

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

EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE FACTORES GENERADORES DE FLUJOS DE  
DETRITOS DURANTE EL EVENTO DEL 25 DE MARZO DE 2015 EN LA CUENCA  
DEL VALLE DEL HUASCO, COMUNA DE VALLENAR, III REGIÓN DE ATACAMA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

VÍCTOR YURI FREDES SILVA

PROFESOR GUÍA:

Dr. GERMÁN AGUILAR MARTORELL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

Dr. SERGIO SEPULVEDA VALENZUELA

Msc. MARISOL LARA CASTILLO

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**POR:** Víctor Yuri Fredes Silva

**FECHA:** 17/06/2016

**PROFESOR GUÍA:** Germán Aguilar Martorell

**EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE FACTORES GENERADORES DE FLUJOS DE  
DETRITOS DURANTE EL EVENTO DEL 25 DE MARZO DE 2015 EN LA CUENCA  
DEL VALLE DEL HUASCO, COMUNA DE VALLENAR, III REGIÓN DE ATACAMA**

El temporal extremo que afectó al norte y centro de Chile a fines de Marzo de 2015 (25M), produjo distintos procesos de remociones en masa del tipo flujo con consecuencias catastróficas para la población que habita en las riberas de los ríos El Carmen y El Tránsito (Región de Atacama). El presente trabajo tiene por finalidad evaluar los factores que determinaron la generación, la magnitud y el tipo de estos flujos, con el fin de conocer cuáles subcuencas son más susceptibles a producirlos. La metodología aplicada consiste en un análisis estadístico comparativo de los principales parámetros morfométricos, hidrográficos y litológicos de las subcuencas para determinar su influencia en la susceptibilidad de generar flujos y la confrontación de estos datos con la activación de las subcuencas durante el 25M.

Los parámetros morfométricos e hidrográficos que influyen en la susceptibilidad de las subcuencas a producir flujos son: el área, el perímetro, la pendiente media, el orden jerárquico de la red de drenaje y las razones de Melton y relieve. Estos parámetros fueron integrados en dos factores: el Factor de Escala y Factor de Retención. El Factor de Escala, referido al tamaño de las subcuencas, resultó ser relevante para la activación y magnitud de los depósitos generados durante el 25M, con una relación positiva en la generación de flujos. El Factor de Retención, referido a la capacidad de almacenar sedimentos, resultó ser relevante en la presencia de un reservorio de detritos dentro de las subcuencas, susceptible a ser removido.

La litología también juega un rol determinante en la factibilidad de generación de flujos en las subcuencas analizadas (Factor Litológico), obteniéndose que aquellas subcuencas constituidas mayormente por rocas intrusivas sean menos propensas a producir flujos. También la geología tiene influencia en el tipo de flujo desencadenado. En subcuencas con alta presencia de lutitas y limolitas se desencadenaron mayormente flujos de barro, mientras que en aquellas que presentan un porcentaje importante de rocas metamórficas se desarrollaron flujos de detritos.

Con los datos de las subcuencas activadas durante el 25M se determinaron valores críticos en los factores, que marcan la susceptibilidad de una subcuenca a generar flujos. De esta forma se determinó que un 80% de las subcuencas identificadas como susceptibles, según estos factores, fueran activadas durante el 25M. Con base en lo planteado, este trabajo establece las condiciones necesarias en ambientes semiáridos para identificar a una subcuenca como susceptible a generar remociones del tipo flujo, diferenciando la magnitud y tipo del depósito a producirse durante eventos de precipitaciones intensas.

## **Agradecimientos**

El presente trabajo fue desarrollado en el *Advanced Mining Technology Center* de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Agradezco a mi profesor guía Dr. Germán Aguilar por sus comentarios, enseñanzas y buena disposición para desarrollar este trabajo en conjunto. Así también agradezco a los profesores Dr. Sergio Sepúlveda y Msc. Marisol Lara por su revisión y comentarios a la primera versión de este trabajo.

Agradezco a Dios y a mi familia en especial mis padres Ximena y Ricardo, hermanos Ricardo y Nicolás, hermana Francisca, abuelos Tata y Tina y a mi polola Jimena por todo su cariño y apoyo entregado.

Agradezco a todas las personas que he conocido y me han acompañado durante mis largos años de estudio; profesores, compañeros y amigos del colegio, de la universidad y del trabajo.

Agradezco poder haber estudiado esta hermosa disciplina, que me ha permitido conocer lugares extraordinarios, conocer personas valorables y vivir experiencias increíbles.

En especial quisiera agradecer al profesor de matemáticas Patricio Figueroa (Q.E.P.D) del Instituto Nacional, al profesor Dr. Fernando Barra del Departamento de Geología y al profesor Carlos Vignolo del Departamento de Ingeniería Industrial, quienes me dejaron no sólo enseñanzas académicas, sino que también enseñanzas de vida durante mi proceso de aprendizaje.

*The right man in the right place*

## Tabla de Contenido

1. Introducción .....	1
1.1. Motivación y Formulación del Problema .....	1
1.2. Hipótesis de Trabajo .....	2
1.3. Objetivos .....	2
1.3.1. Objetivo General .....	2
1.3.2. Objetivos Específicos .....	2
1.4. Metodología.....	3
1.5. Resultados Esperados .....	3
1.6. Zona de Estudio: Ubicación y Accesos .....	4
2. Antecedentes.....	5
2.1. Marco Geotectónico y Segmentación Morfoestructural .....	5
2.2. Marco Geológico Local.....	9
2.3. Geología Estructural.....	14
2.4. Clima Regional y Local.....	15
3. Catastro de flujos de detritos-barro activados durante el 25M .....	17
3.1. Evento precipitaciones Marzo 2015 .....	17
3.2. Caracterización de los depósitos ocurridos durante el 25M.....	19
3.2.1. Flujos de Detritos .....	20
3.2.2. Flujos de Barro .....	21
3.3. Clasificación volumétrica de los depósitos .....	22
4. Análisis de las subcuencas .....	24
4.1. Parámetro Litológico .....	24
4.2. Parámetros Morfométricos .....	26
4.3. Parámetros Hidrográficos.....	30
4.4. Análisis estadístico univariable .....	32
4.5. Análisis Multivariable.....	35
4.5.1. Matriz de Correlaciones .....	35
4.5.2. Análisis Factorial .....	36
5. Significancia estadística para activación de flujos en las subcuencas .....	40
5.1. Validación de supuestos previos al análisis de varianza.....	40
5.2. Discriminación de los parámetros en la actividad de las subcuencas .....	41
5.3. Discriminación de parámetros para Clase y Tipo de depósitos.....	44
6. Discusiones .....	46
6.1. Actividad de subcuencas.....	46
6.2. Magnitud y tipo de depósitos.....	47

7. Conclusiones.....	49
8. Bibliografía .....	50
ANEXOS .....	54
<b>Anexo A.</b> Clasificación de los abanicos aluviales generados durante el 25M. ....	55
<b>Anexo B.</b> Ubicación de las subcuencas estudiadas en el valle del Huasco.. ....	56
<b>Anexo C.</b> Superficie grupos geológicos (%) para cada subcuenca .....	57
<b>Anexo D.</b> Resumen parámetros morfométricos e hidrográficos de las subcuencas. ....	59
<b>Anexo E.</b> Teoría estadística básica .....	59
<b>Anexo F.</b> Resultado test ANOVA según factor clase volumétrica .....	62
<b>Anexo G.</b> Resultado test ANOVA según factor tipo de depósito generado. ....	63

### Índice de Tablas

<b>Tabla 2-1.</b> Etapas y subetapas del Ciclo Andino (Jurásico Superior al presente). Modificado de Charrier et al. (2009).....	5
<b>Tabla 2-2.</b> Resumen litoestratigráfico de las unidades, formaciones y depósitos presentes en la zona de estudio a partir de Salazar et al. (2013).....	11
<b>Tabla 2-3.</b> Principales estructuras en el área de estudio. La extensión de las fallas corresponde a la extensión en planta y ha sido estimada dentro de la zona de estudio.....	15
<b>Tabla 3-1.</b> Estaciones de la DGA dentro del área de estudio. Se incluye la información de la precipitación media mensual para el temporal 25M y las precipitaciones medias mensuales para el período 1995-2015 en estas estaciones. ....	18
<b>Tabla 3-2.</b> Clasificación para flujos de detritos y barro según tamaño (Modificado de Jakob, 2005).....	23
<b>Tabla 4-1.</b> Grupos geológicos construidos para estimar la influencia de la geología y meteorización en la producción de material superficial susceptible a ser movilizado. ..	25
<b>Tabla 4-2.</b> Resultados porcentaje y factor grupos geológicos para la subcuenca de la Qda. La Marquesa afluente al río El Carmen. ....	25
<b>Tabla 4-3.</b> Medidas estadísticas de tendencia central y de dispersión de datos para las 13 variables analizadas de las subcuencas. Valores no transformados. ....	32
<b>Tabla 4-4.</b> Matriz de correlaciones para variables analizadas en las subcuencas. Valores sombreados celestes indican correlación positiva (mayor a 0.5) y valores sombreados rosados indican correlación negativa (menor a 0.5). ....	36
<b>Tabla 4-5.</b> KMO y prueba de Bartlett para la totalidad de variables analizadas para las subcuencas. ....	37
<b>Tabla 4-6.</b> Tabla comunalidades.....	37
<b>Tabla 4-7.</b> Varianza total explicada.....	38
<b>Tabla 4-8.</b> Matriz de componentes rotadas, extracción de componentes principales. Método de rotación: Varimax.....	38

<b>Tabla 5-1.</b> Tabla comunalidades.....	40
<b>Tabla 5-2.</b> Test ANOVA para las variables de las subcuencas estudiadas. Variables significativas en la activación de las cuencas se presentan en celdas sombreadas y en negrita. gl: grados de libertad, F: estadístico de Fisher.....	41
<b>Tabla 5-3.</b> Test ANOVA de los grupos geológicos para discriminar la actividad en subcuencas del 25M.....	42
<b>Tabla 5-4.</b> Resumen estadístico univariable de los parámetros influyentes en la actividad de subcuencas para el 25M... ..	42
<b>Tabla 5-5.</b> Estadística univariable de los parámetros significativos en la discriminación por clases de depósitos.....	45
<b>Tabla 5-6.</b> Estadística univariable de los parámetros significativos en la discriminación por tipo de depósitos... ..	45

## Índice de Ilustraciones

<b>Figura 1-1.</b> Ejemplo de flujo de detritos en el sector Los Perales generado durante el evento 25M en la confluencia entre el río El Tránsito y su tributario. ....	2
<b>Figura 1-2.</b> Mapa ubicación zona de estudio. La estrella morada indica la zona de estudio en el mapa de Chile. Mapa de rutas de acceso, modificado de Infraestructura de datos Geoespaciales de Chile (IDE). ....	4
<b>Figura 2-1.</b> Configuración tectónica durante: (A) Cretácico Inferior tardío; (B) Cretácico Superior a Mioceno tardío, (C) Mioceno tardío al presente. El gráfico (D) muestra la tasa de convergencia durante el Cenozoico de las placas Farallon y Nazca con respecto a la placa Sudamericana. (Charrier et al., 2007).....	7
<b>Figura 2-2.</b> Zona de subducción plana ('Flat-Slab') asociada a la dorsal de Juan Fernández, zona carente de volcanismo. Las líneas segmentadas corresponden a contornos de profundidad de la zona de Wadati – Benioff. La estrella morada indica la zona de este estudio. CC: Cordillera de la Costa; CF: Cordillera Frontal; DC: Depresión Central; CD: Cordillera de Domeyko; Pc: Precordillera; CP: Cordillera Principal; SP: Sierras Pampeanas; DS: Depresión Subandina; AP: Altiplano – Puna. Modificado de Charrier et al. (2007). ....	8
<b>Figura 2-3.</b> Mapa Geológico de la zona de estudio basado en la carta geológica de SERNAGEOMIN: "Geología del Área El Tránsito-Lagunillas" (Salazar et al. 2013) sobreimpuesto en relieve sombreado del modelo de elevación digital.....	10
<b>Figura 3-1.</b> En la imagen (A) se observa el esquema de actividad normal de los sistemas de presiones, el ASPS consiste en un anticiclón de alta presión 'H' ubicado por sobre los 30°S mientras que en el sur (~40°S) el sistema de bajas presiones 'L' genera precipitaciones en el sur del país. La imagen (B) ilustra el posicionamiento inusual del sistema de bajas presiones en el norte de Chile, rodeado por sistemas de alta presión que se formaron posteriormente (Imágenes NOAA).....	17
<b>Figura 3-2.</b> (A) Precipitación diaria registrada entre el 22 y 28 de Marzo de 2015 cuando ocurrió el temporal 25M en seis estaciones de la DGA que están dentro del área de estudio. (B) Precipitación media mensual según registro de estaciones de la DGA	

dentro del área de estudio para los últimos 20 años (1995-2015) según el resumen de datos de la Tabla 3-1..... 19

**Figura 3-3.** Ubicación y delimitación de las 126 subcuencas del presente estudio categorizadas según su actividad y tipo de flujo durante el 25M. Los rombos amarillos señalan estaciones meteorológicas de la DGA. Los círculos azules corresponden a depósitos de flujos de detritos y los círculos rojos a depósitos de flujos de barro, en ambos casos el tamaño de los círculos indica el rango del volumen del depósito..... 20

**Figura 3-4.** (A) Diagrama de flujo de detritos (Ilustración modificada del Departamento de Geología de la Universidad de Wyoming. (B) Ejemplo depósito de flujos de detritos ('debris flow'; círculo amarillo) y subcuenca asociada (polígono amarillo) en subcuenca del río El Carmen (Imagen satelital de Google Earth). (C) Fotografía del mismo depósito de flujos de detritos tomada por Aguilar el 16 de Abril 2015. .... 21

**Figura 3-5.** (A) Diagrama flujo de barro, las flechas indican dirección del deslizamiento (Ilustración modificada de Geografía BBC). (B) Ejemplo depósito de flujo de barro (círculo amarillo) y subcuenca asociada (polígono amarillo), ocurrido en la subcuenca oeste del río El Carmen en el sector de La Retama. Imagen satelital de Google Earth, fotografía del depósito tomada por Aguilar el 16 de Abril 2015. .... 22

**Figura 3-6.** Fotografías tomadas por Aguilar et al. (2015) el 16 de Abril de 2015 en la zona de estudio. (A) Flujo de detritos Clase-3 en subcuenca afluente al río El Carmen con destrucción de vehículos; (B) Flujo de barro Clase-3 en subcuenca afluente río El Carmen con destrucción de viñedos; (C) Flujo de detritos Clase-5 en subcuenca afluente río El Tránsito con destrucción y movilización de puente; (D) Flujo de barro Clase-4 en subcuenca afluente río Carmen con destrucción de viviendas. .... 23

**Figura 4-1.** Mapa rango de valores de variable GEO ponderada dentro de cada subcuenca de la zona de estudio. .... 26

**Figura 4-2.** (A) Mapa rango de áreas de las subcuencas analizadas. (B) Mapa rango de pendientes medias para cada subcuenca. (C) Mapa rango índice de Gravelius. (D) Mapa rango valores de razón de Melton dentro de cada subcuenca. Todos los mapas fueron construidos sobre el modelo de elevación digital sombreado. La activación de las subcuencas se refiere al evento del 25M. .... 29

**Figura 4-3.** Red de drenaje fina construida a partir de área drenada mínima de 50 celdas para cada subcuenca. La discriminación de activación de las subcuencas está referida al evento 25M..... 31

**Figura 4-4.** La Imagen (A) muestra un diagrama de red de drenaje jerarquizada según orden de Strahler (Strahler, 1952). La Imagen (B) ilustra la red de drenaje y su orden de Strahler correspondiente para la subcuenca de la Quebrada El Carrizo en la zona de estudio, en este caso el orden mayor es 5. .... 31

**Figura 4-5.** Histogramas de frecuencias para las variables estudiadas: (A) Geo; (B) Area; (C) Largo; (D) Perimetro; (E) Zave; (F) Pendiente; (G) Relieve; (H)  $I_{GRAV}$ ; (I) MRATIO; (J) RRATIO; (K) HRATIO; (L) Densidad; (M) Orden. La curva en cada histograma corresponde a la curva de distribución normal o logaritmo normal (para el área, largo y perímetro). Mean: Media, Std. Dev.: Desviación estándar, N: número de subcuencas. .... 35

**Figura 4-6.** Gráfico de componentes principales. Círculos celestes indican variables pertenecientes al Factor-1, amarillos al Factor-2 y morados al Factor-3..... 39

<b>Figura 5-1.</b> Gráfico de susceptibilidad de generación de flujos de subcuencas y actividad durante el 25M. La zona de susceptibilidad está enmarcada por valores por sobre 2,2 en Factor de Escala (Factor 1), y por debajo de 27,3 en el Factor de Retención (Factor 2).	43
<b>Figura 5-2.</b> Mapa de susceptibilidad de generación de flujos de las subcuencas en la zona de estudio y correlación con la actividad generada durante el 25M. Leyenda en figura .....	44
<b>Figura 6-1.</b> Porcentaje de área superficial media de los distintos grupos geológicos en las 49 subcuencas clasificadas según su tipo de depósito asociado. ....	48
<b>Figura 6-2.</b> Mapa grupos geológicos y su factor litológico asociado dentro del área de estudio. Construido sobre modelo de elevación digital sombreado .....	48



## **1. Introducción**

### **1.1. Motivación y Formulación del Problema**

El evento de precipitaciones intensas que afectó al centro y norte del país entre el 23 y 26 de Marzo de 2015, conocido como *25M*, trajo consecuencias catastróficas para la población. En los ríos El Tránsito y El Carmen, afluentes de la cuenca del Valle del Huasco, se produjeron distintos procesos de remociones en masa del tipo flujo (Figura 1-1), los cuales dañaron viviendas, viñedos, plantaciones, parcelas, animales, cortaron caminos y rutas de acceso. Según datos de la ONEMI (2015) y de la asamblea por el agua "Huasco Alto", en la provincia del Huasco se contabilizaron 17 personas desaparecidas, 105 viviendas completamente destruidas, corte del suministro de agua potable y electricidad, además del corte del camino C-48 que une Vallenar con Alto del Carmen y los caminos C-499 y C-489 que unen El Tránsito y San Félix con Alto del Carmen respectivamente.

La importancia de los flujos de detritos y de barro en áreas montañosas no sólo está referida a la pérdida de vidas y daños a la infraestructura que estos puedan generar, resaltando la importancia de reconocer estos peligros en etapas tempranas de desarrollos de planificación, sino que también estos tipos de flujos son agentes dominantes de denudación y agradación de valles, es decir, cumplen un importante rol en la dinámica de transferencia de materia en las cuencas (Wilford et al., 2004). En la zona de estudio se ha observado que la construcción de abanicos aluviales en la conjunción de tributarios, es un proceso que controla de forma importante la agradación de sedimentos en el Holoceno (Aguilar, 2010).

Lo planteado anteriormente destaca la importancia de reconocer los parámetros que son significantes en la evaluación de quebradas y subcuencas susceptibles de producir este tipo de flujos, aplicable en cuencas de diversos lugares, con el fin último de presentar una zonificación ante los peligros latentes de flujos de detritos y de barro. En base al catastro de los depósitos generados por los flujos aluviales del *25M* y la caracterización de las subcuencas tributarias, este trabajo evalúa cuales son las características morfométricas, hidrográficas y geológicas que influyen en la activación de flujos, además de discriminar entre magnitudes y tipo de los mismos, en subcuencas semiáridas durante episodios de precipitaciones intensas.



**Figura 1-1.** Ejemplo de flujo de detritos en el sector Los Perales generado durante el evento *25M* en la confluencia entre el río El Tránsito y su tributario.

## **1.2. Hipótesis de Trabajo**

La hipótesis de trabajo plantea que las características morfométricas e hidrográficas de las cuencas, así como la litología sobre la cual ellas se han desarrollado, influyeron en la ocurrencia, tipo y magnitud de los flujos producidos durante las precipitaciones de fines de Marzo de 2015 en el sector cordillerano de la cuenca del Valle del Huasco.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Identificar aquellos parámetros morfométricos, hidrográficos y litológicos presentes en las subcuencas de drenaje, significativos estadísticamente, que influyen en la generación de flujos de detritos y barro, entregando resultados que permitan su posterior integración en análisis de evaluación de riesgos hidrometeorológicos.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- ❖ Identificar las subcuencas tributarias activadas y no activadas durante el *25M* en los ríos El Carmen y El Tránsito, discriminado volúmenes y tipos de flujos.
- ❖ Establecer los atributos morfométricos, geológicos e hidrográficos de las cuencas tributarias.
- ❖ Realizar una evaluación y análisis estadístico de los parámetros seleccionados que permitan diferenciar subcuencas propensas a la generación de flujos de detritos y de barro.
- ❖ Confrontar los resultados respecto a la activación de las subcuencas durante el *25M* y los tipos de depósitos involucrados.

#### **1.4. Metodología**

Con el fin de lograr los objetivos antes propuestos se presenta a continuación la metodología establecida para poder realizarlos:

La identificación de las subcuencas activadas durante el 25M se realizó en base a la observación de los depósitos generados por los flujos de detritos y barro, que se desarrollaron en la conjunción de los tributarios asociados a los ríos El Carmen y El Tránsito. Dicha observación se realizó de dos maneras: durante Abril de 2015 Aguilar et al. (2015) realizaron un catastro en terreno de los depósitos que se produjeron en las localidades de El Tránsito y Alto del Carmen, en el sector de la Sierra del Medio. La segunda manera de identificación y además de delimitación de los abanicos de los depósitos fue por medio de un mapeo de imágenes satelitales, posteriores al evento, provenientes del satélite *RapidEye*. Una vez identificados los depósitos fue posible asociarlos a las subcuencas en las cuales se desarrollaron sus respectivos flujos.

La identificación y delimitación de las subcuencas tributarias fue realizada a través de software de sistemas de información geográfica (GIS, *Geographic Information Systems*), previa construcción de la red de drenaje en la zona de estudio mediante el mismo software. La confección de la red de drenaje se logra a partir del modelo de elevación digital (DEM, *Digital Elevation Model*) el cual fue descargado de manera gratuita del servicio japonés *ASTER GDEM*. La grilla de este DEM tiene una resolución y tamaño de celda de 30x30 m.

La caracterización de las subcuencas tributarias, en especial sus atributos de morfometría e hidrografía se determinan a partir de revisión bibliográfica sobre estudios de análisis y propiedades de cuencas hidrográficas (Jakob y Bovis, 1996; Wilford et al., 2004; de Scally y Owens, 2004). Dichos atributos se calcularon por medio de software GIS para todas las subcuencas seleccionadas considerando los datos aportados por el DEM. Además para el estudio de la litología en cada cuenca se ha creado una variable litológica que sintetiza las propiedades mecánicas, erosivas y químicas del sustrato dentro de cada cuenca, según información bibliográfica para distintas litologías o materiales (Salazar et al., 2013; Tarbuck, 2005; González de Vallejos, 2002).

Finalmente el análisis estadístico contempla la clasificación en grupos de las variables por medio de un análisis factorial y la posterior elaboración de un test de comparación de medias (ANOVA de un factor) para las variables de interés con el fin de establecer la influencia por separado y conjunta de los parámetros en la generación y magnitud de flujos de detritos y barro originados en las subcuencas, esto se logra a través de software estadístico.

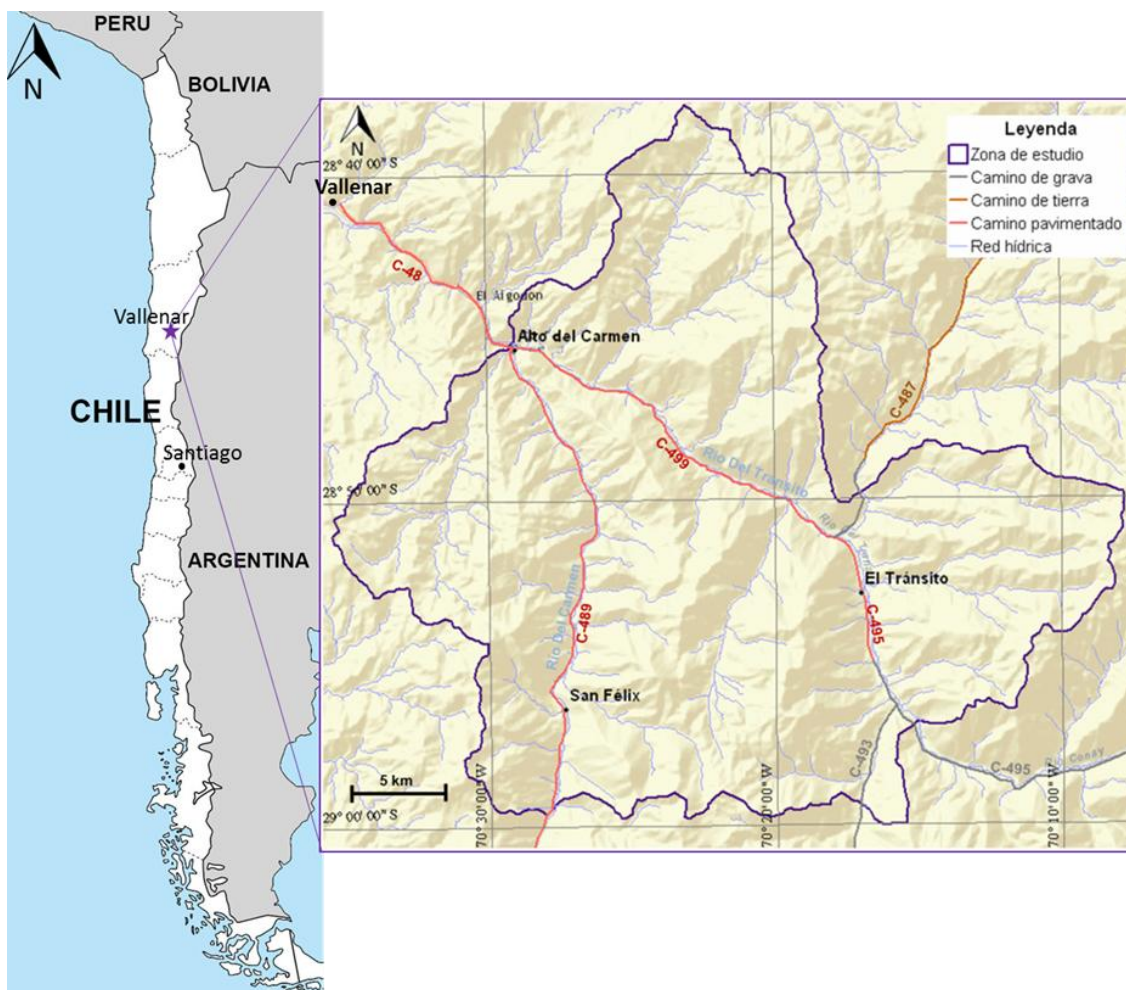
#### **1.5. Resultados Esperados**

Establecer de manera integral las variables que desencadenan flujos de detritos o de barro en subcuencas semiáridas. Con el presente trabajo se espera determinar cuáles subcuencas son efectivamente susceptibles a generar flujos de detritos o de barro en función de los resultados de los parámetros analizados. Con lo anterior será posible evaluar la susceptibilidad de activación de flujos aluviales como resultado de eventos de precipitaciones de magnitud similar al 25M. Lo anterior, permite seleccionar los parámetros y determinar los umbrales críticos que influyen en la generación de flujos, no sólo en la cuenca del Valle del Huasco, sino que en otras cuencas semiáridas andinas.

## 1.6. Zona de Estudio: Ubicación y Accesos

La zona de estudio se encuentra en la III Región de Atacama entre las latitudes  $28^{\circ}46'S$ /  $29^{\circ}58'S$  y longitudes  $70^{\circ}28'W$ /  $71^{\circ}16'W$  aproximadamente. Comprende las localidades de Alto del Carmen, San Félix y El Tránsito, situadas en las riberas de los ríos El Carmen y El Tránsito. Se estudiarán aquellas subcuencas tributarias ubicadas en ambos flancos de estos ríos y que se encuentran en el sector donde se activaron flujos de detritos y barro durante las precipitaciones de finales de Marzo de 2015, delimitándose la zona de estudio por la divisoria de aguas de las subcuencas analizadas. La Figura 1-2 muestra la ubicación de la zona de estudio y sus accesos viales.

El acceso a la zona de estudio desde Santiago es a través de la Ruta 5 hasta Vallenar, desde ahí tomar el camino C-48 hasta la Comuna de Alto del Carmen. A partir de Alto del Carmen se recorren las subcuencas tributarias del río El Carmen mediante el camino C-489 colindante a este río, hasta la altura de San Félix, en cambio las subcuencas tributarias del río El Tránsito se recorren por los caminos C-495 y C-499 que también siguen el curso del río.



**Figura 1-2.** Mapa ubicación zona de estudio. La estrella morada indica la zona de estudio en el mapa de Chile. Mapa de rutas de acceso, modificado de Infraestructura de datos Geoespaciales de Chile (IDE).

## 2. Antecedentes

### 2.1. Marco Geotectónico y Segmentación Morfoestructural

Chile se encuentra sobre una zona de subducción activa, específicamente la placa de Nazca es subductada por debajo de la placa Sudamericana en un margen convergente. Este régimen de subducción se ha mantenido de manera activa y continua en el presente desde su reactivación a partir del Jurásico Inferior. Durante este lapso de tiempo distintas condiciones geotectónicas han configurado la evolución del margen andino, conociéndose este período como Ciclo Andino (Charrier et al., 2009; Tabla 2-1).

**Tabla 2-1.** Etapas y subetapas del Ciclo Andino (Jurásico Superior al presente). Modificado de Charrier et al. (2009).

EDAD Ma	ERA	PERÍODO	CICLO TECTÓNICO	ETAPAS	SUBETAPAS	EVENTOS TECTÓNICOS
10	CENOZOICO	NEOGENO	A N D I N O	Tercera	Segunda	→← 27°S ←→ <i>Fase Pehuenche</i>
		Primera			<i>Fase Incaica</i>	
50		PALEOGENO		Segunda	Segunda	Transtensión <i>Fase K-T</i>
		Primera			Extensión <i>Fase Peruana</i>	
100	CRETACICO	MESOZOICO		Primera	Segunda	Extensión Subsidencia termal Subsidencia tectónica
					Primera	Emersión de cuenca Subsidencia termal Subsidencia tectónica
150	JURASICO			Primera	Segunda	Extensión
					Primera	Extensión
200						

En la primera etapa del Ciclo Andino, durante el Jurásico Inferior, la subducción se caracterizó por el movimiento de la Placa Phoenix (Aluk) hacia Sudamérica con un gran ángulo de oblicuidad (~60°) resultando en un régimen transtensional (Figura 2-1.A) (Scheuber et al., 1994). El régimen tectónico se caracterizó por una extensión generalizada del margen continental, la principal característica paleogeográfica de esta etapa es el desarrollo de un arco magmático y una cuenca de trasarco hacia el sector oriental del arco, reconociéndose ciclos de transgresión-regresión y también emersión de la cuenca atribuidos a efectos tectónicos (Charrier et al., 2007).

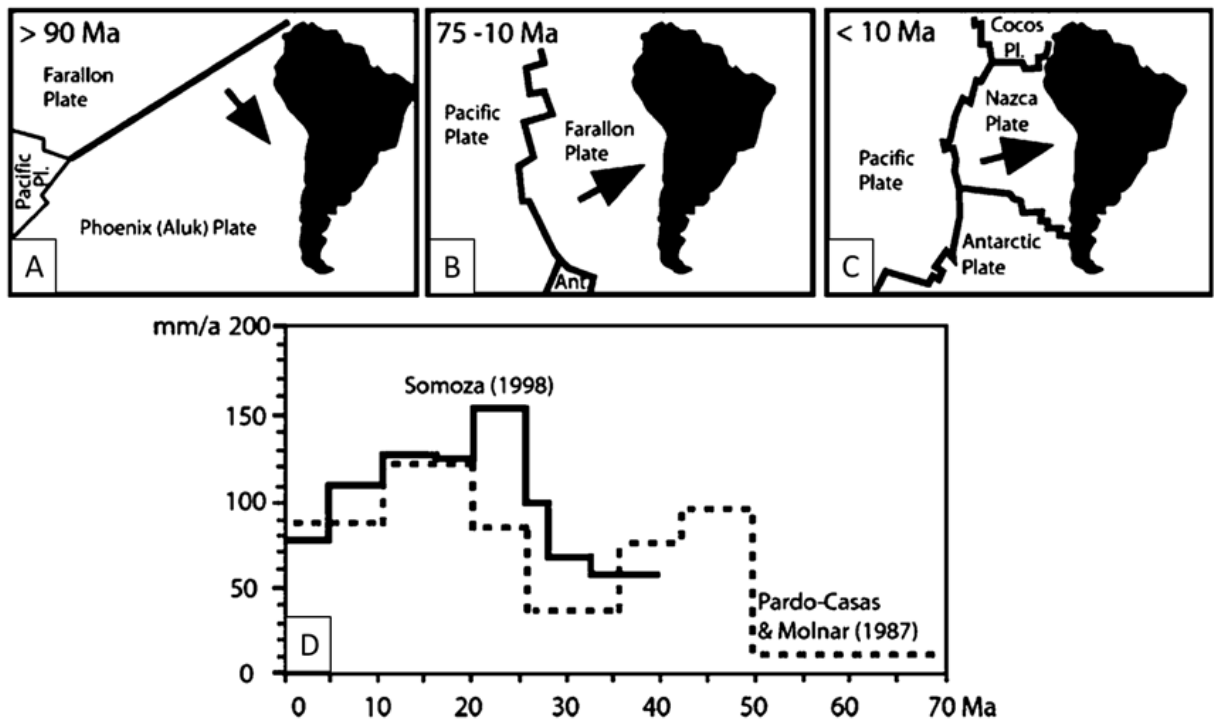
La segunda etapa del Ciclo Andino comenzó en el Cretácico Superior donde el régimen extensional fue reemplazado por uno compresional. El evento generalizado de deformación conocido como Fase Peruana marca la separación de la primera y segunda etapa del Ciclo Andino (Scheuber et al., 1994). Así durante los 110 y 70 Ma el centro de difusión entre las placas de Phoenix y Farallon migró hacia el sur,



obteniéndose como resultado la convergencia entre las placas de Farallon y Sudamérica con un bajo ángulo de oblicuidad (Scheuber et al., 1994) (Figura 2-1.B). La disminución en el ángulo de inclinación del plano de subducción da lugar a una subducción más cercana al tipo Chileno (Charrier et al., 2007). Este cambio geodinámico habría causado en el margen continental un engrosamiento cortical, regresión y emersión de la cuenca de trasarco, alzamiento y deformación (inversión de la cuenca de trasarco) y una erosión asociada a la Fase Peruana, generándose de esta manera una nueva organización paleogeográfica, en la cual el arco magmático se desplazó hacia el este y se generó una cuenca de antepaís de retroarco continental. Estos procesos en conjunto determinaron un dominio de antearco más ancho que en la etapa precedente (Charrier et al., 2007).

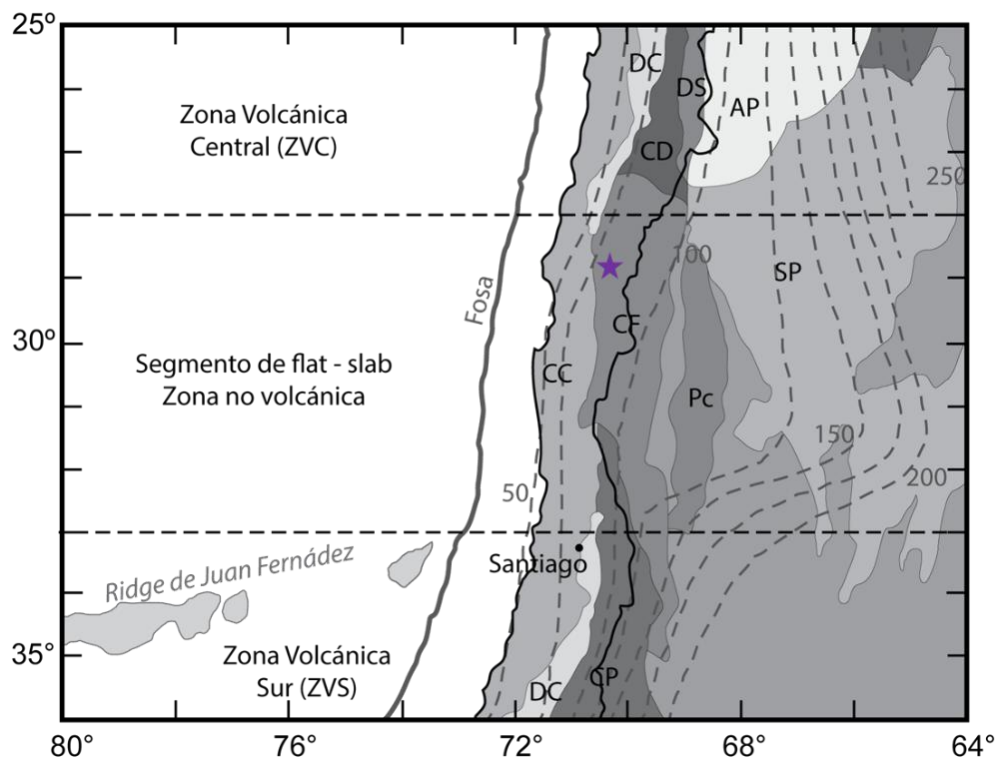
La tercera etapa del Ciclo Andino comenzó con la Fase Incaica durante el Eoceno Medio. Durante esta etapa ocurre la Orogenia Incaica de carácter compresiva, produciéndose una inversión tectónica de las cuencas de intra-arco y el alzamiento de la cordillera Incaica, la cual es el elemento topográfico dominante durante el Eoceno Superior y Oligoceno (Charrier et al., 2009). Esta fase compresiva está expresada fuertemente al norte de los 27°S, a lo largo de una franja que incluye la Cordillera Occidental y la Cordillera de Domeyko. Aunque con alcance hacia el sur, a lo largo de la Cordillera Frontal, su influencia está disminuida por una deformación extensional, con adelgazamiento cortical y magmatismo toleítico, que durante el Eoceno Medio al Oligoceno Tardío desarrolló una cuenca extensional de intra-arco, cuya mayor expresión se observa en la Cordillera Principal del Centro-Sur de Chile, donde el alcance de la Fase Compresiva Incaica no se expresa.

A continuación durante el Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano ocurre la inversión tectónica de la cuenca extensional de Abanico por deformación en compresión asociada a la Fase Pehuenche, produciéndose un engrosamiento cortical que cambia la afinidad del magmatismo a uno calcoalcalino (Charrier et al., 2009). Los mayores rasgos morfoestructurales actuales se han producido a partir de esta fase de deformación atribuida a la ruptura de la placa Farallon en las placas de Cocos y Nazca hace 25 Ma (Oligoceno Superior). Desde ese momento el vector de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana se hizo prácticamente ortogonal al margen chileno y se incrementó la velocidad absoluta de convergencia, pasando desde  $50 \pm 28$  mm/año durante los 36 y 26 Ma a  $112 \pm 8$  mm/año a partir de los 26 Ma (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Farías et al., 2007) (Figura 2-1.C y 2-1.D).



**Figura 2-1.** Configuración tectónica durante: **(A)** Cretácico Inferior tardío; **(B)** Cretácico Superior a Mioceno tardío, **(C)** Mioceno tardío al presente. El gráfico **(D)** muestra la tasa de convergencia durante el Cenozoico de las placas Farallon y Nazca con respecto a la placa Sudamericana. (Charrier et al., 2007).

En el Mioceno colisiona la dorsal de Juan Fernández con la Placa Sudamericana, la cual se ubica en su posición actual (latitud  $32,5^{\circ}\text{S}$ ) hace aproximadamente  $\sim 10$  Ma (Yáñez et al., 2001). La dorsal oceánica de Juan Fernández es subductada bajo el margen continental, ejerciendo un esfuerzo boyante y alzamiento mayor en el continente, provocando la segmentación y extensión de una zona de subducción plana o subhorizontal (ángulo de subducción menor a  $10^{\circ}$ ) entre los  $27^{\circ}\text{S}$ - $33^{\circ}\text{S}$ , teniendo alcance en la zona de este estudio (Charrier et al., 2007). Esta subducción plana o de *Flat-Slab* genera una discontinuidad en el orógeno y una importante segmentación de los Andes, así esta región se caracteriza por una inactividad volcánica reciente. En cambio, en los segmentos al norte de los  $27^{\circ}\text{S}$  y al sur de los  $33^{\circ}\text{S}$ , hay presencia de actividad volcánica actual (Figura 2-2). A la ausencia de vulcanismo entre los  $28^{\circ}\text{S}$ - $33^{\circ}\text{S}$ , se añade que la vertiente occidental de los Andes es prácticamente continua desde el mar hacia el este, con ausencia de la cuenca longitudinal denominada 'Depresión Central' (Fariás et al., 2007), la cual sí está presente al norte y sur de este segmento (Figura 2-2). De esta manera el ante-arco en la zona de subducción plana está compuesto por dos unidades morfoestructurales la Cordillera de la Costa y la Cordillera Frontal. Según lo mencionado la subducción de la dorsal de Juan Fernández controla la morfología, magmatismo y tectónica de esta región (Charrier et al., 2007).



**Figura 2-2.** Zona de subducción plana ('Flat-Slab') asociada a la dorsal de Juan Fernández, zona carente de volcanismo. Las líneas segmentadas corresponden a contornos de profundidad de la zona de Wadati – Benioff. La estrella morada indica la zona de este estudio. CC: Cordillera de la Costa; CF: Cordillera Frontal; DC: Depresión Central; CD: Cordillera de Domeyko; Pc: Precordillera; CP: Cordillera Principal; SP: Sierras Pampeanas; DS: Depresión Subandina; AP: Altiplano – Puna. Modificado de Charrier et al. (2007).

Las características geotectónicas y geomorfológicas antes mencionadas permiten explicar y determinar de cierta manera las formas y relieves actuales en la zona de este estudio. Así la Cordillera de la Costa se constituye por rocas intrusivas y series volcánicas paleozoicas y mesozoicas de orientación N-S, representando el piedemonte de la Cordillera Frontal. El relieve y paisaje de la Cordillera de la Costa se considera maduro con cumbres convexas de altitudes de hasta 2.000 m.s.n.m., una característica predominante del relieve que se observa a lo largo de la Cordillera de la Costa es la morfología de pedimentos entre los 27°-33°S (Aguilar et al., 2013).

La Cordillera Frontal corresponde al dominio morfoestructural donde se enmarca este trabajo (Figura 2-2). La Cordillera Frontal está constituida por extensos bloques de basamento cristalino, alargados en orientación N-S, que se alternan con franjas de rocas estratificadas mesozoicas (Salazar et al., 2013). Este relieve preserva en sus interfluvios más altos superficies planas con rasgos definitorios de un pedimento que alcanzan altitudes de hasta 5.500 m.s.n.m., y descienden paulatinamente hacia el oeste hasta 3.000 m.s.n.m. (Aguilar et al., 2013). Estos antiguos pedimentos están incididos por drenajes que corresponden a cañones que representan hasta 2.000 m de incisión y que dan paso, aguas arriba, a empinadas paredes. Altos valores de pendiente en la Cordillera Frontal se concentran en los cañones, mientras que los interfluvios planos están dominados por pedimentos de baja pendiente (Aguilar et al., 2013).

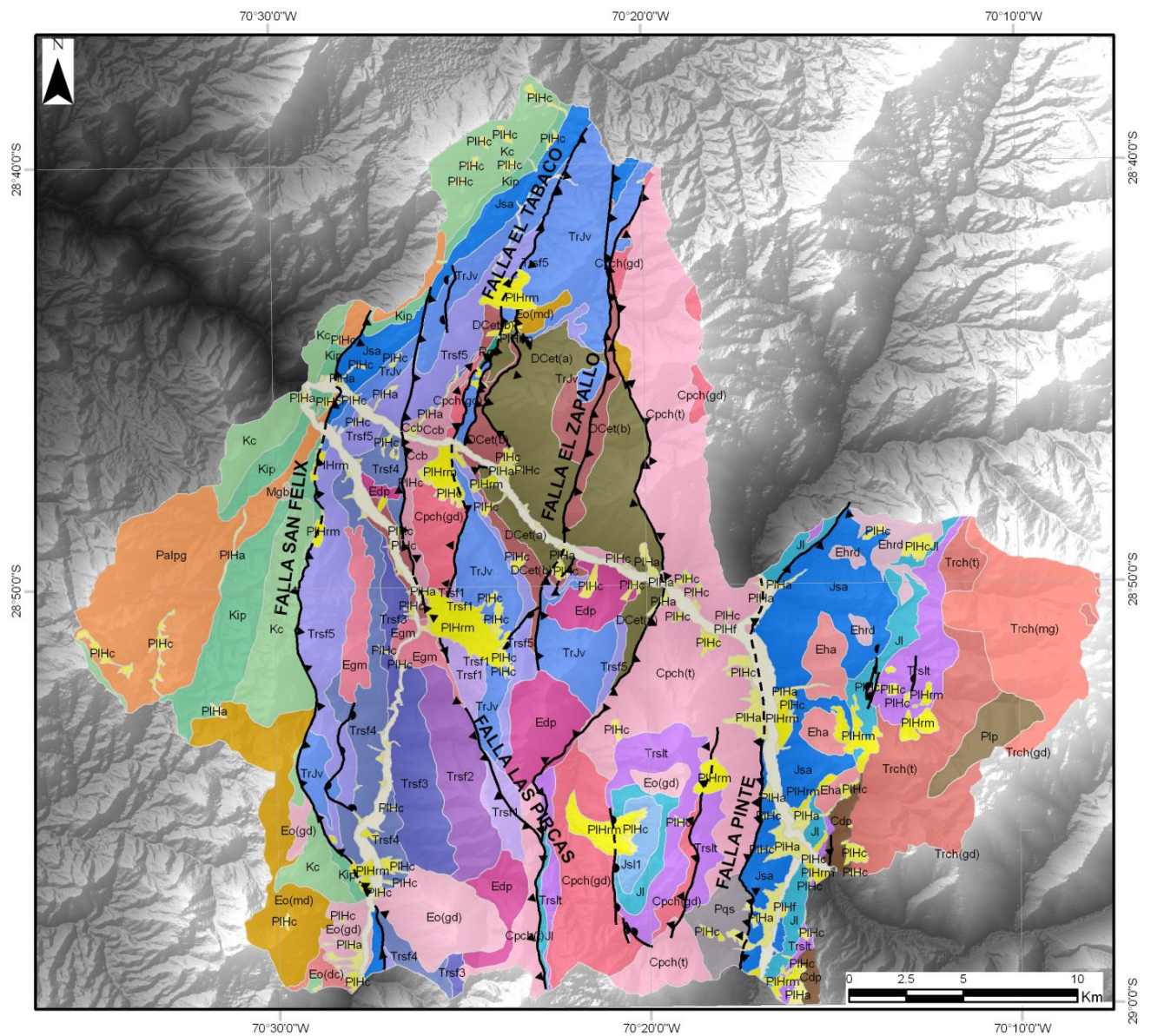
La dinámica fluvial de las cuencas semiáridas ha estado marcada por los ciclos glaciales–interglaciales. En la Cordillera Frontal existen registros geomorfológicos de valles en forma de artesa que habrían sido excavados durante las glaciaciones



cuaternarias (Amman et al., 2001). Hace 32.000 a 14.000 años atrás se habría producido un extenso avance glacial de más de 20 km desde la cabecera de los valles cordilleranos, generándose grandes volúmenes de sedimentos glaciogénicos que formaron extensas morrenas que se distribuyen sobre los 3.000 m.s.n.m. (Zech et al., 2006; Aguilar, 2010). Al finalizar los avances glaciales de mayor importancia y agradación de sedimentos glaciogénicos en la Cordillera Frontal, ocurrió un período de agradación de sedimentos aguas abajo de los frentes glaciales hace 12.000 a 4.000 años atrás, cuya sedimentología indica un origen glaciogénico. Remociones en masa y depósitos de flujos de detritos y barro, aportados por la dinámica de laderas y tributarios en la media montaña, habrían generado entrapamiento de los sedimentos glaciogénicos en el cauce troncal durante el Holoceno (Aguilar, 2010).

## **2.2. Marco Geológico Local**

Las unidades geológicas en la zona de estudio se originaron en diferentes períodos y eventos tectónicos de acuerdo a lo presentado en la Sección 2.1. El mapa geológico y la zona de estudio se presentan en la Figura 2-3, además la Tabla 2-2 muestra todas las unidades geológicas que pertenecen a la zona de estudio a partir de la carta geológica “Geología del Área del Tránsito-Lagunillas, Región de Atacama” del SERNAGEOMIN elaborada por Salazar et al. (2013).



**Leyenda**

Zona Estudio

**Tipo de estructuras**

- Falla Inversa
- Falla Normal
- Falla de Rumbo
- Indeterminada

**Geología**

- PIHrm- Depósitos de remoción en masa
- PIHf- Depósitos Fluviales
- PIHa- Depósitos aluviales
- PIHc- Depósitos coluviales
- Mgb- Gravas de cerro El Burro
- Eha- Intrusivos hipabisales andesíticos
- Ehrd- Intrusivos hipabisales riódacíticos
- Egm- Granitoides La Mesilla

- Eo(md)- Complejo Plutónico El Orito- monzodiorita
- Eo(gd)- Complejo Plutónico El Orito- granodiorita
- Eo(dc)- Complejo Plutónico El Orito- diorita
- Edp- Diorita de Qda. Las Pircas
- Palpg- Complejo Plutónico Pie de Gallo
- Kc- Fm. Cerrillos
- Kip- Fm. Pucalume
- Jsa- Fm. Algarrobal
- Jsl1- Fm. Lagunillas
- Jl- Fm. Lautaro
- TrJv- Estratos del Verraco
- Trslt- Fm. La Totora
- Trch(t)- Complejo Plutónico Chollay- tonalitas
- Trch(gd)- Complejo Plutónico Chollay- granodioritas
- Trch(mg)- Complejo Plutónico Chollay- monzogranitos

- Trsf5- Fm. San Félix (Miembro 5)
- Trsf4- Fm. San Félix (Miembro 4)
- Trsf3- Fm. San Félix (Miembro 3)
- Trsf2- Fm. San Félix (Miembro 2)
- Trsf1- Fm. San Félix (Miembro 1)
- Plp- Gneisses de La Pampa
- Pgs- Fm. Guanaco Sonso
- Pqs- Esquistos de Qda. Seca
- Cpch(t)- Complejo Plutónico Chancoquin- tonalitas
- Cpch(gd)- Complejo Plutónico Chancoquin- granodioritas
- Ccb- Fm. Cerro Bayo
- Cdp- Diorita de Qda. Pinte
- DCet(a)- Complejo Metamórfico El Tránsito- esquistos griseo
- DCet(b)- Complejo Metamórfico El Tránsito- esquistos verde

**Figura 2-3.** Mapa Geológico de la zona de estudio basado en la carta geológica de SERNAGEOMIN: “Geología del Área El Tránsito-Lagunillas” (Salazar et al. 2013) sobrepuesto en relieve sombreado del modelo de elevación digital.

**Tabla 2-2.** Resumen litoestratigráfico de las unidades, formaciones y depósitos presentes en la zona de estudio a partir de Salazar et al. (2013).

Era	Periodo	Epoca	Descripción	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	<b>PIHrm Depósitos de remoción en masa</b> (Pleistoceno-Holoceno). Depósitos de material semi consolidado de bloques, gravas y arenas angulosas, de muy mala selección, con una matriz de tamaño arena fina a arcilla. La mayoría de estos depósitos presentan algún nivel de cubierta vegetal. <b>PIHf Depósitos fluviales</b> (Pleistoceno-Holoceno). Sedimentos no consolidados a parcialmente consolidados de bancos de gravas y arenas con buena selección y regular redondeamiento, que en sectores presentan imbricación en los clastos. Se asocian a los valles de los ríos y quebradas principales.	
		Pleistoceno	<b>PIHa Depósitos aluviales</b> (Pleistoceno-Holoceno). Depósitos no consolidados a moderadamente consolidados de gravas de mala selección, matriz y clastosoportados, con clastos angulosos y de regular esfericidad, inmersos en una matriz de tamaño arena fina a limo. En sectores presentan estratificación en capas centimétricas y una incipiente imbricación. Algunos depósitos presentan cubierta vegetal. <b>PIHc Depósitos coluviales</b> (Pleistoceno-Holoceno). Depósitos de pequeña extensión, asociados a laderas de alta y moderada pendiente, corresponden a gravas de clastos angulosos, de mala selección, sin estratificación, con una matriz escasa de tamaño arena fina.	
			Neógeno	<b>Mgb Gravas de Cerro el Burro</b> (Mioceno-Plioceno?). Depósitos parcialmente consolidados que presentan una estratificación subhorizontal. Corresponden a gravas de color marrón, matriz soportadas, polimícticas, de fragmentos angulosos con regular a mala esfericidad. Las gravas van aumentando su tamaño de grano hacia el techo.
	Paleógeno	Oligoceno		
			Eoceno	<b>Eha Intrusivos hipabisales andesíticos</b> (Eoceno). Cuerpos porfídicos de composición andesítica, de color gris verdoso, inequigranulares, de grano fino a medio y leucocráticos. Se encuentra con grados variables de sericitización y argilización, los piroxenos se encuentran fracturados y presenta anfíbolos con zonación inversa. <b>Ehrd Intrusivos hipabisales riódacíticos</b> (ca. 40 Ma). Cuerpos porfídicos de composición dacítica a riolítica, de color blanco, inequigranulares y de grano variable entre fino y medio. Presenta fenocristales de plagioclasa, cuarzo y escasos máficos (principalmente biotita), los cuales presentan grados variables de alteración a sericita, clorita y calcita. <b>Egm Granitoides La Mesilla</b> (ca. 51 Ma). Sienogranitos a monzogranitos de color blanco, de textura fanerítica a porfídica, de grano medio, con escasos máficos cloritizados. Algunos cristales de cuarzo tienen subgranos, hay zonación en plagioclasas y cristales de muscovita con leve deformación. <b>Eo Complejo Plutónico El Orito</b> (54-50 Ma). Complejo plutónico multicomposicional, conformado por mozdioritas, dioritas cuarcíferas, granodioritas y tonalitas. (gd) granodioritas a tonalitas de anfíbola y biotita, de color blanco grisáceo, de grano fino a medio y leucocráticas, con plagioclasa zonada a escala microscópica y minerales máficos cloritizados. (md) monzodioritas cuarcíferas a monzonitas de anfíbola, de color rosado, de grano fino a medio e inequigranular. Los minerales máficos presentan inclusiones de minerales opacos y particularmente la biotita se encuentra cloritizada. (dc) dioritas cuarcíferas a monzonitas de anfíbola, de color rosado, de grano fino a medio e inequigranular. Los minerales máficos presentan inclusiones de minerales opacos y particularmente la biotita se encuentra cloritizada. <b>Edp Diorita de Quebrada Las Pircas</b> (ca. 54 Ma). Dioritas a dioritas cuarcíferas de color gris, de biotita y anfíbola, textura fanerítica, inequigranulares y leucocráticas, con cristales de plagioclasa zonados, minerales opacos cloritizados e inclusiones de minerales opacos de anfíbola.
		Paleoceno	<b>Palpg Complejo Plutónico Pie de Gallo</b> (65-64 Ma). Granodioritas a granitos de biotita y anfíbola, de color rosado a gris, equigranulares y leucocráticos. Los minerales máficos se encuentran recrystalizados y con leve deformación intracristalina.	
		Cretácico	Superior	<b>Kc Formación Cerrillos</b> (Cretácico Superior). Secuencia volcánica compuesta en su base por gruesas coladas de lavas andesíticas porfídicas que gradan a potentes sucesiones de rocas piroclásticas de composición intermedia a ácida.
			Inferior	<b>Kip Formación Pucalume</b> (Valanginiano Superior-Santoniano). Sucesión siliciclástica granocreciente compuesta de calcilitas negras, calizas grises, limolitas, areniscas finas a medias con estratificación cruzada, laminación lenticular, ondulosa y tipo flaser y ortoconglomerados canalizados con cuarzoarenitas medias en el techo.
		Mesozoico	Jurásico	Superior
	Medio			
Inferior	<b>Jl Formación Lautaro</b> (Sinemuriano-Bajociano). Sucesión sedimentaria carbonatada marina constituida por calcarenitas, areniscas calcáreas, margas, calizas y areniscas rojas. Contiene abundante fauna marina fósil. Presenta importantes variaciones de espesor y de facies y está limitada por fallas de alto ángulo.			

Era	Período	Época	Descripción
Mesozoico	Triásico	Superior	<b>TrJv Estratos del Verraco</b> (¿Triásico Sup?-¿Jurásico Medio?). Secuencia volcánica compuesta de lavas andesíticas masivas con texturas hialoclásticas y un paquete de calizas fosilíferas intercaladas. <b>Trslt Formación La Tоторa</b> (Triásico Superior). Sucesión volcánica compuesta esencialmente de coladas de lava andesíticas de color rojizo a violeta, comúnmente autobrechizadas y amigdaloidales. Presenta intercalaciones de litarenitas rojas y tobas de ceniza y lapilli de composición intermedia.
		Medio	
		Inferior	<b>Trch Complejo Plutónico Chollay</b> (ca. 247-237 Ma). Complejo plutónico multicomposicional, constituido por granodioritas, monzogranitos, seinogranitos, dioritas a gabros y tonalitas. (t) tonalitas a dioritas cuarcíferas de textura hipidiomórfica, de grano fino a medio y leucocráticas, de biotita y anfíbola. Los minerales máficos presentan un grado variable de clorización. Se encuentran foliadas en algunos sectores, de orientación N-S. (gd) granodioritas blanquecinas de biotita y muscovita, de grano fino a medio, leucocráticas e hipidiomórficas. Presentan textura perfitica y en sectores presentan una leve foliación y deformación en las micas. (mg) monzogranitos de color rosado, grano grueso, textura hipidiomórfica y leucocráticos. Sus minerales máficos corresponden a biotita y en algunos casos anfíbola, con grados variables de clorización en minerales máficos y presencia de texturas perfitica y mirmekítica. <b>Trsf Formación San Félix</b> (¿Triásico Inferior?-Superior). Sucesión siliciclástica marina a continental compuesta por conglomerados, fangolitas y areniscas. 5 Ortoconglomerados canalizados con imbricación intercalados con areniscas gruesas con estratificación cruzada en artesa y troncos fósiles en posición de vida. 4 Lutitas de color verde oscuro a gris, con intercalaciones de grauvacas volcánicas y paraconglomerados con estratificación gradada normal. 3 Ortoconglomerados canalizados y arenas gravosas con intercalaciones de fangolitas negras. En su sección intermedia presenta fangolitas rojas intercaladas con ortoconglomerados canalizados. 2 Alternancias rítmicas de lutitas con bioturbación y laminación paralela, y areniscas finas con bases erosivas, marcas de arrastre y gradación normal. 1 Ortoconglomerados canalizados con imbricación y areniscas gruesas a medias con estratificación cruzada.
Paleozoico	Pérmico		<b>Pip Gneisses de La Pampa</b> (Pérmico Medio). Gneisses blancos grisáceos y color marrón de meteorización, leucocráticos con bandeamiento milimétrico a centimétrico de biotita y cuarzo-feldespato, además de presencia de sillimanita, muscovita y escasa cordierita. <b>Pgs Formación Guanaco Sonso</b> (Pérmico Medio-Superior). Lavas de composición andesítica a dacítica, de textura afanítica a porfídica y con masa fundamental levemente cloritizada. <b>Pqs Esquistos de Quebrada Seca</b> (Pérmico Inferior). Esquistos cuarzo-micáceos de textura granolepidoblástica que presentan alternancias de bandas félsicas decimétricas. Se componen de cuarzo, plagioclasa, muscovita, biotita, granate y estauroлита y son instruidos por diques graníticos de muscovita pegmatítica.
		Carbonífero	<b>Cpch Complejo Plutónico Chancoquin</b> (ca. 297-285 Ma). (t) tonalitas a dioritas grises de biotita y anfíbola, de grano medio, leucocráticas a mesocráticas e hipidiomórficas. Presenta una característica foliación marcada por minerales máficos. Son cortadas por diques básicos y ácidos. (gd) granodiorita a monzogranito de muscovita y biotita, de grano medio a grueso, inequigranular y leucocrática. Tiene textura hipidiomórfica, leve deformación en cristales de muscovita y plagioclasa, texturas perfitica, mirmekítica y cataclástica. <b>Ccb Formación Cerro Bayo</b> (Pennsylvaniano). Sucesión volcánica compuesta por complejos de domos dacíticos rojizos y tobas de lapilli y vítreas dacíticas a riolíticas de color violeta a rojizo. <b>Cdp Diorita de Quebrada Pinte</b> (ca. 324 Ma). Diorita de anfíbola grano medio, melanocrática, con distintos grados de milonización e intruida por diques sin-tectónicas aplíticos de muscovita.
		Devónico	<b>Dcet Complejo Metamórfico El Tránsito</b> (Devónico Superior-Pennsylvaniano). (a) Esquistos cuarzo-micáceos de color gris con textura granolepidoblástica que presenta bandas granoblásticas métricas de cuarzo policristalino y albita. Se compone de cuarzo, albita, muscovita, biotita, con la presencia ocasional de granate y estauroлита. (b) Esquistos de cuarzo y anfíbola de color verde oscuro de textura granonematoblástica. Se componen de cuarzo policristalino, albita, anfíbola y epidota y presenta intercalaciones de cuarcitas, mármoles y esquistos nodulares de albita.

A continuación se describen las unidades geológicas principales que abarca la zona de estudio, ordenadas de mayor a menor edad:

Las unidades más antiguas corresponden al basamento ígneo-metamórfico del Permo-Triásico en la zona de estudio. Se destaca el **Complejo Metamórfico El Tránsito** que es la unidad más antigua, de edad Devónico-Carbonífero e interpretada como una asociación petrotectónica de un prisma de acreción (Salazar et al., 2013). Ribba (1985) lo definió, como un conjunto de metabasitas, esquistos cuarzo-micáceos, esquistos nodulares de albita, cuarcitas y mármoles, que afloran en los ríos El Tránsito y El Carmen. Otra unidad importante corresponde a los **Gneisses de La Pampa** definido por Ribba (1985) a un restringido cuerpo de gneisses de sillimanita de edad Pérmico Medio, con afloramientos en ambas laderas del río El Tránsito, en las cercanías de la localidad de La Pampa. Este basamento es intruido por el **Complejo**



**Plutónico Chollay**, del Período Triásico inferior (251-235 Ma). Está compuesto por monzogranitos, granodioritas, dioritas a gabros y tonalitas que afloran en el sector oriental de la zona de estudio, como una franja de orientación N-S (Salazar et al. 2013).

Luego durante el Triásico Medio Superior se depositaron sobre el basamento Permo-Triásico rocas volcano-sedimentarias como la **Formación San Félix** definida por Reutter (1974), como una serie siliciclástica marina a continental de edad Triásico Inferior-Superior, que aflora como un homoclinal de rumbo N-S y manteo al oeste, expuesto de manera continua desde el valle del río El Carmen por el sur y hasta la Quebrada El Tabaco por el norte. Otra unidad del Triásico Superior que descansa sobre el basamento Permo-Triásico es la **Formación La Totorá** definida por Reutter (1974) en la quebrada del mismo nombre, como una secuencia volcánica, compuesta por coladas andesíticas y andesítico-basálticas, brechas volcánicas y rocas sedimentarias volcanogénicas.

Durante el Jurásico se depositaron rocas sedimentarias marinas en discordancia angular sobre las unidades triásicas, destacando la **Formación Lautaro** que corresponde a una secuencia marina carbonatada, que aflora como franjas de orientación NNE a NS discontinuas entre sí, abarcando la Quebrada Las Pircas, Pinte, La Plaza, La Totorá, Algarrobal y La Llaleta, la Sierra del Tatul y el Cerro el Gaucho, las cuales continúan aflorando hacia el norte y hacia el sur (Segerstrom, 1959). Hacia fines del Jurásico y principios del Cretácico se depositó en discordancia angular sobre la Fm. La Totorá y en disconformidad sobre la Fm. Lautaro la unidad volcánica **Formación Algarrobal** que aflora a lo largo del valle del río El Carmen, extendiéndose por la Quebrada El Tabaco, hasta llegar a la Quebrada Las Habas (Dediós, 1967). Esta formación corresponde a 800 m de potentes tobas de lapilli líticas de composición andesítica, de color rojizo, con intercalaciones de lavas andesíticas ricas en fenocristales de plagioclasa (Salazar et al., 2013).

En el Cretácico se incluyen unidades de rocas sedimentarias clásticas de ambiente lacustre, aluvial y fluvial. En este período la **Formación Pucalume** se dispuso en discordancia angular sobre la Fm. Algarrobal, aflorando como una franja de orientación NE en la ladera SE de la Sierra del Tabaco y en el sector de Quebrada Corral de Pirca, su litología corresponde a una sucesión siliciclástica roja compuesta de arcosas líticas a litarenitas rojas medias a gruesas con estructuras tipo marcas de carga, ondulitas de oleaje y laminación plana cerca de la localidad de Alto del Carmen (Dediós, 1967).

En el Paleógeno ocurren intrusiones de complejos plutónicos y rocas ígneas afectando a las rocas volcano-sedimentarias del Mesozoico. Así en las cercanías de la localidad de Alto del Carmen y la Quebrada El Algodón, se encuentra en contacto por falla en algunos sectores e intruyendo en otros a las formaciones Algarrobal y Pucalume el **Complejo Plutónico Pie de Gallo** de edad 65-64 Ma. Este complejo corresponde a un intrusivo compuesto bimodal, formado por granodioritas y dioritas, que aflora en el cerro del mismo nombre, con una extensión aproximada de 75 km<sup>2</sup> (Arévalo et al., 2009).

En el Eoceno intruye la subunidad de monzodioritas del **Complejo Plutónico El Orito** (Salazar et al., 2013) la cual se encuentra por contacto por falla con las formaciones San Félix y La Totorá. Otra intrusión Eocena corresponde a los **Granitoides La Mesilla**, definida por Ribba (1985), como dos cuerpos intrusivos de composición sienogranítica a monzogranítica, que afloran como un cuerpo

subredondeado al sur de la localidad de La Mesilla, en el río El Carmen. Salazar et al. (2013) han definido los **Intrusivos Hipabisales Andesíticos** de color grisáceo a verdoso de composición andesítica y textura porfídica a fanerítica, los cuales intruyen a las formaciones Algarrobal, La Totorá y Lautaro, siguiendo una orientación N-S entre la Quebrada Amolanas por el norte y la Quebrada Pinte por el sur.

Durante el Mioceno, Salazar et al. (2013) plantean que ocurrieron dos eventos compresivos que involucraron incisión entre períodos de pedimentación. Durante estos períodos de pedimentación se habrían generado superficies de bajo relieve y la deposición de sucesiones de gravas, que en la zona se denominan **Gravas del Cerro El Burro** (Salazar et al., 2013). Rossel (2014) documenta que estas sucesiones están representadas por capas de conglomerados y areniscas semiconsolidadas, siliciclásticas, depositadas en un ambiente aluvio-fluvial, depositadas sobre sustrato intrusivo asignado al Complejo plutónico Chollay o sobre rocas volcánicas de las formaciones Lagunillas y Pastos Blancos.

Los **Depósitos Fluviales** cuaternarios son el relleno más profundo de los valles de los ríos El Tránsito y El Carmen, y de las principales quebradas de la zona de estudio, son depósitos no consolidados a moderadamente consolidados, compuestos de bancos de gravas y arenas con buena selección (Salazar et al., 2013). En las cercanías de las localidades de Alto del Carmen y El Tránsito se desarrollan en mayor cantidad **Depósitos de Remoción en Masa**, correspondientes a material semiconsolidado sin estructura, con fragmentos muy variados en tamaño, desde arena a bloques angulosos (Salazar et al., 2013).

### 2.3. Geología Estructural

El principal dominio estructural en la zona de estudio corresponde al de la Cordillera Frontal. Este dominio estructural comprende tres bloques de basamento cristalino, alongados en dirección N-S a NNE-SSW, separados por franjas de rocas mesozoicas estratificadas. Cada bloque corresponde a núcleos de anticlinales de bloque colgante de fallas inversas, de vergencia este y carácter regional (Salazar et al., 2013).

En el sector occidental de la zona de estudio la falla principal corresponde a la Falla San Félix de tipo inversa y rumbo aproximado N-S y vergencia oeste, la cual separa el basamento Permo-Triásico de la cobertura Mesozoica, en este caso a las formaciones Pucalume y Cerrillos (Salazar et al., 2012).

La Falla El Zapallo corresponde a una falla normal con reactivación inversa (inversión positiva) de rumbo estimado N-S, vergencia hacia el oeste y manteo subvertical, la cual pone en contacto al Complejo Metamórfico El Tránsito con rocas Mesozoicas (Fm. Estratos del Verraco). Salazar et al. (2012) han inferido que el movimiento de esta falla habría sido normal entre el Triásico Superior y el Jurásico Inferior, la reactivación inversa sería posterior al Cretácico Inferior y previo al Eoceno, además durante esta inversión se produciría la Falla El Tabaco a modo de 'Short-cut' de la Falla El Zapallo.

Según Salazar et al. (2013) el bloque occidental del cuadrángulo El Tránsito-Lagunillas, compuesto principalmente por el Complejo Plutónico Chanchoquín y el Complejo Metamórfico El Tránsito, corresponde al núcleo del anticlinal del bloque colgante de la Falla Pinte, en cuyo limbo dorsal se apoyan en discordancia erosiva las

series triásicas de las formaciones San Félix y La Totora, manteando hacia el oeste y noroeste. La Tabla 2-3 presenta el cuadro resumen de las principales estructuras presentes en el área de estudio, las cuales también están ilustradas en la Figura 2-3.

**Tabla 2-3.** Principales estructuras en el área de estudio. La extensión de las fallas corresponde a la extensión en planta y ha sido estimada dentro de la zona de estudio.

Falla	Tipo	Rumbo	Manteo	Vergencia	Extensión	Referencia
<i>San Félix</i>	Falla inversa	N-S	Subvertical	Oeste	31,3 Km	Salazar et al. (2013)
<i>El Tabaco</i>	Falla normal con reactivación inversa	N-S	Subvertical	Oeste	15,2 Km	Salazar et al. (2013)
<i>El Zapallo</i>	Falla normal con reactivación inversa	N-S	Subvertical	Oeste	23,2 Km	Salazar et al. (2013)
<i>Las Pircas</i>	Falla normal con reactivación inversa	N-S	Subvertical	Oeste	9,1 Km	Salazar et al. (2013)
<i>Pinte</i>	Falla inversa	N-S	Subvertical	Este	14,2 Km	Salazar et al. (2013)

## 2.4. Clima Regional y Local

De acuerdo a los tipos de clima definidos por Antoniolleti (1972) para la Región de Atacama, la zona de estudio se enmarca en un *Clima desértico transicional*, caracterizado por su gran transparencia atmosférica, el aumento de la sequedad hacia el este, formando una zona semiárida y de escasas precipitaciones invernales.

La aridez en la Región de Atacama se debe a la interacción de varios factores, entre ellos la influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS) que genera una zona de alta presión inhibiendo el desarrollo de convección y precipitación (Schulz et al., 2011). La corriente fría de Humboldt en conjunto con el efecto de surgencia de aguas forzado por el persistente ASPS contribuye a una alta estabilidad de la atmósfera que bloquea la llegada de frentes atmosféricos desde el oeste. Además el efecto barrera de la Cordillera de los Andes previene la advección de aire húmedo desde la Cuenca Amazónica, contribuyendo a la preservación de una ambiente árido en la inmediatez del océano (Schulz et al., 2011).

Las precipitaciones en la región de estudio se asocian al sistema Monzón Tropical, produciéndose principalmente durante el invierno, la influencia de este último sistema atmosférico se acentúa hacia el sur, lo que se traduce en un incremento latitudinal a nivel regional de las precipitaciones (Garreaud et al., 2008). Las precipitaciones están controladas por la topografía, esto es, un aumento de las mismas conforme aumenta el gradiente altitudinal hacia la cordillera andina (hacia el este), de manera inversa las temperaturas y la oscilación térmica disminuyen hacia el este (DGA, 2004). Este control de las elevaciones tiene una influencia a escala local en la zona de estudio, al comparar la diferencia de precipitaciones entre interfluvios y valles, determinándose que las precipitaciones se concentran a mayores elevaciones y en menor medida en los valles (de menores elevaciones). Aguilar (2010) señala que este control orográfico de las precipitaciones en el sector de la cuenca del río Huasco marca la diferencia a largo plazo entre una dinámica fluvial vigorosa en las cuencas fluvio-glaciales de la Cordillera Principal oriental, en relación al valle troncal y los tributarios aguas abajo.

La isoterma 0°C se mantiene a altitudes de entorno a los 3200 msnm durante la temporada de invierno y por sobre los 4000 msnm durante el verano (ONEMI, 2015), es

por esto que, en la zona de estudio se destacan coberturas nivales estacionales que aportan al balance hídrico de las cuencas de los valles El Tránsito y El Carmen.

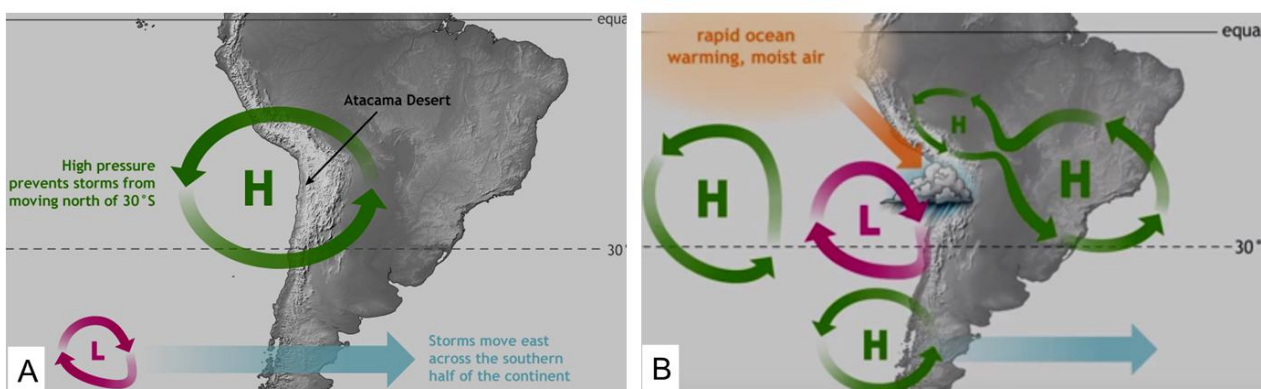
El régimen de temperatura del sistema océano y atmósfera está fuertemente influenciado por el sistema El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), este sistema está asociado con el aumento o disminución anómalo de la temperatura superficial del mar (Schulz et al., 2011). En la región de Atacama, los eventos El Niño se expresan en montos pluviométricos anormalmente altos generando acumulación de nieve en la alta cordillera y lluvias en las zonas intermedia y costera (Garreaud et al., 2010).



### 3. Catastro de flujos de detritos-barro activados durante el 25M

#### 3.1. Evento precipitaciones Marzo 2015

Entre el 23 y 26 de Marzo de 2015 ocurrió un evento meteorológico intenso en la región de Atacama, técnicamente Garreaud (2015) lo ha descrito como una *Baja Segregada*, consistente en un núcleo frío en altura, el cual debilitó el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur que se desplazó hacia el este. Esto permitió la movilización de una zona de baja presión (~40°S) hacia el noreste. Luego una serie de sistemas de alta presión se formaron, impidiendo que el sistema de baja presión volviera al sur, además la Cordillera de los Andes obstaculizó su paso hacia el este. Vientos del noreste captaron humedad desde el océano en los trópicos, en áreas del océano que fueron calentadas rápidamente (por efecto del Niño-Oscilación del Sur) en la semana previa al temporal. Esto debilitó la fuerza de enfriamiento de la surgencia de la corriente de Humboldt, llevando a un rápido calentamiento de la superficie del mar (Figura 3-1).



**Figura 3-1.** En la imagen (A) se observa el esquema de actividad normal de los sistemas de presiones, el ASPS consiste en un anticiclón de alta presión 'H' ubicado por sobre los 30°S mientras que en el sur (~40°S) el sistema de bajas presiones 'L' genera precipitaciones en el sur del país. La imagen (B) ilustra el posicionamiento inusual del sistema de bajas presiones en el norte de Chile, rodeado por sistemas de alta presión que se formaron posteriormente (Imágenes NOAA).

La Tabla 3-1 contiene la información pluviométrica ocurrida durante el evento 25M y las medias mensuales de precipitación de los últimos 20 años (período 1995-2015) para 6 estaciones meteorológicas pertenecientes a la DGA (*Dirección General de Aguas*) que están dentro de la zona de estudio (Figura 3-3). Es posible observar el efecto orográfico en las precipitaciones medias mensuales de las estaciones meteorológicas, donde estaciones ubicadas por sobre los 1.000 m.s.n.m. poseen mayores niveles de precipitación a diferencia de aquellas ubicadas por debajo de los 1.000 m.s.n.m. Además se observa que las precipitaciones acaecidas durante el temporal del 25M sobrepasan de 20 a 25 veces la cantidad de precipitación media normal esperada para el mes de Marzo en todas las estaciones, esta anomalía está determinada por el evento del Niño 2015 (Garreaud, 2015).

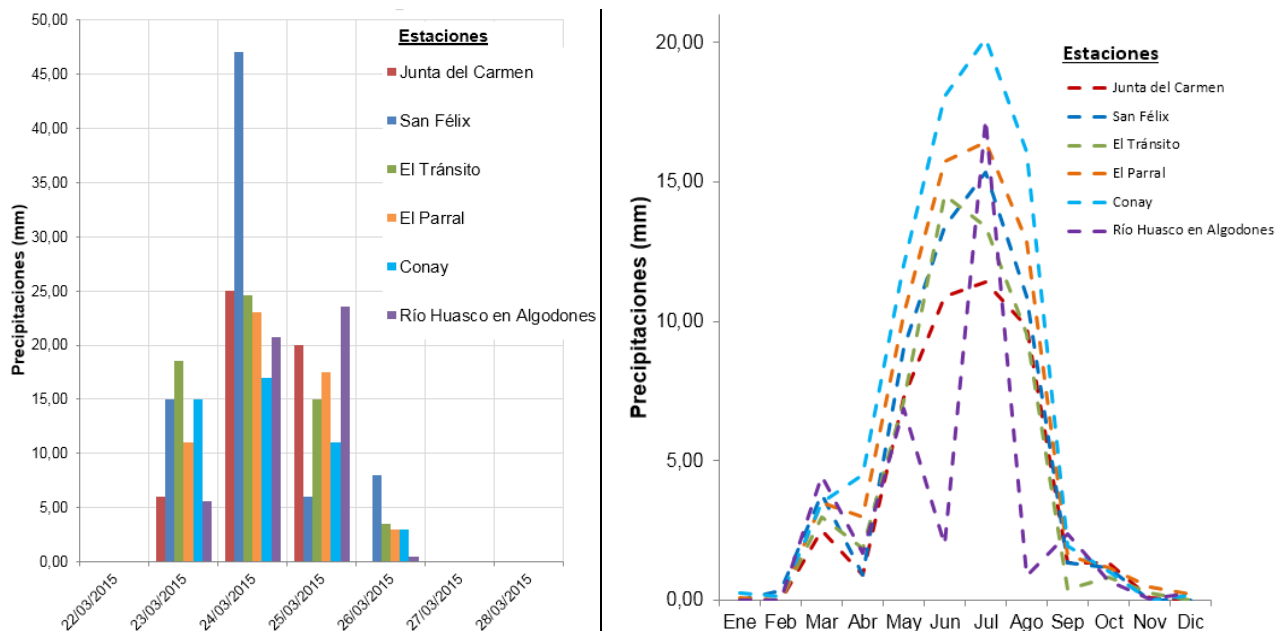
**Tabla 3-1.** Estaciones de la DGA dentro del área de estudio. Se incluye la información de la precipitación media mensual para el temporal 25M y las precipitaciones medias mensuales para el período 1995-2015 en estas estaciones.

Estación	Ubicación		Elevación ms nm	Pp (mm) 25M 2015	Precipitación media mensual: 1995-2015. (mm)											
	UTM_N	UTM_E			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Junta del Carmen	6818335	355330	770	51	0.00	0.00	2.53	0.91	7.29	10.89	11.42	9.80	1.37	1.37	0.07	0.00
San Félix	6798721	357552	1150	76	0.00	0.36	3.82	0.92	9.05	13.41	15.33	10.90	1.36	1.18	0.00	0.00
El Tránsito	6805357	374948	1100	61.6	0.05	0.00	2.98	1.86	7.16	14.52	13.40	9.55	0.40	0.81	0.26	0.00
El Parral	6793623	383223	1400	54.5	0.11	0.00	3.50	3.01	10.25	15.74	16.45	12.89	1.62	1.16	0.48	0.22
Conay	6794190	387629	1450	46	0.26	0.13	3.51	4.51	12.03	18.09	20.15	16.07	1.95	1.06	0.00	0.18
Río Huasco en Algodones	6820890	352856	750	50.3	0.00	0.00	4.44	1.70	6.86	1.98	17.24	0.89	2.38	0.68	0.06	0.25

\* Estación Río Huasco en Algodones comenzó mediciones en Octubre de 2003

La Figura 3-2.A corresponde al gráfico de precipitaciones diarias entre el 22 y 28 de Marzo de 2015, semana en que ocurrieron los flujos de detritos en la Región de Atacama, para las estaciones: Junta del Carmen, San Félix, El Tránsito, El Parral, Conay y Río Huasco en Algodones. Se observa que el temporal consistió en dos picos de precipitaciones principales, las cuales comenzaron indistintamente en estas seis estaciones el 23 de Marzo de 2015. Se observa que en las estaciones ubicadas más al este (Figura 3-3) como El Parral y Conay, las precipitaciones estuvieron presentes durante 4 días, en cambio estaciones ubicadas hacia el extremo oeste de la zona de estudio como Junta del Carmen o Río Huasco en Algodones las precipitaciones se registraron durante 3 días. Esto concuerda con el ya mencionado efecto orográfico de las precipitaciones, donde las estaciones ubicadas en el extremo este de la zona de estudio están a una mayor elevación que aquellas ubicadas en el extremo oeste.

La Figura 3-2.B corresponde a la precipitación media mensual para un rango de 20 años (1995-2015) de las estaciones dentro del área de estudio. Se observa el efecto de la elevación en las estaciones, donde las estaciones de mayor elevación como Conay, El Parral, San Félix y El Tránsito poseen mayores niveles de precipitaciones medias mensuales, a diferencia de estaciones de menor elevación como Junta del Carmen y Río Huasco en Algodones.



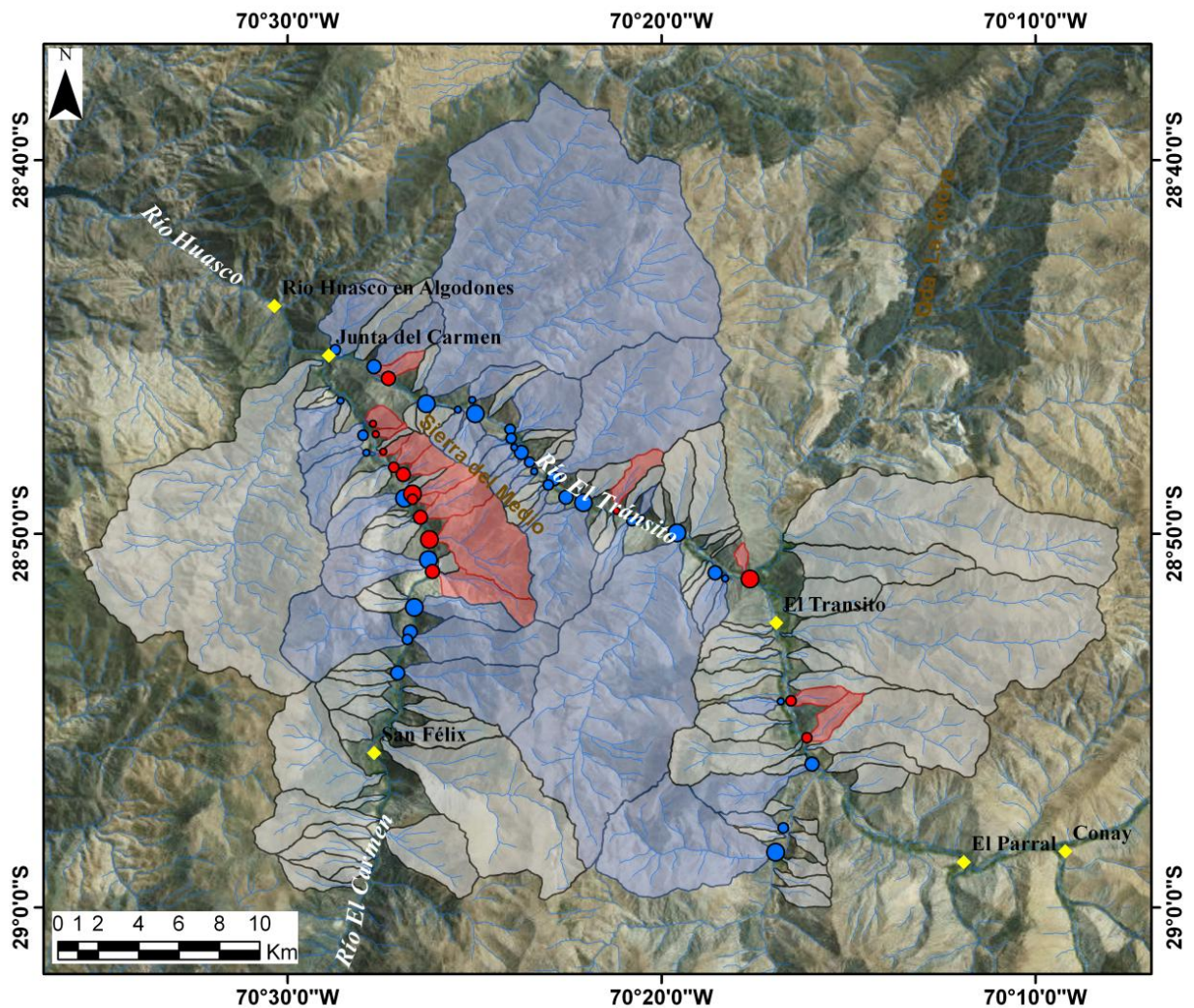
**Figura 3-2. (A)** Precipitación diaria registrada entre el 22 y 28 de Marzo de 2015 cuando ocurrió el temporal 25M en seis estaciones de la DGA que están dentro del área de estudio. **(B)** Precipitación media mensual según registro de estaciones de la DGA dentro del área de estudio para los últimos 20 años (1995-2015) según el resumen de datos de la Tabla 3-1.

### 3.2. Caracterización de los depósitos ocurridos durante el 25M

Burbank y Anderson (2001) definen las cuencas hidrográficas como superficies terrestres drenadas a través de una red hídrica natural, delimitadas por una línea de cumbres de elevación máxima denominada divisoria de aguas. Además, los afluentes o tributarios corresponden a aquellos cursos de agua secundarios que descargan hacia un río o cauce principal. Cada tributario posee su propia cuenca, denominada subcuenca, así las cuencas y subcuencas varían desde superficies de tamaño de hectáreas hasta miles de kilómetros cuadrados (Burbank y Anderson, 2001). Estas subcuencas representan el área de captura de las aguas que drenan corrientes provenientes desde las quebradas, canales, cárcavas y zanjas que inciden las laderas de las sierras y montañas que circundan a los ríos.

Datos de la DGA (2004) indican que la subcuenca del río El Carmen posee una superficie de 2.860 km<sup>2</sup>, mientras que la subcuenca del río El Tránsito tiene una superficie de 4.135 km<sup>2</sup>. En este trabajo se estudiaron 126 subcuencas tributarias a estos ríos, en el área de activación de flujos durante el evento 25M. En 49 de ellas se identificaron depósitos asociados a flujos de detritos o de barro debido a este evento (Figura 3-3). El supuesto utilizado en la identificación de las subcuencas catalogadas como activadas corresponde a aquellas cuyos depósitos alcanzaron los cauces de los ríos El Carmen o El Tránsito, excluyéndose de esta manera aquellas subcuencas que posiblemente generaron flujos dentro de sus cauces tributarios sin alcanzar el río troncal, catalogándose como inactivas.





### Leyenda

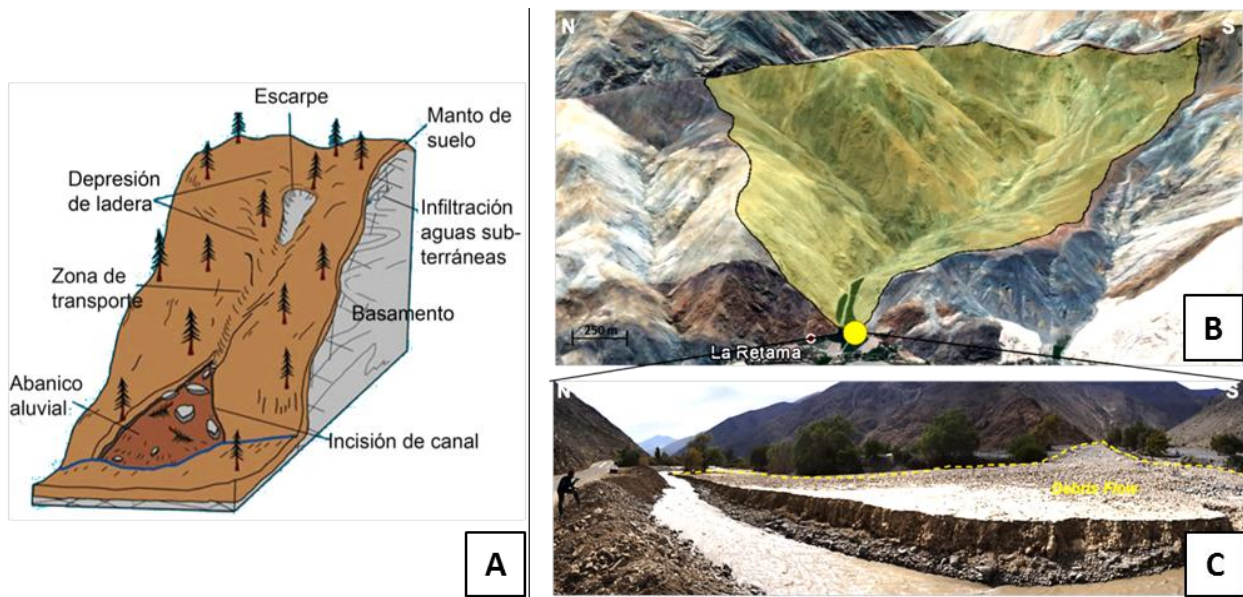
◆ Estaciones Meteorológicas DGA	<b>Flujos de barro- Vol (m3)</b>	<b>Flujos de detritos- Vol (m3)</b>
— Red de drenaje	● 100 - 1000	● 100 - 1000
<b>Límite y actividad de subcuencas</b>	● 1000 - 10000	● 1000 - 10000
■ Subcuenca Inactiva	● 10000 - 100000	● 10000 - 100000
■ Subcuenca activada- Flujos de detritos	● 100000 - 1000000	● 100000 - 1000000
■ Subcuenca activada- Flujos de barro		

**Figura 3-3.** Ubicación y delimitación de las 126 subcuencas del presente estudio categorizadas según su actividad y tipo de flujo durante el 25M. Los rombos amarillos señalan estaciones meteorológicas de la DGA. Los círculos azules corresponden a depósitos de flujos de detritos y los círculos rojos a depósitos de flujos de barro, en ambos casos el tamaño de los círculos indica el rango del volumen del depósito.

### 3.2.1. Flujos de Detritos

Iverson (2014) define y describe los flujos de detritos “*Debris Flow*” (Figura 3-4) como masas de suelo y roca fragmentada, cargados de agua, que descienden rápidamente desde laderas montañosas pudiéndose canalizar en canales e incisiones de montañas, incorporar objetos en su camino y formar depósitos lobulados cuando depositan su carga en fondos de valle. Se considera un flujo de detritos aquel con al menos un 50% de material de tamaño arena o mayor.

En los flujos de detritos el mecanismo de generación principal es la incorporación de agua al suelo (en este trabajo las precipitaciones ocurridas durante el 25M). Este aumento de agua debe sobrepasar la capacidad de infiltración del suelo para saturarlo en torno al 100% produciéndose de esta manera un incremento en la presión de poros que disminuye la resistencia al corte de la masa de suelo, condicionando la estabilidad de la ladera (Iverson, 2014). La mayoría de los flujos de detritos se originan desde fuentes discretas o distribuidas donde pendientes con ángulos mayores que 25 a 30° poseen una capa de suelo de baja cohesión y/o rocas fragmentadas.



**Figura 3-4.** (A) Diagrama de flujo de detritos (Ilustración modificada del Departamento de Geología de la Universidad de Wyoming). (B) Ejemplo depósito de flujos de detritos ('debris flow'; círculo amarillo) y subcuenca asociada (polígono amarillo) en subcuenca del río El Carmen (Imagen satelital de Google Earth). (C) Fotografía del mismo depósito de flujos de detritos tomada por Aguilar el 16 de Abril 2015.

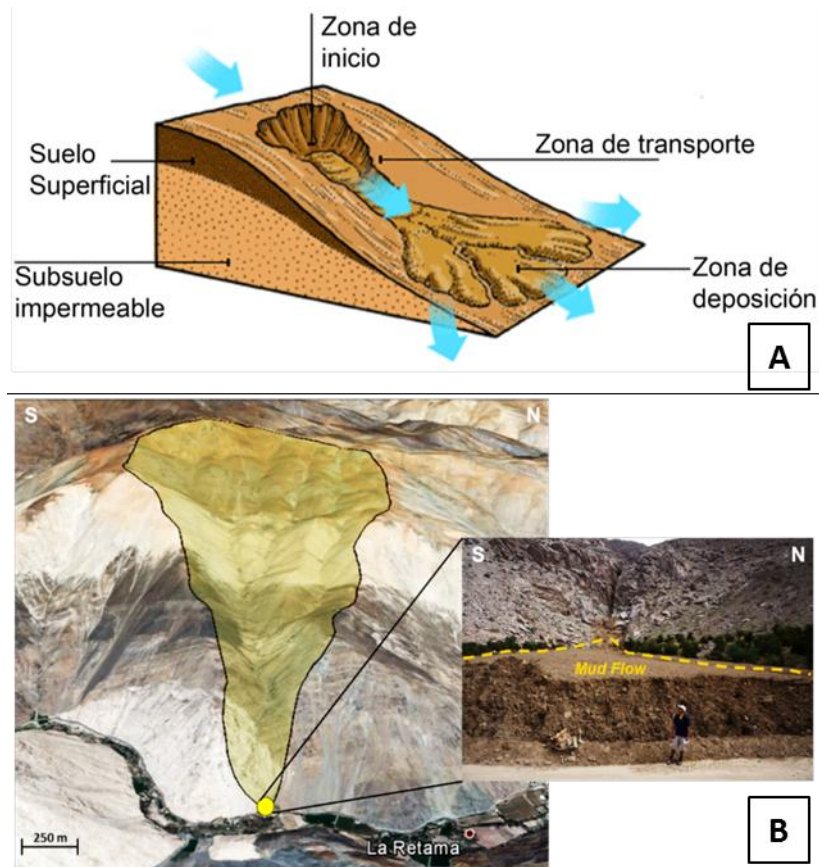
Los depósitos de los flujos de detritos se caracterizan por tener forma de abanico, poseer *levees* laterales de material grueso y un lóbulo terminal también formado por material grueso (Wilford et al., 2004). Los depósitos pueden presentar gradación inversa (aunque la gradación puede variar a normal o estar ausente) y la orientación del eje mayor de los clastos es predominantemente paralela al flujo.

Las observaciones de campo catastran 34 depósitos generados durante el 25M, cuyas características texturales y geomorfológicas indican un origen por flujos de detritos. Los volúmenes de estos depósitos varían desde 758 a 333.831 m<sup>3</sup> (Figura 3-3).

### 3.2.2. Flujos de Barro

Hungr et al. (2001) definen los flujos de barro "*Mud Flow*" (Figura 3-5); como un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos finos plásticos en un canal, involucrando un contenido de agua significativamente mayor relativo a la fuente del material (Índice de plasticidad > 5%). Si bien los flujos de barro y flujos de detritos comparten la mayoría de sus aspectos morfológicos y de comportamiento, es necesario remarcar que la fracción de finos modifica la reología del material, siendo esto importante en el modelamiento dinámico de los flujos. Además la presencia de arcilla retarda la dilución y drenaje del agua, causando mayores extensiones de la deposición de los flujos de barro (Hungr et al., 2001).





**Figura 3-5. (A)** Diagrama flujo de barro, las flechas indican dirección del deslizamiento (Ilustración modificada de *Geografía BBC*). **(B)** Ejemplo depósito de flujo de barro (círculo amarillo) y subcuenca asociada (polígono amarillo), ocurrido en la subcuenca oeste del río El Carmen en el sector de La Retama. Imagen satelital de Google Earth, fotografía del depósito tomada por Aguilar el 16 de Abril 2015.

Los depósitos de los flujos de barro poseen forma de abanico (vista en planta) con una mayor razón de ancho-profundidad que los depósitos de flujos de detritos. En condiciones similares los depósitos producidos por flujos de barro poseen un alcance mayor que aquellos provocados por flujos de detritos, por la presencia mencionada mayor de material fino (Hungt et al., 2001).

Las observaciones de campo catastran 15 depósitos generados durante el 25M cuyas características texturales y geomorfológicas indican un origen por flujos de barro. Los volúmenes de estos depósitos varían entre 3.034 y 204.100 m<sup>3</sup> (Figura 3-3).

### 3.3. Clasificación volumétrica de los depósitos

Además de la clasificación según el tipo de los depósitos (flujos de detritos o de barro), se ha agregado una clasificación según el volumen de los depósitos generados. Para esto se ha seguido la clasificación de 10 clases según magnitud volumétrica para flujos de detritos definida por Jakob (2005), presentada en la Tabla 3-2. El Anexo A contiene la información de volumen, tipo y clase según volumen de los 49 depósitos.

**Tabla 3-2.** Clasificación para flujos de detritos y barro según tamaño (Modificado de Jakob, 2005).

Clase	Volumen (m <sup>3</sup> )	Descarga (m <sup>3</sup> /s)	Área (m <sup>2</sup> )	Consecuencias Potenciales
1	<10 <sup>2</sup>	<5	<4x10 <sup>2</sup>	Daño muy localizado, en pequeñas quebradas se sabe que han muerto trabajadores, daño a construcciones pequeñas.
2	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	5-30	4x10 <sup>2</sup> -2x10 <sup>3</sup>	Podría enterrar autos, destruir edificación forestal, quebrar árboles, bloquear desagües, descarrilar trenes.
3	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	30-200	2x10 <sup>3</sup> -9x10 <sup>3</sup>	Podría destruir grandes construcciones, dañar puentes de concreto, bloquear o dañar carreteras y tuberías.
4	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	200-1500	9x10 <sup>3</sup> -4x10 <sup>4</sup>	Podría destruir partes de localidades, destruir secciones de infraestructura de corredores, puentes, bloquear riachuelos.
5	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>	1500-12000	4x10 <sup>4</sup> -2x10 <sup>5</sup>	Podría destruir partes de pueblos, destruir bosques de área de km <sup>2</sup> , bloquear riachuelos y pequeños ríos.
6	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	N/O	>2x10 <sup>5</sup>	Podría destruir pueblos, obliterar valles o abanicos de tamaño de decenas de km <sup>2</sup> , represar ríos.
7	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	N/O	N/O	Podría destruir parte de ciudades, inundar grandes valles de decenas de km <sup>2</sup> de tamaño, represar grandes ríos.
8	10 <sup>8</sup> -10 <sup>9</sup>	N/O	N/O	Podría destruir ciudades, inundar grandes valles de hasta 100 km <sup>2</sup> de tamaño, represar grandes ríos.
9	10 <sup>9</sup> -10 <sup>10</sup>	N/O	N/O	Destrucción extensa y completa sobre cientos de km <sup>2</sup>
10	>10 <sup>10</sup>	N/O	N/O	Destrucción extensa y completa sobre cientos de km <sup>2</sup>

Aplicando esta clasificación de tamaño volumétrico a los depósitos del 25M se obtiene que 1 depósito pertenece a la Clase-2, 19 depósitos corresponden a la Clase-3, 27 depósitos pertenecen a la Clase-4 y 2 depósitos pertenecen a la Clase-5. De esta manera los depósitos generados tienen el potencial de destruir partes de localidades, secciones de infraestructura de corredores o puentes y bloquear afluentes, según lo presentado en la Tabla 3-2. Lo anterior fue corroborado en terreno (Figura 3-6), donde uno de los depósitos de mayor volumen habría represado el río El Tránsito y desplazado un puente varias decenas de metros aguas abajo (Figura 3-6.C).



**Figura 3-6.** Fotografías tomadas por Aguilar et al. (2015) el 16 de Abril de 2015 en la zona de estudio. **(A)** Flujo de detritos Clase-3 en subcuenca afluente al río El Carmen con destrucción de vehículos; **(B)** Flujo de barro Clase-3 en subcuenca afluente río El Carmen con destrucción de viñedos; **(C)** Flujo de detritos Clase-5 en subcuenca afluente río El Tránsito con destrucción y movilización de puente; **(D)** Flujo de barro Clase-4 en subcuenca afluente río Carmen con destrucción de viviendas.

#### 4. Análisis de las subcuencas

Los parámetros referidos a la litología, morfometría e hidrografía de las subcuencas se escogieron en base a su influencia en la generación de flujos o inundaciones y la capacidad de producción de sedimentos de las mismas, según información bibliográfica (Tarbuck, 2005; de Scally y Owens, 2004; Wilford et al., 2004; González de Vallejos, 2002; Bovis y Jakob, 1999; Jakob y Bovis, 1996). Además se establecieron y calcularon razones e índices adimensionales con el objetivo de poder comparar subcuencas de distinta magnitud. El Anexo B contiene la información de las 126 subcuencas en el área de estudio.

Con el fin de encontrar aquellos parámetros significativos y sus posibles relaciones que favorezcan la generación de remociones en masa del tipo flujo en las subcuencas, se ha realizado un análisis estadístico de los parámetros seleccionados.

##### 4.1. Parámetro Litológico

Con el objetivo de evaluar la influencia de la litología de las subcuencas en la generación de flujos de detritos durante el *25M* se construyó un parámetro litológico (en adelante denominado *GEO*) a partir de la información bibliográfica y explicativa sobre procesos de desintegración de suelos y macizos rocosos para diferentes litologías. El parámetro agrupa y pondera las 37 unidades geológicas definidas por Salazar et al. (2013) de la zona de estudio en cinco grupos, según sus características litológicas, propiedades mecánicas y químicas que influyen en su fragmentación física y alteración química. Así variaciones litológicas determinan la disponibilidad relativa de detritos dentro de las subcuencas para ser transportados por los flujos. El material superficial, encerrado por cada subcuenca, es un factor latente en la capacidad de generación de posibles remociones en masa durante episodios de lluvias como los ocurridos en el evento *25M*. Las principales propiedades que condicionan la disponibilidad de detritos son la composición, texturas, estructuras y tiempo de exposición superficial de las rocas (Tarbuck, 2005). Cuantificar estas propiedades resulta difícil, por ello se utilizaron las siguientes propiedades físicas que las determinan:

❖ Resistencia: Es la resistencia que la roca presenta ante los procesos de alteración y desintegración. Se define como la tendencia a la ruptura de los componentes o estructuras internas de las rocas (González de Vallejos, 2002).

❖ Cohesión: Es la cualidad por la cual las partículas de un material, por ejemplo minerales de una roca, se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas (González de Vallejos, 2002).

❖ Porosidad: Corresponde al volumen de huecos o poros en las rocas sobre el volumen total. La porosidad decrece con la profundidad y con la edad de las rocas. Es la propiedad que más afecta a las características resistentes y mecánicas de las rocas, ya que la existencia de huecos puede dar lugar a zonas de debilidad. Es inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a la deformabilidad (González de Vallejos, 2002).

Considerando datos bibliográficos se ha asignado a cada uno de los cinco grupos geológicos definidos un valor de *Factor Litológico*, el cual es función del peso de los parámetros de resistencia, cohesión y porosidad (Tabla 4-1). Como fue descrito anteriormente la porosidad es la propiedad que tiene la mayor influencia en la



resistencia de las rocas, seguida por la influencia de la resistencia y de la cohesión (González de Vallejos, 2002). De esta manera se propone la siguiente ponderación porcentual para el cálculo del factor litológico para cada grupo:

$$\text{Factor Litológico} = (0.65 \times \text{Porosidad} + 0.25 \times \text{Resistencia} + 0.10 \times \text{Cohesión})/100$$

**Tabla 4-1.** Grupos geológicos construidos para estimar la influencia de la geología y meteorización en la producción de material superficial susceptible a ser movilizado.

Grupo	Unidades geológicas	Litología principal grupo	Resistencia Compresión Simple** (kg/cm <sup>2</sup> )	Cohesión** (kg/cm <sup>2</sup> )	Porosidad Eficaz** %	Factor Litológico
Geo1	Trch(t), Trch(gd), Trch(mg), Cpch(t), Cpch(gd), Eha, Eo(gd), Edp, Eo(md), Eo(dc), Palpg	Granodioritas triásicas y granitoides grano fino alterados	2115	185	0.5	54,7
Geo2	Kc, Jsa, Jsl1, Trslt, Ccb, Pgs, Ehrd, Egm, Jl, Trsf5, Trsf3, Trsf1, Trjv	Andesitas basálticas, areniscas y calizas.	1061	180	15	29,8
Geo3	Plp, Pqs, DCet(b), DCet(a), Cdp.	Esquistos	600	118	3	16,4
Geo4	Kip, Trsf4, Trsf2	Lutitas-Limolitas	200	190	8.5	7,50
Geo5	PIHf, PIHrm, PIHa, PIHc, Mgb	Depósitos Pleistocenos	Despreciable	Despreciable	60	3,90

\*Códigos unidades geológicas según descripción Salazar et al. (2013) para carta geológica El Tránsito-Lagunillas (detalle en Tabla 2-2).

\*\*Valores extraídos de libro Ingeniería geológica, González de Vallejo (2002). Para los casos de rangos de valores se ha puesto el valor medio del rango. En el caso de más de una litología se ha promediado los valores entre las litologías del grupo.

Con la suma ponderada del porcentaje de cada grupo geológico y el factor litológico asignado al grupo correspondiente, se construye la variable *GEO* para cada subcuenca, siendo una medida de la resistencia a la meteorización y producción de detritos en cada subcuenca (Tabla 4-2). En la Figura 4-1 se presentan los valores determinados para el parámetro *GEO* en cada una de las subcuencas estudiadas. El Anexo C contiene los porcentajes de grupo geológico encerrado por cada subcuenca y el valor de la variable *GEO* calculado para cada subcuenca.

**Tabla 4-2.** Resultados porcentaje y factor grupos geológicos para la subcuenca de la Qda. La Marquesa afluente al río El Carmen.

Grupo Geológico	% Grupo	Factor Litológico
Geo1	18,78	54,7
Geo2	58,69	29,8
Geo3	18,79	16,4
Geo4	0,00	7,50
Geo5	3,74	3,90

$$GEO_{\text{cuenca 'La Marquesa'}} = \frac{(18,78 \times 54,7 + 58,69 \times 29,8 + 18,79 \times 16,4 + 3,74 \times 3,9)}{100} = 30,97$$

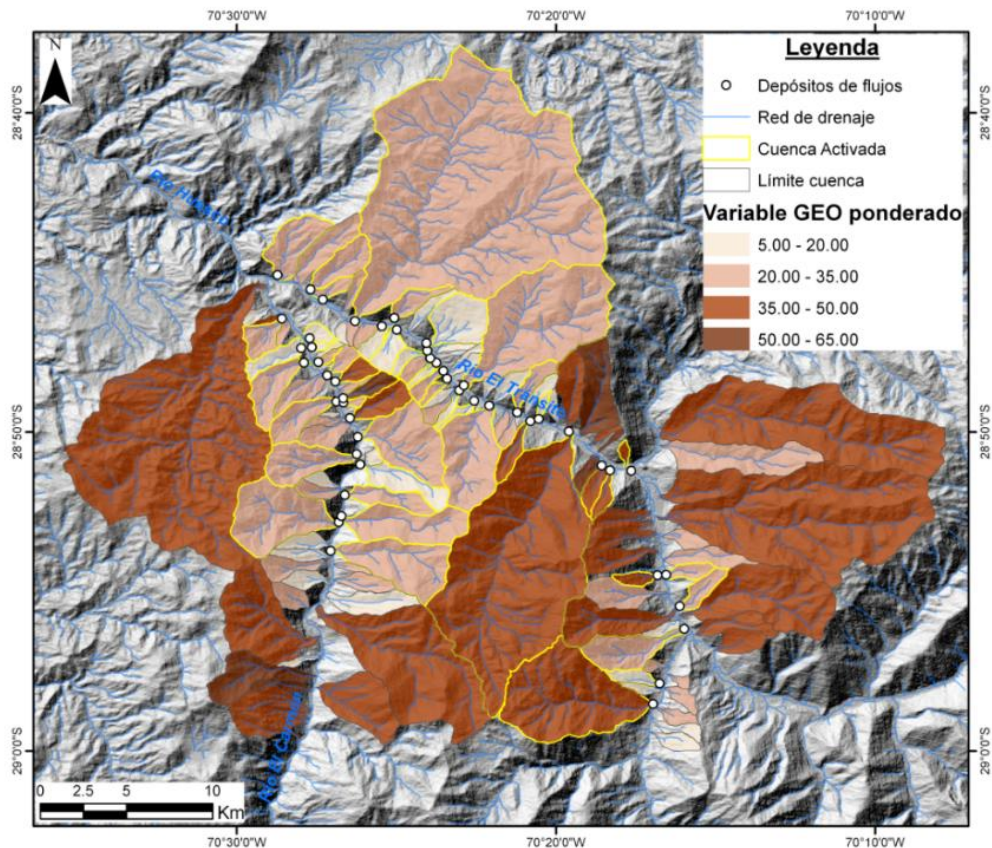


Figura 4-1. Mapa rango de valores de variable GEO ponderada dentro de cada subcuenca de la zona de estudio.

#### 4.2. Parámetros Morfométricos

Los parámetros morfométricos corresponden a los atributos de las subcuencas analizadas que permiten extraer el máximo de información geomorfológica de las mismas. Esto se logra a partir de la topografía extraída del modelo de elevación digital de resolución de celda 30 m. A través del cálculo de estos parámetros en software *GIS* se obtienen los datos morfométricos para cada subcuenca, los cuales están en el Anexo D. Los parámetros calculados son:

- ❖ **Área:** Corresponde a la superficie topográfica encerrada por la divisoria de aguas dentro de cada subcuenca. La Figura 4-2.A muestra la categorización del área de las subcuencas.

- ❖ **Largo:** Línea recta planimétrica desde el exutorio al punto más distante del borde de la subcuenca (Strahler, 1958).

- ❖ **Perímetro:** Es la medida del contorno de la superficie que es encerrada por cada subcuenca.

- ❖ **Altitud media (Zave):** Corresponde a la elevación topográfica media de la subcuenca con respecto al nivel del mar.

- ❖ **Pendiente media:** Corresponde al ángulo medio ponderado de las pendientes de las superficies dentro de cada subcuenca. La Figura 4-2.B muestra la categorización de la pendiente media de las subcuencas estudiadas.

❖ **Relieve:** Se define como la diferencia de elevación entre la altura máxima y altura mínima dentro de la subcuenca (Patton, 1988).

❖ **Índice de Gravelius ( $I_{GRAV}$ ):** 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 (Ecuación-1). La Figura 4-2.C muestra la categorización de este índice en las subcuencas de la zona de estudio. 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.

$$I_{GRAV} = 0.28 \frac{PERIMETRO}{\sqrt{AREA}} \quad (Ecuación-1)$$

❖ **Razón de Melton ( $MRATIO$ ):** La razón de Melton fue definida por Melton (1957) como el cociente entre el relieve y la raíz cuadrada del área de la subcuenca (Ecuación-2). Bovis y Jakob (1999) señalan a la razón de Melton como una aproximación al valor de rugosidad de una subcuenca, esta rugosidad actúa como un sustituto de la inestabilidad de las subcuencas, enfatizando que cuencas altamente disecadas son más propensas a generar flujos de detritos durante eventos climáticos extremos. Además esta razón ha sido utilizada por autores como Jackson (1987) para diferenciar subcuencas cuya rugosidad las hacen propensas a generar flujos de detritos en vez de inundaciones detríticas. La Figura 4-2.D muestra la categorización de este índice para las subcuencas en la zona de estudio.

$$MRATIO = \frac{RELIEVE}{\sqrt{AREA}} \quad (Ecuación-2)$$

❖ **Razón de Relieve ( $RRATIO$ ):** Ha sido definida por Strahler (1958) como el relieve dividido por el largo de la subcuenca (Ecuación-3).

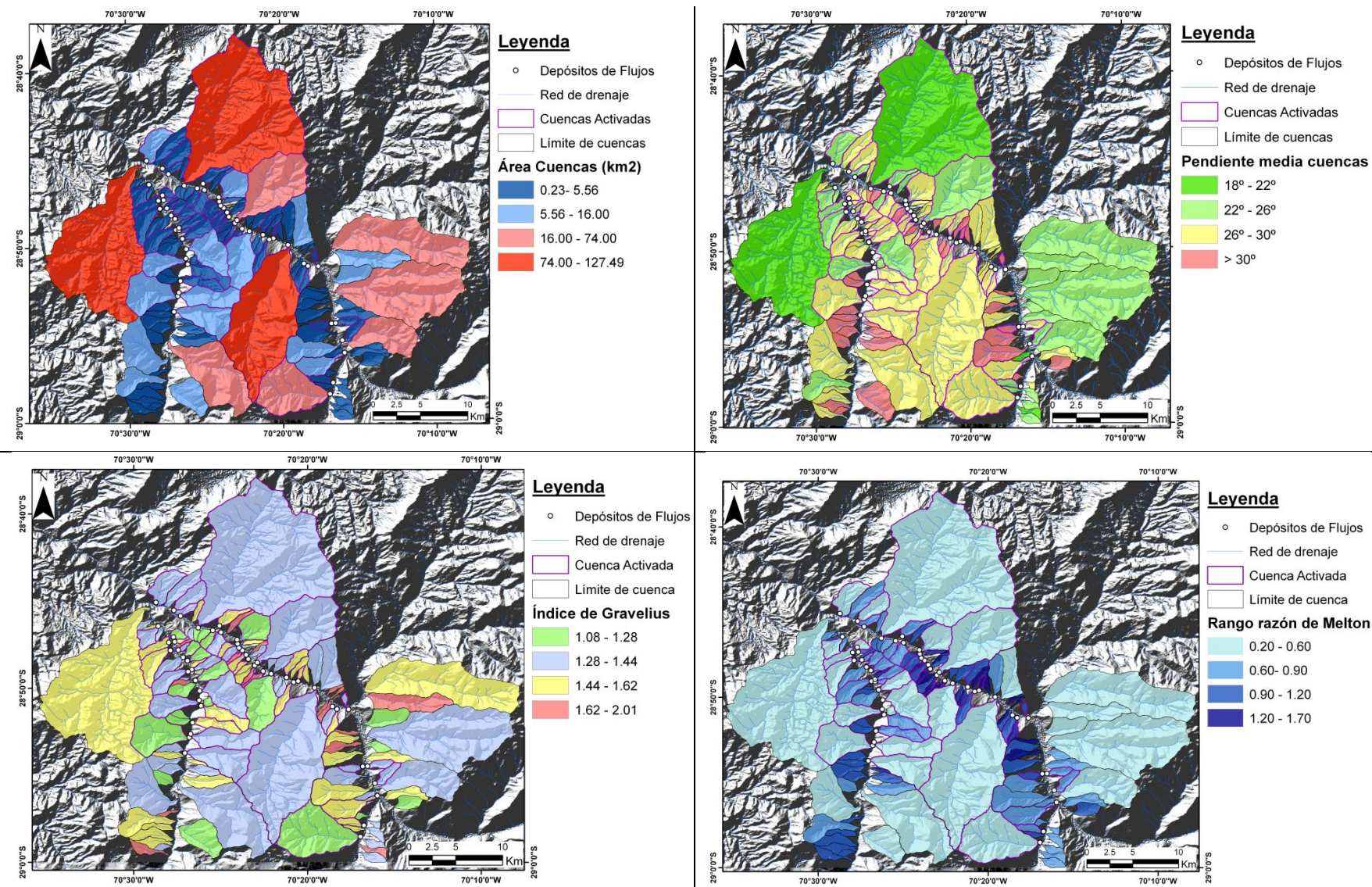
$$RRATIO = \frac{RELIEVE}{LARGO} \quad (Ecuación-3)$$

❖ **Hipsometría ( $HRATIO$ ):** La curva hipsométrica es la representación gráfica del porcentaje de área de la subcuenca sobre una elevación, donde el 100% corresponde a la altura máxima y el 0% corresponde a la elevación mínima (Strahler, 1952). La curva hipsométrica permite inferir la fase de desarrollo de la red de drenaje. Dado que la construcción de la integral hipsométrica para cada subcuenca es un trabajo laborioso de realizar para 126 subcuencas, se ha optado por añadir el estadístico hipsométrico definido por Wood y Snell (1960) como una aproximación a la curva hipsométrica. Este estadístico se define como el cociente entre la diferencia de la altura media con la mínima y la diferencia de la altura máxima y mínima (Ecuación-4).

$$HRATIO = \frac{Z_{ave} - Z_{mín}}{Z_{máx} - Z_{mín}} \quad (Ecuación-4)$$



**Figura 4-2. (A)** Mapa rango de áreas de las subcuencas analizadas. **(B)** Mapa rango de pendientes medias para cada subcuenca. **(C)** Mapa rango índice de Gravelius. **(D)** Mapa rango valores de razón de Melton dentro de cada subcuenca. Todos los mapas fueron construidos sobre el modelo de elevación digital sombreado. La activación de las subcuencas se refiere al evento del 25M.



### 4.3. Parámetros Hidrográficos

Los parámetros hidrográficos corresponden a las características de la red de drenaje dentro de cada subcuenca. La red de drenaje está referida a la red natural de transporte gravitacional de agua, sedimento o contaminantes, formada por ríos, lagos y flujos subterráneos, alimentados por la lluvia o derretimiento de nieves (Burbank y Anderson, 2001). La construcción de la red de drenaje se realiza a partir del modelo de elevación digital. Dado que el modelo de elevación digital utilizado posee una resolución de 30 m para cada celda, se ha optado por utilizar la red más fina posible con el fin de obtener la mayor cantidad de afluentes (canales, quebradas o zanjas) para cada cuenca. Así se clasifican las celdas con acumulación de flujo superiores a un número seleccionado de celdas vertientes dentro de cada subcuenca. Para objeto de este análisis se construyó una red de drenaje considerando un valor de área drenada de al menos 50 celdas vertientes para cada subcuenca (Figura 4-3).

En general en la zona de estudio, las redes de drenaje en cada subcuenca, presentan en planta un patrón de drenaje dendrítico (similar a las ramificaciones de un árbol), el cual se desarrolla cuando las rocas presentan una resistencia a la erosión uniforme y no ejercen control sobre la dirección de crecimiento del valle. Esta situación sucede al tratarse de rocas sedimentarias prácticamente horizontales o de rocas ígneas o metamórficas macizas (Burbank y Anderson, 2001). Los resultados de los parámetros hidrográficos analizados para cada subcuenca se presentan en el Anexo D, ellos son:

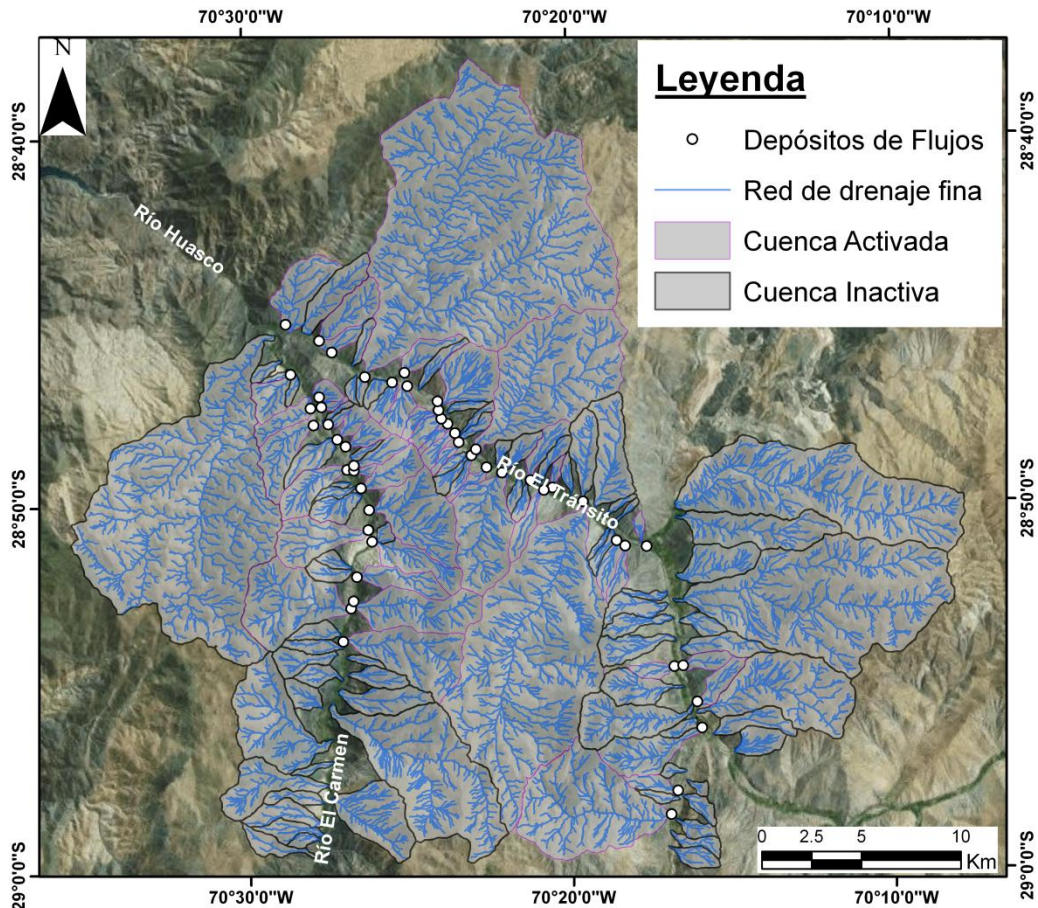
❖ **Densidad de drenaje:** Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua dentro de la subcuenca y el área total de ésta (Wilford et al., 2004).

$$Densidad = \frac{\sum L_{ci}}{AREA} \quad (Ecuación-5)$$

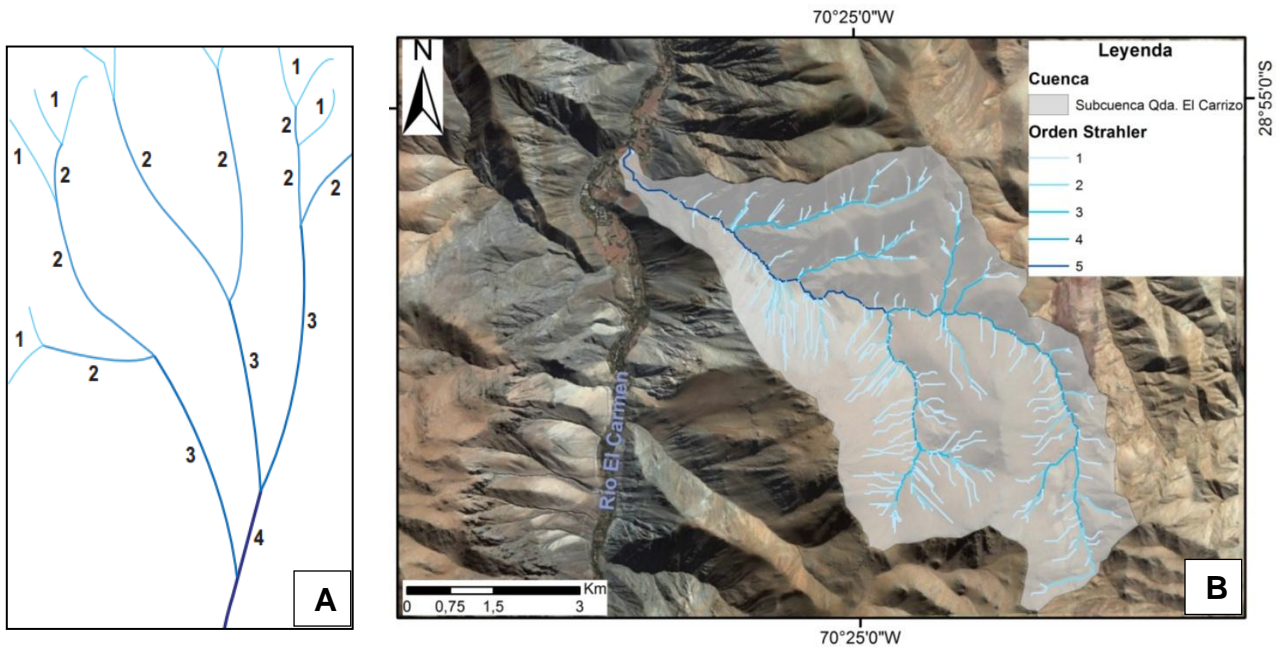
donde  $L_{ci}$  es la longitud (km) del cauce  $i$  dentro de la subcuenca

❖ **Orden de Strahler (Orden):** El orden de la red de drenaje de Strahler es un método para evaluar el tamaño y complejidad de un cauce o río, basado en el número de Strahler y la relación jerárquica de sus tributarios (Strahler, 1957). En las cabeceras se otorga un orden 1 a los cauces (que carecen de tributarios), si dos cauces de orden 1 se unen pasan a ser orden 2, si un cauce de orden 1 se une al de orden 2 este mantiene el orden mayor, es decir, 2. Este sistema continúa aguas abajo hasta la desembocadura donde se asigna el orden máximo (Figura 4-4.A). La Figura 4-4.B presenta un ejemplo del orden jerárquico en una de las subcuencas estudiadas.





**Figura 4-3.** Red de drenaje fina construida a partir de área drenada mínima de 50 celdas para cada subcuenca. La discriminación de activación de las subcuencas está referida al evento 25M.



**Figura 4-4.** La Imagen (A) muestra un diagrama de red de drenaje jerarquizada según orden de Strahler (Strahler, 1952). La Imagen (B) ilustra la red de drenaje y su orden de Strahler correspondiente para la subcuenca de la Quebrada El Carrizo en la zona de estudio, en este caso el orden mayor es 5.

#### 4.4. Análisis estadístico univariable

El análisis estadístico univariable tiene como objetivo entregar información sobre la distribución estadística de los datos para cada parámetro y con ello identificar errores o anomalías que deben ser consideradas en los análisis estadísticos posteriores. Las herramientas utilizadas en este análisis corresponden a las medidas de posición central y dispersión de los datos para cada parámetro. Además se presentan los histogramas de frecuencias, que corresponden a la distribución de las variables en rango o clases, permitiendo detectar valores extremos y erróneos de los datos, pudiendo indicar una posible mezcla de poblaciones (Emery et al., 2010).

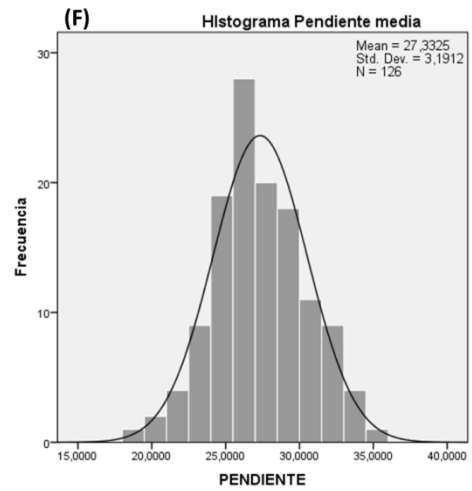
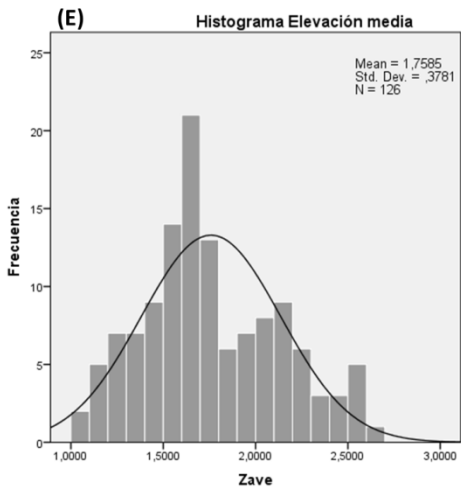
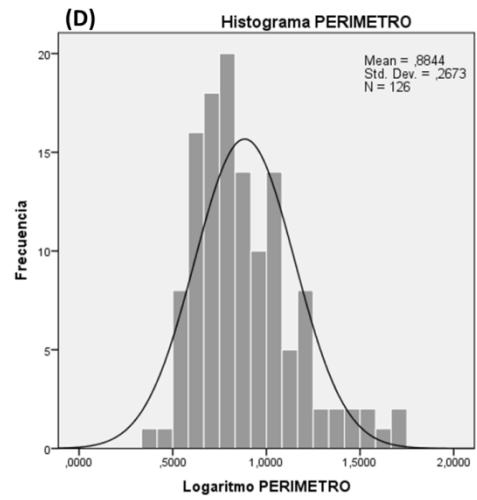
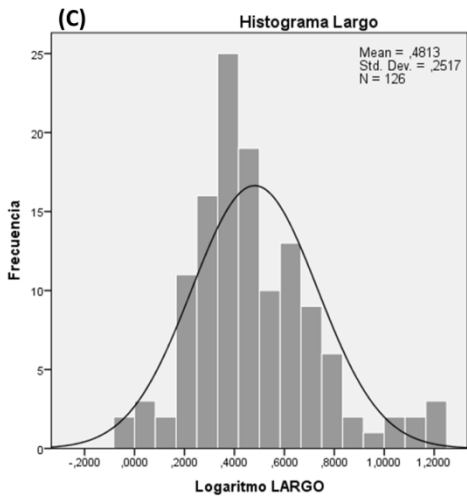
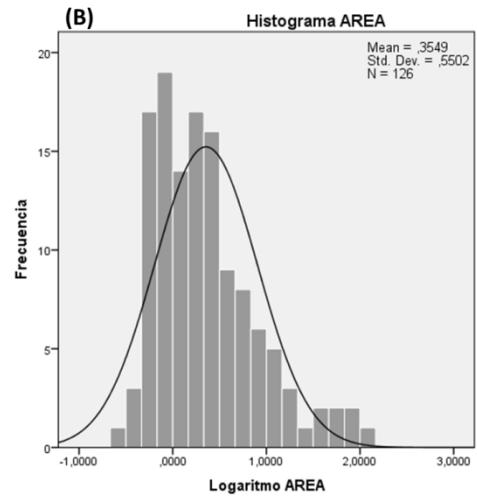
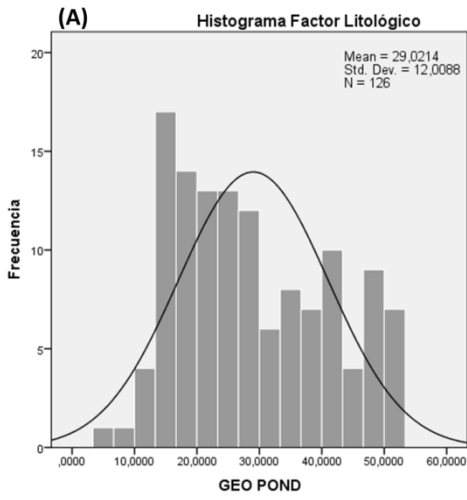
La Tabla 4-3 muestra las medidas estadísticas calculadas para las 13 variables analizadas. Las variables *Área*, *Largo* y *Perímetro* poseen un rango y varianza prácticamente similar a su valor máximo, lo cual indica grandes saltos en la magnitud de los datos en estas variables. Así los valores de los datos de estas variables han de ser transformados en base logarítmica (base 10) para desarrollar los análisis multivariados posteriores y así poder comparar entre subcuencas de diferentes órdenes de magnitud para estos parámetros (Jakob y Bovis, 1996).

**Tabla 4-3.** Medidas estadísticas de tendencia central y de dispersión de datos para las 13 variables analizadas de las subcuencas. Valores no transformados.

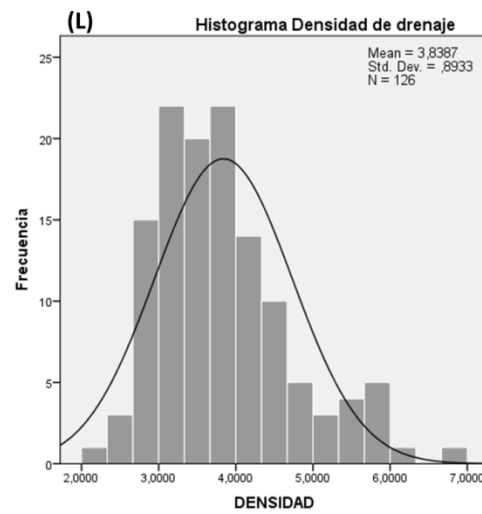
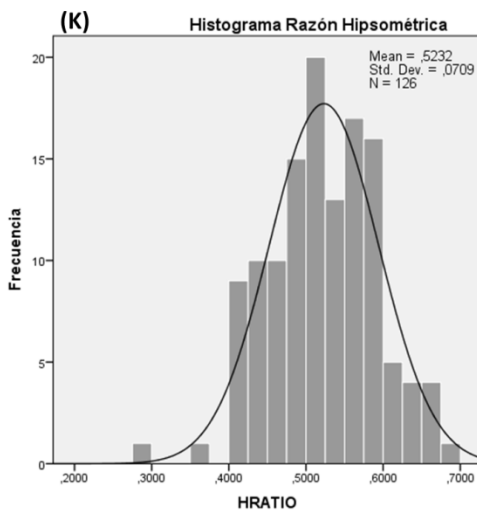
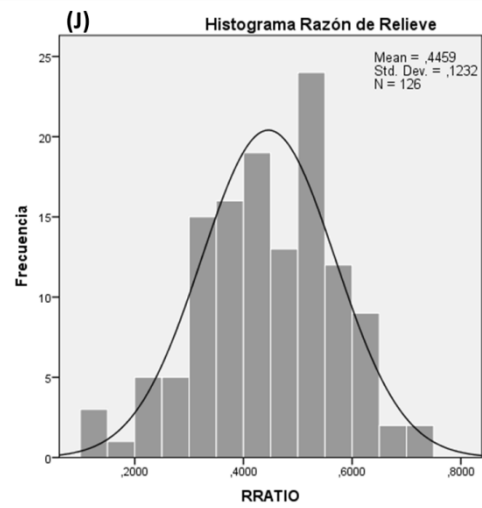
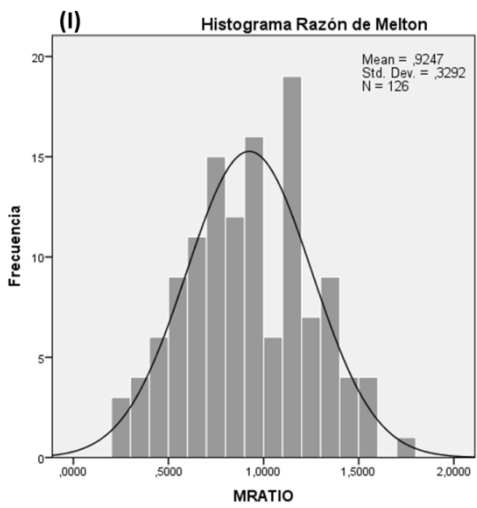
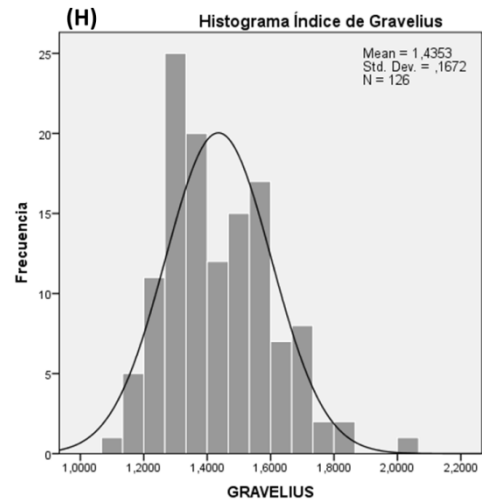
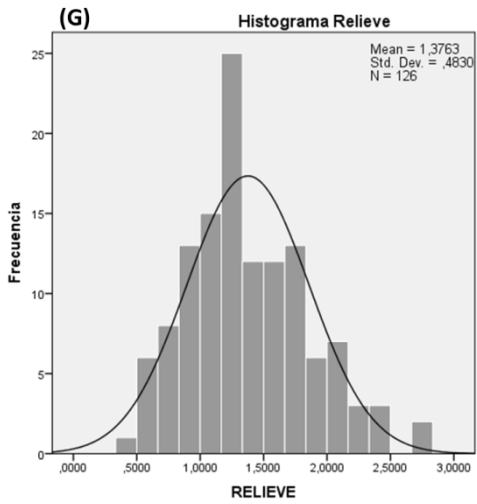
<i>Variable</i>	<i>N</i>	<i>Media</i>	<i>Mediana</i>	<i>Moda</i>	<i>Desv. Est.</i>	<i>Varianza</i>	<i>Rango</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<b>GEO</b>	126	29.02	26.42	5,5226 <sup>a</sup>	12.01	144.21	47.21	5.52	52.73
<b>Area (Km<sup>2</sup>)</b>	126	6.83	1.77	,2289 <sup>a</sup>	17.18	295.13	127.36	0.23	127.59
<b>Largo (Km)</b>	126	3.69	2.71	1,6500 <sup>a</sup>	2.98	8.89	15.82	0.93	16.75
<b>Perimetro (Km)</b>	126	9.65	6.62	4.50	8.74	76.41	50.99	2.37	53.37
<b>Zave (Km)</b>	126	1.76	1.68	1.61	0.38	0.14	1.67	1.03	2.70
<b>Pendiente (°)</b>	126	27.33	26.94	18,7378 <sup>a</sup>	3.19	10.18	17.16	18.74	35.90
<b>Relieve</b>	126	1.38	1.31	1.21	0.48	0.23	2.38	0.40	2.78
<b>I<sub>GRAV</sub></b>	126	1.44	1.41	1,0862 <sup>a</sup>	0.17	0.03	0.92	1.09	2.00
<b>MRATIO</b>	126	0.92	0.93	,2057 <sup>a</sup>	0.33	0.11	1.53	0.21	1.74
<b>RRATIO</b>	126	0.45	0.45	,1256 <sup>a</sup>	0.12	0.02	0.59	0.13	0.72
<b>HRATIO</b>	126	0.52	0.52	,2904 <sup>a</sup>	0.07	0.01	0.40	0.29	0.69
<b>Densidad (Km<sup>-1</sup>)</b>	126	3.84	3.71	2,2370 <sup>a</sup>	0.89	0.80	4.56	2.24	6.80
<b>Strahler</b>	126	3.17	3.00	3.00	1.10	1.20	5.00	1.00	6.00

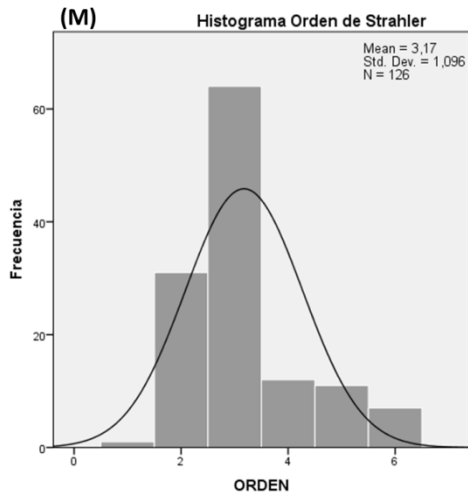
<sup>a</sup> Múltiples modas, se presenta el valor mínimo.

La Figura 4-5 presenta los histogramas de frecuencia para cada variable. Los histogramas indican que las variables siguen una distribución normal en todas las variables con excepción de los parámetros *Área*, *Largo* y *Perímetro*, las cuales siguen una distribución Lognormal. En general, la forma de la curva de distribución normal en los histogramas es mesocúrtica, notándose una sola población de datos para cada variable. Sin embargo, se distingue una forma de curva leptocúrtica (alargada) en las variables *Pendiente*, *RRATIO* y *HRATIO* lo cual representa un elevado grado de concentración de datos en torno a valores centrales (Emery et al., 2010).









**Figura 4-5.** Histogramas de frecuencias para las variables estudiadas: (A) *Geo*; (B) *Area*; (C) *Largo*; (D) *Perímetro*; (E) *Zave*; (F) *Pendiente*; (G) *Relieve*; (H)  $I_{GRAV}$ ; (I) *MRATIO*; (J) *RRATIO*; (K) *HRATIO*; (L) *Densidad*; (M) *Orden*. La curva en cada histograma corresponde a la curva de distribución normal o logaritmo normal (para el área, largo y perímetro). Mean: Media, Std. Dev.: Desviación estándar, N: número de subcuencas.

#### 4.5. Análisis Multivariable

El análisis estadístico multivariable tiene como finalidad identificar relaciones o dependencias entre las variables. Las herramientas utilizadas para el análisis multivariable son la matriz de correlaciones y el análisis factorial mediante componentes principales.

##### 4.5.1. Matriz de Correlaciones

La matriz de correlaciones es una matriz cuadrada simétrica de dimensión  $n \times n$ , siendo  $n$  el número de variables. Cada casilla presenta el valor del coeficiente de correlación de Pearson; la cual es la medida de relación lineal entre dos variables cuantitativas, siendo independiente de la escala de medida de las variables (Levy y Varela, 2003; Anexo E). De esta manera se considera al coeficiente de correlación de Pearson como un índice que permite medir el grado de relación o semejanza entre dos variables, donde valores cercanos a 1 indican una fuerte relación directa entre las variables y valores cercanos a -1 indican un fuerte relación inversa entre las variables, mientras que valores cercanos a 0 indican que no hay relación lineal entre las variables.

En la matriz de correlaciones (Tabla 4-4) se observa una relación positiva entre las variables asociadas al tamaño de las subcuencas (*Área*, *Largo* y *Perímetro*) y las variables asociadas al relieve de las subcuencas (*Zave* y *Relieve*). Además se observa una fuerte relación positiva entre estas variables de tamaño y relieve con el orden jerárquico de Strahler de la red de drenaje. Otras relaciones positivas destacadas son: la elevación media (*Zave*) se relaciona con el factor litológico (*GEO*; coef. Pearson de 0,5), la pendiente media está correlacionada con las razones de Melton (*MRATIO*) y de relieve (*RRATIO*), además la razón de Melton se correlaciona con el índice de la forma de las subcuencas ( $I_{GRAV}$ ).

Relaciones negativas se observan para las razones de Melton y de Relieve con las variables *Área*, *Perímetro*, *Largo* y *Orden*.

**Tabla 4-4.** Matriz de correlaciones para variables analizadas en las subcuencas. Valores sombreados celestes indican correlación positiva (mayor a 0.5) y valores sombreados rosados indican correlación negativa (menor a 0.5).

	GEO	Area	Largo	Perímetro	Zave	Pendiente	Relieve	I <sub>GRAV</sub>	MRATIO	RRATIO	HRATIO	Densidad	Orden
GEO	1.00												
Area	0.31	1.00											
Largo	0.36	<b>0.96</b>	1.00										
Perímetro	0.34	<b>0.98</b>	<b>0.99</b>	1.00									
Zave	<b>0.50</b>	<b>0.71</b>	<b>0.75</b>	<b>0.75</b>	1.00								
Pendiente	-0.05	-0.32	-0.32	-0.34	-0.01	1.00							
Relieve	0.41	<b>0.84</b>	<b>0.90</b>	<b>0.88</b>	<b>0.88</b>	0.01	1.00						
I <sub>GRAV</sub>	0.12	-0.26	0.00	-0.08	0.07	-0.07	0.07	1.00					
MRATIO	-0.09	<b>-0.77</b>	<b>-0.61</b>	<b>-0.68</b>	-0.28	<b>0.58</b>	-0.33	<b>0.57</b>	1.00				
RRATIO	-0.17	<b>-0.77</b>	<b>-0.76</b>	<b>-0.77</b>	-0.35	<b>0.74</b>	-0.43	0.12	<b>0.84</b>	1.00			
HRATIO	0.34	0.34	0.34	0.35	<b>0.52</b>	0.00	0.41	0.02	-0.11	-0.10	1.00		
Densidad	-0.07	-0.31	-0.25	-0.29	-0.09	0.29	-0.09	0.22	0.51	0.44	-0.01	1.00	
Orden	0.19	<b>0.79</b>	<b>0.73</b>	<b>0.76</b>	<b>0.57</b>	-0.19	<b>0.66</b>	-0.27	<b>-0.57</b>	<b>-0.53</b>	0.25	-0.06	1.00

#### 4.5.2. Análisis Factorial

El análisis factorial tiene como objeto simplificar las numerosas y complejas relaciones que se puedan encontrar en un conjunto de variables cuantitativas observadas. Para ello trata de encontrar dimensiones o factores que ponen en relación a las aparentemente no relacionadas variables a partir de la varianza que contiene cada variable, que se considera como una “medida de la información” (Levy y Varela, 2003).

El análisis factorial aquí presentado utiliza el método en componentes principales (ACP) para obtener los factores comunes. El ACP es un método geométrico de carácter descriptivo que tiene como finalidad descubrir la estructura subyacente en un conjunto de  $n$  individuos estudiados bajo una serie de  $p$  variables cuantitativas (Levy y Varela, 2003). De esta manera el método de análisis en componentes principales es un procedimiento matemático mediante el cual se pretende reducir la dimensión de un conjunto de  $p$  variables obteniendo un nuevo conjunto de variables más reducido, pero capaz de explicar la variabilidad común encontrada en un grupo de individuos sobre los cuales se han observado las  $p$  variables originales (Levy y Varela, 2003).

Levy y Varela (2003) destacan dos criterios para comprobar la calidad del análisis factorial por medio de componentes principales, descripción más detallada se encuentra en el Anexo E. Los criterios son:

- *Estadístico de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)*: Contrasta que las correlaciones parciales entre las variables estudiadas sean pequeñas. Valores de KMO de 0,80 a 0,90 son “muy buenos”, mientras que valores por debajo de 0,5 no son aceptables.
- *Contraste de esfericidad de Bartlett*: Comprueba que la matriz de correlaciones es significativamente distinta de la matriz identidad. Si la matriz de correlaciones fuese una matriz identidad no habría correlación entre las variables y no tendría sentido llevar a cabo un análisis factorial.

Como se observa en la Tabla 4-5 el valor de la medida KMO que considera todas las variables es cercano a 0,8, próximo al límite definido como “muy bueno” por Levy y Varela (2003). Además en la Tabla 4-5 se observa que la significancia del test de Bartlett es 0 con lo que se rechaza la hipótesis nula de que la matriz de correlaciones sea la identidad. Con lo anterior cabría esperar un buen ajuste factorial de las variables.

**Tabla 4-5.** KMO y prueba de Bartlett para la totalidad de variables analizadas para las subcuencas.

Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin		<b>0,75</b>
Prueba de esfericidad de Bartlett	chi-cuadrado <sup>1</sup>	2688
	gl <sup>2</sup>	78
	Sig. <sup>3</sup>	<b>0,00</b>
<sup>1</sup> Transformación del test chi-cuadrado.		
<sup>2</sup> Grados de libertad.		
<sup>3</sup> Significancia.		

La tabla de comunalidades (Tabla 4-6) representa la cantidad de varianza explicada de una variable al reducir el sistema a las nuevas dimensiones. Se denomina comunalidad a la proporción de la varianza explicada por los factores o componentes principales en una variable (Levy y Varela, 2003). La columna de las comunalidades iniciales son todas iguales a 1, esto es así porque en un análisis en componentes principales se calculan tantas componentes como variables originales y, así pues, se reproduce la totalidad de la varianza (Levy y Varela, 2003).

**Tabla 4-6.** Tabla de comunalidades.

Communalidades		
	Inicial	Extracción
GEO	1.000	.396
Area	1.000	.976
Largo	1.000	.942
Perímetro	1.000	.963
Zave Km	1.000	.847
Pendiente	1.000	.833
Relieve	1.000	.916
I <sub>GRAV</sub>	1.000	.882
MRATIO	1.000	.948
RRATIO	1.000	.938
HRATIO	1.000	.359
Densidad	1.000	.375
Orden	1.000	.702

De la Tabla 4-6 se observa que la varianza para las variables estudiadas es reproducida por los factores comunes del análisis factorial en más de un 70% (extracción por sobre 0,70), a excepción de las variables DENSIDAD, GEO POND y HRATIO (densidad y razón hipsométrica) en las que los factores comunes reproducen aproximadamente el 40% de su varianza.

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, se hará uso del método de componentes principales para obtener los factores comunes del análisis factorial, donde el nuevo conjunto de variables sea combinación lineal de las variables originales, tomando aquellas componentes cuyo valor propio asociado sea mayor que uno, es decir, aquellas componentes que aportan más información que cualquiera de las variables originales (Levy y Varela, 2003). La cantidad de factores comunes extraídos

se obtiene de la Tabla 4-7 denominada Varianza total explicada, observándose en ella la extracción de 3 factores que explican en conjunto un 77,52% de la varianza total.

**Tabla 4-7.** Varianza total explicada.

Componente	Autovalores Iniciales			Suma de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% Varianza	% Acumulado	Total	% Varianza	% Acumulado
1	6.576	50.585	50.585	6.576	50.585	50.585
2	2.243	17.251	67.836	2.243	17.251	67.836
3	1.258	9.680	77.517	1.258	9.680	77.517
4	.947	7.281	84.798			
5	.724	5.569	90.368			
6	.628	4.829	95.197			
7	.271	2.082	97.279			
8	.204	1.572	98.851			
9	.085	.656	99.507			
10	.041	.315	99.822			
11	.020	.156	99.978			
12	.003	.021	99.999			
13	7.265E-05	.001	100.000			

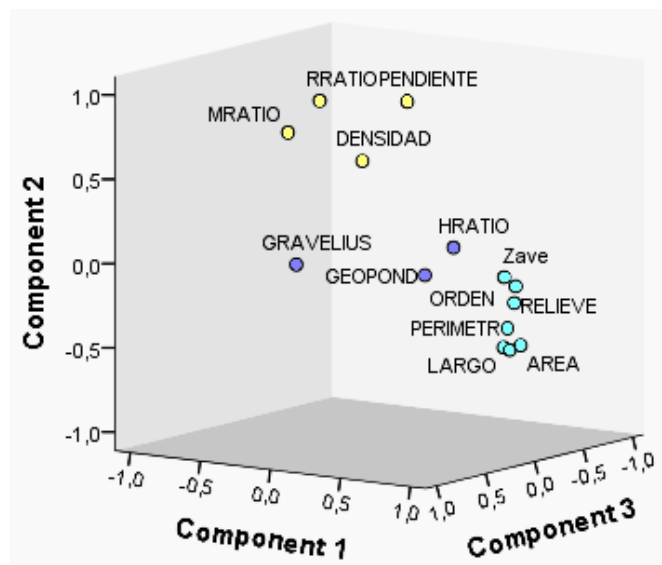
Para una mejor interpretación e identificación de los factores y resultados, una vez completado el análisis factorial, las soluciones deben ser rotadas ya que, por un lado, factores con muchas cargas factoriales son difíciles de interpretar y, por otro, no existe una solución perfecta o ideal en el análisis factorial, toda rotación ortogonal de una solución es también solución (Levy y Varela, 2003).

El método seleccionado para la rotación es el método *Varimax* que tiene como objetivo minimizar el número de variables que tienen coeficientes altos en un factor, para esto se maximiza la suma de las varianzas de los coeficientes factoriales dentro de esa componente, dejando por columna cantidades próximas bien a 1 o bien a 0, proporcionando factores que siguen estando sin correlación (Levy y Varela, 2003). Los resultados de la rotación y las componentes se presentan en la Tabla 4-8.

**Tabla 4-8.** Matriz de componentes rotadas, extracción de componentes principales. Método de rotación: Varimax.

Variable	Componentes		
	1	2	3
GEO	0.31	-0.02	0.55
Area	0.80	-0.50	-0.30
Largo	0.85	-0.47	-0.06
Perímetro	0.84	-0.50	-0.14
Zave	0.92	-0.03	0.04
Pendiente	0.05	0.89	-0.22
Relieve	0.95	-0.09	-0.03
lGRAV	0.06	0.09	0.93
MRATIO	-0.29	0.77	0.51
RRATIO	-0.37	0.89	0.07
HRATIO	0.07	0.12	0.58
Densidad	0.00	0.59	0.18
Orden	0.69	-0.27	-0.39

La primera observación luego de realizado el análisis factorial es que se ha reducido el conjunto original de 13 variables a tan sólo 3 factores. El gráfico presentado en la Figura 4-6 corresponde a la representación de las variables en estas tres componentes.



**Figura 4-6.** Gráfico de componentes principales. Círculos celestes indican variables pertenecientes al Factor-1, amarillos al Factor-2 y morados al Factor-3.

Luego a partir de la Tabla 4-8 (matriz de componentes rotadas) y el gráfico de componentes (Figura 4-6), se interpretan los siguientes factores (componentes) que agrupan a las variables del estudio:

- 1<sup>er</sup> Factor:** Zave, RELIEVE, ORDEN, AREA, LARGO y PERIMETRO.
- 2<sup>do</sup> Factor:** PENDIENTE, DENSIDAD, MRATIO y RRATIO.
- 3<sup>er</sup> Factor:** GRAVELIUS, GEO y HRATIO

De esta manera las variables que se agrupan en el primer factor corresponden esencialmente a parámetros relacionados con la forma de las subcuencas, así como sus propiedades de altura representada por la elevación media y por el relieve. El segundo factor agrupa a variables que tienen relación con la rugosidad presente en las subcuencas. Finalmente el tercer factor agrupa variables que como se vio mediante el análisis de correlaciones no presentan relaciones significativas entre sí.



## 5. Significancia estadística para activación de flujos en las subcuencas

Con el objetivo de evaluar la susceptibilidad de activación de flujos de detritos y barro en las subcuencas de los valles de los ríos El Tránsito y El Carmen, se desarrolló el ANOVA o análisis de la varianza de los parámetros medidos en las subcuencas. El ANOVA es una generalización del test de medias a dos grupos o más, el cual es utilizado para comparar la significancia de las variables. En este estudio se comparan los parámetros de las subcuencas donde ocurrieron los flujos durante el 25M con los de las subcuencas en las cuales no se produjeron. Con respecto a los depósitos se realizan dos análisis de varianza: El primero contrasta la significancia de los parámetros en el tipo de depósito generado y el segundo contrasta la significancia de los parámetros en el tipo de clase volumétrica a la cual pertenecen los depósitos.

### 5.1. Validación de supuestos previos al análisis de varianza

La realización del test ANOVA contempla dos criterios o supuestos previos que se deben cumplir antes de efectuarlo, estos son: Normalidad de las variables y Homocedasticidad de las varianzas de las variables.

Si bien en los histogramas presentados en la Sección 4.4 las variables presentan una distribución normal y log-normal, se optó por complementar el supuesto de normalidad por medio del test de Kolmogorov-Smirnov (Anexo E), el cual contempla que las variables siguen una distribución normal si su significancia es mayor que 0,05. Esto no se cumple para las variables *Orden* y *GEO* (significancia < 0,05) (Tabla 5-1), no obstante, a partir de la observación de sus histogramas sí se puede asumir normalidad para estas dos variables. Además autores como Levy y Varela (2003) resaltan que variables que no posean una distribución normal no afectan seriamente al test ANOVA.

El segundo supuesto indica que se debe cumplir la homocedasticidad de la varianza de las variables, esto es, que la varianza para cada variable analizada en el test ANOVA debe ser igual para ambos grupos estudiados. Para corroborar este supuesto se emplea el test de Levene, que indica que se cumple la homocedasticidad de la varianza para cada variable con valores de significancia por sobre 0,05, en cambio, valores por debajo de 0,05 no cumplen la igualdad de las varianzas. En la Tabla 5-1 se observa que ninguna variable posee una significancia menor a 0,05, por lo que todos los parámetros cumplen con la homocedasticidad de sus varianzas.

**Tabla 5-1.** Resultado de la significancia de los test de Kolmogorov-Smirnov y Levene para los parámetros estudiados. Sig: Significancia del test.

	N	Parámetros Normales		Estadístico Kolmogorov-Smirnov	Sig. Test KS	Estadístico Levene	Sig. Test Levene
		Media	Desv. Estándar				
<b>GEO</b>	126	13,067	7,857	1,588	<b>0,013</b>	0,121	0,728
<b>Area</b>	126	0,355	0,550	1,186	0,120	0,316	0,575
<b>Largo</b>	126	0,481	0,252	1,100	0,178	0,018	0,894
<b>Perimetro</b>	126	0,884	0,267	1,261	0,083	0,023	0,881
<b>Zave</b>	126	1,758	0,378	1,264	0,082	2,016	0,158
<b>Pendiente</b>	126	27,333	3,192	0,645	0,800	9,198	0,103
<b>Relieve</b>	126	1,377	0,483	1,018	0,252	2,137	0,146
<b>I<sub>GRAV</sub></b>	126	1,435	0,167	1,081	0,193	0,751	0,388
<b>MRATIO</b>	126	0,925	0,329	0,684	0,737	0,416	0,520
<b>RRATIO</b>	126	0,461	0,185	1,188	0,119	5,562	0,100
<b>HRATIO</b>	126	0,523	0,071	0,447	0,988	2,034	0,156
<b>Densidad</b>	126	3,839	0,893	1,088	0,187	0,575	0,450
<b>Orden</b>	126	3,170	1,096	3,650	<b>0,000</b>	0,143	0,706

## 5.2. Discriminación de los parámetros en la actividad de las subcuencas

Para discriminar los parámetros que influyen en la actividad de flujos en las subcuencas se desarrolló un análisis de la varianza (ANOVA). El test ANOVA considera como hipótesis nula que las medias de los parámetros analizados para las subcuencas activas e inactivas son iguales, la hipótesis alternativa plantea que al menos la media de algún grupo es distinta. En este estudio se ha optado por una significancia del 10% en los resultados, así variables con un valor de significancia menor o igual a 0,10 son significativas para la distinción de la actividad de las subcuencas (rechazo de la hipótesis nula), por otro lado valores por sobre 0,10 indican que no hay significancia en la variable para explicar la diferencia entre los grupos (aceptación de la hipótesis nula). En la Tabla 5-2 se observa que las variables *Área*, *Perímetro*, *Pendiente*, *MRATIO*, *RRATIO* y *Orden* son significativamente distintas con respecto a los grupos clasificados por actividad de las subcuencas.

**Tabla 5-2.** Test ANOVA para las variables estudiadas. Variables significativas en la activación de las cuencas se presentan en celdas sombreadas y en negrita. gl: grados de libertad, F: estadístico de Fisher ( ver ref. Anexo E).

	Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl.	Media cuadrática	F	Significancia.
GEO	<i>Actividad</i>	107.763	1	107.763	.746	.389
	<i>Error residual</i>	17918.577	124	144.505		
	<i>Total</i>	18026.340	125			
<b>Area</b>	<i>Actividad</i>	1.184	1	1.184	4.004	<b>.048</b>
	<i>Error residual</i>	36.655	124	.296		
	<i>Total</i>	37.839	125			
Largo	<i>Actividad</i>	.147	1	.147	2.345	.128
	<i>Error residual</i>	7.773	124	.063		
	<i>Total</i>	7.920	125			
<b>Perímetro</b>	<i>Actividad</i>	.214	1	.214	3.049	<b>.083</b>
	<i>Error residual</i>	8.715	124	.070		
	<i>Total</i>	8.929	125			
Zave	<i>Actividad</i>	.220	1	.220	1.553	.215
	<i>Error residual</i>	17.584	124	.142		
	<i>Total</i>	17.804	125			
<b>Pendiente</b>	<i>Actividad</i>	40.979	1	40.979	4.018	<b>.047</b>
	<i>Error residual</i>	1264.735	124	10.199		
	<i>Total</i>	1305.714	125			
Relieve	<i>Actividad</i>	.032	1	.032	.137	.712
	<i>Error residual</i>	29.237	124	.236		
	<i>Total</i>	29.269	125			
I <sub>GRAV</sub>	<i>Actividad</i>	.072	1	.072	2.623	.108
	<i>Error residual</i>	3.426	124	.028		
	<i>Total</i>	3.498	125			
<b>MRATIO</b>	<i>Actividad</i>	.592	1	.592	5.692	<b>.019</b>
	<i>Error residual</i>	12.894	124	.104		
	<i>Total</i>	13.485	125			
<b>RRATIO</b>	<i>Actividad</i>	.070	1	.070	4.776	<b>.031</b>
	<i>Error residual</i>	1.811	124	.015		
	<i>Total</i>	1.881	125			
HRATIO	<i>Actividad</i>	.006	1	.006	1.155	.285
	<i>Error residual</i>	.632	124	.005		
	<i>Total</i>	.638	125			
Densidad	<i>Actividad</i>	.079	1	.079	.098	.754
	<i>Error residual</i>	99.675	124	.804		
	<i>Total</i>	99.754	125			
<b>Orden</b>	<i>Actividad</i>	6.968	1	6.968	6.034	<b>.015</b>
	<i>Error residual</i>	143.191	124	1.155		
	<i>Total</i>	150.159	125			

Si bien el parámetro litológico ponderado (variable *GEO*) no es discriminante en la actividad de las subcuencas, se plantea a continuación la realización de un test ANOVA para los grupos geológicos definidos en la Sección 4.1. Esto tiene como finalidad contrastar la influencia que pueda tener cada grupo geológico dentro de cada subcuenca en la discriminación entre subcuencas que se activaron de aquellas que no produjeron flujos. Los resultados se presentan en la Tabla 5-3.

**Tabla 5-3.** Test ANOVA de los grupos geológicos para discriminar la actividad en subcuencas del 25M.

	Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl.	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Geo1</b>	<i>Actividad</i>	9296.896	1	9296.896	12.073	<b>.001</b>
	<i>Error residual</i>	54673.729	71	770.053		
	<i>Total</i>	63970.625	72			
Geo2	<i>Actividad</i>	45.476	1	45.476	.061	.806
	<i>Error residual</i>	70961.613	95	746.964		
	<i>Total</i>	71007.089	96			
Geo3	<i>Actividad</i>	518.739	1	518.739	.427	.516
	<i>Error residual</i>	63175.965	52	1214.922		
	<i>Total</i>	63694.704	53			
Geo4	<i>Actividad</i>	141.678	1	141.678	.329	.570
	<i>Error residual</i>	16791.075	39	430.540		
	<i>Total</i>	16932.753	40			
Geo5	<i>Actividad</i>	35.748	1	35.748	.129	.720
	<i>Error residual</i>	32908.372	119	276.541		
	<i>Total</i>	32944.120	120			

Con una significancia de 0,001 se tiene que la presencia del grupo Geo1 dentro de cada subcuenca restringe la posible activación de remociones del tipo flujo en las subcuencas. El grupo Geo1 está constituido por rocas intrusivas, principalmente por las tonalitas, granodioritas y monzogranitos de los Complejos plutónicos Chollay y Chancoquín. La estadística de los valores de las seis variables que son influyentes en la activación de las subcuencas según los resultados del ANOVA se presenta en la Tabla 5-4. El análisis indicó que el tamaño (área y perímetro), la pendiente, la rugosidad (razón de Melton), la razón de relieve, la jerarquía en la red de drenaje y la menor proporción de rocas intrusivas en las subcuencas influyeron en la generación de flujos de detritos y barro.

**Tabla 5-4.** Resumen estadístico univariable de los parámetros influyentes en la actividad de subcuencas para el 25M.

Parámetro	Grupo	Media	Desv. est.	Mínimo	Máximo
<b>Area</b>	<i>Inactivas</i>	5.611	1.622	0.2289	96.7318
	<i>Activadas</i>	8.758	3.003	0.4198	127.5917
<b>Perímetro</b>	<i>Inactivas</i>	8.951	.950	2.3730	52.3630
	<i>Activadas</i>	10.748	1.332	2.9610	53.3650
<b>Pendiente</b>	<i>Inactivas</i>	27.787	0.395	18.7378	33.6679
	<i>Activadas</i>	26.618	0.368	20.4650	35.8977
<b>MRATIO</b>	<i>Inactivas</i>	0.980	0.035	0.2057	1.5454
	<i>Activadas</i>	0.838	0.049	0.2206	1.7393
<b>RRATIO</b>	<i>Inactivas</i>	0.465	0.014	0.1256	.7175
	<i>Activadas</i>	0.416	0.017	0.1411	.6811
<b>Orden</b>	<i>Inactivas</i>	2.987	0.127	1	6
	<i>Activadas</i>	3.469	0.143	2	6
<b>Geo1</b>	<i>Inactivas</i>	58.128	4.390	2.9776	96.1601
	<i>Activadas</i>	35.453	4.828	1.3924	87.8036

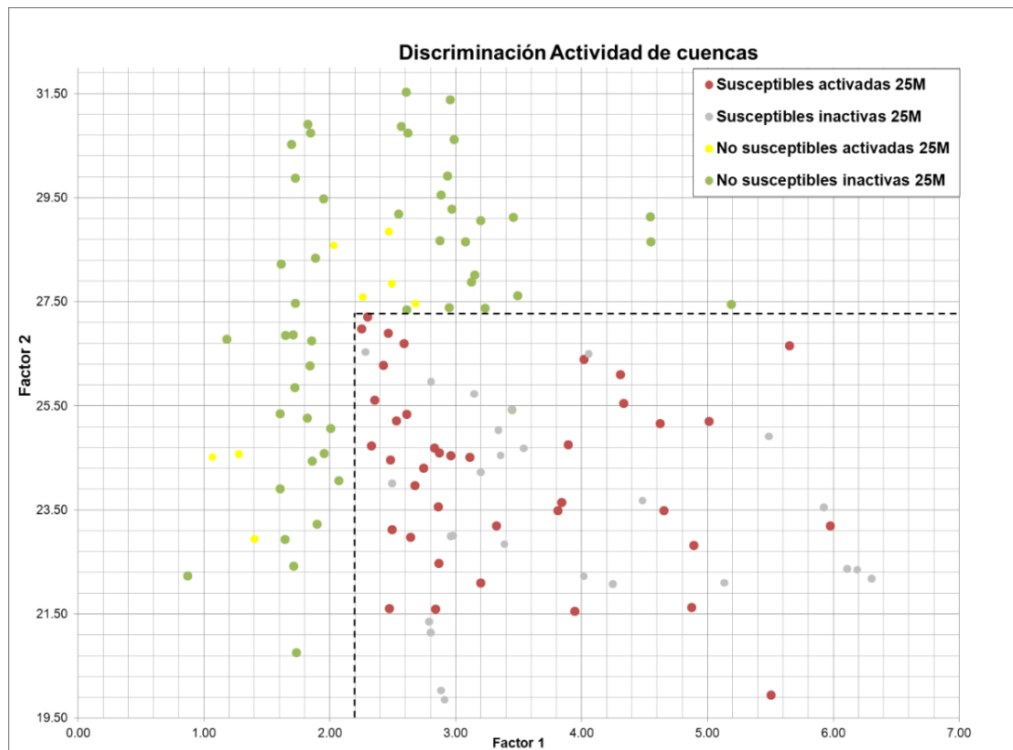
Con la información obtenida del test ANOVA en conjunto con el análisis factorial (sección 4.5.2), es posible reformular los factores de este análisis con las 6 variables identificadas como significativas en la discriminación entre subcuencas inactivas y activadas: *Orden*, *Área*, *Perímetro*, *Pendiente*, *MRATIO* y *RRATIO*. De esta manera los nuevos factores, en base a su grado de correlación y la ponderación de cada variable definida en el análisis factorial, quedan definidos como:

$$\mathbf{Factor1} = 0,69 \times \mathbf{ORDEN} + 0,80 \times \mathbf{AREA} + 0,84 \times \mathbf{PERIMETRO}$$

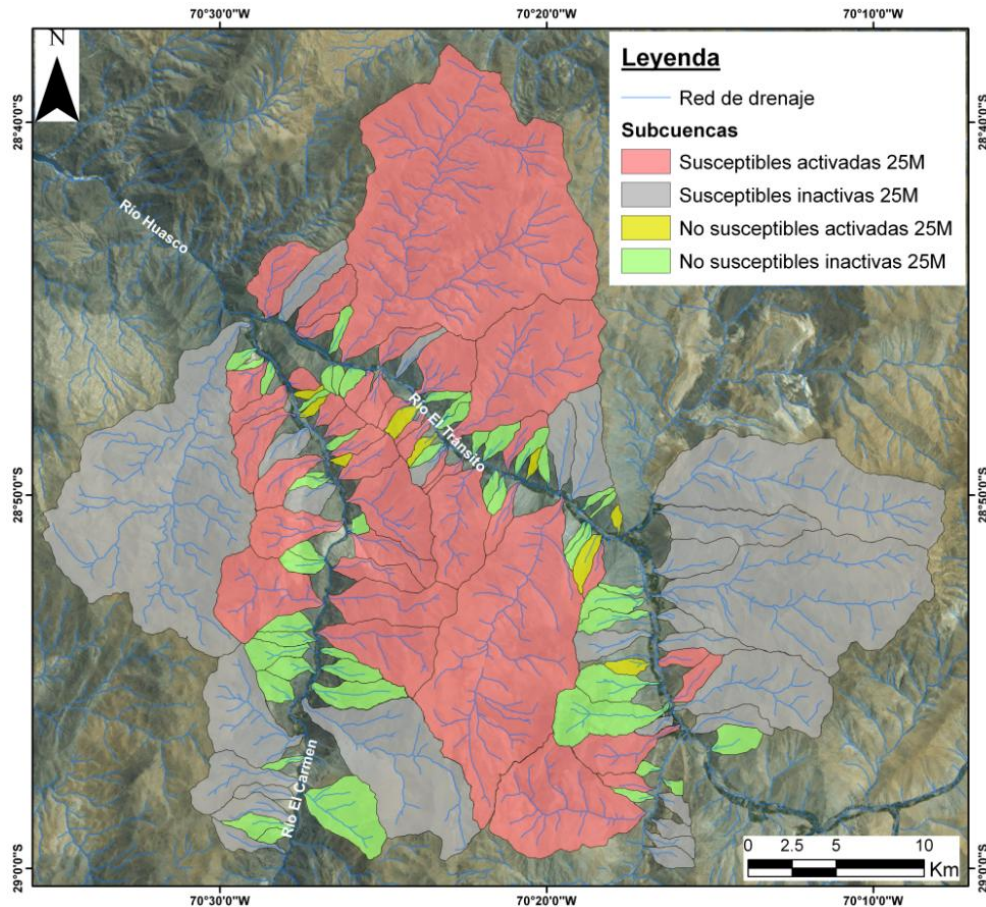
$$\mathbf{Factor2} = 0,89 \times \mathbf{PENDIENTE} + 0,77 \times \mathbf{MRATIO} + 0,89 \times \mathbf{RRATIO}$$

Según lo que representa cada uno de estos parámetros, y sus características conjuntas, se plantea nombrar al Factor-1 como “Factor de Escala”, y al Factor-2 como “Factor de Retención”.

Al aplicar la fórmula de estos factores a la base de datos de las 126 subcuencas, se construye el gráfico de la Figura 5-1, donde se observa una zona delimitada por líneas punteadas en la cual se concentra la mayor cantidad de subcuencas activadas. Esta zona de susceptibilidad de generación de flujos se caracteriza por poseer valores mayores a 2,2 en el Factor de Escala y valores menores que 27,3 en el Factor de Retención. De esta manera se obtiene que un 81,6% de las subcuencas que produjeron flujos de detritos o de barro en el evento del 25M fueron correctamente clasificadas en la zona de susceptibilidad utilizando esta discriminación por factores. Además se tiene que un 36,4% de las subcuencas que son susceptibles a generar remociones del tipo flujo no fueron activadas durante el temporal del 25M, así estas subcuencas reúnen las condiciones para producir flujos pero no fueron generados (subcuencas grises en mapa de la Figura 5-2).



**Figura 5-1.** Gráfico de susceptibilidad de generación de flujos de subcuencas y actividad durante el 25M. La zona de susceptibilidad está enmarcada por valores por sobre 2,2 en Factor de Escala (Factor 1), y por debajo de 27,3 en el Factor de Retención (Factor 2).



**Figura 5-2.** Mapa de susceptibilidad de generación de flujos de las subcuencas en la zona de estudio y correlación con la actividad generada durante el 25M. Leyenda en figura.

### 5.3. Discriminación de parámetros para Clase y Tipo de depósitos

Con el propósito de determinar si los parámetros litológicos, morfométricos e hidrográficos de las subcuencas tienen influencia en las características morfológicas y sedimentológicas de los depósitos generados, se realizan dos análisis de varianza (ANOVA). El primero tiene como finalidad identificar que parámetros tienen significancia en la magnitud (volumen) de los depósitos, mientras que el segundo identifica que parámetros tienen significancia en el tipo de depósito generado (flujos de detritos o de barro).

Los depósitos generados durante el 25M se clasificaron como Clase-3 ( $<10.000 \text{ m}^3$ ) y Clase-4 ( $>10.000 \text{ m}^3$ ) según la tabla de clasificación de Jakob (2005) (detalle en la sección 3.4). El test ANOVA de los parámetros analizados establece como hipótesis nula que las medias son iguales para los depósitos de ambas clases. La tabla con los resultados completos de este test se presenta en el Anexo F-1. Este análisis determinó que las variables significativas en la clasificación de los depósitos según su volumen son: *Geo4*, *Área*, *Largo*, *Perímetro*, *Zave*, *Relieve*, *Orden*, *MRATIO* y *RRATIO*. Los valores estadísticos para cada clase se muestran en la Tabla 5-5, en la cual se observa que subcuencas de mayores dimensiones (*Área*, *Largo* y *Perímetro*), mayor relieve (*Zave* y *RELIEVE*), menor rugosidad (*MRATIO*) y mayor orden jerárquico (*Orden*) generaron depósitos de mayor volumen. Un mayor valor medio de área superficial de la variable *Geo4*, que integra litologías correspondientes a lutitas y limolitas, determina un menor volumen del depósito.



**Tabla 5-5.** Estadística univariable de los parámetros significativos en la discriminación por clases de depósitos.

Parámetro	Clase	Media	Error est.	Mínimo	Máximo
<b>Geo4</b>	<i>Clase-3</i>	44.50	8.71	15.90	78.36
	<i>Clase-4</i>	21.67	5.18	2.87	45.94
<b>Area</b>	<i>Clase-3</i>	2.01	0.38	0.42	6.69
	<i>Clase-4</i>	13.03	4.76	0.54	127.59
<b>Largo</b>	<i>Clase-3</i>	2.63	0.22	0.97	4.32
	<i>Clase-4</i>	4.90	0.68	1.63	16.75
<b>Perímetro</b>	<i>Clase-3</i>	6.60	0.61	2.96	12.22
	<i>Clase-4</i>	13.37	2.01	3.69	53.37
<b>Zave</b>	<i>Clase-3</i>	1.55	0.07	1.14	2.14
	<i>Clase-4</i>	1.80	0.06	1.21	2.48
<b>Relieve</b>	<i>Clase-3</i>	1.17	0.08	0.58	1.84
	<i>Clase-4</i>	1.54	0.08	0.86	2.49
<b>MRATIO</b>	<i>Clase-3</i>	0.95	0.07	0.52	1.74
	<i>Clase-4</i>	0.76	0.06	0.22	1.53
<b>RRATIO</b>	<i>Clase-3</i>	0.47	0.02	0.30	0.68
	<i>Clase-4</i>	0.38	0.02	0.14	0.59
<b>Orden</b>	<i>Clase-3</i>	3.00	0.20	2.00	6.00
	<i>Clase-4</i>	3.77	0.18	3.00	6.00

Los depósitos generados durante el 25M se clasificaron en terreno en depósitos generados por flujos de detritos y flujos de barro (detalle en la sección 3.2). El test ANOVA de los parámetros analizados establece como hipótesis nula que las medias son iguales para ambos tipos de flujos. La tabla con los resultados completos de este test ANOVA se presenta en el Anexo G. Este análisis determinó que las variables significativas en la clasificación de los depósitos según su tipo son: *Área*, *Largo*, *Perímetro*, *Zave*, *Relieve*, *Geo3* y *Geo4*. Los valores estadísticos univariados de cada tipo de flujo se muestran en la Tabla 5-6, en la cual se observa que subcuencas de mayores dimensiones (*Área*, *Largo* y *Perímetro*) y de mayor relieve (*Zave* y *Relieve*) se asocian a depósitos de flujos de detritos. Un mayor valor medio de área superficial de la variable *Geo4*, que integra litologías correspondientes a lutitas y limolitas, determina la ocurrencia de depósitos generados por flujos de barro. En cambio un valor promedio mayor del grupo geológico *Geo3*, constituido principalmente por rocas metamórficas (esquistos), está asociado a la ocurrencia de depósitos por flujos de detritos.

**Tabla 5-6.** Estadística univariable de los parámetros significativos en la discriminación por tipo de depósitos.

Parámetro	Tipo Flujo	Media	Error est.	Mínimo	Máximo
<b>Geo3</b>	<i>Flujo de detritos</i>	38.85	6.88	0.21	92.30
	<i>Flujo de barro</i>	15.44	11.51	0.83	83.71
<b>Geo4</b>	<i>Flujo de detritos</i>	24.91	4.93	2.87	52.44
	<i>Flujo de barro</i>	46.49	12.04	10.57	78.36
<b>AREA</b>	<i>Flujo de detritos</i>	11.51	4.25	0.55	127.59
	<i>Flujo de barro</i>	2.51	0.77	0.42	12.21
<b>LARGO</b>	<i>Flujo de detritos</i>	4.66	0.61	1.90	16.75
	<i>Flujo de barro</i>	2.57	0.29	0.97	4.79
<b>PERIMETRO</b>	<i>Flujo de detritos</i>	12.45	1.81	4.06	53.37
	<i>Flujo de barro</i>	6.88	0.95	2.96	16.33
<b>Zave</b>	<i>Flujo de detritos</i>	1.80	0.06	1.31	2.48
	<i>Flujo de barro</i>	1.49	0.07	1.14	2.09
<b>RELIEVE</b>	<i>Flujo de detritos</i>	1.54	0.07	0.93	2.49
	<i>Flujo de barro</i>	1.08	0.09	0.58	1.84

## 6. Discusiones

### 6.1. Actividad de subcuencas

Los parámetros morfométricos área y perímetro, relacionados con el tamaño de las subcuencas, poseen un valor medio mayor en las subcuencas activadas en comparación con las subcuencas que se mantuvieron inactivas. El orden jerárquico de la red de drenaje también ha resultado ser significativo, de donde se establece que un orden mayor a 3 es característico de las subcuencas activadas durante el episodio del 25M. Esto señala que en una subcuenca con red de drenaje de mayor orden hay mayor cantidad de conexiones de canales dentro de la misma y es, en estos canales, donde se inician los flujos de detritos o de barro, es decir, mayor cantidad de canales de drenaje se traducen en una mayor cantidad de zonas potenciales de inicio de remociones. Los parámetros antes mencionados constituyen el “Factor de Escala”, descrito por otros autores como “efecto de escala” (de Scally y Owens, 2004; Bovis y Jakob, 1999). Así autores como Bovis y Jakob (1999) sugieren que subcuencas de mayor tamaño tienen mayor posibilidad de generar flujos, ya que existe una mayor probabilidad de encontrar zonas de inestabilidad en ellas. Esto también es corroborado en el trabajo de de Scally y Owens (2004) donde el tamaño de la subcuenca es un control importante en la disponibilidad de sedimentos por ser transportados.

Las subcuencas inactivas y las activadas durante el 25M están dentro de rangos de susceptibilidad de generación de flujos, respecto a sus valores medios de pendiente, rugosidad y relieve (Iverson, 2014; de Scally y Owens, 2004; Bovis y Jakob, 1999). Sin embargo, las subcuencas inactivas poseen medias mayores que las subcuencas activadas para estos tres parámetros. Respecto a la pendiente media, las subcuencas inactivas tienen una media levemente mayor ( $27,8^\circ$ ) que las subcuencas activadas ( $26,6^\circ$ ). El valor medio de la razón de Melton para las subcuencas activas es menor (0,84) que las inactivas (0,98). Además el valor medio de la razón de relieve es menor en las subcuencas activadas (0,42) en comparación con las inactivas (0,47). La generación de flujos en cuencas de más baja pendiente, rugosidad y relieve se podría explicar por el “Factor de Retención”. La influencia de este factor se define como la mayor capacidad de almacenar un reservorio importante de coluvios y regolitos dado el entrampamiento de los detritos, mayor preservación y acumulación en el tiempo. Estos detritos solo serían evacuados de las cuencas ante eventos de la magnitud del 25M.

El grupo de las subcuencas inactivas posee un menor factor de retención, ya que al poseer un valor de pendiente media muy alta, no son capaces de almacenar detritos. Esto se complementa con un elevado valor medio de la razón de relieve en estas subcuencas, lo cual implica un perfil longitudinal de alto gradiente y alta energía potencial de estas subcuencas, disminuyendo su capacidad de almacenar y retener los sedimentos que se generan en ellas (de Scally y Owens, 2004). Además el valor mayor de la razón de Melton en las subcuencas no activadas es indicativo de una alta disección de estas subcuencas, lo cual implicaría una elevada inestabilidad de las mismas (Bovis y Jakob, 1999), no permitiendo retener el material generado para ser movilizado.

La influencia de la litología en la generación de flujos en las subcuencas quedó establecida por el grupo geológico *Geo1*, que es un limitante de la actividad aluvional. Este grupo incluye litologías de intrusivos en el área de estudio, principalmente de los complejos plutónicos Chollay y Chancoquín. El valor medio del porcentaje de área superficial de este grupo geológico es de 58% en las subcuencas inactivas, mientras

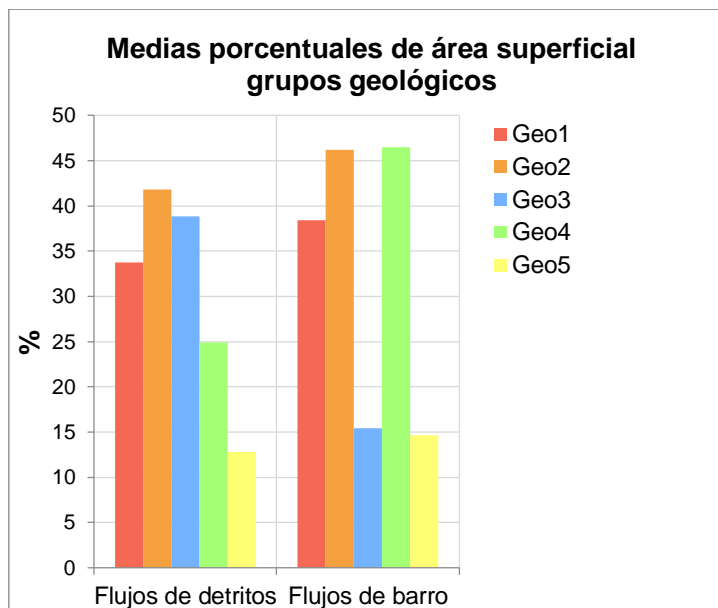
que en las subcuencas que fueron activadas es de un 35%. Esto se complementa con el control litológico que se puede apreciar en el mapa geológico local de la Figura 2-2, en la cual se observa una mayor extensión de rocas intrusivas hacia el este de la zona de estudio, con mayor presencia de subcuencas no activadas. Autores como Jakob y Bovis (1996) también han remarcado la importancia del control litológico, en especial de las rocas intrusivas que limitan la actividad de generación de flujos.

Es importante señalar que otras variables externas, por ejemplo la cantidad de precipitación relativa entre cada subcuenca, son importantes como agentes gatilladores de generación de deslizamientos del tipo flujo. Esto podría explicar porque algunas subcuencas que cumplen con las condiciones de activación, no fueron activadas durante el episodio del 25M, pero que podrían potencialmente, ser activadas en episodios de precipitaciones similares o de mayor intensidad.

## **6.2. Magnitud y tipo de depósitos**

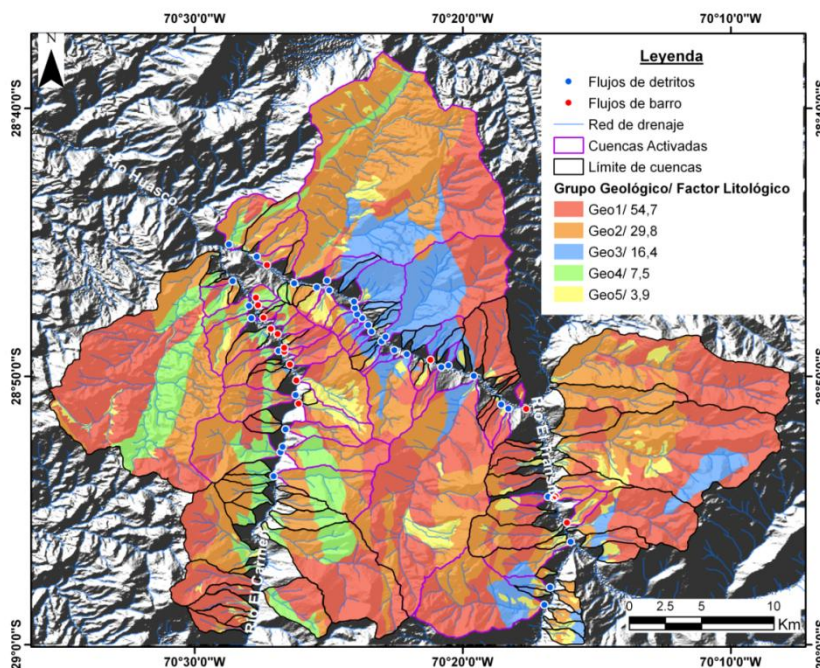
Con el resultado del análisis de varianza se identificó que los parámetros asociados al tamaño de las subcuencas (área, perímetro y largo) son significativos en la magnitud y tipo de flujos desarrollados. Similar a lo mencionado para la activación de las subcuencas, se tiene que el Factor de Escala controlaría la magnitud y tipo de flujo. Así las subcuencas con depósitos de Clase-4 (volúmenes entre 10.000 y 100.000 m<sup>3</sup>) son de mayor tamaño que las subcuencas con depósitos de Clase-3 (volúmenes entre 1.000 y 10.000 m<sup>3</sup>), con una mayor probabilidad en el caso de las primeras, de contener material removible. Este efecto escala también se expresa en la diferencias de los valores medios de elevación media, relieve y orden jerárquico de la red de drenaje en las subcuencas asociadas a depósitos de mayor volumen. Por otro lado el valor medio de las razones de relieve (cuociente entre el relieve y el largo de una subcuenca) y la rugosidad (razón de Melton) son menores en las subcuencas asociadas a los depósitos de mayor volumen. Esto se explica por el Factor de Retención, donde las subcuencas que produjeron depósitos de menor volumen poseen una menor capacidad de almacenar detritos.

En la discriminación entre el tipo de depósito generado ya sea por flujo de detritos o flujos de barro, se tiene que los grupos geológicos *Geo3* y *Geo4* son significativos. La Figura 6-1 contiene el gráfico con los valores medios porcentuales de área superficial de los 5 grupos geológicos definidos dentro del área de estudio (Sección 4.1). Del gráfico de la Figura 6-1 se observa que las subcuencas con generación de flujos de detritos o de barro poseen porcentajes similares de los grupos geológicos *Geo1*, *Geo2* y *Geo5*, por lo tanto la cobertura de rocas intrusivas (*Geo1*), volcánico-sedimentarias (*Geo2*) y material no consolidado (*Geo5*) dentro de una subcuenca no son determinantes en el tipo de depósito generado. La principal diferencia en el tipo de depósito generado, radica en la cantidad de superficie que abarcan los grupos *Geo3* o *Geo4* dentro de las subcuencas. Los flujos de detritos provienen de subcuencas que poseen un 39% de su superficie cubierta con rocas del Complejo Metamórfico El Tránsito y de los esquistos de Quebrada Seca (*Geo3*). Los flujos de barro provienen desde subcuencas que contienen un 46% de su área con cobertura de rocas del tipo lutitas y limolitas provenientes de la Fm. Pucalume y los miembros 2 y 4 de la Fm. San Félix (*Geo4*).



**Figura 6-1.** Porcentaje de área superficial media de los distintos grupos geológicos en las 49 subcuencas clasificadas según su tipo de depósito asociado.

Los grupos *Geo3* y *Geo4* son más susceptibles a la meteorización que los otros grupos geológicos, al presentar baja cohesión, baja resistencia a la compresión simple y altos valores de porosidad. La diferencia principal es que el grupo *Geo3* al estar constituido por esquistos genera material detrítico de mayor tamaño, en cambio el grupo *Geo4* se constituye por lutitas y limolitas, que al meteorizarse liberan a las subcuencas material fino (limos y arcillas), componente esencial de los flujos de barro. Esta influencia se observa en la Figura 6-2, donde el grupo *Geo4* tiene una mayor extensión en aquellas subcuencas que generaron flujos de barro, mientras que el grupo *Geo3* está presente en mayor medida en las subcuencas asociadas a flujos de detritos.



**Figura 6-2.** Mapa grupos geológicos y su factor litológico asociado dentro del área de estudio. Construido sobre modelo de elevación digital sombreado.

## 7. Conclusiones

Este trabajo permitió identificar los parámetros morfométricos, hidrográficos y litológicos que son significantes en la generación de flujos en las subcuencas semiáridas del Valle del Huasco, a través, de un tratamiento estadístico de datos recopilados del episodio aluvional ocurrido durante Marzo de 2015. El análisis de los parámetros disminuyó la dimensionalidad del número de variables e identificó tres principales factores que determinaron la magnitud y modo de ocurrencia de estos flujos: Escala, Retención y Litológico.

El Factor de Escala, documentado en otras regiones (Bovis y Jakob, 1999; de Scally y Owens; 2004), determina que subcuencas de mayor extensión o tamaño poseen una mayor probabilidad de contener material susceptible a ser movilizado por flujos.

El factor de retención establece que subcuencas de baja pendiente y relieve son capaces de acumular un reservorio de sedimentos propenso a ser movilizado. La litología también tiene influencia en la posible actividad de flujos de las subcuencas y en particular en el tipo de depósito generado, así la presencia de rocas intrusivas en las subcuencas limita la generación de flujos. Además la presencia de rocas metamórficas promueve la ocurrencia de flujos de detritos mientras que la presencia de rocas sedimentarias de grano fino (limos y arcillas) condiciona la generación de flujos de barro.

A través de este análisis se calcularon los umbrales que determinan la susceptibilidad de las subcuencas a producir flujos, según los cuales 40 de las 126 subcuencas analizadas presentan características que las hacen propensas a generar flujos, acertando en un 81,6% en relación con las subcuencas que fueron activadas durante el episodio aluvional ocurrido durante Marzo de 2015, no obstante, el 34,6% de las subcuencas que no se activaron en el evento se representaron en el rango de susceptibilidad de generación de flujos. De esta manera la identificación de la susceptibilidad de las subcuencas a generar flujos de detritos o de barro, no sólo depende de variables cuyos valores estén por sobre o debajo de un valor umbral, sino que de la combinación y conjunción de factores que permitan determinar si una subcuenca tiene las condiciones para desarrollar remociones del tipo flujo.



## 8. Bibliografía

Aguilar, G., Cabré, A., Guaita, C., González, F., Ortega, F., Carretier, S., Riquelme, R., Comte, D. (2015). Denudación por flujos de detritos durante las lluvias torrenciales de marzo de 2015 en Atacama.

Aguilar, G., Riquelme, R., Martinod, J., Darrozes, J. (2013). Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32°S. *Andean Geology* 40 (1): 79-101.

Aguilar, G. (2010). Erosión y transporte de materia en la vertiente occidental de los Andes semiáridos del norte de Chile (27-32°S): Desde un enfoque a gran escala temporal y espacial, hasta la evolución cuaternaria de un sistema fluvial. *Tesis para optar al grado de doctor en ciencias, mención Geología*. Université de Toulouse; Universidad Católica del Norte (UCN).

Amman, C., Jenny, D., Kammer, K., Messerli, B. (2001). Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18-29°S). *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 172: 313-326.

Antonioletti, R., Schneider, H., Borcosque, J., Zárate, E. (1972). *Características climáticas del Norte Chico (26° a 33° Latitud Sur)*. Instituto de investigación de recursos naturales, Santiago, Chile.

Arévalo, C., Mourgues, F.A., Chávez, R. (2009). Geología del Área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama, Carta Geológica de Chile, No 120, Servicio Nacional de Geología y Minería

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.

Burbank, D., Anderson, R. (2001). Tectonic geomorphology. Oxford: Blackwell Science Ltd. 274 p.

Cerny, C.A., & Kaiser, H.F. (1977). A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices. *Multivariate Behavioral Research*, 12(1), 43-47.

Charrier, R., Farías, M., Maksaev, V., (2009). Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile Norte y Central e implicaciones para las regiones adyacente de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (1): 5-35.

Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. Chapter 3. The Geology of Chile. *The Geological London Society*, London, p.21-114.

de Scally, F. A., & Owens, I. F. (2004). Morphometric controls and geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(3), 311-322.

Dediós, P. (1967). Cuadrángulo Vicuña, Provincia de Coquimbo. Carta Geológica de Chile, Instituto de Investigaciones Geológicas N° 16, 65 p.

Dirección General de Aguas (DGA). 2004. Cuenca del río Huasco. Reporte técnico por CADEPE-IDEPE Consultores en Ingeniería. 111 p.

Emery, X., Pizarro, S. (2010). Estudio exploratorio para datos multivariados. Advanced laboratory for geostatistical supercomputing. Departamento de Ingeniería de minas, Universidad de Chile.

Farías, M. (2007). Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. *Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología*. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Garreaud, R. (2015). Norte Oscuro, Sur Claro (aluviones en Atacama). *Outreach Notes*.

Garreaud, R., A. Molina and M. Farias, (2010): Andean Uplift and Atacama Hyperaridity: A Climate Modeling Perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 292, p.39-50.

Garreaud, R., M, Vuille., R, Compagnucci., J, Marengo. (2008). Present-day South American Climate. *PALEO3 Special Issue*, 281, p.180-195.

González de Vallejos, (2002). Ingeniería Geológica. Pearson: Prentice-Hall, Madrid. 715 p.

Hungr, O., Evans, S., Bovis, M., Hutchinson, J. (2001). A review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), p.221-238.

Iverson, R. (2014). Debris flows: behaviour and hazard assessment. *Geology Today*, vol. 30, Issue 1, p.15-20.

Jackson, L., Kostaschuk, R., MacDonald, G. (1987). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental Engineering Geosciences* 7(3), p.221-238.

Jakob, M. y Bovis, M. J. (1996). Morphometric and geotechnical controls of debris flow activity, southern Coast Mountains, British Columbia, Canada. *ZEITSCHRIFT FUR GEOMORPHOLOGIE SUPPLEMENTBAND*, 13-26.

Jakob, M. (2005). A size classification for debris flows. *Engineering geology*, 79(3), p.151-161.

Levy, J., Varela, J. (2003). Análisis multivariable para las ciencias sociales. Prentice Hall, Madrid. 862 p.

Melton, M. (1957). *An analysis of the relation among elements of climate, surface properties and geomorphology* (No. CU-TR-11). COLUMBIA UNIV NEW YORK.

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública , ONEMI. (2015). Monitoreo por evento hidrometeorológico ,25 de Marzo de 2015.

Pardo-Casas F, Molnar P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time: *Tectonics* 6: 233-248.

Patton, P. C. (1988). Drainage basin morphometry and floods. *Flood Geomorphology*. John Wiley & Sons New York. 1988. p 51-64. 11 fig, 1 tab, 67 ref.

Reutter K., (1974). Entwicklung und Bauplan der chilenischen Hochkordillere im Bereich 29° südlicher Breite. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, vol. 146(2), 153-178.

Ribba, L., (1985). Geología regional del cuadrángulo El Tránsito, Región de Atacama, Chile. *Memoria para optar al título de Geólogo*. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

Rossel, K. (2014). Estratigrafía y estudio de proveniencia de las sucesiones neógenas en la cordillera frontal del valle del Huasco, Atacama: Formación Laguna Grande (28°45'S). *Memoria para optar al título de Geólogo*. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

Salazar, E; Coloma, F; Creixell, C. (2013). Geología del área El Tránsito-Lagunillas, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 149, 1 mapa escala 1:100.000.

Salazar, E. (2012). Evolución tectono-estratigráfica post-paleozoica de la Cordillera de Vallenar. *Tesis para optar al grado de magister en ciencias, mención Geología*. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

Seegerstrom, K., Parker, R. L. (1959). Cuadrángulo Cerrillos. Provincia de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 6*: 115 p., 1 mapa escala 1:50.000.

Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A., Reutter, K., (1994). Tectonic Development of the North Chilean Andes in Relation to Plate Convergence and Magmatism since the Jurassic. *Fachrichtung Geologie*, Freie Universität Berlin, Malteserstr. 74-100, D-1000 Berlin 46.

Schulz, N., Boisier, J. P. y Aceituno, P. (2012). Climate change along the arid coast of northern Chile. *International Journal of Climatology*, 32(12), 1803-1814.

Strahler, A. N. (1958). Dimensional analysis applied to fluviially eroded landforms. *Geological Society of America Bulletin*, 69(3), 279-300.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142.

Tarback, E., Lutgens, F. (2005). Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física. Prentice Hall, Madrid. 686 p.

Wilford, D., Sakals, M., Innes, J., Sidle, R., Bergerud, W. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Lanslides, vol.1, Issue 1*, p.61-66.

Wood, W., Snell, J. (1960). A quantitative system for classifying landforms. No. TR-EP-124. *Quartermaster research and engineering command Natick, Massachusetts*.

Yáñez, G., Ranero, C., Von Huene, R., Díaz, J. (2001). Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32°-34°S): The role of the Juan Fernandez Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. *Journal of Geophysical Research* 106 (B4): 6325-6345.

Zech, R. Kull, C. y Veit, H. (2006). Late Quaternary glacial history in the Encierro Valley, northern Chile (29°S), deduced from <sup>10</sup>Be surface exposure dating. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 277-286.

## **ANEXOS**



### Anexo A. Clasificación de los abanicos aluviales generados durante el 25M.

ID Subcuenca	VOLUMEN m <sup>3</sup>	CLASE	Subcuenca río	Tipo Flujo
3	1999.60	3	El Carmen	F. Detritos
5	11716.80	4	El Carmen	F. Detritos
6	2332.84	3	El Carmen	F. Detritos
8	36298.40	4	El Carmen	F. Detritos
12	34697.00	4	El Carmen	F. Detritos
13	17008.33	4	El Carmen	F. Barro
15	204100.00	4	El Carmen	F. Barro
16	13083.33	4	El Carmen	F. Barro
17	9158.33	3	El Carmen	F. Barro
18	100146.38	4	El Carmen	F. Barro
20	12897.03	4	El Carmen	F. Barro
21	7728.63	3	El Carmen	F. Barro
22	6952.46	3	El Tránsito	F. Detritos
24	26650.25	4	El Tránsito	F. Detritos
25	10752.28	4	El Tránsito	F. Barro
27	140190.66	4	El Tránsito	F. Detritos
28	1591.03	3	El Tránsito	F. Detritos
30	13367.83	4	El Tránsito	F. Detritos
34	14555.23	4	El Tránsito	F. Detritos
37	3034.24	3	El Tránsito	F. Barro
40	46212.87	4	El Tránsito	F. Detritos
41	20169.78	4	El Tránsito	F. Detritos
42	11894.45	4	El Tránsito	F. Detritos
45	5973.64	3	El Tránsito	F. Detritos
46	13107.23	4	El Tránsito	F. Detritos
47	65410.81	4	El Tránsito	F. Detritos
48	10109.63	4	El Tránsito	F. Detritos
49	21800.28	4	El Tránsito	F. Detritos
50	758.48	3	El Tránsito	F. Detritos
51	5966.69	3	El Tránsito	F. Detritos
55	30144.00	4	El Carmen	F. Detritos
56	42390.00	4	El Carmen	F. Detritos
57	16485.00	4	El Carmen	F. Detritos
60	333830.77	4	El Tránsito	F. Detritos
64	99657.19	4	El Tránsito	F. Detritos
65	11233.58	4	El Tránsito	F. Detritos
66	19951.23	4	El Tránsito	F. Detritos
69	4767.17	3	El Tránsito	F. Detritos
72	8545.80	3	El Tránsito	F. Detritos
74	19713.69	4	El Tránsito	F. Detritos
75	5953.56	3	El Tránsito	F. Detritos
82	9224.03	3	El Tránsito	F. Barro
83	11304.00	4	El Carmen	F. Detritos
97	9046.52	3	El Tránsito	F. Barro
111	1311.48	3	El Tránsito	F. Detritos
114	18576.24	4	El Tránsito	F. Barro
120	3557.54	3	El Carmen	F. Barro
122	4168.58	3	El Carmen	F. Barro
123	5567.53	3	El Carmen	F. Barro

**Anexo B. Ubicación y actividad de las subcuencas estudiadas en el valle del Huasco. Las coordenadas consideran el punto medio de cada subcuenca y utilizan el datum WGS84 zona 19S.**

ID	UTM E	UTM N	Rio/Ribera	Actividad 25M
0	350692	6807721	Carmen/W	No Activada
1	354473	6815038	Carmen/W	No Activada
2	355069	6814751	Carmen/W	No Activada
3	354797	6813705	Carmen/W	Activada
4	355891	6814115	Carmen/W	No Activada
5	355470	6812593	Carmen/W	Activada
6	355355	6810770	Carmen/W	Activada
7	356774	6810606	Carmen/W	No Activada
8	356661	6809053	Carmen/W	Activada
9	357984	6808948	Carmen/W	No Activada
10	358039	6808150	Carmen/W	No Activada
11	358356	6809360	Carmen/W	No Activada
12	356867	6806578	Carmen/W	Activada
13	362291	6805366	Carmen/E	Activada
14	360583	6806880	Carmen/E	No Activada
15	362427	6807726	Carmen/E	Activada
16	361118	6810117	Carmen/E	Activada
17	359672	6810103	Carmen/E	Activada
18	360519	6811044	Carmen/E	Activada
19	359542	6811043	Carmen/E	No Activada
20	359766	6811896	Carmen/E	Activada
21	359018	6812575	Carmen/E	Activada
22	356399	6819231	Transito/NE	Activada
23	358087	6819056	Transito/NE	No Activada
24	358929	6818130	Transito/NE	Activada
25	358440	6816688	Transito/NE	Activada
26	359500	6816621	Transito/NE	No Activada
27	365486	6822429	Transito/NE	Activada
28	362584	6815992	Transito/NE	Activada
29	363319	6815565	Transito/NE	No Activada
30	364883	6814884	Transito/NE	Activada
31	364678	6813323	Transito/NE	No Activada
32	365311	6812837	Transito/NE	No Activada
33	365306	6812354	Transito/NE	No Activada
34	369124	6815021	Transito/NE	Activada
35	366462	6811148	Transito/NE	No Activada
36	367508	6811205	Transito/NE	No Activada
37	368726	6811397	Transito/NE	Activada
38	367448	6808308	Transito/SW	No Activada
39	367090	6808796	Transito/SW	No Activada
40	365509	6806882	Transito/SW	Activada
41	364848	6809481	Transito/SW	Activada
42	364352	6809675	Transito/SW	Activada
43	363777	6809686	Transito/SW	No Activada
44	363908	6810422	Transito/SW	No Activada
45	363561	6810736	Transito/SW	Activada
46	363142	6811115	Transito/SW	Activada
47	361283	6812999	Transito/SW	Activada
48	362114	6812570	Transito/SW	Activada
49	363050	6811726	Transito/SW	Activada
50	362612	6812122	Transito/SW	Activada
51	360480	6813475	Transito/SW	Activada
52	360042	6814054	Transito/SW	No Activada
53	359374	6814161	Transito/SW	No Activada
54	358903	6814103	Transito/SW	No Activada
55	362448	6802995	Carmen/E	Activada
56	361591	6804502	Carmen/E	Activada
57	362133	6800725	Carmen/E	Activada
58	359622	6800500	Carmen/E	No Activada
59	360357	6799625	Carmen/E	No Activada
60	367914	6800494	Transito/SW	Activada
61	360648	6798520	Carmen/E	No Activada
62	362903	6794749	Carmen/E	No Activada
63	360220	6792610	Carmen/E	No Activada
64	370611	6793146	Transito/SW	Activada
65	373949	6794333	Transito/SW	Activada

ID	UTM E	UTM N	Rio/Ribera	Actividad 25M
66	373517	6795847	Transito/SW	Activada
67	372505	6797498	Transito/SW	No Activada
68	373068	6799139	Transito/SW	No Activada
69	373995	6800033	Transito/SW	Activada
70	372784	6801166	Transito/SW	No Activada
71	370619	6811201	Transito/NE	No Activada
72	367558	6807095	Transito/SW	Activada
73	371938	6810993	Transito/NE	No Activada
74	371855	6805245	Transito/SW	Activada
75	372325	6804690	Transito/SW	Activada
76	382655	6808972	Transito/NE	No Activada
77	379437	6807094	Transito/NE	No Activada
78	383062	6803651	Transito/NE	No Activada
79	380975	6798940	Transito/NE	No Activada
80	374352	6793693	Transito/SW	No Activada
81	377712	6801277	Transito/NE	No Activada
82	376812	6800507	Transito/NE	Activada
83	355619	6803426	Carmen/W	Activada
84	354891	6797490	Carmen/W	No Activada
85	354359	6794130	Carmen/W	No Activada
86	356449	6798795	Carmen/W	No Activada
87	357168	6799788	Carmen/W	No Activada
88	356207	6800501	Carmen/W	No Activada
89	377418	6805468	Transito/NE	No Activada
90	356931	6801245	Carmen/W	No Activada
91	357096	6801951	Carmen/W	No Activada
92	355399	6792773	Carmen/W	No Activada
93	355981	6793630	Carmen/W	No Activada
94	355672	6791983	Carmen/W	No Activada
95	356455	6791462	Carmen/W	No Activada
96	379267	6797436	Transito/NE	No Activada
97	377471	6799505	Transito/NE	Activada
98	372981	6803185	Transito/SW	No Activada
99	372932	6802344	Transito/SW	No Activada
100	376535	6793142	Transito/NE	No Activada
101	376286	6792037	Transito/NE	No Activada
102	376422	6791338	Transito/NE	No Activada
103	376284	6790620	Transito/NE	No Activada
104	376434	6794124	Transito/NE	No Activada
105	379449	6796476	Transito/NE	No Activada
106	376634	6802328	Transito/NE	No Activada
107	357655	6804930	Carmen/W	No Activada
108	357938	6805549	Carmen/W	No Activada
109	369097	6810830	Transito/NE	No Activada
110	369738	6809980	Transito/NE	No Activada
111	369196	6810054	Transito/NE	Activada
112	371328	6806347	Transito/SW	No Activada
113	371484	6805951	Transito/SW	No Activada
114	373380	6807350	Transito/NE	Activada
115	372384	6808381	Transito/NE	No Activada
116	373706	6803837	Transito/SW	No Activada
117	356888	6795059	Carmen/W	No Activada
118	374976	6794991	Transito/SW	No Activada
119	375424	6797093	Transito/SW	No Activada
120	358187	6812663	Carmen/E	Activada
121	358211	6813080	Carmen/E	No Activada
122	357921	6813386	Carmen/E	Activada
123	357677	6814028	Carmen/E	Activada
124	354786	6791264	Carmen/W	No Activada
125	372789	6808116	Transito/NE	No Activada

**Anexo C. Superficie grupos geológicos (%). Se presenta el producto entre los grupos geológicos y su factor litológico para cada subcuenca, además de la variable Geo.**

ID	Geo1 (%)	Geo2 (%)	Geo3 (%)	Geo4 (%)	Geo5 (%)	FL1	FL2	FL3	FL4	FL5	Geo
0	53.63	22.52	0.00	21.41	2.44	2933	671	0	160	10	37.73
1	5.29	22.51	0.00	69.79	2.41	289	671	0	520	9	14.89
2	64.67	0.00	0.00	29.24	6.10	3536	0	0	218	24	37.78
3	26.13	5.27	0.00	52.44	16.16	1429	157	0	391	63	20.39
4	0.00	72.86	0.00	0.00	27.14	0	2170	0	0	106	22.76
5	0.00	46.95	0.00	45.94	7.11	0	1398	0	342	28	17.68
6	0.00	73.41	0.00	15.90	10.69	0	2186	0	119	42	23.47
7	0.00	69.24	3.42	20.72	6.62	0	2062	56	154	26	22.99
8	0.00	89.55	0.21	9.37	0.87	0	2667	3	70	3	27.44
9	0.00	67.35	1.78	27.41	3.47	0	2006	29	204	14	22.53
10	0.00	70.14	3.26	24.87	1.73	0	2089	53	185	7	23.35
11	0.00	43.70	3.71	52.59	0.00	0	1302	61	392	0	17.54
12	0.00	89.48	0.00	9.97	0.54	0	2665	0	74	2	27.42
13	1.39	57.85	0.00	0.00	40.76	76	1723	0	0	159	19.58
14	0.00	4.85	2.95	0.00	92.20	0	144	48	0	360	5.52
15	9.17	54.59	0.00	0.00	36.24	502	1626	0	0	141	22.69
16	61.94	36.60	1.45	0.00	0.00	3387	1090	24	0	0	45.01
17	34.85	44.34	14.04	0.00	6.76	1906	1321	230	0	26	34.83
18	87.80	10.41	0.83	0.00	0.96	4801	310	14	0	4	51.29
19	38.01	38.05	4.40	1.00	18.54	2079	1133	72	7	72	33.64
20	60.35	27.97	1.12	10.57	0.00	3300	833	18	79	0	42.30
21	20.52	28.87	3.35	43.27	3.99	1122	860	55	322	16	23.75
22	27.10	45.88	0.00	21.25	5.77	1482	1366	0	158	22	30.29
23	6.66	67.21	0.00	20.75	5.38	364	2002	0	155	21	25.42
24	0.00	96.88	0.00	0.00	3.12	0	2886	0	0	12	28.98
25	0.00	79.94	0.00	0.00	20.06	0	2381	0	0	78	24.59
26	0.00	99.79	0.00	0.00	0.21	0	2972	0	0	1	29.73
27	20.47	60.27	11.98	2.87	4.40	1119	1795	196	21	17	31.50
28	12.43	28.93	57.77	0.00	0.87	680	862	946	0	3	24.91
29	0.00	0.00	99.80	0.00	0.20	0	0	1634	0	1	16.35
30	0.00	0.00	92.13	0.00	7.87	0	0	1509	0	31	15.39
31	0.00	0.00	90.56	0.00	9.44	0	0	1483	0	37	15.20
32	0.00	0.00	98.53	0.00	1.47	0	0	1613	0	6	16.19
33	0.00	0.00	91.63	0.00	8.37	0	0	1500	0	33	15.33
34	43.46	1.54	54.85	0.00	0.14	2377	46	898	0	1	33.21
35	0.00	0.00	99.66	0.00	0.34	0	0	1632	0	1	16.33
36	0.00	0.00	99.60	0.00	0.40	0	0	1631	0	2	16.33
37	15.94	0.00	83.71	0.00	0.35	872	0	1371	0	1	22.44
38	48.17	0.00	0.00	0.00	51.83	2634	0	0	0	202	28.36
39	41.85	29.11	15.92	0.00	13.13	2288	867	261	0	51	34.67
40	18.78	58.69	18.79	0.00	3.74	1027	1748	308	0	15	30.97
41	0.00	22.49	73.34	0.00	4.17	0	670	1201	0	16	18.87
42	0.00	18.50	47.90	0.00	33.60	0	551	784	0	131	14.66
43	0.00	66.04	33.86	0.00	0.11	0	1967	554	0	0	25.22
44	0.00	25.38	74.62	0.00	0.00	0	756	1222	0	0	19.78
45	0.00	40.28	58.49	0.00	1.23	0	1200	958	0	5	21.62
46	0.00	54.99	43.67	0.00	1.34	0	1638	715	0	5	23.58
47	15.43	20.76	0.25	0.00	63.55	844	618	4	0	248	17.14
48	10.25	36.82	5.30	0.00	47.63	561	1097	87	0	186	19.30
49	0.00	28.30	41.35	0.00	30.35	0	843	677	0	118	16.38
50	3.79	48.30	35.54	0.00	12.37	207	1439	582	0	48	22.76
51	12.45	10.54	0.00	0.00	77.01	681	314	0	0	300	12.95
52	0.00	93.64	0.00	0.00	6.36	0	2789	0	0	25	28.14
53	0.00	63.15	0.00	36.77	0.08	0	1881	0	274	0	21.55
54	0.00	0.07	0.00	79.70	20.23	0	2	0	594	79	6.75
55	26.26	41.48	0.00	32.01	0.26	1436	1235	0	239	1	29.11
56	0.00	81.51	0.00	18.37	0.12	0	2428	0	137	0	25.65
57	11.18	45.46	0.00	43.05	0.31	611	1354	0	321	1	22.88
58	0.00	99.50	0.00	0.00	0.50	0	2964	0	0	2	29.66
59	0.00	69.24	0.00	30.61	0.14	0	2062	0	228	1	22.91
60	58.64	31.01	3.73	0.00	6.62	3207	924	61	0	26	42.17
61	0.00	54.03	0.00	43.17	2.81	0	1609	0	322	11	19.42
62	61.80	21.00	0.00	16.59	0.61	3380	625	0	124	2	41.31
63	57.31	13.17	0.00	29.52	0.01	3134	392	0	220	0	37.46
64	53.72	26.31	16.80	0.00	3.17	2937	784	275	0	12	40.09

ID	Geo1 (%)	Geo2 (%)	Geo3 (%)	Geo4 (%)	Geo5 (%)	FL1	FL2	FL3	FL4	FL5	Geo
65	0.00	11.95	66.48	0.00	21.57	0	356	1089	0	84	15.29
66	30.70	45.33	17.23	0.00	6.74	1679	1350	282	0	26	33.37
67	39.10	57.32	0.00	0.00	3.59	2138	1707	0	0	14	38.59
68	42.33	36.15	0.00	0.00	21.52	2315	1077	0	0	84	34.75
69	78.89	3.09	0.00	0.00	18.02	4314	92	0	0	70	44.76
70	57.35	33.89	0.00	0.00	8.76	3136	1010	0	0	34	41.80
71	86.60	0.00	12.63	0.00	0.77	4736	0	207	0	3	49.45
72	71.77	28.23	0.00	0.00	0.00	3925	841	0	0	0	47.65
73	96.16	0.00	0.00	0.00	3.84	5258	0	0	0	15	52.73
74	84.73	0.00	0.00	0.00	15.27	4634	0	0	0	60	46.93
75	85.80	0.00	0.00	0.00	14.20	4692	0	0	0	55	47.47
76	48.20	48.19	0.00	0.00	3.61	2636	1435	0	0	14	40.85
77	10.04	89.82	0.00	0.00	0.15	549	2675	0	0	1	32.25
78	53.04	27.16	11.72	0.00	8.09	2900	809	192	0	32	39.32
79	81.23	3.45	10.62	0.00	4.70	4442	103	174	0	18	47.37
80	0.00	22.93	47.42	0.00	29.65	0	683	777	0	116	15.75
81	34.81	46.24	0.00	0.00	18.95	1904	1377	0	0	74	33.55
82	0.00	96.99	0.00	0.00	3.01	0	2889	0	0	12	29.01
83	13.97	62.99	0.00	22.85	0.19	764	1876	0	170	1	28.11
84	43.24	46.72	0.00	6.61	3.43	2365	1392	0	49	13	38.19
85	90.63	7.35	0.00	0.00	2.02	4956	219	0	0	8	51.83
86	0.00	60.77	0.00	37.03	2.20	0	1810	0	276	9	20.95
87	0.00	49.30	0.00	46.24	4.46	0	1469	0	345	17	18.30
88	0.00	82.74	0.00	16.52	0.74	0	2464	0	123	3	25.90
89	45.81	53.32	0.00	0.00	0.88	2505	1588	0	0	3	40.96
90	0.00	55.00	0.00	41.93	3.06	0	1638	0	313	12	19.63
91	0.00	34.31	0.00	64.20	1.48	0	1022	0	478	6	15.06
92	89.00	0.00	0.00	0.00	11.00	4867	0	0	0	43	49.10
93	95.16	0.00	0.00	0.00	4.84	5204	0	0	0	19	52.23
94	80.62	0.82	0.00	0.00	18.56	4409	24	0	0	72	45.06
95	73.27	0.04	0.00	0.00	26.69	4006	1	0	0	104	41.12
96	63.44	8.32	20.72	0.00	7.52	3469	248	339	0	29	40.86
97	21.69	46.41	0.00	0.00	31.90	1186	1382	0	0	124	26.93
98	89.93	0.87	0.00	0.00	9.20	4918	26	0	0	36	49.80
99	63.38	11.21	0.00	0.00	25.41	3466	334	0	0	99	38.99
100	0.00	80.03	7.80	0.00	12.17	0	2384	128	0	47	25.59
101	0.00	54.60	28.34	0.00	17.06	0	1626	464	0	67	21.57
102	0.00	22.04	44.12	0.00	33.84	0	657	722	0	132	15.11
103	0.00	24.01	21.36	0.00	54.63	0	715	350	0	213	12.78
104	0.00	96.41	0.00	0.00	3.59	0	2872	0	0	14	28.86
105	61.46	0.00	9.75	0.00	28.79	3361	0	160	0	112	36.33
106	47.01	26.60	0.00	0.00	26.39	2570	792	0	0	103	34.66
107	0.00	71.40	0.00	28.28	0.32	0	2127	0	211	1	23.39
108	0.00	41.64	0.00	53.45	4.91	0	1240	0	398	19	16.58
109	7.45	0.00	88.53	0.00	4.02	407	0	1450	0	16	18.73
110	0.00	0.00	56.66	0.00	43.34	0	0	928	0	169	10.97
111	3.15	0.00	92.30	0.00	4.55	172	0	1511	0	18	17.02
112	92.52	0.00	0.00	0.00	7.48	5059	0	0	0	29	50.88
113	91.27	0.00	0.00	0.00	8.73	4991	0	0	0	34	50.25
114	80.83	0.00	0.00	0.00	19.17	4420	0	0	0	75	44.95
115	76.15	0.00	0.00	0.00	23.85	4164	0	0	0	93	42.57
116	85.40	0.00	0.00	0.00	14.60	4670	0	0	0	57	47.27
117	0.00	52.95	0.00	22.02	25.03	0	1577	0	164	98	18.39
118	0.00	74.98	1.56	0.00	23.46	0	2233	26	0	91	23.50
119	2.98	38.12	0.00	0.00	58.90	163	1136	0	0	230	15.28
120	52.86	0.00	3.55	33.44	10.16	2890	0	58	249	40	32.37
121	26.16	0.00	0.00	66.23	7.62	1430	0	0	494	30	19.54
122	13.51	0.00	0.00	78.36	8.13	739	0	0	584	32	13.54
123	0.00	24.20	0.00	66.80	9.00	0	721	0	498	35	12.54
124	82.14	14.84	0.00	0.00	3.02	4492	442	0	0	12	49.46
125	91.90	0.00	0.00	0.00	8.10	5025	0	0	0	32	50.57

### Anexo D. Resumen parámetros morfométricos e hidrográficos de las subcuencas.

ID	Area (Km <sup>2</sup> )	Largo (km)	Perim. (Km)	Zave (Km)	Reli. (Km)	Pend. (°)	I <sub>GRAV</sub>	HRAT	MRAT	RRAT	Dens.	Orden
0	96.732	16.11	52.363	2.006	2.02	21.00	1.49	0.598	0.21	0.126	2.787	6
1	0.847	1.86	4.357	1.224	0.74	26.40	1.33	0.561	0.81	0.399	2.835	2
2	0.425	1.65	3.737	1.074	0.63	23.80	1.61	0.412	0.97	0.384	3.242	1
3	3.069	3.06	8.137	1.311	0.93	24.50	1.30	0.532	0.53	0.303	3.152	3
4	0.665	1.75	3.904	1.025	0.58	22.40	1.34	0.363	0.71	0.329	3.271	2
5	2.758	3.13	8.906	1.347	1.02	23.40	1.50	0.504	0.61	0.324	2.905	3
6	5.542	4.32	12.223	1.622	1.40	24.00	1.45	0.553	0.60	0.325	3.087	3
7	2.856	3.48	8.147	1.408	1.31	26.20	1.35	0.426	0.77	0.376	3.098	3
8	4.579	4.18	10.340	1.727	1.40	25.50	1.35	0.597	0.66	0.336	3.575	4
9	0.853	2.35	5.621	1.386	1.09	26.10	1.70	0.450	1.18	0.464	4.273	2
10	2.757	2.83	7.281	1.546	1.21	27.90	1.23	0.540	0.73	0.427	4.480	3
11	0.229	1.00	2.373	1.182	0.57	28.50	1.39	0.478	1.19	0.569	3.093	2
12	7.113	4.81	12.445	1.946	1.52	25.20	1.31	0.668	0.57	0.316	2.542	3
13	5.129	4.73	12.813	1.697	1.66	26.80	1.58	0.455	0.73	0.351	3.459	4
14	0.710	0.93	3.441	1.163	0.40	24.30	1.14	0.490	0.48	0.081	2.978	2
15	12.206	4.79	16.327	1.658	1.43	25.00	1.31	0.515	0.41	1.569	4.047	5
16	3.729	3.29	8.624	1.625	1.23	26.70	1.25	0.590	0.63	0.254	2.929	3
17	0.420	0.97	2.961	1.218	0.58	26.20	1.28	0.564	0.90	0.173	3.084	2
18	2.012	2.71	7.007	1.668	1.25	25.70	1.38	0.631	0.88	0.991	3.324	3
19	0.588	1.92	4.271	1.282	1.01	29.20	1.56	0.409	1.32	0.348	3.811	2
20	1.760	2.05	5.859	1.546	1.15	27.00	1.24	0.579	0.86	0.596	3.758	3
21	1.487	2.12	5.486	1.410	0.93	26.40	1.26	0.587	0.77	0.472	3.392	3
22	6.691	4.24	11.947	1.355	1.35	23.40	1.29	0.424	0.52	0.957	3.032	4
23	5.225	5.14	11.691	1.627	1.61	26.80	1.43	0.520	0.71	0.383	2.799	3
24	4.825	4.37	10.414	1.573	1.41	25.70	1.33	0.548	0.64	0.274	3.024	4
25	1.421	2.17	5.686	1.206	0.86	23.20	1.34	0.471	0.72	0.196	3.773	3
26	1.148	2.67	5.853	1.426	1.00	25.90	1.53	0.599	0.93	0.461	2.340	2
27	127.59	16.75	53.365	2.213	2.49	20.50	1.32	0.550	0.22	0.973	3.000	6
28	2.648	3.48	8.760	1.566	1.45	25.30	1.51	0.485	0.89	0.086	3.103	3
29	1.579	3.55	7.817	1.676	1.50	24.40	1.74	0.542	1.19	0.430	4.620	3
30	7.286	3.76	11.494	1.814	1.72	27.20	1.19	0.540	0.64	0.442	5.401	5
31	0.762	2.34	4.771	1.380	1.10	28.50	1.53	0.447	1.26	0.518	4.568	2
32	0.655	2.27	5.329	1.613	1.15	27.80	1.84	0.614	1.42	0.507	4.839	2
33	0.905	2.07	4.841	1.471	1.10	29.20	1.42	0.522	1.15	0.530	4.753	3
34	33.000	10.02	26.508	2.403	2.38	21.80	1.29	0.624	0.41	0.237	3.278	5
35	0.668	1.37	3.792	1.500	0.96	31.90	1.30	0.582	1.17	0.701	3.930	2
36	1.812	2.69	6.278	1.719	1.35	29.40	1.31	0.563	1.00	0.500	3.919	3
37	2.409	3.51	8.733	2.093	1.84	26.20	1.58	0.613	1.18	0.524	4.905	3
38	0.951	2.00	4.715	1.717	1.30	32.70	1.35	0.578	1.33	0.651	5.152	3
39	0.812	1.98	4.392	1.451	1.21	32.80	1.36	0.415	1.34	0.610	3.850	2
40	13.920	6.14	16.651	1.979	1.79	28.00	1.25	0.578	0.48	0.291	3.366	4
41	0.807	2.71	6.428	1.510	1.31	27.00	2.00	0.444	1.46	0.483	5.603	3
42	0.748	2.48	5.385	1.612	1.32	28.70	1.74	0.516	1.53	0.533	4.050	3
43	1.224	2.53	6.155	1.813	1.32	27.60	1.56	0.668	1.19	0.522	5.914	3
44	0.782	2.17	4.681	1.527	1.24	31.00	1.48	0.492	1.40	0.569	4.109	3
45	0.792	2.11	5.084	1.585	1.24	29.20	1.60	0.543	1.40	0.589	4.741	3
46	1.292	2.31	5.959	1.633	1.23	28.70	1.47	0.595	1.08	0.533	4.343	3
47	2.439	2.73	7.397	1.502	1.27	26.10	1.33	0.506	0.81	0.465	4.299	3
48	1.138	2.34	5.878	1.524	1.23	28.00	1.54	0.511	1.16	0.527	5.953	3
49	0.722	2.25	5.093	1.473	1.18	28.60	1.68	0.492	1.39	0.524	5.966	3
50	1.465	2.22	5.654	1.485	1.17	29.90	1.31	0.508	0.97	0.528	4.515	3
51	1.497	2.19	5.581	1.404	1.02	24.80	1.28	0.546	0.83	0.464	5.093	3
52	1.062	1.62	4.501	1.247	0.96	31.70	1.22	0.428	0.93	0.591	3.378	2
53	0.643	1.51	3.629	1.280	0.93	32.70	1.27	0.480	1.16	0.617	3.622	2
54	0.626	1.43	3.859	1.350	0.88	28.60	1.37	0.569	1.11	0.617	4.163	2
55	10.973	6.47	16.457	2.028	1.92	29.10	1.39	0.526	0.58	0.297	3.111	6
56	4.102	4.54	11.136	1.779	1.56	26.50	1.54	0.498	0.77	0.430	2.780	3
57	12.911	6.08	17.075	2.239	2.08	28.50	1.33	0.574	0.58	0.342	3.260	4
58	0.665	1.81	4.488	1.604	1.13	30.90	1.54	0.487	1.38	0.623	3.158	6
59	2.294	3.11	7.212	2.008	1.68	30.70	1.33	0.559	1.11	0.540	3.813	3
60	74.494	16.72	42.824	2.359	2.36	25.70	1.39	0.562	0.27	0.141	3.450	5
61	4.718	4.79	11.323	2.127	2.03	29.80	1.46	0.510	0.93	0.424	3.000	3
62	34.792	10.75	30.048	2.512	2.25	25.90	1.43	0.625	0.38	0.210	3.599	5
63	9.851	4.94	13.349	2.351	1.89	29.90	1.19	0.581	0.60	0.383	4.518	5
64	27.962	7.57	23.026	2.475	1.88	25.80	1.22	0.550	0.36	0.248	3.128	4
65	1.682	2.94	6.992	1.971	1.22	24.60	1.51	0.512	0.94	0.414	4.093	3



ID	AREA (Km <sup>2</sup> )	LARGO (km)	PERI. (Km)	Zave (Km)	RELI (Km)	PEN (°)	GRAV	HRAT	MRAT	RRAT	Dens.	Orden
66	6.778	5.10	13.628	2.130	2.06	28.60	1.47	0.450	0.79	0.404	3.890	4
67	9.407	5.63	16.075	2.458	2.22	31.20	1.47	0.578	0.72	0.394	3.333	4
68	4.614	4.11	10.483	2.253	2.06	31.40	1.37	0.523	0.96	0.500	3.686	3
69	1.313	2.32	5.345	1.805	1.32	30.80	1.31	0.470	1.15	0.568	4.118	3
70	3.682	3.87	10.096	2.348	1.98	28.40	1.47	0.616	1.03	0.512	3.944	4
71	4.484	4.53	10.421	2.217	1.79	27.40	1.38	0.660	0.85	0.396	4.156	3
72	2.398	3.92	8.724	2.140	1.72	26.20	1.58	0.657	1.11	0.439	3.352	3
73	8.390	5.86	14.901	2.093	1.76	25.80	1.44	0.599	0.61	0.300	3.404	4
74	2.011	2.75	7.223	1.859	1.61	29.30	1.43	0.498	1.13	0.585	5.217	3
75	1.385	3.04	6.657	2.123	1.63	28.20	1.58	0.629	1.39	0.536	4.017	3
76	47.778	14.59	36.999	2.554	2.74	24.60	1.50	0.513	0.40	0.188	3.902	5
77	11.693	8.27	20.046	2.171	2.05	24.20	1.64	0.501	0.60	0.248	2.931	3
78	59.681	13.85	37.147	2.695	2.78	24.60	1.35	0.571	0.36	0.201	3.262	5
79	20.020	7.75	21.810	2.544	2.28	24.20	1.36	0.596	0.51	0.294	3.490	6
80	0.805	2.20	5.094	1.760	0.90	24.80	1.59	0.430	1.00	0.407	2.866	2
81	3.589	4.56	10.956	1.877	1.65	24.60	1.62	0.451	0.87	0.361	2.822	3
82	1.771	2.55	6.189	1.612	1.05	27.40	1.30	0.451	0.79	0.412	2.778	3
83	14.984	5.49	16.614	1.997	1.72	27.60	1.20	0.565	0.44	0.314	3.190	5
84	15.989	5.42	19.043	2.186	1.74	27.30	1.33	0.587	0.43	0.320	3.432	5
85	7.487	5.65	14.865	2.548	2.05	23.80	1.52	0.647	0.75	0.362	3.569	5
86	2.096	2.40	6.092	1.787	1.32	33.10	1.18	0.485	0.91	0.549	4.205	3
87	1.773	2.56	6.214	1.598	1.28	32.30	1.31	0.408	0.96	0.499	3.339	3
88	2.749	3.10	8.409	2.057	1.60	31.30	1.42	0.572	0.97	0.517	3.230	3
89	5.933	4.35	10.857	1.711	1.35	24.00	1.25	0.460	0.56	0.311	3.999	4
90	1.688	3.16	7.154	1.725	1.59	31.30	1.54	0.417	1.23	0.504	3.336	3
91	1.785	2.29	6.583	1.651	1.49	33.70	1.38	0.411	1.11	0.649	2.359	3
92	3.370	4.23	10.198	2.299	1.80	26.90	1.56	0.559	0.98	0.426	3.375	3
93	1.671	2.92	7.283	2.075	1.57	28.20	1.58	0.512	1.21	0.537	3.052	2
94	2.192	3.68	8.541	2.159	1.63	29.90	1.62	0.523	1.10	0.442	4.017	3
95	0.803	1.73	4.172	1.795	1.07	33.10	1.30	0.453	1.19	0.618	3.949	2
96	3.456	3.89	10.446	2.163	1.74	26.30	1.57	0.551	0.94	0.448	3.416	3
97	2.451	3.19	7.982	1.701	1.20	23.30	1.43	0.444	0.76	0.375	3.873	6
98	2.766	3.06	9.172	2.101	1.80	29.20	1.54	0.526	1.08	0.588	3.803	3
99	2.246	3.65	8.927	2.215	1.93	29.80	1.67	0.558	1.29	0.529	4.604	3
100	1.330	1.92	5.479	1.763	0.77	23.00	1.33	0.529	0.67	0.401	3.884	3
101	1.333	2.15	5.659	1.820	0.78	22.80	1.37	0.502	0.67	0.362	3.514	3
102	1.454	2.65	7.026	1.960	1.05	21.20	1.63	0.486	0.87	0.395	3.807	3
103	1.868	2.50	6.309	1.999	1.11	24.70	1.29	0.458	0.81	0.443	4.277	3
104	0.533	1.14	3.383	1.590	0.52	25.80	1.30	0.522	0.71	0.457	3.820	2
105	2.895	2.70	6.935	2.076	1.64	32.00	1.14	0.520	0.96	0.685	6.102	6
106	1.651	2.56	5.780	1.470	0.87	21.60	1.26	0.417	0.68	0.340	3.683	3
107	1.636	2.31	5.792	1.712	1.30	31.80	1.27	0.564	1.02	0.565	2.949	3
108	0.969	1.66	4.501	1.634	1.19	33.70	1.28	0.548	1.21	0.717	3.912	3
109	1.405	2.88	6.543	1.993	1.71	30.40	1.55	0.594	1.44	0.593	5.658	3
110	0.810	2.19	4.816	1.700	1.38	32.70	1.50	0.496	1.53	0.630	6.801	3
111	0.553	1.90	4.063	1.649	1.29	35.90	1.53	0.511	1.74	0.681	4.546	2
112	0.483	1.87	4.195	1.527	0.98	28.40	1.69	0.488	1.41	0.524	5.980	2
113	0.965	2.27	5.744	1.644	1.21	26.60	1.64	0.498	1.23	0.533	4.800	2
114	0.535	1.63	3.691	1.517	0.86	30.60	1.41	0.530	1.17	0.525	5.636	3
115	0.562	2.02	4.406	1.600	0.99	27.40	1.65	0.574	1.31	0.488	4.000	2
116	0.754	2.28	5.270	1.678	1.34	29.90	1.70	0.431	1.55	0.589	5.710	2
117	0.669	2.29	4.938	1.640	1.02	26.90	1.69	0.433	1.25	0.447	3.066	2
118	0.551	1.17	3.335	1.612	0.65	30.40	1.26	0.479	0.88	0.556	2.864	2
119	0.992	1.97	4.944	1.396	0.71	18.70	1.39	0.290	0.71	0.358	3.725	3
120	0.600	1.73	3.902	1.146	0.73	24.50	1.41	0.420	0.94	0.345	4.635	2
121	0.473	1.69	4.212	1.267	0.82	24.20	1.71	0.520	1.19	0.485	3.395	2
122	0.475	1.53	3.660	1.163	0.74	26.20	1.49	0.444	1.08	0.419	4.301	2
123	1.250	1.65	4.337	1.144	0.69	26.80	1.09	0.464	0.61	0.445	3.563	3
124	2.340	3.70	9.438	2.536	1.73	25.50	1.73	0.689	1.13	0.467	2.237	2
125	0.415	1.83	4.285	1.679	0.98	26.60	1.86	0.642	1.52	0.537	4.462	2

## **Anexo E. Glosario y teoría estadística básica.**

### Coeficiente de Correlación de Pearson

En el caso de datos en escala de intervalo o razón, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson “r” entre dos variables X e Y como (Levy y Varela, 2003):

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2)}}$$

con  $x_i = X_i - \bar{X}$  e  $y_i = Y_i - \bar{Y}$   
donde,  $\bar{X}$  es la media de la variable X  
 $\bar{Y}$  es la media de la variable Y

### Estadístico de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)

El estadístico KMO (Cerny y Kaiser, 1977) es una medida de la exactitud de un muestreo. Este estadístico resume que tan pequeñas son las correlaciones parciales entre las variables, sujeto a las correlaciones originales. Si las variables comparten factores comunes, entonces las correlaciones parciales debiesen ser más pequeñas y el valor de KMO cercano a 1.0. Así un valor de KMO de 0.5 ocurre cuando la matriz de correlaciones es igual a la matriz de correlaciones parciales. Un caso especial de esta situación es el caso donde la matriz de correlaciones es una matriz identidad, teniéndose que si la matriz de correlaciones se asemeja a la matriz identidad, entonces el valor de KMO se aproxima a 0.5. Valores mayores que 0.8 de KMO se consideran buenos, esto es, indican que el análisis por componentes será útil para las variables.

### Test de Kolmogorov-Smirnov

Permite contrastar que los datos de una variable siguen una distribución normal (Levy y Varela, 2003). Utiliza el estadístico D, definido como:

$$D = \text{máx}|F_n(x) - F_0(x)|$$

donde,  $F_n(x)$  es la función de distribución muestral de la variable y  $F_0(x)$  es la función teórica o correspondiente a la población normal.

### Test ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) permite determinar si las medias de varias muestras son significativamente distintas una de otra. Se supone que las muestras son independientes, de distribución normal, de misma varianza, pero quizás de diferentes medias debido a que están afectadas por un factor de variación A (Emery et al., 2010).

Para esto se construye un estadístico de Fisher con k-1 y n-k grados de libertad (k=nº de variables; n=nº de datos), definido como:

$$F = \frac{MS_1}{MS_0} = \frac{SS_1/(k-1)}{SS_0/(n-k)}$$

$$SS_0 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 ; SS_1 = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$$

Donde  $SS_0$  es la suma de cuadrados residual (fuente de variación por error) y  $SS_1$  es la suma de cuadrados debido por la fuente de variación del factor.  $MS_0$  es la media cuadrática del error y  $MS_1$  es la media cuadrática del factor.

**Anexo F. Resultado test ANOVA aplicado a las variables de las subcuencas estudiadas. Las variables significativas entre clases volumétricas (clases 3 y 4) de las subcuencas se presentan en celdas sombreadas y en negrita. gl: grados de libertad, F: estadístico de Fisher.**

Variable	Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl.	Media cuadrática	F	Significancia
GEO	<i>Clase volumétrica</i>	36.737	1	36.737	.322	.573
	<i>Error residual</i>	5369.680	47	114.249		
	<i>Total</i>	5406.417	48			
Geo1	<i>Clase volumétrica</i>	316.946	1	316.946	.404	.529
	<i>Error residual</i>	24295.118	31	783.713		
	<i>Total</i>	24612.064	32			
Geo2	<i>Clase volumétrica</i>	649.484	1	649.484	.973	.330
	<i>Error residual</i>	26040.864	39	667.714		
	<i>Total</i>	26690.348	40			
Geo3	<i>Clase volumétrica</i>	1410.944	1	1410.944	1.463	.238
	<i>Error residual</i>	23149.237	24	964.552		
	<i>Total</i>	24560.180	25			
<b>Geo4</b>	<i>Clase volumétrica</i>	2051.734	1	2051.734	5.612	<b>.033</b>
	<i>Error residual</i>	5118.701	14	365.622		
	<i>Total</i>	7170.435	15			
Geo5	<i>Clase volumétrica</i>	3.417	1	3.417	.011	.916
	<i>Error residual</i>	13257.649	44	301.310		
	<i>Total</i>	13261.066	45			
<b>Area</b>	<i>Clase volumétrica</i>	2.682	1	2.682	10.128	<b>.003</b>
	<i>Error residual</i>	12.445	47	.265		
	<i>Total</i>	15.127	48			
<b>Largo</b>	<i>Clase volumétrica</i>	.549	1	.549	10.926	<b>.002</b>
	<i>Error residual</i>	2.362	47	.050		
	<i>Total</i>	2.912	48			
<b>Perímetro</b>	<i>Clase volumétrica</i>	.686	1	.686	11.835	<b>.001</b>
	<i>Error residual</i>	2.725	47	.058		
	<i>Total</i>	3.411	48			
Pendiente	<i>Clase volumétrica</i>	.992	1	.992	.147	.703
	<i>Error residual</i>	317.637	47	6.758		
	<i>Total</i>	318.629	48			
<b>Zave</b>	<i>Clase volumétrica</i>	.704	1	.704	6.828	<b>.012</b>
	<i>Error residual</i>	4.846	47	.103		
	<i>Total</i>	5.550	48			
<b>Relieve</b>	<i>Clase volumétrica</i>	1.545	1	1.545	9.390	<b>.004</b>
	<i>Error residual</i>	7.734	47	.165		
	<i>Total</i>	9.280	48			
Densidad	<i>Clase volumétrica</i>	.005	1	.005	.006	.937
	<i>Error residual</i>	38.960	47	.829		
	<i>Total</i>	38.965	48			
<b>Orden</b>	<i>Clase volumétrica</i>	6.837	1	6.837	7.769	<b>.008</b>
	<i>Error residual</i>	41.367	47	.880		
	<i>Total</i>	48.204	48			
I <sub>GRAV</sub>	<i>Clase volumétrica</i>	.002	1	.002	.057	.813
	<i>Error residual</i>	1.278	47	.027		
	<i>Total</i>	1.280	48			
<b>MRATIO</b>	<i>Clase volumétrica</i>	.423	1	.423	3.780	<b>.058</b>
	<i>Error residual</i>	5.259	47	.112		
	<i>Total</i>	5.682	48			
<b>RRATIO</b>	<i>Clase volumétrica</i>	.075	1	.075	5.894	<b>.019</b>
	<i>Error residual</i>	.597	47	.013		
	<i>Total</i>	.671	48			
HRATIO	<i>Clase volumétrica</i>	.005	1	.005	1.391	.244
	<i>Error residual</i>	.177	47	.004		
	<i>Total</i>	.183	48			

**Anexo G. Resultado test ANOVA aplicado a las variables de las subcuencas estudiadas. Las variables significativas según el tipo de depósito generado en las subcuencas durante el 25M se presentan en celdas sombreadas y en negrita. gl: grados de libertad, F: estadístico de Fisher.**

	Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl.	Media cuadrática	F	Significancia
GEO	<i>Tipo de depósito</i>	74.680	1	74.680	.658	.421
	<i>Error residual</i>	5331.737	47	113.441		
	<i>Total</i>	5406.417	48			
Geo1	<i>Tipo de depósito</i>	164.197	1	164.197	.208	.651
	<i>Error residual</i>	24447.866	31	788.641		
	<i>Total</i>	24612.064	32			
Geo2	<i>Tipo de depósito</i>	152.797	1	152.797	.225	.638
	<i>Error residual</i>	26537.551	39	680.450		
	<i>Total</i>	26690.348	40			
<b>Geo3</b>	<i>Tipo de depósito</i>	2803.802	1	2803.802	3.093	<b>.091</b>
	<i>Error residual</i>	21756.378	24	906.516		
	<i>Total</i>	24560.180	25			
<b>Geo4</b>	<i>Tipo de depósito</i>	1599.992	1	1599.992	4.021	<b>.065</b>
	<i>Error residual</i>	5570.444	14	397.889		
	<i>Total</i>	7170.435	15			
Geo5	<i>Tipo de depósito</i>	30.851	1	30.851	.103	.750
	<i>Error residual</i>	13230.215	44	300.687		
	<i>Total</i>	13261.066	45			
<b>Area</b>	<i>Tipo de depósito</i>	1.524	1	1.524	5.264	<b>.026</b>
	<i>Error residual</i>	13.603	47	.289		
	<i>Total</i>	15.127	48			
<b>Largo</b>	<i>Tipo de depósito</i>	.503	1	.503	9.804	<b>.003</b>
	<i>Error residual</i>	2.409	47	.051		
	<i>Total</i>	2.912	48			
<b>Perímetro</b>	<i>Tipo de depósito</i>	.470	1	.470	7.518	<b>.009</b>
	<i>Error residual</i>	2.940	47	.063		
	<i>Total</i>	3.411	48			
<b>Zave</b>	<i>Tipo de depósito</i>	.966	1	.966	9.898	<b>.003</b>
	<i>Error residual</i>	4.585	47	.098		
	<i>Total</i>	5.550	48			
<b>Relieve</b>	<i>Tipo de depósito</i>	2.173	1	2.173	14.371	<b>.000</b>
	<i>Error residual</i>	7.107	47	.151		
	<i>Total</i>	9.280	48			
Pendiente	<i>Tipo de depósito</i>	5.288	1	5.288	.793	.378
	<i>Error residual</i>	313.341	47	6.667		
	<i>Total</i>	318.629	48			
Densidad	<i>Tipo de depósito</i>	.034	1	.034	.041	.840
	<i>Error residual</i>	38.931	47	.828		
	<i>Total</i>	38.965	48			
Orden	<i>Tipo de depósito</i>	1.569	1	1.569	1.581	.215
	<i>Error residual</i>	46.635	47	.992		
	<i>Total</i>	48.204	48			
I <sub>GRAV</sub>	<i>Tipo de depósito</i>	.052	1	.052	2.007	.163
	<i>Error residual</i>	1.227	47	.026		
	<i>Total</i>	1.280	48			
MRATIO	<i>Tipo de depósito</i>	.002	1	.002	.015	.903
	<i>Error residual</i>	5.681	47	.121		
	<i>Total</i>	5.682	48			
RRATIO	<i>Tipo de depósito</i>	.015	1	.015	1.052	.310
	<i>Error residual</i>	.657	47	.014		
	<i>Total</i>	.671	48			
HRATIO	<i>Tipo de depósito</i>	.004	1	.004	1.104	.299
	<i>Error residual</i>	.178	47	.004		
	<i>Total</i>	.183	48			