



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Geografía

**“ANÁLISIS DE COMPONENTES HIDROLÓGICOS Y SU INFLUENCIA EN EL
TIPO DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN MICROCUENCAS DE LA
RESERVA NACIONAL RÍO CLARILLO, COMUNA DE PIRQUE, REGIÓN
METROPOLITANA DE SANTIAGO”**

Memoria para optar al título de Geógrafo

NICOLÁS BECERRA CORNEJO

Profesor guía: Rodrigo Vargas Rona

SANTIAGO – CHILE

2020

Análisis de componentes hidrológicos y su influencia en el tipo de escurrimiento superficial en microcuencas de la Reserva Nacional río Clarillo, Comuna de Pirque, Región Metropolitana de Santiago.

I'd rather be a forest than a street...

Paul Simon.

RESUMEN

Se analizan los principales componentes hidrológicos relacionados a la infiltración en 35 microcuencas de la Reserva Nacional Río Clarillo ubicada en la comuna de Pirque, región Metropolitana de Santiago, con el objetivo de entender la influencia de éstos en la existencia de un flujo superficial permanente. Los principales componentes hidrológicos son una selección de parámetros morfométricos cuyos valores dan cuenta del estado erosivo de las unidades hidroespaciales, además de la cobertura vegetal, pendiente y exposición.

De aquellas 35 microcuencas, en las que se realiza un análisis general, únicamente se obtuvo información del tipo de escurrimiento en 20, siendo esto la principal limitante metodológica. De esta manera el objetivo se cumple cabalmente sólo para 20 microcuencas, que se decidió fueran microcuencas de un entorno geográfico similar, la zona media-baja del área de estudio que a su vez coincide con la zona boscosa de la cuenca.

El análisis general de las 35 microcuencas las agrupó en 3 categorías de estado erosivo, aquellas deterioradas, equilibradas y en un punto intermedio. Luego, el análisis de los componentes según el tipo de escurrimiento se realizó en 3 etapas, i) 20 microcuencas con información de escurrimiento frente a los componentes; ii) componentes de 2 microcuencas contiguas y a grandes rasgos similares de no ser por el tipo de escurrimiento; y iii) componentes de 3 microcuencas con escurrimiento superficial permanente pero con magnitudes de caudal distintos. Se observaron componentes que se manifiestan tanto inversa como directamente proporcional acorde a la teoría, otros en que se observa un patrón en desacuerdo con la teoría (se esperaba otro comportamiento) y aquellos que no tienen relación con la teoría.

Se concluye que, para el área de estudio, el control de los componentes sobre el tipo de escurrimiento superficial no es taxativo, mas, sí refleja tendencias y describe las importantes diferencias entre unidades hidroespaciales, especialmente cuando los componentes se complementan entre sí. La manera en que se relacionan los componentes unos con otros da cuenta de la interrelación en los procesos y el continuo en que se desarrolla el fenómeno. A su vez, se aborda lo necesario que es la interdisciplinariedad al estudiar estos fenómenos.

TABLA DE CONTENIDO

.....	0
RESUMEN	2
TABLA DE CONTENIDO	3
ÍNDICE DE MAPAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES	6
ÍNDICE DE GRÁFICOS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	7
1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 Introducción	8
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.3 Área de estudio	9
1.3.1 Reserva Nacional Río Clarillo	11
1.3.2 Biogeografía	11
1.3.3 Climatología	12
1.3.4 Geomorfología.....	13
1.3.5 Geología	14
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo General.....	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
CAPITULO 2: MARCO CONCEPTUAL.	15
2.1 Escorrentía y flujo hídrico.	15
2.2 Infiltración.	17
2.2.1 Vegetación.....	17
2.2.2 Pendiente.	18
2.2.3 Exposición.	20
2.3 Parámetros morfométricos	20
2.3.1 Parámetros generales	21
2.3.1.1 Área de la cuenca	21
2.3.1.2 Longitudes importantes	21

2.3.2	Parámetros de forma.....	21
2.3.2.1	Coeficiente de compacidad de Gravelius	21
2.3.2.2	Factor de forma	22
2.3.3	Parámetros de Relieve	23
2.3.3.1	Pendiente media de la cuenca.....	23
2.3.3.2	Pendiente media del cauce	23
2.3.3.3	Curva hipsométrica	23
2.3.4	Red de drenaje	24
2.3.4.1	Forma y orden.	24
2.3.4.2	Densidad de drenaje D_d	25
2.4	Tiempo de concentración (T_c).....	26
CAPÍTULO 3 MARCO METODOLÓGICO.....		27
3.1	De la recolección y generación de información hidrológica	27
3.1.1	Delimitación de microcuencas.....	28
3.2	Del cálculo de los componentes hidrológicos.....	29
3.2.1	Cálculo de los parámetros morfométricos	29
3.2.2	Pendiente y exposición	30
3.2.3	Cobertura vegetal.....	30
3.3	Del análisis de los componentes y el cruce de información	31
3.4	Limitantes metodológicas.	31
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....		34
4.1	Delimitación de microcuencas.	34
4.1.1	Clasificación general	34
4.2	Escurrimiento superficial y caudal.	37
4.2.1	Caudales	38
4.3	Parámetros generales.	39
4.4	Pendientes	41
4.5	Exposición	43
4.6	Cobertura Vegetal	46
4.7	Parámetros morfométricos.....	47
4.7.1	Parámetros de forma.....	47

4.8	Parámetros de Relieve	51
4.8.1	Hipsometría	51
4.8.2	Pendiente media del cauce.....	59
4.9	Jerarquización de la red de drenaje.....	60
4.10	Densidad de drenaje.....	62
4.11	Tiempos de concentración.	63
4.12	Resumen de componentes.....	65
4.13	Tipo de temporalidad del escurrimiento vs componentes hidrológicos.....	69
4.13.1	Según los parámetros generales.....	70
4.13.1.1	Área	70
4.13.1.2	Desnivel.....	70
4.13.2	Según los parámetros de relieve	70
4.13.2.1	Pendiente media de la cuenca, del cauce principal, densidad de drenaje	70
4.13.2.2	Curva hipsométrica	71
4.13.3	Según los parámetros de forma	74
4.13.4	Según la cobertura vegetal.....	75
4.13.5	Según la pendiente.....	76
4.13.6	Según la exposición.	77
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....		78
5.1	Conclusiones.....	78
5.2	Discusión	80
5.3	Recomendaciones	82
BIBLIOGRAFÍA		84
ANEXOS		87
5.4	Anexo n°1 Criterio de clasificación para la pendiente media del cauce principal.	87
5.5	Anexo n°2 Tabla área precipitación sólida	87
ÍNDICE DE MAPAS		
Mapa 1	Área de estudio.....	10
Mapa 2	Delimitación de microcuencas	36
Mapa 3	Microcuencas según número de componentes resaltados	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de flujos.....	16
Tabla 2 Pendientes y umbrales geomorfológicos.....	19
Tabla 3 Clases de compacidad.....	22
Tabla 4 Esquema metodológico.....	33
Tabla 5 Clasificación general de microcuencas.....	35
Tabla 6 Régimen de escurrimiento superficial.....	38
Tabla 7 Caudales de microcuencas 24, 25 y 27.....	39
Tabla 8 Parámetros generales.....	40
Tabla 9 Cobertura de los umbrales de pendiente.....	41
Tabla 10 Resumen de pendientes predominantes.....	43
Tabla 11 Cobertura de exposición de las microcuencas.....	44
Tabla 12 Resumen de exposición.....	45
Tabla 13 Cobertura vegetal.....	47
Tabla 14 Compacidad y forma de microcuencas.....	48
Tabla 15 Clasificación de Compacidad.....	49
Tabla 16 Clasificación de microcuencas según su Factor de forma.....	50
Tabla 17 Formas de microcuencas.....	51
Tabla 18 Resumen de etapa erosiva según curvas hipsométricas.....	58
Tabla 19 Pendiente media del cauce principal.....	60
Tabla 20 Jerarquización de Shreve.....	61
Tabla 21 Densidad de drenaje.....	62
Tabla 22 Tiempos de concentración.....	64
Tabla 23 Resumen.....	66
Tabla 24 Pendiente de microcuencas 7 y 8.....	76
Tabla 25 Pendiente de microcuencas 24, 25 y 26.....	76
Tabla 26 Exposición microcuencas 7 y 8.....	77
Tabla 27 Exposición microcuencas 24, 25 y 27.....	78

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Coeficiente de compacidad de Gravelius.....	21
Ecuación 2 Factor de Forma.....	22
Ecuación 3 Densidad de drenaje.....	26
Ecuación 4 California Culverts Practice (1942).....	26
Ecuación 5 Giandotti.....	26
Ecuación 6 Normas españolas.....	27
Ecuación 7 Bransby-Williams.....	27
Ecuación 8 Pilgrim y McDermott.....	27
Ecuación 9 Passini.....	27
Ecuación 10 Factores de Formación del Suelo.....	32

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Curvas hipsométricas de microcuencas 1, 2, 3, 3a, 3b, 3c y 4	52
Gráfico 2 Curvas hipsométricas de microcuencas 5, 5a, 5b, 5c y 5d.	53
Gráfico 3 Curvas hipsométricas de microcuencas 6, 7 y 8.....	54
Gráfico 4 Curvas hipsométricas de microcuencas 10, 11, 12 y 13.....	55
Gráfico 5 Curvas hipsométricas de microcuencas 9, 14, 15 y 16.....	56
Gráfico 6 Curvas hipsométricas de microcuencas 17, 18, 18a, 19, 20, 21 y 22.....	57
Gráfico 7 Curvas hipsométricas de microcuencas 23, 24, 25, 26 y 27.....	58
Gráfico 8 Curvas hipsométricas según el tipo de escurrimiento	72
Gráfico 9 Comparación de curvas hipsométricas de microcuencas 7 y 8	73
Gráfico 10 Comparación de curvas hipsométricas de microcuencas 24, 25 y 27	74
Gráfico 11 Criterio de clasificación para la Pendiente media de la cuenca	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Climograma Reserva Nacional Río Clarillo años 1985-2009.....	13
Figura 2 Parámetros de forma	23
Figura 3 Tipos de curvas hipsométricas	24
Figura 4 Métodos de jerarquización.	25
Figura 5 Microcuencas 7 y 8	69

1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La presente memoria indaga en el fenómeno del flujo base (*base flow*) en microcuencas de la Reserva Nacional Río Clarillo (RNRC en adelante). El flujo base o escurrimiento superficial permanente de las microcuencas es importante ya que la suma de dichos flujos constituye el caudal de verano del río Clarillo, el cual una vez derretidas las nieves, no se abastece de glaciares ni lagunas altoandinas. Se analizan hidrológicamente 35 microcuencas, no obstante, 20 de ellas se relacionan con el tipo de escurrimiento debido a limitantes metodológicas (ver página 31). El análisis hidrológico de las 35 microcuencas permite agruparlas en 3 categorías según un balance erosivo general, así, se clasifican en estables, deterioradas y en un punto medio entre ambos.

Al analizar los componentes hidrológicos con el tipo de escurrimiento, los resultados son ambiguos debido a la disparidad de la información y la heterogeneidad de las microcuencas. Para superar la heterogeneidad de comparar microcuencas muy disímiles, se enfoca la escala de análisis comparando microcuencas similares. En primera instancia se comparan 2 microcuencas contiguas que difieren en la temporalidad del escurrimiento superficial. Luego se comparan 3 microcuencas, que si bien las 3 poseen flujo superficial permanente, difieren en el monto del caudal.

Los componentes analizados no poseen un control directo en la temporalidad del escurrimiento, no obstante, cuando el análisis se enfoca en microcuencas similares sí existen patrones claros que dan cuenta de una relación entre los componentes con el escurrimiento superficial, ya sea en la existencia de éste como en la cantidad.

1.2 Planteamiento del problema

Los ríos y cursos de agua, son de las expresiones del ciclo hidrológico más notables y trascendentales, aun cuando representan tan solo el 10^{-4} % con respecto al total de agua en la tierra (Pidwirny, 2006). Pese a tan pequeño porcentaje, a través de los cauces de los ríos fluye agua durante todo el año aun estando en la estación seca y con ausencia de precipitaciones en el área de recepción, lo que se explica en las cuencas andinas con el almacenamiento crionival, en donde, ante una ola de calor pueden ocurrir subidas de caudal.

El río Clarillo es un curso de agua que nace en un cajón precordillerano en la Región Metropolitana de Santiago. Corresponde a un afluente del río Maipo, es decir, constituye una subcuenca de la gran cuenca andina del Maipo. A diferencia del río Maipo, la cuenca del río Clarillo carece de glaciares y lagunas altoandinas que lo abastezcan de manera permanente, entonces una vez que se derrite la nieve precipitada, clasificar el régimen del río como pluvio-nival es insuficiente ya que no explicaría el flujo base.

Dicho flujo base proviene de un conjunto de fenómenos, conocidos popularmente como “vertientes”, “ojos de agua”, “brotes de agua”, manantiales, o incluso quebradas, que consisten en afloramientos de agua subterránea. La suma de dichas “vertientes” que fluyen

principalmente por los *talwegs* de las microcuencas, constituye el caudal de la época estival del río Clarillo. En muchas microcuencas, la disponibilidad de agua es permanente y es sostén de ecosistemas de caracteres esclerófilo e incluso templados, es decir, densos bosques de especies hidrófitas, en donde destaca la presencia del bosque con *Persea lingue* (lingue), árbol catalogado Vulnerable¹ cuyos requerimientos hídricos sitúan su área de distribución muy cercana a fuentes de agua, a tal punto que en ciertas microcuencas que ya no poseen de flujo base en verano, los bosques de la mencionada especie se han secado.

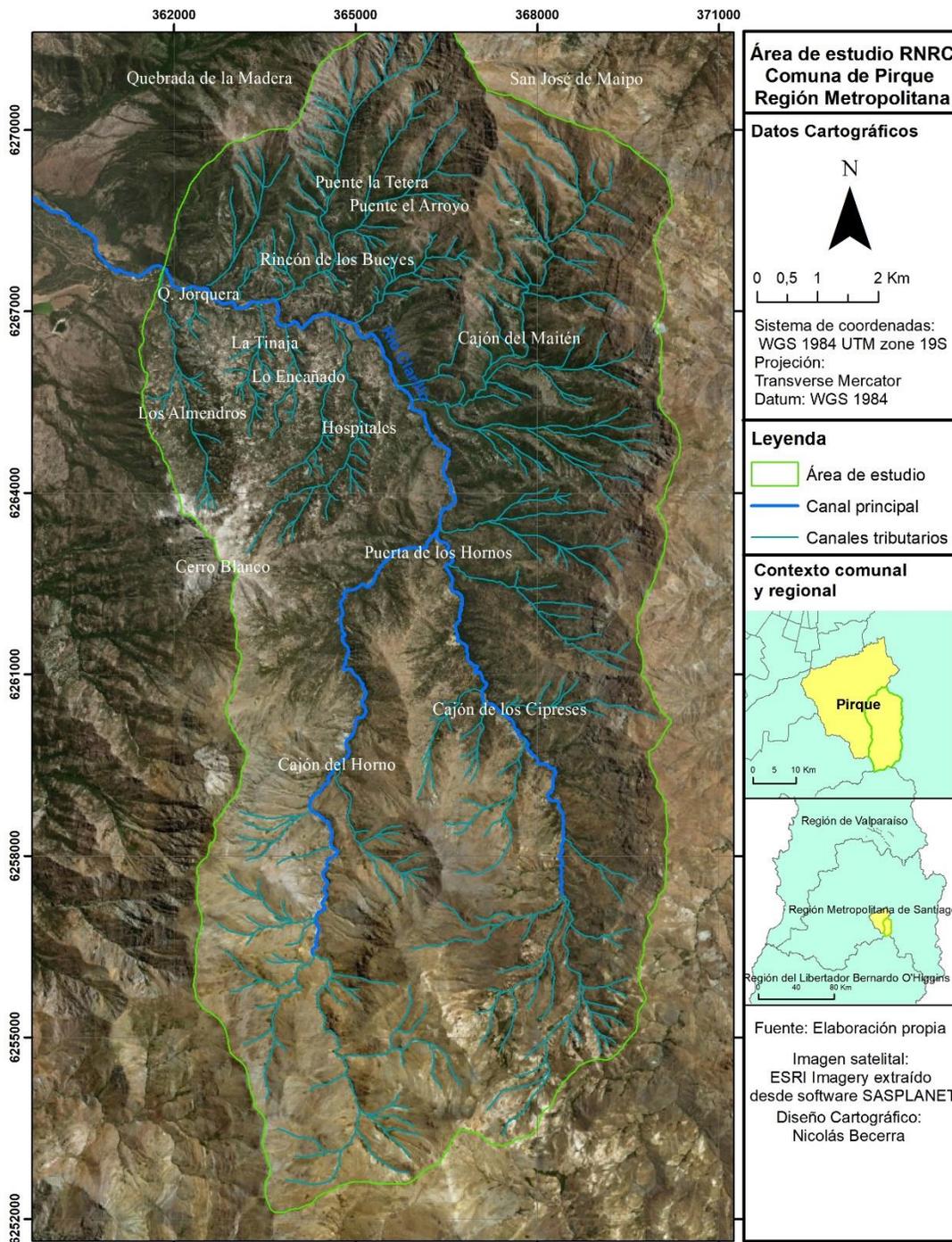
Entonces, la importancia del flujo base, además de la directa relación que posee con la conservación de formaciones esclerófilas e hidrófitas y de especies catalogadas como Vulnerable, se suman otros aspectos, tales como la disponibilidad de agua para las funciones de la RNRC y para las instalaciones sanitarias de los visitantes. Así nace el interés de esta memoria de investigar sobre el fenómeno del escurrimiento permanente en microcuencas de la RNRC con la siguiente pregunta de investigación. ¿Cuáles son las características de las microcuencas de la RNRC que influyen en que éstas posean o no, flujo superficial permanente?

1.3 Área de estudio

El área de estudio (ver Mapa 1) corresponde la Reserva Nacional Río Clarillo en base a una delimitación realizada con criterios topográficos. La RNRC está ubicada en la comuna de Pirque en la Región Metropolitana, a unos 40 kilómetros al sureste de Santiago, se accede a ella mediante el camino G-405, también llamado Camino Orilla de Río.

¹ Séptimo proceso de Clasificación de Especies mediante el DS N°42/2011 del Ministerio del Medio Ambiente promulgado el 30 de Noviembre de 2011 oficializa el estado de conservación de *Persea lingue* como Vulnerable (VU) desde la Región de O'Higgins hacia el norte, desde Región del Maule al sur como Preocupación Menor (LC).

Mapa 1 Área de estudio



1.3.1 Reserva Nacional Río Clarillo

La Reserva Nacional Río Clarillo es parte de las 105 unidades del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) y a su vez, una de las 46 Reservas Nacionales. Creada el 29 de enero de 1982 mediante el Decreto Supremo N°19² del Ministerio de Agricultura, en donde se detallan los títulos de propiedad de los predios y se describen los deslindes. La categoría Reserva Nacional es homologable con la categoría de manejo IV de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés), lo que implica una conservación mediante manejo activo cuyo objetivo es mantener, conservar y restaurar especies nativas (Zorondo-Rodríguez, 2013).

La Reserva Nacional Río Clarillo busca conservar la flora representativa de la zona mesomórfica del país y usar de manera racional sus recursos (Lira, 1986). Administrativamente está emplazada en la comuna de Pirque de la Provincia Cordillera en la Región Metropolitana de Santiago siendo una de las 3 unidades SNASPE presentes en dicha región, junto con la Reserva Nacional Roblería del Cobre de Loncha y el Monumento Natural el Morado.

1.3.2 Biogeografía

Como se ha mencionado, la RNRC pretende preservar la flora y fauna de la zona mesomórfica del país. En cuanto a la vegetación, ésta se desarrolla de diversas formas, en tanto a las distintas posiciones geomorfológicas existentes, así existen densos y altos bosques de fondos de quebrada como ralos matorrales xerofíticos en laderas de exposición boreal, hasta bofedales en los ambientes altoandinos.

En tanto a la composición florística de leñosas, los densos bosques de fondo de quebrada están formados principalmente por *Persea lingue* (lingue), *Drimys winteri* (canelo), *Luma chequen* (arrayán blanco o chequén) y *Cyptocarya alba* (peumo), luego en las zonas de características más méxicas son comunes los bosques con *Lithraea caustica* (litre), *Quillaja saponaria* (quillay), *Kageneckia oblonga* (bollén) y *Maytenus boaria* (maitén). En las laderas de exposición boreal existe un matorral espinoso compuesto, entre otras, por *Vachellia caven* (espino), *Colliguaja odorífera* (colliguay), *Baccharis linearis* (romerillo), *Retanilla ephedra* (frutilla del campo), *Talguenea quinquinervia* (tralhuén), las suculentas *Echinopsis chilensis* (quisco) y del género *Puya* (chaguales). Bosquetes de *Escallonia myrtoidea* (lun) y *Austrocedrus chilensis* (ciprés de la cordillera) están presentes en los cajones cordilleranos. Vegetación riparia propia de la zona ribereña del río Clarillo es *Salix humboldtiana* (sauce criollo), *Psoralea glandulosa* (culén), *Baccharis salicifolia* (chilca) y *Gunnera tinctoria* (nalca) (Niemeyer, y otros, 2002). En la zona de estepa altoandina predomina *Chuquiraga oppositifolia* (hierba blanca), *Laretia acaulis* (llaretilla) y *Anarthrophyum elegans* (Lira, 1986; CONAF, 1996).

² Publicado el 5 de Marzo de 1982 en el Diario Oficial.

Cabe destacar la presencia de especies con Categoría de conservación, *Citronella mucronata*, *Persea lingue*, *Porliera chilensis* y *Austrocedrus chilensis* como Vulnerable (VU); *Drimys winteri*, En Peligro (EN); y *Kageneckia angustifolia* Casi amenazado (NT)³. Muy relacionado a la categoría de conservación de la vegetación es la actividad extractiva para la producción de carbón realizada en el pasado, la que tuvo una gran distribución en el área de estudio (la toponimia de Cajón del Horno es un ejemplo) dejando como consecuencia un paisaje dominado por árboles multifustales, característico de un bosque en regeneración.

En cuanto a la fauna, específicamente a los vertebrados terrestres según el trabajo de Díaz *et al* (2002), están presentes 127 especies de las cuales 26 son endémicas de Chile. De las 127 especies, 15 son reptiles, 85 aves, 5 anfibios y 22 mamíferos, los que constituyen el 69% de las especies que teóricamente se distribuyen en la RNRC, es decir, la fauna asociada al matorral y bosque esclerófilo de la zona central de Chile.

1.3.3 Climatología

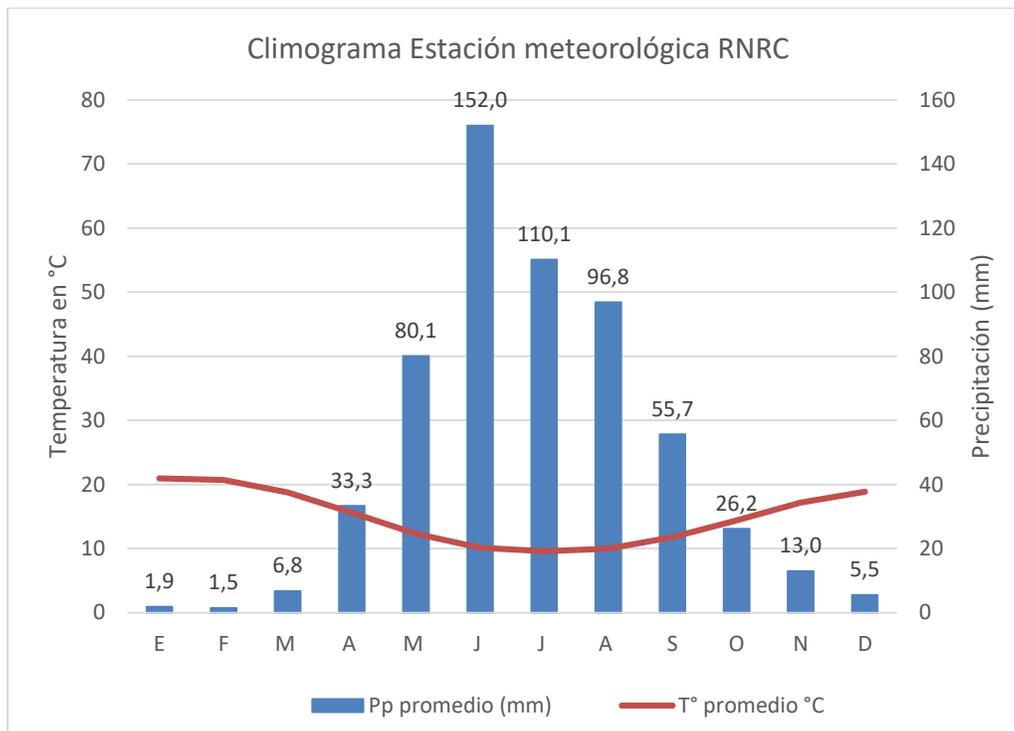
La RNRC está inserta en la unidad macro climática mediterránea semi-árida, lo cual supone en términos de precipitación, que ésta ocurra en el período frío del año, mientras que en los meses cálidos predomina la sequía (di Castri & Hajek, 1976). Según la clasificación de Köppen, el clima es Csb (Lira, 1986), que indica un clima con un verano seco en términos de precipitación, mas, suave en términos de temperatura pues el mes más cálido no supera los 22°C.

En proporción con la unidad macro climática en la cual está inserta la RNRC, se tienen lluvias invernales concentradas y temperaturas altas en los meses de verano, ambas variables con un comportamiento inverso. La posición de la Reserva la dispone en la zona de barlovento con respecto a la cordillera principal, aumentando los montos de precipitación con respecto a la Depresión de Santiago y con eventos de precipitación menores en verano, los cuales en términos de cantidad de agua e infiltración no tienen mucha significancia.

Los datos a disposición, con los cuales se elaboró el climograma de la Figura 1 son los promedios mensuales de temperatura máxima y mínima entre los años 1985 y 2009, además de los montos de precipitación de cada mes entre los años 1993 y 2018. En dichos términos el mes más caluroso fue febrero de 1997 34,1 y el más frío agosto de 1995 -1,1°C. Los datos analizados están medidos en el exutorio de la cuenca, siendo más representativos para el Llano de Pirque que para la Reserva, en la cual representa únicamente las zonas bajas. De esta manera la cantidad de días con grados bajo cero son escasos (a los 850msnm), mas esta cantidad de días aumenta con la altitud, dando paso a fenómenos como la crioclastia (Lira, 1986) que se vuelven relevantes dada la hipsometría de la cuenca, con un notable efecto en las dinámicas geomorfológicas e hídricas.

³ Según la lista de especies según Categoría de Conservación del Ministerio del Medio Ambiente, actualizado a Diciembre de 2018.

Figura 1 Climograma Reserva Nacional Río Clarillo años 1985-2009



Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por CONAF.

1.3.4 Geomorfología

La posición geomorfológica de la Reserva Nacional Río Clarillo corresponde a un cajón precordillerano formado en el Batolito Andino contiguo al Llano Central de la Depresión de Santiago. El área de estudio abarca desde el nacimiento de los cursos de agua del “Cajón del Horno” y del “Cajón de Los Cipreses”, hasta la zona apical del cono de deyección formado por el Río Clarillo hacia los llanos de Pirque o la localidad de El Principal.

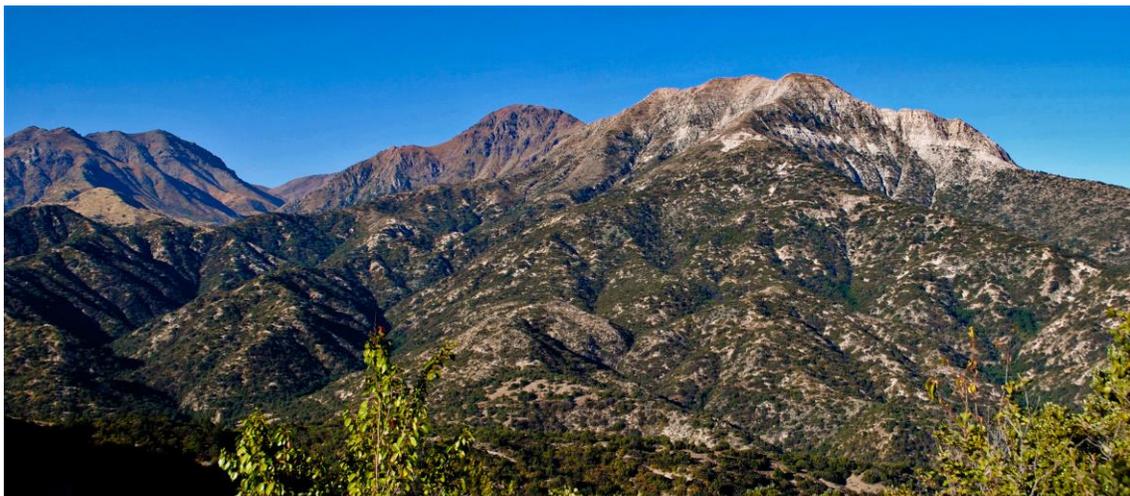
Los cajones principales (Horno y Cipreses) desde su nacimiento, escurren de sur a norte, casi paralelamente a lo largo de unos 8 kilómetros sobre 2 gargantas con paredes sumamente abruptas, para juntarse en las cercanías del lugar conocido como “Puerta de los Hornos”. Una vez “formado” el río Clarillo este paulatinamente va cambiando su dirección, pasando de la dirección sur-norte a este-oeste presente en la entrada de la RNRC.

El paisaje está dominado por un encajonamiento distribuido en toda el área de estudio, exceptuando el escaso aterrazamiento del río Clarillo y pequeños abanicos aluviales que describen las pendientes más suaves. Dicho encajonamiento ocurre tanto en las zonas dominadas por el canal principal, como en las microcuencas tributarias como se puede observar en la Fotografía 1, la cual evidencia el grado de disección en la unidad granítica coronada por el Cerro Blanco.

Morfoclimáticamente en el área de estudio existen principalmente 2 dominios. El dominio Templado presente en la zona boscosa, que se amplía a semi-árido y templado húmedo según sea una vertiente exposición norte o sur, respectivamente. Por sobre la zona boscosa el dominio es Periglaciario, con temperaturas bajas y montos de precipitación más altos por la gradiente altitudinal en donde el crioclastismo aporta gran cantidad de material para la formación de conos coluviales y corredores de derrubios.

En general, el área de estudio presenta características de inestabilidad provocadas por las altas pendientes y el grado de meteorización del sustrato, dejando como resultado suelos delgados, deslizamientos de material maicilloso y sistemas de cárcavas activos (Lira, 1986). El grado de alteración y meteorización se considera medio en el sentido que la roca está disgregada en forma de arenas (no arcilla), lo que por un lado genera buenas condiciones de infiltración, por otro, materiales muy fáciles de ser transportados aluvial y coluvialmente. Lo anterior aplica en aquellos suelos desnudos, de orientación norte o aquellos muy intervenidos. Otros elementos de inestabilidad presentes en el área de estudio son aquellos inducidos por la actividad antrópica, sobre todo en los caminos carreteros, los que comúnmente están disectados longitudinalmente por *rills* e incluso sistemas de cárcavas (*gullies*).

Fotografía 1 Denudación y encajonamiento en vertientes cristalinas



Fuente: Capturada en terreno.

1.3.5 Geología

La entrada del área de estudio, la Reserva Nacional Río Clarillo, está marcada por el paso del Llano de Pirque (sureste del llano de Santiago) hacia los contrafuertes andinos, dicho panorama está dominado por la acción de una gran falla, siendo los llanos, zonas de relleno de los hundimientos generados. Además una dislocación transversal de la falla explica el levantamiento del Cordón Los Ratones, el que separa los llanos de Pirque con los de Buin y Paine (Brüggen, 1951).

Los sistemas montañosos de la zona baja del área de estudio corresponden a rocas intrusivas nombradas como Granodiorita La Obra, del mioceno inferior entre 22 y 19 Ma. (Sellés & Gana, 2001), parte de la Unidad I, así catalogada a aquellos intrusivos que tienen presencia hasta la Formación Farellones (Thiele, 1980). Análisis realizados en La Obra por Oyarzún (1971) en (Urquidi, 1977) indican un 30% de cuarzo, 15,6% de feldespato potásico, 44,4% de plagioclasa, 6,7% de biotita, 2,8% de anfíbola y 0,7% de minerales accesorios y opacos. Con un grado de fracturamiento moderado y de alteración medio a leve (EMG Consultores S.A., 2013), en forma de grano fino y medio (Urquidi, 1977) indican una buena permeabilidad en la unidad intrusiva⁴. Dichas rocas son descritas de color gris claro a muy claro.

En el área de estudio, contigua a las formaciones intrusivas se encuentra la Formación Farellones, la cual está definida como “una potente unidad constituida por sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, riolíticas y basálticas, y rocas piroclásticas alternadas” (Thiele, 1980) de edad miocena media a superior establecidas por dataciones K-Ar (Rivano, Godoy, Vergara, & Villarroel, 1990). La falta de estudios geológicos a una escala adecuada y en el área de estudio imposibilita ahondar en detalle en esta formación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar componentes hidrológicos⁵ y su grado de influencia en la temporalidad del escurrimiento superficial en microcuencas de la Reserva Nacional Río Clarillo.

1.4.2 Objetivos específicos

- I) Generar y recolectar información hidrológica, topográfica y sobre regímenes de escurrimiento superficial en microcuencas de la Reserva Nacional Río Clarillo.
- II) Calcular componentes hidrológicos en microcuencas de la Reserva Nacional Río Clarillo.
- III) Relacionar componentes hidrológicos con el escurrimiento superficial de microcuencas de la Reserva Nacional Río Clarillo.

CAPITULO 2: MARCO CONCEPTUAL.

2.1 Escorrentía y flujo hídrico.

En el contexto del ciclo hidrológico, una vez iniciada la precipitación, ocurren los procesos de almacenamiento, entre otros el almacenamiento de humedad del suelo o almacenamiento superficial también conocido como encharcamiento. Ven Te Chow *et al* (1994) determina

⁴ La permeabilidad depende, entre otras cosas, del fracturamiento y el grado de alteración la unidad litológica. Así, una unidad sin fracturamiento y ni alteración será impermeable a la lluvia (a excepción de aquellas rocas genéticamente permeables), a medida que ocurre el diaclasamiento y el material se disgrega, la unidad se vuelve permeable hasta que una mayor alteración la vuelve a impermeabilizar en tanto el contenido arcilloso resultante funciona como sellante (basado en una comunicación personal de F. Ferrando, 8/11/2018)

⁵ Definidos posteriormente como los principales parámetros morfométricos y elementos indispensables para entender las dinámicas de infiltración.

que los tipos de almacenamiento son: i) detención y ii) retención, la diferencia entre ambos radica en la permanencia del agua el medio, siendo el primero donde el almacenamiento es efímero pues su contenido se traslada mientras su capacidad se colma y el segundo implica que el contenido se pierde por evaporación. En la detención cuando los almacenamientos se trasladan, es el momento donde se genera el movimiento y consecuentemente el flujo o escorrentía, que puede ser superficial, subsuperficial y subterráneo. La Tabla 1 explica los tipos de flujos. En tanto al régimen de escorrentía superficial, Monsalve (2002) los clasifica en perennes, intermitentes y efímeros. La diferencia entre intermitente y efímero es que el primero posee flujo superficial en la estación húmeda mientras que en el período estival el descenso del nivel freático “seca” el curso de agua, por otro lado, el curso efímero únicamente presenta escurrimiento producto la escorrentía superficial, durante y poco después del evento de precipitación con una capacidad de infiltración muy baja (Ven Te Chow *et al*, 1994).

Tabla 1 Tipos de flujos.

Tipo de flujo	Explicación
Superficial	<p>Hortoniano: ocurre una vez que la tasa de precipitación supera la tasa de infiltración del suelo. Presente en ambientes cuyas condiciones tienden a la impermeabilidad.</p> <p>De saturación: ocurre en la medida que el flujo subsuperficial satura el suelo y genera escorrentía superficial cuando cae agua en dicho suelo. Relacionado con el concepto de “áreas de fuentes variables” que son las áreas que aportan directamente a una corriente, las que dependen de la saturación de los flujos subsuperficiales (si está saturado aporta).</p>
Subsuperficial	Flujo no saturado cercano a la superficie, una vez que es liberado del almacenamiento del suelo y cuya velocidad es despreciable. Puede aflorar a la superficie.
Subterráneo	Flujo saturado en los acuíferos.

Fuente: Elaboración propia en base a Ven Te Chow *et al* (1994)

La Tabla 1 está referida a los procesos relacionados a la precipitación misma y al poco tiempo luego que finaliza, no obstante, flujos superficiales perennes o permanentes operan todo el año en microcuencas estudiadas en esta memoria. El origen de dichos flujos es a partir de afloramiento de aguas subterráneas, sin embargo la operación de flujos subsuperficiales es importante debido a su relación con la infiltración.

Entonces para la existencia de un flujo superficial permanente, es necesario que se genere una reserva de agua (almacenamiento) mediante a la infiltración, la cual alimentará el flujo superficial de las microcuencas en la época estival mediante su afloramiento. El flujo de entrada a dichas reservas (y al flujo superficial mismo) corresponde al agua precipitada en

las lluvias, y se desarrolla mediante los flujos descritos anteriormente. La efectividad de la recarga de las reservas está supeditada a las características intrínsecas de cada microcuenca y al tipo de precipitación, por ello existen microcuencas con flujo superficial permanente y otras que no. Para acercarse al entendimiento de las características intrínsecas de las microcuencas, estas son descritas mediante un análisis de los componentes hidrológicos, considerados como los principales parámetros morfométricos y elementos indispensables como la pendiente, exposición y vegetación.

Se espera que el comportamiento de los componentes hidrológicos analizados esté relacionado con el tipo de escurrimiento, en el sentido que aquellas unidades hidroespaciales que posean un mayor desequilibrio en términos de erosividad y erodabilidad⁶ (consecuentemente tienen una menor capacidad de infiltración) tengan un caudal base menor o inexistente. Por otro lado, en aquellas microcuencas equilibradas en términos erosivos, se asume una mayor capacidad de infiltración y por lo tanto un caudal base mayor o presente en todo el año.

2.2 Infiltración.

Como se señaló anteriormente el origen de los flujos permanentes de agua de las microcuencas es subterráneo, el cual aflora en la superficie. A su vez, el agua subterránea tiene su origen en las precipitaciones, principalmente invernales, cuya agua se almacena y es entregada en algunos casos a lo largo de todo el año. Dicho almacenamiento ocurre mediante la infiltración, entendiendo a la infiltración como el paso de agua a través del suelo cuya dirección es igual a la de la fuerza de gravedad (Guitelman & Leiva, s/f). La vegetación, la pendiente y la exposición son factores trascendentales en la infiltración.

2.2.1 Vegetación.

La existencia de vegetación es importante a la hora de analizar el ciclo hidrológico ya que, en primera instancia, esta almacena el agua mediante la retención y detención. En cuanto a la retención ocurre con la intercepción en la medida que el agua se adhiere a la superficie de las plantas (la cual es bastante considerando el área de todas las hojas), posteriormente esa agua es evaporada. El agua adherida de cierta manera impermeabiliza y permite que las nuevas gotas que caen, escurran (de modo fustal en el caso de especies arbóreas) o formen nuevas gotas por colmatación, llamada agua de trascolación, que alcanza la superficie (Mateos & Schnabel, 1998). El escurrimiento fustal o cortical tiene una gran probabilidad de infiltrarse en el suelo gracias a la baja velocidad con la que llega a la superficie, que a su vez se favorece gracias al desarrollo radicular el cual implica un suelo, en cierta medida, aireado.

Experimentos realizados por Grésillon (1994) mediante simulaciones de lluvia han observado que un suelo cubierto de vegetación herbácea tiene una capacidad de infiltración 10 veces mayor sobre un suelo desnudo. En esta misma línea Meunier (1996), afirma que

⁶ Erosividad entendido como la habilidad potencial de los elementos externos para producir erosión y erodabilidad como las propiedades internas del suelo en resistencia a la erosión (Lira, 1986).

una cuenca provista de vegetación llega a tener menos de un quinto del caudal máximo que una cuenca sin vegetación, y posiciona a la vegetación como un factor fundamental en el control de crecidas, sobre todo en ambientes de montaña donde la delgadez de los suelos y la pedregosidad de los mismos es preponderante para el ciclo hidrológico⁷.

En el caso de los bosques nativos, las capas de materia orgánica y hojarasca son importantes a la hora de disminuir o frenar la velocidad de las gotas, sobre todo si son gotas generadas por colmatación, las cuales a pesar de tener menor velocidad, tienen mayor masa. Little & Lara (2010) afirma que las plantaciones forestales del centro-sur de Chile, provocan una merma en la calidad y cantidad de agua, situación diametralmente opuesta es la que ocurre mediante la restauración ecológica con vegetación nativa, ya que los flujos de verano o flujos base aumentan. Lo anterior si bien se enmarca en latitudes diferentes a las del área de estudio, por lo tanto a regímenes de precipitación y a cambios de uso de suelo distintos⁸, es importante para demostrar el rol que juega la vegetación nativa en los procesos hidrológicos.

2.2.2 Pendiente.

La pendiente es la inclinación del terreno con respecto a la horizontal, y se calcula mediante la tangente de la superficie. Hidrológicamente, en primera instancia, determina geoméricamente el encuentro entre la gota de agua y la superficie. La energía cinética que disipan los suelos depende del ángulo de enfrentamiento, absorbiendo la totalidad de la energía si se trata de un ángulo de 90°. En el caso de los terrenos con pendiente, el agua, naturalmente, fluye hacia cotas inferiores y consecuentemente el almacenamiento tenderá a producirse en esos lugares y dependerá del tipo de superficie y la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, la cantidad que se pueda infiltrar en el recorrido.

Cuando se producen los flujos, la velocidad y la aceleración de estos, es mayor en los terrenos con pendientes mayores, aunque depende de la concavidad o convexidad que éstos se concentren o dispersen respectivamente. Los flujos con mayor velocidad tienen una mayor probabilidad de erosionar los suelos, en forma de canalículos y *gullies* si se trata de flujos concentrados y en manto si son flujos laminares. En gran medida dichos flujos no están disponibles para la infiltración ya que al tener mayor energía, su movimiento se vuelve más efectivo y escurren superficialmente.

Otra característica importante derivada de la pendiente es que, al comparar una unidad hidroespacial de igual área calculada cartográficamente, es decir en el plano, pero de diferente pendiente, el área de captación o superficie real de ambas es distinta, siendo mayor

⁷ Es necesario mencionar que el experimento de Grésillon fue realizado en *Réal Collobrier*, cuenca ubicada a unos 10 kilómetros del Mediterráneo en Francia meridional. El área de estudio de Meunier es en la cuenca de *Draix*, en los Alpes franceses, a unos 90 kilómetros de la ciudad de *Nice* (costa del Mediterráneo). Además es provechoso mencionar que la cuenca desprovista de vegetación (*Laval*) del estudio de Meunier, tuvo un deslizamiento de tierra en 1999, el cual ha sido estudiado en diversos aspectos (Fressard, Olivier, Malet, Klotz, & Grandjean, 2009).

⁸ Principalmente al cambio de uso de suelo de bosque nativo por plantaciones forestales, afortunadamente la RNRC está exento de ello.

en el caso de la unidad con mayor pendiente⁹ ya que se trata de volúmenes distintos. El área de las unidades hidroespaciales tiene una relación directamente proporcional con la cantidad de agua que captan y la pendiente se relaciona con la producción de sedimentos de la misma (Gregory & Walling, 1973). De esta manera una mayor producción de agua y de sedimentos se vuelve algo indivisible en cuencas con pendientes altas.

La Tabla 2 indica los tipos de pendiente y sus respectivos umbrales geomorfológicos. Relacionando dicha información con los suelos, se puede afirmar que existe una relación inversa entre la pendiente y el espesor de los suelos, debido a los procesos gravitatorios, de arrastre y transporte que operan en pendientes mayores. A su vez al recoger la definición de suelos frágiles de la ley de fomento forestal¹⁰ indica que éstos son “*Aquellos susceptibles de sufrir erosión severa, debido a factores limitantes intrínsecos, tales como pendiente, textura, estructura, profundidad, drenaje, pedregosidad u otros (...)*”. De esta manera solo considerando la pendiente, los suelos de más de 10,1 grados, se consideran frágiles debido al umbral geomorfológico al que se adscriben. Lo anterior únicamente al referirse a la pendiente, ya que pueden haber otras variables, como la textura, que en el caso de un suelo de 5° de pendiente con una textura arenosa, igualmente se considera frágil.

Tabla 2 Pendientes y umbrales geomorfológicos

Pendiente (°)	Pendiente (%)	Tipo	Umbral geomorfológico
0-2	0 – 3,49	Horizontal	Erosión nula o leve.
2,1 - 5	3,49 – 8,75	Suave	Erosión débil, difusa, inicio de regueros y soliflucción fría.
5,1 - 10	8,75 – 17,63	Moderada	Erosión moderada a fuerte, e inicio de erosión lineal.
10,1 - 20	17,63 – 36,4	Fuerte	Erosión intensa, cárcavas incipientes.
20,1 – 30	36,4 – 57,74	Moderadamente escarpada	Cárcavas frecuentes, movimientos en masa y reptación.
30,1 - 45	57,74 - 100	Muy escarpada	Coluviamiento y soliflucción intensa.
>45	> 100	Acantilada	Desprendimientos, derrumbes y corredores de derrubios.

Fuente: Araya-Vergara & Börgel (1972), Young (1977) y Ferrando (1992)

⁹ Demostrable elementalmente mediante un triángulo rectángulo cualquiera. La longitud de la hipotenusa es mayor a la del cateto adyacente, siendo esta última medida la que se obtiene cartográficamente.

¹⁰ Ley 19.561 modifica el decreto de Ley N°701, de 1974, sobre fomento forestal. Publicada el 16 de mayo de 1998 y promulgada el 9 de abril de 1998.

2.2.3 Exposición.

La exposición u orientación es el rumbo de la pendiente. Se mide en grados y se clasifica según los puntos cardinales. De la orientación dependen las horas de sol diarias que llegan a una determinada superficie y el ángulo de incidencia de la radiación solar, el que determina cuánta energía se absorbe y cuánta se refleja.

Las diferencias entre los lugares de exposición norte y sur son notables, entre la más destacada es la vegetación. Las tasas de evapotranspiración en las laderas de orientación norte son mayores que en las de orientación sur, de esta manera, en el área de estudio las laderas sur poseen vegetación boscosa e hidrófila en contraposición a las laderas norte donde se presentan matorrales xerofíticos.

La meteorización por la acción de la radiación opera con más intensidad en las laderas norte o de solana, principalmente por el ángulo de incidencia de la radiación solar y la mayor insolación¹¹. En el caso de la precipitación, las comunes precipitaciones de la zona central derivadas de sistemas de baja presión (el conocido viento norte) genera que las gotas caigan inclinadas por acción del viento, dicha dirección que adoptan provoca impactos más cercanos a los 90° grados en las laderas norte, de esta manera afectan los suelos por acción de la salpicadura, energía que se absorbe casi en su totalidad, causando compactación o disgregación y por ende suelos de texturas arenosas y con afloramientos de roca.

2.3 Parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos describen de una manera cuantitativa las características de las cuencas y sus redes de drenaje. En primera instancia, la cuantificación de dichas características en coeficientes e índices funciona y se interpreta de manera descriptiva según sea la característica analizada, empero, es importante siempre contextualizar estos datos a lo que representan y a los procesos que construyen. Tomando en consideración otras características, los parámetros morfométricos se convierten en una herramienta útil para conocer el estado de equilibrio morfodinámico de las microcuencas (Ferrando, 1994). Por ejemplo un índice de compacidad de Gravelius (ver Ecuación 1) cercano a la unidad nos indica en primera instancia, una forma compacta de la cuenca, sin embargo, está relacionado en ciertos ambientes con la ocurrencia de flujos de detritos ante eventos de precipitación extrema (Meza, Rodríguez, Corvacho, & Tapia, 2014), mas, al analizar dicho índice con la pendiente promedio del cauce y de la cuenca, es posible que la ocurrencia de flujos de detritos no exista (en el caso de pendientes bajas) o bien se reafirme lo anterior y sea muy recurrente (con pendientes altas). Aun el análisis se vuelve más provechoso al incorporar otros parámetros como la densidad de drenaje.

¹¹ Consecuencia de ello es la menor cobertura vegetal, lo que expone a la superficie aún más a la meteorización y a su vez, merma la cantidad de agua interceptada en la precipitación.

Los parámetros morfométricos a calcular y analizar son aquellos recomendados en los estudios para obras viales (Aristizábal, Botero, & Vélez, 2012), los utilizados para evaluar el equilibrio morfodinámico de cuencas enfocado en flujos de barro, avenidas u otro tipo de amenazas (Ferrando, 1994; Meza *et al.*, 2014; González, 2004) divididos en parámetros generales, de forma, de relieve y sobre la red de drenaje (Ibañez, Moreno, & Gisbert, s/f). La selección de los parámetros se realizó en función que al ser utilizados para evaluar ciertas amenazas, implica que tienen una expresión en los procesos hidrológicos y que trascienden la calidad de simples descriptores.

2.3.1 Parámetros generales

Son los parámetros geométricos básicos que son utilizados para el cálculo de los de forma, aportan una noción general de las características de la cuenca.

2.3.1.1 Área de la cuenca

Corresponde al área delimitada por la divisoria de aguas, más específicamente la divisoria topográfica e indica un área en donde el agua precipitada, si se trata de un suelo impermeable, se dirige a un mismo punto o exutorio.

2.3.1.2 Longitudes importantes

Longitud de diversas variables, tales como el perímetro de la cuenca (largo de la divisoria topográfica), longitud del cauce principal, de la red de drenaje, ancho y largo de la cuenca entre otros. Dichas longitudes al analizarlas en conjunto con el área permiten inferir procesos hidrológicos.

2.3.2 Parámetros de forma

2.3.2.1 Coeficiente de compacidad de Gravelius

Este coeficiente compara el perímetro de una cuenca, con el perímetro de un círculo de igual área. Se compara con un círculo debido a que es la forma más compacta. Tiene un valor superior a la unidad y aumenta con la irregularidad.

Ecuación 1 Coeficiente de compacidad de Gravelius

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

En donde Cg: Coeficiente de compacidad de Gravelius

P: Perímetro (km)

A: Área (km²)

Los valores siempre serán mayores a 1 (excepto si la cuenca es perfectamente circular), de esta manera mientras más cercano a 1 sea, la curva del hidrograma será más abrupta debido a la acumulación de los flujos en menor tiempo. La Tabla 3 muestra la interpretación de la

forma y la Figura 2 comprueba que una cuenca alargada posee un valor mayor al de una cuenca que tiende a la circularidad.

Tabla 3 Clases de compacidad

Coefficiente de compacidad	Clases de compacidad
1 - 1,25	Redonda a oval redonda
1,25 – 1,5	De oval redonda a oval oblonga
1,5 – 1,75	De oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: (Instituto Nacional de Ecología, 2004)

2.3.2.2 Factor de forma

Consiste en el cociente entre el área de una cuenca y el largo de *talweg* principal al cuadrado (ver Ecuación 2). Ayuda a cuantificar la geometría de las cuencas, así obteniendo valores menores a la unidad indica que la cuenca tiene un carácter alargado (Aristizábal *et al.*, 2012) por lo tanto, mientras más cercano a 0, más elongada es la forma de la cuenca (ver Figura 2, en donde la cuenca superior, de forma alargada, tiene un factor de 0.35 mientras que la inferior, relativamente circular, su factor es de 0.82).

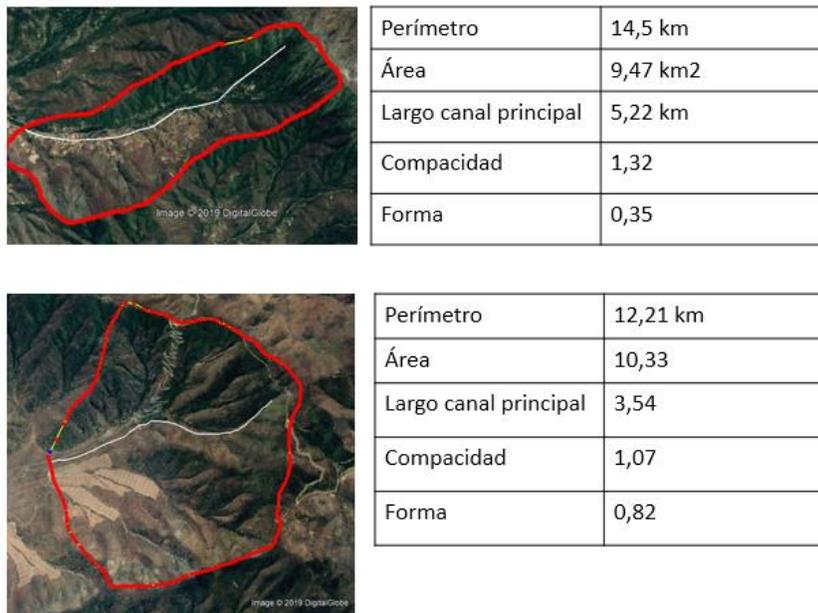
Ecuación 2 Factor de Forma

$$Ff = \frac{A}{L^2}$$

En donde A: área de la cuenca (km²)

L= longitud del *talweg* principal (km)

Figura 2 Parámetros de forma



Compacidad se refiere a la compacidad de Gravelius y Forma al Factor de Forma.

En rojo la divisoria de aguas y en blanco el canal principal.

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes del *software* Google Earth.

2.3.3 Parámetros de Relieve

2.3.3.1 Pendiente media de la cuenca

La pendiente media de la cuenca es importante para entender la respuesta hidrológica de las cuencas, entrega una visión general de la dinámica del agua y de los sedimentos. Una cuenca con mayor pendiente implica que el agua escurre más rápido y con mayor cantidad de sedimentos (Gregory & Walling, 1973), ya sea en escurrimiento en manto o concentrado.

2.3.3.2 Pendiente media del cauce

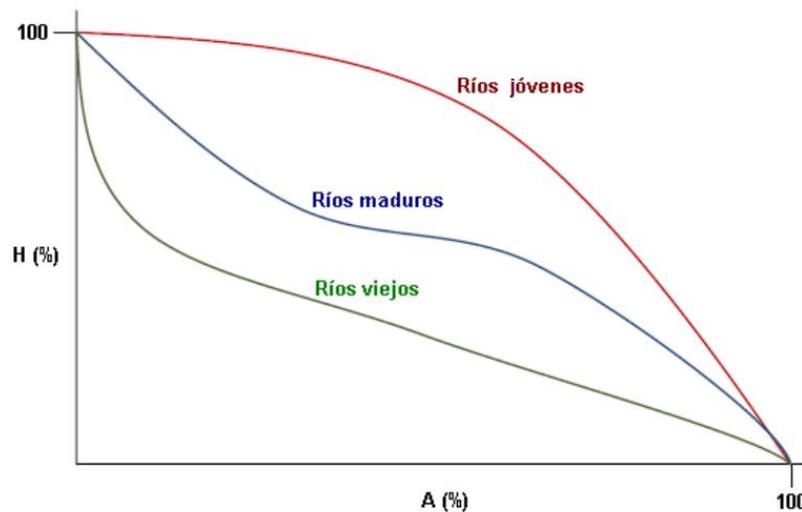
La pendiente media del cauce es la relación entre el desnivel altitudinal y el largo del canal principal (Ibañez *et al.*, s/f). El desnivel altitudinal es la diferencia de altitud entre el origen del canal con respecto a su exutorio. Da cuenta de la velocidad media y de la capacidad erosiva y de arrastre del canal principal, a diferencia de la pendiente media de la cuenca, que indica la situación general de las laderas.

2.3.3.3 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es la representación gráfica del relieve de una hoya, que traza la relación entre las elevaciones con sus respectivas superficies en una cuenca (Meza *et al.*, 2014). Respecto a la forma de la curva en cuanto a su convexidad o concavidad se clasifican

las unidades hidroespaciales según su madurez o desarrollo de la actividad hidrológica, como por lo general es aplicado a grandes ríos (ver Figura 3), se habla de ríos viejos o jóvenes. En el caso del área de estudio indica más bien un balance erosivo de las unidades, siendo la curva de ríos jóvenes una etapa de desequilibrio erosivo, la de ríos maduros el equilibrio erosivo y la de ríos viejos una unidad erosionada (Meza, Rodríguez, Corvacho, & Tapia, 2014). También depende de la curva la cantidad de energía relativa que adquieren los flujos de agua y la configuración de los volúmenes o distribución de masa de las microcuencas. Además entrega indicios sobre la representatividad del valor de pendiente promedio, donde se supone que mientras más equilibrada la microcuenca más representativo será la pendiente media.

Figura 3 Tipos de curvas hipsométricas



Fuente: (Ibañez, Moreno, & Gisbert, Morfología de cuencas hidrográficas, s/f)

2.3.4 Red de drenaje

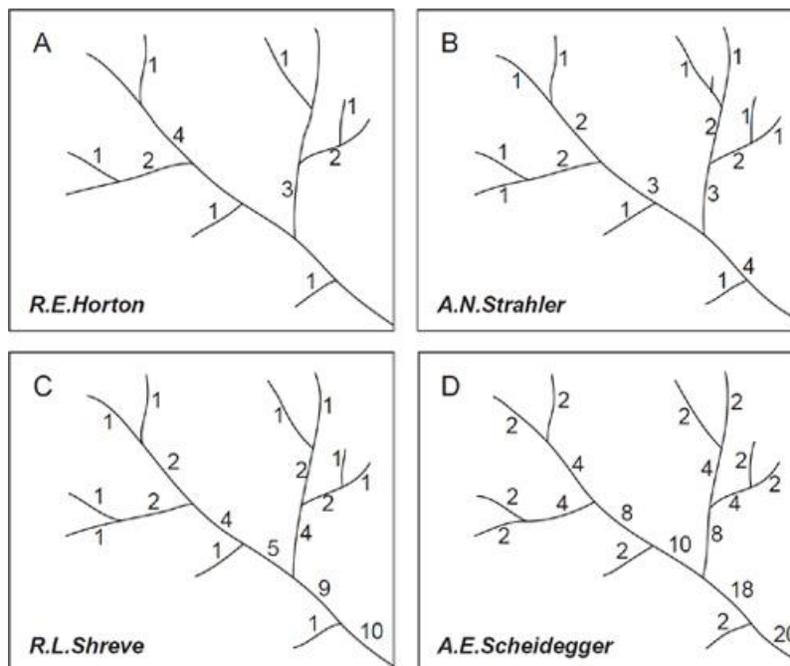
2.3.4.1 Forma y orden.

El patrón de red de drenaje corresponde a la forma de los canales mapeados a través de la fotointerpretación de los *talwegs*. Las redes de drenaje se clasifican de acuerdo a su forma y a la jerarquización o su grado de desarrollo. Dentro de la clasificación morfológica existen redes de drenaje dendríticas, rectangulares, radiales, centrípetas, paralelas (Gregory & Walling, 1973), entre otras, las que dependen principalmente de la geología, clima y antigüedad de la cuenca.

La jerarquización u orden se utiliza para cuantificar el desarrollo de una red de drenaje en cuanto a los canales tributarios. Existen 4 métodos para ordenar los canales, en primera instancia los de Horton y Strahler (a y b respectivamente en la Figura 4), en donde solamente la confluencia de dos segmentos de igual jerarquía permite aumentar la jerarquía del dren resultante. Ambas clasificaciones difieren entre sí en la segmentación de los drenes y su principal deficiencia radica en que desprecia cualquier canal tributario de menor jerarquía.

Las otras dos jerarquizaciones fueron propuestas por Shreve y Scheidegger (c y d respectivamente en la Figura 4), las cuales superan la limitación del orden de Horton y Strahler ya que todos los tributarios, aunque sean de menor orden, aumentan la jerarquía. La diferencia entre los métodos de Shreve y Scheidegger es que el primero numera los drenes elementales con el número 1 y el segundo, por razones algebraicas y por considerar el escurrimiento en manto, con el número 2 (Gregory & Walling, 1973). La jerarquización más adecuada al presente estudio, debido a la escala de trabajo que implican las microcuencas, es la jerarquización de Shreve.

Figura 4 Métodos de jerarquización.



Fuente: (Gregory & Walling, 1973)

2.3.4.2 Densidad de drenaje D_d .

En primera instancia la densidad de drenaje relaciona la longitud total de los *talwegs* con el área de una cuenca hidrográfica (ver Ecuación 3). Describe el desarrollo de la red de drenaje, es decir, qué tan presentes son los drenes en una unidad hidroespacial. Luego se puede indagar acerca de la efectividad de la red de drenaje, en base a la longitud de un *talweg* según el área que drena¹². Controla la velocidad de escurrimiento, siendo éste directamente proporcional a la D_d por lo tanto una densidad de drenaje alta indica una respuesta hidrológica rápida por parte de las unidades hidroespaciales. A una mayor velocidad, la capacidad erosiva aumenta, por lo tanto, valores de D_d altos, se relaciona a condiciones relativamente altas de erosión o impermeabilidad. Y por último, es una síntesis de las características litológicas,

¹² También existe el Coeficiente de Mantenimiento que representa el área disponible para alimentar cada canal. Es el inverso de la D_d (Ferrando, 1994).

climáticas y de cobertura vegetal de una cuenca (Instituto Nacional de Ecología, 2004; González, 2004; Ferrando, 1994).

Ecuación 3 Densidad de drenaje

$$D_d = \frac{\sum L}{A}$$

En donde: L= longitud de los drenes en km; y A= área de la cuenca en km²

2.4 Tiempo de concentración (Tc)

El tiempo de concentración (Tc) clásicamente es entendido como el tiempo que tarda en llegar al exutorio o desagüe la gota de agua que cae en el punto más alejado al exutorio de la cuenca hidrográfica bajo una lluvia uniforme (Ibañez, Moreno, & Gisbert, s/f). Lo anterior es aplicable en ambientes donde opera el flujo superficial hortoniano o en unidades hidroespaciales con suelos más bien impermeables. Otra forma de entender el tiempo de concentración es como tiempo de respuesta o equilibrio, en donde se define como el tiempo necesario para que todo el sistema contribuya efectivamente en el caudal del exutorio (Vélez & Botero, 2011), definición mucho más completa ya que es aplicable en lugares donde la infiltración y operación de los flujos subsuperficiales es importante.

Pese a las diferentes definiciones y formas de entender el concepto, ambos apuntan al mismo resultado hidrológico, que corresponde al tiempo en que la curva del hidrograma llega a su punto más alto, por lo tanto el caudal es el máximo y luego empieza a decaer si es que la lluvia ha disminuido o terminado.

Cuando existe una ausencia de datos hidrológicos de buena calidad y resolución (datos de precipitación y de caudal cada 5 minutos) el Tc se calcula mediante ecuaciones empíricas. Dichas ecuaciones han sido construidas mediante ensayos de laboratorio o generalizaciones extraídas de cuencas experimentales, por lo tanto se deben seleccionar ecuaciones que responden a condiciones afines a las del área de estudio a aplicar y además, se debe evaluar cualitativamente el resultado. Es recomendable utilizar al menos cinco ecuaciones diferentes y así eliminar los valores extremos (Vélez & Botero, 2011; Aristizábal *et al.*, 2012; Ibañez *et al.*, s/f; Dirección de Vialidad, 2018). A continuación se enumeran las ecuaciones utilizadas cuya fuente corresponde a los autores citados anteriormente referidos al Tc.

Ecuación 4 California Culverts Practice (1942)

$$t_c(\text{min}) = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Ecuación 5 Giandotti

$$t_c(\text{horas}) = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{25,3 \sqrt{S} \cdot L}$$

Ecuación 6 Normas españolas

$$t_c(\text{min}) = 18 \frac{L^{0,76}}{S^{0,19}}$$

Ecuación 7 Bransby-Williams

$$t_c(\text{min}) = 14,6 \cdot A^{-0,1} \cdot S^{-0,2}$$

Ecuación 8 Pilgrim y McDermott

$$t_c(\text{horas}) = 0,76 \cdot A^{0,38}$$

Ecuación 9 Passini

$$t_c(\text{horas}) = \frac{[0,108 \cdot (A \cdot L)^{1/3}]}{S^{0,5}}$$

En donde: t_c = tiempo de concentración; L = Longitud del cauce principal en km; H = diferencia entre las cotas extremas de la cuenca; A = área de la cuenca en km²; y S = pendiente del cauce principal (m/m). Válidos para las ecuaciones del tiempo de concentración.

El Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas utiliza las ecuaciones California Culverts Practice (1942), Giandotti y Normas españolas, refiriéndose que la primera es para cuencas de montaña y la segunda para cuencas pequeñas con pendiente, a su vez, la tercera, Ibáñez *et al.* (s/f) indica que está calculada para climas mediterráneos, es decir, similar al área de estudio. La ecuación Bransby-Williams se recomienda en cuencas no mayores a 75 km² y la de Pilgrim y McDermott no debe usarse en cuencas de más de 250 km² (Vélez & Botero, 2011).

CAPÍTULO 3 MARCO METODOLÓGICO.

Metodológicamente esta memoria es de carácter mixto, en el sentido que se utilizan datos cuantitativos, no obstante la interpretación y uso de aquellos números se realiza desde lo cualitativo. En base a lo anterior radica el hecho que no se utilice un modelo numérico que involucre los distintos componentes para llegar a un resultado, ya que intentar aunar los componentes hacia un único resultado, entregaría conclusiones irreales debido al nivel de abstracción, mientras que cada componente por sí solo no da abasto para explicar fenómeno alguno.

3.1 De la recolección y generación de información hidrológica

Para abordar el objetivo de: Generar y recolectar la información hidrológica, topográfica y sobre regímenes de escurrimiento en microcuencas de la Reserva Nacional Río Clarillo, metodológicamente se realizó mediante 2 formas, en primera instancia, el trabajo de gabinete, el cual consistió en agotar las diversas fuentes de información en línea y en formato físico

para obtener el material necesario y por otro lado está el trabajo en terreno, el cual fue indispensable para obtener observaciones certeras. En un punto medio entre las anteriores, la solicitud de información a Conaf (ver “Etapas de levantamiento de información” de la Tabla 4). La información entregada por la gente de la RNRC, consiste en registros de la estación meteorológica, con la que se elaboró el climograma y datos de caudales. Dichos datos de caudales (Tabla 7) corresponden a mediciones realizadas por el personal de la RNRC en períodos de verano, los que poseen una gran cantidad de vacíos y el método utilizado es, en cierto modo, rudimentario generando un grado de precisión cuestionable, no obstante lo anterior, las series de datos tienen un patrón de comportamiento que permitió el aprovechamiento de los datos (con conocimiento de sus limitantes) de forma más bien cualitativa.

La información base necesaria consistió en un modelo de elevación digital, curvas de nivel, mapas de sombreado (*hillshade*), pendientes, exposición e imagen satelital de alta resolución, con las cuales es posible realizar la delimitación de microcuencas. Como se indica en el esquema metodológico (Tabla 4) las curvas de nivel, *hillshade*, mapa de pendiente y orientación, son derivados del Modelo de Elevación Digital, el cual es la versión corregida de 30 metros SRTM¹³. La imagen satelital de alta resolución corresponde a *ESRI Imagery*, obtenida mediante el *software* SASPlanet, el que permite descargar imágenes satelitales y mapas temáticos de distintos proveedores de mapas (*ESRI, Google, Nokia, Bing, Yahoo*, entre otros).

3.1.1 Delimitación de microcuencas

En base a la imagen satelital, modelo digital de terreno, curvas de nivel y *hillshade*, se realizó la delimitación de las microcuencas. Si bien, tan solo con curvas de nivel se puede delimitar unidades hidroespaciales, para la escala y el nivel de detalle requerido es necesario utilizar el *hillshade*, el cual entrega información acerca de los volúmenes del terreno y en cierta medida de la orientación, y también una imagen satelital de alta resolución la que permite dibujar la divisoria con mayor exactitud. Además la delimitación del área de estudio, lo que se consideró como la RNRC, se realizó atendiendo la divisoria topográfica de la microcuenca “Los Almendros” como la microcuenca de menor altitud, incluyendo toda el área aportante al río Clarillo aguas arriba, lo que en términos prácticos es la entrada a las instalaciones de la RNRC y el paso del llano central a los contrafuertes andinos. Esta delimitación no necesariamente coincide con los deslindes oficiales mencionados en el DS N°19¹⁴, entre otros

¹³ *Shuttle Radar Topography Mission*, DEM realizado mediante un sensor radar a bordo del transbordador espacial *Endeavour*, en su misión de febrero del año 2000. En la versión del DEM utilizada, la 3.0, se eliminaron los vacíos complementando con el DEM ASTERGDEM. Tiene una resolución espacial de 30x30 metros, así los productos derivados están subordinados a dicha resolución.

¹⁴ DS N°19 indica 10.185 ha, Lira (1986) calculó 13.185 ha sobre la ampliación 1:25.000 de la carta regular IGM 1:50.000 y el SIG de la delimitación de este trabajo arrojó 13.015 ha.

motivos, porque no incluye todas las instalaciones de la entrada a la Reserva, lo cual para efectos de esta memoria carece de importancia.

No se delimitaron todas las microcuencas del área de estudio, no obstante con el fin de representar la diversidad de unidades hidroespaciales se consideraron desde la zona baja hasta la alta, de diversos tamaños cuyo criterio principal de selección fue el de un área drenada por un dren en común, así excluyendo ciertas laderas de flujos difusos, que su delimitación debe realizarse en otra escala de análisis y detalle. Con la selección se buscó abarcar todo el área de estudio no obstante amplias zonas quedaron fuera (ver Mapa 2), una de ellas es la zona media y baja del “Cajón del Horno” cuya geomorfología les entrega un carácter más de laderas que de microcuencas. A pesar de la ausencia de microcuencas delimitadas en varias zonas, las eventuales microcuencas no consideradas, en todos los casos tienen otras microcuencas homologables, así las microcuencas 15, 16, 21 y 22 perfectamente representan a las zonas sin microcuencas de ambos cajones; aguas abajo, la microcuenca 5d representa de buena manera a las unidades hidroespaciales no consideradas ubicadas entre 4 y 5d, y entre 6 y 7.

Una vez delimitadas las unidades hidroespaciales delineando los puntos más altos del terreno (la divisoria topográfica) se dibujan líneas que unen los puntos más deprimidos del terreno que corresponden a los canales por donde se concentran los flujos de agua. Canales que se clasificaron según el número de Shreve simbolizado en la Figura 4, parte de los parámetros relacionados a la red de drenaje.

3.2 Del cálculo de los componentes hidrológicos.

El cálculo de los componentes hidrológicos es parte del segundo objetivo. Corresponde a todos los cálculos, procesamiento y derivados de la información base recabada en el objetivo número uno. Ver sección media de la Tabla 4.

3.2.1 Cálculo de los parámetros morfométricos

Una vez delimitadas las microcuencas, se calcula en el Sistema de Información Geográfica los componentes de las ecuaciones de los distintos parámetros tales como área, perímetro, cota máxima y mínima, cota máxima y mínima del canal principal, largo del cauce principal, longitud de los canales, entre otras. Una vez presentes en la tabla de atributos, ésta se exporta para trabajar con la información en una hoja de cálculo del *software Microsoft Excel*, de esta manera mediante operaciones entre las columnas, se obtiene el desnivel, desnivel del cauce principal, entre otras.

En general los parámetros se calcularon en *Excel* según las ecuaciones mencionadas en el apartado del Marco Conceptual. La selección de los parámetros y las ecuaciones se hizo de acuerdo a los parámetros más aceptados siempre y cuando se adecúen a la escala de trabajo¹⁵.

¹⁵ Tal como se muestra en el apartado del Marco Conceptual, para jerarquizar la red de drenaje existen 4 métodos, el utilizado es el que se adapta al área de estudio. Para medir la forma existe una variedad de

En cuanto a las curvas hipsométricas, estas se realizaron mediante una clasificación de las altitudes en el DEM cada 50 metros, así el área de estudio quedó dividida en rangos de altitud. Dicha información se extrae para cada una de las unidades hidroespaciales resultando una tabla con la cantidad de píxeles por rango de altitud en cada microcuenca, la cantidad de píxeles se transforma a una unidad de superficie (cada píxel cubre una superficie de 900m²) y se calcula el porcentaje que representa en la superficie total de cada microcuenca. Finalmente en *Excel* se calculan los porcentajes de superficie acumulada, y se relativizan los valores de la altura (altitud mínima 0% y altitud máxima 100%), valores los cuales son graficados en el eje de las abscisas y ordenadas respectivamente.

3.2.2 Pendiente y exposición

Para los mapas de pendiente y de exposición, derivados del DEM, en primera instancia se clasifican sus valores, el primero mediante los tipos de pendientes y umbrales geomorfológicos de la Tabla 2 y el segundo según los puntos cardinales. Luego se extraen los datos de pendiente y exposición de cada microcuenca, así, con el total de superficie se calcula el porcentaje de superficie de cada tipo de pendiente y exposición, dando origen a las Tablas 9 y 11.

3.2.3 Cobertura vegetal

El cálculo de la cobertura vegetal de las unidades hidroespaciales se realizó mediante una clasificación supervisada sobre la base de una imagen satelital de alta resolución (*Esri imagery*), dicho método consistió en generar 2 tipos de firmas espectrales, suelo con vegetación y suelo desnudo. Para el suelo con vegetación han sido considerados desde densos bosques de fondo de quebrada hasta aislados matorrales en zonas de vegetación rala.

La utilización de dicha metodología genera automáticamente 3 sesgos que necesariamente deben ser abordados, i) considera solamente la vegetación leñosa y ciertos bofedales, obviando la vegetación herbácea y las praderas estacionales; ii) para detectar satelitalmente la vegetación lo más preciso sería generar firmas espectrales en base a bandas cuya longitud de onda describa especialmente la actividad fotosintética y solamente en base al color verde; y iii) en relación al anterior, en ciertos bosques densos se generan colores negros que se confunde con sombras de pendientes muy abruptas y en ese sentido la clasificación supervisada clasifica lugares con vegetación donde no la hay. De los tres sesgos mencionados el primero siempre debe ser considerado en el análisis como una limitante, no obstante el segundo, las imágenes satelitales disponibles que permiten analizar las longitudes de onda adecuadas carecen de una resolución espacial apropiada para la escala de análisis que se busca¹⁶, reconociendo solamente bosques que cubren áreas relativamente amplias. En tanto

parámetros, tales como el radio de circularidad, coeficiente de forma, índice de simetría, coeficiente de redondez, entre tantos otros, sin embargo la elección decantó en la Compacidad de Gravelius por ser el más aceptado y para complementar se agregó el Factor de Forma.

¹⁶ Por ejemplo, las imágenes Landsat con una resolución espacial de 30x30 metros, para discriminar de buena forma un tipo de superficie ésta debe ser mayor a 900m².

para el tercer sesgo, este tiene una reducida cobertura, y en los valores porcentuales presentados es totalmente despreciable.

3.3 Del análisis de los componentes y el cruce de información

Tal como lo indica la Tabla 4 en la “Etapa de análisis” se interpretaron, clasificaron y analizaron los componentes de las 35 microcuencas que originalmente fueron seleccionadas.

La clasificación de los parámetros se realizó mediante una interpretación y posterior asignación de categorías. Al momento de asignar categorías de alto, medio y bajo, se adaptó al descriptor (por ejemplo, en el Coeficiente de compacidad se consideran microcuencas compactas, medias e irregulares) y se utilizaron métodos para una correcta clasificación dependiendo del comportamiento de los datos. En la medida que el promedio es representativo se utilizó la desviación estándar para definir los rangos, mientras que para casos en donde los valores están más agrupados (siendo el promedio menos representativo) se utilizaron cuartiles, determinando los cortes mediante a los respectivos percentiles.

Luego de analizar la totalidad de microcuencas se inició el análisis en aquellas con información del tipo de escurrimiento, lo que se contrasta o cruza con los valores de los componentes hidrológicos. En primera instancia se analizan las 20 microcuencas con el dato del tipo de escurrimiento, para después enfocarse en el contraste entre 2 microcuencas, la 7 y 8, las que a pesar de ser muy parecidas en el papel, difieren en el régimen de escurrimiento. Posteriormente se analizan los componentes para las 3 microcuencas con información de caudal. Los contrastes de microcuencas son una forma de enfocar el análisis, de reducir los elementos presentes para indagar en el grado de influencia de los componentes hidrológicos en el tipo de escurrimiento.

3.4 Limitantes metodológicas.

La principal limitante metodológica de esta memoria es la falta de información. Tanto la información disponible, como la recabada en terreno. Entre la falta de información disponible se puede mencionar aquella relacionada a los caudales, información hidrometeorológica que serviría, entre otras cosas, para determinar la influencia de las aguas provenientes del derretimiento de las nieves. Información detallada de los caudales en las microcuencas¹⁷ serviría para estimar las tasas de escurrimiento e infiltración y en general tener un mayor conocimiento de la dinámica hidrológica del área de estudio. Entre la información que se refiere a terreno, en principio se seleccionaron 35 microcuencas para analizar, no obstante el acceso a ciertos lugares (las microcuencas de ambos cajones) para obtener la información necesaria es de alta complejidad en términos de logística y recursos, y es por ello que el análisis según el tipo de escurrimiento quedó relegado a la zona baja, restringiéndose a la zona boscosa de la cuenca.

¹⁷ Si bien se facilitó información sobre los caudales, sus limitantes han sido mencionadas.

Como consecuencia de la falta de información nace una limitante sobre la disparidad de la cantidad de microcuencas con flujo permanente e intermitente, 16 contra 4 específicamente; dicha disparidad entrega por un lado una gran diversidad y exceso de información para las microcuencas con flujo permanente mientras que ocurre lo opuesto con aquellas de flujo intermitente. Dicha limitante, en parte, se soluciona mediante la reducción de la escala de análisis en la última etapa de los resultados, mediante el contraste de las microcuencas 7 y 8 y el contraste de aquellas microcuencas con información de caudal.

Una limitante eminente es lo referido a los suelos, los que son sumamente relevantes en cuanto a la hidrología se refiere debido a que, junto a la vegetación, es la zona de contacto de la precipitación con el sistema de flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, es decir, el comportamiento del agua en los tres sistemas anteriores radica tanto en la existencia de suelo como en las características de éste. Levantamientos de información como el Estudio de Suelos de la Región Metropolitana del CIREN¹⁸ y un estudio de la relación de la morfogénesis y pedogénesis¹⁹ tratan suelos del Llano de Pirque hasta la zona apical del cono de deyección del río Clarillo. El traslape es una zona de menos de 10 hectáreas de un aterramiento del río, lo cual es desestimable para los objetivos, tomando en cuenta que dicha morfología tiene una escasa distribución en el área de estudio de esta memoria. La falta de información de suelos se aborda, mediante aquellos componentes que tienen relación con los procesos edáficos, entendiendo los suelos como sistemas de caja negra en donde se utilizan los factores pedogénéticos externos para entender los suelos, siendo esta una de las dos perspectivas en el estudio de los suelos, la segunda es analizarlos como un sistema de caja blanca, en donde la relevancia está en los procesos y transferencias internas en el suelo. Ambas perspectivas lejos de ser opuestas son de carácter complementario, la de caja negra ha sido desarrollada por el pedólogo suizo Hans de Jenny (1941), resumida en la célebre ecuación de los factores de formación del suelo (ver Ecuación 10).

Ecuación 10 Factores de Formación del Suelo

$$s = f (cl, o, r, p, t \dots)$$

En donde: s= suelo; cl= clima; o= organismos; r= topografía, relieve; p= material parental; t= tiempo

Entonces, se utilizan componentes como un análogo de la ecuación, en donde la presencia de suelo como algunas características de éste será resultado de: i) tipo de exposición, que determina ecosistemas xerofíticos o templados abordando el factor climático; ii) vegetación, aborda el factor de los organismos por medio del depósito de hojarasca y materia orgánica y

¹⁸ Actualización y homogeneización de los Estudios de suelos de la RM, realizada el año 1996. El área de estudio abarca el Estudio Agrológico del Proyecto Maipo del año 1981 realizado por la Comisión Nacional de Riego, escala 1:50.000

¹⁹ Relación entre morfogénesis y pedogénesis en la cuenca del río Clarillo, Región Metropolitana de Santiago. Llona, M; Araya-Vergara, J; Vera, V. Revista de Geografía Norte Grande, 37: 47-61 (2007).

la función de las raíces como atrapasuelo; y iii) pendiente que aborda el relieve y la topografía en donde a mayor pendiente se espera una capa más delgada de suelo; mientras que el material parental se caracteriza en el marco geológico el cual al tener datación, fija al tiempo como una constante. Así, si bien el suelo no se analiza particularmente, explícita e implícitamente está presente.

Tabla 4 Esquema metodológico

Etapa de levantamiento de información	
Entrada/Fuente de información	Producto
Modelo de elevación digital	Curvas de nivel
	Hillshade
	Mapa de pendientes
	Mapa de orientación
Imágenes satelitales	ESRI Imagery
	Landsat 8
Revisión bibliográfica	Índices, ecuaciones y coeficientes
Trabajo de terreno	Datos de régimen de escurrimiento
Solicitud de información	Datos climáticos, meteorológicos y de caudales
Cálculo de componentes hidrológicos	
Relacionados a la infiltración	Pendiente
	Exposición
	Vegetación
Parámetros morfométricos	Generales
	de forma
	de relieve
	sobre la red de drenaje
Tiempos de concentración	California Culverts Practice
	Giandotti
	Normas españolas
	Bransby-Williams
	Pilgrim y Mcdermott
	Passini
Etapa de análisis	
Clasificación de los resultados de los componentes calculados	
Interpretación de los componentes	
Cruce de información	Componentes hidrológicos/tipo de temporalidad de escurrimiento

	Contraste entre microcuencas 7 y 8
	Contraste entre microcuencas con información de caudal

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS.

4.1 Delimitación de microcuencas.

El resultado de la delimitación de microcuencas (ver Mapa 2) corresponde a 35 microcuencas, de las cuales 27 son microcuencas que alimentan directamente al canal principal (río Clarillo), y 8 son afluentes, subdivisiones de las anteriores o submicrocuencas. Las microcuencas se enumeraron arbitrariamente y con fines de ordenamiento, del 1 al 27 en sentido horario. Las microcuencas que alimentan directamente al río se identifican con un número y las submicrocuencas utilizan el mismo número de la microcuenca a la que pertenecen acompañado con una letra²⁰.

4.1.1 Clasificación general

Las microcuencas, enumeradas desde el 1 hasta el 27 (ver Mapa 2), se pueden clasificar de manera general según elementos que tienen en común, con el fin de vincular su dígito identificador a una expresión espacial (ver Tabla 5). De esta manera las microcuencas enumeradas del 1 al 4 (1, 2, 3 y 4), son microcuencas de orientación²¹ sur-suroeste, que alimentan al río Clarillo desde el norte en su zona baja²². Microcuencas enumeradas con el 5 (5, 5a, 5b, 5c y 5d) son microcuencas de orientación suroeste-sur, que alimenta al río en su sección media-baja, cuyo topónimo es “Cajón del Maitén”. Microcuencas desde el 6 al 8 (6, 7 y 8) son microcuencas de exposición oeste ubicados en la zona media de la cuenca. Aquellas enumeradas del 10 hasta el 13 (10, 11, 12 y 13) son microcuencas de la zona alta del Cajón de Los Cipreses, 11-12 y 13 dan origen a dicho curso de agua. Microcuencas 9 y del 14 al 16 (9, 14, 15 y 16) son microcuencas de la zona media del Cajón de Los Cipreses. Las enumeradas del 17 al 22 (17, 18, 18a, 19, 20, 21 y 22) son microcuencas que se ubican en la zona alta y media-alta en el Cajón del Horno. Por último, del 23 al 27 (23, 24, 25, 26 y 27) son microcuencas de exposición norte, tienen de cabecera al Cerro Blanco²³, y alimentan al río Clarillo desde el sur en su zona baja.

²⁰ Con excepción de 5d.

²¹ Se refiere a la orientación-exposición *sensu lato* de la cuenca, según la dirección de su canal principal, más adelante se analiza qué orientación predomina según la cantidad de superficie.

²² En adelante, zona baja, media y alta del Río Clarillo, o de la cuenca, se refiere al área de estudio y no a la cuenca hidrográfica del Río Clarillo completa la que tiene su exutorio en el río Maipo.

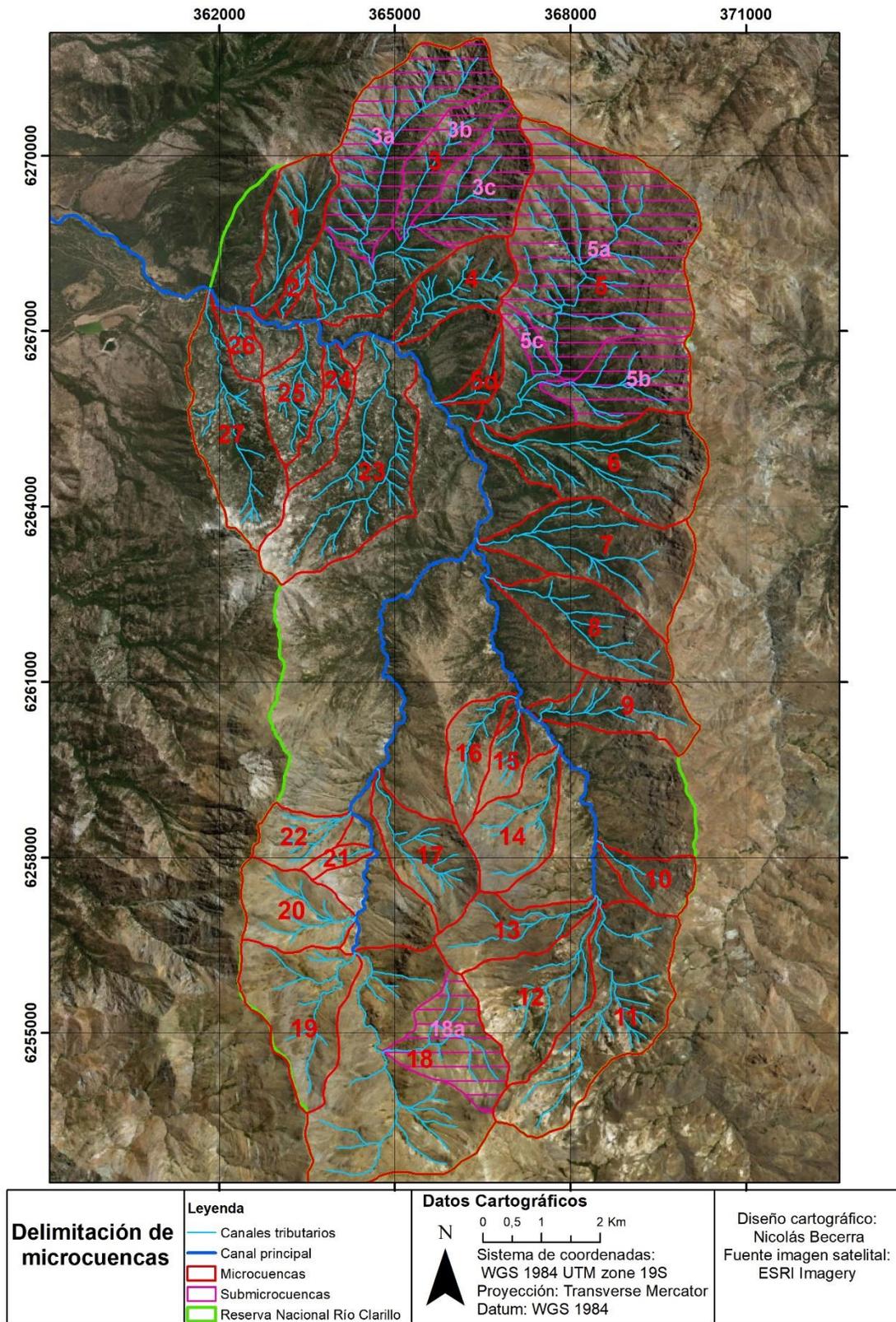
²³ Excepto la microcuenca 26.

Tabla 5 Clasificación general de microcuencas

1, 2, 3, 3a, 3b, 3c y 4	Microcuencas orientación sur-suroeste que alimentan desde el lado norte a la zona baja del río Clarillo. Microcuenca 3 conocida como el “Rincón de los Bueyes”
5, 5a, 5b, 5c y 5d	Microcuencas orientación suroeste-sur, alimentan al río en su sección media-baja cuyo topónimo es “Cajón del Maitén”
6, 7 y 8	Microcuencas orientación oeste, zona media de la cuenca
10, 11, 12 y 13	Microcuencas de la zona alta del Cajón de Los Cipreses
9, 14, 15 y 16	Microcuencas de la zona media del Cajón de Los Cipreses.
17, 18, 18a, 19, 20, 21 y 22	Microcuencas de la zona media y alta del Cajón del Horno
23, 24, 25, 26 y 27	Microcuencas orientación norte, comparten al Cerro Blanco como cabecera, alimentan al río Clarillo desde su orilla sur en su zona baja.

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 2 Delimitación de microcuencas



4.2 Escurrimiento superficial y caudal.

La información sobre escurrimiento superficial permanente no fue posible obtenerla en todas las microcuencas, principalmente debido a la lejanía de aquellas ubicadas en las zonas medias y altas de ambos cajones. De esta manera, la información de escurrimiento superficial radica en la zona baja y media de la cuenca que es lo alcanzable en este trabajo y además esta decisión considera un criterio de agrupación de microcuencas en un entorno geográfico similar. Dicho entorno geográfico corresponde a la zona boscosa de la Reserva, en las cuales la superación del límite arbóreo ocurre en las cabeceras, en contraposición a las microcuencas de la zona media y alta de los cajones, en donde su zona boscosa, si es que la hay, se limita a zonas ribereñas y en su exutorio. Es por lo anterior que se utiliza el término “intermitente” ya que se asumen condiciones de infiltración, unidades hidroespaciales “efímeras” son propias de ambientes áridos-semiáridos donde opera principalmente la escorrentía hortoniana, la cual, si es que está presente en el área de estudio, es en laderas o microcuencas de la zona alta.

De esta manera las microcuencas con información sobre la temporalidad de su escurrimiento superficial (ver Tabla 6), son aquellas enumeradas del número 1 al 8 y del 23 hasta el 27, que da un total de 14 microcuencas y 6 submicrocuencas. La mayor cantidad de microcuencas, un 80% (de aquellas 20), presentan escurrimiento superficial permanente o 77% sin considerar las submicrocuencas. De acuerdo a lo observado y conversado con Guardaparques, 3 microcuencas tienden a disminuir notoriamente su caudal en verano, reduciéndose a una delgada película de agua sobre la zona saturada del lecho de la quebrada, no obstante por exigua que sea la cantidad de agua, ésta se encuentra presente durante todo el año. Dicha tendencia, a pesar de fundamentarse desde un punto de vista meramente cualitativo, al no estar respaldado por mediciones, sirve para tener una impresión general y básica de los diversos panoramas presentes.

Tabla 6 Régimen de escurrimiento superficial

Microcuenca	Temporalidad del escurrimiento superficial
1	Permanente*
2	Intermitente
3	Permanente
3a	Permanente
3b	Permanente
3c	Permanente
4	Permanente*
5	Permanente
5a	Permanente
5b	Permanente
5c	Permanente
5d	Intermitente
6	Permanente
7	Permanente
8	Intermitente
23	Permanente*
24	Permanente
25	Permanente
26	Intermitente
27	Permanente
* Tendencia a tener un caudal muy bajo en la época estival Negrita con la finalidad de distinguir entre los tipos.	

Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Caudales

La Tabla 7 indica el promedio de las mediciones de caudal realizado por personal de la RNRC. Las mediciones se realizaron en el periodo estival de los años 2014, 2015 y 2018, en las microcuencas más cercanas y de fácil acceso con respecto a las oficinas de la Unidad. Cada dato, es el promedio de dos mediciones, una en la mañana (alrededor de las 9:00) y otra en la tarde (alrededor de las 16:00). A su vez, el caudal promedio es la media aritmética de los promedios de mañana y tarde. La irregularidad de los datos, no permiten un mayor análisis estadístico del comportamiento de los caudales, empero, son útiles para tener una idea de la magnitud concreta y relativa de los mismos.

De esta manera, la magnitud concreta indica que en verano es esperable contar con un caudal de $0,62 \frac{l}{s}$ en la microcuenca 24 (Lo Encañado), $1,12 \frac{l}{s}$ en la microcuenca 25 (La Tinaja) y $2,2 \frac{l}{s}$ en la microcuenca 27 (Los Almendros). Por otro lado, la magnitud relativa sugiere que “Los Almendros” (27) cosecha aproximadamente el doble que “La Tinaja” (25) y, a su vez, por “Lo Encañado” escurre aproximadamente la mitad de lo presente en “La Tinaja” (25).

Tabla 7 Caudales de microcuencas 24, 25 y 27

Microcuenca 24 “Lo Encañado”		Microcuenca 25 “La Tinaja”		Microcuenca 27 “Los Almendros”	
Caudal promedio (l/s)	0,62	Caudal promedio (l/s)	1,12	Caudal promedio (l/s)	2,20
Mínimo	0,39	Mínimo	0,59	Mínimo	1,10
Máximo	0,78	Máximo	2,55	Máximo	3,22
Desviación estándar	0,08	Desviación estándar	0,48	Desviación estándar	0,49
Muestra	72 datos	Muestra	74 datos	Muestra	72 datos

Fuente: Elaboración propia en base a datos entregados por personal de la RNRC.

4.3 Parámetros generales.

La Tabla 8 contiene los parámetros generales. Respecto al área, 37% de las microcuencas su área es menor a 2km², por lo tanto se consideran pequeñas, un 43% medianas y un 20% grandes (más de 5km²). Al llevarlo a términos absolutos, son 13 pequeñas, 15 medianas y 7 grandes. La microcuenca de mayor tamaño es la número 5 con 14,57 km², el “Cajón del Maitén” y aquella de menor área, con apenas 0,25km², la microcuenca 2. El rango más representativo son microcuencas del orden de 2-5km² aproximadamente, siendo la microcuenca de “Los Almendros” (27) característica.

En cuanto a los demás parámetros presentes en la Tabla 8, el largo del canal principal, el perímetro y el ancho tienen un comportamiento relativamente similar al del área, con coeficientes de determinación superiores al .87²⁴, mas no ocurre lo mismo con el desnivel, ya que una cuenca puede ser 3 veces más grande que otra, lo que no implica que tenga 3 veces el desnivel.

²⁴ Significa que una ecuación lineal de la forma $y=ax+c$, es capaz de explicar en un 87% el comportamiento de la variable dependiente (en este caso largo del canal principal, perímetro y ancho) con respecto a la independiente (área). El porcentaje restante, se explica con las diferentes formas que tienen las microcuencas, analizado con el Coeficiente de Gravelius y el Factor de Forma.

Tabla 8 Parámetros generales

Microcuenca	Área km ²	Largo (canal principal) km	Perímetro km	Ancho (metros)				Cotas (msnm)		
				Zona alta	Zona media	Zona Baja	Promedio	Mínima	Máxima	Desnivel (m)
1	2,13	2,52	7,00	937,4	813,2	500,6	750,4	900,5	1930,3	1029,8
2	0,25	1,14	2,54	222,6	286,9	269,6	259,7	909,3	1223,6	314,3
3	11,91	6,07	14,42	2913,4	2986	1714,6	2538,0	934,4	2538,6	1604,2
3a	5,02	4,47	11,17	1266,5	1186,2	1162,9	1205,2	1084,3	2538,6	1454,4
3b	1,74	2,51	7,04	647,3	675,7	510,8	611,3	1201,6	2449,4	1247,7
3c	2,71	2,35	7,06	1548,8	1358,8	846,2	1251,3	1263,0	2452,0	1189,0
4	1,96	2,48	6,47	1189	913,7	480,3	861,0	980,1	1954,7	974,6
5	14,57	7,65	16,94	3005,3	3363,4	1457,7	2608,8	1064,8	2446,6	1381,8
5a	9,88	5,62	13,59	2966,1	3406	1541,6	2637,9	1242,6	2446,6	1204,0
5b	2,71	2,15	7,39	1271,5	1480,9	450,8	1067,7	1220,9	2299,9	1079,0
5c	0,44	1,24	3,52	298,3	318	403,9	340,1	1197,4	1772,6	575,3
5d	0,50	1,92	3,99	331,3	467,1	201,2	333,2	1024,5	1693,0	668,5
6	4,71	3,71	10,48	1892,3	1282	505	1226,4	1068,0	2443,6	1375,6
7	4,29	3,41	10,08	1448,8	1411,1	584,4	1148,1	1139,7	2442,0	1302,3
8	3,13	3,55	8,04	1269,4	1341,7	619,8	1077,0	1211,1	2467,5	1256,4
9	2,08	2,82	7,30	880,6	907,3	383,8	723,9	1396,5	2417,3	1020,8
10	1,14	1,49	4,93	1001,7	564	302,4	622,7	1653,6	2432,7	779,1
11	5,29	4,74	11,94	867,2	1332,5	1402,7	1200,8	1754,0	2958,1	1204,1
12	3,45	3,09	9,01	1661,7	1173,8	413,3	1082,9	1745,3	2777,5	1032,2
13	2,10	2,93	7,02	1107,3	787,4	476,1	790,3	1732,9	2762,1	1029,2
14	2,38	3,01	6,83	1399,1	811,3	568,2	926,2	1472,1	2618,6	1146,5
15	0,82	1,38	4,42	463,5	641,9	410,2	505,2	1398,5	2368,1	969,5
16	1,43	2,32	6,01	614,7	816,4	435,5	622,2	1375,4	2483,3	1107,9
17	2,42	2,81	7,41	1395	1052,3	520,9	989,4	1701,2	2722,9	1021,8
18	10,34	5,45	13,43	3229,7	2664,3	1682,4	2525,5	2060,2	2963,9	903,6
18a	2,54	2,50	7,15	2336,6	1550,2	687,7	1524,8	2304,3	2943,6	639,3
19	3,51	3,09	8,64	2917,3	1364,2	669,1	1650,2	2064,1	2778,0	713,9
20	2,22	1,80	6,05	1359,1	1298	714,6	1123,9	2017,3	2722,9	705,5
21	0,34	0,96	2,86	282,2	359,8	225,5	289,2	1920,6	2390,2	469,6
22	1,24	1,41	4,78	1058,4	777,2	461,1	765,6	1873,6	2728,7	855,1
23	5,71	5,54	11,82	1418,8	1360	883,1	1220,6	962,3	2234,7	1272,3
24	1,22	2,14	6,22	621,7	491,6	513	542,1	934,4	1784,9	850,5
25	1,59	2,40	6,15	793,3	1053	381,4	742,6	911,2	1634,9	723,8
26	0,61	0,96	3,54	528,3	491,7	578,6	532,9	878,7	1346,1	467,5
27	3,99	4,37	10,24	1241,8	1310,3	629,1	1060,4	864,2	2197,4	1333,2
	Mínimo									
	Máximo									
	Mediana									

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Pendientes

La Tabla 9, contiene el porcentaje de cobertura según los umbrales geomorfológicos asociados a la pendiente (ver Tabla 2), además de los valores absolutos máximos y mínimos, y el valor promedio. Los rangos predominantes, en todos los casos van desde los 10° hasta los 45°, es decir, en todas las microcuencas los valores de pendiente que tienen la mayor cobertura está en los tipos fuerte, moderadamente escarpado y muy escarpado predominando los suelos frágiles.

Tabla 9 Cobertura de los umbrales de pendiente

Microcuenca	Pendiente en grados							Pendiente promedio	Pendiente máxima	Pendiente mínima
	0 - 2	2,1 - 5	5,1 - 10	10,1 - 20	20,1 - 30	30,1 - 45	>45			
1	0,0%	0,1%	2,5%	17,0%	45,4%	35,1%	0,0%	26,29	40,44	4,07
2	0,0%	1,1%	7,2%	53,6%	37,3%	0,7%	0,0%	18,28	30,36	3,75
3	0,0%	0,3%	1,8%	14,2%	31,9%	50,2%	1,6%	29,03	58,10	1,15
3a	0,0%	0,1%	1,5%	8,9%	27,7%	60,0%	1,7%	30,84	58,10	2,52
3b	0,0%	0,2%	0,4%	9,6%	29,9%	59,6%	0,3%	30,42	46,95	2,81
3c	0,0%	0,1%	0,3%	6,5%	30,9%	58,6%	3,7%	31,54	54,15	2,29
4	0,0%	0,1%	0,9%	13,3%	41,4%	44,0%	0,3%	27,96	46,79	3,61
5	0,1%	0,4%	2,4%	17,1%	43,5%	36,2%	0,5%	26,67	52,45	0,18
5a	0,1%	0,3%	1,7%	17,8%	47,6%	32,2%	0,3%	26,38	52,45	0,59
5b	0,1%	0,3%	1,4%	10,6%	30,5%	55,8%	1,3%	30,10	50,26	0,80
5c	0,0%	0,8%	2,7%	18,4%	51,0%	27,1%	0,0%	25,33	41,44	2,46
5d	0,0%	0,0%	2,3%	18,2%	54,2%	25,2%	0,0%	25,25	38,94	3,95
6	0,1%	0,3%	5,2%	20,9%	28,9%	39,7%	4,9%	27,62	61,11	1,39
7	0,1%	0,1%	1,7%	14,7%	38,3%	43,3%	1,7%	28,45	58,91	1,00
8	0,1%	0,1%	1,2%	12,7%	35,5%	49,1%	1,3%	29,09	51,50	0,70
9	0,0%	0,2%	1,2%	15,3%	33,0%	48,3%	2,0%	29,08	55,46	0,62
10	0,0%	0,0%	0,6%	9,9%	38,3%	50,9%	0,2%	29,52	46,69	7,60
11	0,0%	0,5%	2,6%	17,7%	52,2%	26,9%	0,0%	25,29	45,94	1,50
12	0,0%	0,3%	2,0%	21,8%	55,4%	20,4%	0,0%	24,36	43,47	0,69
13	0,2%	0,3%	3,3%	19,9%	58,7%	17,6%	0,1%	24,10	46,02	0,67
14	0,0%	0,1%	0,6%	8,6%	39,5%	51,0%	0,2%	29,31	46,69	4,22
15	0,0%	0,0%	0,0%	3,8%	50,8%	45,3%	0,0%	29,16	41,31	11,42
16	0,0%	0,1%	0,2%	9,8%	39,5%	50,2%	0,3%	28,96	46,99	3,08
17	0,0%	0,2%	2,3%	14,8%	44,8%	37,7%	0,1%	26,94	49,57	0,55
18	0,2%	1,2%	7,7%	33,7%	45,6%	11,3%	0,3%	21,10	55,94	0,52
18a	0,2%	0,8%	5,5%	41,0%	46,7%	5,8%	0,0%	20,12	37,35	1,35
19	0,1%	1,1%	4,5%	23,1%	60,7%	10,5%	0,0%	22,71	37,39	1,00
20	0,1%	0,6%	2,8%	21,0%	65,3%	10,1%	0,0%	23,46	37,31	0,74
21	0,3%	0,3%	2,2%	25,9%	55,8%	15,6%	0,0%	23,63	36,29	1,81
22	0,2%	0,4%	1,8%	7,9%	39,3%	49,9%	0,7%	29,42	46,83	0,57

Microcuenca	Pendiente en grados							Pendiente promedio	Pendiente máxima	Pendiente mínima
	0 - 2	2,1 - 5	5,1 - 10	10,1 - 20	20,1 - 30	30,1 - 45	>45			
23	0,1%	1,1%	5,8%	25,1%	51,8%	16,1%	0,0%	22,84	45,58	0,85
24	0,1%	0,2%	3,4%	37,2%	49,9%	9,2%	0,0%	21,48	35,71	1,84
25	0,3%	2,2%	5,4%	25,2%	54,2%	12,8%	0,0%	22,26	39,80	0,84
26	0,0%	0,9%	4,6%	42,0%	43,7%	8,8%	0,0%	20,54	35,74	2,67
27	0,0%	0,5%	3,0%	25,4%	42,2%	27,4%	1,5%	24,94	56,66	2,31
								Mínimo	Máximo	

Fuente: Elaboración Propia

Lo anterior no tiene nada de extraño tratándose del área de estudio, no obstante es necesario acotar que los porcentajes de cobertura de los tipos de pendiente extremos (horizontal y acantilado) pueden ser engañosos debido a la fisiografía del área de estudio y a la fuente de los datos altimétricos. Así, de la misma manera que las zonas de pendiente baja en el modelo de elevación digital son difíciles de detectar por el entorno montañoso, las pendientes acantiladas son suavizadas por pendientes menores debido a la resolución de 30x30 metros.

Tal como se mencionó, los tipos predominantes son fuerte, moderadamente escarpada y muy escarpada, con diversas combinaciones. De este modo y como se observa en la Tabla 10, un 40% de las microcuencas, tienen una cobertura predominante de pendiente “muy escarpada” y “moderadamente escarpada”, con pendientes promedio muy cercanas a los 30°. En un 26% de las microcuencas el predominio de pendiente es “moderadamente escarpada” y “fuerte”, lo cual se refleja en sus pendientes promedio del orden de los 20-22° aproximadamente. Por último el 23%²⁵ de las microcuencas tienen un dominio de pendiente “moderadamente escarpada” y “muy escarpada”, reflejado en pendientes del orden de los 26°. El orden de predominio es lo que diferencia al primer grupo (muy escarpada y moderadamente escarpada) y al tercero (moderadamente escarpada y muy escarpada), es decir, en el primer grupo tiene una mayor cobertura el tipo “muy escarpada” seguido del tipo de pendiente “moderadamente escarpada”.

Con estos tres grupos de microcuencas según su pendiente y dividiendo el área de estudio en zona baja, media y alta, no se puede definir un patrón espacial claro ya que cada grupo recorre las 3 zonas mencionadas. A pesar de ello, la cabecera del “Cajón del Horno” (microcuencas 18, 18a, 19 y 20) su pendiente promedio es del orden de los 20-22°, es decir, están en el grupo de predominio moderadamente escarpada y fuerte, ahondando aquello, se puede afirmar que las microcuencas que dan origen a ambos cajones no tienen las pendientes promedio mayores como podría esperarse del ambiente de alta montaña que pertenecen.

²⁵ El porcentaje que completa el 100% lo componen 4 microcuencas, las cuales tienen combinaciones distintas a las mencionadas y diferentes entre sí.

Tabla 10 Resumen de pendientes predominantes

Moderadamente escarpada y muy escarpada	Pendiente promedio	Muy escarpada y moderadamente escarpada	Pendiente promedio	Moderadamente escarpada y fuerte	Pendiente promedio
1	26,29	3	29,03	18	21,10
5	26,67	3a	30,84	18a	20,12
5a	26,38	3b	30,42	19	22,71
5c	25,33	3c	31,54	20	23,46
5d	25,25	4	27,96	21	23,63
11	25,29	5b	30,10	23	22,84
15	29,16	6	27,62	24	21,48
17	26,94	7	28,45	25	22,26
		8	29,09	26	20,54
		9	29,08		
		10	29,52		
		14	29,31		
		16	28,96		
		22	29,42		

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Exposición

La orientación de las unidades hidroespaciales es un componente intrínseco de ellas, por lo tanto describir la distribución espacial de las diversas orientaciones es describir la propia ubicación de las microcuencas. No obstante, como se ha mencionado, las distintas orientaciones tienen consecuencias hidrológicas notables.

De esta manera, se presentan dos tablas, la Tabla 11 y Tabla 12. La primera contiene la totalidad de los datos mientras que la segunda un resumen y dos columnas que contrastan las orientaciones extremas, es decir el norte y sur con sus afines (noreste y noroeste; sureste y suroeste, respectivamente). Entonces si se define como una microcuenca vulnerable si la orientación norte y sus afines cubren el 60% o más de su superficie, se tiene 8 microcuencas vulnerables. Aquellas 8 microcuencas son “Los Almendros”, “Jorquera”, “La Tinaja”, “Lo Encañado” y “Hospitales” (23, 24, 25, 26 y 27 respectivamente) más las microcuencas 14, 15 y 16, ubicadas en la zona media del “Cajón de Los Cipreses”. Si se considera un 50% de superficie orientación norte y afín como vulnerable, aumentan a 15, las microcuencas que se añaden están ubicadas en la cabecera de los dos cajones principales. En dichas microcuencas se esperan comportamientos más intensos ante las precipitaciones, en términos de la energía, volúmenes y composición. En cuanto a energía, en suelos más bien impermeables (escasa vegetación y menor desarrollo de suelos) la velocidad de la escorrentía es mayor, a mayor escorrentía (y menor infiltración) aumenta el caudal instantáneo (volumen de agua) y genera una curva del hidrograma adelantada y acentuada. Por último, la composición de los flujos

tiende a tener una mayor carga de sedimentos²⁶ ya que con su energía los va arrastrando y transportando con facilidad.

En la vereda contraria, se encuentran aquellas microcuencas en las que la orientación sur y afines es mayor al 60%, compuestas por 8 microcuencas, ubicadas en la zona baja de la cuenca (1, 2, 3, 3a, 3b 4, 5c y 5d). Estas microcuencas de características húmedas debido a la menor insolación, poseen una gran cobertura vegetal y un importante desarrollo de suelos, que actúan como esponjas del agua precipitada, lo que implica una curva del hidrograma retrasada y poco acentuada. Además se espera una mayor operación de flujos subsuperficiales los que provocan, tanto un crecimiento como una disminución gradual de la curva del hidrograma.

El valor de la mediana en la Tabla 12, en las columnas de “Sur y afines” y “Norte y afines”, representa, en el caso de “sur y afines” el punto medio entre el predominio total de la exposición sur con la escasez de exposición sur. La mediana en ambos casos se da en microcuencas de tendencia oeste, lo que permite establecer que las microcuencas de dicha exposición, ante la precipitación, tienen comportamientos de carácter transicional respecto a los mencionados en los apartados anteriores.

Tabla 11 Cobertura de exposición de las microcuencas

Microcuenca	Exposición							
	% Norte	% Noreste	% Este	% Sureste	% Sur	% Suroeste	%Oeste	% Noroeste
1	0%	0%	2%	29%	29%	27%	13%	0%
2	0%	0%	0%	13%	45%	36%	7%	0%
3	1%	0%	4%	23%	21%	18%	24%	10%
3a	0%	0%	7%	34%	23%	13%	19%	4%
3b	0%	0%	0%	24%	20%	20%	33%	3%
3c	1%	0%	0%	5%	17%	29%	29%	18%
4	0%	0%	0%	12%	19%	32%	23%	14%
5	3%	2%	9%	17%	15%	18%	20%	16%
5 ^a	2%	2%	12%	18%	15%	16%	19%	15%
5b	8%	3%	0%	0%	12%	33%	25%	19%
5c	0%	0%	7%	40%	27%	25%	1%	0%
5d	0%	0%	0%	6%	23%	37%	25%	8%
6	18%	1%	0%	0%	5%	18%	30%	29%
7	19%	2%	0%	1%	8%	28%	21%	23%
8	22%	5%	0%	0%	3%	18%	37%	15%
9	11%	1%	0%	0%	13%	43%	11%	20%
10	24%	0%	0%	0%	0%	21%	23%	31%
11	21%	18%	12%	1%	1%	8%	20%	19%
12	18%	32%	32%	10%	0%	0%	0%	8%
13	8%	28%	33%	28%	1%	0%	0%	0%
14	12%	42%	32%	8%	0%	0%	0%	6%
15	24%	58%	6%	0%	0%	0%	0%	12%

²⁶ Cabe recordar la mayor disponibilidad de sedimentos en microcuencas de exposición norte, ya que están muy expuestas a la salpicadura, lo que deviene en una mayor disgregación de los materiales.

Análisis de componentes hidrológicos y su influencia en el tipo de escurrimiento superficial en microcuencas de la Reserva Nacional río Clarillo, Comuna de Pirque, Región Metropolitana de Santiago.

Microcuenca	Exposición							
	% Norte	% Noreste	% Este	% Sureste	% Sur	% Suroeste	%Oeste	% Noroeste
16	36%	17%	28%	3%	0%	0%	0%	16%
17	22%	7%	1%	0%	2%	12%	28%	28%
18	13%	17%	11%	6%	6%	11%	18%	19%
18 ^a	27%	4%	2%	9%	13%	13%	10%	22%
19	12%	28%	27%	12%	3%	1%	3%	14%
20	6%	20%	34%	24%	12%	3%	1%	0%
21	6%	47%	34%	12%	0%	0%	0%	1%
22	16%	16%	56%	10%	0%	0%	0%	2%
23	21%	27%	25%	5%	0%	1%	7%	14%
24	33%	35%	5%	1%	0%	0%	12%	14%
25	26%	26%	24%	1%	1%	1%	5%	17%
26	42%	15%	1%	0%	0%	0%	2%	41%
27	18%	35%	6%	0%	0%	1%	20%	19%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12 Resumen de exposición

Microcuenca	Exposición predominante (%)	Orientación de la cuenca o dirección de la red de drenaje	Norte y afines	Sur y afines
1	Sureste (29), sur (29) y suroeste (27)	Suroeste	0%	85%
2	Sur (45) y suroeste (36)	Sur	0%	93%
3	Oeste (24), sureste (23) y sur (21)	Suroeste	11%	61%
3a	Sureste (34) y Sur (23)	Sur	5%	70%
3b	Oeste (33), sureste (24), sur (20) y suroeste (20)	Suroeste	3%	64%
3c	Suroeste (29) y oeste (29)	Oeste	19%	52%
4	Suroeste (32) y oeste (23)	Suroeste	14%	62%
5	Oeste (20)	Suroeste	21%	50%
5a	-	Sur	19%	50%
5b	Suroeste (33) y oeste (25)	Oeste	30%	45%
5c	Sureste (40), sur (27) y suroeste (25)	Sureste	0%	92%
5d	Suroeste (37), oeste (25) y sur (23)	Suroeste	8%	67%
6	Oeste (30) y noroeste (29)	Oeste	47%	23%
7	Suroeste (28), noroeste (23) y oeste (21)	Oeste	43%	36%
8	Oeste (37) y norte (22)	Noroeste	42%	21%
9	Suroeste (43) y noroeste (20)	Oeste	32%	57%
10	Noroeste (31), norte (24), oeste (23) y suroeste (21)	Noroeste	56%	22%
11	Norte (21) y oeste (20)	Norte	58%	10%
12	Noroeste (32) y este (32)	Noreste	57%	10%
13	Este (33), noreste (28) y sureste (28)	Este	37%	30%
14	Noreste (42) y este (32)	Norte	60%	8%
15	Noreste (58) y norte (24)	Norte	94%	0%
16	Norte (36) y este (28)	Norte	69%	3%
17	Oeste (28), noroeste (28) y norte (22)	Noroeste	57%	14%
18	-	Norte	49%	23%
18 ^a	Norte (27) y noroeste (22)	Oeste	52%	36%
19	Noreste (28) y este (27)	Noreste	54%	16%
20	Este (34), sureste (24) y noreste (20)	Este	26%	38%
21	Noreste (47) y este (34)	Este	54%	12%

Microcuenca	Exposición predominante (%)	Orientación de la cuenca o dirección de la red de drenaje	Norte y afines	Sur y afines
22	Este (56)	Noreste	34%	10%
23	Noreste (27), este (25) y norte (21)	Norte	62%	7%
24	Noreste (35) y norte (33)	Norte	82%	2%
25	Norte (26), noreste (26) y este (24)	Norte	69%	2%
26	Norte (42) y noroeste (41)	Norte	97%	0%
27	Noreste (35) y oeste (20)	Norte	72%	2%
				Mínimo
				Máximo
				Mediana

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Cobertura Vegetal

La Tabla 13 muestra los porcentajes de cobertura vegetal según cada microcuenca. Un 40% de las microcuencas (14) poseen 4 de 5 partes desprovistas de vegetación. Las 14 microcuencas mencionadas, en su totalidad están ubicadas en la zona media y alta del “Cajón de Los Cipreses” y el “Cajón del Horno”, por lo tanto la razón de la escasez es atribuible a la altitud y sus consecuencias en la vegetación. En dichas microcuencas la vegetación fundamentalmente crece en la orilla de los canales y quebradas, aquella presente en las laderas, su carácter abierto no ayuda a su detección²⁷. Estas microcuencas hidrológicamente son vulnerables, si bien la cobertura vegetal de los ambientes altoandinos es pobre, es necesario considerar la orientación norte de algunas, lo que las hace susceptible a la salpicadura de las gotas de agua en las precipitaciones cuando son líquidas.

Microcuencas medianamente cubiertas de vegetación ($\leq 40\%$) representan un 29% del total, es decir, un total de 10. Dentro de éstas se encuentran las submicrocuencas 3a, 3b y 3c; la microcuenca 5 y su submicrocuenca 5a; las microcuencas 8 y 9; y las microcuencas exposición norte 24, 25 y 26 (“Lo Encañado”, “La Tinaja” y “Jorquera”, respectivamente). En el caso de las submicrocuencas 3a, 3b y 3c, al ser de exposición sur se espera una mayor cobertura, sin embargo gran parte de su superficie está constituida por ambientes altoandinos con cabeceras que superan los 2400 msnm., similar a lo que ocurre con la microcuenca 5 y su submicrocuenca 5a, cuya cabecera llega a los 2446 msnm. En cuanto a las microcuencas 8 y 9, están ubicadas en la zona media de la cuenca y su dirección es noroeste y oeste respectivamente, lo que reafirma su condición de “transicionales”. Con respecto a las microcuencas 24, 25 y 26, su exposición norte las vuelve vulnerables en tanto que ante cualquier pérdida de vegetación, la recuperación por parte del bosque o por reforestación es más compleja por la insolación, las tasas de evapotranspiración y las condiciones del suelo.

Sobre las microcuencas bien cubiertas de vegetación, éstas representan un 31% con un total de 11 unidades hidroespaciales. Corresponden a microcuencas de exposición sur de la zona

²⁷ Formaciones vegetales como el matorral de *Chuquiraga oppositifolia* son difíciles de detectar.

baja de la cuenca (1, 2, 3, 4 y 5c), microcuencas orientadas hacia el sureste y este (5b, 5d, 6 y 7) y la microcuenca “Hospitales” y “Los Almendros” (23 y 27 respectivamente).

Tabla 13 Cobertura vegetal

Microcuenca	% Cobertura
1	59%
2	55%
3	42%
3a	35%
3b	39%
3c	35%
4	54%
5	33%
5a	24%
5b	47%
5c	57%
5d	65%
6	56%
7	42%
8	38%
9	22%
10	16%
11	15%
12	14%
13	6%
14	6%
15	19%
16	15%
17	14%
18	8%
18a	4%
19	5%
20	2%
21	5%
22	3%
23	41%
24	40%
25	40%
26	28%
27	43%
	Mínimo
	Máximo
	Mediana

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Parámetros morfométricos

4.7.1 Parámetros de forma

La Tabla 14 muestra los resultados del cálculo de los parámetros de forma, es decir, el Coeficiente de Gravelius (Cg) y el Factor de forma (Ff). La tendencia, tal como lo indica la mediana, es a formas irregulares, en el caso la compacidad de Gravelius y al alargamiento

según el Factor de forma. Debido a la naturaleza de estos parámetros, son inversos entre sí, es por ello que la misma microcuenca tiene el valor mínimo del Cg y el máximo del Factor de forma. Sin embargo, lo anterior no ocurre con el máximo en el Cg y el mínimo en el Factor de forma.

Tabla 14 Compacidad y forma de microcuencas

Microcuencas	Gravelius	Factor de forma
1	1,354	0,336
2	1,445	0,190
3	1,178	0,323
3a	1,407	0,251
3b	1,505	0,276
3c	1,210	0,490
4	1,305	0,319
5	1,252	0,249
5a	1,220	0,313
5b	1,267	0,588
5c	1,495	0,286
5d	1,588	0,136
6	1,363	0,342
7	1,373	0,369
8	1,283	0,248
9	1,428	0,262
10	1,305	0,514
11	1,464	0,236
12	1,367	0,362
13	1,368	0,244
14	1,248	0,262
15	1,375	0,434
16	1,416	0,267
17	1,343	0,307
18	1,179	0,348
18a	1,266	0,407
19	1,301	0,367
20	1,145	0,687
21	1,387	0,365
22	1,213	0,626
23	1,396	0,186
24	1,591	0,264
25	1,375	0,276
26	1,281	0,661
27	1,445	0,209
		Mínimo
		Máximo
		Mediana

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 15 agrupa las microcuencas según su compacidad, en primera instancia según la clasificación de forma (Tabla 3) y luego estadísticamente según los valores obtenidos. Según

la clasificación de forma del coeficiente de Gravelius, un 71% de las microcuencas entran en la categoría “de oval redonda a oval oblonga” y lo sigue la forma con tendencia a lo compacto “redonda a oval redonda” con un 20% y por último la forma más irregular²⁸ con 3 microcuencas. En la clasificación de los valores, la lectura que se obtiene es sobre las microcuencas más irregulares y más compactas dentro de las 35, en este sentido 6 microcuencas se agregan a la clasificación de irregulares.

En unidades hidroespaciales con formas compactas a redondas se espera una concentración en la confluencia de los canales (Meza *et al.*, 2014) una curva del hidrograma más adelantada y acentuada ya que en un mismo período de tiempo, toda el área está aportando esorrentía, por lo tanto las crecidas son importantes. No obstante, matizando aquello con otros parámetros, en la microcuenca 3, su submicrocuenca 3c, la submicrocuenca 5a, la vegetación juega un papel importante en la infiltración, moderando la esorrentía y las crecidas, lo anterior aun sin ser las microcuencas más pobladas de vegetación, los bosques bajo la línea de los árboles son sumamente densos. En dónde las crecidas ocurren sin mayor obstáculo (Meunier, 1996), sin duda es en las microcuencas 14, 18, 20 y 22 ya que la pobre cobertura de vegetación expone los suelos a la erosión.

Tabla 15 Clasificación de Compacidad.

Según la forma		
Redonda a oval redonda	Oval redonda a oval oblonga	De oval oblonga a rectangular oblonga
3, 3c, 5a, 14, 18, 20 y 22	1, 2, 3a, 4, 5, 5b, 5c, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18a, 19, 21, 23, 25, 26 y 27	3b, 5d y 24
Estadísticamente		
Baja (más compacta)	Media	Alta (más irregular)
3, 3c, 5, 5a, 14, 18, 18a, 20 y 22	1, 3a, 4, 5b, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25 y 26	2, 3b, 5c, 5d, 9, 11, 16, 24 y 27

Fuente: Elaboración propia.

²⁸ Cabe destacar que el coeficiente de compacidad clasifica las microcuencas en compactas o irregulares.

Tabla 16 Clasificación de microcuencas según su Factor de forma

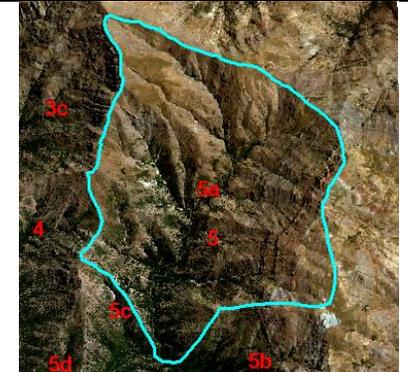
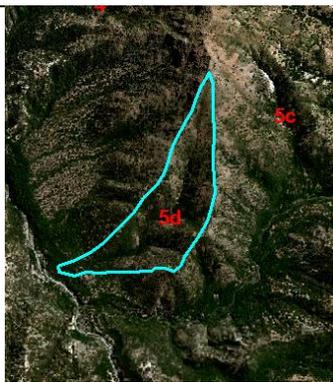
Tendencia según el Factor de forma		
Elongada	Media	Redonda
2, 3a, 5, 5d, 11, 13, 23 y 27	1, 3, 3b, 4, 5a, 5c, 6, 9, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 24 y 25	3c, 5b, 7, 8, 10, 15, 18a, 20, 22 y 26

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera según el Cg, la microcuenca más irregular es la 24, la microcuenca con el valor de la mediana es la 6 y la más compacta es la microcuenca 20. Para el factor de forma²⁹ la microcuenca más circular es la microcuenca 20, la mediana es 5a y la más elongada es 5d. La Tabla 17 simboliza las formas de las divisorias topográficas.

²⁹ El factor de forma clasifica las microcuencas en circulares o elongadas.

Tabla 17 Formas de microcuencas

Forma/coeficiente	Compacidad de gravelius	Factor de forma
Más compacta-circular		
Microcuenca con valor de la mediana		
Más irregular-elongada		

Fuente: Elaboración propia

4.8 Parámetros de Relieve

4.8.1 Hipsometría

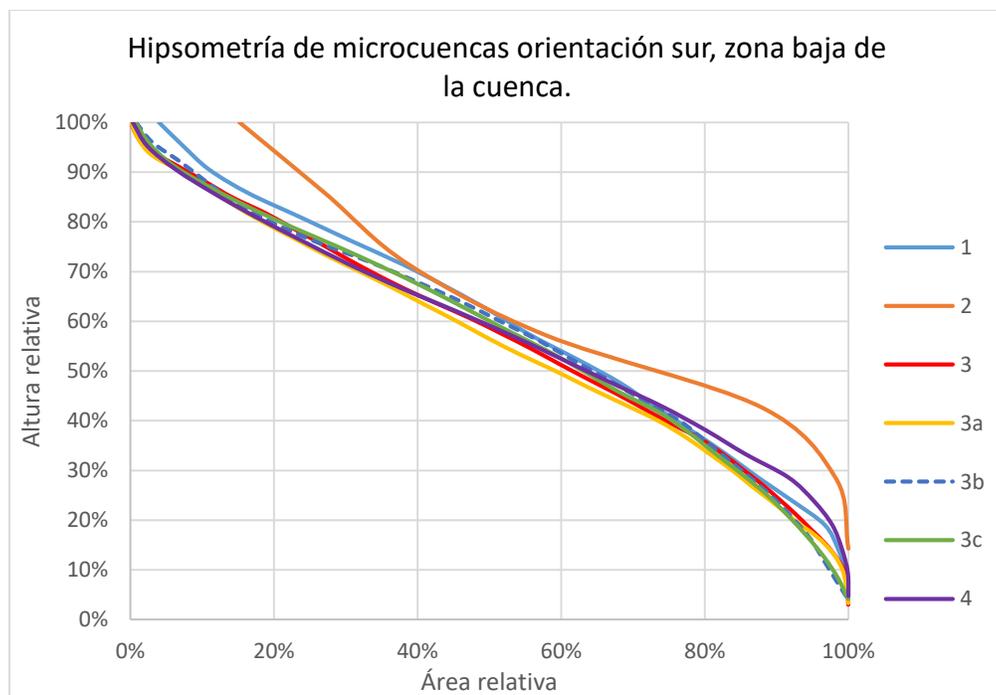
Para tener un orden debido a la cantidad de microcuencas las curvas hipsométricas se agrupan y analizan en 7 gráficos según la clasificación de la Tabla 5, de forma que los gráficos no se saturan con información.

Las curvas hipsométricas de las microcuencas que figuran en el Gráfico 1 tienen un comportamiento similar, reflejado en la aglomeración de estas, con excepción de la pequeña microcuenca 2. Microcuencas 1, 3 (y sus submicrocuencas) y 4 tienen una curva que representa un equilibrio erosivo, no se reconocen áreas más importantes que otras, es decir, la superficie de las cabeceras es similar a la de su zona media y baja, lo que se expresa en un mapa topográfico con curvas de nivel uniformemente separadas entre sí, lo que hace que su valor de pendiente promedio sea, en cierta forma, representativo.

Este equilibrio erosivo puede inferirse en el sentido que cuando se formaron dichas microcuencas fueron erosionadas hasta el punto en que la vegetación se asentó consistentemente (favorecido por su orientación sur), deteniendo en gran parte los procesos erosivos y evitando el paso a una etapa erosionada.

En tanto la microcuenca 2 se encuentra en una etapa erosiva, evidenciado en la convexidad de la parte alta y baja, zonas en donde se desprende de la aglomeración de curvas de las otras microcuencas.

Gráfico 1 Curvas hipsométricas de microcuencas 1, 2, 3, 3a, 3b, 3c y 4

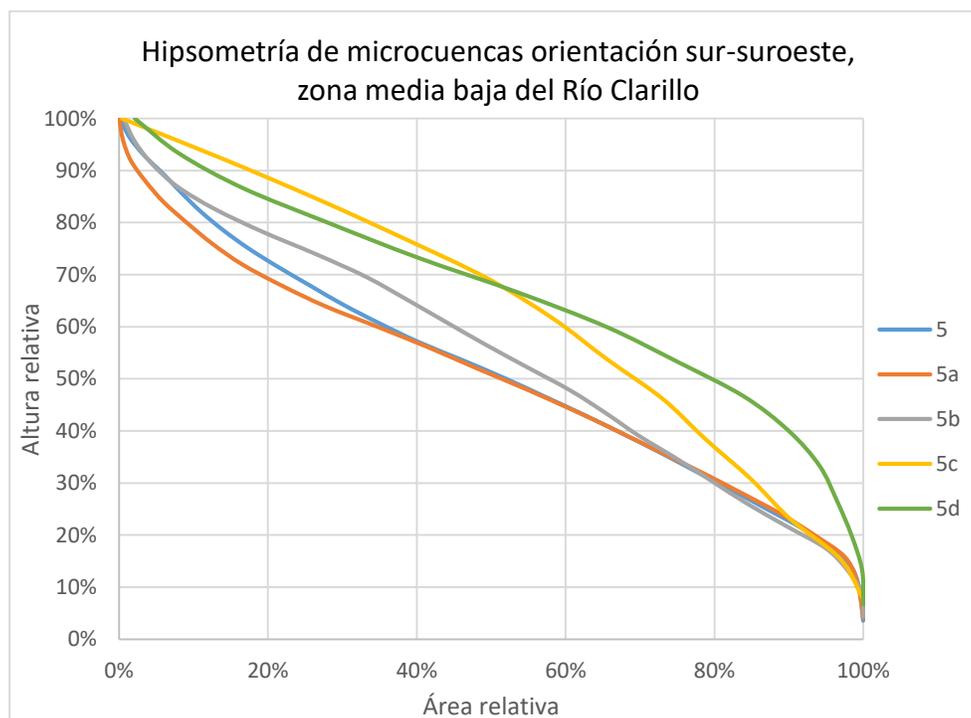


Fuente: Elaboración propia.

Las microcuencas asociadas al “Cajón del Maitén”, cuyas curvas hipsométricas figuran en el Gráfico 2, describen etapas de equilibrio y disequilibrio. Las que trazan disequilibrio, aunque sus curvas no están sobrepuestas, son las microcuencas pequeñas 5c y 5d (0,44 y 0,5 km² respectivamente), mientras en 5c hay un predominio de las cotas medias y en 5d es la zona baja la que tiene la mayor área debido a que dicha microcuenca en su corto recorrido, llega a una zona de terrazas y relleno coluvial, los cuales no ha sido capaz de disectar.

De las microcuencas en estado de equilibrio, al diferenciarlas es posible sostener que la microcuenca 5b está más equilibrada que 5 y 5a ya que solamente es abrupta en la parte alta, reflejando la pared de roca presente en la zona adyacente a su cumbre-divisoria. La microcuenca 5a, no es más que la parte alta de la microcuenca 5 lo que implica que la cumbre-divisoria tiene mayor notoriedad, expresado con una forma de etapa erosionada (concauidad) en su parte alta, aun cuando la totalidad describe un estado de equilibrio.

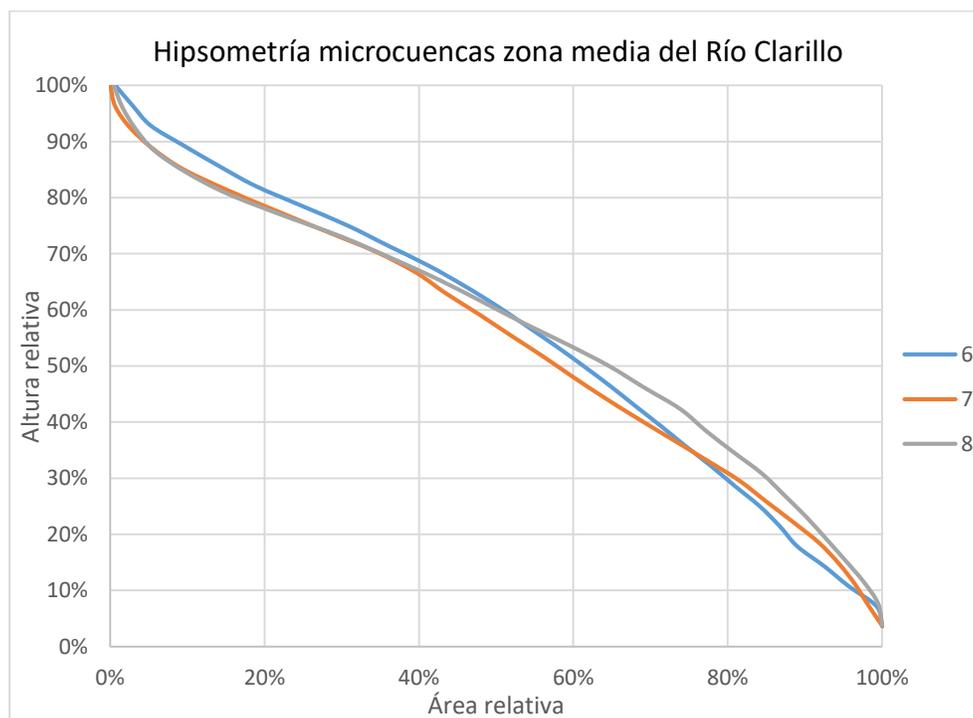
Gráfico 2 Curvas hipsométricas de microcuencas 5, 5a, 5b, 5c y 5d.



Fuente: Elaboración propia.

Las curvas hipsométricas de las microcuencas de la zona media del río Clarillo (ver Gráfico 3) describen un comportamiento transicional entre la etapa de desequilibrio, con tendencia hacia el equilibrio debido a la baja convexidad, presentando entre ellas leves diferencias en su zona alta y baja. La similitud de su comportamiento se liga con la semejanza de su exposición, principalmente oeste lo cual las posiciona a grandes rasgos como, transicionales, ya que en ellas median los comportamientos extremos (la exposición predominante no es sur ni norte, su cobertura vegetal es menor con respecto a las microcuencas de exposición sur) y por tanto se esperan comportamientos intermedios en la susceptibilidad a la erosión.

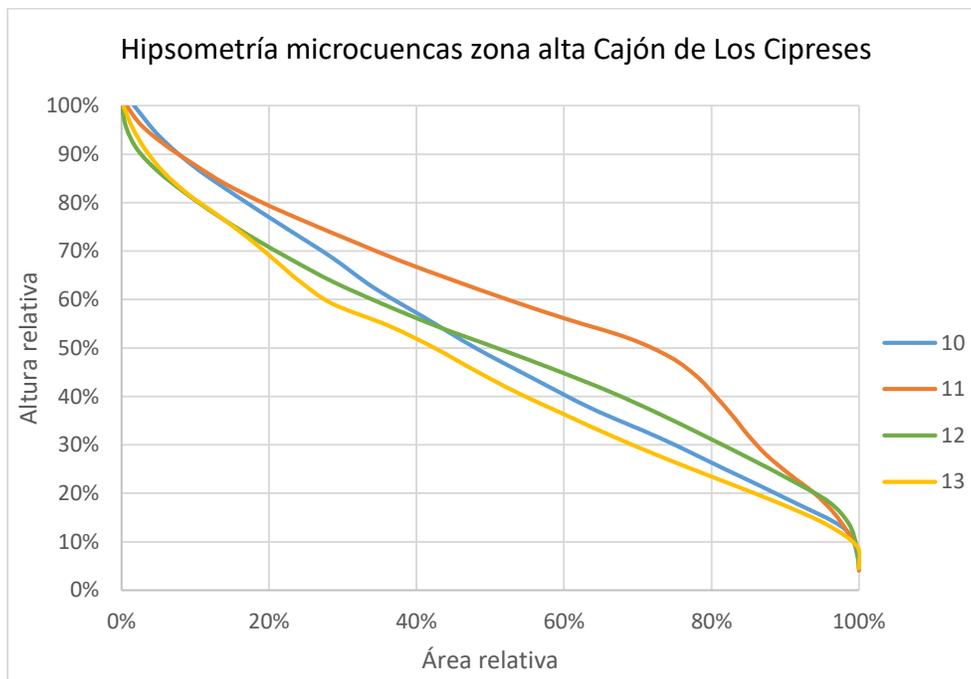
Gráfico 3 Curvas hipsométricas de microcuencas 6, 7 y 8



Fuente: Elaboración propia.

Las curvas hipsométricas de las microcuencas de la zona alta del “Cajón de Los Cipreses” (ver Gráfico 4) describen una etapa erosionada debido a que la forma cóncava no se remite solamente a la zona alta, como ocurre en las microcuencas anteriores, sino que está presente y es predominante a lo largo de todo el recorrido de las curvas. La curva de la microcuenca 11 a pesar de separarse de las demás, de igual manera describe una etapa erosionada, y el abultamiento proyectado en la zona baja es provocado por su forma alargada.

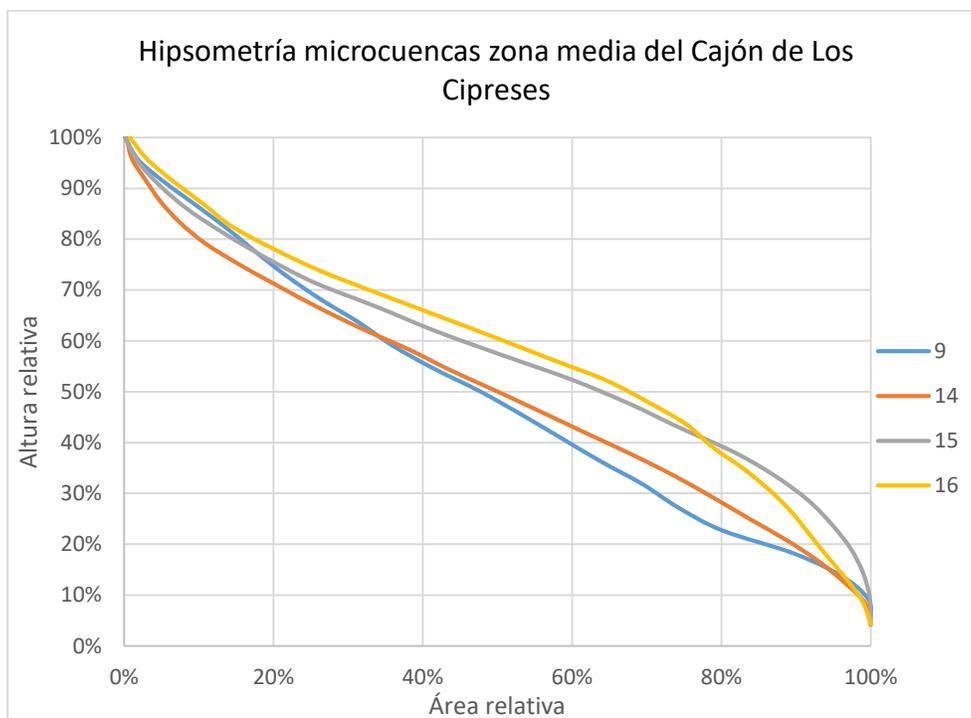
Gráfico 4 Curvas hipsométricas de microcuencas 10, 11, 12 y 13



Fuente: Elaboración propia.

Las microcuencas de la zona media del “Cajón de Los Cipreses” tienen un trazado de curva hipsométrica en una etapa de equilibrio (ver Gráfico 5), a lo que se puede agregar que las microcuencas 15 y 16 en su zona media baja tienen una tendencia a un ciclo erosivo desequilibrado o un estado joven. Dicha tendencia se manifiesta debido a que estas microcuencas (15 y 16) están ubicadas en el flanco oeste del cajón, el que corresponde a una verdadera pared, es decir, con pendientes muy altas.

Gráfico 5 Curvas hipsométricas de microcuencas 9, 14, 15 y 16

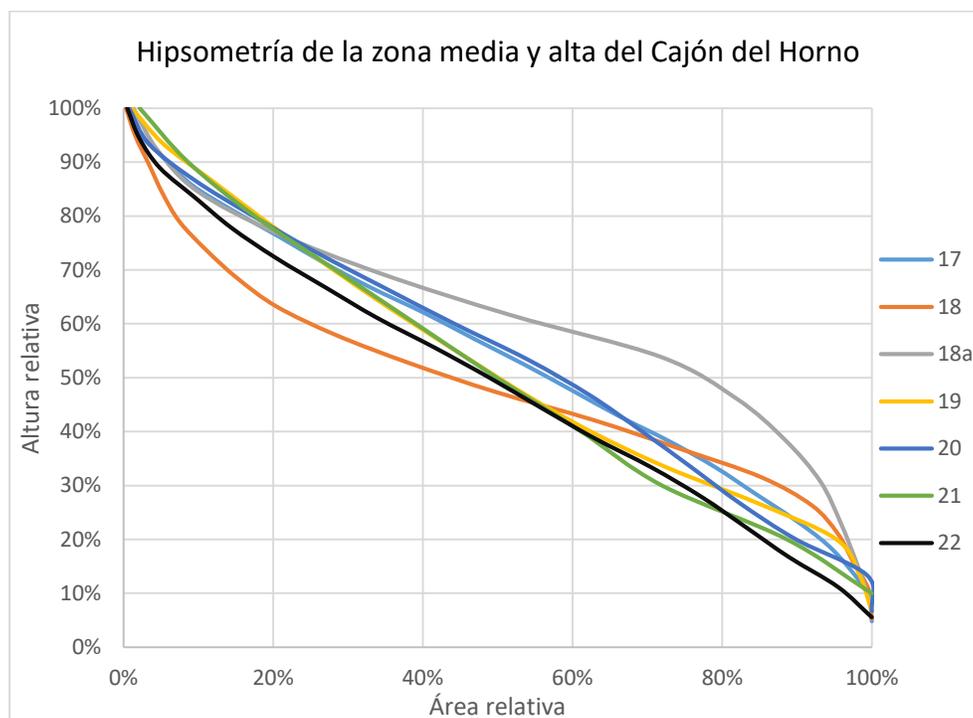


Fuente: Elaboración propia.

Las microcuencas de la zona alta del “Cajón del Horno” presentan curvas hipsométricas en etapas de equilibrio y erosionadas (ver Gráfico 6). Se consideran en etapa erosionada las microcuencas 18 y su submicrocuena 18a, las que presentan una evidente concavidad en la zona alta, que avanzando en el recorrido aparece un punto de inflexión dando origen a una convexidad, la que se hace presente en la zona baja de la microcuena 18 y en la zona media de la microcuena 18a formando un abultamiento apreciable.

Las demás microcuencas describen etapas de equilibrio, llamando la atención el recorrido prácticamente rectilíneo de las microcuencas 21 y 22, especialmente la primera, comportamiento que ocurre debido a su reducido tamaño el cual puede asemejarse a ciertas laderas, que induce a valores o formas inusuales con respecto a la media sobre todo si se trata de valores relativos.

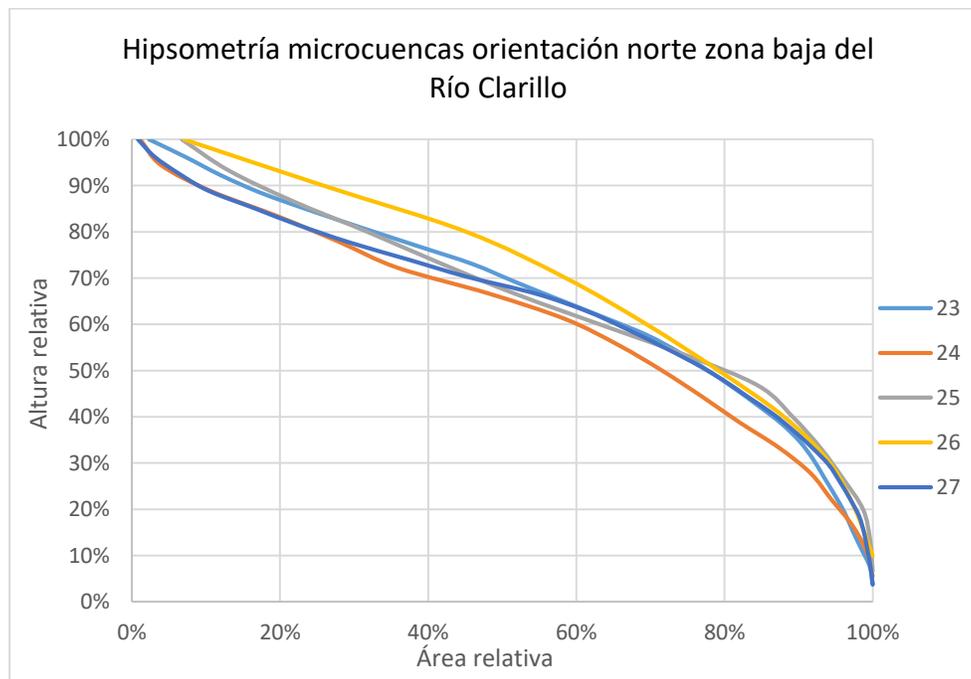
Gráfico 6 Curvas hipsométricas de microcuencas 17, 18, 18a, 19, 20, 21 y 22



Fuente: Elaboración propia.

Todas las curvas hipsométricas de las microcuencas de orientación norte de la zona baja del río (ver Gráfico 7), se encuentran en una etapa de desequilibrio erosivo, trazando un recorrido convexo predominante (leve concavidad en la parte alta de las microcuencas 24, 25 y 27). Las 5 microcuencas en cuestión tienen sus curvas hipsométricas bien agrupadas, salvo 2 detalles que son la zona alta y media de la microcuenca 26 y la zona baja de la microcuenca 23, debido a la reducida superficie y a la elongación respectivamente.

Gráfico 7 Curvas hipsométricas de microcuencas 23, 24, 25, 26 y 27



Fuente: Elaboración propia.

En resumen y como lo indica la Tabla 18, un 23% de las microcuencas poseen una curva hipsométrica que describe una etapa erosiva desequilibrada, un 60% una curva equilibrada y un 17% una curva erosionada. En términos absolutos corresponde a 8, 21 y 6 microcuencas, respectivamente. Para el caso de las microcuencas en estado erosivo equilibrado se reconocieron 4 microcuencas con tendencia hacia las otras etapas, 2 con tendencia a una etapa erosionada y 2 a una etapa de desequilibrio. Es importante recalcar la influencia de la exposición y la vegetación en el trazado de la curva hipsométrica, ya que las microcuencas de la zona baja teniendo el mismo sustrato (granodiorita de La Obra), en la orientación norte las curvas son desequilibradas mientras que las laderas sur, en general, están equilibradas.

Tabla 18 Resumen de etapa erosiva según curvas hipsométricas

Microcuenca	Tendencia erosiva.
1	Equilibrio
2	Desequilibrio
3	Equilibrio

Microcuenca	Tendencia erosiva.
3a	Equilibrio
3b	Equilibrio
3c	Equilibrio
4	Equilibrio
5	Equilibrio**
5a	Equilibrio **
5b	Equilibrio
5c	Desequilibrio
5d	Desequilibrio
6	Equilibrio
7	Equilibrio
8	Equilibrio
9	Equilibrio
10	Erosionada
11	Erosionada
12	Erosionada
13	Erosionada
14	Equilibrio
15	Equilibrio*
16	Equilibrio*
17	Equilibrio
18	Erosionada
18a	Erosionada
19	Equilibrio
20	Equilibrio
21	Equilibrio
22	Equilibrio
23	Desequilibrio
24	Desequilibrio
25	Desequilibrio
26	Desequilibrio
27	Desequilibrio
*	Tendencia al desequilibrio
**	Tendencia a la etapa erosionada

Fuente: Elaboración propia.

4.8.2 Pendiente media del cauce

El comportamiento de los valores de la pendiente media del cauce principal en el sentido de la distribución³⁰, permitió considerar 12 microcuencas con valores altos (mayor a .300m/m), 12 con valores medios (entre .230 y .300m/m) y 11 con valores bajos (menores a .230). Los valores más altos se encuentran en microcuencas pequeñas y los valores bajos en las de gran tamaño. Fenómeno explicado con el hecho que la relación altitud-área no posee una correlación lineal. Siendo el valor más alto .432 m/m para la microcuenca 15, el mínimo .130 m/m para la microcuenca 18 y el valor de la mediana de .267 para la microcuenca 6.

Así los valores altos en microcuencas pequeñas (15, 21, 22, 5b, 5c, 16 y 10 son los valores más altos) indica que son microcuencas con una respuesta rápida ante las precipitaciones y

³⁰ Un gráfico de barras con todos los valores evidencia claramente los rangos alto, medio y bajo, ver Anexo n°1.

además con una alta capacidad erosiva debido a la velocidad de los flujos. Características que se retroalimentan positivamente en el caso de poseer valores de densidad de drenaje alto y formas compactas. Por otro lado los valores más bajos son de las microcuencas 18, 5, 18a, 5a, 23 y 19 que son microcuencas de tamaños considerables cuyo recorrido largo del cauce principal suaviza el valor de la pendiente de este.

Tabla 19 Pendiente media del cauce principal

Microcuenca	S (m/m)
1	0,285
2	0,248
3	0,227
3a	0,275
3b	0,320
3c	0,342
4	0,213
5	0,159
5a	0,185
5b	0,374
5c	0,370
5d	0,262
6	0,267
7	0,241
8	0,288
9	0,301
10	0,361
11	0,222
12	0,230
13	0,305
14	0,329
15	0,432
16	0,364
17	0,268
18	0,130
18a	0,171
19	0,206
20	0,295
21	0,397
22	0,387
23	0,186
24	0,240
25	0,230
26	0,222
27	0,214
	Mínimo
	Máximo
	Mediana

Fuente: Elaboración propia.

4.9 Jerarquización de la red de drenaje

El mayor desarrollo de la red de drenaje está presente en microcuencas grandes, y en microcuencas medianas de la zona baja, mientras que el bajo desarrollo (números de jerarquía

bajos) ocurre en microcuencas pequeñas, y en las medianas de la zona alta. No obstante, la microcuenca 2, es la de menor superficie mas no la de menor desarrollo, ya que hay 8 microcuencas (5c, 21, 5d, 10, 26, 3b, 13 y 15) con igual o menor número de Shreve. Lo anterior es consecuente con la Densidad de drenaje, donde la microcuenca 2 es la de mayor densidad (6,7 km/km²) y, excluyendo la microcuenca 5d (con 4,3 km/km²), las 7 mencionadas restantes tienen valores entre 3,1 y 1,9 km/km² (ver Tabla 21).

El “Cajón del Maitén” (5), alcanza el número 32 de jerarquía, y si consideramos que antes de juntarse con el río Clarillo, se junta con la microcuenca 6, el número 32 aumenta al 43 (por eso la salvedad en la Tabla 20).

Tabla 20 Jerarquización de Shreve

Microcuenca	Jerarquización de Shreve
1	5
2	4
3	39
3a	16
3b	4
3c	6
4	18
5	32/43*
5a	20
5b	6
5c	1
5d	2
6	11
7	12
8	8
9	6
10	2
11	16
12	7
13	4
14	7
15	4
16	6
17	10
18	19
18a	5
19	8
20	9
21	1
22	5
23	23
24	6
25	13
26	3
27	12

Fuente: Elaboración propia.

4.10 Densidad de drenaje

El cálculo de la Densidad de drenaje (ver Tabla 21) arroja resultados entre 1,925 y 6,718 km/km², con una mediana de 2,669. Los valores más bajos³¹ son de las microcuencas 3b, 10 y 18 (<2 km/km²), microcuencas en donde el área maneja el comportamiento de la gran cantidad de los parámetros. Por otro lado, los valores mayores de densidad de drenaje están presentes en la microcuenca 2 (influenciado por su pequeño tamaño), 4, 5d, 15, 22, 24 y 25 con valores que superan los 3 km/km², ubicadas tanto en la zona alta como baja.

Tabla 21 Densidad de drenaje

Microcuenca	Densidad de drenaje (km/km ²)	Mantenimiento del canal (km ² /km)
1	2,897	0,345
2	6,718	0,149
3	2,737	0,365
3a	2,715	0,368
3b	1,925	0,520
3c	2,190	0,457
4	4,177	0,239
5	2,793	0,358
5a	2,223	0,450
5b	2,342	0,427
5c	2,816	0,355
5d	4,351	0,230
6	2,880	0,347
7	2,487	0,402b,
8	2,517	0,397
9	2,474	0,404
10	1,961	0,510
11	2,669	0,375
12	2,190	0,457
13	2,527	0,396
14	2,641	0,379
15	3,185	0,314
16	2,687	0,372
17	2,959	0,338
18	1,980	0,505
18a	2,199	0,455
19	2,073	0,482
20	2,627	0,381
21	2,848	0,351
22	3,406	0,294
23	2,674	0,374
24	3,153	0,317
25	3,989	0,251
26	2,222	0,450
27	2,167	0,462

³¹ Rangos bajo, medio y alto, calculados mediante cuartiles. Desde valor mínimo al primer cuartil, bajo; desde el primer hasta tercer cuartil, medio; y desde el tercer cuartil al valor máximo, alto.

Mínimo	
Mediana	
Máximo	

Fuente: Elaboración propia.

4.11 Tiempos de concentración.

La Tabla 22 muestra el resultado del cálculo de los tiempos de concentración (Tc). Se presentan los resultados de cada ecuación y el promedio omitiendo los valores extremos, el cual metodológicamente es el tiempo de concentración propiamente tal. Los valores extremos se presentan principalmente en 2 ecuaciones, la Ecuación 4 California Culverts Practice (1942) y la Ecuación 8 Pilgrim y McDermott en el mínimo y máximo, respectivamente. La ecuación California Culverts Practice indica el valor mínimo en 27 microcuencas, y en las que su valor se considera en el promedio, son microcuencas grandes además de la microcuenca 27 (las microcuencas 3, 3a, 5, 5a, 11, 18 y 23 superan los 5 km² y son las 7 microcuencas más grandes; por otro lado, la microcuenca 27 es considerada mediana rondando los 4km²). Lo anterior ocurre debido a que dicha ecuación si bien se utiliza para cuencas montañosas, estas deben ser de gran tamaño (lo que se reafirma con buenos resultados en las microcuencas grandes). Por otro lado la Ecuación 8 Pilgrim y McDermott arrojó para 33 microcuencas el valor máximo, las 2 microcuencas en las que no fue valor máximo (5d y 23) son antípodas en cuanto al área (único parámetro utilizado en dicha ecuación). Entonces si bien Pilgrim y McDermott se recomienda para cuencas menores a 250km², al parecer estas microcuencas son de bastante menor proporción y ha de estar formulada en otro tipo de ambientes.

Al calcular la diferencia existente entre el valor calculado por cada ecuación con el valor final, se llega a la conclusión que el cálculo más fiable es el obtenido por la Ecuación 5 Giandotti, recomendada por el Ministerio de Obras Públicas para cuencas pequeñas con pendiente (Dirección de Vialidad, 2018). El promedio de todas las diferencias entre la ecuación Giandotti con el Tc promedio es de tan solo 3,2 minutos. Y dicha ecuación presenta mayores diferencias con el promedio cuando se trata de microcuencas de mayor tamaño. Entonces, en microcuencas como las del área de estudio, se recomienda trabajar con la ecuación de Giandotti para las medianas y pequeñas, mientras que en aquellas con mayor área como los cajones la ecuación más recomendable es la de California Culverts Practice.

En cuanto a los resultados, como es de esperarse los Tiempos de concentración menores están presentes en cuencas pequeñas y los Tc mayores en las cuencas grandes. De las 7 microcuencas con 20 minutos y menos de tiempo de concentración, tan solo 2 superan el kilómetro cuadrado, estas microcuencas son 21, 5c, 15, 2, 26, 22 y 10, ordenadas de menor a mayor Tc mas no de menor a mayor área. La microcuenca 2 es la de menor tamaño con tan solo la cuarta parte de un kilómetro cuadrado, no obstante, tiene un Tc mayor a las microcuencas 21, 5c y 15; de las cuales 21 y 15 tienen una pobre cobertura vegetal (5% y

19%, respectivamente), lo que diferencia aún más el Tc con respecto a la microcuenca 2 que posee un 55% de cobertura vegetal (predominantemente arbórea debido a la exposición).

Por otro lado, 5 microcuencas poseen Tc superiores a los 50 minutos (5, 18, 5a, 3 y 23 en orden de mayor a menor), y corresponden a las 5 microcuencas más grandes, aunque nuevamente no es correlativo (los 5 Tc más altos de mayor a menor son las microcuencas 5, 18, 5a, 3 y 23 mientras que las cinco microcuencas más grandes de mayor a menor son 5, 3, 18, 5a y 23) siendo la microcuenca 3 la que se desajusta.

Tabla 22 Tiempos de concentración

Microcuencas	Tiempos de concentración en minutos						Promedio (omitiendo los extremos)
	CCP	GIA	NE	BW	PMC	PSS	
1	11,5	26,9	46,1	17,4	60,8	21,2	27,9
2	7,2	16,5	25,9	22,2	26,8	8,5	18,3
3	26,7	46,3	94,0	15,3	116,9	56,7	55,9
3a	19,5	33,5	71,8	16,1	84,2	34,9	39,9
3b	10,7	24,0	45,0	17,3	56,3	18,8	26,3
3c	10,0	26,7	42,3	16,4	66,6	20,5	26,5
4	11,5	30,4	48,1	18,6	58,8	23,8	30,2
5	36,9	57,6	119,9	16,1	126,2	78,3	73,2
5a	27,3	48,8	92,0	16,3	108,9	57,4	56,4
5b	9,3	25,9	38,8	16,1	66,6	19,1	25,0
5c	6,3	15,8	25,6	19,3	33,4	8,7	17,4
5d	9,9	19,1	38,1	20,4	35,1	12,5	21,8
6	16,0	33,9	62,6	16,3	82,1	32,5	36,3
7	14,9	35,0	59,9	16,8	79,3	32,3	36,0
8	15,9	29,1	59,7	16,7	70,3	26,9	33,1
9	13,1	25,8	49,7	17,3	60,2	21,3	28,5
10	6,9	21,0	29,5	17,7	47,9	12,8	20,3
11	22,4	37,7	78,1	16,7	85,9	40,2	44,6
12	14,5	34,0	56,0	17,3	73,0	29,7	34,3
13	13,7	25,5	51,1	17,2	60,4	21,5	28,8
14	13,5	25,5	51,4	16,7	63,4	21,8	28,8
15	5,8	17,5	26,9	17,6	42,3	10,3	18,1
16	10,1	21,3	41,3	17,2	52,3	16,0	24,0
17	13,1	28,5	50,6	17,4	63,8	23,7	30,1
18	29,4	59,3	96,2	17,4	110,8	68,9	63,5
18a	13,6	36,8	50,5	18,9	65,0	29,1	33,8
19	16,7	36,1	57,3	17,7	73,5	31,6	35,7
20	9,0	28,2	35,5	17,2	61,8	18,9	24,9
21	5,1	14,5	20,8	19,6	30,2	7,1	15,5
22	6,3	21,1	27,9	17,3	49,4	12,5	19,7
23	26,3	41,7	91,0	17,2	88,4	47,5	51,0
24	10,2	25,2	42,1	19,0	49,1	18,2	26,1

Microcuencas	Tiempos de concentración en minutos						Promedio (omitiendo los extremos)
	CCP	GIA	NE	BW	PMC	PSS	
25	12,4	27,6	46,3	18,7	54,4	21,1	28,4
26	5,1	23,4	23,2	20,7	37,7	11,5	19,7
27	19,6	35,6	74,0	17,3	77,2	36,3	41,4
Mínimo*		Máximo*					

En donde: CCP es Ecuación 4 California Culverts Practice (1942); GIA es Ecuación 5 Giandotti; NE es Ecuación 6 Normas españolas; BW es Ecuación 7 Bransby-Williams; PMC es Ecuación 8 Pilgrim y McDermott; y PSS es Ecuación 9 Passini

*Valor mínimo y máximo entre los valores arrojados de cada microcuenca (filas) y no en relación con las otras como se utiliza en otras tablas (según las columnas).

Fuente: Elaboración propia

4.12 Resumen de componentes.

A modo de resumen se presenta la Tabla 23 que contiene, el valor de pendiente promedio, porcentaje de exposición norte y afín, cobertura vegetal, etapa erosiva, pendiente media del cauce principal, densidad de drenaje, y tiempos de concentración. Los parámetros mencionados dependiendo de sus valores e interpretación indican y describen procesos de erosión y fragilidad frente a las precipitaciones, en los casos que es así, se ha resaltado con rojo. Esto debido a que ciertos comportamientos se retroalimentan positivamente entre sí, por ejemplo, es muy distinto tener una pendiente promedio alta en suelos con buena cobertura vegetal frente a pendiente alta con suelos con pobre cobertura. De esta manera la cantidad de componentes resaltados se vuelve fundamental. Tanto el tiempo de concentración como la pendiente promedio no se resaltaron debido a su subordinación con el área de las unidades.

Según el número de componentes resaltados reconocen 3 grupos, los cuales tienen una distribución espacial clara, tal como se observa en el Mapa 3 y son explicados en los siguientes apartados.

El primer grupo de microcuencas, de la 1 a la 8, ubicadas en el flanco norte y este del río Clarillo desde la zona baja hasta la zona media, en donde se resalta la forma, etapa erosiva, pendiente media del cauce o densidad de drenaje y en ningún caso una misma microcuenca tiene más de 2 componentes resaltados. En general dichas microcuencas tienen una buena cobertura vegetal, lo cual inhibe el desencadenamiento de procesos erosivos, no obstante la submicrocuenca 5c con una curva hipsométrica en estado de desequilibrio, pendiente promedio del cauce alta y tiempo de concentración bajo sin duda apunta a una sensibilidad ante un evento de precipitación, igual caso con la microcuenca 5d la que posee una densidad de drenaje y pendiente media del cauce alta, sumado a un tiempo de concentración bajo.

Panorama muy distinto se presenta en las microcuencas de la zona media y alta de los 2 Cajones principales (“Cajón del Horno” y “Cajón de Los Cipreses”) ya que 12 microcuencas

presentan al menos 3 parámetros resaltados. 14 de las 15 tienen una pobre cobertura vegetal, 10 de 15 poseen más del 50% de superficie con exposición norte y afín, 8 de las 15 tienen pendiente media del cauce principal alta. De aquellas 12 microcuencas 7 tienen resaltado 3 parámetros mientras que 5 poseen 4 parámetros resaltados. Con 4 parámetros se encuentran las microcuencas 10, 14, 15, 18a y 22 mientras que las microcuencas 11, 12, 13, 16, 17, 18 y 21 tienen 3 parámetros resaltados cada una. Dichas microcuencas están expuestas a la erosión ante precipitación líquida.

No obstante las microcuencas de la zona alta de los cajones, debido a su posición geomorfológica, parte sustancial de su área está sobre la línea de los árboles y consecuentemente la precipitación sólida se vuelve fundamental (ver Anexo n°2 Tabla área precipitación sólida)³². Así, las microcuencas de las cabeceras de los cajones bien superan el 60% de área que actúa como receptáculo de precipitación sólida e incluso superando el 95% en el caso de la microcuenca 18. Aunque reciban mayormente precipitación sólida, ello no quiere decir que siempre sea así, (eventualmente hay tormentas con isoterma 0°C anormalmente altas) y la nieve caída en la superficie tiene una duración de carácter pasajero pues en aquellos terrenos predomina la exposición norte y en ningún lugar hay nieves eternas.

Por último, están las microcuencas de exposición norte de la zona baja, (23, 24, 25, 26 y 27, “Hospitales”, “Lo Encañado”, “La Tinaja”, “Jorquera” y “Los Almendros”), las cuales tienen más del 50% de exposición norte y afín además de una curva hipsométrica que refleja un desequilibrio erosivo. Además las quebradas “Lo Encañado” y “La Tinaja” (24 y 25) tienen una densidad de drenaje alta.

Tabla 23 Resumen

Microcuenca	Pendiente promedio		Exposición Norte y afín	Cobertura Vegetal	Forma	Etapa erosiva	Pendiente media del cauce	Dd	Tc (min)
	%	°							
1	49,4%	26,3	<20%	Buena	Transición	Equilibrio	Media	Alto	27,9
2	33,0%	18,3	<20%	Buena	Elongada	Desequilibrio	Media	Alto	18,3
3	55,5%	29,0	<20%	Buena	Compacta	Equilibrio	Baja	Medio	55,9
3a	59,7%	30,8	<20%	Media	Transición	Equilibrio	Media	Medio	39,9
3b	58,7%	30,4	<20%	Media	Elongada	Equilibrio	Alta	Bajo	26,3
3c	61,4%	31,5	<20%	Media	Compacta	Equilibrio	Alta	Bajo	26,5
4	53,1%	28,0	<20%	Buena	Transición	Equilibrio	Baja	Alto	30,2
5	50,2%	26,7	>20%; <50%	Media	Compacta	Equilibrio**	Baja	Medio	73,2
5a	49,6%	26,4	<20%	Media	Compacta	Equilibrio **	Baja	Medio	56,4
5b	58,0%	30,1	>20%; <50%	Buena	Transición	Equilibrio	Alta	Medio	25,0
5c	47,3%	25,3	<20%	Buena	Elongada	Desequilibrio	Alta	Medio	17,4

³² Considerando que la precipitación sólida aparece sobre los 2200msnm, que corresponde a la isoterma 0 promedio de las tormentas en la latitud del área de estudio (Garreaud, 2013).

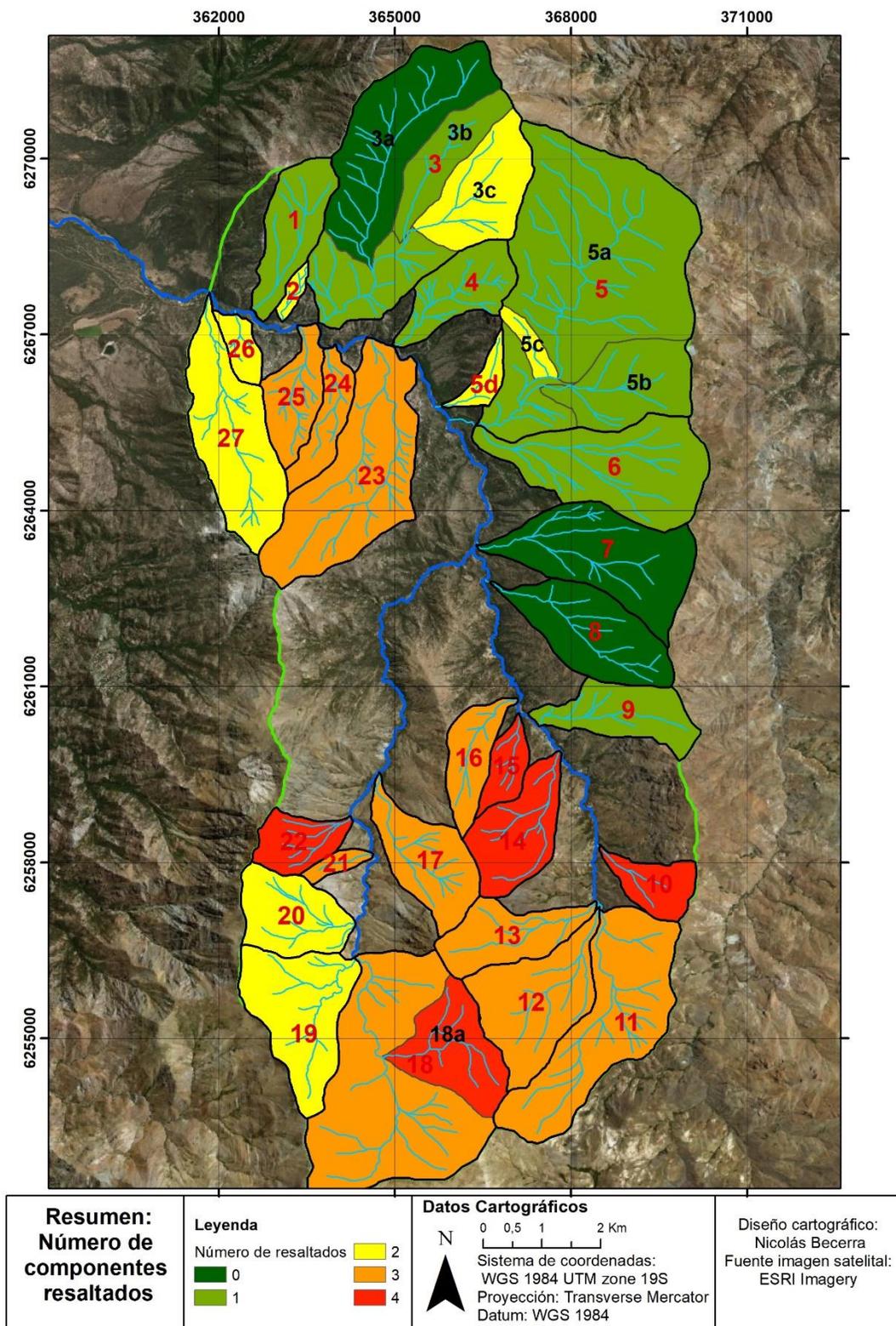
Análisis de componentes hidrológicos y su influencia en el tipo de escurrimiento superficial en microcuencas de la Reserva Nacional río Clarillo, Comuna de Pirque, Región Metropolitana de Santiago.

Microcuenca	Pendiente promedio		Exposición Norte y afín	Cobertura Vegetal	Forma	Etapa erosiva	Pendiente media del cauce	Dd	Tc (min)
	%	°							
5d	47,2%	25,3	<20%	Buena	Elongada	Desequilibrio	Media	Alto	21,8
6	52,3%	27,6	>20%; <50%	Buena	Transición	Equilibrio	Media	Alto	36,3
7	54,2%	28,5	>20%; <50%	Buena	Transición	Equilibrio	Media	Medio	36,0
8	55,6%	29,1	>20%; <50%	Media	Transición	Equilibrio	Media	Medio	33,1
9	55,6%	29,1	>20%; <50%	Media	Elongada	Equilibrio	Alta	Medio	28,5
10	56,6%	29,5	>50%	Pobre	Transición	Erosionada	Alta	Bajo	20,3
11	47,2%	25,3	>50%	Pobre	Elongada	Erosionada	Baja	Medio	44,6
12	45,3%	24,4	>50%	Pobre	Transición	Erosionada	Media	Bajo	34,3
13	44,7%	24,1	>20%; <50%	Pobre	Transición	Erosionada	Alta	Medio	28,8
14	56,1%	29,3	>50%	Pobre	Compacta	Equilibrio	Alta	Medio	28,8
15	55,8%	29,2	>50%	Pobre	Transición	Equilibrio*	Alta	Alto	18,1
16	55,3%	29,0	>50%	Pobre	Elongada	Equilibrio*	Alta	Medio	24,0
17	50,8%	26,9	>50%	Pobre	Transición	Equilibrio	Media	Alto	30,1
18	38,6%	21,1	>20%; <50%	Pobre	Compacta	Erosionada	Baja	Bajo	63,5
18a	36,6%	20,1	>50%	Pobre	Compacta	Erosionada	Baja	Bajo	33,8
19	41,9%	22,7	>50%	Pobre	Transición	Equilibrio	Baja	Bajo	35,7
20	43,4%	23,5	>20%; <50%	Pobre	Compacta	Equilibrio	Media	Medio	24,9
21	43,8%	23,6	>50%	Pobre	Transición	Equilibrio	Alta	Medio	15,5
22	56,4%	29,4	>20%; <50%	Pobre	Compacta	Equilibrio	Alta	Alto	19,7
23	42,1%	22,8	>50%	Buena	Transición	Desequilibrio	Baja	Medio	51,0
24	39,4%	21,5	>50%	Media	Elongada	Desequilibrio	Media	Alto	26,1
25	40,9%	22,3	>50%	Media	Transición	Desequilibrio	Media	Alto	28,4
26	37,5%	20,5	>50%	Media	Transición	Desequilibrio	Baja	Bajo	19,7
27	46,5%	24,9	>50%	Buena	Elongada	Desequilibrio	Baja	Bajo	41,4

* = Tendencia al desequilibrio
** = Tendencia a la etapa erosionada

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 3 Microcuencas según número de componentes resaltados

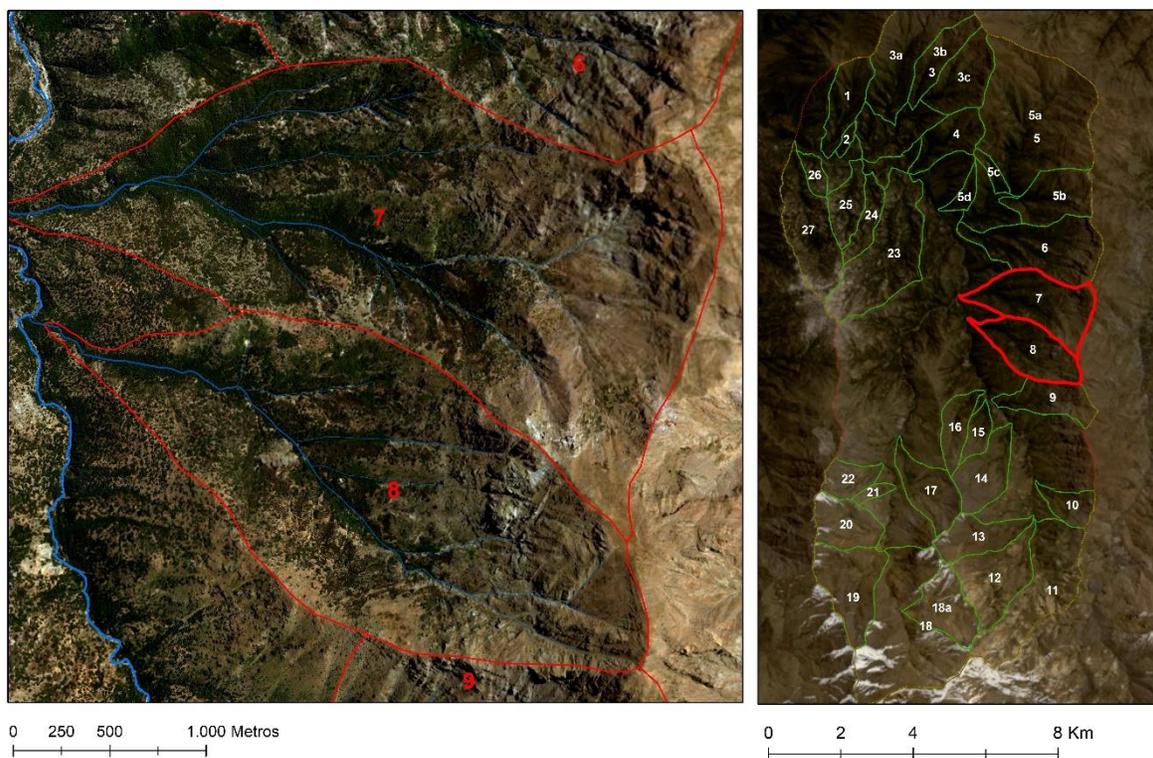


4.13 Tipo de temporalidad del escurrimiento vs componentes hidrológicos.

Como se mencionó, de las microcuencas a analizar enfocándose en la temporalidad de su escurrimiento superficial (ver Tabla 6), un 80% de aquellas presentan flujos superficiales todo el año, que implica una disparidad en relación a aquellas que su flujo es intermitente. No obstante las microcuencas 7 y 8, que son colindantes y *grosso modo*, de características similares (ver Figura 5) de no ser por la temporalidad del escurrimiento superficial. Es ahí donde se hace especial énfasis además de aquellas 3 microcuencas en las que se tienen datos de caudal.

Entonces los apartados se dividen en 3, la primera relaciona los componentes del conjunto de 20 microcuencas con información de temporalidad, luego se contrastan las microcuencas 7 y 8 y finalmente se contrastan las 3 microcuencas con datos sobre la magnitud de caudal (ver Tabla 7). Lo último se realiza en términos que la microcuenca 27 tiene el doble del caudal de la microcuenca 25 y esta última el doble de la microcuenca 24 (cualitativamente hablando).

Figura 5 Microcuencas 7 y 8



A la izquierda: Acercamiento a las microcuencas 7 y 8 con imagen satelital *Esri Imagery*; a la derecha: posición de microcuencas 7 y 8 en el área de estudio, con imagen satelital *Landsat 8*.

Fuente: Elaboración propia.

4.13.1 Según los parámetros generales.

4.13.1.1 Área

De las microcuencas con escurrimiento permanente sólo una posee superficie menor a 1 km² (5c), por otro lado, aquellas con flujo superficial intermitente únicamente la microcuenca 8 supera el km² llegando a los 3,13 superando en superficie a 8 microcuencas con escurrimiento superficial permanente.

La comparación de las microcuencas 7 y 8 da cuenta de una diferencia de superficie de 1,16 km² en que supera la microcuenca 7 a la 8. Además la relación entre aquellas microcuencas con datos de caudal da cuenta de una proporcionalidad directa entre ambas variables, es decir, mayor área, mayor caudal, tal como lo indica la bibliografía

4.13.1.2 Desnivel

En cuanto al desnivel, las microcuencas con escurrimiento superficial permanente en general superan los 1000 metros teniendo en promedio un desnivel de 1100 metros. Dicho desnivel está reflejado en el hecho que todas (con excepción de 4, 5c, 24 y 25) tienen una parte del recorrido de su divisoria coincidente con la divisoria topográfica de la cuenca, del Clarillo, la cual baja los 2000 msnm únicamente cuando se acerca a la zona del exutorio. En tanto a las microcuencas con escurrimiento superficial intermitente, su desnivel es considerablemente menor para las microcuencas 2, 5d y 26 (314, 668 y 467 metros respectivamente) y la microcuenca 8 con 1256 metros bien supera a 9 microcuencas con flujo permanente, siendo una excepción.

La diferencia entre el desnivel de las microcuencas 7 y 8 es de unos 46 metros, teniendo un mayor desnivel la microcuenca 7 la que tiene más superficie contigua a la divisoria de la cuenca. La comparación del desnivel según el caudal, no entrega una proporcionalidad directa ya que “Lo Encañado” (24) a pesar de tener menor caudal, supera en 127 metros a “La Tinaja” (25); “Los Almendros” (27) supera con creces a ambas.

4.13.2 Según los parámetros de relieve

4.13.2.1 Pendiente media de la cuenca, del cauce principal, densidad de drenaje

El valor promedio de la pendiente en las unidades sin escurrimiento permanente va desde los 18° hasta los 29°, la pequeña microcuenca 2 posee el valor mínimo, mientras que los 29 grados corresponden a la microcuenca 8. En las unidades con flujo superficial permanente la pendiente promedio está entre los 21 y 31°, cuya variabilidad se explica, al igual que en aquellas sin flujo permanente, en la extensión de las mismas, siendo la pendiente más alta en aquellas que su cabecera coincide con la divisoria de la cuenca. Entre las microcuencas 7 y 8 hay una diferencia de .64 grados más para la segunda. En tanto para las microcuencas con información de caudal, encontramos un comportamiento directamente proporcional, es decir, mayor pendiente promedio mayor caudal, siendo la pendiente promedio mayor para la

microcuenca 27 (24,94°), con respecto a las microcuencas 25 (22,26°) y 24 (21,48°), siguiendo el orden de las magnitudes de caudal.

La pendiente media del cauce principal (S) para las microcuencas con flujos intermitentes presenta valores medios en el caso de las unidades 2, 8 y 5d, mientras que para la microcuenca 26, el valor es bajo debido al escaso desarrollo de sus canales sumando un bajo desnivel. En las unidades con flujo a lo largo de todo el año, 5 poseen valores altos, 6 medios y 5 bajos, lo cual está muy relacionado al desnivel de la microcuenca y qué tan cerca de la cabecera está la naciente. Tanto la microcuenca 7 como la 8 tienen valores medios con la pequeña diferencia de .047 m/m, siendo el valor “mayor” para la microcuenca con escurrimiento intermitente (8). La relación entre las magnitudes de caudal con “S” tiene un comportamiento inverso ya que la microcuenca 27 con .214 m/m es menor a los .230 m/m de la microcuenca 25 y a los .240 m/m de la microcuenca 24.

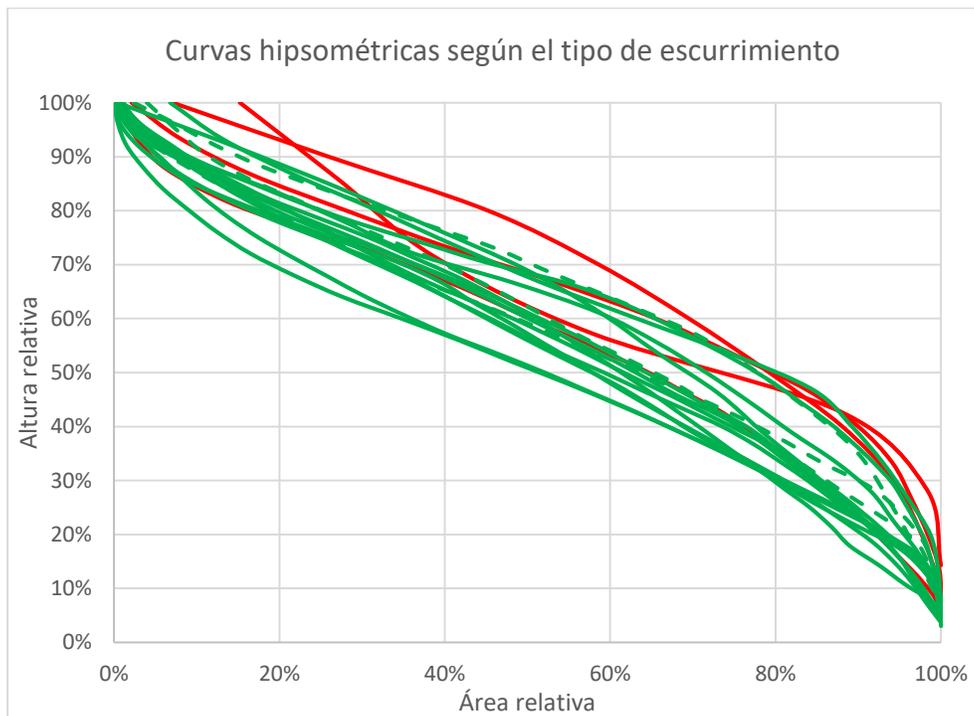
En cuanto a la densidad de drenaje, de las cuatro microcuencas con flujo superficial intermitente, dos de ellas poseen de los valores más altos (las pequeñas microcuencas 2 y 5d con 6,718 y 4,351 km/km², respectivamente), las restantes, microcuencas 8 y 26 poseen una densidad de drenaje media y baja siguiendo dicho orden. Para las 16 microcuencas con flujo superficial permanente, 4 presentan una densidad de drenaje baja, 7 media y 5 alta, cabe destacar que en el caso de aquellas que su flujo se vuelve muy exiguo, 2 de las 3 (microcuencas 1 y 4 con 2,897 y 4,177 km/km² respectivamente) tienen una Dd alta. Contrastando las microcuencas 7 y 8, la segunda posee una Dd levemente menor, de solamente 3 centésimas de km/km². Y en lo que respecta a la relación de la magnitud de caudal la microcuenca de mayor caudal (27) posee la menor densidad (2,167 km/km²) con respecto a las microcuencas 24 (3,153 km/km²) y 25 (3,989 km/km²) de caudal menor aunque dicha relación no es del todo inversamente correlativa.

4.13.2.2 Curva hipsométrica

El Gráfico 8 posee las curvas hipsométricas de las microcuencas analizadas en este apartado. Se logran observar los 3 tipos de etapas del ciclo erosivo, aunque la mayor cantidad y el traslape se encuentra en equilibrio erosivo y en el desequilibrio. En menor cantidad la etapa erosionada en la cual destacan 2 curvas que su trazado se encuentra debajo de la aglomeración (que son las microcuencas 5 y 5a, las que tienen una importante influencia de la cabecera con el dominio morfoclimático de alta montaña).

Las curvas de las microcuencas con escurrimiento superficial permanente (curvas verdes en el Gráfico 8), en general, están sobrepuestas trazando un recorrido que representa la etapa de equilibrio, aquellas que representan un trazado de desequilibrio, éste no es tan acentuado como el caso de las microcuencas con escurrimiento intermitente (curvas rojas en el Gráfico 8) las que describen fuertes cambios en su recorrido, alejándose de la aglomeración de curvas.

Gráfico 8 Curvas hipsométricas según el tipo de escurrimiento

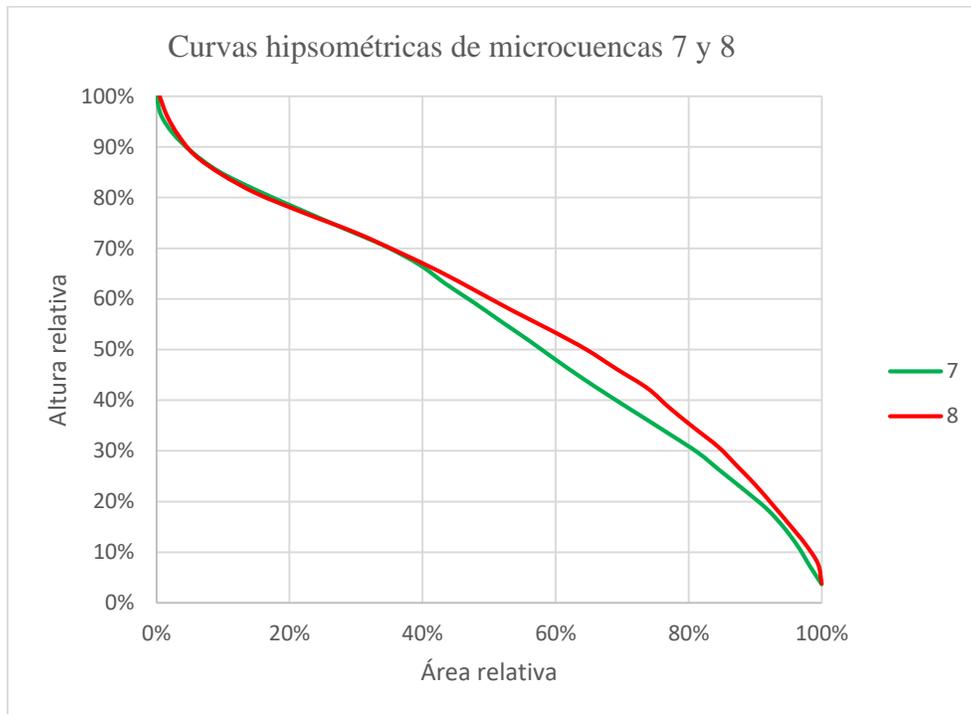


Líneas verdes continuas: escurrimiento superficial permanente; líneas verdes discontinuas: escurrimiento superficial permanente con tendencia a disminuir en el período estival y; líneas rojas: escurrimientos superficial intermitente.

Fuente: Elaboración propia

Para el contraste de las microcuencas 7 y 8, sus curvas se aislaron y se presentan en el Gráfico 9. Si bien ambas microcuencas se consideran en una etapa de equilibrio erosivo, al contrastarlas se observan diferencias, una leve en la cumbre y otra más notoria en la zona media-baja. Dicha diferencia radica en una mayor convexidad para la microcuenca con escurrimiento intermitente (8) con respecto a la de escurrimiento permanente (7). La mayor convexidad descrita indica un acercamiento o tendencia al ciclo de desequilibrio erosivo.

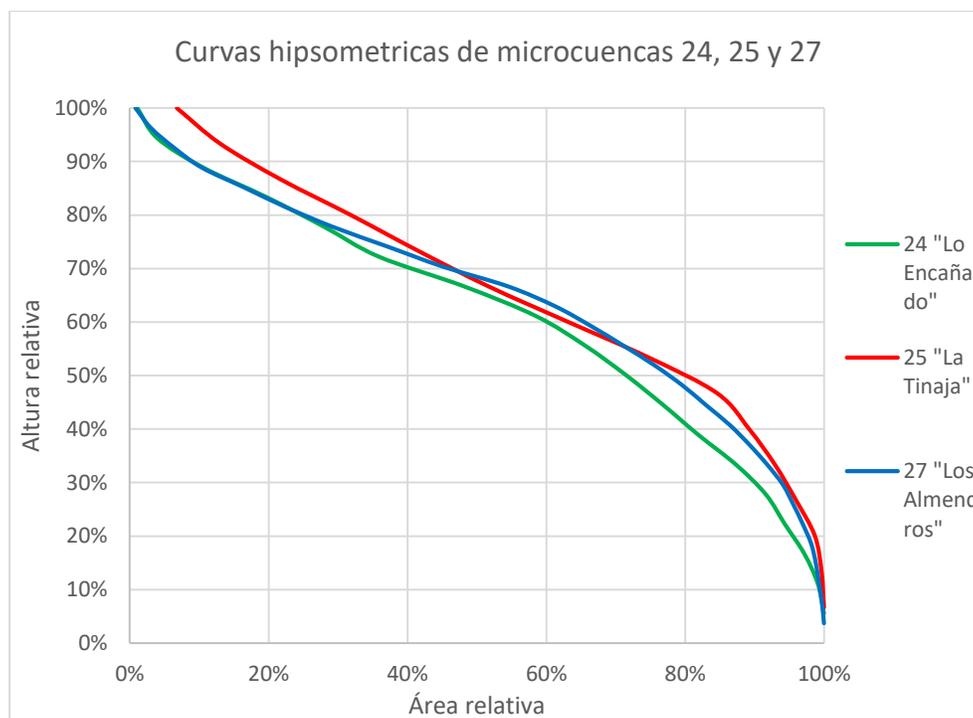
Gráfico 9 Comparación de curvas hipsométricas de microcuencas 7 y 8



Fuente: Elaboración propia.

En tanto a la magnitud de caudal con respecto a la hipsometría (ver Gráfico 10), las 3 microcuencas poseen una curva que describe una etapa desequilibrada. Al centrarse en la microcuenca “Los Almendros”, en su parte alta coincide con “Lo Encañado” y en su parte baja coincide con “La Tinaja”, zona en la cual la convexidad es más evidente. Dicha convexidad en la zona baja es donde se observa la etapa de mayor desequilibrio en las 3 microcuencas.

Gráfico 10 Comparación de curvas hipsométricas de microcuencas 24, 25 y 27



Fuente: Elaboración propia.

4.13.3 Según los parámetros de forma

Ya sea mediante al Coeficiente de compacidad de Gravelius o al Factor de Forma, en las microcuencas estudiadas no existe una tendencia, debido a que sin importar si el escurrimiento es permanente o intermitente se encuentran microcuencas de formas compactas e irregulares.

Para el contraste entre las microcuencas 7 y 8 se establece que 8 es más elongada que 7 (según el Factor de Forma) mas, la microcuenca 7 es más irregular que 8 (según C_g), aquella irregularidad está definida en la zona alta de las microcuencas, en donde sus cabeceras cartográficamente describen formas distintas, con 2 quebradas abriéndose hacia los flancos (microcuenca 7) y cerrándose en forma redondeada (microcuenca 8) tal como se observa en la Figura 5. Lo anterior demuestra, además, que la microcuenca 7 posee una mayor área de

recepción en la zona alta, lo cual se ratifica en la comparación de las curvas hipsométricas con un recorrido levemente más abrupto en la zona alta, y a su vez una mayor prominencia en la zona media en la curva de la microcuenca 8 con respecto a la 7 (ver Gráfico 9).

Con respecto a la magnitud del caudal no existe una proporcionalidad que los relacione ya que para el Coeficiente de compacidad, la microcuenca 24 es la “más irregular”, la “menos irregular” es la microcuenca 25 no la 27 como sería en el caso de existir una correlación con la magnitud de caudal; a su vez, para el Factor de forma, la “más elongada” es la microcuenca 27, la menos elongada es la microcuenca 25 y no la 24 para que exista proporcionalidad alguna.

4.13.4 Según la cobertura vegetal.

Las microcuencas con escurrimiento superficial permanente, todas (incluyendo aquellas que tienden a un exiguo caudal en estío) tienen una buena cobertura vegetal (superior al 40%), con excepción de las submicrocuencas de la cabecera de las unidades 3 y 5 que sus coberturas rondan el 30%, debido a la cantidad de superficie por sobre la línea de los árboles, además el porcentaje de superficie que recibe precipitación sólida es del orden del 10% como lo indica el ANEXO 2.

Las microcuencas de escurrimiento superficial intermitente 2 y 5d tienen buena cobertura (más del 50%) mientras que las microcuencas 8 y 26 tienen una cobertura inferior al 40%. El 38% de cobertura de la microcuenca 8 puede atribuirse a su posición en la zona media de la cuenca, no obstante si se compara con la microcuenca 7, ésta última tiene un 42% cubierto. Dicha diferencia expresada en términos absolutos indica aproximadamente una diferencia de 62,58 hectáreas, cantidad apreciable considerando que el área de las unidades 7 y 8 es del orden de las 420 y 310 hectáreas, respectivamente.

El hecho de tener menos vegetación implica menor intercepción de la precipitación y menor precipitación fustal y foliar, lo que deriva en menor cantidad de agua infiltrada. Desde una perspectiva inversa se puede intuir que una microcuenca con escurrimiento intermitente tendrá menos vegetación o en cualquier caso ésta tendría distintas características (vegetación dispersa, rala y de baja altura por ejemplo). Así, es difícil definir con certeza inequívoca si la menor cobertura vegetal de la microcuenca 8 con respecto a la microcuenca 7 es debido a la menor disponibilidad de agua, o la cantidad de vegetación no permite que infiltre lo necesario para abastecer con agua de manera permanente.

Para las microcuencas con información del caudal, aquella con mayor caudal (27) posee un 43% de cobertura vegetal versus el 40% de las microcuencas 24 y 25. Dicho 40% es un valor aproximado, al precisar dichas cifras, la microcuenca 24 tiene un 39,53% cubierto y la 25 un 39,95%; si bien se aprecia una correlación en el sentido de mayor cobertura vegetal-mayor caudal, en estos términos es bastante leve y no tan notable como el contraste de las microcuencas 7 y 8.

4.13.5 Según la pendiente.

Tanto las microcuencas con escurrimiento superficial permanente como las efímeras, poseen pendientes moderadas o pendientes fuertes, es decir, valores promedio cercanos a los 20 grados están presentes en ambas veredas. Incluso el hecho de tener mayor superficie con pendientes muy escarpadas, para las microcuencas seleccionadas existe una mayor probabilidad de tener escurrimiento permanente ya que una pendiente alta implica que hipsométricamente abarca las zonas altas y consecuentemente tienen mayor superficie, lo que tiende prevalecer sobre los procesos erosivos asociados a las pendientes más fuertes.

En todas las microcuencas destaca la pendiente “moderadamente escarpada”, en aquellas que su flujo es permanente siempre va acompañada del rango “muy escarpada” con excepción del grupo de microcuencas de exposición norte de la zona baja del río Clarillo en las que aparece el rango “fuerte”. En las microcuencas con flujos intermitentes, predominan los rangos “moderadamente escarpada-muy escarpada” (8 y 5d) y “moderadamente escarpada-fuerte” (2 y 26), agrupadas según su tamaño.

En cuanto al contraste entre las microcuencas 7 y 8 (ver Tabla 24), si bien en ambas predominan los rangos “muy escarpado” y “moderadamente escarpado”, en la microcuenca 8 el rango de pendiente más abrupta predomina más (49% sobre un 43%), además del medio grado superior en el valor de pendiente promedio. Así, en cuanto a la pendiente, la microcuenca 8 con respecto a la 7, tiene una menor capacidad de infiltración porque sus flujos adquieren una mayor velocidad junto a los otros procesos asociados a una mayor pendiente (suelo delgado, facilidad al transporte de material aguas abajo, etc...).

Tabla 24 Pendiente de microcuencas 7 y 8

Microcuenca	Pendiente en grados							Pendiente promedio	Pendiente máxima	Pendiente Mínima
	0 - 2	2,1 - 5	5,1 - 10	10,1 - 20	20,1 - 30	30,1 - 45	>45			
7	0,1%	0,1%	1,7%	14,7%	38,3%	43,3%	1,7%	28,45	58,91	1,00
8	0,1%	0,1%	1,2%	12,7%	35,5%	49,1%	1,3%	29,09	51,50	0,70

Fuente Elaboración propia.

Entre las microcuencas con información de caudal se observa una proporcionalidad directa entre la pendiente y el caudal, esto porque un análisis a la Tabla 25, da cuenta que la microcuenca 27 (de mayor caudal) posee la superficie más abrupta y por otro lado la microcuenca 24 (de menor caudal) es la menos abrupta en estos términos.

Tabla 25 Pendiente de microcuencas 24, 25 y 26

Microcuenca	Pendiente en grados							Pendiente promedio	Pendiente máxima	Pendiente Mínima
	0 - 2	2,1 - 5	5,1 - 10	10,1 - 20	20,1 - 30	30,1 - 45	>45			
24	0,1%	0,2%	3,4%	37,2%	49,9%	9,2%	0,0%	21,48	35,71	1,84
25	0,3%	2,2%	5,4%	25,2%	54,2%	12,8%	0,0%	22,26	39,80	0,84
27	0,0%	0,5%	3,0%	25,4%	42,2%	27,4%	1,5%	24,94	56,66	2,31

Fuente: Elaboración propia.

4.13.6 Según la exposición.

En los distintos tipos de escurrimiento superficial se encuentran todas las exposiciones. En las microcuencas con escurrimiento intermitente, las pequeñas 2 y 26 tienen mayoritariamente una exposición sur y norte, respectivamente, lo mismo ocurre en aquellas con flujos permanentes, donde la microcuenca 25 tiene un predominio de exposición norte y las microcuencas del “Rincón de los Bueyes” (3 y sus submicrocuencas) la exposición sur y afín tiene un predominio total. Es decir, se dan los dos extremos, tanto para la ocurrencia de un escurrimiento intermitente como permanente.

La comparación de la exposición predominante en las microcuencas 7 y 8 (Tabla 26) describe que si bien la microcuenca 7 supera levemente a la 8 en la exposición norte y afines (43% frente a 42%), la microcuenca 8 posee más superficie expuesta al norte absoluto (22% versus 19%) y al considerar la exposición sur y afines, la microcuenca 7 supera con creces a la microcuenca 8 (36% frente a 21%). Entonces, se puede afirmar en base a la exposición del terreno que la microcuenca 8 es más seca lo que tiene una consecuencia en el régimen de escurrimiento, reafirmando lo anteriormente expuesto en cuanto a la cobertura vegetal.

Tabla 26 Exposición microcuencas 7 y 8

Microcuenca	% Norte	% Noreste	% Este	% Sureste	% Sur	% Suroeste	% Oeste	% Noroeste	Norte y afín	Sur y afín	Exposición predominante (%)
7	19%	2%	0%	1%	8%	28%	21%	23%	43%	36%	Suroeste (28), noroeste (23) y oeste (21)
8	22%	5%	0%	0%	3%	18%	37%	15%	42%	21%	Oeste (37) y norte (22)

Fuente: Elaboración propia.

La exposición de las microcuencas con información de caudal (Tabla 27), si bien todas son del grupo de las microcuencas exposición norte, solamente en la 25 “La Tinaja” existe un predominio absoluto³³ el norte (por 0.28% sobre el noreste, decimales no presentes en la tabla). Siguiendo con el norte absoluto, existe una relación inversamente proporcional con el caudal, es decir, mayor porcentaje de superficie norte menor caudal. Así, la microcuenca 24 “Lo Encañado” posee un 33% de superficie norte (mayor de las tres), y sumando los afines, el guarismo aumenta a un 82% nuevamente siendo el mayor de las tres.

³³ Predominio absoluto como el mayor porcentaje de cobertura. Si bien en la microcuenca 24 también predomina la exposición norte con un 33%, la que predomina absolutamente es noreste con un 35%.

Tabla 27 Exposición microcuencas 24, 25 y 27

Microcuenca	% Norte	% Noreste	% Este	% Sureste	% Sur	% Suroeste	% Oeste	% Noroeste	Norte y afín	Sur y afín	Exposición predominante (%)
24	33%	35%	5%	1%	0%	0%	12%	14%	82%	2%	Noreste (35) y norte (33)
25	26%	26%	24%	1%	1%	1%	5%	17%	69%	2%	Norte (26), noreste (26) y este (24)
27	18%	35%	6%	0%	0%	1%	20%	19%	72%	2%	Noreste (35) y oeste (20)

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

Con el fin que las microcuencas seleccionadas fuesen representativas al área de estudio, se eligieron de diversos tamaños, lo que resultó en una enorme heterogeneidad de aquellas, a pesar de ser parte de un mismo entorno geográfico. Así, es muy poco lo que se puede comparar entre, por ejemplo, la microcuenca 3 de algo menos de 12 km² con la microcuenca 26 que no llega al kilómetro cuadrado. Siguiendo con dicho ejemplo, esas microcuencas son disímiles en el régimen del escurrimiento, no obstante no se puede concluir que la diferencia de sus componentes deriva en sus distintos tipos de régimen, ya que son distintas en prácticamente todos los aspectos y cualquier comparación superficial estaría viciada.

Aún dentro de la heterogeneidad mencionada, en términos erosivos y a grandes rasgos, se encontraron microcuencas estables, deterioradas y otras en un término medio entre ambos. Las estables son aquellas ubicadas en la zona baja-media de la cuenca con orientaciones que tienden al sur o al oeste, en las que se observa que los componentes hidrológicos indican microcuencas estabilizadas, entre los que destaca la densa cobertura vegetal.

Se determinó a las microcuencas de los cajones principales (del Horno y de Los Cipreses) como deterioradas debido a la relevancia que tiene la orientación norte, pendiente media del cauce principal alta, curva hipsométrica erosionada y la pobre cobertura vegetal. Escenarios que describen ambientes erosivos principalmente por tratarse de unidades con vegetación prácticamente inexistente pese a tener pendientes promedio relativamente bajas. En el término medio se encuentran las microcuencas de exposición norte de la zona baja de la cuenca, que si bien tienen cobertura vegetal, baja densidad de drenaje y pendientes relativamente bajas, el desequilibrio erosivo evidenciado en la curva hipsométrica y el dominio de la exposición norte indican que cualquier perturbación las afecta y conduce hacia el deterioro, expresado en derrumbes, deslizamientos y/o pérdida de suelos en general. Estos 3 tipos de categorías de las microcuencas deben ser considerados en cuanto al manejo y actividades que son compatibles o que pueden soportar.

La influencia de los componentes hidrológicos en el tipo de escurrimiento no es determinante en el sentido que sus valores caractericen evidentemente el tipo de escurrimiento. En la totalidad de las microcuencas analizadas no se observó un control categórico, mas, existen patrones y valores esperados que se hacen presentes en ciertos grupos de microcuencas. Lo anterior debido a la heterogeneidad de la muestra, a pesar de pertenecer a una misma cuenca en un ambiente relativamente similar.

Si bien la influencia o dominio no ocurre taxativamente, en ciertos escenarios y ambientes, los componentes analizados poseen expresiones concretas que reflejan tendencias útiles para explicar distintos comportamientos o fenómenos. Dichas expresiones concretas afloran una vez que la escala de análisis se enfoca en unidades hidroespaciales semejantes y entregan como conclusión que en relación al tipo de escurrimiento los componentes analizados se comportan i) con valores tanto directa como inversamente proporcional que se adecúan a la teoría, ii) con valores no conformes a la teoría, y iii) con valores que son intrínsecos a cada unidad, en otras palabras, sin relación con la teoría.

En tanto al punto i, componentes como área, cobertura vegetal, orientación de la superficie, pendiente promedio del cauce principal, densidad de drenaje tienen una correlación con respecto a la teoría. La orientación dependiendo de la óptica que se utilice puede explicar de manera inversa o directamente proporcional (más superficie norte, menor caudal; más superficie sur, mayor caudal, respectivamente) y en los casos de las unidades con flujo permanente o mayor flujo, la pendiente media del cauce principal y la densidad de drenaje es menor; la cobertura arbórea y el área es mayor.

De acuerdo al punto ii, se encuentran los parámetros que describen ambientes de mayor energía (valores altos en pendiente media de la cuenca, desnivel, cota máxima), pero sus valores altos se hacen presentes en las microcuencas con escurrimiento permanente. Esta suerte de paradoja radica en el hecho que valores altos de dichos parámetros son propios de microcuencas de gran tamaño, que tienen una superficie proporcionalmente importante sobre la línea límite de los árboles, lo cual tiene mayor influencia. El caso del punto iii, se refiere a los parámetros de forma los que sin importar si el escurrimiento superficial es permanente o intermitente se puede encontrar microcuencas de una forma como de otra (irregular y compacta para Gravelius; circular y elongada para el Factor de Forma). Lo anterior se explica en el sentido que aun tratándose de microcuencas compactas o circulares, el desarrollo de la red de drenaje es de manera dendrítica y los nodos de los canales suelen distribuirse de manera homogénea longitudinalmente en un canal principal, no habiendo zonas centrípetas de múltiples confluencias.

No obstante una vez que la escala de análisis se enfoca en la comparación de unidades hidroespaciales semejantes (el caso de los contrastes entre las microcuencas 7 y 8, y posteriormente entre las microcuencas 24, 25 y 27) es donde afloran ciertos patrones y los componentes manifiestan un control sobre el tipo de escurrimiento. Así, parámetros como el

porcentaje de superficie de exposición norte, la densidad de drenaje y la pendiente media del cauce principal poseen un comportamiento inversamente proporcional frente al régimen de escurrimiento (permanente) o al (mayor) caudal de escurrimiento³⁴, mientras que el área, la pendiente media de la cuenca³⁵, la cantidad de superficie de exposición sur y la vegetación tienen un comportamiento directamente proporcional.

En general, la cabecera de las microcuencas tiene un rol fundamental, así en aquellas que hipsométricamente su cumbre se ubica sobre los 1800-2000 msnm, la probabilidad de tener flujo superficial permanente es muy alta, debido a que teóricamente la infiltración es mayor por el gradiente altitudinal de la precipitación; la pedregosidad predominante en dichos ambientes que genera suelos con relativa permeabilidad; y sobretodo porque son microcuencas grandes (capaces de abarcar dicha cota). Lo cual está íntegramente relacionado con los valores de pendiente promedio de la cuenca altos, presentes en las microcuencas con flujo superficial permanente.

Por último, los componentes hidrológicos por sí mismos evidenciaron tendencias, las que solamente pueden ser validadas a la hora que se analizan junto a otro componente. Por ejemplo la pendiente media de la cuenca tuvo que analizarse en conjunto con el área de las unidades para tener conclusiones íntegras. Por otro lado, el análisis de la vegetación siempre debe tener presente a la exposición, ya que, esta última sea norte o sur, los panoramas son radicalmente distintos. Esta interrelación entre los componentes, ya sea dependencia, complemento o subordinación entre ellos es manifiesto de la indisolubilidad de los elementos y factores en un ecosistema, ya que se trata de un continuo. Aun cuando el objeto de estudio de esta Memoria puede considerarse como específico ha evidenciado que los elementos y factores de los ecosistemas son parte de un *continuum*.

5.2 Discusión

A pesar de que los componentes hidrológicos analizados tienen una expresión espacial, ésta no fue medida, por lo tanto, puede ser discutible la relación entre la expresión espacial y el valor obtenido. Por ejemplo, como se mencionó una forma compacta (medido con el perímetro y área) conlleva una serie de procesos y expresiones espaciales tal como una curva del hidrograma acentuada, aquello no fue medido y es la información más importante. Con lo anterior no se busca rehuir la relación de la morfometría en los procesos hidrológicos mas sí tener presente la separación entre la medición con lo que ocurre en la realidad, lo cual es sumamente importante enfrentar y corroborar con observaciones empíricas.

En base a lo anterior, siempre se debe tener en cuenta los alcances de los parámetros analizados para saber hasta qué punto pueden ser utilizados. Así en conocimiento de las

³⁴ Entiéndase la existencia de un flujo superficial permanente y un mayor caudal (en la comparación de las microcuencas 24, 25 y 27) como fenómenos análogos.

³⁵ Para el caso de las microcuencas 7 y 8, la microcuenca 8 tiene mayor pendiente media que la 7; mientras que según la magnitud de los caudales, mayor pendiente media, mayor caudal.

limitaciones y aplicaciones de los diversos componentes es que se puede diferenciar si las relaciones que se descubren son de carácter causal o casual. Por ejemplo, la relación entre el flujo superficial permanente con el porcentaje de cobertura vegetal es de carácter causal, aun desconociendo la dirección de la causalidad (si la ocurrencia de flujo superficial permanente causa mayor cobertura vegetal o viceversa), mientras que el valor de la pendiente media con el flujo superficial permanente sería más bien casual, ya que (en el área de estudio) la probabilidad alta de tener flujo superficial permanente con pendiente media alta, se debe a que las microcuencas abarcan grandes y altas superficies, lo que genera dicho valor alto, y no a la pendiente promedio por sí sola.

Dicha causalidad entre vegetación es un ejemplo más de la indisolubilidad de los elementos en los ecosistemas, siendo la vegetación una especie de piedra angular ya que tiene un rol fundamental en múltiples procesos. La importancia de los bosques además posee una retroalimentación positiva para el ecosistema en su conjunto que tiende a potenciarse conforme a un bosque se desarrolla. Por ejemplo, una vez que un bosque empieza a densificarse cada vez tendrá más efectos en la temperatura, debido a la evapotranspiración y generación de sombra, la disminución de temperatura aumenta la cantidad de oxígeno disuelto en un eventual curso de agua bajo el bosque, potenciando la biodiversidad. La existencia de un sotobosque aumenta aún más la retención hídrica y protege los suelos de la erosión. Mayor vegetación consecuentemente aporta mayor cantidad de materia orgánica a los suelos, enriqueciéndolos nutritivamente y favoreciendo el desarrollo de estos (Vargas, 2019). Y así sucesiva y cíclicamente se puede continuar con las interrelaciones e interacciones presentes en los ecosistemas, lo que sin lugar a dudas exige necesariamente un proceder interdisciplinario cuando se trata de la relación de los bosques y el agua.

En la misma línea de la interdisciplinariedad, los afloramientos de agua (fuente de agua para el flujo permanente) es posible que posean un origen distinto al propuesto en el marco conceptual. El hecho que la divisoria topográfica no coincida necesariamente con la divisoria de los acuíferos implica la posibilidad que el agua que escurre por alguna microcuenca analizada haya sido captada fuera de sus límites o que el agua captada en las microcuencas depare a otras cuencas. Además al cruzar las estructuras geológicas con el ciclo hidrológico nacen incertidumbres, en donde ante la existencia de, por ejemplo, una falla geológica, el agua bien puede infiltrarse en esta o bien puede aflorar agua por medio de dicha estructura. Dicha perspectiva complementa la utilizada en esta Memoria, y ayuda a explicar todos los casos en donde el *base flow* parece no tener una fuente aparente. De esa manera el fenómeno se puede estudiar caso a caso con técnicas como el uso de trazadores ambientales o isotópicos los que permiten determinar posibles flujos subterráneos regionales, analizando la carga de minerales o las condiciones de infiltración³⁶, que afloran mediante fallas geológicas.

³⁶ Por ejemplo, mientras aumenta la altitud o la continentalidad, las precipitaciones cada vez son más pobres en ²H, isótopo pesado del hidrógeno, ya que éste precipita antes. Entonces si el agua que aflora en una vertiente es

5.3 Recomendaciones

Es necesario describir y analizar con mayor detalle la vegetación ya que el comportamiento hidrológico es diferente dependiendo tanto de la composición florística como de la estructura del bosque o matorral. Así, es sumamente distinta la respuesta hidrológica de rales matorrales espinosos frente a densos formaciones esclerófilas de fondo de quebrada.

Los resultados del estado erosivo de las microcuencas, junto con los componentes hidrológicos pueden y son funcionales a los trabajos de manejo y planificación de la RNRC. A lo anterior debe sumarse la variable de intervención antrópica, la cual no fue desarrollada en esta Memoria, y presenta en el área de estudio evidentes huellas de la explotación maderera para la producción de carbón que sufrió la cuenca a lo largo de la historia. Dicha explotación fue de carácter intensivo y extensivo. Otro factor de intervención importante es la actividad ganadera, que realizan los llamados “talajeros” de “El Principal”, la cual traslada animales a microcuencas que se clasificaron como frágiles (zona alta de los cajones). Si esa fragilidad se definió en base al daño que puede provocar la salpicadura de las gotas de agua en una precipitación, no se puede obviar los efectos que tiene la pisada de los animales, además de los perjuicios que genera el pastoreo y ramoneo.

Aumentar la muestra, tanto en el número de microcuencas como de cuencas con el fin de ampliar la perspectiva, y enfocar y profundizar el análisis en algunas, ayuda a comprender de mejor manera el fenómeno del *base flow*. Ampliando el horizonte de microcuencas permite entender la ocurrencia del fenómeno en otros ambientes, por ejemplo, el comportamiento en las microcuencas de la Cordillera de la Costa ¿ocurre o no ocurre? ¿Es más frecuente? ¿Es localizado?

Se debe tener una especial atención a la actividad antrópica con el fin de no clasificar un flujo como intermitente cuando en realidad se está extrayendo el agua, fenómeno que aumenta su complejidad al considerar la extracción de agua de los acuíferos.

En el análisis en ciertas microcuencas sería importante incluir observaciones sobre el afloramiento o el origen del flujo, por ejemplo, observando si es de forma artesiana o corresponde a la suma de una gran cantidad de gotas de suelos saturados. Mapeos en detalle sobre la permeabilidad y profundidad de suelos permitirían describir el recorrido del agua y reconocer las zonas de almacenamiento lo que proporciona información valiosa para el manejo hídrico a una escala de microcuenca.

Por último, se recomienda continuar el ejercicio de medición de caudales en la RNRC, ya que si la información de éstos fue muy útil en esta Memoria, lo serán para cualquier otro tipo de estudio relacionado. Si bien, lo ideal en cuanto a mediciones de caudal es la instrumentalización para obtener mediciones cada 5 minutos y así complementarlas con datos

más pobre en ^2H que la precipitación que cae en dicho lugar, implica que la recarga del acuífero que aflora ocurre en lugares con mayor altitud.

Análisis de componentes hidrológicos y su influencia en el tipo de escurrimiento superficial en microcuencas de la Reserva Nacional río Clarillo, Comuna de Pirque, Región Metropolitana de Santiago.

de precipitación (la unidad ya cuenta con una estación meteorológica automática), mediciones simples son bastante útiles. Además sería importante aforar más microcuencas de la zona boscosa, y para las de la zona alta de la cuenca realizar mediciones aunque sea 2 veces al año (idealmente antes y después de la temporada de precipitaciones) para establecer el necesario monitoreo del comportamiento de la escorrentía superficial, sobre todo en el escenario actual donde la tendencia a la disminución de los caudales compromete el abastecimiento de agua en la Unidad³⁷.

³⁷ El informe “Situación de abastecimiento de agua en la Reserva Nacional Río Clarillo”, emitido en diciembre de 2019 por el Departamento de Áreas Silvestres Protegidas, concluye que es necesario cerrar al público la RNRC como medida de cautela y protección.

BIBLIOGRAFÍA

- Araya-Vergara, J., & Börgel, R. (1972). *Definición de parámetros para establecer un Banco Nacional de riesgos y Amenazas Naturales. Criterios para su Diseño*. ONEMI/PNUD Uchile/92/009/A.
- Aristizábal, V., Botero, B., & Vélez, J. (2012). *Manual de hidrología para obras viales basado en el uso de Sistemas de Información Geográfica*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Brüggen, J. (1951). *Informe hidrogeológico sobre el agua subterránea en el fundo El Principal de Pirque*. Santiago de Chile.
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L., & Saldarriaga, J. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- CONAF. (1996). *Plan de Manejo Reserva Nacional Río Clarillo, Documento de trabajo N°247*. Santiago, Chile: Unidad de gestión Patrimonio Silvestre, Corporación Nacional Forestal.
- di Castri, F., & Hajek, E. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Santiago de Chile: Vicerrectoría Académica - Universidad Católica de Chile.
- Díaz, I., Sarmiento, C., Ulloa, L., Moreira, R., Navia, R., Véliz, E., & Peña, C. (2002). Vertebrados terrestres de la Reserva Nacional Río Clarillo, Chile central: representatividad y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural* 75, 433-448.
- Dirección de Vialidad. (2018). *Manual de Carreteras. Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- EMG Consultores S.A. (2013). *Estudio de Impacto Ambiental: Plan Seccional "El Principal"*. Ilustre Municipalidad de Pirque .
- Ferrando, F. (1992). Bases para la confección de cartas de Erodabilidad. *Anales del XIV Congreso Nacional de Geografía y V Jornadas de Cartografía Temática*. (pág. 8). Talca: Universidad de Talca.
- Ferrando, F. (1994). Métodos hidromorfométricos para determinar la erosividad en las cuencas hidrográficas. *Ingeniería Hidráulica en México Vol. IX*, 5-14.
- Fressard, M., Olivier, M., Malet, J.-P., Klotz, S., & Grandjean, G. (2009). Morpho-structure and triggering conditions of the Laval landslide developed in clay-shales, Draix catchment (Alpes-de-Haute-Provence, France) : a first stage toward numerical modelling. *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes : from geomorphologic mapping to dynamic modeling*, (págs. 107-111). Estrasburgo.

- Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in central Chile. *Journal of hydrometeorology*. Volume 14, 1515-1534.
- González, A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la A.G.E n°38*, 311-329.
- Gregory, K., & Walling, D. (1973). *Drainage Basin Form and Process a geomorphological approach*. Londres: Edward Arnold.
- Grésillon, J. (1994). *Contribution a l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants. Approches numériques et expérimentales a différentes échelles*. . Grenoble, Francia: Universidad Josph Fourier.
- Guitelman, A., & Leiva, A. (s/f). Capítulo 2: Guía de conceptos hidrológicos. En A. Guitelman, & A. Leiva, *Hidrología e Hidráulica Vial*. Buenos Aires: Facultad de Ingeniería UBA.
- Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (s/f). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica*. Universidad Politecnica de Valencia.
- Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (s/f). *Morfología de cuencas hidrográficas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Instituto Nacional de Ecología. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro*. Ciudad de México.
- Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation. A system of quantitative pedology*. New York: McGraw-Hill.
- Lira, P. (1986). Diagnóstico de riesgo de erosión en la Reserva Nacional Río Clarillo. Memoria para optar al Título de Geógrafo. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Little, C., & Lara, A. (2010). Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Bosque* 31(3), 175-178.
- Mateos, B., & Schnabel, S. (1998). Medición de la interceptación de las precipitaciones por la encina (*Quercus rotundifolia* Lam.): Metodología e instrumentalización. *Norba Geografía*, 95-112.
- Meunier, M. (1996). La cubierta forestal y las crecidas en las pequeñas cuencas de montaña. *Unasylva*, vol. 47, N°185, p. 29-37.
- Meza, M., Rodríguez, A., Corvacho, O., & Tapia, A. (2014). Análisis morfométrico de microcuencas afectadas por flujos de detritos bajo precipitación intensa en la Quebrada de Camiña, Norte Grande de Chile. *Diálogo Andino N°44*, 15-24.

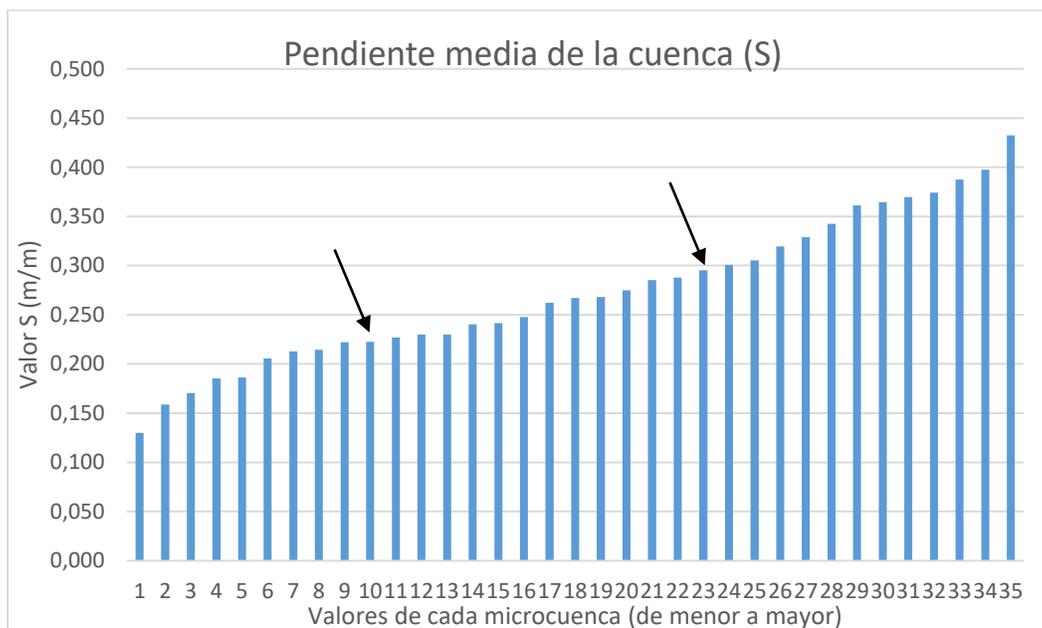
- Monsalve, G. (2002). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Niemeyer, H., Bustamante, R., Simonetti, J., Teillier, S., Fuentes-Contreras, E., & Mella, J. (2002). *Historia Natural de la Reserva Nacional Río Clarillo. Un espacio para aprender Ecología*. Santiago de Chile.
- Oyarzún, J. (1971). *Contribution a l'etude Geochimique des roches volcaniques et plutoniques du Chili*. Tesis Doctoral. Universidad de París.
- Pidwirny, M. (2006). "The hydrologic Cycle" en *Fundamentals of Physical Geography 2nd Edition*.
- Rivano, S., Godoy, E., Vergara, M., & Villarroel, R. (1990). Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile central (32-34°S). *Revista Geológica de Chile. Vol. 17 No.2* , 205-214.
- Sellés, D., & Gana, P. (2001). Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal, regiones Metropolitana de Santiago y del libertador General Bernardo O'Higgins. *Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geológica Básica*, 30p 1 mapa escala 1:100.000.
- Thiele, R. (1980). Hoja Santiago. Región Metropolitana. En *Carta Geológica de Chile. Escala 1:250.000*. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Urquidí, J. (1977). *Geología y condiciones geotéctónicas del Proyecto Embalse Pirque*. Tesis para optar al título de Geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Vargas, R. (2019). Agua y Bosque. *Material del curso "Gestión iintegrada de cuencas hidrográficas"*. Universidad de Chile.
- Vélez, J., & Botero, A. (2011). Estimación del Tiempo de Concentración y Tiempo de Rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. *Dyna Nro 165*, 58-71.
- Young, A. (1977). *Slopes*. London : Longman Group Limited .
- Zorondo-Rodríguez, F. (2013). *Propuesta de homologación de la tipología de áreas protegidas de Chile y categorías propuestas por la Union Internacional para la Conservación de la Naturaleza*. Santiago de Chile: Proyecto de creación de un Sistema Nacional Integral de Áreas Protegidas para Chile: Estructura Financiera y Operacional.

ANEXOS

5.4 Anexo n°1 Criterio de clasificación para la pendiente media del cauce principal.

El Gráfico 11 representa el criterio de clasificación para la Pendiente media del cauce principal, en la cual se observaron puntos de inflexión en el trazado de los valores ordenados de menor a mayor, así, las flechas negras indican los cortes para la clasificación baja, media y alta. Dichos puntos de inflexión describen los tres grupos de mejor manera frente a métodos cuantitativos que se ven influenciados por el mínimo y el máximo, los que tienen marcadas diferencias con su sucesor y antecesor respectivamente.

Gráfico 11 Criterio de clasificación para la Pendiente media de la cuenca



Fuente: Elaboración propia.

5.5 Anexo n°2 Tabla área precipitación sólida

Microcuenca	Área (km ²)	Área de precipitación sólida (%)
3	11,91	9,7%
3a	5,02	13,4%
3b	1,74	10,2%
3c	2,71	11,4%
5	14,57	8,4%
5a	9,88	11,0%
5b	2,71	5,1%
6	4,71	13,3%

Análisis de componentes hidrológicos y su influencia en el tipo de escurrimiento superficial en microcuencas de la Reserva Nacional río Clarillo, Comuna de Pirque, Región Metropolitana de Santiago.

7	4,29	14,6%
8	3,13	12,8%
9	2,08	25,9%
10	1,14	36,5%
11	5,29	62,2%
12	3,45	64,6%
13	2,10	71,2%
14	2,38	37,6%
15	0,82	5,1%
16	1,43	13,3%
17	2,42	53,1%
18	10,34	96,5%
18a	2,54	100,0%
19	3,51	88,4%
20	2,22	82,7%
21	0,34	49,1%
22	1,24	72,9%
20	2,22	82,7%
21	0,34	49,1%
22	1,24	72,9%

Fuente: Elaboración propia