

4.3 Caracterización geomorfológica de la microcuenca del estero Yerba Loca mediante imágenes de alta resolución

Waldo Pérez,^{a,b} Idania Briceño,^a Paulina Vidal^a

^aHémera Centro de Observación de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Chile

^bDepartamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, España

4.3.1. Introducción

Mediante el uso de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha logrado caracterizar, analizar y discretizar información ambiental de múltiples variables y escalas. Ejemplo de ello es el mapa geomorfológico, que permite entender el contexto físico de la superficie de la Tierra y proporciona una descripción objetiva y completa de las formas del relieve, incorporando: información sobre las propiedades espaciales (dimensiones, pendiente, curvatura, relieve); geometría del relieve (morfometría); su origen y evolución, debido a agentes y procesos genéticos endógenos/exógenos (morfogénesis); su edad relativa o absoluta (morfocronología); su estado de actividad y la velocidad de los procesos genéticos (morfoodinámica); y el tipo de roca y depósitos cercanos a la superficie (Dramis et al., 2011).

Desde el punto de vista geomorfológico, en la cuenca del río Mapocho destacan los estudios realizados por Araya (1985, 1988 y 1996) y Börgel et al. (2004). Araya (1985) elaboró un análisis de la carta geomorfológica a escala 1:200.000, en la que clasifica los fenómenos en las vertientes, los talwegs (línea que unen puntos de máxima profundidad en el lecho de un río) y la morfotectónica presentes. La clasificación que muestra está orientada a exponer los encadenamientos entre ellos y destaca que gran parte de estas formas son herencias del cuaternario. Además, el autor correlaciona los sistemas de vertiente con las formas depositacionales basales; establece las relaciones entre el origen de la geodinámica actual del paisaje respecto a la acción de los agentes subaéreos; los aspectos genético-evolutivos a través del análisis de los depósitos basales coluviales; la escasa vegetación y la acción de relieves plegados.

Börgel et al. (2004) señalan que las sierras y los valles cordilleranos están representados por relieves plegados constituidos por sierras anticlinales y sinclinales. También indican que valles con igual evolución son indicadores de estructura impuesta por los procesos de orogénesis, donde el clima es el factor determinante en el modelado del territorio debido a un trabajo en forma selectiva, de acuerdo a la disposición y resistencia de las rocas, formando relieves en paisajes con diversos estados de equilibrio.

El presente trabajo tiene por objetivo la delimitación de los sistemas geomorfológicos presentes en la microcuenca del estero del Yerba Loca, mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución y un DEM (Digital Elevation Model o modelo de elevación interferométrico) obtenido de datos satelitales ERS-1 y ERS-2 (European Remote Sensing). La demarcación de los sistemas se realiza a partir de una metodología jerárquica que permite identificar y separar los sistemas presentes según criterios de secuencias topográficas y altitudinales, con énfasis en el análisis de formas derivadas de los procesos desencadenantes heredados o actuales.

4.3.2. Material y métodos

4.3.2.1. Área de estudio

La microcuenca del estero Yerba Loca se localiza en la comuna de Lo Barnechea, en la Región Metropolitana, y forma parte de la sección alta de la cuenca del río Mapocho (figura 75). Posee una superficie aproximada de 108,3 km² y se inserta en un clima mediterráneo con precipitaciones moderadas, concentradas en el invierno, y

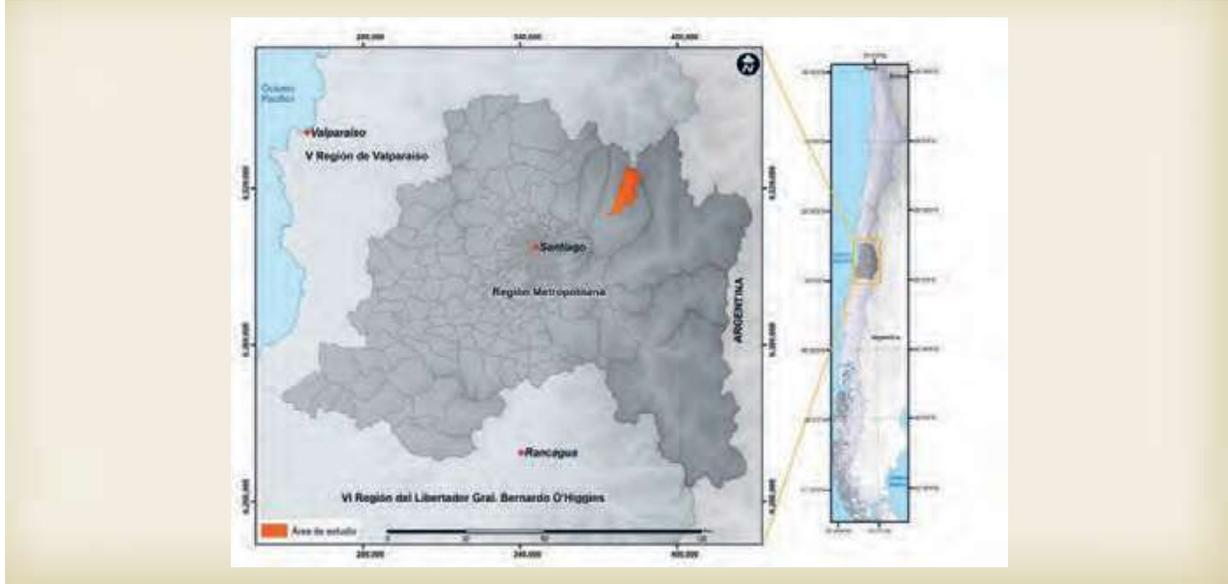


Figura 75: Localización microcuenca del estero Yerba Loca. Fuente: Hémera (2017).

con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses (DGA, 2016).

4.3.2.2. Datos remotos (Pléiades/ERS)

Se utilizó el mosaico de imágenes Pléiades de enero de 2015 y el DEM (Digital Elevation Model) ERS interferométrico, cuyas características técnicas se indican en las tablas 19 y 20.

4.3.2.3. Cálculo de parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos se definen como indicadores de las características dinámicas de los sistemas de drenaje que establecen los tipos de comportamiento y reacciones hidrológicas más probables (Ferrando, 1993). De acuerdo a Ritter et al. (1995), la morfometría de una microcuenca estudia la forma o geometría de la misma con la finalidad de describir procesos geomorfológicos. Estos procesos evalúan la producción de sedimentos, esti-

Tabla 19: Características técnicas de las imágenes Pléiades. Fuente: *Elaboración propia*.

Imagen	Resolución espectral	Longitud de onda (nm)	Resolución espacial	Fuente
PLÉIADES	Pan	480-820	50 cm	http://www.imagine-it.cl
	Azul	450-530	2 m	
	Verde	510-590	2 m	
	Rojo	620-700	2 m	
	IC	775-915	2 m	

Tabla 20: Características técnicas del DEM interferométrico. Fuente: *Elaboración propia*.

Imagen	Resolución espacial	Fuente
ERS interferométrico	30 m	www.esa.int

Tabla 21: Fórmulas matemáticas para calcular parámetros morfométricos. Fuente: Adaptado de Kummar et al. (2014).

Parámetro morfométrico	Fórmula	Fuente	
parámetros lineales			
Perímetro de la cuenca	Medición lineal de la divisoria de aguas de la microcuenca expresada en km	Horton (1945)	
Longitud del cauce principal	Longitud del cauce en km	Horton (1945)	
Longitud de red hídrica	Σ Longitud de los cauces presentes en la cuenca km		
Parámetros areales o superficiales			
Área o magnitud de una microcuenca (A_c):	Área plana en proyección horizontal delimitada por su divisoria expresada en km ²	Horton (1932;1945)	
Densidad de la red de drenaje (D_d)	$D_d = L/A_c$ dónde: L = Longitud total de los cauces dentro de la microcuenca; (A_c) el área total de drenaje en km ²	Horton (1932;1945)	
Coeficiente de compacidad (K_c):	$K_c = 0,282 * \frac{P}{\sqrt{S}}$ dónde: P= Perímetro de la microcuenca, S= Superficie de la microcuenca, K_c = Coeficiente de compacidad	Gravelius (1914)	
Forma de la microcuenca F_f	$F_f = A / L^2$ A = área de la cuenca; perímetro de la cuenca	Horton (1932;1945)	
Tiempo de concentración	$T_c = 60 \left(\frac{11,9 L}{H} \right)^{0,775}$ dónde: T_c = Tiempo de concentración en minutos, L = Longitud del curso de agua principal, (millas), H = Desnivel de la cuenca (pies)	Li y Chibber (2008)	
Parámetros de relieve			
Altitud, pendiente y exposición	Estos parámetros morfométricos fueron calculados a partir del DEM		
Desnivel	$R = H-h$ dónde: H=Altura máxima en m; h = Altura min. (m)	Hadley y Schumm (1961)	
Pendiente promedio en °			
Rapidez de escurrimiento potencial	IC Gravelius	Rapidez de escurrimiento potencial	Ferrando (1981)
	>2	Muy lento	
	2-1,76	Lento	
	1,75-1,51	Moderado	
	1,50-1,26	Acelerado	
	1,26-0	Muy acelerado	
Curva hipsométrica	Se calculó con la extensión para ArcGIS CalHypso de (Pérez-Peña et al., 2009)	Strahler (1957)	

man tasas de erosión, la rapidez de escurrimiento potencial de la escorrentía, entre otros.

En el área de estudio se calcularon los parámetros de drenaje lineales, areales o superficiales, y de relieve, para entender la influencia morfométrica en el relieve y sus características (Obi Reddy et al., 2004). Los parámetros morfométricos calculados en la microcuenca del estero Yerba Loca, se detallan en la tabla 21.

4.3.2.4. Definición de sistemas y geoformas

La definición de los sistemas geomorfológicos se realiza a partir de las relaciones verticales entre los sistemas presentes en el área de estudio, cuyas características morfológicas están determinadas por procesos litoestructurales, glaciales, nivales, gravitacionales y aluviales. Su funcionamiento lo determina la transferencia de materiales, a través de flujos de detritos, avalanchas, deslizamientos,

Tabla 22: Sistemas geomorfológicos, geoformas y morfogénesis. Fuente: Hémera (2017).

Sistema geomorfológico	Geoformas	Morfogénesis asociada
Lito-estructural Se definen como aquellas áreas donde los procesos del Cuaternario han dejado una impronta de escasa profundidad	Afloramientos rocosos, cornisas	Escarpe erosivo, ruptura de pendiente, falla observada e inferida, traza de plano axial, anticlinal
Glacial Está representado por las masas de hielo situadas en las cabeceras del sistema fluvial. Este sistema gestiona el aporte hídrico (pluvio-nival) a la microcuenca y da valor paisajístico al entorno cordillerano	Glaciar de valle, glaciar de montaña, glaciar rocoso, morrena: frontal, de fondo y lateral	Traza de plano axial, sinclinal, corona circo glaciar, grietas longitudinales, grietas transversales, flujo de detrito glacio aluvial
Nival Está representado por las alturas máximas y mínimas que ha alcanzado la nieve en el periodo 2003 a 2011 de acuerdo al movimiento de la isoterma 0 °C	Nicho de nivación, superficie con cobertura nival estacional	Isoterma 0° media anual mínima ±3,350 m.s.n.m., isoterma 0° media anual máxima ±4,050 m.s.n.m.
Gravitacional Estas formas y procesos caracterizan un amplio ambiente superficial recubriendo al sistema lito-estructural con diferentes tipos de detritos. Lo representa los movimientos de material no consolidado en las laderas en respuesta la atracción de la gravedad	Cono coluvial, cono coluvial coalescente, coluviones antiguos	Deslizamiento, desprendimiento o caída de rocas, flujo de detritos
Aluvial Define las formas y procesos vinculantes con las actividades de erosión, transporte y sedimentación en la microcuenca hidrográficas en estudio	Abanico aluvial, cono aluvial	

entre otros, y el transporte de materiales por el agua; así como por las condiciones imperantes en los afloramientos rocosos, que presentan una morfología y pendientes condicionadas por las características litológicas y estructurales, y por la dinámica y procesos propios de la evolución de laderas adyacentes (Ramonell, 1997).

A partir del análisis jerárquico, se identificaron los sistemas geomorfológicos en el área de estudio, con sus respectivas geoformas y morfogénesis asociada (ver tabla 22).

4.3.2.5. Interpretación visual, digitalización y validación en terreno

La caracterización de los sistemas geomorfológicos se realizó a partir de la interpretación visual del mosaico

de imágenes Pleiádes y mediante el desarrollo de las siguientes fases de trabajo: a) división la microcuenca del estero Yerba Loca en cinco (5) cuadrantes a escala 1:25.000, con el fin de obtener una observación de los distintos sistemas presentes en el área de estudio; b) descripción y tipificación de los sistemas geomorfológicos; c) clasificación, delimitación y categorización de las geoformas, manteniendo una coherencia en la asignación de áreas basados en los sistemas definidos; d) validación y corrección de la información interpretada, mediante la realización de dos (2) campañas a terreno (ver tabla 23); e) diseño de la simbología; y f) cartografía y elaboración de mapa geomorfológico, mediante el uso del software ArcGIS 10.1. El sistema de referencia usado en la cartografía es Datum WGS84, proyección UTM Huso 19 Sur.

Tabla 23: Campañas de terreno. Fuente: Hémera (2017).

N° Campaña	Sector	Fechas
1	Estero de la Yerba Loca	Del 16 al 26 de enero, 2016
2	Estero de la Yerba Loca	Del 15 al 18 de febrero, 2016

4.3.3. Resultados

4.3.3.1. Morfometría de la microcuenca del estero Yerba Loca

El análisis morfométrico señala que la red de drenaje de la microcuenca es controlada por las fallas presentes en el área en estudio. El factor de forma (Ff), indicador de los flujos máximos de las cuencas, muestra que los factores hidrogeológicos afectan directamente o indirectamente al entorno geomorfológico del área en estudio. Por otro lado, los elementos fisiográficos como el relieve y la pendiente (Singh et al., 2011), revelan que la escorrentía e infiltración presentan un potencial moderado.

Los parámetros morfométricos areales, como la densidad de drenaje (Dd), determina que la microcuenca tiene estratos resistentes/permeables, indicador que se condice con las características litológicas presentes en el sector.

Asociado al relieve de alta montaña, las pendientes se presentan de moderadas a fuertes, con valores que fluctúan entre los 3° y 75°. El 41% y 36% de la superficie de la microcuenca presenta pendientes que oscilan entre los 15°-30° y 30°-45°, respectivamente. La pendiente es el principal factor de desarrollo y control de las formas del relieve, y permite entender el movimiento del agua en la

microcuenca. Los valores máximos de las pendientes se localizan en la parte alta de la microcuenca, y corresponden a pendientes muy escarpadas que favorecen la caída y desprendimientos de rocas.

Las altitudes de la microcuenca oscilan entre los 1.300 y 5.350 m.s.n.m. aproximadamente, donde el 43% de la superficie se localiza entre los 3.000 y 4.000 m.s.n.m.

La red de drenaje de la microcuenca presenta, en orden de superficie, una exposición oeste, noroeste y suroeste, que representan el 25%, 19% y 16%, respectivamente, debido a un probable control de la tectónica. Los resultados del análisis morfométrico se detallan en la tabla 24. La figura 76 muestra la distribución de la altitud, pendiente y exposición en la microcuenca del estero Yerba Loca.

El índice de compacidad de Gravelius presenta un valor de 1,53 que es característico de una microcuenca de forma alargada que posee rapidez de escurrimiento potencial moderado, y cuyo cauce principal puede recibir aportes de manera gradual sin represamientos debido a la presencia de altas pendientes. Este índice también indica una tendencia de la microcuenca a concentrar grandes volúmenes de agua en su escurrimiento, lo que sumado al desnivel (4.051 metros aproximados), podría provocar

Tabla 24: Parámetros morfométricos del estero Yerba Loca. Fuente: Hémera (2017).

Parámetro morfométrico	Resultados
Parámetros lineales	
Perímetro de la cuenca	56,9 km
Longitud del cauce principal	22 km
Longitud de red hídrica	52 km
Parámetros areales o superficiales	
Área o magnitud de una microcuenca ():	108,3 km ²
Densidad de la red de drenaje (λ)	0,48
Coefficiente de compacidad	1,53
Forma de la microcuenca	Alargada
Tiempo de concentración	82,71 min
Parámetros de relieve	
Altitud, pendiente y exposición	ver figura 76
Desnivel	4.051,76 m
Pendiente promedio en grados (°)	29°
Rapidez de escurrimiento potencial	Rapidez de escurrimiento potencial moderado
Curva hipsométrica	ver figura 77

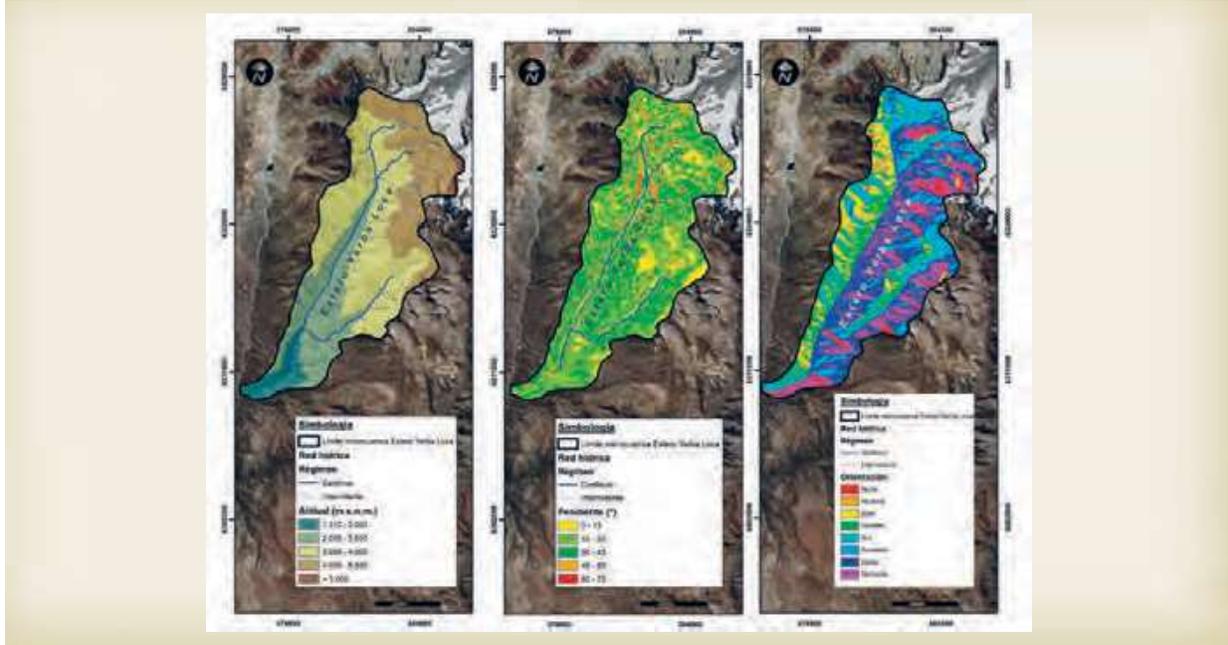


Figura 76: Altitud (m), pendiente (°) y exposición del estero Yerba Loca. Fuente: Hémera (2017).

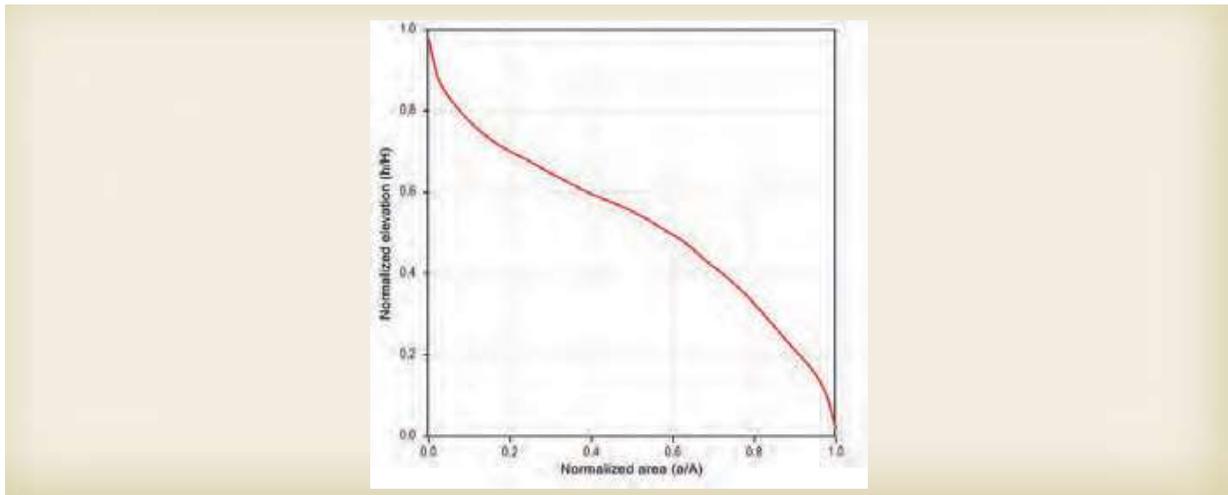


Figura 77: Curva hipsométrica estero del Yerba Loca. Fuente: Hémera (2017).

inundaciones en sus puntos de descarga, en eventos de precipitaciones extremas.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Campos (1992) y Chow et al. (1994), la microcuenca del estero Yerba Loca corresponde a una cuenca pequeña (25-250 km²), sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración.

La microcuenca presenta un patrón de drenaje de Trellis, caracterizado por cursos de aguas paralelos entre sí, debi-

do a la influencia de fallas y diaclasas (fractura en la roca en la que no hay desplazamientos de bloques) de origen estructural. Por otro lado, presenta una densidad de drenaje (Dd) de 0,48 km/km², el cual indica un alto potencial de erosión y estructuración de la red fluvial. Los parámetros morfométricos medidos muestran coherencia con la información de la curva hipsométrica (ver figura 77), en la que se observa que la microcuenca en estudio se caracteriza por ser geológicamente joven, capaz de movilizar grandes bloques de rocas.

4.3.3.2. Sistemas y geoformas de la microcuenca del estero Yerba Loca

Las características de los sistemas y geoformas asociados a la microcuenca, se describen de forma detallada en la tabla 25.

Cada uno de los sistemas y geoformas identificados, muestran la riqueza de procesos y factores que interactúan en el sector andino de Chile central. La influencia estructural se ve reflejada en las formas del relieve, a través de la disposición tectónica, así como en los agudos contrastes de resistencia litológica que producen erosión selectiva. Se muestra como

Tabla 25: Características de los sistemas y geoformas del estero Yerba Loca. Fuente: *Elaboración propia.*

Sistema	Geoformas	Fotografía
Litoestructural	Las geoformas asociadas al sistema lito-estructural incluyen afloramientos rocosos, que corresponden a superficies constituidas por rocas expuestas sin desarrollo de vegetación, generalmente dispuestos en laderas abruptas. La influencia estructural se ve reflejada en: Las formas del relieve a través de la disposición tectónica; en agudos contrastes de resistencia litológica que producen erosión selectiva; en los escarpes marginales en el que se resaltan sistemas depositacionales y gravitacionales, y se da paso a formas coluviales que favorecen los depósitos al pie de las laderas y en los taludes.	
Glacial	El sistema glaciar está integrado por circos glaciales, morrenas, glaciares rocosos y glaciar de valle. En la cabecera de la microcuenca se localiza el glaciar La Paloma a 4.486 m.s.n.m. (DGA, 2010), con una superficie de 1,2 km ² . Los glaciares rocosos que se localizan entre los 3.800 y 5.000 m.s.n.m., están compuestos por detritos pobremente clasificados y suelen adoptar formas lobuladas. Se caracterizan por tener un frente y pendientes laterales escarpadas, localizándose algunos de ellos en las coordenadas 384.436 E, 6.324.171 N, 382.997 E, 6.322.806 N. El modelado glacial, que se evidencia por encima de los 3.500 m.s.n.m., destaca en vertientes con profundas excavaciones en forma de circo glacial, con disección nival y fluvial. En este sistema, se observan, además, distintas acumulaciones en las vertientes asociadas a procesos glaciares y gravitacionales. Las morrenas se observan como grandes bloques heterométricos, con una escasa matriz fina. Se reconocen varios conjuntos morrénicos frontales (en torno a las coordenadas 380.995 E, 6.315.077 N, 380.794 E, 6.325.638 N), conformados por varios circos glaciales, colgados sobre los barrancos, que indican el límite máximo de extensión del glaciar La Paloma.	
Nival	Los nichos de nivación corresponden a depresiones cóncavas, abandonadas por los hielos cuaternarios. En las zonas de sotavento aumentan su potencial de riesgo cuando la nieve es empujada, y es favorecido este empuje con la inclinación y las formas de las laderas (Acosta, 2006). La pérdida de cobertura de hielo expone los materiales del sustrato y de las formaciones superficiales a otros procesos. En el extremo altitudinal inferior y por el aumento de la temperatura, ocurren procesos de fitocolonización, con especies pioneras herbáceas. También se hacen evidentes los depósitos constituidos por materiales detríticos heterométricos, abandonados en el pasado reciente por los glaciares. Se puede observar los nichos de acumulación nival en la ladera oeste de la cuenca superior del estero de la Yerba Loca (localización 379.995 E, 6.324.138 N).	

Sistema	Geformas	Fotografía
Gravitacional	<p>El sistema gravitacional tiene una gran extensión a lo largo de la microcuenca, que se expresa en formas de conos coluviales y conos coluviales coalescentes, sobre los 2,500 m.s.n.m., dependiendo de las condiciones morfoestructurales. En la sección baja de la microcuenca, se observan coluviones antiguos cubiertos de vegetación.</p> <p>Por encima de estas altitudes se plantea la existencia de una marcada disimetría entre las vertientes, dominados por los procesos glaciares y periglaciares. Por otro lado, los taludes con coluvios se caracterizan por fuertes pendientes (>20°), y se observan en las porciones distales, grandes bloques, procedentes de la pared y caídas de roca.</p> <p>Estos taludes con coluvios se ubican en las laderas adyacentes del estero del Yerba Loca, en su margen derecho (en sentido de la dirección de la corriente), tapizando el talud de forma continua desde la coordenada 380.944 E, 6.324.460 N, hasta la coordenada 378.117 E, 6.316.069 N, con alternancia de conos coluviales, producto de microcuencas aportantes.</p>	
Aluvial	<p>El sistema aluvial lo representan pequeños conos aluviales y abanicos aluviales, constituidos por sedimentos originados por distintos procesos erosivos torrenciales, depositados en las partes más bajas de los valles y en los pies de las laderas.</p> <p>Los conos y abanicos de mayor desarrollo están surcados en toda su longitud por desprendimiento de rocas, que dispersan los bloques por toda la ladera. Los conos presentan formas variadas que denotan un funcionamiento complejo. Se aprecia la distribución de procesos gravitacionales, destacando las pendientes rectilíneas, con la presencia de canales de flujos bien definidos.</p> <p>Se observan valles en forma de U.</p>	

sistemas denudativos, que permiten la delimitación de superficies a través de escarpes marginales, sistemas deposicionales y gravitacionales, dando paso a formas coluviales que favorecen los depósitos al pie de las laderas. Desde el punto de vista aluvial, en el área del Yerba Loca se distinguen abanicos y conos en los que se demuestra la presencia de sedimentos heterométricos hacia los cauces; su topografía escarpada indica que es el primer factor geomorfológico a considerar para la generación de flujos, deslizamientos y derrumbes. En la figura 78, se identifican los sistemas geomorfológicos de la microcuenca del estero de Yerba Loca.

4.3.4. Conclusiones

El área de estudio, ubicada en la cordillera de Chile central se encuentra sometida a diversos procesos geomorfológicos (tectónica reciente, erosión glacial, fluvial y gravi-

tacional) debido, en parte, a su localización, condiciones orográficas, altitud y precipitación, generando una alta inestabilidad derivada de procesos dinámicos aún activos. Estos procesos conllevan la formación de una serie de sistemas geomorfológicos, que mediante la utilización de una metodología jerárquica y representados a escala 1:50.000, caracterizan la microcuenca en cinco grandes grupos, que son los sistemas litoestructural, gravitacional, glacial, nival y aluvial.

El estudio entrega como resultados las características que definen la geomorfología de alta montaña, la influencia glacial y la convergencia de procesos entre los sistemas y geoformas definidos.

Por otro lado, se establece que las relaciones espaciales y altitudinales presentes el área de estudio puedan servir

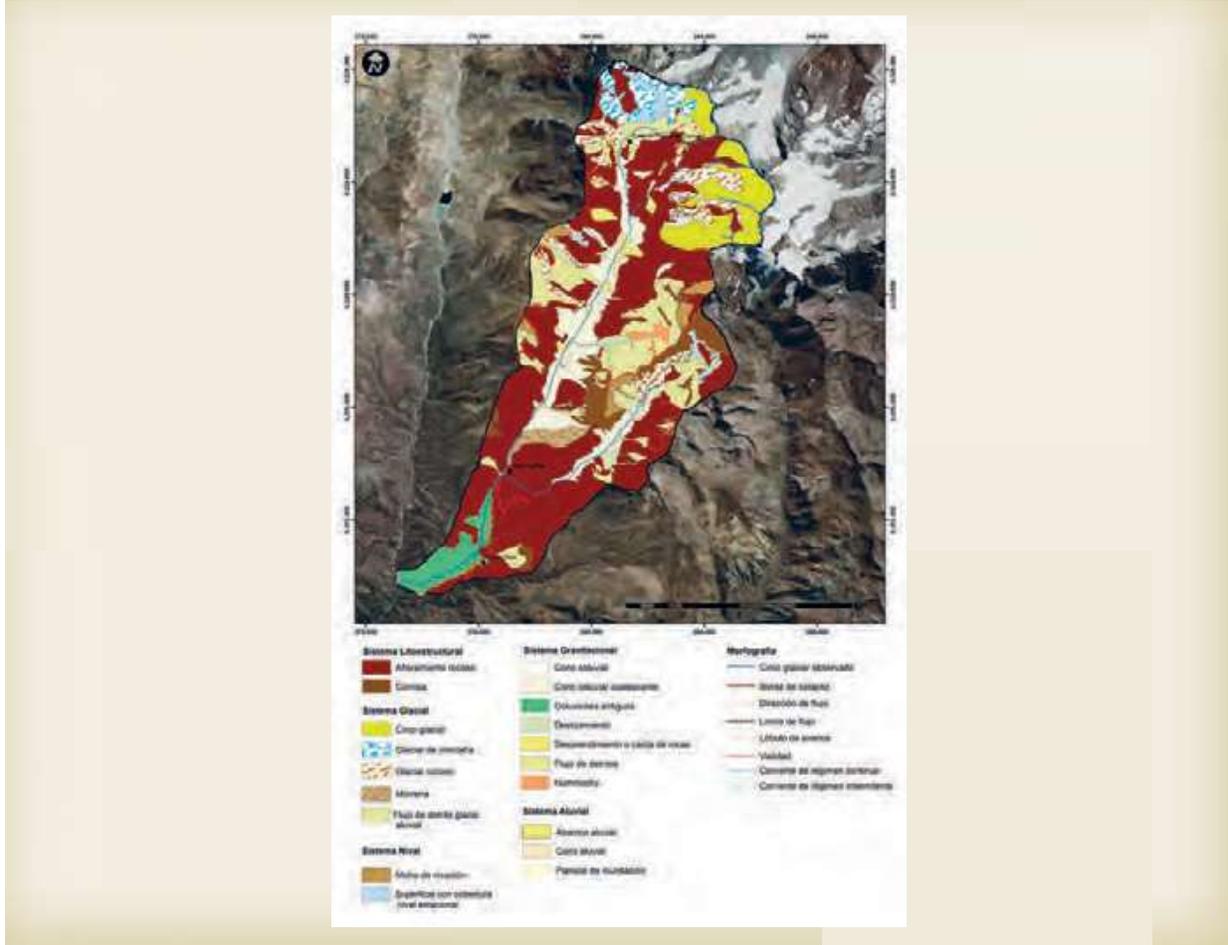


Figura 78: Mapa de sistemas geomorfológicos. Fuente: *Elaboración propia.*

de base para estudios posteriores de amenazas por inundaciones y deslizamientos de laderas o movimientos en masa, ante un escenario de cambio climático proyectado. Este escenario conllevaría un aumento global de las temperaturas para la zona, así como una disminución de las precipitaciones, que se concentrarían en ciertos períodos y con mayor intensidad, pudiendo condicionar una mayor ocurrencia de remociones en masa en la zona de estudio.

Debido a las condiciones climáticas, topografía, accesibilidad y extensión del área de estudio, el uso de imágenes de satélite de alta resolución, integradas en un SIG, ha demostrado una vez más la importancia que tienen en el levantamiento y producción de información temática digital.

Este trabajo es un aporte a los sistemas ambientales regionales, debido a que se generó información a escala mediana, que no se dispone actualmente.