%	10%	5%	20%	2%	5%	0%	10%	62%
48	5%	1%	5%	35%	0%	5%	0%	10%	61%
49	5%	1%	5%	35%	0%	5%	0%	10%	61%
50	5%	5%	5%	35%	0%	5%	0%	10%	65%
51	5%	5%	5%	35%	0%	5%	0%	10%	65%
52	10%	10%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	50%
53	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
54	10%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%

55	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
56	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
57	10%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
58	10%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
59	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
60	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
61	10%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
62	10%	10%	0%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
63	15%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	65%
64	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
65	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
66	10%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
67	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
68	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
69	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	60%
70	5%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	50%
71	15%	10%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	55%
72	10%	10%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	50%
73	5%	5%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	40%
74	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
75	10%	5%	5%	20%	0%	5%	0%	10%	55%
76	10%	10%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	50%
77	10%	10%	0%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
78	10%	10%	0%	10%	0%	5%	0%	10%	45%
79	10%	10%	5%	10%	0%	5%	0%	10%	50%
80	5%	5%	5%	10%	2%	5%	0%	10%	42%
81	10%	10%	0%	20%	2%	5%	0%	10%	57%

Tabla 8-5: Cálculo de susceptibilidad de hoja de quebrada De Meléndez

Poligono	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	IS
1	0%	5%	5%	5%	0%	0%	0%	1%	16%
2	5%	1%	5%	10%	0%	5%	5%	1%	32%
3	5%	5%	5%	20%	0%	5%	10%	1%	51%
4	10%	10%	5%	20%	0%	5%	0%	1%	51%