

Universidad Nacional del Comahue
Facultad de Ingeniería
Departamento de Geología y Petróleo



Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas

ESTUDIO DE RIESGO HÍDRICO EN CUENCAS ALUVIONALES DE LAGO LOS BARREALES, PROVINCIA DEL NEUQUÉN

Autora: Gómez Díaz, Ariadna

Director: Gatica, Jose Ricardo

Co-directora: Dufilho, Ana Cecilia



Universidad Nacional del Comahue
Facultad de Ingeniería
Departamento de Geología y Petróleo
Licenciatura en Ciencias Geológicas

ESTUDIO DE RIESGO HÍDRICO EN CUENCAS ALUVIONALES DE LAGO LOS BARREALES, PROVINCIA DEL NEUQUÉN

Trabajo Final de Licenciatura presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue como parte de los requisitos para la obtención del título de:
LICENCIADA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Autora: Gómez Díaz, Ariadna Andrea - Legajo ING-4332

Director: Lic. Gatica, Jose Ricardo – Cátedra de Geotecnia. Departamento de Geología y Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

Co-directora: Dra. Dufilho, Ana Cecilia – Cátedra de Hidrogeología. Departamento de Geología y Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

Jurado 1: Dr. Horne, Federico

Jurado 2: Ing. Kohler, Santiago

Jurado 3: Lic. Minutella, Miriam

Neuquén Capital, Argentina.

Año 2021



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

RESUMEN

Las instalaciones del Centro Paleontológico Lago Barreales (CePaLB) de la Universidad Nacional del Comahue ubicadas sobre la costa norte del lago Los Barreales en el departamento Confluencia, dentro de la región extra-andina de la provincia del Neuquén, se encuentran sometidas a procesos de escorrentía debido a la presencia de cuencas aluvionales. Estas cuencas de clima árido generan avenidas, ante eventos extremos de precipitaciones, que potencialmente podrían afectar las instalaciones. El objetivo principal de este trabajo final de licenciatura consiste en estudiar el riesgo hídrico aluvional que producen las cuencas hidrológicas que afectan, con su dinámica hídrica, las instalaciones del CePaLB a través de la caracterización hidrológica de las mismas, estimación de caudales máximos para un periodo de retorno de 100 años, modelado hidráulico bidimensional y evaluación de la profundidad de socavación de la crecida de diseño.

La metodología empleada para el desarrollo del trabajo involucró el relevamiento aerofotogramétrico por medio de vuelo dron con una resolución espacial de 0,5 m por pixel, relevamiento de campo de la zona de estudio con reconocimiento y muestreo de suelos, delimitación y determinación de las características morfométricas de las cuencas mediante la utilización de Sistema de Información Geográfica, estimación de caudales máximos a través del método racional, modelación hidráulica de la crecida de diseño utilizando el *software* HEC-RAS y el cálculo de la erosión generalizada a través de la ecuación de Listchvan-Levediev.

Se delimitaron 52 cuencas de áreas menores a 2 ha y pendientes pronunciadas (superiores al 20%), con caudales máximos que no superan el 1 m³/s para un período de recurrencia de 100 años. Los resultados de la modelación hidráulica indican láminas de escorrentía con tirantes de 0,2 metros y velocidades de flujo de 0,8 m/s. Se obtuvo una profundidad de socavación de la crecida de diseño menor a 0,3 metros.

Se concluye que las instalaciones del CePaLB presentan bajo riesgo de erosión encauzada, únicamente los caminos de acceso pueden sufrir cortes debido a procesos aluvionales. En función del análisis de la pendiente natural del terreno, se realizaron las recomendaciones pertinentes para la protección de las instalaciones y se propusieron obras de mitigación para el sector sur del área de estudio. La erosión hídrica podría atenuarse restringiendo el encauzamiento de la lámina de escorrentía sobre el camino mediante bordos con el fin de desviar y redireccionar el flujo de agua hacia su drenaje natural.

Palabras claves: Riesgo hídrico, riesgo aluvional, parámetros morfométricos, modelación hidráulica bidimensional.



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

ABSTRACT

The installations of the Lago Barreales Paleontological Center (CePaLB) of the Comahue National University, located on the north shore of the lake Los Barreales in the Confluencia department, within the extra-Andean region of the Neuquén province, are subject to runoff processes due to the presence of alluvial basins. These basins of arid climate generate floods, in the face of extreme rainfall events, which could potentially affect the installations. The main objective of this final degree project is to study the alluvial water risk produced by the hydrological basins that affect, with their water dynamics, the CePaLB installations through their hydrological characterization, estimation of maximum flows for a return period of 100 years, two-dimensional hydraulic modeling, and evaluation of the depth of scour of the design flood.

The methodology used for the development of the work involved the aerialphotogrammetric survey by means of the drone flight with a special resolution of 0.5 m pixel, field survey of the study area with recognition and soil sampling, delimitation and determination of the morphometric characteristics of the basins through the use of a Geographic Information System, estimation of maximum flows through the rational method, hydraulic modeling of the design flood using the HEC-RAS software and the calculation of generalized erosion through the Listchvan-Levediev equation.

52 basins of areas smaller than 2 ha and steep slopes (greater than 20%) were delimited, with maximum flows that do not exceed $1 \text{ m}^3/\text{s}$ for a recurrence period of 100 years. The results of the hydraulic modeling indicate runoff sheets with depths of 0.2 meters and flow velocities of 0.8 m/s . A scour depth of the design flood of less than 0.3 meters was obtained.

It is concluded that the CePaLB installations present a low risk of channeled erosion, only the access roads may suffer cuts due to alluvial processes. Based on the analysis of the natural slope of the land, the pertinent recommendations were made for the protection of the installations and mitigation works were proposed for the southern sector of the study area. Water erosion could be mitigated by restricting the channeling of the runoff sheet on the road through borders in order to divert and redirect the flow of water towards its natural drainage.

Keywords: Water hazard, alluvial risk, morphometric parameters, two-dimensional hydraulic modeling.



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

AGRADECIMIENTOS:

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores Jose y Cecilia por su guía, apoyo y tiempo dedicado durante la realización del presente trabajo.

A la Universidad Nacional del Comahue y, en especial, a los profesores de la carrera por enseñarme y brindarme sus conocimientos para que pueda desarrollarme como profesional.

Al jurado evaluador, que con sus observaciones y sugerencias permitieron mejorar este trabajo.

A mi país, por darme la posibilidad de estudiar en la universidad pública y gratuita.

A todas las personas, empresas e instituciones que con su ayuda colaboraron en la realización de este trabajo. Especialmente a Proeco SRL por realizar el relevamiento aerofotométrico y al laboratorio Geoneuquén por llevar a cabo los análisis granulométricos.

A mis padres, por todo el esfuerzo, sacrificio y apoyo durante estos años para que pueda estudiar y formarme como profesional.

A mis amigos, por el apoyo emocional y estar durante estos años.

A mis geocompañeros, por los conocimientos compartidos, las horas de estudio y los buenos momentos.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMIENTOS:	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	1
1.2. Objetivos específicos.....	1
2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y ANTECEDENTES	3
2.1. Ubicación geográfica.....	3
2.2. Antecedentes	5
3. MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO	7
3.1. Relevamiento de campo	7
3.2. Delimitación y caracterización de cuencas aluvionales	7
3.2.1. Introducción	7
3.2.2. Delimitación de cuencas.....	8
3.2.3. Caracterización de cuencas y red hidrográfica.....	8
3.2.3.1. Características generales de las cuencas.....	9
3.2.3.2. Características físicas de forma de las cuencas	9
3.2.3.3. Características físicas de relieve de las cuencas.....	10
3.2.3.4. Características de la red hidrográfica	12
3.3. Hidrología	14
3.3.1. Introducción	14
3.3.2. Potencial de escorrentía.....	15
3.3.2.1. Método del Número de Curva	16
3.3.2.1.1. Estimación del CN mediante Sistema de Información Geográfica	18
3.3.3. Tormenta de diseño	20
3.3.3.1. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia.....	20
3.3.3.2. Datos de precipitación	21
3.3.4. Transformación precipitación-escorrentía.....	21
3.3.4.1. Método racional.....	21
3.3.4.1.1. Estimación de C mediante Sistema de Información Geográfica	23
3.4. Modelación hidráulica.....	23
3.4.1. Introducción	23
3.4.2. HEC-RAS.....	24
3.4.2.1. Datos requeridos.....	25
3.5. Erosión generalizada	31



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

3.5.1.	Introducción	31
3.5.2.	Método de Listchvan-Levediev.....	32
3.5.3.	Estimación de la erosión generalizada con Sistema de Información Geográfica	33
4.	CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS ZONALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	34
4.1.	Clima.....	34
4.2.	Geología	34
4.3.	Geomorfología	38
4.4.	Suelos	40
4.5.	Pendientes	42
4.6.	Drenaje y cuencas vertientes	44
4.7.	Vegetación.....	44
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
5.1.	Relevamiento de campo	45
5.2.	Delimitación y caracterización de cuencas aluvionales	51
5.2.1.	Delimitación de cuencas.....	51
5.2.2.	Caracterización de cuencas y red hidrográfica.....	53
5.2.2.1.	Características generales de las cuencas.....	53
5.2.2.2.	Características físicas de forma de las cuencas	54
5.2.2.3.	Características físicas de relieve de las cuencas.....	56
5.2.2.4.	Características de la red hidrográfica	59
5.3.	Hidrología	61
5.3.1.	Método del Número de Curva	61
5.3.2.	Tormenta de diseño	63
5.3.3.	Transformación precipitación-escorrentía.....	63
5.4.	Modelación hidráulica.....	67
5.5.	Erosión generalizada	70
5.6.	Obras de mitigación propuestas	72
5.6.1.	Efecto de las obras propuestas.....	75
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	85
8.	ANEXO	91
8.1.	Coeficiente n de Manning	91
8.2.	Análisis granulométricos.....	95
8.3.	Curvas hipsométricas	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ubicación del área de estudio	4
Figura 3.1. Modelos de curvas hipsométricas según Strahler (Fuente: Villodas, 2008)	12
Figura 3.2. El ciclo hidrológico y sus fases (Fuente: Chow <i>et al.</i> , 1994)	15
Figura 3.3. Modelo de Elevación Digital del Terreno y geometría del mallado	27
Figura 3.4. Detalles de la geometría del mallado (números: indican la condición de entrada de cada cuenca; líneas rosadas: indican los sectores donde el mallado es más pequeño).....	27
Figura 3.5. Selección de los resultados de la corrida y definición de los tiempos de cómputo..	28
Figura 3.6. Coeficiente n de Manning para distintas superficies del área de estudio.....	30
Figura 4.1. Esquema litoestratigráfico del Grupo Neuquén (Fuente: Garrido, 2011)	36
Figura 4.2. Unidades litológicas del área de estudio	37
Figura 4.3. Geomorfología del área de estudio.....	39
Figura 4.4. Unidades de suelo del área de estudio	41
Figura 4.5. Mapa de pendientes del área de estudio.....	43
Figura 5.1. a) Sondeo con barreno en el cauce de la cuenca C52. b) Relleno de gravas y derrubios en el cauce aguas abajo de la cuenca C52.....	47
Figura 5.2. a) Desarrollo de <i>badlands</i> en la cuenca C39 (lado derecho de la fotografía). b) Tubificación (<i>piping</i>) en la cuenca C39.....	47
Figura 5.3. Relleno del cauce aguas abajo de la cuenca C39	48
Figura 5.4. a) Erosión laminar en los cauces de las cuencas C33 y C34. b) Relleno antrópico del cauce aguas abajo de las cuencas C33 y C34	48
Figura 5.5. a) Relleno antrópico del cauce aguas abajo de la cuenca C23. b) Gavión que afecta el cauce aguas abajo de la cuenca C23.....	49
Figura 5.6. Relleno antrópico del cauce aguas abajo de las cuencas C20 y C21	49
Figura 5.7. Gavión que afecta al cauce aguas abajo de las cuencas C18 y C19.....	50
Figura 5.8. Sondeo con barreno y toma de muestra en el cauce de la cuenca C08.....	50
Figura 5.9. Sondeo con barreno en el cauce de la cuenca C03.....	51
Figura 5.10. Cuencas delimitadas y red de drenaje del área de estudio	52
Figura 5.11. Valores de Número de Curva, para una condición media de humedad antecedente, corregidos en función de la pendiente	62
Figura 5.12. Valores de coeficiente de escorrentía C para un período de retorno de 100 años..	64
Figura 5.13. Tirante de la lámina de agua (en metros) para la crecida máxima de diseño para 100 años de recurrencia.....	68
Figura 5.14. Velocidad de flujo de agua (en m/s) para la crecida máxima de diseño para 100 años de recurrencia	69
Figura 5.15. Erosión generalizada (en metros) del área de estudio.....	71
Figura 5.16. Obras de mitigación propuestas (bordos) sobre el camino (las flechas indican hacia donde se desviaría el flujo de agua)	74
Figura 5.17. Tirante de la lámina de agua (en metros) para la crecida de diseño para 100 años de recurrencia con la intervención de las obras propuestas	77

Figura 5.18. Velocidad de flujo de agua (en m/s) para la crecida de diseño para 100 años de recurrencia con la intervención de las obras propuestas	78
Figura 5.19. Erosión generalizada (en metros) del área de estudio con la intervención de las obras propuestas	79
Figura 5.10. Caudal en los cauces analizados (líneas negras representan los hidrogramas estudiados)	80
Figura 5.21. Caudal en los cauces analizados (líneas negras representan los hidrogramas estudiados)	80
Figura 5.22. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C31 (cauce C31) para la situación actual y la situación con obra	81
Figura 5.23. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C34 (cauce C34) para la situación actual y la situación con obra	81
Figura 5.24. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C39 (cauce C39) para la situación actual y la situación con obra	81
Figura 5.25. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C50 (cauce C50) para la situación actual y la situación con obra	82
Figura 5.26. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C52 (cauce C52) para la situación actual y la situación con obra	82
Figura 8.1. Análisis granulométrico del cauce que se encuentra aguas abajo de la cuenca C52 (muestra C1-M1).....	95
Figura 8.2. Análisis granulométrico del cauce de la cuenca C52 (muestra C1-M2).....	95
Figura 8.3. Análisis granulométrico del cauce formado por la confluencia de los cauces que se hallan aguas abajo de las cuencas C39 y C33-C34 (muestra C4-5-M3).....	96
Figura 8.4. Análisis granulométrico del cauce de la cuenca C27 (muestra C7-M4).....	96
Figura 8.5. Análisis granulométrico del cauce de la cuenca C08 (C11-M5)	97
Figura 8.6. Análisis granulométrico del cauce de la cuenca C03 (muestra C13-M6).....	97
Figura 8.7. Curvas hipsométricas de las cuencas C01, C02, C03 y C04	98
Figura 8.8. Curvas hipsométricas de las cuencas C05, C06, C07 y C08.....	98
Figura 8.9. Curvas hipsométricas de las cuencas C09, C10, C11 y C12.....	98
Figura 8.10. Curvas hipsométricas de las cuencas C13, C14, C15 y C16	99
Figura 8.11. Curvas hipsométricas de las cuencas C17, C18, C19 y C20	99
Figura 8.12. Curvas hipsométricas de las cuencas C21, C22, C23 y C24	99
Figura 8.13. Curvas hipsométricas de las cuencas C25, C26, C27 y C28	100
Figura 8.14. Curvas hipsométricas de las cuencas C29, C30, C31 y C32	100
Figura 8.15. Curvas hipsométricas de las cuencas C33, C34, C35 y C36	100
Figura 8.16. Curvas hipsométricas de las cuencas C37, C38, C39 y C40	101
Figura 8.17. Curvas hipsométricas de las cuencas C41, C42, C43 y C44	101
Figura 8.18. Curvas hipsométricas de las cuencas C45, C46, C47 y C48	101
Figura 8.19. Curvas hipsométricas de las cuencas C49, C50, C51 y C52	102



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Valores de CN de escorrentía para cuencas aluvionales de la provincia del Neuquén en condiciones medias de humedad antecedente (Fuente: Fernández <i>et al.</i> , 1980)	20
Tabla 3.2. Valores de precipitaciones para una recurrencia de 100 años en Paso de los Indios (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén).....	21
Tabla 3.3. Valores de coeficiente de escorrentía superficial C (Fuente: Chow <i>et al.</i> , 1988)	23
Tabla 3.4. Características del mallado general	26
Tabla 3.5. Valores de n de Manning estimados.....	29
Tabla 4.1. Clases de gradiente de pendiente (Fuente: FAO, 2009)	42
Tabla 5.1. Sitios relevados en el área de estudio	45
Tabla 5.2. Parámetros generales de las cuencas del área de estudio	54
Tabla 5.3. Parámetros físicos de forma de las cuencas del área de estudio.....	55
Tabla 5.4. Parámetros físicos de relieve de las cuencas del área de estudio	57
Tabla 5.5. Parámetros de la red hidrográfica de las cuencas del área de estudio (N/A: No Aplica).....	60
Tabla 5.6. Números de Curva elegidos para el estudio hidrológico.....	61
Tabla 5.7. Parámetros hidrológicos y caudales máximos de las cuencas del área de estudio	66
Tabla 5.8. Caudales máximos para los cauces aguas abajo para la condición actual y la condición con obras de mitigación.....	76
Tabla 8.1. Valores de coeficiente de rugosidad n de Manning (Fuente: Chow, 1994)	91

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental para el desarrollo de la vida y se considera un recurso hídrico importante desde el punto de vista humano ya que presenta grandes beneficios como su uso doméstico, industrial, agrícola, minero, recreativo, entre otros. Sin embargo, el agua puede constituir una amenaza si se tienen en cuenta los fenómenos naturales, que pueden generar grandes daños sobre los seres vivos, la sociedad y el ambiente ocasionando pérdidas de vidas, destrucción o pérdida de bienes, daños económicos y a infraestructuras, y alteraciones en el ambiente (Durante, 2015). Dentro de los fenómenos naturales hídricos o de base hidrológica, que pueden generar una amenaza, se encuentran las crecidas, inundaciones, lluvias extremas, nevadas intensas, entre otros. Por lo expuesto anteriormente, se puede definir el riesgo hidrológico como el peligro emergente, para la vida humana, el territorio, las áreas urbanas, las zonas industriales y rurales y la infraestructura, de la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos (Fattorelli y Fernández, 2011).

El riesgo aluvional se presenta ante la generación de un aluvión y se caracteriza por procesos erosivos severos. Un aluvión o avenida aluvional es un flujo de agua cargado con materiales sedimentarios, extremadamente veloz, que aparece como consecuencia de lluvias intensas y de corta duración en zonas áridas y semiáridas con pendientes pronunciadas y escasa vegetación que permiten el desarrollo de cauces activos solo durante la tormenta. A su vez, el clima árido condiciona la existencia de escasa vegetación lo que facilita el transporte de grandes volúmenes de material durante las tormentas (Dufilho *et al.*, 2001; Farias, 2009; Marizza *et al.*, 2010).

El proceso de erosión se ve influenciado fuertemente por la pendiente que condiciona la velocidad del agua. La erosión hídrica aumenta el escurrimiento de agua superficial a causa de la reducción de la tasa de infiltración del suelo debido lluvias previas y, en consecuencia, se reduce el almacenamiento de agua en el suelo y el crecimiento de vegetación, lo cual disminuye la cubierta protectora del suelo incrementando la degradación del mismo. Es decir, aumentos en la escorrentía se interpretan en incrementos de la erosión (Burgos, 2019).

Las instalaciones del Centro Paleontológico Lago Barreales (CePaLB) de la Universidad Nacional del Comahue se encuentran sometidas a procesos de escorrentía debido a la presencia de cuencas aluvionales de áreas menores a 1 ha y pendientes pronunciadas que se desarrollan al pie de la barda. Estas cuencas, desarrolladas en zonas áridas, generan avenidas que, ante eventos extremos de precipitaciones, potencialmente podrían afectar las instalaciones. En función de lo expuesto, este trabajo final de licenciatura tiene como finalidad estudiar y comprender el riesgo aluvional que afecta a las instalaciones del CePaLB a través de la estimación de los caudales máximos para un periodo de retorno de 100 años y la realización de una modelación hidráulica mediante la cual se obtienen parámetros que permiten evaluar el comportamiento de cada cuenca. La velocidad de la escorrentía y la altura de la lámina (tirante) permiten estimar la erosión generalizada del área.

1.1. Objetivo general

Estudiar el riesgo hídrico que producen las cuencas hidrológicas que afectan, con su dinámica hídrica, las instalaciones del Centro Paleontológico Lago Barreales (CePaLB).

1.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros morfométricos, de forma e hidrológicos de las cuencas identificadas en la zona de estudio y caracterización hidrológica de las mismas.
- Estimar los caudales máximos generados para una lluvia de diseño de período de recurrencia de 100 años.
- Evaluar la profundidad de socavación de la crecida de diseño.



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

- En función del análisis de la pendiente natural del terreno, realizar las recomendaciones para la protección de las instalaciones y, de ser necesario, proponer obras de mitigación.

La estructura de este trabajo final de licenciatura se resume en los siguientes capítulos:

CAPITULO I: Introducción, planteamiento del problema y justificación del estudio, se definen los objetivos generales y específicos.

CAPITULO II: Se expone la ubicación del área de estudio y los antecedentes relacionados a estudios de riesgo aluvional.

CAPITULO III: Marco teórico-metodológico, se explican los conceptos teóricos necesarios y se especifica la metodología seguida para el desarrollo del trabajo.

CAPITULO IV: Se describen las características biofísicas zonales del área de estudio.

CAPITULO V: Se exponen los resultados obtenidos del estudio hidrológico, la caracterización de cuencas, la estimación de caudales, la modelación hidráulica, la erosión generalizada y las medidas de mitigación propuestas.

CAPITULO VI: Se presentan las conclusiones elaboradas a partir de los resultados obtenidos y las recomendaciones para las obras de mitigación necesarias.

CAPITULO VII: Se expone la bibliografía utilizada durante el desarrollo del trabajo.

CAPITULO VIII: Se presentan los anexos.



2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y ANTECEDENTES

2.1. Ubicación geográfica

El área de estudio corresponde a las instalaciones del Centro Paleontológico Lago Barreales (CePaLB) que se encuentra ubicado sobre la costa norte del lago artificial Los Barreales en el departamento Confluencia, provincia del Neuquén, a los 38° 27' 08,5'' de latitud Sur y 68° 43' 31,8'' de longitud Oeste, 90 km al noroeste de la localidad de Neuquén (Figura 2.1). Se accede al yacimiento por la ruta provincial N°7, desde la ciudad de Neuquén hacia el Norte; en el kilómetro 25 se empalma con la ruta provincial N°51, por la que se deben recorrer 65 km.

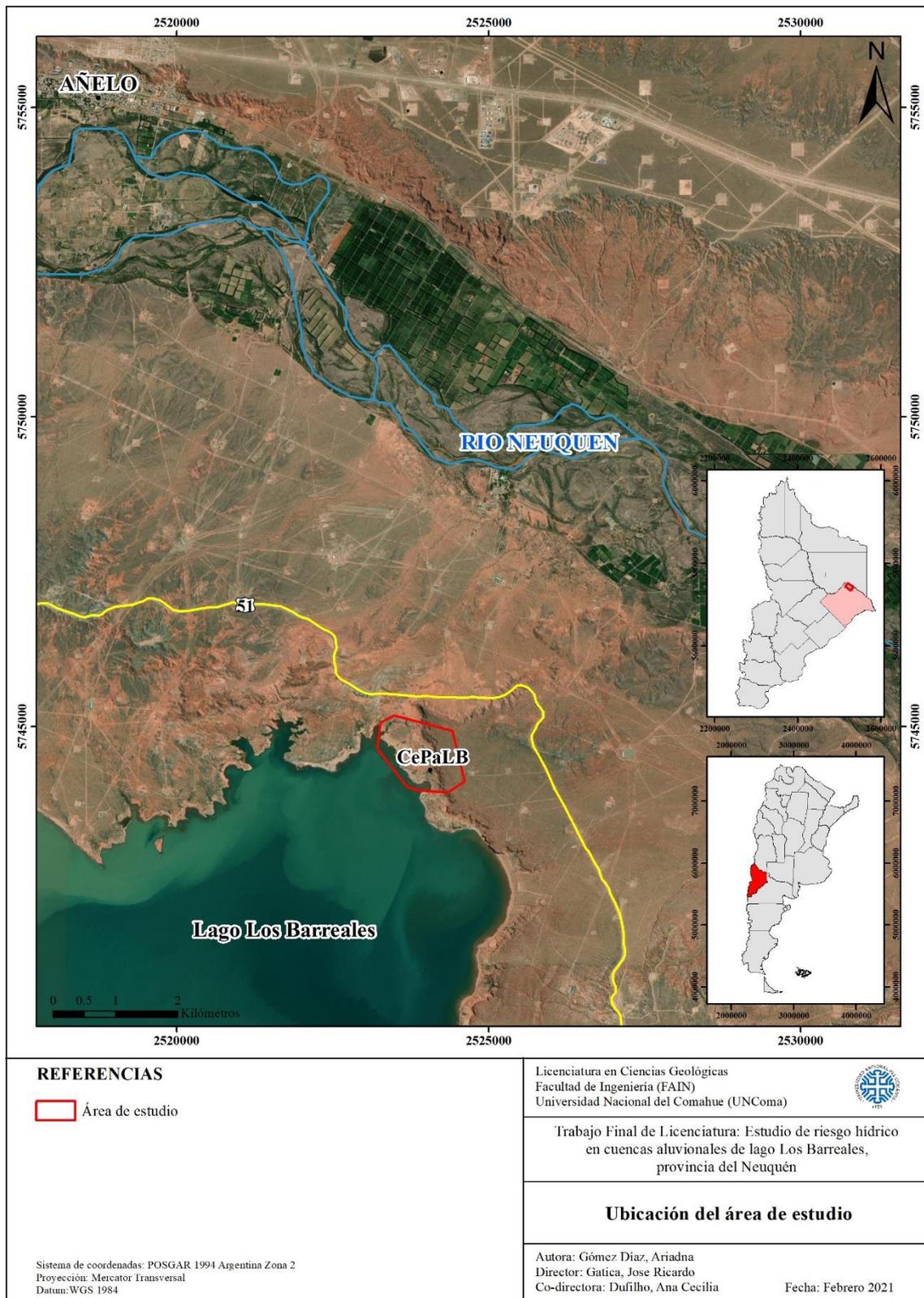


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio

2.2. Antecedentes

La zona de estudio, correspondiente a las instalaciones del Centro Paleontológico Lago Barreales (CePaLB), no cuenta, hasta la fecha, con estudios de riesgo hídrico aluvional y regionalmente los trabajos realizados se limitan a estudios hidrológicos para la estimación de caudales sin llegar a análisis hidráulicos para la estimación de áreas expuestas al riesgo aluvional. Dentro de la provincia del Neuquén, Rabassa (1977) fue uno de los primeros en estudiar cuencas aluvionales por medio de la geología de superficie y la cobertura vegetal para la determinación de valores de Número de Curva (CN) y la realización de mapas de este parámetro. También se han realizado estudios de control aluvional como los presentados por Fernández *et al.* (1995) y Dufilho *et al.* (2001). Los primeros llevaron a cabo un estudio hidrológico de cuencas aluvionales a través de sus características físicas, climáticas y de vegetación para el cálculo de caudales y volúmenes de crecientes para diferentes tiempos de retorno con el fin de ser usados en el dimensionamiento hidráulico de estructuras de desagües. Mientras que, Dufilho *et al.* (2001) realizaron una simulación hidrológica de avenidas por medio de un modelo matemático con el fin de obtener hidrogramas de crecidas para distintas alternativas de obras de control, para lo cual se estimó una lluvia de diseño y se utilizó un Sistema de Información Geográfica (GIS). Cabe mencionar también la realización de estudios de erosión hídrica del suelo (Saad y Marizza, 2007; Marizza *et al.*, 2010; Dufilho *et al.*, 2011) basados en ecuaciones de pérdida de suelo y GIS, aunque Marizza *et al.* (2010) también utilizaron un modelo matemático hidrológico para la obtención de hidrogramas de crecidas para diferentes periodos de retorno.

Dentro de los estudios de riesgo hídricos del país, resaltan los trabajos de riesgo aluvional realizados en la provincia de Mendoza para lo cual se han llevado a cabo estudios hidrológicos e hidráulicos para el control aluvional de crecidas a través de modelos matemáticos de simulación (Burgos y Vargas Aranibar, 2008a; Burgos y Vargas Aranibar, 2008b; Farias, 2009). Se han realizados estudios de riesgo hídrico por inundaciones por crecidas de cauces (Maza y Burgos, 2007; Burgos 2014), riesgo por cambios de usos de suelos, variabilidad climática e incendios como el presentado por Burgos (2019) y riesgo hídrico ante una potencial rotura de presa (Maza *et al.*, 2014; Burgos y Salcedo; 2016a; Burgos y Salcedo, 2016b). Catamarca es otra de las provincias que cuenta con varios estudios de riesgo hídrico por crecidas de ríos como los trabajos realizados por Maza *et al.* (1995), Maza *et al.* (2012), Burgos *et al.* (2015), Burgos y Salcedo (2016b), Burgos *et al.* (2017), entre otros, a través de modelado hidrológico-hidráulico para la obtención de áreas inundables. En Córdoba, se han llevado a cabo estudios de riesgo hídrico por inundación por crecidas de cauces con la finalidad de determinar los niveles de inundación (Durante, 2015; Sanchez Conci, 2016).

A nivel internacional se cuenta con estudios de riesgo hídrico por inundaciones, por avenidas y desbordes de ríos, por crecidas aluvionales e incluso por rotura de estructuras hidráulicas ante avenidas extremas. En Chile, Valdés-Pineda *et al.* (2017) realizaron una simulación de una crecida aluvional a través de un modelo matemático hidráulico para generar mapas de alturas de inundación que son utilizados para el desarrollo de mapas de riesgos. Perú es un país que se encuentra continuamente afectado por inundaciones debido a la estacionalidad de las precipitaciones en la región andina y a la presencia del fenómeno El Niño, por lo cual se han realizado varios estudios de riesgo hídrico por inundaciones y por crecidas y desbordes de ríos (Escarcena Quiza, 2012; Quispe Torres y Sullca Otazu, 2015; Apaza Sejje, 2018; Cordova Diaz, 2018; Sierra Lopinta, 2018; García Tocto, 2019; Oyola Romero y Medina Troncos, 2019) mediante el modelado hidrológico-hidráulico para la obtención de caudales máximos y la altura del agua para diferentes periodos de retorno con el fin de determinar las áreas con riesgo de inundación. Por otro lado, también se cuenta con estudios riesgo hídrico de inundación por riesgo de falla de una estructura de defensa ante avenidas máximas realizando un modelado hidráulico con el objeto de identificar el caudal máximo que puede soportar la estructura y determinar las zonas propensas a inundaciones (Mayta Rojas y Mamani Maquera, 2018). En Colombia, Pérez Romo y Venegas Sandoval (2016) y Ramos Moreno y Pacheco Fontalvo (2017) estudiaron el riesgo hídrico de la cuenca del río Frío ante eventos de crecidas mediante modelaciones hidrológicas e hidráulicas para la obtención de caudales máximos y alturas de las láminas de agua.



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

En España, se llevaron a cabo análisis de riesgo de inundación por avenidas torrenciales a través de modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos para la delimitación de áreas inundables (Etxeberría Ramírez *et al.*, 2002; García Lorenzo y Conesa García, 2011; Díaz de la Cruz, 2012).

3. MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO

3.1. Relevamiento de campo

Con el objetivo de identificar y obtener un mejor conocimiento de las cuencas del área de estudio se realizó una salida de campo.

Se recorrió el área de estudio con el fin de determinar la geología y geomorfología de la zona y, en función de éstas, obtener información base de los suelos.

Se evaluaron las condiciones hidrológicas del área (capacidad de infiltración y escurrimiento superficial) y el estado de las instalaciones y estructuras de defensa. Se observó, también, el tipo cobertura vegetal de la zona.

Se consultó con los residentes acerca de las zonas vulnerables a crecidas aluvionales y los daños causados por estas.

Se efectuó un relevamiento de los cauces que afectan a las instalaciones analizando el tipo de erosión sobre el lecho de los mismos, para lo cual se llevó a cabo una evaluación del daño visible, tales como surcos, cárcavas y acumulaciones, producto de lluvias intensas.

Se realizó un análisis cualitativo textural de los sedimentos y se efectuaron sondeos de suelos mediante barreno y pala para la toma de muestra y con el fin de determinar granulometría del lecho y la profundidad del relleno del mismo de los cauces más importantes.

Esta información fue utilizada en la modelación de los caudales de diseño y la estimación de riesgos hidrológicos.

3.2. Delimitación y caracterización de cuencas aluvionales

3.2.1. Introducción

Una cuenca hidrográfica es toda el área o superficie del terreno que aporta aguas de escorrentía a un mismo punto de desagüe o punto de cierre, es decir, las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural delimitada por la existencia de la divisoria de aguas y fluyen hacia el punto de salida a través de la red de cauces principales. La delimitación de una cuenca hidrográfica por su divisoria de aguas, establece un sistema de drenaje, con un río y sus afluentes, por el cual la precipitación caída corre por su superficie y se concentra en un punto de desembocadura del cauce. La cuenca recoge la precipitación, la transforma en escurrimientos y los conduce hasta el punto de salida. Este transporte va acompañado de pérdidas de agua y retardos en el escurrimiento debido a la ocurrencia de varios fenómenos que condicionan la relación entre la precipitación y la escorrentía, y que están controlados por las características físicas de la cuenca. Estas características se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc. Por lo tanto, la forma, relieve, naturaleza edáfica y cubierta vegetal de la cuenca influyen directamente tanto en el volumen de los escurrimientos como en su distribución en el tiempo (Aparicio Mijares, 1992; Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Villodas, 2008; Gaspari *et al.*, 2013).

El límite de una cuenca hidrográfica se define a partir del parteaguas, divisoria de aguas o *divortium acuarum* que son los puntos de mayor nivel topográfico que definen la dirección de circulación del escurrimiento superficial, conocidos también como interfluvio. El parteaguas es una línea que divide a cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación que, en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca. (Villón, 2002; Gaspari *et al.*, 2013).

3.2.2. Delimitación de cuencas

La delimitación de las cuencas y la definición de la red de drenaje se realizó mediante el procesamiento de la información geográfica proporcionada por el Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM), imágenes aéreas y el relevamiento de campo. El geoprocésamiento y el análisis espacial se lleva a cabo con el *software* ArcGIS (Sistema de Información Geográfica) por medio de las funciones:

- **Fill:** Rellena sumideros en un ráster de superficie para eliminar pequeñas imperfecciones en los datos. Un sumidero es una celda con una dirección de drenaje indefinida y las celdas que lo rodean son más bajas. El llenado de vacíos se realiza para que la cuenca tenga continuidad y salida única sin zonas de depresión que implique un estancamiento del flujo. Se corrige la cota del DEM en las zonas donde en un grupo de 3x3 celdas, la central posea cota menor que las ocho restantes, lo que produciría un corte en las líneas de flujo (Burgos, 2005).
- **Flow Direction:** Crea un ráster de dirección de flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada, indica la inclinación que posee cada pixel (Burgos y Vargas Aranibar, 2008b).
- **Flow Accumulation:** Crea un ráster de flujo acumulado para cada celda. Capa de acumulación de aporte, la cual representa en un punto determinado la cantidad de píxeles que drenan a él (Burgos y Vargas Aranibar, 2008b). Por medio de esta capa se identifica la red de drenaje.
- **Con:** Capa ráster que determina la hidrografía al establecer un umbral mínimo (valor condicionante) de acumulación de aporte hídrico para que sea considerado un cauce torrencial. Se define un valor para el área mínima de captación, para la concentración del flujo. Las celdas o píxeles con un valor mayor al otorgado serán drenajes y los que posean valores menores no lo serán (Burgos y Vargas Aranibar, 2008b; Quijano Cossío, 2015). Define la red hídrica.
- **Aforos:** Capa vectorial (*shape*) de puntos para establecer los puntos de aforo o cierre de las cuencas.
- **Snap Pour Point:** Alinea los puntos de fluidez a la celda de acumulación de flujo más alta dentro de una distancia específica. Buscará, dentro de una distancia de alineación alrededor de los puntos de fluidez especificados, la celda de flujo acumulado más alto y moverá el punto de fluidez a esa ubicación. Crea un ráster de puntos de aforo alineados con la red hídrica. Fuerza a los puntos de aforo a caer dentro de la red hídrica.
- **Watershed:** Determina el área de contribución por sobre un conjunto de celdas de un ráster, es decir, define todas las celdas que fluyen hacia el punto de aforo y delimita las cuencas hidrográficas.
- **Raster to Polygon:** Convierte la capa ráster de cuenca en una capa vectorial de polígonos.
- **Raster to Polyline:** Convierte la capa ráster de la red hídrica en una capa vectorial de polilíneas.

El DEM utilizado en este estudio se obtuvo a través de aerofotogrametría por medio de vuelo de dron, con una resolución espacial de 0,50 m por pixel.

3.2.3. Caracterización de cuencas y red hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una función compleja de numerosos factores tales como el tipo de suelo, el relieve, la vegetación, el clima, que dan lugar a las características físicas de la cuenca, las cuales influyen profundamente en el comportamiento hidrológico de la misma. Los parámetros morfométricos reflejan las características de la cuenca en cuanto a su forma y la influencia en la respuesta a las precipitaciones, y son indicadores cuantitativos de los elementos de la cuenca que, de una manera u otra, influyen en la magnitud y variabilidad de los procesos hidrológicos. La caracterización morfométrica de una cuenca hidrográfica cuantifica todos los parámetros que describen su estructura física y territorial, y desempeña un papel fundamental en el estudio y

comportamiento de los procesos hidrológicos (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Vaccarino Pasquali *et al.*, 2012; Volonté, 2017; Garay y Agüero 2018).

La determinación y cuantificación de los parámetros morfométricos se llevó a cabo a través del *software* ArcGIS a partir de los resultados del geoprocesamiento del DEM.

3.2.3.1. Características generales de las cuencas

Las principales características de una cuenca son:

- **Área (A):** Se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas, es decir, es la superficie encerrada por la divisoria de aguas (Aparicio Mijares, 1992; Gaspari *et al.*, 2013). Sus unidades de medida son el kilómetro cuadrado (km²) y hectárea (ha).

El área de la cuenca es quizá el parámetro más importante, siendo determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos, como el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc (Maza *et al.*, 2014). Cuanto más grande es el área de la cuenca, mayor serán los caudales generados.

En función de la superficie pueden clasificarse en:

- Cuenca pequeña cuando el área es menor de 100 km².
- Cuenca mediana cuando el área se encuentra entre los 100 km² y los 2000 km².
- Cuenca grande cuando el área es mayor de 2000 km².

Se estima a partir del polígono de la cuenca, que se obtiene del análisis GIS, a través de la función *Calculate Geometry* dentro de la tabla de atributos del *shape* de cuencas.

- **Perímetro (P):** Se define como la longitud del contorno del área de la cuenca, proyectada en un plano horizontal, o longitud de la línea divisoria de aguas (Villón, 2002). El perímetro puede informar sobre la forma de la cuenca y tiene influencia en el tiempo de concentración, el cual es menor cuando el perímetro se asemeja a una forma circular (Cordova Diaz, 2018). Su unidad de medida es el kilómetro (km). Se estima a partir del polígono de la cuenca, que se obtiene del análisis GIS, a través de la función *Calculate Geometry* dentro de la tabla de atributos del *shape* de cuencas.

- **Longitud de la cuenca (L):** Es la longitud de una línea recta con dirección “paralela” al cauce principal entre un punto aguas abajo (punto de cierre) y otro punto situado a mayor distancia aguas arriba de la cuenca (Garay y Agüero, 2018). Al igual que el área, este parámetro influye fuertemente en la generación de escorrentía. Su unidad de medida es el kilómetro (km). Se estima a partir de la superposición de la red de drenaje y el polígono de la cuenca que se obtiene del análisis GIS utilizando la función *Measure*.

3.2.3.2. Características físicas de forma de las cuencas

La forma de la cuenca está dada por la configuración geométrica de la misma proyectada sobre un plano horizontal y está determinada por la interacción de los factores geológicos, hidrológicos y estructurales. Este parámetro influye en la velocidad de escurrimiento y es una característica importante porque de ella depende el tiempo de concentración y, por ende, los caudales resultantes. Así, en las cuencas ovaladas, las aguas circulan por más cauces secundarios y su tiempo de concentración, tiempo que tarda la gota más alejada de la sección de salida en llegar a dicha sección, será mayor que en las cuencas alargadas, en las cuales las gotas de agua llegan antes al cauce principal, y por lo tanto salen antes. La forma de la cuenca es determinante en su comportamiento hidrológico; cuencas de igual área, pero diferente forma, presentan distintas respuestas hidrológicas por lo que generan hidrogramas diferentes (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Quijano Cossío, 2015). En este estudio se adoptan los siguientes índices para describir físicamente la cuenca:

- **Factor de forma de Horton (K_f):** Este parámetro adimensional se define como el cociente entre el área de la cuenca (A) y el cuadrado de su longitud (L) (Garay y Agüero, 2018).

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

El factor de forma puede dar información sobre las características de una cuenca como la pendiente y la forma, por lo que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial y la tendencia a presentar crecidas. Cuando K_f es menor a uno, la cuenca presenta forma alargada. Un factor de forma bajo indica que la cuenca es larga y estrecha, el escurrimiento no se concentra tan rápido y, por lo tanto, no es propensa a crecidas. Además, una cuenca con K_f bajo, es menos propensa a tener una lluvia intensa simultáneamente sobre toda su superficie. Por el contrario, cuando K_f es cercano o superior a la unidad, la cuenca presenta forma redondeada, por lo que tenderá a concentrar el escurrimiento de una precipitación intensa generando grandes crecidas. Por otra parte, un factor de forma alto puede indicar cuencas con mucha pendiente, mientras que, un factor de forma bajo puede significar cuencas con poca pendiente (Gaspari *et al.*, 2012; Cordova Diaz, 2018; Garay y Agüero, 2018).

- **Coefficiente de Compacidad o Índice de Gravelius (K_c):** Este parámetro adimensional se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca.

$$K_c = \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{\text{Perímetro de un círculo}} = 0,282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

En cualquier caso, el coeficiente de compacidad será mayor que la unidad, pudiendo alcanzar valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas. Una cuenca se aproximará a una forma circular cuando el valor de K_c se acerque a la unidad. Según el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma:

- Redonda para un valor de K_c entre 1 y 1,25.
- Ovalada para un valor de K_c entre 1,25 y 1,50.
- Oblonga para un valor de K_c entre 1,50 y 3.

Este parámetro está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, ya que están llegando las gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca. A medida que K_c tiende a la unidad, es decir cuando la cuenca tiende a una forma redondeada, la probabilidad de ocurrencia de crecidas en la cuenca será mayor debido a que las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presentan diferencias mayores, por lo que se concentrarán grandes volúmenes de aguas de escurrimiento y el tiempo de concentración será menor. Generalmente, en cuencas muy alargadas el valor del K_c es mayor a 2, entonces el tiempo de concentración será mayor y, por lo tanto, la cuenca tendrá menores oportunidades de crecidas (Gaspari *et al.*, 2013; Maza *et al.*, 2014; Cordova Diaz, 2018).

3.2.3.3. Características físicas de relieve de las cuencas

El relieve, dado por la altitud y la pendiente, de una cuenca hidrográfica está dado por la configuración topográfica del área y presenta una fuerte influencia sobre la respuesta hidrológica, es decir, incide en los fenómenos de escorrentía superficial, infiltración y erosión hídrica. Generalmente, la generación de escorrentía se produce en lapsos de tiempos menores en aquellas zonas con mayor relieve o pendiente (Vaccarino Pasquali *et al.*, 2012; Consorcio Pomca Quindío, 2018).

- **Alturas máxima ($H_{\text{máx}}$) y mínima ($H_{\text{mín}}$):** Se refiere a las cotas máxima y mínima de la cuenca. La cota máxima es la mayor altura a la cual se encuentra la divisoria de aguas, mientras que, la cota mínima es la cota sobre la cual la cuenca desagua (Garay y Agüero, 2018). Su unidad medida es el metro (m). Se obtienen de analizar la información del DEM con el polígono de la cuenca en GIS.
- **Desnivel altitudinal (D):** Se calcula como la diferencia entre las alturas máxima y mínima (Garay y Agüero, 2018). Su unidad de medida es el metro (m).
- **Pendiente media de la cuenca (S_m):** Es la variación de la inclinación de una cuenca y se define como la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a las áreas elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante. Este parámetro influye en el comportamiento hidrológico de la cuenca dado que tiene relación con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. La pendiente incide en la velocidad media de escorrentía y, por lo tanto, en el poder de arrastre y la erosión sobre la cuenca. A su vez, el gradiente de pendiente influye indirectamente en el tiempo de concentración, a través de la velocidad de escorrentía. Por lo tanto, controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una importancia directa en relación a la magnitud de las crecidas. En zonas de altas pendientes, se presentan mayormente procesos de erosión, mientras que en regiones planas aparecen principalmente procesos de drenaje y sedimentación (Villón, 2002; Fattorelli y Fernández, 2011; Gaspari *et al.*, 2012; Consorcio Pomca Quindío, 2018). Su unidad de medida es el metro sobre metro (m/m). Se obtiene de analizar el mapa de pendientes con el polígono de la cuenca en GIS.
- **Curva hipsométrica:** Es la representación gráfica utilizada para indicar la distribución del área con respecto a la altura (Strahler, 1952). Permite conocer la proporción de área relativa por encima o por debajo de una determinada elevación de la cuenca. La curva hipsométrica es una función adimensional que se construye graficando la altura relativa en ordenadas (h/H) y el área relativa sobre cada curva de nivel en abscisas (a/A), donde h son las elevaciones relativas a la máxima altura (H) de la cuenca y a son las áreas relativas de la superficie total (A) (Ocaña *et al.*, 2020). Es decir, para obtener los valores relativos se dividen la altura y el área por sus respectivos valores máximos.
La curva hipsométrica es la representación gráfica del relieve de una cuenca y puede modificarse en función de la altura relativa, lo que permite estimar el estado de equilibrio dinámico potencial de la cuenca, bajo la hipótesis de que esta función relaciona altitud con área, por lo tanto, cambia con el tiempo a medida que la cuenca sufre denudación (Verdugo Cárdenas, 2017; Guerra y González, 2002). Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, ello puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos (Racca, 2007). La curva hipsométrica da cuenta de la influencia de los factores tectónicos, climáticos y el control de la litología sobre la evolución de las cuencas de drenaje (Quezada *et al.*, 2010).
El valor del área relativa que yace bajo la curva se denomina integral hipsométrica y es indicativa del estado de desarrollo de la cuenca. Valores superiores al 60% se asocian a curvas convexas (curva A de la Figura 3.1) e indican fase de desequilibrio o “juventud” reflejando una cuenca con gran potencial erosivo. Valores cercanos al 47% se asocian a curvas sinusoidales cóncavo-convexas (curva B de la Figura 3.1) y representan fase de equilibrio o “madurez”, reflejando una cuenca en equilibrio. Valores inferiores al 30% se asocian a curvas cóncavas (curva C de la Figura 3.1) e implican fase de “vejez” indicando una cuenca sedimentaria, es decir, con poca capacidad erosiva (Racca, 2007; Villodas, 2008).

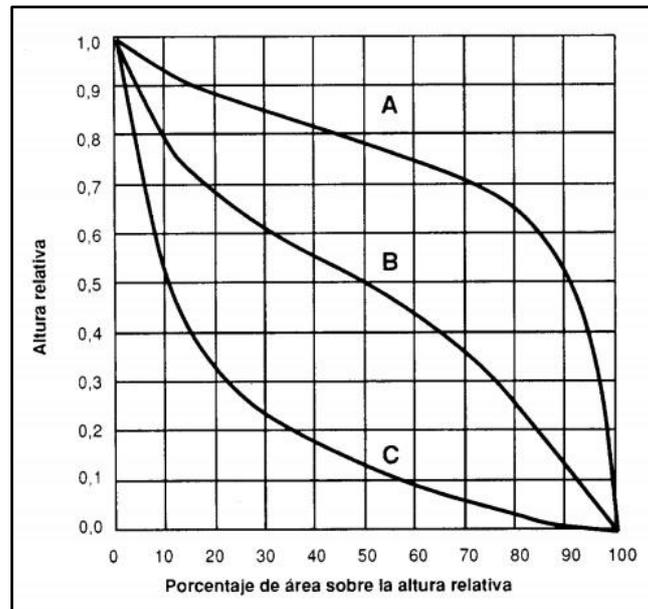


Figura 3.1. Modelos de curvas hipsométricas según Strahler (Fuente: Villodas, 2008)

La integral hipsométrica (H_{si}) es también un indicador del “ciclo de erosión” (Strahler, 1952). El ciclo de erosión puede dividirse en tres etapas: vieja ($H_{si} < 0,35$), en el cual la cuenca está completamente estabilizada, etapa de madurez o equilibrio (H_{si} entre 0,35 a 0,6) y etapa de juventud o desequilibrio ($H_{si} > 0,6$), donde la cuenca es altamente susceptible a la erosión (Strahler, 1952).

En este estudio, la integral hipsométrica o área bajo la curva fue calculada de acuerdo al método propuesto por Pike y Wilson (1971), como la relación (E) Elevación-Relieve expresado como:

$$E \approx H_{si} = \frac{\text{Elev. promedio} - \text{Elev. mín}}{\text{Elev. máx} - \text{Elev. mín}}$$

Donde:

E: Es la relación elevación-relieve equivalente a la integral hipsométrica H_{si} . Es adimensional.

Elev. promedio: Es la elevación media de la cuenca estimada a partir de las curvas de nivel de la cuenca. Unidad de medida en metros (m).

Elev. mín y Elev. máx: son las elevaciones mínimas y máximas de las cuencas, respectivamente. Unidad de medida en metros (m).

- **Altura media de la cuenca (H_m):** Se obtiene como el promedio de las alturas medias de la curva hipsométrica y es un indicador general de las cantidades de precipitación dado que, generalmente, existe una correlación entre ésta y la altitud media (Fattorelli y Fernández, 2011; Consorcio Pomca Quindío, 2018).

3.2.3.4. Características de la red hidrográfica

La red de drenaje de una cuenca es un sistema interconectado de cauces, a través del cual, el agua captada en las partes altas se recolecta y es conducida a las partes bajas (Breña Puyol y Villa, 2006). La red de drenaje es el resultado de la combinación de factores climáticos, edáficos, de vegetación, geológicos y geomorfológicos y no solo responde a las condiciones del modelado actual, sino que también representa condiciones antiguas diferentes (Vaccarino Pasquali *et al.*, 2002).

Las características del cauce principal de una cuenca es otro de los factores que resulta representativo del comportamiento hidrológico de la misma. Este factor es significativo en la

determinación de la configuración del hidrograma de las crecidas y, por lo general, en la mayoría de las fórmulas para el cálculo del tiempo de concentración de una cuenca intervienen parámetros derivados de las características físicas del cauce principal (Fattorelli y Fernández, 2011).

Para caracterizar la red hidrográfica se utilizan los siguientes parámetros:

- **Longitud del cauce principal (L_r):** Es la distancia que recorre el cauce desde su origen en aguas arriba hasta su desembocadura (Garay y Agüero, 2018). En general, los caudales crecen con la longitud de los cauces debido a que existe una relación directa entre la longitud de estos y las áreas de las cuencas hidrográficas correspondientes. A su vez, los tiempos promedios de subida y las duraciones promedias totales de las crecidas torrenciales tendrán siempre una clara relación con la longitud de los cauces. Una longitud mayor supone mayores tiempos de desplazamiento de las crecidas y como consecuencia, mayor atenuación de las mismas, por lo que los tiempos de concentración y las duraciones totales de estas serán mayores (Consortio Pomca Quindío, 2018). Su unidad de medida es el kilómetro (km) y se obtiene del análisis de la red de drenaje mediante GIS a través de la función *Calculate Geometry* dentro de la tabla de atributos del *shape* de la red de drenaje.
- **Alturas máxima ($H_{máx}$) y mínima del cauce principal ($H_{mín}$):** Corresponden a las alturas máxima y mínima del cauce. Su unidad de medida es el metro (m) y se obtienen del análisis de la información del DEM con el *shape* de la red de drenaje en GIS.
- **Pendiente media del cauce principal (S_{mr}):** Es la relación existente entre el desnivel altitudinal del cauce y su longitud. La pendiente del cauce principal representa un valor medio, ya que cada tramo de río tiene una pendiente propia. La pendiente del cauce influye directamente en la velocidad de flujo, al aumentar la pendiente aumenta la velocidad del agua por la red hidrográfica, haciendo más susceptible a la cuenca a procesos erosivos y al arrastre de materiales. Por lo tanto, este parámetro permite evaluar el potencial erosivo, a partir de la velocidad del flujo, lo cual nos ayuda entender el comportamiento en el tránsito de avenidas (Breña Puyol y Villa, 2006; Garay y Agüero, 2018). Su unidad de medida es el metro sobre metro (m/m) y se obtiene con herramientas de GIS, superponiendo la información de pendientes con la red hidrográfica.
- **Tiempo de concentración (T_c):** Es el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la superficie de la cuenca estén aportando agua de escorrentía al punto de cierre y contribuyan simultáneamente al caudal recibido en la salida (Sánchez San Román, 2011). Dicho de otra forma, es el tiempo en el cual la escorrentía superficial, debida a la precipitación caída en un instante dado, del punto hidrológicamente más alejado de la cuenca, alcanza el punto de desagüe o salida (Témez, 1978). Es el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca), contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe. Desde que finalizan las entradas de lluvia neta en la cuenca hasta que sale de la cuenca su última gota, transcurre un cierto tiempo " T_c " o tiempo de concentración, necesario para que las precipitaciones caídas, en zonas alejadas, puedan hacer su viaje hasta la sección de cierre. El tiempo de concentración es característico de cada cuenca y, por lo tanto, independiente del aguacero. El valor del tiempo de concentración de una cuenca es función de sus características morfológicas, edáficas y fitológicas. (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996).
El tiempo de concentración representa, de alguna forma, la respuesta hidrológica de la cuenca, e indica una estimación para la duración del evento más desfavorable. El tiempo de concentración define la rapidez de la respuesta de una cuenca ante una precipitación efectiva (Burgos, 2019).
Existen numerosas fórmulas empíricas para estimar el tiempo de concentración de cuencas hidrográficas desarrolladas por diferentes autores para distintas regiones del

mundo. Aunque las ecuaciones varían entre sí, la mayoría relacionan el T_c con parámetros morfológicos de la cuenca. A continuación, se presentan las más comúnmente utilizadas:

- **Kirpich (1940):** Desarrollada con información proporcionada por el Soil Conservation Service (SCS) en siete cuencas rurales de Tennessee en los Estados Unidos, con canales bien definidos y de pendientes empinadas (3 a 10%). Se aplica a cuencas con áreas entre 0,5 y 45 ha.

$$T_c = 0,06628 \cdot \left(\frac{L_r}{\sqrt{S_{mr}}} \right)^{0,77}$$

- **Témez (1978):** Se aplica a pequeñas cuencas rurales de área menor a 200 km².

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L_r}{S_{mr}^{0,25}} \right)^{0,76}$$

- **Ecuación de retardo SCS (1973):** Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola que ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 5000 ha.

$$T_c = \frac{(L \cdot 1000)^{0,8} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{441 \cdot \sqrt{(S_m \cdot 100)}}$$

Donde L, también denominada como longitud de flujo, se encuentra en metros (m).

Para la selección del tiempo de concentración se adopta como criterio, en este estudio, calcular el promedio de los valores de tiempo de concentración obtenidos mediante las ecuaciones antes mencionadas.

3.3. Hidrología

3.3.1. Introducción

El objetivo de la hidrología es el estudio del ciclo hidrológico y sus transformaciones a lo largo de éste en los distintos medios (océanos, relieve terrestre, atmosfera, subsuelo, etc) (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996).

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrogeología y se define como el movimiento general del agua ascendente por evaporación y descendente primero por precipitación y después en forma de escorrentía. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua (Chow *et al.*, 1994; Sánchez San Román, 2011).

El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre bajo el efecto de la radiación solar y el viento para volverse parte de la atmosfera. El vapor de agua formado se eleva y se transporta por la atmosfera en forma de nubes hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos. El agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y parte de la infiltrada y de la escorrentía superficial regresan a la atmosfera mediante evaporación. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien puede percolar profundamente para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar (Aparicio Mijares, 1992).

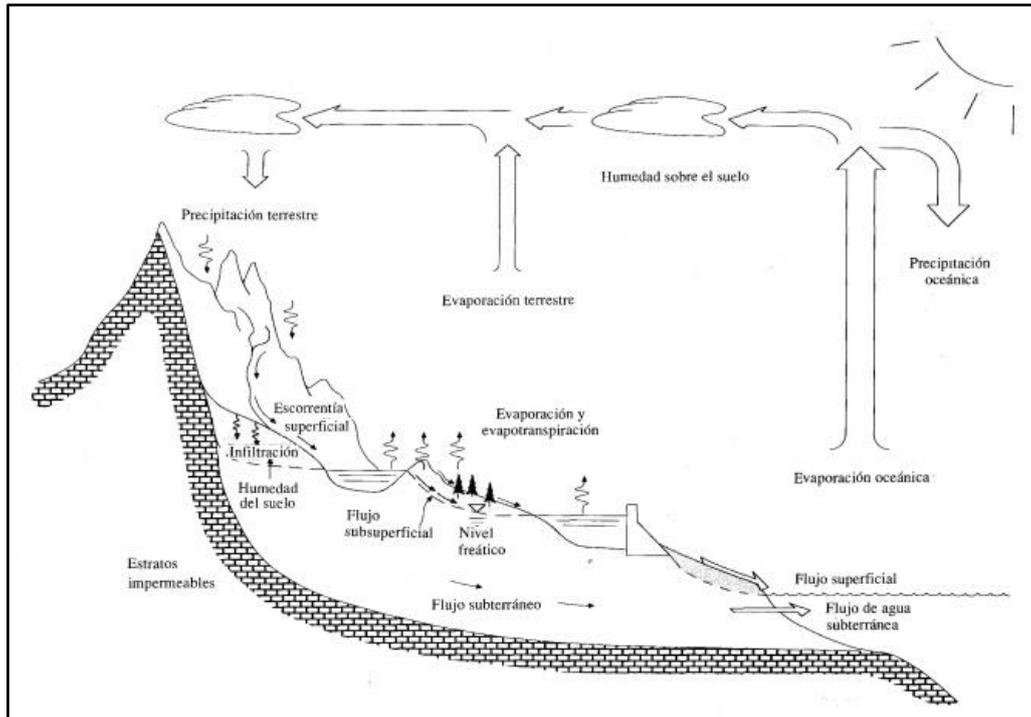


Figura 3.2. El ciclo hidrológico y sus fases (Fuente: Chow *et al.*, 1994)

3.3.2. Potencial de escorrentía

El escurrimiento o escorrentía se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre, una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada, sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca (Aparicio Mijares, 1992). Según el camino que sigue el agua hasta alcanzar la red de drenaje podemos distinguir entre:

- **Escorrentía superficial:** Corresponde al agua que no se infiltra en ningún momento, producto de una mayor intensidad de precipitación con respecto a la capacidad de infiltración del suelo, y que alcanza la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno bajo la acción de la gravedad. Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. La escorrentía superficial está formada en un primer momento por el flujo en forma de lámina sobre la superficie del suelo (*overland flow*). Si la cuenca receptora tiene pendiente este flujo fluye por gravedad hacia cursos de agua o canales de drenaje en principio pequeños (cauces de orden 1), los cuales se van agrupando en cauces de orden superior formando luego los tributarios principales de los grandes ríos. Cuando la cuenca carece de pendiente, como es el caso las llanuras, no existe un sistema de drenaje jerarquizado y predomina el escurrimiento en forma laminar (Aparicio Mijares, 1992; Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Fattorelli y Fernández, 2011).
- **Escorrentía hipodérmica o subsuperficial:** Una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. Se debe a la saturación de los horizontes edáficos inferiores y corresponde a la fracción de la precipitación que penetra en el suelo y se mueve lateralmente por los horizontes superiores. Bajo estas condiciones, la capacidad de infiltración del suelo excede las intensidades de lluvia observadas para todos los casos con excepción de las lluvias extremas. El límite entre ésta y la escorrentía superficial es confuso, ya que el agua que circula bajo la superficie puede reaparecer al aire libre e incorporarse a la escorrentía

superficial y viceversa (Aparicio Mijares, 1992; Chow *et al.*, 1994; Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996).

- **Escorrentía subterránea:** Es la fracción de la precipitación que se infiltra hasta alcanzar la capa freática y que circula en régimen laminar a través de los acuíferos hasta desembocar en la red de drenaje superficial (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996).

De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca. Por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el **escurrimiento directo**. El escurrimiento subterráneo es el que llega más lento hasta la salida de la cuenca, pudiendo tardar años en hacerlo, y, en general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña y su suelo muy permeable. Debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el **escurrimiento base**. El escurrimiento subsuperficial puede ser casi tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo y por ello es difícil distinguirlo de los otros dos. Cuando es relativamente rápido se le trata junto con el escurrimiento superficial, y cuando es relativamente lento se le considera parte del subterráneo (Aparicio Mijares, 1992).

De los tres tipos de escorrentía, en una duración de tormenta del tipo aplicado en este estudio, las escorrentías subsuperficial y subterránea son prácticamente despreciables, por lo tanto, no se tienen en cuenta en este caso.

El escurrimiento superficial está relacionado con las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca. El volumen total de la escorrentía y sus valores máximos están influenciados directa o indirectamente por factores climáticos y fisiográficos (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Fattorelli y Fernández, 2011; Gaspari *et al.*, 2013):

- Factores climáticos: Distribución en el tiempo, volumen e intensidad de las precipitaciones. La intensidad resulta fundamental porque se relaciona con la tasa de infiltración del suelo. La intensidad y la duración de las precipitaciones determinan el volumen total de agua escurrida en la cuenca. Si la intensidad de la lluvia es mayor que la tasa de infiltración, todo el excedente de la lluvia es escorrentía superficial, esto se debe a que las lluvias de gran intensidad provocan el desagregado de las partículas del suelo sellando la superficie, disminuyendo la tasa de infiltración y aumentando el escurrimiento superficial. Por otro lado, las lluvias de baja intensidad y larga duración saturan la capacidad de retención del suelo.
- Factores fisiográficos:
 - Características de la cuenca: tamaño, forma, pendiente, orientación. Ésta última es importante ya que se produce una mayor escorrentía en las solanas que en las umbrías.
 - Suelo (tipo y usos): capacidad de infiltración, permeabilidad, presencia de capas freáticas. La escorrentía es inversamente proporcional a la capacidad de infiltración del terreno.
 - Densidad y forma de la red de drenaje.
 - Cobertura vegetal (tipo y densidad de vegetación): actúa positivamente reduciendo la escorrentía superficial, al frenar la velocidad de la lámina de agua, aumenta el tiempo de oportunidad de infiltración.

3.3.2.1. Método del Número de Curva

El método del Número de Curva de Escorrentía fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en 1972 y se utiliza para determinar la precipitación efectiva o escorrentía directa. El método calcula las abstracciones de la precipitación de una tormenta y considera que el exceso de precipitación o precipitación efectiva P_e es siempre menor o igual que la precipitación total P . Asimismo, después de que la escorrentía se inicia, el agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual que la retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación I_a (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía ya que el escurrimiento comienza una vez superado el umbral de

escorrentía (I_a), luego la escorrentía potencial es $P - I_a$ (Chow *et al.*, 1994). La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Por el principio de continuidad se tiene que:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando las expresiones previas y resolviendo para P_e se obtiene la ecuación básica para el cálculo de la escorrentía directa:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Donde:

P_e es la **precipitación efectiva** o escurrimiento superficial real.

P es la **precipitación total**.

I_a es la **abstracción inicial** o umbral de escorrentía previa al encharcamiento que es altura mínima de lluvia necesaria para que se produzca escorrentía superficial, es decir, el volumen de agua que se infiltra antes de que comience la escorrentía. Se corresponde con la cantidad de agua inicial retenida por intercepción, embalse superficial, evaporación e infiltración, antes de iniciarse la escorrentía.

S es la **retención potencial máxima** o pérdidas máximas posibles. Este parámetro depende del tipo de suelo, de la condición de humedad antecedente, de la cobertura vegetal y del uso y tratamiento del suelo.

$P - I_a$ es la **escorrentía potencial** o el escurrimiento superficial máximo, es decir, el máximo volumen de agua que puede convertirse en escorrentía.

A través del estudio de los resultados obtenidos en muchas cuencas experimentales pequeñas, el SCS desarrolló la siguiente relación empírica entre I_a y S :

$$I_a = 0,2 \cdot S$$

Por lo tanto:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}$$

El parámetro S se relaciona con el Número de Curva de Escorrentía (CN):

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Los números de curva expresan la capacidad de la cuenca para producir escorrentía y se encuentran tabulados en función de:

- **Uso y tratamiento del suelo**
- **Cobertura vegetal**
- **Tipo de suelo:** Se distinguen cuatro grupos hidrológicos de suelo a partir de la textura, su espesor, potencial de escurrimiento y capacidad de infiltración.
 - Grupo A: Suelos profundos y de texturas gruesas (arenosos o areno-limosos). En ellos el agua se infiltra rápidamente aun cuando estén muy húmedos. Su potencial de

- escurrimiento es mínimo por su gran permeabilidad. Elevada capacidad de infiltración (valor mínimo de velocidad de infiltración de 7,5 a 11,5 mm/h).
- Grupo B: Suelos francos y profundos, suelos franco arenosos de mediana profundidad, y suelos arenosos de escaso espesor. Presentan una moderada permeabilidad cuando están saturados, con un valor mínimo de velocidad de infiltración de 4 a 7,5 mm/hora y su potencial de escurrimiento es medio
 - Grupo C: Suelos franco-arcillosos e incluso arcillosos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados; también se incluyen aquí suelos que presentan horizontes someros bastante impermeables. Su potencial de escurrimiento es alto y presentan un valor mínimo de velocidad de infiltración de 1,3 a 4 mm/hora. Los suelos de este grupo poseen un bajo contenido en materia orgánica.
 - Grupo D: Suelos muy arcillosos y profundos con alto grado de tumefacción; también se incluyen aquí los terrenos que presentan una capa de arcilla somera y muy impermeable, así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca impermeable, ciertos suelos salinos y suelos con nivel freático alto. Son suelos con un potencial de escurrimiento máximo y con un valor mínimo de velocidad de infiltración de 0 a 1,3 mm/hora.
 - **Condición de humedad antecedente:** Es decir, el estado de humedad del suelo previo a la precipitación. La determinación de las condiciones de humedad iniciales se realiza en función de la precipitación acumulada los cinco días previos al aguacero. Se distinguen tres condiciones de humedad edáfica.
 - Condición I: Suelo muy seco sin llegar al índice de marchitez (precipitación menor a 12,5 mm)
 - Condición II: Suelo en situación normal; alejado de la capacidad de campo, pero también alejado del punto de marchitez permanente (precipitación entre 12,7 mm y 38,1 mm).
 - Condición III: Suelo saturado o muy próximo a la saturación; capacidad de campo (precipitación mayor a 38,1 mm).

El Número de Curva adimensional puede tomar valores entre cero y cien. A mayor número se obtiene un umbral de escorrentía menor, lo que se traduce en un mayor escurrimiento. Un valor de CN = 100 indica que la cuenca es impermeable, es decir, todo lo que llueve escurre (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Fattorelli y Fernández, 2011; Gaspari *et al.*, 2013).

3.3.2.1.1. Estimación del CN mediante Sistema de Información Geográfica

Un parámetro sensible en la determinación del CN es la clasificación hidrológica de suelos, o Grupo Hidrológico de Suelo (GHS). En particular, el problema radica en que no se cuenta con cartografía que represente este parámetro y, por lo tanto, suele asignarse en forma cualitativa y en función de la experiencia del diseñador. Se clasifica a los suelos según las siguientes premisas de acuerdo a Fattorelli y Fernández (2011):

- La pendiente del terreno incrementa el potencial de escurrimiento.
- Suelos con perfiles de características semejantes responde en forma semejante al efecto de una tormenta.
- La clasificación debe basarse siempre en una misma técnica de medición.
- El criterio formado por especialistas en base a numerosas observaciones es fundamental en la clasificación de suelos. Asimismo, se debe tener en cuenta que a medida que el uso del suelo se intensifica, se incrementa también la retención y por ende disminución de avenidas por el escurrimiento.

Las cuencas hidrográficas presentan suelos y coberturas vegetales que no son uniformes en todo su territorio. El índice CN se determina para cada complejo suelo-vegetación a partir de sus características particulares de vegetación y textura edáfica. Se supone que cada uno de los complejos suelo-vegetación se comporta de una misma forma frente a la infiltración. En cada uno de estos complejos, la precipitación generará diferentes caudales de escurrimiento en función del grado de permeabilidad del suelo (Gaspari *et al.*, 2013). Por lo expuesto anteriormente, para

asignar un solo valor de Número de Curva para toda la cuenca se debe obtener un valor de CN medio ponderado.

La estimación de los valores de CN se realiza a través de tablas, las cuales están en función del tipo y tratamiento de suelo, cobertura vegetal, grupo hidrológico de suelo y condición de humedad antecedente, y, posteriormente, se corrigen los valores obtenidos en función de la pendiente del terreno. Para el caso en estudio se utilizó la tabla de valores de CN propuesta por Fernández *et al.* (1980) para cuencas aluvionales de la provincia del Neuquén en condiciones medias de humedad previa (Tabla 3.1) y se estimó el índice CN para una cubierta con características de pradera o pastizal, condición de infiltración mala y grupos hidrológicos de suelo C y D.

Los números de curva obtenidos se digitalizaron en formato vectorial y luego se llevaron a formato ráster mediante la función *Polygon to Raster*. Luego, se realizó una estadística zonal utilizando la función *Zonal Statistics as Table* para obtener el valor ponderado de CN, según las áreas, para cada cuenca.

Uso del suelo y cubierta	Tratamiento o método	Condición para la infiltración	Grupo Hidrológico del Suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	SR		77	86	91	94
Cultivo en hileras	SR	Mala	72	81	88	91
	SR	Buena	67	78	85	89
	C	Mala	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	CyT	Mala	66	74	80	82
	CyT	Buena	62	71	78	81
Granos pequeños	SR	Mala	65	76	84	88
	SR	Buena	63	75	83	87
	C	Mala	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	CyT	Mala	61	72	79	82
	CyT	Buena	59	70	78	81
Legumbres tupidas o rotación de praderas	SR	Mala	66	77	85	89
	SR	Buena	58	72	81	85
	C	Mala	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	CyT	Mala	63	73	80	83
	CyT	Buena	51	67	76	80
Pradera o pastizal		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
	C	Mala	47	67	81	88
	C	Buena	10	35	70	79
	C	Regular	25	59	75	83
Pradera (permanente)			30	58	71	78
Bosques (lotes de bosques)		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Cascos de estancias			59	74	82	86
Caminos (revestidos) (con pavimentos duros)			74	84	90	92

--	--	--	--

Tabla 3.1. Valores de CN de escorrentía para cuencas aluvionales de la provincia del Neuquén en condiciones medias de humedad antecedente (Fuente: Fernández *et al.*, 1980)

3.3.3. Tormenta de diseño

Una tormenta de diseño es aquella que, para determinada probabilidad de ocurrencia y duración, proporciona tanto el valor más probable de lámina total, así como su distribución espacial y temporal, es decir, es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Generalmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de éste se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes. (Chow *et al.*, 1994; Fattorelli y Fernández, 2011).

3.3.3.1. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia

Uno de los primeros pasos que debe seguirse en un proyecto de diseño hidrológico es la determinación del evento de precipitación que debe utilizarse. La forma más común de hacer esto es utilizar una tormenta de diseño que involucre una relación entre la intensidad de precipitación, la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados para la obra y el sitio de estudio. En muchos casos existen curvas estándar de intensidad-duración-frecuencia (IDF) disponibles para el sitio que representan la relación entre la intensidad o la lámina de la lluvia que precipita en un determinado tiempo y su frecuencia estadística de ocurrencia. Generalmente los datos se presentan en forma gráfica, con la duración en el eje horizontal y la intensidad en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, para cada uno de los periodos de retorno de diseño (Chow *et al.*, 1994; Fattorelli y Fernández, 2011).

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h). La duración de la tormenta está dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno, T, que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño (Chow *et al.*, 1994).

Para el caso en estudio, se han adoptado las ecuaciones propuestas por Rapacioli y D'Amico (2013) para la provincia del Neuquén para obtener curvas generalizadas de intensidad de precipitación:

- Fórmula de Cartaya: Para duraciones menores a una hora

$$I_D = \frac{P_D}{D} = \frac{1,041 \cdot D^{0,49} \cdot P_{1h}}{D}$$

Dónde: I_D es la intensidad máxima media (en mm/h) para la duración D y recurrencia estipulada, D es la duración en horas ($0 < D < 1$ hora) y P_{1h} es la precipitación máxima (en mm) acumulada en 1 hora y recurrencia estipulada. Esta última se obtiene de la relación P_{1h}/P_{24h} para la cual se recomienda el valor de 0,59 para la zona aluvional de la provincia del Neuquén.

- Método de Intensidad Contigua (MIC): Para duraciones mayores a una hora

$$I_D = 13,98 \cdot I_{24} \cdot D^{-0,83}$$

Dónde: I_D es la intensidad máxima media (en mm/h) para la duración D y recurrencia estipulada, D es la duración en horas ($1 < D < 24$ hora) e I_{24} es la intensidad máxima media (en mm/h) de la precipitación de 24 horas para la recurrencia estipulada.

El tiempo de recurrencia o periodo de retorno que se adopta en este estudio es de 100 años.

3.3.3.2. Datos de precipitación

Por la ubicación del área de estudio, se utilizaron los datos de precipitaciones de la Estación Paso de los Indios, ubicada a 60 km aproximadamente al SO de la zona de estudio (38° 31' 55,5'' de latitud sur y 69° 24' 48,9'' de longitud oeste), los cuales se encuentran disponibles en la página de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén. Los datos de precipitación máxima en 24 horas se adoptaron del análisis estadístico realizado en el trabajo "Determinación de Curvas IDF en la cuenca del Río Colorado - Segunda Parte" (Rapacioli y D'Amico, 2013). Para una recurrencia de 100 años, la precipitación máxima en 24 horas (P_{24h}), la precipitación máxima en 1 hora (P_{1h}) y la intensidad media máxima en 24 horas (I_{24h}) son:

Tr (años)	P_{24h} (mm)	P_{1h} (mm)	I_{24h} (mm/h)
100	93	54,87	3,88

Tabla 3.2. Valores de precipitaciones para una recurrencia de 100 años en Paso de los Indios (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén)

3.3.4. Transformación precipitación-escorrentía

Es muy común que no se cuente con registros de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. Generalmente, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y, además, no se afectan por cambios en la cuenca. Por lo tanto, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación.

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son el área de la cuenca, la altura total de precipitación, las características de la cuenca como son la forma, pendiente, vegetación, etc, la distribución de la lluvia en el tiempo y la distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca (Aparicio Mijares, 1992).

Se han desarrollado una gran cantidad de métodos para estimar escurrimientos a partir de la precipitación que los origina y a estos procedimientos se los denomina como modelos de lluvia-escorrentía (Breña Puyol y Villa, 2006). Estos modelos lluvia-escorrentía se han clasificado de acuerdo con la información requerida en:

- Métodos empíricos: Con dos tipos de métodos, en uno solo se necesitan las características fisiográficas de la cuenca para su aplicación, mientras que, en el otro se utilizan las características fisiográficas y los datos de precipitación. Los métodos empíricos se han desarrollado a través de ecuaciones matemáticas, en las cuales intervienen alguna de las características de la cuenca, así como el uso del suelo, pendiente del terreno, longitud o pendiente del cauce principal y la intensidad o altura de lluvia total que produce el caudal máximo. Un aspecto fundamental de este tipo de métodos es que únicamente proporcionan el caudal máximo o pico.
- Métodos del hidrograma unitario. En este tipo de métodos es necesario tener disponibles registros de lluvias y escurrimientos en la cuenca de estudio.
- Métodos de simulación del escurrimiento: Para su aplicación se requiere información detallada de las características de la cuenca y de datos hidrológicos de la misma y de modelos matemáticos complicados.

De acuerdo con lo establecido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Neuquén, la estimación del hidrograma de crecida para cuencas con áreas menores a 120 ha se debe realizar con el Método Racional.

3.3.4.1. Método racional

Para el proceso lluvia-escorrentía en cuencas pequeñas es común la fórmula racional. El Método Racional permite estimar el caudal máximo (no todo el hidrograma) de la crecida de

diseño para el periodo de retorno elegido a partir de la intensidad de la precipitación (de duración igual al tiempo de concentración), del área de la cuenca y del coeficiente de escorrentía C .

Si se supone que en una cuenca impermeable cae uniformemente una lluvia de intensidad constante durante un largo tiempo. Al principio el caudal que sale de la cuenca será creciente con el tiempo, pero llegará un momento en el que se alcance un punto de equilibrio, es decir, en el que el volumen de lluvia que entra por unidad de tiempo ($I.A$) sea el mismo que el caudal de salida (Q_p):

$$Q_p = I . A$$

El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del caudal de equilibrio se denomina tiempo de concentración y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar por el punto más alejado hasta la salida de la cuenca.

En una cuenca no impermeable, sólo una parte de la lluvia con intensidad I escurre directamente hasta la salida, por lo que se debe aplicar un coeficiente de escorrentía C para obtener la intensidad de la lluvia neta ($C.I$). Si se acepta que, durante la lluvia, o al menos una vez que se ha establecido el caudal de equilibrio, no cambia la capacidad de infiltración en la cuenca, se puede escribir fórmula racional como:

$$Q_p = C . I . A$$

Donde C es un coeficiente de escurrimiento, que representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa y Q_p es el caudal punta o máximo posible que puede producirse con una lluvia de intensidad I (de duración igual al tiempo de concentración) en una cuenca de área A y coeficiente de escorrentía superficial C .

El coeficiente de escorrentía C define la proporción de la intensidad de la lluvia que genera escorrentía superficial y se puede estimar por medio de expresiones empíricas o a través de tablas. El coeficiente de escurrimiento adimensional puede tomar valores entre 0 y 1 y varía de una cuenca a otra y de una tormenta a otra debido a cambia con el estado de humedad del suelo y con la duración e intensidad de la precipitación; también depende de la vegetación, del suelo y de la pendiente (Aparicio Mijares, 1992; Chow *et al.*, 1994; Ferrer Polo, 2000).

Para obtener las unidades habituales, la ecuación adopta la expresión clásica del método racional:

$$Q_p = \frac{C . I . A}{3,6}$$

Donde el caudal Q_p se encuentra en m^3/s , el coeficiente de escorrentía C es adimensional, la intensidad de precipitación I está en $mm/hora$ y el área de la cuenca A se halla en km^2 .

La duración de la lluvia debe elegirse igual al tiempo de concentración de la cuenca para maximizar el caudal de diseño. Utilizando las curvas IDF para el caso en estudio, se selecciona, para el periodo de retorno elegido, la intensidad que corresponda a una duración de la lluvia igual al tiempo de concentración de la cuenca. Esto se debe a que se considera que la descarga mayor en una cuenca para una determinada intensidad de lluvia, se produce cuando la duración de la precipitación es igual al tiempo de concentración de la cuenca. A tiempos menores las descargas son menores, a tiempos mayores la descarga se mantiene en el valor máximo instantáneo, lo que aumenta es el volumen escurrido (Fattorelli y Fernández, 2011).

En este método no se considera el tiempo ya que es un cálculo en régimen permanente y sólo se calcula el caudal constante que se obtendría como resultado de una precipitación constante. Por su simplicidad, el método racional solamente puede servir para obtener una estimación del caudal en cuencas pequeñas y con precipitaciones cortas y homogéneas (Sánchez San Román, 2011).

3.3.4.1.1. Estimación de C mediante Sistema de Información Geográfica

Las cuencas hidrográficas presentan diferentes tipos superficies, cubierta vegetal y pendientes, por lo que para asignar un solo valor de coeficiente de escorrentía para toda la cuenca se debe obtener un valor de C ponderado.

La estimación de los valores de C se realiza a través de tablas, las cuales están principalmente en función del tipo de superficie, la cobertura vegetal y la pendiente. Algunas tablas también tienen en cuenta la condición hidrológica, el tratamiento y el grupo hidrológico de suelo. Para el caso en estudio se utilizó la tabla de valores de coeficiente de escorrentía propuesta por Chow *et al.* (1988) y se estimó C para una superficie con característica de pastizales, prados, dehesas y para un periodo de retorno de 100 años (Tabla 3.3).

Se realizó una reclasificación del mapa de pendiente a través del *software* ArcGIS mediante la función *Reclassify* para valores de 0-2%, 2-7% y mayores al 7% y se asignaron los valores de los coeficientes de escorrentías, obtenidos previamente, para cada rango de pendiente. Posteriormente, se llevó a cabo una estadística zonal utilizando la función *Zonal Statistics as Table* para obtener el valor ponderado, según las áreas, para cada cuenca.

Tipo de superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Zonas urbanas							
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Cemento, tejados	0,75	0,80	0,83	0,88	0,92	0,97	1,00
Zonas verdes (céspedes, parques, etc.)							
<i>Condición pobre (cobertura vegetal inferior al 50% de la superficie)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
Pendiente media (2-7%)	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
Pendiente alta (> 7%)	0,40	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
<i>Condición media (cobertura vegetal entre el 50% y el 75% del área)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Pendiente media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente alta (> 7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
<i>Condición buena (cobertura vegetal superior al 75%)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
Pendiente media (2-7%)	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
Pendiente alta (> 7%)	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
Zonas rurales							
Campos de cultivo							
Pendiente baja (0-2%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Pendiente media (2-7%)	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Pendiente alta (> 7%)	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastizales, prados, dehesas							
Pendiente baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Pendiente media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente alta (> 7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Bosques, montes arbolados							
Pendiente baja (0-2%)	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Pendiente media (2-7%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Pendiente alta (> 7%)	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58
Nota: Los valores de esta tabla son los utilizados en la ciudad de Austin (Texas, USA) para determinar caudales punta por el método racional en su término municipal.							

Tabla 3.3. Valores de coeficiente de escorrentía superficial C (Fuente: Chow *et al.*, 1988)

3.4. Modelación hidráulica

3.4.1. Introducción

La modelación hidráulica logra representar el flujo de un cauce y simula su comportamiento frente a distintas condiciones con un alto grado de fidelidad y detalle, por lo que, aumenta la confiabilidad de las estructuras proyectadas. Esto implica que los diseños se ajustan más a los requerimientos reales del flujo, lo cual tiene un importante impacto económico. Por un lado, se

disminuye el riesgo de diseñar una obra poco resistente que colapse fácilmente con las consecuentes pérdidas económicas o lo que es peor, en vidas humanas. Por otro lado, también se reduce la posibilidad de un diseño sobredimensionado que requiera de inversiones innecesarias. Por lo tanto, la modelación hidráulica constituye una importante herramienta de optimización para el diseño de obras hidráulicas (Lippi Domínguez, 2016).

Los modelos hidráulicos hacen uso de las ecuaciones diferenciales parciales de flujo no permanente en canales y se basan en la solución de las ecuaciones de Saint-Venant de conservación de la masa y de cantidad de movimiento, en sus formas completas o simplificadas, para el flujo en canales abiertos. El flujo se calcula como una función del tiempo y del espacio a través del sistema. Los modelos hidráulicos, sobre todo los que consideran la solución completa de las ecuaciones de Saint-Venant, tienen la capacidad de simular un amplio espectro de condiciones de flujo y diversas características del río. En general, son más conceptuales desde el punto de vista hidráulico y tienen un sólo parámetro (rugosidad) para estimar y ocasionalmente calibrar (Fattorelli y Fernández, 2011).

Para el caso en estudio, se utilizó el modelado hidráulico para evaluar el comportamiento hidráulico de los caudales máximos de las cuencas aluvionales, para 100 años de recurrencia, en la situación actual y, posteriormente, estimar la erosión general a través de los resultados obtenidos de la modelación. Luego, se llevó a cabo un modelo hidráulico para predecir comportamiento hidráulico y la influencia de los caudales frente obras de mitigación de diseño. Para la modelación hidráulica se utilizó el *software* HEC-RAS versión 5.0.7.

3.4.2. HEC-RAS

El HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*) es un *software* integrado que contiene una interfaz gráfica, módulos de análisis hidráulico, almacenamiento de datos y presentación simple de gráficos y resultados. Es uno de los modelos más utilizados en la modelización hidráulica, diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales, bidimensionales o combinados (1D y 2D) para canales naturales o artificiales (López Vásquez, 2019).

El HEC-RAS puede calcular perfiles bajo condiciones de flujo permanente y no permanente, y regímenes de flujo subcrítico, crítico, supercrítico y mixto (Oyola Romero y Medina Troncoso, 2019).

El HEC-RAS tiene como objetivo calcular las elevaciones de las superficies de agua en cualquier punto o ubicación de interés, ya sea por un conjunto dado de datos de flujo (simulación de flujo permanente) o a través del tránsito de hidrogramas (simulación de flujo no permanente). Una hipótesis en la que se basan los cálculos del HEC RAS es que considera el flujo simulado como unidimensional, es decir, que la única componente de velocidad que se considera es la del componente de dirección del movimiento (Mayta Rojas y Mamani Maquera, 2018).

Para el cálculo de los perfiles de agua, el modelo se basa en la ecuación unidimensional de energía (ecuación de Bernulli) y ecuación de pérdidas por fricción, las cuales se resuelven por iteraciones. Las pérdidas de energía por fricción, contracción o expansión del flujo, se evalúan con la ecuación de Manning y para la contracción o expansión se multiplica un coeficiente de pérdida por la carga de velocidad. La ecuación del momentum es utilizada en situaciones en que el perfil de la superficie del agua es rápidamente variado, esto incluye cambios en el régimen del flujo, producto de variaciones significativas en la pendiente del terreno, contracciones en puentes y confluencias de cauces (Cordova Diaz, 2018; López Vásquez, 2019).

El sistema cuenta con cuatro módulos de análisis hidráulico (Mayta Rojas y Mamani Maquera, 2018; López Vásquez, 2019):

- Módulo para el cálculo del perfil de la lámina de agua en régimen permanente.
- Módulo que simula en régimen variable (no permanente).

- Módulo que estima el transporte de sedimentos para lechos móviles.
- Módulo de análisis de la calidad de agua.

El HEC-RAS presenta múltiples aplicaciones y ventajas, entre ellas:

- Facilita el cálculo de los perfiles de agua y de los parámetros hidráulicos del cauce.
- Permite la predicción de áreas de inundación y mitigación de las mismas en un río o sistema de ríos para diferentes periodos de retorno.
- Permite incorporar estructuras hidráulicas al modelado de cauces.
- Permite determinar las variables hidráulicas para el diseño de estructuras como puentes, alcantarillas, cunetas, etc.
- Permite determinar la altura óptima en el diseño de una carretera, que puede ser afectada por el caudal de un cauce.
- Permite la visualización gráfica de datos y resultados.

Para la correcta aplicación del *software*, es importante conocer las limitaciones del programa para el módulo de cálculo de perfil de la lámina de agua en régimen permanente y sus capacidades hidráulicas sujetas a la ecuación de Bernoulli. Algunas de estas limitaciones son (US Army Corps of Engineers, 2016; López Vásquez, 2019):

- Se supone que el flujo es permanente porque los términos dependientes del tiempo no están incluidos en la ecuación de energía.
- El flujo es gradualmente variado, porque la ecuación de energía se basa en la hipótesis que la distribución de presión en cada sección es hidrostática.
- El flujo es unidimensional (por ejemplo, sólo se tiene en cuenta la componente de la velocidad en la dirección del flujo), porque la ecuación de energía se basa en la hipótesis que la altura de energía total es la misma para todos los puntos de la sección transversal.
- La profundidad y velocidad del flujo varía en dirección longitudinal al canal, y es constante en cada sección.
- Sólo se pueden modelar cauces con pendientes menores a 1:10, ya que no se tiene en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua en la ecuación.
- Ni saltos ni obstáculos son reproducidos correctamente, ya que el programa no realiza balance de fuerzas. El resalto o salto hidráulico es un fenómeno local, que se presenta en un flujo rápidamente variado y ocurre por un cambio brusco de flujo rápido (régimen supercrítico) a lento (régimen subcrítico), el cual siempre va acompañado por un aumento súbito del tirante y una pérdida de energía bastante considerable en un tramo relativamente corto. Generalmente se produce cuando en una corriente rápida existe algún obstáculo o un cambio brusco de pendiente (French, 1988; Aguilar Tucubal, 2014).
- El resultado viene condicionado por las consideraciones geométricas adoptadas.

3.4.2.1. Datos requeridos

Para llevar a cabo la modelación hidráulica, el HEC-RAS requiere establecer los siguientes parámetros:

Geometría del mallado (*Geometric Data*): Para la simulación es necesaria una geometría base con valores de elevación topográfica de alta precisión. Para definir los datos geométricos se utilizó la información topográfica del DEM obtenido mediante vuelo aerofotogramétrico, con una resolución de pixel de 0,5 m.

La calidad y la precisión del resultado depende del mallado y, por consiguiente, de la cantidad de celdas empleadas para su generación.

Se delimitó una geometría que represente la influencia de los cauces sobre el área prevista utilizando la herramienta *2D Flow Area* y se especificó para la misma un tamaño de celdas de 0,5

x 0,5 metros, obteniendo un mallado general con las características mostradas en la Tabla 3.4. Para el caso en estudio, se seleccionaron casi todas las cuencas para realizar la modelación; no se tuvieron en cuenta las cuencas C12, C13, C16, C22, C30, C44, C45 y C50 ya que los caudales obtenidos en ellas se consideran despreciables.

Se marcaron las condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo utilizando la herramienta *SA/2D Area BC Lines*.

Utilizando la herramienta *2D Area Break Lines* se eligieron aquellos sectores en donde se desea que el modelo tenga una mayor precisión, por lo que el mallado debe ser más detallado. En este caso, se seleccionaron los cauces y el margen del camino y se adoptó un mallado con tamaño de celda de 0,3 x 0,3 metros (Figura 3.4).

Número de celdas	627104
Área máxima de celda (m ²)	0,6
Área mínima de celda (m ²)	0,02
Área promedio de celda (m ²)	0,24

Tabla 3.4. Características del mallado general

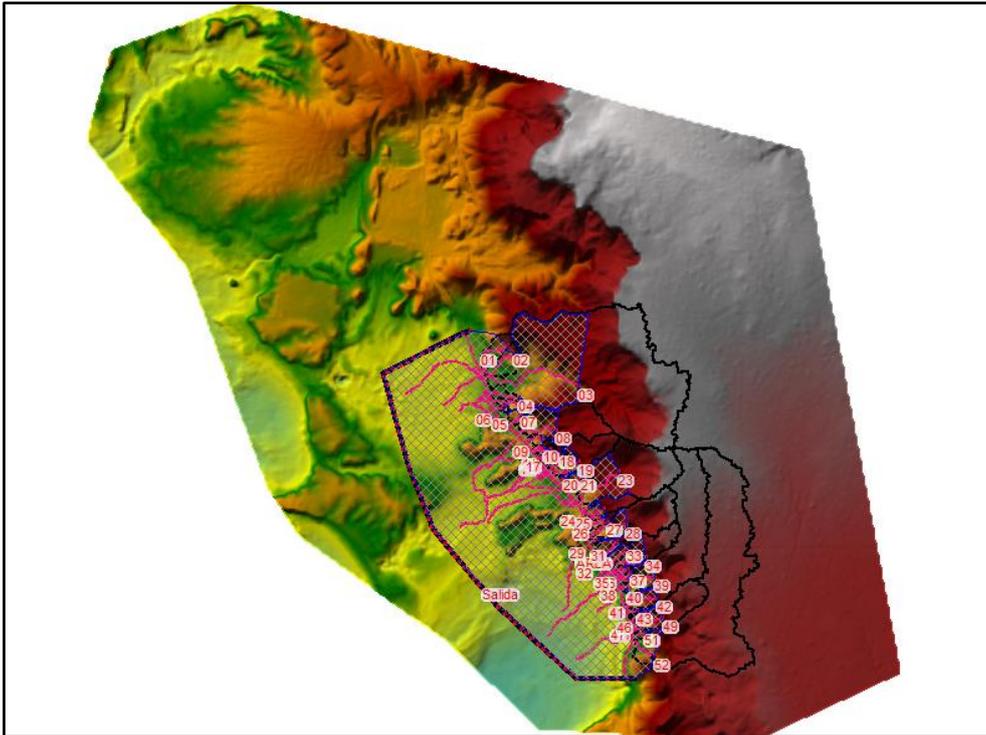


Figura 3.3. Modelo de Elevación Digital del Terreno y geometría del mallado

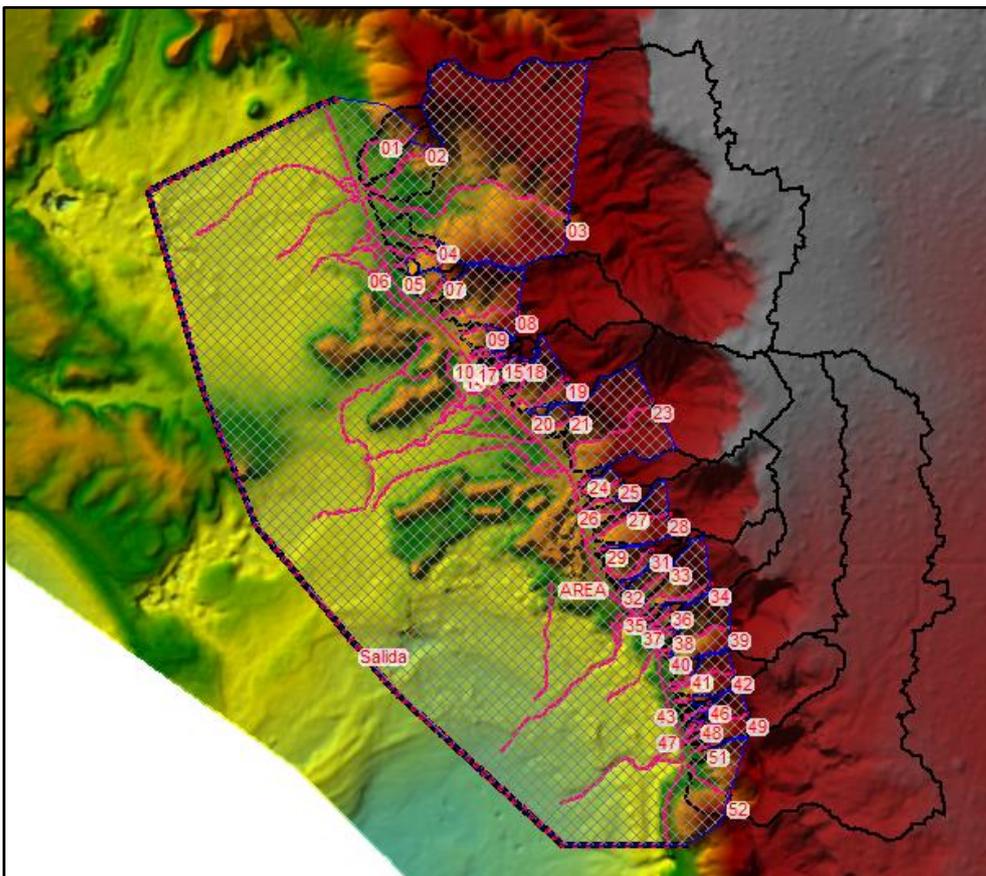


Figura 3.4. Detalles de la geometría del mallado (números: indican la condición de entrada de cada cuenca; líneas rosadas: indican los sectores donde el mallado es más pequeño)

Hidrodinámica (*Unsteady Flow Data*): Se asignan las condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo.

En la condición de aguas arriba se introducen los caudales máximos, obtenidos por el método racional, en función del tiempo de concentración de la cuenca y la pendiente media del tramo del cauce de condición de borde utilizando la herramienta *Flow Hydrograph*. Para ello se asume que la duración de la tormenta es mayor o igual al tiempo de concentración T_c de la cuenca y que la intensidad de lluvia es uniforme en el espacio dentro de la cuenca. Para el caso en estudio se adoptó que la duración de la lluvia es de 23 minutos.

En la condición aguas abajo se introduce la pendiente media del terreno utilizando la herramienta *Normal Depth*.

Corrida del modelo (*Unsteady Flow Analysis*): El modelo requiere seleccionar los resultados a obtener y definir los tiempos de simulación y los tiempos de iteración sobre los cuales se correrá la modelación. Para el caso en estudio se adoptó un tiempo de simulación igual a la duración de la lluvia (23 minutos) con el fin de contemplar el momento de máximo caudal, un intervalo de computo de 0,3 segundos y un intervalo de salida de 30 segundos para obtener una buena precisión numérica y reducir al mínimo el tiempo de cálculo (Figura 3.5).

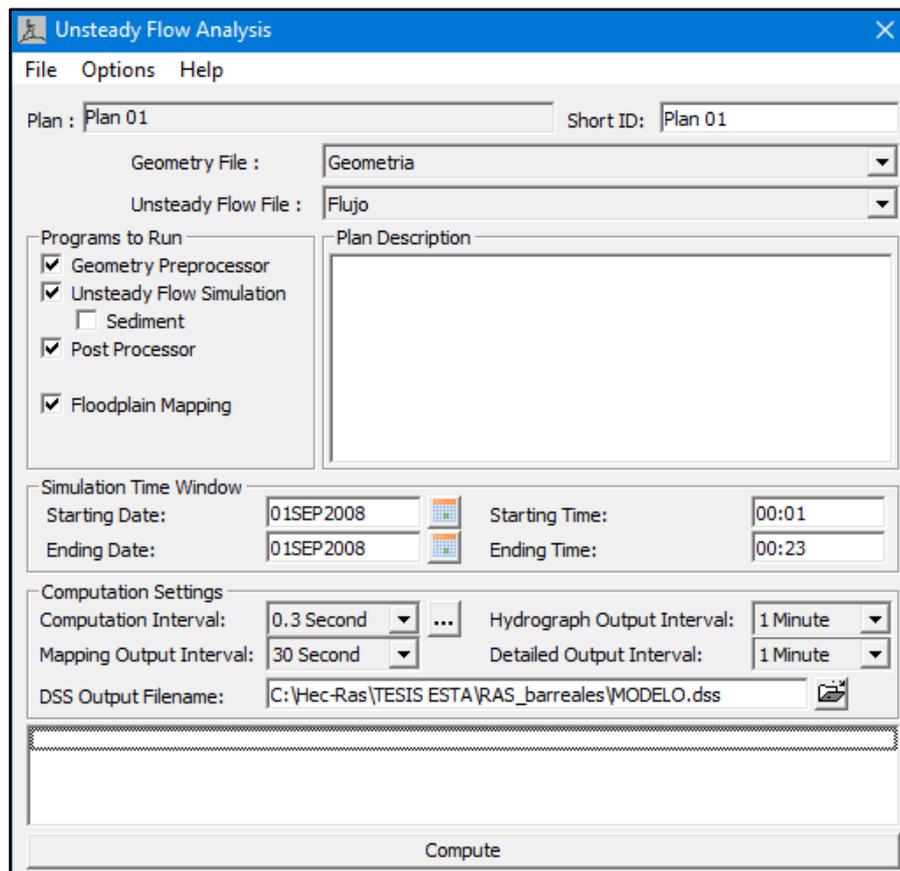


Figura 3.5. Selección de los resultados de la corrida y definición de los tiempos de cómputo

Mapeo del parámetro n de Manning (*Add Manning's Value*): La rugosidad de la superficie influirá en la velocidad que puede alcanzar el escurrimiento superficial sobre el terreno: a mayor rugosidad, el escurrimiento será más lento y viceversa (Breña Puyol y Villa, 2006). El concepto de rugosidad permite simular la aspereza o falta de uniformidad del lecho natural de un cauce

(Coello, 2013). El coeficiente de rugosidad n es muy variable y depende de varios factores, tales como la rugosidad de la superficie, la vegetación, la irregularidad del canal, el alineamiento del canal, la sedimentación y socavación, la presencia de obstrucciones y sus características de tamaño, forma y número dentro del canal que tienden a incrementar el n . Por otro lado, el tamaño y forma del canal, el nivel y caudal, y el cambio estacional puede originar un aumento de vegetación en el lecho del cauce y, a su vez, variación en el coeficiente n (Mayta Rojas y Mamani Maquera, 2018).

Para la modelación es necesario discretizar el parámetro de rugosidad en función del tamaño y forma de los granos del material que forma el perímetro mojado.

La determinación de los valores de n de Manning se realiza a través de tablas, las cuales están en función del tipo de canal. En estas tablas se acostumbra presentar el coeficiente de Manning en tres categorías: mínimo, normal y máximo. El coeficiente de Manning normal es el que se emplea corrientemente en los cálculos. En el diseño de canales se utilizan los valores extremos, como factores de seguridad. El valor mínimo para examinar la posibilidad de socavación de la sección transversal y el máximo para verificar que ésta sea suficientemente alta para evitar desbordamientos (Cadavid, 2006). La estimación de la rugosidad del cauce se basa en una valoración subjetiva.

Para el caso en estudio se utilizó la tabla de valores de coeficiente de rugosidad propuesta por Chow (1994) expuesta en el apartado 8.1 del Anexo y se estimó n para corrientes naturales y planicies de inundación (Tabla 8.1) para áreas con distintas características, obteniéndose los siguientes valores:

Camino y picadas	0,03
Instalaciones	0,03
Cauces	0,035
Terreno sin vegetación	0,045
Terreno con vegetación	0,048

Tabla 3.5. Valores de n de Manning estimados

Los valores de n de Manning obtenidos se digitalizaron en formato vectorial mediante el *software* ArcGIS (Figura 3.6).

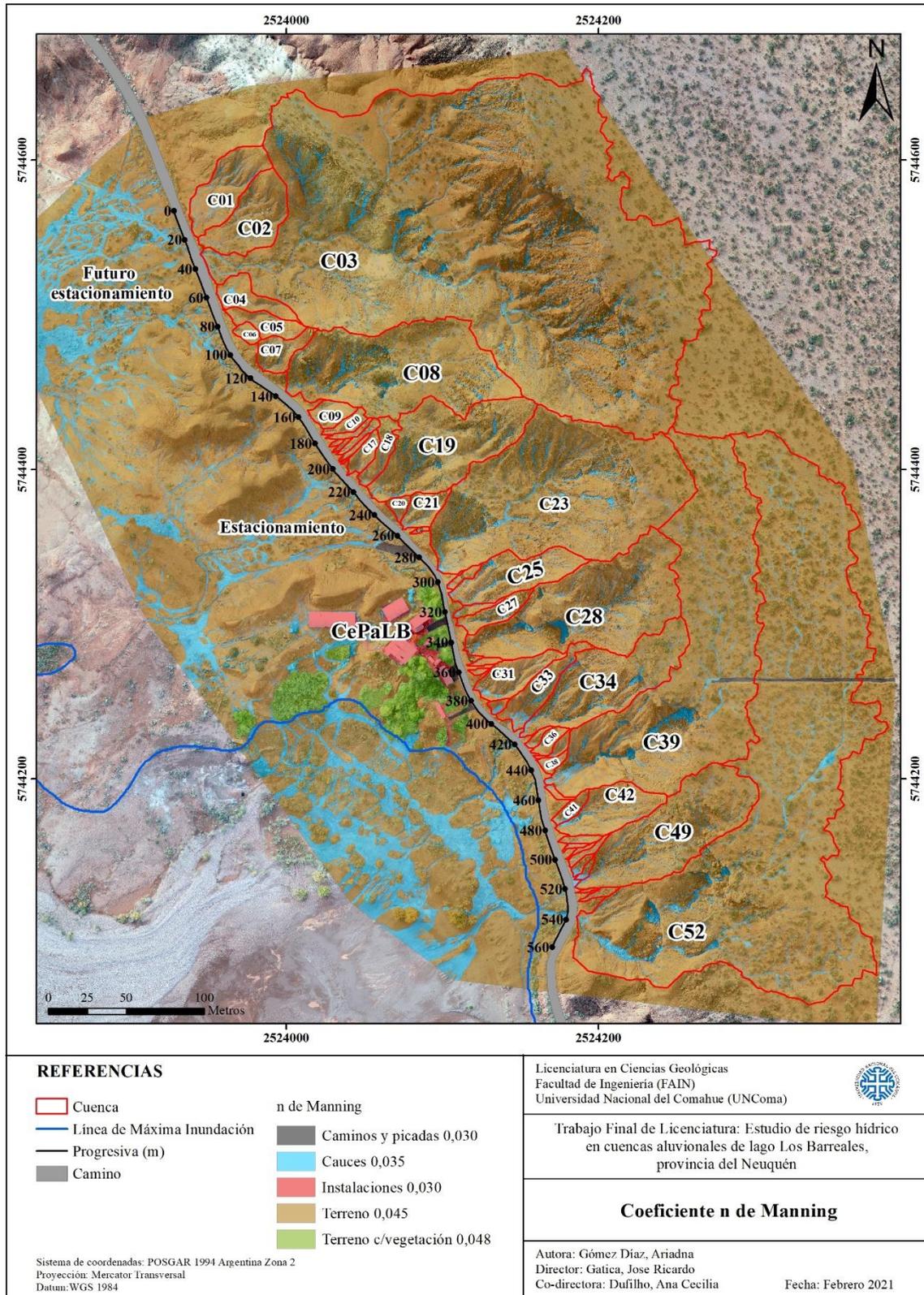


Figura 3.6. Coeficiente n de Manning para distintas superficies del área de estudio

3.5. Erosión generalizada

3.5.1. Introducción

La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas de suelo por acción de algún agente erosivo.

La erosión hídrica en un cauce es la pérdida del material del lecho y márgenes, debido a la capacidad de transporte asociada a un evento hidrológico. La profundidad de la erosión alcanzada depende del tipo y tamaño de las partículas que conforman el lecho y de la magnitud y duración del evento hidrológico (Barbosa Gil, 2013).

Los factores que influyen en la erosión son principalmente:

- Factores geomorfológicos: Las características de mayor interés son la pendiente, la geometría de la sección transversal, su forma en planta, las características del material del lecho y las condiciones de borde del canal (Barbosa Gil, 2013).
- Factores de transporte: Las características del flujo, como la velocidad, duración, caudal y frecuencia, así como las tasas de transporte y tipo de sedimento transportado durante tales eventos (Barbosa Gil, 2013).

Además, la erosión puede clasificarse en 3 tipos según su naturaleza:

- Erosión general: Puede subdividirse en dos tipos según la escala temporal
 - Erosión general a corto plazo: Se desarrolla durante la propagación de crecidas, sobre todo extraordinarias, debido a un desbalance entre la capacidad de transporte y el transporte efectivo. Se produce en el cauce debido al aumento de la velocidad de flujo del lecho debido a la falta de área de escurrimiento, que pone en movimiento las partículas del fondo que se encontraban en equilibrio, exista o no una estructura antropogénica (Guitelman *et al.*, 2006; Basile, 2018).
 - Erosión general a largo plazo: Son los cambios en la cota del lecho debido a causas naturales o a la acción antrópica que afecta las condiciones del río. La agradación involucra el depósito del material erosionado en el curso o en la cuenca, mientras que la degradación implica una disminución en la cota del lecho, debido a un déficit en el sedimento aportado desde aguas arriba (Guitelman *et al.*, 2006).
 - Erosión por contracción de flujo: Se da cuando disminuye el área de flujo de un curso debido a una contracción natural o causada por alguna estructura antropogénica. La erosión por contracción del flujo sucede durante las avenidas cuando el ancho de paso resulta insuficiente, por lo tanto, la erosión general de corto plazo y la debida a contracción se dan conjuntamente. Durante el tránsito de la crecida, la erosión aumenta respecto a la condición natural sin estructura. Se trata de un descenso general del lecho en correspondencia de la estructura, el cual en ríos aluviales puede ser cíclico, es decir, se produce erosión en la fase de crecimiento de caudales y durante los caudales de punta, seguido por un proceso de deposición en la fase de descenso de caudales y períodos de caudales ordinarios. Esto se debe a que una disminución en el área de flujo resulta en un aumento de las velocidades medias, es decir, hay un incremento de las fuerzas erosivas en la zona de contracción, y como consecuencia, se remueve material, aumentando la sección de paso, lo que implica una disminución en las velocidades medias, hasta alcanzar un valor menor al que se necesita para remover el fondo, deteniéndose así el proceso erosivo (Guitelman *et al.*, 2006; Basile, 2018).
- Erosión local: Es el descenso abrupto en el lecho del cauce, generado por la remoción del material de fondo debido a algún elemento físico componente de alguna obra dentro del canal o alguna singularidad natural que se encuentre interpuesta dentro de la corriente (Guitelman *et al.*, 2006).

Determinar la magnitud de la erosión es complicado por la naturaleza cíclica del proceso erosivo. La erosión puede alcanzar su máximo valor durante una crecida, y volverse difícilmente visible

luego de retirarse las aguas de inundación, al rellenarse con sedimento los huecos erosionados (Guitelman *et al.*, 2006).

3.5.2. Método de Listchvan-Levediev

El método de Listchvan- Levediev se utiliza para el cálculo la erosión general. Este método sostiene que el proceso erosivo se detiene cuando la velocidad media del flujo iguala a la velocidad que mantiene a la sección en equilibrio o en régimen, tal velocidad es mayor que la velocidad crítica de inicio de movimiento (Basile, 2018).

Cuando se cuentan con aforos de crecidas reales puede resultar interesante utilizar la distribución de caudales específicos, con la cual se puede evaluar la erosión general a corto plazo producida por una determinada crecida. La hipótesis fundamental del método consiste en asumir que la distribución transversal de caudales específicos se mantiene constante durante el desarrollo del proceso erosivo. Esto puede no cumplirse si la sección presenta importantes variaciones granulométricas tanto en sentido transversal como en sentido vertical (Basile, 2018).

- **Para sedimentos granulares:**

$$H_{sj} = \left(\frac{q_j}{4,7 \cdot \beta \cdot d^{0,28}} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

- **Para sedimentos cohesivos:**

$$H_{sj} = \left(\frac{q_j}{0,6 \cdot \beta \cdot \gamma_s^{1,18}} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

Donde:

H_{sj} es la **profundidad de flujo** de la faja j **luego de la erosión general** (m).

q_j es el **caudal específico** de faja j que se calcula como el producto de la velocidad media de la faja j (m/s) por la profundidad media de la faja j (m) antes de la erosión general:

$$q_j = U_{mj} \cdot h_j$$

d es el **diámetro representativo del sedimento** del lecho (m). Para sedimentos en el rango de las arenas, cuasi-uniformes se toma $d = d_{50}$ (mediana de la distribución granulométrica del sedimento del lecho) y para sedimentos no uniformes como gravas se toma $d = d_m$ (diámetro medio aritmético).

γ_s es el **peso específico seco del sedimento** del lecho (t/m³).

β es un **coeficiente adimensional**, que depende de la recurrencia R asociada al caudal de diseño (para 10 años $\leq R \leq 1000$ años):

$$\beta = 0,8217 + 0,0369 \cdot \ln R$$

x es **función del diámetro representativo d y del peso específico seco γ_s** . Las siguientes ecuaciones brindan el valor de x:

- Para sedimentos granulares: Para d expresado en (mm)

$$x = \begin{cases} 0,4007 \cdot d^{-0,0262} \rightarrow 0,2 < d(mm) \leq 1 \\ 0,4050 \cdot d^{-0,0778} \rightarrow 1 < d(mm) < 100 \\ 0,5235 \cdot d^{-0,1359} \rightarrow 100 \leq d(mm) < 500 \end{cases}$$

- Para sedimentos cohesivos: Para γ_s expresado en (t/m³)

$$x = \begin{cases} 0,4423 \cdot \gamma_s^{-0,7260} \rightarrow 0,9 \leq \gamma_s(t/m^3) < 1,2 \\ 0,4363 \cdot \gamma_s^{-0,6433} \rightarrow 1,2 \leq \gamma_s(t/m^3) \leq 2 \end{cases}$$

3.5.3. Estimación de la erosión generalizada con Sistema de Información Geográfica

Se realizó un mapa, en formato ráster, de la profundidad de flujo después de la erosión generalizada utilizando la función *Raster Calculator* y la ecuación de Listchvan-Levediev para suelos cohesivos. Para ello, se usaron los mapas de tirante y velocidad máximos obtenidos del modelo hidráulico realizado con HEC-RAS y exportados como formato ráster. Para la ecuación se adoptó como valor del peso específico seco del sedimento $\gamma_s = 1,20$, valor más desfavorable para una granulometría de limos.

Para la obtención del mapa de erosión generalizada se utilizó nuevamente la función *Raster Calculator* realizando la diferencia entre la profundidad de flujo después de la erosión general y la profundidad de flujo antes de la misma. Para ello, se utilizaron el ráster de profundidad de flujo después de la erosión generalizada, generado previamente, y el mapa de tirante máximo obtenido del modelo hidráulico, el cual representa la profundidad de flujo antes de la erosión general.

4. CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS ZONALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Clima

La provincia del Neuquén presenta una importante heterogeneidad climática dada por los gradientes climáticos asociados a las temperaturas y a las precipitaciones. El primer caso se relaciona con la altimetría, es decir, menores temperaturas a medida que la altura es mayor. El segundo caso se debe a la variación de las precipitaciones en sentido Oeste-Este, que son abundantes en la zona occidental y disminuyen su intensidad hacia la zona oriental. Esto último se debe a que el clima continental de la provincia del Neuquén se encuentra condicionado por la acción del anticiclón del Pacífico Sur y por el efecto orográfico, generando dos sectores bien diferenciados: el occidental o región andina y el oriental o región extra-andina. En el sector occidental los vientos húmedos provenientes desde el Océano Pacífico descargan la humedad como consecuencia de la influencia de la Cordillera de los Andes. Por lo tanto, la región andina se caracteriza por un clima húmedo y frío, mientras que la región extra-andina presenta un clima seco y templado.

La zona de estudio se encuentra dentro de la región extra-andina, donde el clima varía de subhúmedo seco a árido, con precipitaciones anuales menores a 200 mm, temperatura media anual entre 10°C y 14°C y las máximas medias entre 16°C y 23°C. Esta región presenta un marcado déficit hídrico anual, es decir, las precipitaciones son menores que la evapotranspiración potencial. Las precipitaciones son de origen convectivo, caracterizándose por su gran intensidad, corta duración y escasa cobertura areal (Marizza *et al.*, 2010; Pereyra *et al.*, 2011; FAO, 2015).

4.2. Geología

El área de estudio se encuentra dentro de los depósitos del Subgrupo Río Neuquén perteneciente al Grupo Neuquén. Según Garrido (2011), el Grupo Neuquén está compuesto por una sucesión de depósitos continentales de origen fluvial, eólico y lacustre somero, desarrollada entre el Cenomaniano Temprano y el Campaniano Medio (Cretácico Superior) y constituida por una sucesión clástica compuesta principalmente de areniscas, fangolitas y grauvacas, con una escasa participación de horizontes conglomerádicos. La depositación del Grupo Neuquén se encuentra vinculada al inicio de la fase de antepaís de la Cuenca Neuquina, originada como consecuencia de una tectónica compresional sobre el margen andino ocurrida a fines del Cretácico Inferior. Litoestratigráficamente, el Grupo Neuquén se compone de tres subgrupos y nueve formaciones (Figura 4.1).

El Subgrupo Río Limay, en la base, comprende a las Fms. Candeleros y Huincul, y representa depósitos de canales de baja sinuosidad desarrollados bajo un control tectónico y climático subordinado.

El Subgrupo Río Neuquén comprende a las Fms. Cerro Lisandro, Portezuelo, Los Bastos, Sierra Barrosa y Plottier, y conforma una sucesión alternante de depósitos pelíticos y psamíticos con bajo grado de litificación, de origen fluvial, desarrollados principalmente bajo control climático. El pasaje entre las formaciones que integran al Subgrupo Río Neuquén es de carácter transicional. Sus límites formacionales están dados por la variación dentro de la secuencia en la relación pelita/psamita, así como en el cambio en la arquitectura de los depósitos de los cuerpos canalizados. Las unidades psamíticas del Subgrupo Río Neuquén (Fms. Portezuelo y Sierra Barrosa), están caracterizadas por depósitos de sistemas de canales arenosos, conformando en conjunto cuerpos tabulares o mantiformes arealmente expandidos y de carácter multihistórico. Por el contrario, las unidades fangosas (Fms. Cerro Lisandro, Los Bastos y Plottier), quedan representadas por depósitos de paleocanales simples, de carga mixta, conformando cuerpos cordoniformes arealmente reducidos. La Fm. Cerro Lisandro se compone en gran parte por

depósitos clásticos finos, entre los que predominan monótonos y potentes bancos de fangolitas rojas que se intercalan con delgados niveles de limolitas y areniscas finas, débilmente consolidadas. Estos depósitos han sido vinculados a medios fluviales sinuosos de carga mixta o fangosa dominante, planicies fangosas distales de sistemas fluviales y a complejos de distributarios proximales de abanico terminal. La Fm. Portezuelo se compone por una sucesión de psamitas y pelitas interestratificadas, existiendo normalmente un dominio de la fracción clástica arenosa. Los términos psamíticos se conforman de areniscas de granulometría media (dominante), escasa a nula matriz y débil cemento carbonático. La fracción pelítica se compone mayormente de fangolitas rojizas poco consolidadas, seguidas en segundo término por depósitos limo-arenosos. Los depósitos de esta formación sugieren un ambiente de depositación vinculado a sistemas fluviales de alta sinuosidad, de tipo meandroso y carga arenosa dominante. La Fm. Los Bastos, unidad de dominio pelítico, se encuentra principalmente compuesta por potentes bancos de fangolitas rojas. Es frecuente la intercalación de delgados niveles de limolitas y areniscas finas bien seleccionadas, débilmente consolidadas. Las sedimentitas de esta unidad han sido atribuidas a depósitos de sistemas fluviales de monocanales sinuosos de carga mixta a fangosa. La Fm. Sierra Barrosa, unidad de dominio psamítico, presenta una sucesión de areniscas de granulometría media a fina, débilmente consolidada, con intercalaciones menores de niveles fangosos. Los términos psamíticos se componen de areniscas, con escasa a nula matriz y débil cemento carbonático. La fracción pelítica se conforma principalmente de fangolitas rojizas poco consolidadas, seguidas en segundo término por depósitos limo-arenosos. Paleoambientalmente, esta formación es atribuida a depósitos de sistemas fluviales de alta sinuosidad y carga arenosa dominante. La Fm. Plottier se compone casi exclusivamente de pelitas rojas a rojizas pálidas, poco consolidadas, con intercalaciones de bancos de limolitas y areniscas finas. En algunos sectores, los cuerpos canalizados presentan bancos de areniscas de granulometría media con un ligero contenido de matriz fangosa. Las sedimentitas de esta unidad han sido interpretadas como depósitos de baja energía, vinculados a amplias llanuras aluviales de escaso relieve. Más recientemente, se atribuyeron las mismas a depósitos de sistemas fluviales sinuosos de carga mixta a fangosa dominante; mostrando una vinculación genética similar al resto de las unidades pelíticas del Subgrupo Río Neuquén.

Finalmente, el Subgrupo Río Colorado, integrado por las Fms. Bajo de la Carpa y Anacleto, comprende a depósitos fluviales desarrollados bajo un nuevo control tectónico dominante.

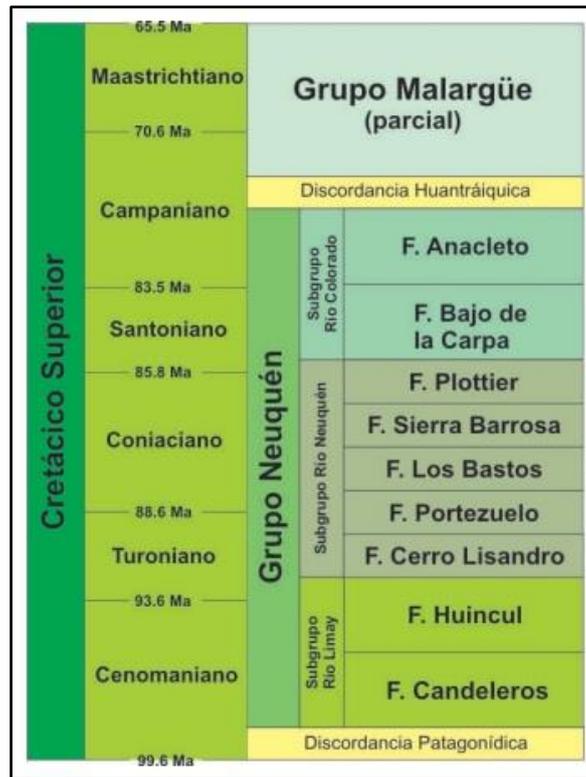


Figura 4.1. Esquema litoestratigráfico del Grupo Neuquén (Fuente: Garrido, 2011)

La identificación geológica del área de estudio se realizó en base a la Hoja Geológica 3969-II, Neuquén (Rodríguez *et al.*, 2009), presentando una escala 1:250.000.

Las cuencas se desarrollan sobre un sistema de terrazas constituidas por bancos de areniscas masivos y duros, los cuales intercalan con depósitos finos (fangolitas) menos resistentes a la erosión (Figura 4.2). La zona de estudio se encuentra dentro de los niveles del Subgrupo Río Neuquén del Cretácico Superior compuesto de areniscas y fangolitas de ambiente fluvial. La Fm. Portezuelo aflora en la parte suroeste, en dirección al lago, mientras que las Fms. Los Bastos, Sierra Barrosa y Plottier ocupan casi la totalidad del área de estudio, incluyendo las bardas. La base del Subgrupo Río Colorado aflora en la meseta alta, al Noreste, y se encuentra cubierta por gravas y arenas correspondientes a depósitos fluviales pleistocenos. Los depósitos aluviales actuales se encuentran en las zonas distales de las cuencas, al Suroeste, y corresponden a los sedimentos transportados por los cursos fluviales efímeros.

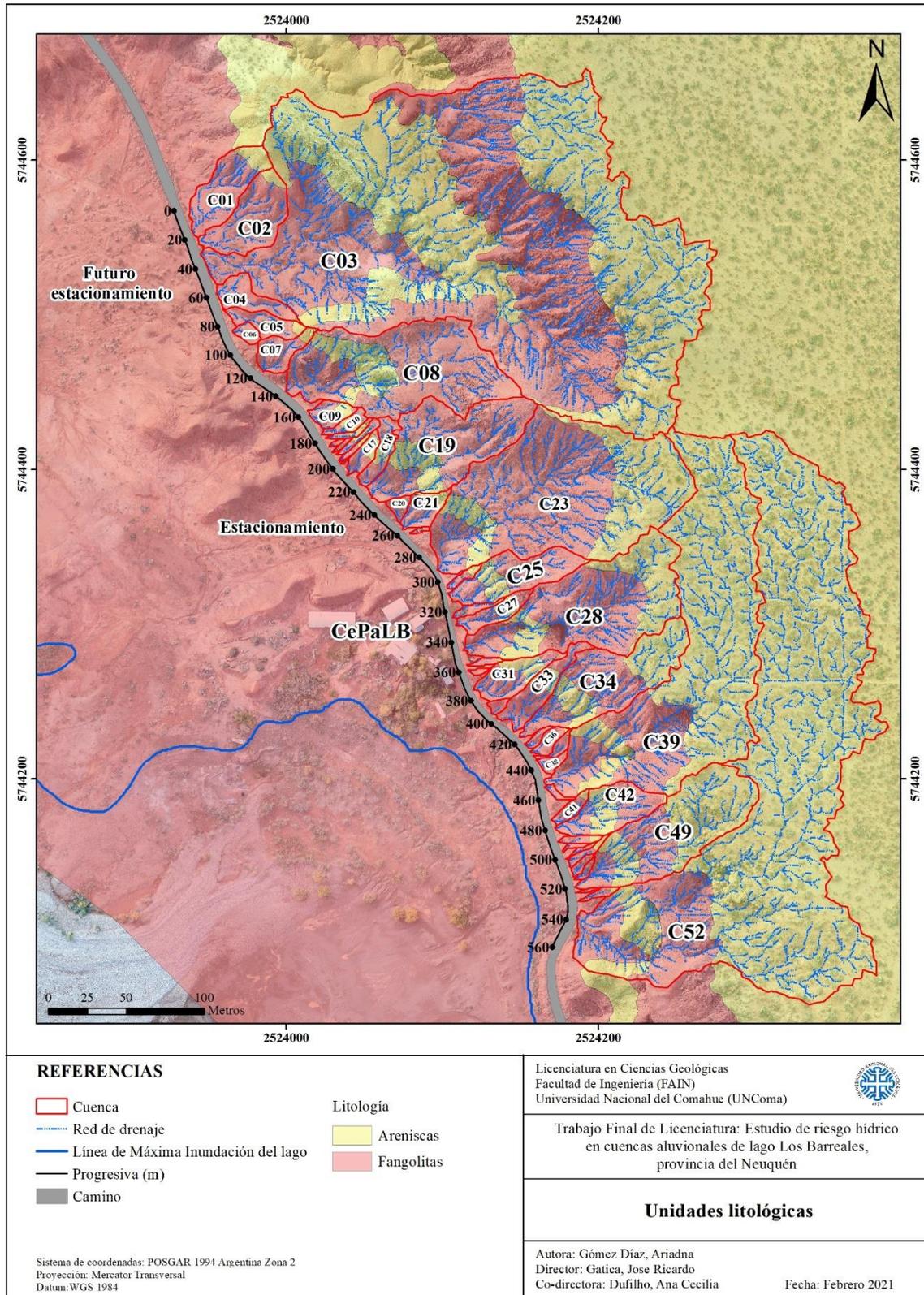


Figura 4.2. Unidades litológicas del área de estudio

4.3. Geomorfología

La zona de estudio se halla dentro de la Subregión Árida Mesetiforme, en la región extra-andina, la cual presenta un relieve mesetiforme caracterizado por amplias mesetas discontinuas, cuyas superficies cuspidales son marcadamente planas, y que es atribuible a la influencia de la estructura geológica, ya que los estratos continentales mesozoicos yacen posiblemente horizontales. Geomorfológicamente se trata de “planicies estructurales por arrasamiento” que se originan en la degradación, por acción fluvial, de mantos poco resistentes hasta alcanzar una capa dura de apreciable extensión. Las terrazas, con niveles desde 50 a 400 msnm, están surcadas por cauces, solamente activos durante tormentas, que desembocan en los valles fluviales o en cuencas endorreicas. Los niveles de terrazas más antiguos, y más altos, se encuentran generalmente cementados por carbonatos o por yeso y dominan los materiales gruesos (gravas y rodados). Es frecuente la presencia de otras geoformas entre las que se destacan: pedimentos, bajadas, conos aluviales y cerros mesa así como planicies aluviales de los ríos Neuquén y Limay y sus principales tributarios. Se manifiestan, en menor medida, “montones de arenas” o dunas enanas debido a la ocurrencia de fenómenos asociados a la actividad eólica (Dufilho *et al.*, 2001; Ferrer *et al.*, 2006; Pereyra *et al.*, 2011).

En general, en el área de estudio predomina una morfología con pequeñas mesetas o “bardas” constituidas por bancos duros de areniscas que alternan con fangolitas poco resistentes a la erosión que conforman los taludes y bajada (Figura 4.3). Estas bardas se encuentran surcadas por cauces efímeros y cubiertas por niveles de pedimentos convergentes hacia el lago. Es común la existencia de *badlands* en la zona de estudio debido a la presencia de procesos erosivos muy activos con desarrollo de cárcavas, pérdida del suelo y escasa cubierta vegetal como consecuencia del clima árido, de lluvias intensas de corta duración y del proceso de escorrentía, lo que genera que la roca parental se altere parcialmente en la superficie produciendo la formación de regolito.

Por afuera del área de estudio y hacia al Noreste, se desarrolla una morfología fluvial generada por el río Neuquén, con desarrollo de terrazas fluviales como remanentes de previas planicies de inundación, cuyo origen se atribuye a modificaciones del régimen de descarga fluvial debido principalmente a cambios climáticos.

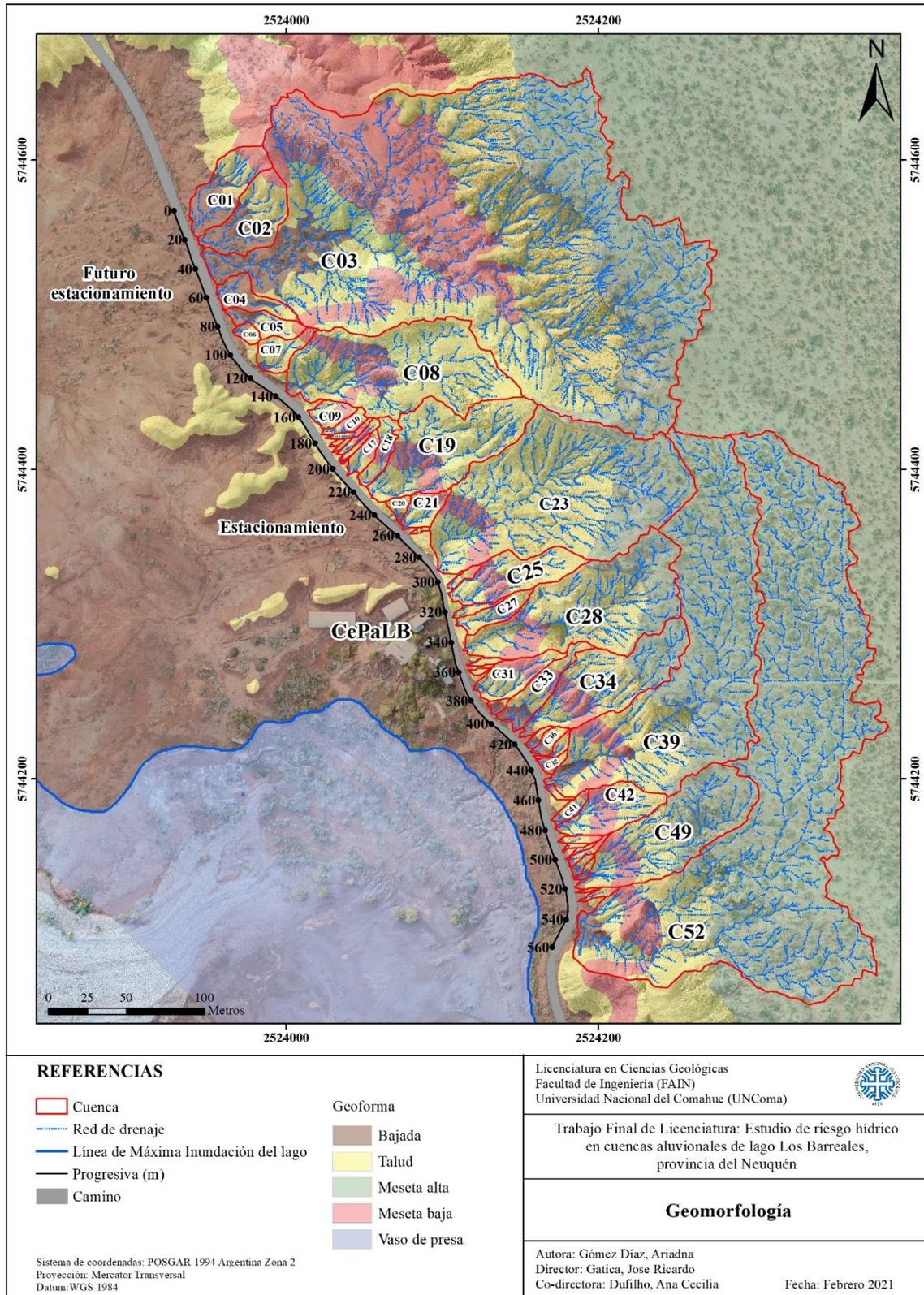


Figura 4.3. Geomorfología del área de estudio

4.4. Suelos

El área de estudio se encuentra dentro de la Subregión Árida Mesetiforme en el ámbito de la región extra-andina, la cual presenta un marcado déficit hídrico y una vegetación rala de estepa arbustiva, condiciones responsables del escaso contenido de materia orgánica (menos del 1%) y, en consecuencia, la posible ausencia de procesos de melanización con predominio de horizontes ócricos. A su vez, este balance hídrico negativo impide la lixiviación de los constituyentes solubles, dando lugar a horizontes cálcicos, petrocálcicos, gypsicos, petroyipsicos y sálicos caracterizados por acumulaciones calcáreas, yesosas o salinas, o bien pueden producirse acumulaciones de sales solubles sin constituir horizontes diagnósticos. Los suelos poseen una completa saturación con base y, por lo tanto, un pH neutro a alcalino. Las condiciones climáticas de la Subregión Árida Mesetiforme determinan para los suelos un régimen de humedad arídico y de temperatura térmico y mésico. Esta subregión se caracteriza por poseer un predominio de suelos Áridisoles respecto de Entisoles debido a que la estructura geológica subhorizontal favorece procesos de infiltración, aun cuando la oferta pluvial es escasa, y a la vez, facilita la perdurabilidad de las geformas y, por lo tanto, suelos con mayor grado de desarrollo en los que es frecuente la presencia de horizontes diagnósticos calcáreos y yesosos, tanto cementados como no consolidados. Los Aridisoles son los suelos de mayor grado de diferenciación pedogenética, presentando perfiles con uno o más horizontes diagnósticos de acumulación y poseen una permeabilidad variable condicionada por la presencia de horizontes cementados. Por otro lado, los Entisoles son suelos de escaso a nulo grado de desarrollo pedogenético, carentes de horizontes diagnósticos, con perfiles muy simples (A/C es característico), con rasgos heredados de los materiales parentales y con alta permeabilidad. Presentan alta susceptibilidad a la erosión hídrica por lo que se desarrollan en áreas donde la escorrentía no permite la evolución de los suelos como es el caso de zonas de taludes o laderas, pendientes controladas por procesos de remoción en masa, terrazas fluviales recientes, planicies aluviales y en abanicos aluviales que conforman el piedemonte de los sistemas serranos precordilleranos (Ferrer *et al.*, 2006; Pereyra *et al.*, 2011).

En la Figura 4.4 se exhibe la distribución de las clases texturales de suelos de interés para el estudio hidrológico.

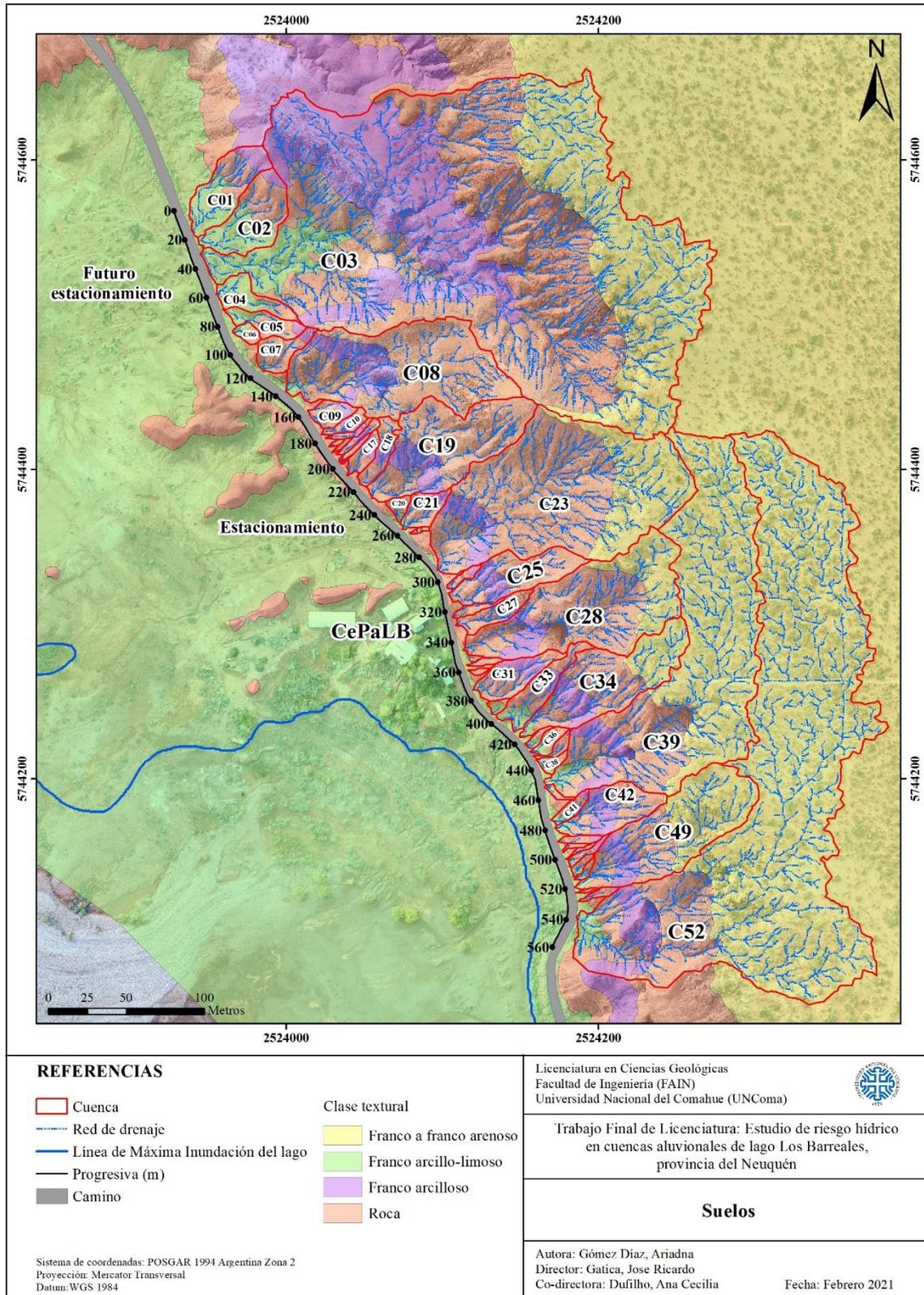


Figura 4.4. Unidades de suelo del área de estudio

4.5. Pendientes

La pendiente general del terreno de una cuenca constituye otro de los factores cuya consideración puede resultar de sumo interés ya que tiene influencia en la forma en la que el agua ya precipitada, se dirige hacia la salida de la misma. La pendiente del terreno natural tiene una relación directa con la velocidad del escurrimiento sobre la cuenca, pero, además, presenta una dependencia muy compleja, con el fenómeno de la escorrentía superficial propiamente dicha, dada su marcada interrelación con la infiltración, el contenido de humedad del suelo, las irregularidades localizadas y el crecimiento de la vegetación (Fattorelli y Fernández, 2011).

La determinación de las pendientes del área de estudio se realizó a través del procesamiento de la información geográfica proporcionada por el Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM) obtenido mediante aerofotogrametría, con una resolución espacial de 0,5 m de tamaño de pixel, utilizando el *software* ArcGIS (Sistema de Información Geográfica) por medio de la función *Slope* (pendiente), entendida como el gradiente o tasa de cambio máximo en el valor z, desde cada celda de una superficie de un ráster. Esta función genera una matriz de datos que representa para cada pixel o cuadrícula el valor de la pendiente máxima con relación a las cuadrículas cercanas o la relación en el cambio de altura para cada celda (Quijano Cossío, 2015). Para el mapa de pendiente se utilizó la clasificación de gradiente de pendiente según la FAO (2009) como se detalla en la Tabla 4.1.

Clase	Descripción	%
01	Plano	0–0,2
02	Nivel	0,2–0,5
03	Cercano al nivel	0,5–1,0
04	Muy ligeramente inclinado	1,0–2,0
05	Ligeramente inclinado	2–5
06	Inclinado	5–10
07	Fuertemente inclinado	10–15
08	Moderadamente escarpado	15–30
09	Escarpado	30–60
10	Muy escarpado	> 60

Tabla 4.1. Clases de gradiente de pendiente (Fuente: FAO, 2009)

En general, el área de estudio (Figura 4.5) exhibe bajas pendientes debido a que se encuentra en la Subregión Árida Mesetiforme, la cual presenta un relieve mesetiforme caracterizado por escarpas o bardas. La mayoría de estas planicies exhiben superficies casi planas, con pendientes entre 1% y 10% (relieve inclinado), que contrastan con sus flancos o laderas cuyas fuertes pendientes poseen valores superiores al 30%, correspondientes a un relieve escarpado, lo que favorece los procesos de erosión y transporte del material aluvial. La bajada presenta, en general, pendientes menores al 10%, con algunos sectores con pendientes muy bajas (menores al 0,5%), principalmente en los sectores norte y medio, indicando un relieve plano en donde el flujo de agua se presenta de forma laminar. Por el contrario, en otros sectores presenta elevadas pendientes (mayores al 30%) que se corresponden con los desniveles y las laderas de los montículos.

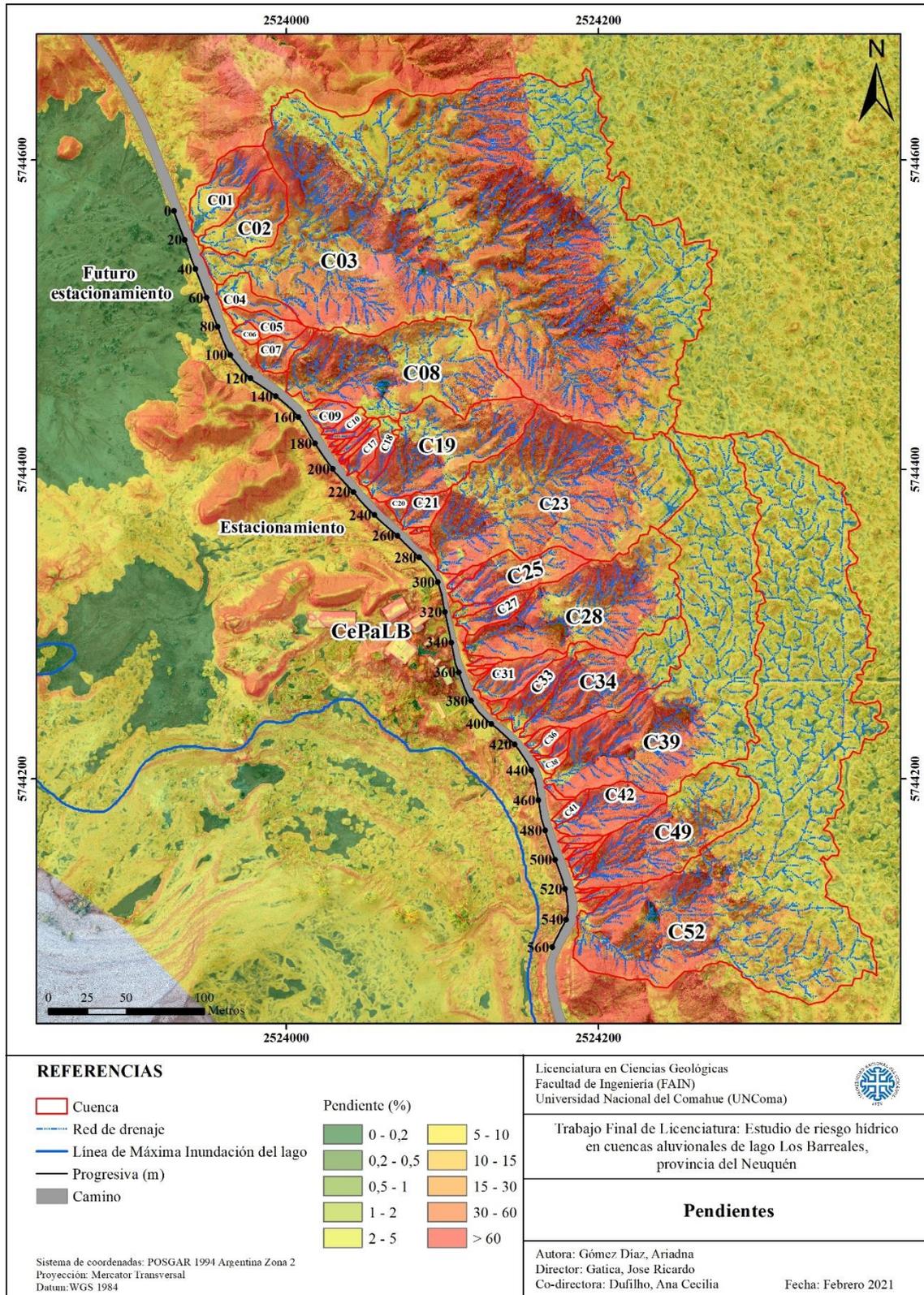


Figura 4.5. Mapa de pendientes del área de estudio

4.6. Drenaje y cuencas vertientes

El área de estudio se encuentra entre el ámbito de la cuenca Los Barreales, al Suroeste, y las terrazas fluviales del río Neuquén, al Noreste. La red hidrográfica de la zona presenta un patrón dendrítico con sentido de escurrimiento hacia el Suroeste, dirigiéndose en dirección a la cuenca Los Barreales, con cursos de régimen efímero que inician en las antiguas terrazas del sector Noreste. Las terrazas representan el sector de aporte a las cuencas y exhibe un relieve plano que no genera una red de drenaje, sino que se producen acumulaciones temporales de agua en las ondulaciones del terreno, caracterizando el área por cursos difusos. Los cursos efímeros se sitúan sobre las laderas con pendientes de alto grado con erosión en surcos y, en zonas próximas a las cabeceras, procesos de cárcavamiento. Las laderas representan una zona de transferencia en donde predominan los procesos de transporte de sedimento. Hacia la zona distal de las cuencas prevalecen procesos de erosión laminar y/o en surco, y, en unas pocas cuencas, la deposición o acumulación de sedimentos conformando pequeños abanicos aluviales. Las lluvias características de la zona son de corta duración, pero intensas, lo que genera caudales pico de escasa duración que decrecen abruptamente.

4.7. Vegetación

La zona de estudio está incluida dentro de la provincia fitogeográfica de Monte con vegetación natural predominante de matorral arbustivo, bajo y ralo, que consiste en especies achaparradas, espinosas y resinosas. Las especies dominante son la jarilla (*Larrea spp*), la zampa (*Atriplex pss*), la vidriera (*Suaeda spp*), el alpataco (*Prosopis alpataco*) y otras especies arbustivas y subarbustivas, acompañadas con muy poca presencia de gramíneas (*Stipa spp*) (Mussini *et al.*, 1984; Secretaría de energía, 2003; Ferrer *et al.*, 2006).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Relevamiento de campo

Los sitios relevados en el área de estudio se detallan en la Tabla 5.1.

Punto	Coordenadas Geográficas		Cuenca
	Latitud	Longitud	
1	38° 27' 11,92" S	68° 43' 22,86" O	C52
2	38° 27' 11,11" S	68° 43' 22,66" O	C49
3	38° 27' 9,18" S	68° 43' 23,47" O	C42
4	38° 27' 9,30" S	68° 43' 23,52" O	C39
5	38° 27' 8,01" S	68° 43' 24,09" O	C33, C34
6	38° 27' 9,25" S	68° 43' 25,03" O	C33, C34, C39
7	38° 27' 6,45" S	68° 43' 25,80" O	C28
8	38° 27' 5,88" S	68° 43' 25,59" O	C26, C27
9	38° 27' 4,73" S	68° 43' 26,57" O	C23
10	38° 27' 3,98" S	68° 43' 27,42" O	C20, C21
11	38° 27' 3,07" S	68° 43' 28,75" O	C18, C19
12	38° 27' 0,91" S	68° 43' 30,29" O	C08
13	38° 26' 58,04" S	68° 43' 32,73" O	C03

Tabla 5.1. Sitios relevados en el área de estudio

El punto 1 corresponde a la cuenca C52. A través del sondeo con barreno, se observa que el lecho del cauce presenta en los primeros 0,2 m de profundidad areniscas finas debidas a la dinámica hídrica del mismo y, por debajo, le siguen fangolitas rojas pertenecientes a la Fm. Plottier (Figura 5.1.a). En este punto se realizó un sondeo y recolectó la muestra C1-M2.

El cauce que se encuentra aguas abajo de la cuenca C52 presenta erosión en surco y se observan en sus márgenes un relleno antrópico compuesto por aproximadamente 0,40 a 0,50 m de grava, en la parte superior, y, por debajo, 1,30 m de derrubio de composición heterogénea constituido por areniscas muy finas y fangolitas (Figura 5.1.b). La muestra C1-M1 se tomó en el lecho del cauce.

El punto 2 corresponde a la cuenca C49. Esta cuenca presenta erosión en surco y laminar, y su flujo escurre hacia la cuenca C52, ya que se encuentra modificado por un borde aguas abajo lo que impide su trayectoria natural de flujo, redireccionando el mismo.

El punto 3 corresponde a la cuenca C42, la cual presenta erosión en surco y escurre hacia la cuenca C52, por lo que contribuye al caudal generado por las cuencas que se encuentran al Sur de la cuenca C42.

El punto 4 corresponde a la cuenca C39. Esta cuenca presenta erosión en surco y se desarrollan procesos de carcavamiento y *badlands* (Figura 5.2). El cauce que se halla aguas abajo de la cuenca presenta en sus márgenes un relleno antrópico de 0,50 a 1,10 m aproximadamente (Figura 5.3).

El punto 5 corresponde a las cuencas C33 y C34, las cuales presentan erosión laminar (Figura 5.4.a) y escurren aguas abajo generando erosión en surco. El cauce aguas abajo presenta en sus márgenes cerca de 0,60 a 1,50 m de relleno antrópico (Figura 5.4.b).

El punto 6 corresponde al cauce generado por la confluencia de los cauces aguas abajo de la cuenca C39 y las cuencas C33 y C34. En este punto se recolectó la muestra C4-5-M3.

El punto 7 corresponde a la cuenca C28, la cual presenta erosión en cárcavas y escurre hacia la cuenca C33. Se observa la presencia de cavernas y derrumbes.



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

El punto 8 corresponde a las cuencas C26 y C27. En la cuenca C26 predomina la depositación del material sedimentario. La cuenca C27 presenta erosión en surco y exhibe el suelo seco en los primeros 10 cm de profundidad. En el cauce de esta cuenca se tomó la muestra C7-M4.

El punto 9 corresponde al cauce que se encuentra aguas abajo de la cuenca C23, el cual presenta en sus márgenes ~1,10 m de relleno antrópico y se encuentra afectado por un gavión (Figura 5.5).

El punto 10 corresponde al cauce que se halla aguas abajo de las cuencas C20 y C21, el cual presenta en sus márgenes 1 m aproximadamente de relleno antrópico y escurre hacia el actual estacionamiento del CePaLB (Figura 5.6).

El punto 11 corresponde a las cuencas C18 y C19. La cuenca C18 presenta erosión laminar y escurre hacia el cauce que se encuentra aguas abajo. La cuenca C19 presenta erosión en surco y una parte escurre hacia el cauce que está aguas abajo y otra parte escurre hacia la cuenca C20. El cauce ubicado aguas abajo presenta en sus márgenes ~ 1 m de relleno antrópico, se encuentra afectado por un gavión y escurre hacia el estacionamiento actual del CePaLB (Figura 5.7).

El punto 12 corresponde a la cuenca C08 que escurre hacia la cuenca C03, al Norte, y presenta erosión en surco. En este punto se recolectó la muestra C11-M5 (Figura 5.8).

El punto 13 corresponde al cauce de la cuenca C03 que presenta erosión en surco y escurre hacia el lugar en donde estará el futuro estacionamiento del CePaLB. Este cauce presenta mayor contenido de areniscas en comparación de los previamente vistos. El lecho del cauce presenta areniscas en los primeros 0,35 m de profundidad y, por debajo, le siguen arcillas (Figura 5.9). La muestra C13-M6 se recolectó en este punto.

No se pudieron llevar a cabo ensayos de infiltración debido a que el suelo se encontraba saturado como consecuencia de una lluvia intensa producida 6 días antes del relevamiento.

Los ensayos granulométricos de las muestras recolectadas se exponen en el apartado 8.2 del Anexo.

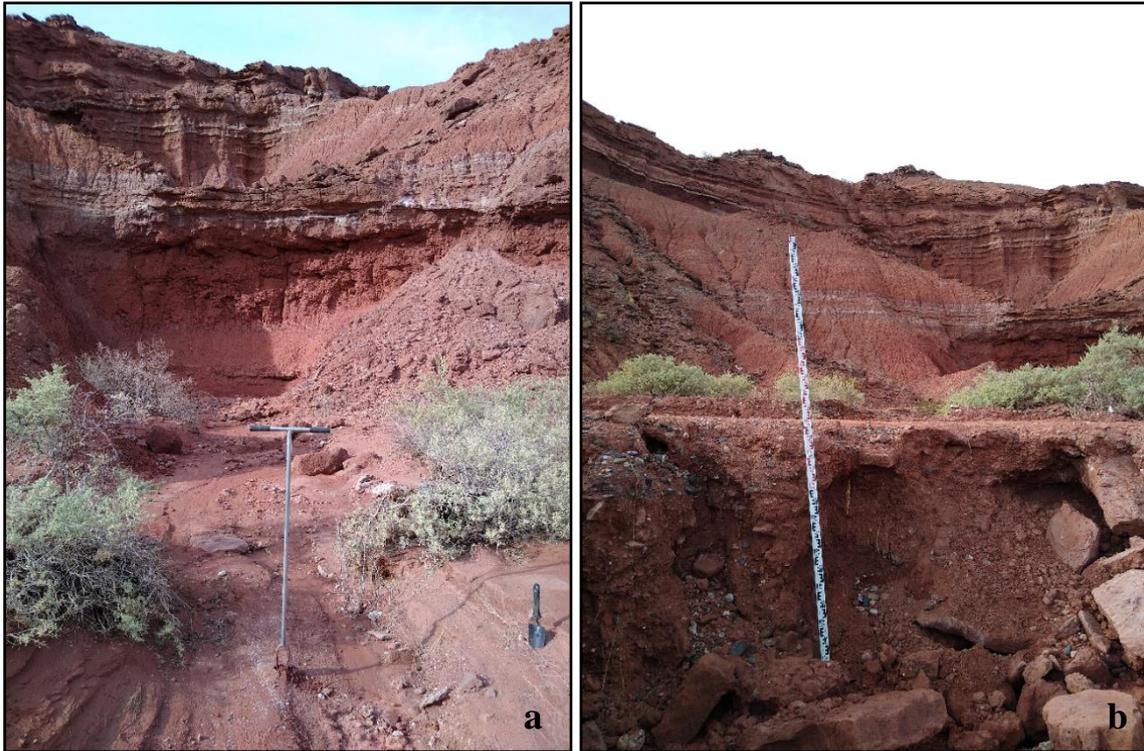


Figura 5.1. a) Sondeo con barreno en el cauce de la cuenca C52. b) Relleno de gravas y derrubios en el cauce aguas abajo de la cuenca C52



Figura 5.2. a) Desarrollo de *badlands* en la cuenca C39 (lado derecho de la fotografía). b) Tubificación (*piping*) en la cuenca C39



Figura 5.3. Relleno del cauce aguas abajo de la cuenca C39



Figura 5.4. a) Erosión laminar en los cauces de las cuencas C33 y C34. b) Relleno antrópico del cauce aguas abajo de las cuencas C33 y C34



Figura 5.5. a) Relleno antrópico del cauce aguas abajo de la cuenca C23. b) Gavión que afecta el cauce aguas abajo de la cuenca C23



Figura 5.6. Relleno antrópico del cauce aguas abajo de las cuencas C20 y C21

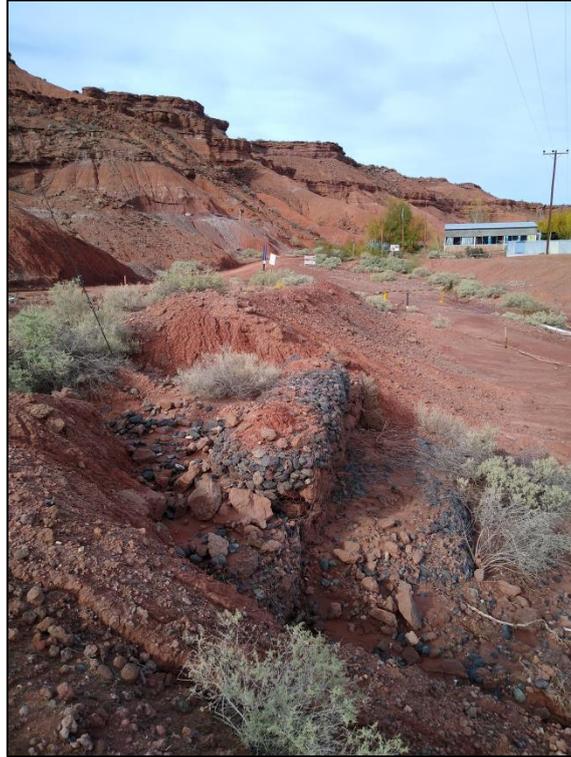


Figura 5.7. Gavión que afecta al cauce aguas abajo de las cuencas C18 y C19



Figura 5.8. Sondeo con barreno y toma de muestra en el cauce de la cuenca C08



Figura 5.9. Sondeo con barreno en el cauce de la cuenca C03

5.2. Delimitación y caracterización de cuencas aluvionales

5.2.1. Delimitación de cuencas

A través del geoprocesamiento llevado a cabo con el software ArcGIS se realizó la delimitación de las cuencas y la definición de la red de drenaje del área de estudio (Figura 5.10). Como resultado se obtuvieron 52 cuencas y una red de drenaje con patrón dendrítico compuesta por cauces efímeros.

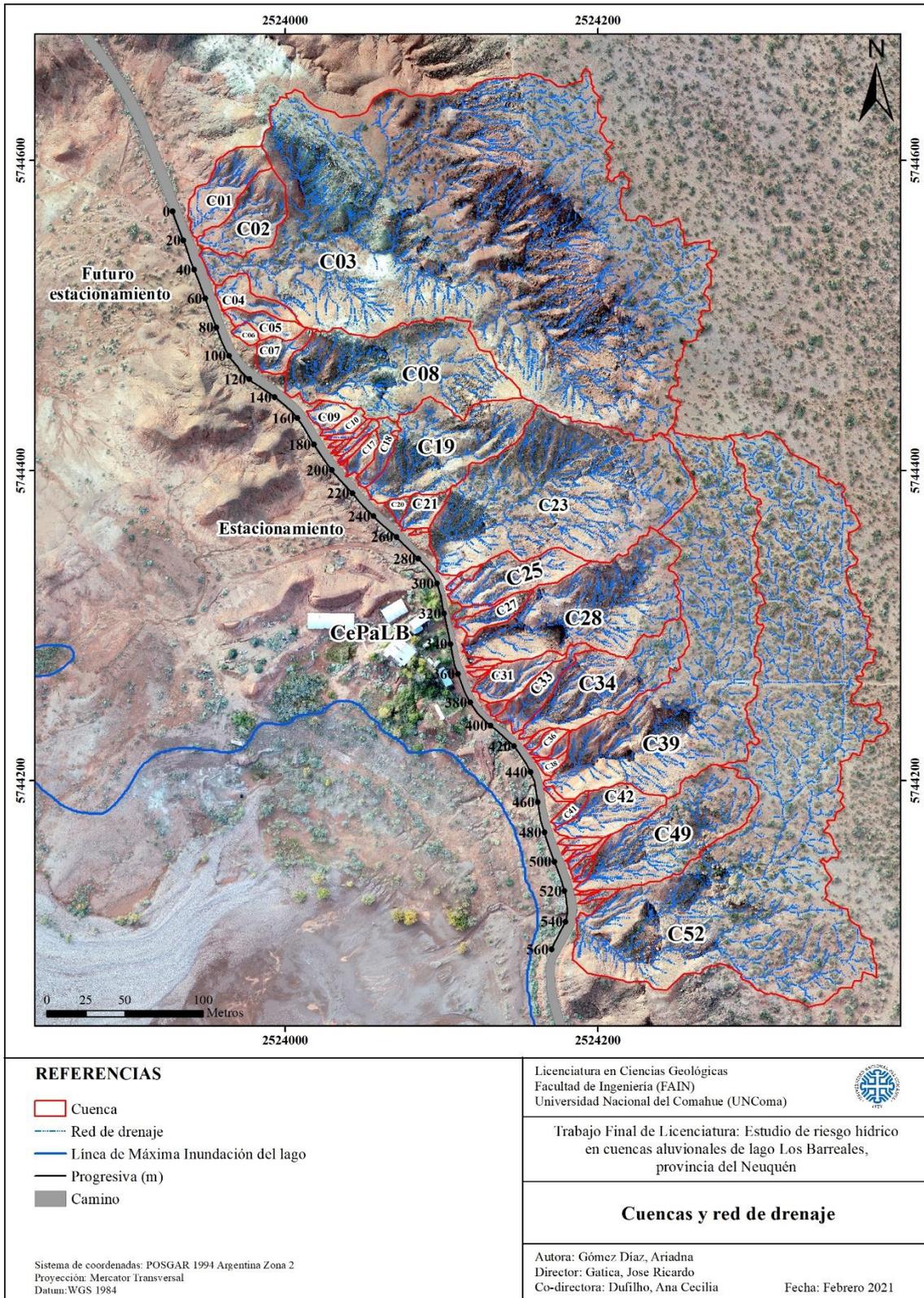


Figura 5.10. Cuencas delimitadas y red de drenaje del área de estudio

5.2.2. Caracterización de cuencas y red hidrográfica

Los resultados de la caracterización de las cuencas y la red hidrográfica se detallan y resumen en las Tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5.

5.2.2.1. *Características generales de las cuencas*

Cuenca	Área, A (ha)	Área, A (km ²)	Perímetro, P (km)	Longitud, L (km)
C01	0,15	0,002	0,18	0,09
C02	0,18	0,002	0,19	0,09
C03	4,45	0,04	1,18	0,49
C04	0,07	0,001	0,15	0,07
C05	0,06	0,001	0,13	0,07
C06	0,02	0,0002	0,05	0,03
C07	0,06	0,001	0,12	0,04
C08	0,67	0,01	0,41	0,20
C09	0,04	0,0004	0,08	0,03
C10	0,02	0,0002	0,08	0,04
C11	0,01	0,0001	0,07	0,04
C12	0,002	0,00002	0,03	0,01
C13	0,003	0,00003	0,04	0,02
C14	0,01	0,0001	0,08	0,04
C15	0,01	0,0001	0,06	0,03
C16	0,001	0,00001	0,02	0,01
C17	0,03	0,0003	0,08	0,04
C18	0,05	0,0005	0,13	0,06
C19	0,41	0,004	0,32	0,15
C20	0,02	0,0002	0,05	0,02
C21	0,05	0,0005	0,10	0,04
C22	0,003	0,00003	0,03	0,01
C23	1,16	0,01	0,49	0,23
C24	0,01	0,0001	0,06	0,03
C25	0,17	0,002	0,22	0,11
C26	0,01	0,0001	0,08	0,04
C27	0,05	0,001	0,13	0,06
C28	0,62	0,01	0,41	0,19
C29	0,01	0,0001	0,06	0,03
C30	0,004	0,00004	0,03	0,01
C31	0,09	0,001	0,15	0,08
C32	0,01	0,0001	0,04	0,02
C33	0,09	0,001	0,19	0,09
C34	0,34	0,003	0,32	0,16
C35	0,01	0,0001	0,05	0,03
C36	0,02	0,0002	0,07	0,03
C37	0,01	0,0001	0,07	0,04
C38	0,01	0,0001	0,06	0,03
C39	1,43	0,01	0,80	0,39
C40	0,01	0,0001	0,05	0,01
C41	0,02	0,0002	0,07	0,04
C42	0,14	0,001	0,18	0,08
C43	0,01	0,0001	0,06	0,03
C44	0,004	0,00004	0,04	0,02
C45	0,004	0,00004	0,05	0,02
C46	0,01	0,0001	0,08	0,04
C47	0,01	0,0001	0,05	0,02

C48	0,01	0,0001	0,05	0,02
C49	0,45	0,004	0,32	0,16
C50	0,002	0,00002	0,03	0,02
C51	0,01	0,0001	0,06	0,03
C52	3	0,03	1,30	0,57

Tabla 5.2. Parámetros generales de las cuencas del área de estudio

Dentro de las características generales de las cuencas, el área de la cuenca es un parámetro importante ya que ofrece una idea de la magnitud de los caudales producidos. Cuanto más grande sea el área de la cuenca, mayor serán los caudales generados.

Las cuencas del área de estudio son cuencas pequeñas y la mayoría de ellas poseen un área menor a 1 ha. Las cuencas que presentan un área mayor a 1 ha son las cuencas C03, C23, C39 y C52.

5.2.2.2. Características físicas de forma de las cuencas

Cuenca	Factor de forma, K_f	Coefficiente de compacidad, K_c	Forma
C01	0,18	1,31	Ovalada
C02	0,22	1,26	Ovalada
C03	0,18	1,58	Alargada
C04	0,14	1,58	Alargada
C05	0,12	1,58	Alargada
C06	0,22	1,11	Redonda
C07	0,30	1,37	Ovalada
C08	0,17	1,43	Ovalada
C09	0,31	1,19	Redonda
C10	0,17	1,50	Ovalada
C11	0,08	1,95	Alargada
C12	0,17	1,44	Ovalada
C13	0,12	1,68	Alargada
C14	0,10	1,82	Alargada
C15	0,09	1,87	Alargada
C16	0,09	1,78	Alargada
C17	0,21	1,34	Ovalada
C18	0,12	1,68	Alargada
C19	0,20	1,42	Ovalada
C20	0,32	1,23	Redonda
C21	0,26	1,29	Ovalada
C22	0,19	1,45	Ovalada
C23	0,21	1,29	Ovalada
C24	0,16	1,58	Alargada
C25	0,15	1,48	Ovalada
C26	0,09	1,88	Alargada
C27	0,14	1,56	Alargada
C28	0,17	1,48	Ovalada
C29	0,09	1,94	Alargada
C30	0,17	1,49	Ovalada
C31	0,15	1,40	Ovalada
C32	0,33	1,24	Redonda
C33	0,12	1,78	Alargada
C34	0,13	1,56	Alargada
C35	0,14	1,54	Alargada
C36	0,21	1,36	Ovalada
C37	0,11	1,79	Alargada

C38	0,20	1,38	Ovalada
C39	0,09	1,89	Alargada
C40	0,30	1,73	Alargada
C41	0,15	1,41	Ovalada
C42	0,21	1,32	Ovalada
C43	0,13	1,57	Alargada
C44	0,10	1,82	Alargada
C45	0,07	2,16	Alargada
C46	0,08	1,94	Alargada
C47	0,18	1,45	Ovalada
C48	0,12	1,62	Alargada
C49	0,17	1,37	Ovalada
C50	0,09	2,01	Alargada
C51	0,12	1,71	Alargada
C52	0,09	2,12	Alargada

Tabla 5.3. Parámetros físicos de forma de las cuencas del área de estudio

Como se mencionó en el apartado 3.2.3.2., las características físicas de forma de las cuencas influyen en la velocidad de escurrimiento, en el tiempo de concentración y en los caudales resultantes.

En general, las cuencas presentan forma alargada (cuencas C03, C04, C05, C11, C13, C14, C15, C16, C18, C24, C26, C27, C29, C33, C34, C35, C37, C39, C40, C43, C44, C45, C46, C48, C50, C51 y C52), lo que indica que el escurrimiento producido por una lluvia intensa no se concentrará rápidamente, por lo que sus tiempos de concentración serán altos y los picos de crecidas son relativamente menores que las ovaladas y redondeadas.

Por su parte, las cuencas que presentan forma ovalada (cuencas C01, C02, C07, C08, C10, C12, C17, C19, C21, C22, C23, C25, C28, C30, C31, C36, C38, C41, C42, C47 y C49) tendrán tiempos de concentración menores que los de las cuencas alargadas.

Por otro lado, las cuencas con forma redondeada (cuencas C06, C09, C20 y C32) tienden a concentrar grandes volúmenes de agua de escurrimiento en poco tiempo, por lo que sus tiempos de concentración serán pequeños y generarán grandes picos de crecidas.

5.2.2.3. Características físicas de relieve de las cuencas

Cuenca	Altura máxima, $H_{m\acute{a}x}$	Altura mínima, $H_{m\acute{i}n}$	Desnivel altitudinal, D	Pendiente media, S_m	Integral hipsométrica, H_{si}		Altura media, H_m
	(m)	(m)			H_{si}	Etapa	
C01	496,43	474,07	22,36	0,36	0,28	Vejez	484,65
C02	492,92	474,02	18,91	0,30	0,24	Vejez	482,94
C03	530,19	473,9	56,29	0,40	0,58	Madurez	501,52
C04	490,77	474,47	16,3	0,27	0,15	Vejez	480,86
C05	492,83	474,78	18,05	0,45	0,32	Vejez	483,16
C06	481,34	475,3	6,04	0,36	0,43	Madurez	478,2
C07	497,14	476,3	20,84	0,45	0,31	Vejez	485,28
C08	519,25	476,29	42,96	0,42	0,47	Madurez	497,16
C09	497,6	477,4	20,2	0,72	0,35	Madurez	486,17
C10	497,93	478,31	19,62	0,69	0,62	Juventud	487,96
C11	498,01	478,54	19,47	0,61	0,55	Madurez	488,4
C12	484,47	478,79	5,68	0,51	0,56	Madurez	481,76
C13	487,47	478,57	8,91	0,52	0,52	Madurez	482,77
C14	497,87	479,07	18,8	0,51	0,63	Juventud	488,47
C15	495,18	478,4	16,78	0,60	0,49	Madurez	486,31
C16	482,75	478,28	4,47	0,60	0,58	Madurez	480,52
C17	497,78	477,61	20,17	0,70	0,47	Madurez	487,49
C18	498,28	477,58	20,7	0,49	0,63	Juventud	487,9
C19	521,9	477,38	44,52	0,44	0,48	Madurez	498,32
C20	485,93	476,77	9,16	0,52	0,33	Vejez	480,37
C21	497,17	476,53	20,64	0,57	0,42	Madurez	486,31
C22	483,68	477,17	6,52	0,52	0,55	Madurez	480,29
C23	529,63	477,11	52,53	0,47	0,64	Juventud	503,2
C24	493,37	477,43	15,94	0,66	0,45	Madurez	484,72
C25	525,1	477,51	47,6	0,56	0,48	Madurez	499,92

C26	493,79	477,43	16,37	0,43	0,27	Vejez	484,37
C27	505,21	477,4	27,82	0,61	0,41	Madurez	491,02
C28	529,4	477,13	52,27	0,56	0,69	Juventud	502,62
C29	489,8	476,76	13,04	0,54	0,48	Madurez	482,82
C30	483,54	476,74	6,8	0,47	0,4	Madurez	479,26
C31	507,82	476,62	31,2	0,57	0,33	Vejez	490,3
C32	480,87	476,05	4,83	0,47	0,27	Vejez	477,8
C33	511,81	474,97	36,84	0,59	0,37	Madurez	491,93
C34	527,34	474,93	52,4	0,54	0,67	Juventud	500,64
C35	483,64	474,8	8,84	0,39	0,31	Vejez	478,44
C36	488,68	474,85	13,83	0,56	0,36	Madurez	480,93
C37	489,17	474,93	14,24	0,58	0,43	Madurez	481,26
C38	481,33	474,97	6,36	0,26	0,26	Vejez	477,58
C39	529,54	475,13	54,41	0,33	0,83	Juventud	503,27
C40	485,46	475,15	10,31	0,46	0,36	Madurez	479,32
C41	490,77	475,34	15,43	0,56	0,42	Madurez	482,69
C42	525,28	475,5	49,77	0,75	0,44	Madurez	499,14
C43	491,66	475,37	16,29	0,59	0,49	Madurez	483,26
C44	485,67	475,51	10,17	0,54	0,5	Madurez	480,46
C45	488,67	475,18	13,49	0,60	0,55	Madurez	481,94
C46	494,66	475,05	19,61	0,58	0,45	Madurez	483,88
C47	485,91	474,74	11,17	0,58	0,36	Madurez	479,53
C48	485,37	474,73	10,64	0,51	0,33	Vejez	479,35
C49	526,16	474,63	51,53	0,50	0,76	Juventud	500,3
C50	482,85	474,6	8,26	0,59	0,52	Madurez	478,49
C51	490,7	474,76	15,94	0,59	0,53	Madurez	482,55
C52	528,76	474,39	54,37	0,20	0,87	Juventud	502,23

Tabla 5.4. Parámetros físicos de relieve de las cuencas del área de estudio



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

Como se mencionó en el apartado 3.2.3.3., la pendiente influye en la velocidad de escorrentía y, en consecuencia, en el poder de arrastre y en la erosión sobre la cuenca. En zonas de altas pendientes, se presentan generalmente procesos de erosión, mientras que en regiones planas aparecen principalmente procesos de drenaje y sedimentación.

En general, las cuencas presentan una pendiente media alta (mayores al 20%), favoreciendo los procesos de erosión y una mayor velocidad de escorrentía, lo que se traduce en un menor tiempo de concentración.

La mayoría de las cuencas se encuentran en una etapa de madurez reflejando una cuenca en equilibrio.

Por su parte, las cuencas en etapa de vejez (cuencas C01, C02, C04, C05, C07, C20, C26, C31, C32, C35, C38 y C48) manifiestan poca capacidad erosiva, dominando la sedimentación.

Por el contrario, las cuencas jóvenes (cuencas C10, C14, C18, C23, C28, C34, C39, C49 y C52) presentan gran potencial erosivo.

Los gráficos de las curvas hipsométricas se exponen en el apartado 8.3 del Anexo.

5.2.2.4. Características de la red hidrográfica

Cuenca	Longitud del cauce principal, L_r (km)	Altura máxima del cauce principal, $H_{máx}$ (m)	Altura mínima del cauce principal, $H_{mín}$ (m)	Pendiente media del cauce principal, S_{mr} (m/m)	Tiempo de concentración, T_c (horas)			
					Kirpich	Témez	SCS	Promedio
C01	0,08	488,7	474,07	0,23	N/A	0,06	0,03	0,04
C02	0,08	487,4	474,02	0,19	N/A	0,06	0,03	0,05
C03	0,49	529,66	473,88	0,16	N/A	0,25	0,10	0,17
C04	0,06	479,44	474,47	0,12	N/A	0,05	0,03	0,04
C05	0,06	483,98	474,67	0,20	N/A	0,05	0,02	0,03
C06	0,01	477,38	475,3	0,06	N/A	0,02	0,01	0,01
C07	0,04	490,52	476,36	0,40	N/A	0,03	0,01	0,02
C08	0,18	510,26	476,29	0,25	N/A	0,11	0,04	0,07
C09	0,03	491,14	477,41	0,54	N/A	0,02	0,01	0,01
C10	0,02	488,61	478,31	0,51	N/A	0,02	0,01	0,01
C11	0,02	488,66	478,54	0,55	N/A	0,02	0,01	0,01
C12	0,004	480,9	478,79	0,62	N/A	0,00	0,00	0,004
C13	0,004	480,73	478,57	0,55	N/A	0,00	0,01	0,01
C14	0,03	497,78	479,36	0,57	N/A	0,02	0,01	0,02
C15	0,01	483,18	478,4	0,55	N/A	0,01	0,01	0,01
C16	0,01	481,49	478,28	0,62	N/A	0,01	0,00	0,005
C17	0,02	488,22	477,61	0,48	N/A	0,02	0,01	0,01
C18	0,06	497,96	477,58	0,36	N/A	0,04	0,02	0,03
C19	0,14	514,06	477,42	0,33	N/A	0,08	0,03	0,06
C20	0,01	479,41	476,73	0,15	N/A	0,02	0,01	0,01
C21	0,03	489,82	476,53	0,47	N/A	0,02	0,01	0,02
C22	0,01	479,63	477,17	0,44	N/A	0,01	0,00	0,01
C23	0,23	529,4	477,11	0,28	N/A	0,12	0,05	0,08

C24	0,01	482,4	477,45	0,48	N/A	0,01	0,01	0,01
C25	0,09	514,05	477,51	0,44	N/A	0,06	0,02	0,04
C26	0,03	487,8	477,43	0,35	N/A	0,03	0,01	0,02
C27	0,05	496,51	477,41	0,48	N/A	0,03	0,01	0,02
C28	0,19	529,4	477,13	0,53	N/A	0,09	0,04	0,07
C29	0,02	485,47	476,76	0,44	N/A	0,02	0,01	0,01
C30	0,005	477,89	476,74	0,27	N/A	0,01	0,00	0,01
C31	0,07	499,3	476,44	0,37	N/A	0,05	0,02	0,03
C32	0,01	476,55	476,05	0,04	N/A	0,01	0,01	0,01
C33	0,08	508,62	474,97	0,47	N/A	0,05	0,02	0,03
C34	0,15	527,11	474,93	0,38	N/A	0,09	0,03	0,06
C35	0,02	478,77	474,78	0,28	N/A	0,02	0,01	0,01
C36	0,02	483,09	474,85	0,39	N/A	0,02	0,01	0,02
C37	0,02	481,32	474,9	0,31	N/A	0,02	0,01	0,02
C38	0,02	477,34	474,94	0,15	N/A	0,02	0,01	0,02
C39	0,39	529,63	475,13	0,20	N/A	0,20	0,10	0,15
C40	0,005	475,33	475,15	0,05	N/A	0,01	0,01	0,01
C41	0,03	485,21	475,26	0,39	N/A	0,02	0,01	0,02
C42	0,06	508,25	475,49	0,56	N/A	0,04	0,02	0,03
C43	0,02	482,17	475,28	0,46	N/A	0,01	0,01	0,01
C44	0,01	478,16	475,44	0,45	N/A	0,01	0,01	0,01
C45	0,02	483,62	475,18	0,56	N/A	0,01	0,01	0,01
C46	0,02	485,01	475,05	0,52	N/A	0,02	0,01	0,01
C47	0,01	478,75	474,74	0,39	N/A	0,01	0,01	0,01
C48	0,01	478,38	474,73	0,28	N/A	0,01	0,01	0,01
C49	0,16	525,71	474,63	0,40	N/A	0,09	0,04	0,06
C50	0,01	477,91	474,63	0,51	N/A	0,01	0,00	0,01
C51	0,02	483,38	474,74	0,49	N/A	0,02	0,01	0,01
C52	0,56	529,58	474,39	0,14	N/A	0,28	0,18	0,23

Tabla 5.5. Parámetros de la red hidrográfica de las cuencas del área de estudio (N/A: No Aplica)

La mayoría de las cuencas presentan cauces con una longitud menor a 0,1 km. Las cuencas que poseen cauces con longitudes mayores a 0,1 km son las cuencas C03, C08, C19, C23, C28, C34, C39, C49 y C52. Como se mencionó en el apartado 3.2.3.4., una longitud mayor supone mayores tiempos de desplazamiento de las crecidas y como consecuencia, mayor atenuación de las mismas, por lo que los tiempos de concentración y las duraciones totales de estas serán mayores

En general los cauces presentan altas pendientes (mayores al 20%) con excepción de los cauces de las cuencas C06, C32 y C40 que presentan pendientes muy bajas (menores al 6%). Como se expuso en el apartado 3.2.3.4., la pendiente del cauce influye en la velocidad de flujo, ya que al aumentar la pendiente aumenta la velocidad del agua, aumentando el potencial erosivo.

El tiempo de concentración se calculó utilizando las ecuaciones de Témez y del SCS y realizando un promedio para la determinación del valor. En general, las cuencas presentan tiempos de concentración menores a una hora.

La ecuación de Kirpich no se utilizó debido a que no se cumple con la condición de que los cauces presenten pendientes entre 3 y 10%, salvo los cauces de las cuencas C06, C32 y C40 las cuales no cumplen la condición de poseer un área entre 0,5 y 45 ha.

5.3. Hidrología

5.3.1. Método del Número de Curva

En la Tabla 5.6 se presenta los Números de Curva de escorrentía, corregidos en función de la pendiente natural del terreno, elegidos para el estudio hidrológico del área. Los valores de CN para una condición media de humedad antecedente se muestran en la Figura 5.11.

Los valores de CN medios ponderados y la abstracción inicial determinados para cada cuenca del área de estudio se exhiben en la Tabla 5.7 del apartado 5.3.3.

CN	Cubierta vegetal	Condición de humedad antecedente	GHS	Pendiente
82	Pradera/Pastizal	Media	C/D	Baja
84	Pradera/Pastizal	Media	C/D	Baja
86	Pradera/Pastizal	Media	D	Media
90	Pradera/Pastizal	Media	D	Alta
92	Pradera/Pastizal	Media	D	Alta

Tabla 5.6. Números de Curva elegidos para el estudio hidrológico

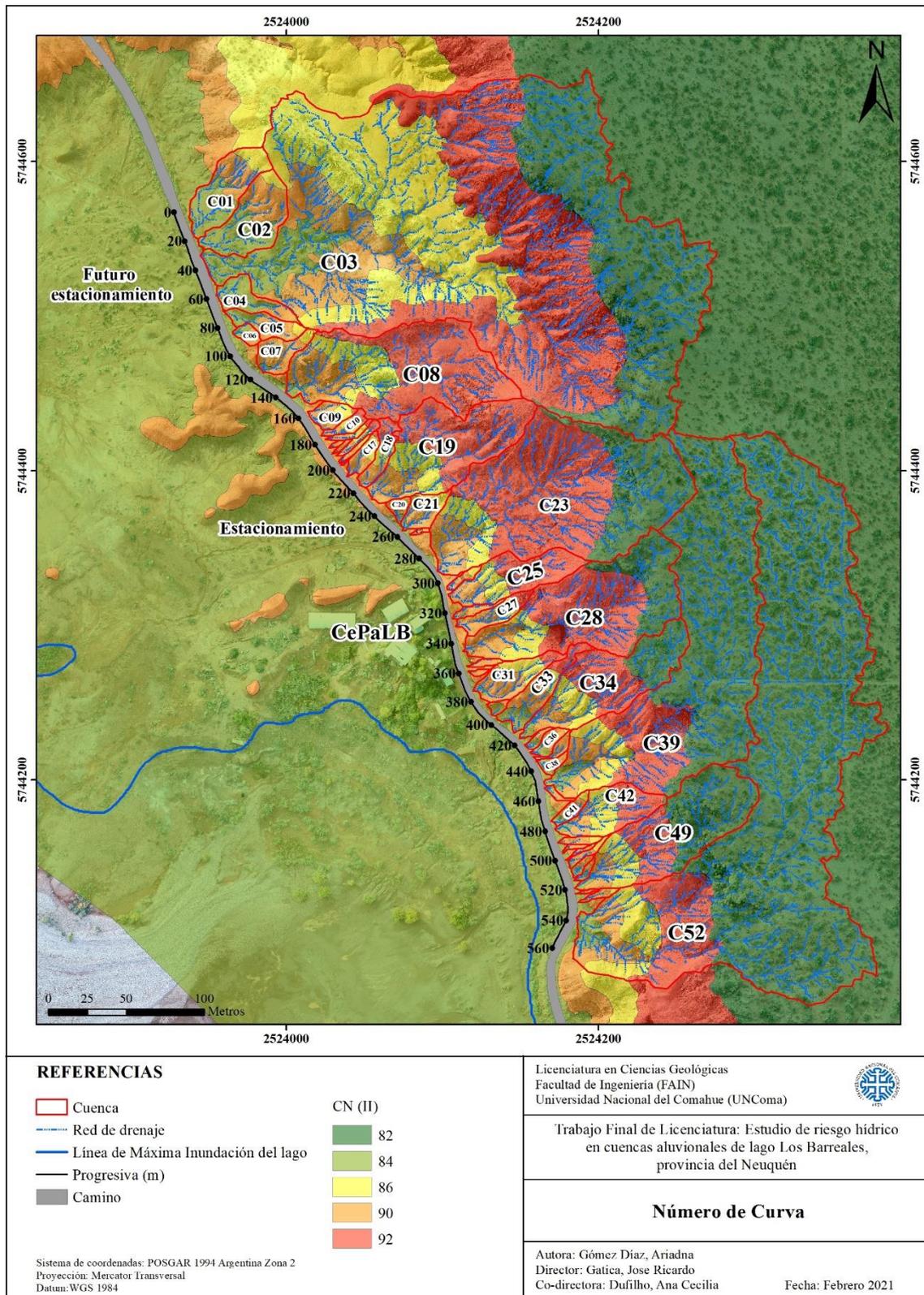


Figura 5.11. Valores de Número de Curva, para una condición media de humedad antecedente, corregidos en función de la pendiente



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

5.3.2. Tormenta de diseño

Los valores de intensidad I_D utilizados para la estimación del caudal para cada cuenca del área de estudio se exponen en la Tabla 5.7 del apartado 5.3.3.

5.3.3. Transformación precipitación-escorrentía

En la Figura 5.12 se presenta el mapa de coeficiente de escorrentía para un tiempo de retorno de 100 años. Los valores de C medios ponderados determinados para cada cuenca se exhiben en la Tabla 5.7.

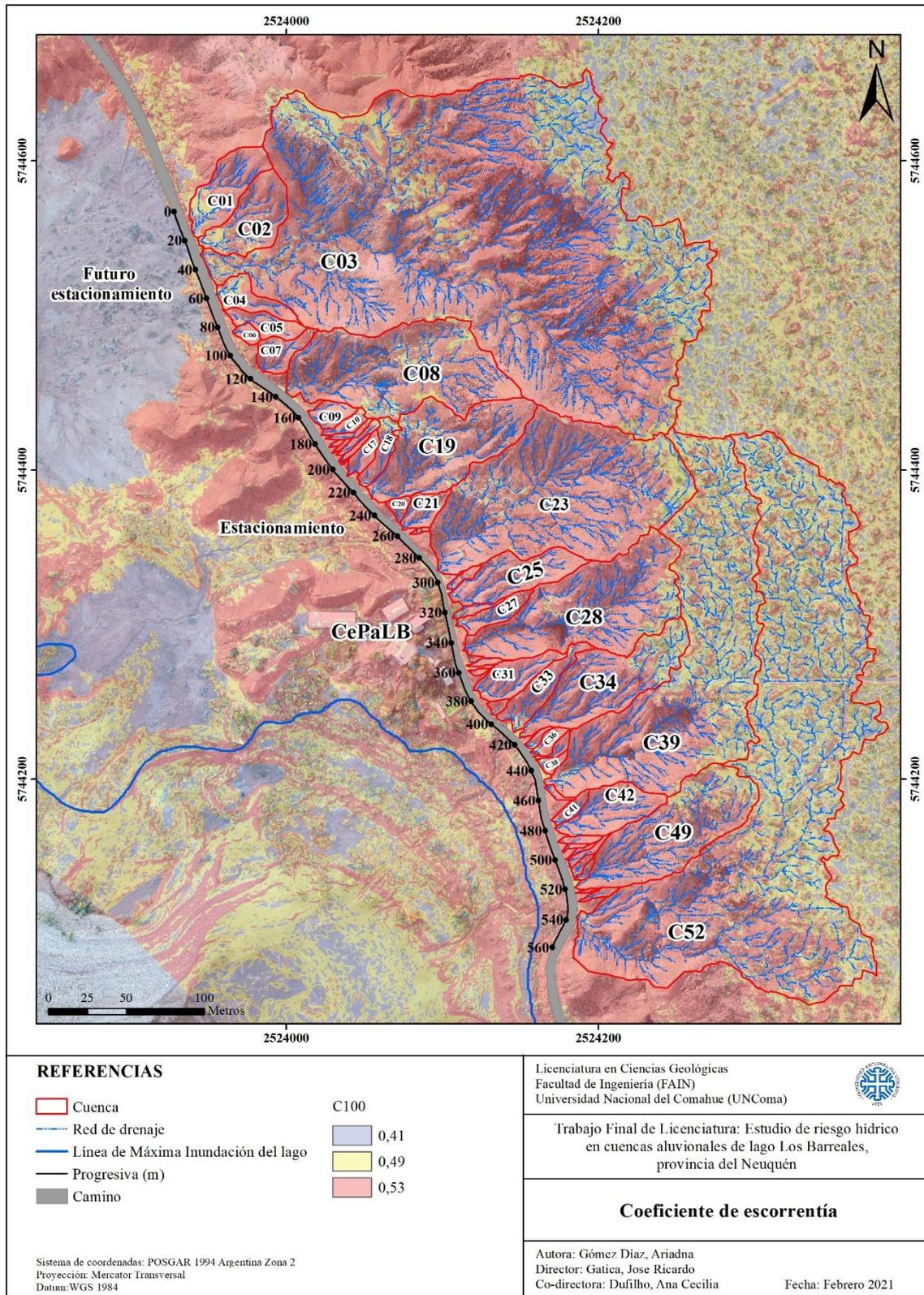


Figura 5.12. Valores de coeficiente de escorrentía C para un período de retorno de 100 años

Cuenca	Área, A (km ²)	Tiempo de concentración, T _c (horas)	Intensidad de precipitación para 100 años, I ₁₀₀ (mm/h)	Número de Curva, CN	Abstracción inicial, I _a (mm)	Coefficiente de escorrentía para 100 años, C ₁₀₀	Caudal máximo para 100 años, Q _{p100} (m ³ /s)
C01	0,002	0,04	287,04	86,28	8,08	0,52	0,06
C02	0,002	0,05	277,69	86,43	7,98	0,52	0,07
C03	0,04	0,17	140,04	87,15	7,49	0,52	0,90
C04	0,001	0,04	301,15	85,61	8,54	0,51	0,03
C05	0,001	0,03	330,65	87,76	7,09	0,53	0,03
C06	0,0002	0,01	497,73	87,64	7,17	0,53	0,01
C07	0,001	0,02	404,95	89,23	6,13	0,53	0,04
C08	0,01	0,07	217,98	90,49	5,34	0,52	0,21
C09	0,0004	0,01	488,05	88,88	6,35	0,53	0,03
C10	0,0002	0,01	512,51	88,47	6,62	0,53	0,02
C11	0,0001	0,01	522,42	88,62	6,52	0,53	0,01
C12	0,00002	0,004	929,30	90	5,64	0,53	0,003
C13	0,00003	0,01	850,55	89,89	5,72	0,53	0,004
C14	0,0001	0,02	452,42	89,31	6,08	0,52	0,01
C15	0,0001	0,01	641,90	88,58	6,55	0,53	0,01
C16	0,00001	0,005	855,71	90	5,64	0,53	0,001
C17	0,0003	0,01	495,29	88,5	6,60	0,53	0,02
C18	0,0005	0,03	349,55	89,54	5,93	0,52	0,02
C19	0,004	0,06	248,75	90,68	5,22	0,53	0,15
C20	0,0002	0,01	557,58	88,97	6,30	0,53	0,01
C21	0,0005	0,02	444,37	88,42	6,65	0,53	0,03
C22	0,00003	0,01	808,87	90	5,64	0,53	0,004
C23	0,01	0,08	200,96	88,43	6,65	0,52	0,34
C24	0,0001	0,01	638,45	88,74	6,44	0,53	0,01

C25	0,002	0,04	299,54	90,37	5,41	0,53	0,08
C26	0,0001	0,02	438,32	89,41	6,02	0,52	0,01
C27	0,001	0,02	383,38	89,1	6,22	0,53	0,03
C28	0,01	0,07	229,65	88,34	6,70	0,52	0,21
C29	0,0001	0,01	535,58	89,32	6,08	0,53	0,01
C30	0,00004	0,01	800,57	89,85	5,74	0,53	0,005
C31	0,001	0,03	329,60	88,85	6,38	0,53	0,04
C32	0,0001	0,01	601,02	85,64	8,52	0,52	0,01
C33	0,001	0,03	317,62	88,13	6,84	0,52	0,04
C34	0,003	0,06	238,72	87,43	7,30	0,52	0,12
C35	0,0001	0,01	525,86	86,73	7,77	0,52	0,01
C36	0,0002	0,02	485,92	87,61	7,18	0,53	0,01
C37	0,0001	0,02	477,09	88,58	6,55	0,53	0,01
C38	0,0001	0,02	465,21	85,52	8,60	0,52	0,01
C39	0,01	0,15	151,47	84,26	9,49	0,50	0,30
C40	0,0001	0,01	719,30	88	6,93	0,53	0,01
C41	0,0002	0,02	456,16	88	6,93	0,53	0,01
C42	0,001	0,03	349,14	89,22	6,14	0,53	0,07
C43	0,0001	0,01	560,53	88,75	6,44	0,53	0,01
C44	0,00004	0,01	739,51	89,35	6,05	0,53	0,004
C45	0,00004	0,01	587,18	89	6,28	0,53	0,004
C46	0,0001	0,01	508,03	87,71	7,12	0,53	0,01
C47	0,0001	0,01	622,59	87,33	7,37	0,52	0,01
C48	0,0001	0,01	565,99	86,82	7,71	0,52	0,01
C49	0,004	0,06	234,55	85,62	8,53	0,52	0,15
C50	0,00002	0,01	785,84	88,62	6,53	0,53	0,003
C51	0,0001	0,01	546,78	88,86	6,37	0,53	0,01
C52	0,03	0,23	121,25	83,29	10,19	0,50	0,50

Tabla 5.7. Parámetros hidrológicos y caudales máximos de las cuencas del área de estudio

Como se observa en la Tabla 5.7, en general, las cuencas presentan, para un periodo de retorno de 100 años, caudales máximos muy bajos, menores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Las cuencas que aportan los caudales más importantes son las cuencas C03, C08, C19, C23, C28, C34, C39, C49 y C52, con valores superiores a $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los caudales de las cuencas C12, C13, C16, C22, C30, C44, C45 y C50 se consideran despreciables ya que son inferiores a $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Tabla 5.7 se puede apreciar, además, que la intensidad de precipitación varía de una cuenca a otra, aunque estas se encuentren dentro de una misma área pequeña. Esta variación espacial se debe a que la intensidad depende de la duración de la precipitación, la cual se toma igual al tiempo de concentración de cada cuenca.

5.4. Modelación hidráulica

Como resultado de la modelación hidráulica se obtuvieron los mapas de tirante (altura) y velocidad de flujo de la lámina de agua para una crecida máxima de 100 años de recurrencia.

A partir de los resultados de la modelación se puede observar que la crecida diseño no afecta directamente las instalaciones del CePaLB.

En el mapa de tirante (Figura 5.13) se observa que la altura de la lámina de agua en el área de estudio es, en promedio, inferior a $0,35 \text{ m}$. Los valores máximos estimados llegan a $0,50 \text{ m}$ en el cauce aguas abajo del cruce con el camino de la cuenca C34. Los valores superiores a $0,50 \text{ m}$ que se observan en la parte alta y media de los cauces de las cuencas C19, C23, C28, C34, C39, C42, C49, localmente en C52 y en el cauce aguas abajo de la cuenca C34, obedecen a la presencia de saltos hidráulicos que el modelo 2D no simula como se mencionó en el apartado 3.4.2, y por lo tanto no serán tenidos en cuenta.

En el camino y en las zonas de pendiente plana (actual y futuro estacionamiento) los tirantes son bajos (menores a $0,2 \text{ m}$).

En el mapa de velocidad de flujo (Figura 5.14) se observa que la velocidad de la escorrentía encauzada en el área de estudio es, en promedio, inferior a $2,4 \text{ m/s}$. En tramos de mayor pendiente se observan velocidades máximas elevadas (superiores a $2,4 \text{ m/s}$) con bajos tirantes (inferiores a $0,35 \text{ m}$), situación que se observa en los cauces de las cuencas C17, C18, C21, C25, C27, C31, C33 y el que se halla aguas abajo del cruce con el camino de la cuenca C23 ubicado al norte del Museo y en el camino próximo a las instalaciones. Las velocidades superiores a 10 m/s que se observan en la parte alta y media de los cauces de las cuencas C03, C08, C23, C28, C34, C39, C42, C49 y localmente en C18, C19, C25, C33, C52, y en los cauces aguas abajo de las cuencas C39 y C52, reflejan las limitaciones que presenta el modelo para reproducir los resaltes hidráulicos presentes en estos cauces.

Por lo tanto, se puede suponer que en los cauces aguas abajo del cruce con el camino es donde se producirá mayor erosión debido a que esta se correlaciona con la velocidad de escorrentía.

Por otro lado, las menores velocidades de flujo (inferiores a $0,3 \text{ m/s}$) se presentan en las zonas de pendientes muy bajas, lo que supone que en estos sectores la erosión será insignificante.

En general, el camino presenta velocidades de flujo bajas (inferiores a $0,8 \text{ m/s}$), con algunos sectores con velocidades medias ($0,8$ a $2,4 \text{ m/s}$). Por lo tanto, tendrá sectores en donde la erosión será insignificante, mientras que, en otros será mayor.

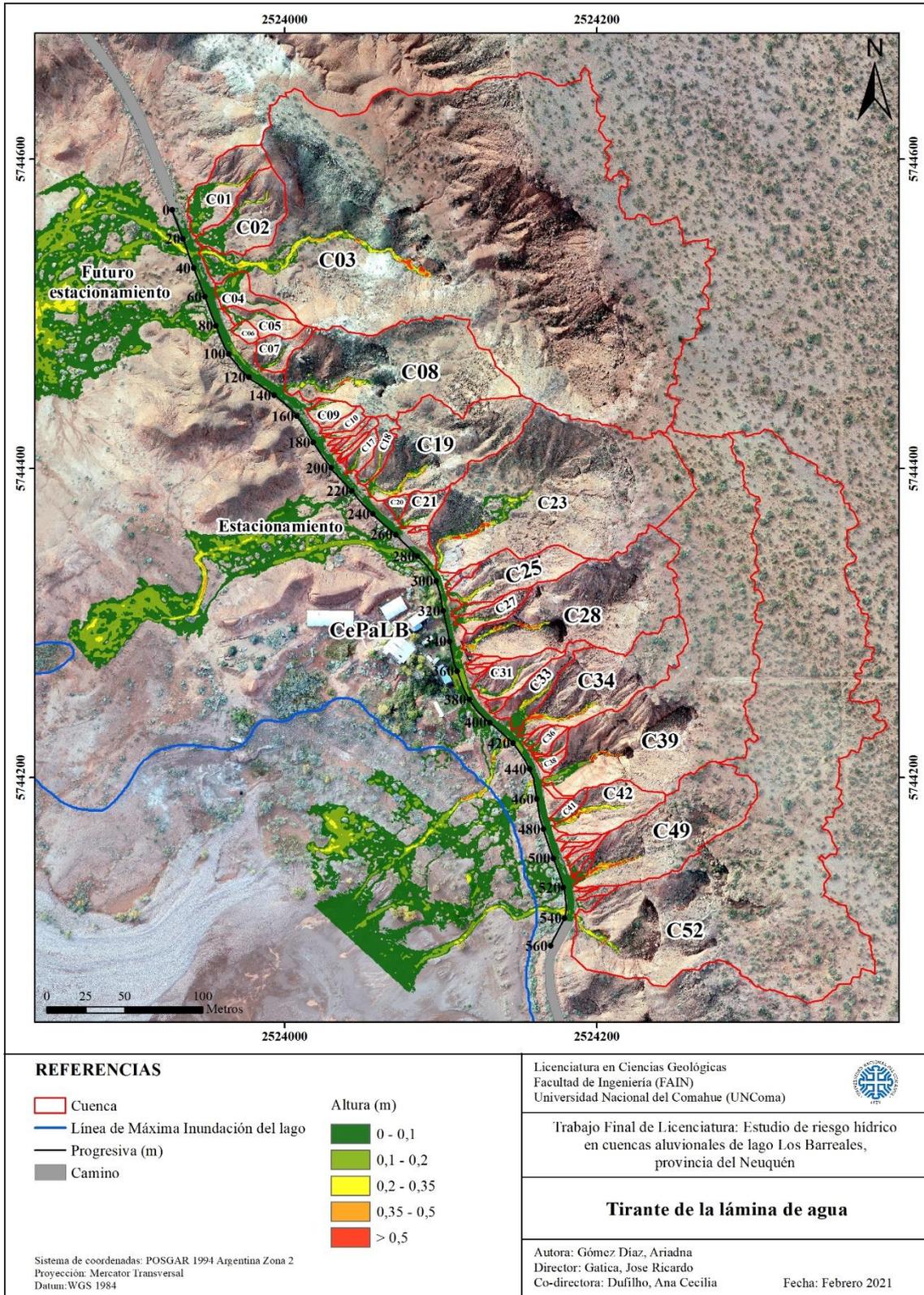


Figura 5.13. Tirante de la lámina de agua (en metros) para la crecida máxima de diseño para 100 años de recurrencia

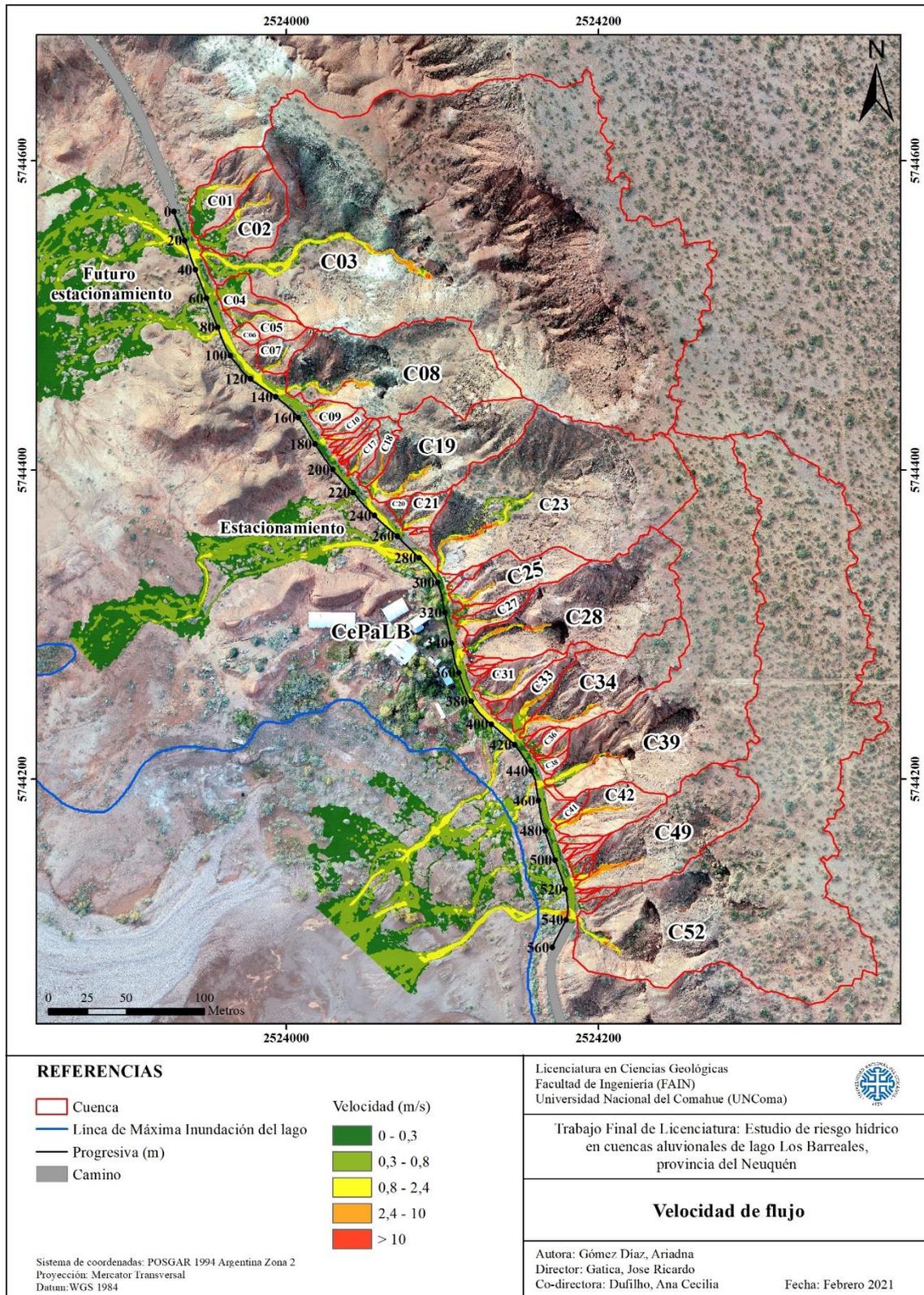


Figura 5.14. Velocidad de flujo de agua (en m/s) para la crecida máxima de diseño para 100 años de recurrencia



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

5.5. Erosión generalizada

Como se mencionó en el apartado 3.5, para la obtención de la erosión generalizada del área de estudio se realizó un mapa de la misma, siendo ésta el resultado de la diferencia entre la profundidad de flujo luego de la erosión general y la profundidad de flujo antes de la misma (mapa de tirante).

En el mapa de erosión generalizada (Figura 5.15) se observa que, en promedio, la erosión en el área de estudio es inferior a 0,3 m. En los sectores de pendiente baja (actual y futuro estacionamiento) la erosión es baja (inferior a 0,3 m) con sectores en donde no hay erosión para la crecida de diseño, por lo tanto, domina la sedimentación. Lo mismo sucede con los sectores más alejados que se encuentran bajo la cota de inundación máxima del lago.

Los sectores que presentan mayor erosión (0,6 a 2 m) corresponden a los cauces aguas abajo del cruce con el camino de las cuencas C21, C34, C39 y C52. Los cauces de las cuencas C23, C28, C34, C39, C42, C49 y localmente C52 exhiben erosiones superiores a 2 m que no deben tenerse en cuenta, debido a que estos valores evidencian las limitaciones del modelo 2D para la obtención de los tirantes y velocidades utilizadas, al no simular resaltos hidráulicos tal como se señaló en el apartado 3.4.2.

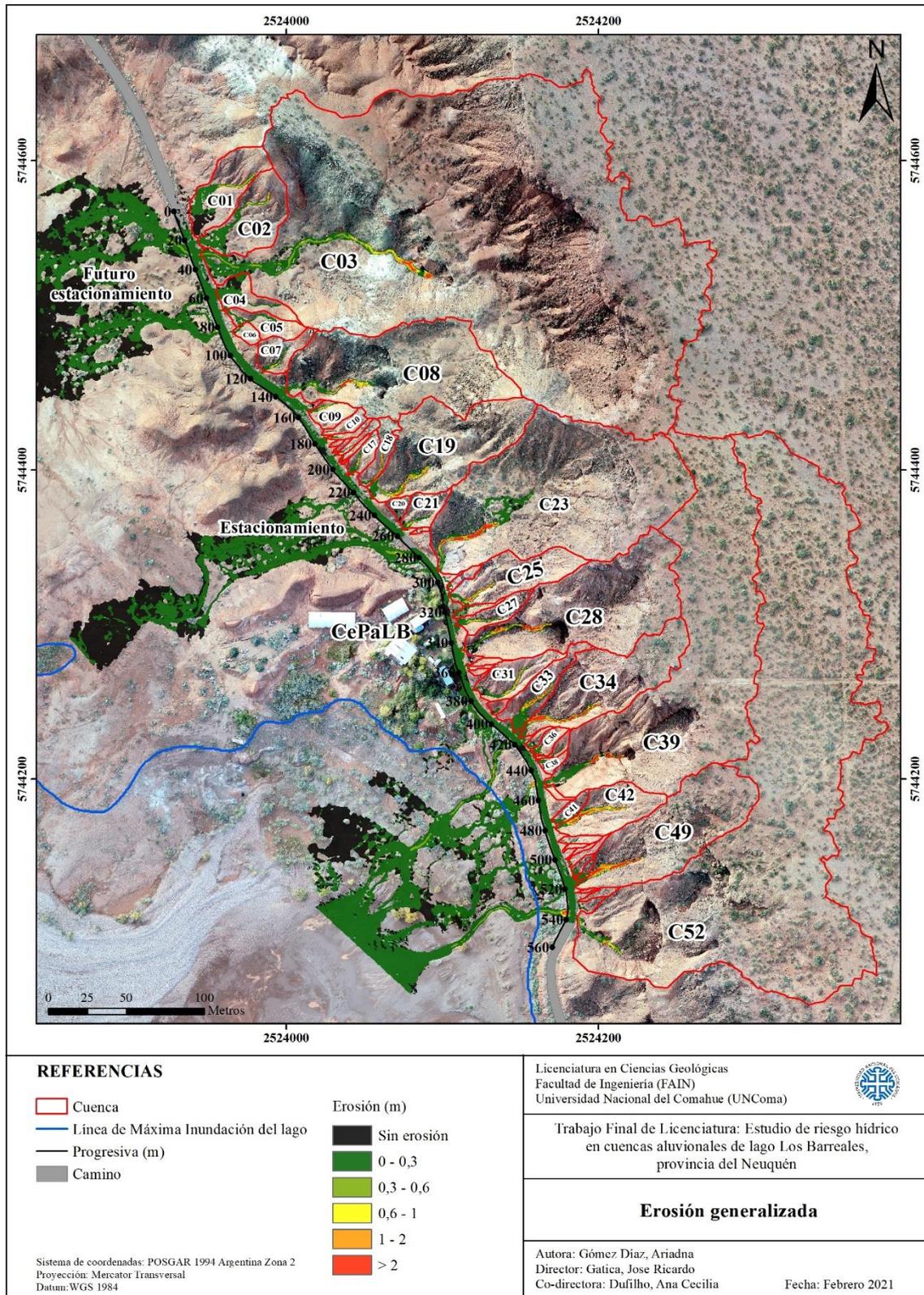


Figura 5.15. Erosión generalizada (en metros) del área de estudio

5.6. Obras de mitigación propuestas

A partir de los resultados de la modelación hidráulica se puede considerar que el sector sur del área de estudio es el que se ve principalmente afectado por la crecida de diseño, mientras que el sector norte, correspondiente al actual y al futuro estacionamiento del CePaLB no presenta riesgos importantes debido a que la erosión generalizada en estas zonas es mínima.

Con el objeto de disminuir el riesgo generado por la crecida máxima de diseño para 100 años de retorno en el sector sur del área de estudio, se proponen medidas de mitigación.

Las magnitudes de las crecidas están determinadas por sus caudales, sus elevaciones y sus volúmenes. Cada uno de estos factores es importante en el diseño hidrológico de diferentes tipos de estructuras para el control de flujo (Chow *et al.*, 1994).

Las medidas de protección tienen como principal objetivo reducir los caudales máximos en las cuencas, a fin de disminuir el potencial erosivo del escurrimiento en toda la red de drenaje (Cisneros *et al.*, 2012).

Las medidas de protección se pueden dividir en función de su naturaleza en:

- Medidas no estructurales: Son aquellas medidas que pretenden reducir el riesgo en un territorio interviniendo sobre el valor de los elementos expuestos y su vulnerabilidad, es decir, sobre el daño potencial. Pertenecen a esta categoría todas aquellas medidas tendientes a prevenir o atenuar los daños consiguientes al evento de crecida sin la construcción de obras que interfieran con el flujo de las aguas (Fattorelli y Fernández, 2011).
- Medidas estructurales: Son aquellas acciones de tipo estructural que proponen reducir la situación de riesgo interviniendo sobre la peligrosidad del evento a través de la construcción de obras que interfieren con el flujo de las aguas (Fattorelli y Fernández, 2011). Las medidas estructurales, a su vez, se dividen en dos grupos:
 - Medidas activas, las cuales tienden a mitigar la magnitud del fenómeno natural reduciendo la probabilidad de que este ocurra con una intensidad dada (reducción de la frecuencia).
 - Medidas pasivas, las cuales pretenden aumentar la capacidad del territorio para soportar las solicitaciones del evento natural sin sufrir daños (reducción del impacto).

Para el caso en estudio, se recomienda como medida no estructural la revegetación de las cuencas para disminuir los caudales que escurren.

La cubierta vegetal representa un factor estabilizador de la cuenca ante eventos torrenciales. La cubierta vegetal contribuye tanto a incrementar la infiltración, ya que la vegetación aumenta la porosidad del suelo, como a disminuir la velocidad de la lámina de escorrentía superficial, debido a que incrementa la rugosidad de la superficie por la que circula. La vegetación actúa como una capa protectora del suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, por lo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo. Por otro lado, los componentes subterráneos, como los sistemas radiculares, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo. La revegetación puede lograrse a través de la diseminación de semillas, sin laboreos, de especies nativas o exóticas con el fin de conseguir la germinación e instalación de las mismas (Gaspari *et al.*, 2013).

Sin embargo, las cuencas del área de estudio presentan pendientes pronunciadas por lo que sería muy difícil actuar sobre las mismas para llevar a cabo una revegetación, además del tiempo requerido para establecer la vegetación. Por lo expuesto anteriormente, se propone trabajar con medidas estructurales sobre el camino.

Asimismo, se debe tener en cuenta que, para este estudio, se utilizaron los valores de coeficiente de escorrentía de Chow *et al.* (1988), los cuales determinan los caudales calculados. Si se hubieran



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

tomado valores de C menores, propuestos por otros autores, se obtendrían caudales menores y, por lo tanto, menor erosión y riesgo.

Para el control de la escorrentía y la erosión en el camino de acceso, se recomienda realizar bordos amortiguadores de velocidades sobre el camino como medida estructural pasiva, con el objeto de desviar el flujo de agua y disminuir tanto el caudal que circula por el mismo como el aporte hacia los cauces donde hay erosión.

Con la intención de analizar cómo se ve afectado el flujo de escorrentía sobre el camino por la intervención de obras hidráulicas, se llevó a cabo una modelación hidráulica. Para ello, se realizó una progresiva sobre el camino y se seleccionaron puntos sobre el camino en donde se desea desviar el flujo de agua para disminuir el caudal circulante, estableciendo bordos.

Se decidió establecer tres bordos de baja pendiente (menor al 10%) y de taludes tendidos de 3H:1V en las progresivas 380 a 400, 460 a 480 y 520 a 540 (Figura 5.16). Los bordos se incorporan al terreno modificando el Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM) a través del *software* ArcGIS. Una vez obtenido el DEM con las obras propuestas, se lleva a cabo la modelación hidráulica utilizando este nuevo DEM y sin modificar los otros parámetros (geometría del mallado, hidrodinámica, tiempos de cómputos, n de Manning).

Posteriormente, se determinó la erosión generalizada a través de un mapa de la misma, siendo ésta el resultado de la diferencia entre la profundidad de flujo luego de la erosión y la profundidad de flujo antes de la misma, ésta última representada por el mapa de tirante.

Por último, se determinaron los caudales de los cauces que se encuentran aguas abajo de las cuencas C31, C34, C39, C50 y C52 antes y luego de la intervención de las obras estructurales para comparar ambas situaciones.

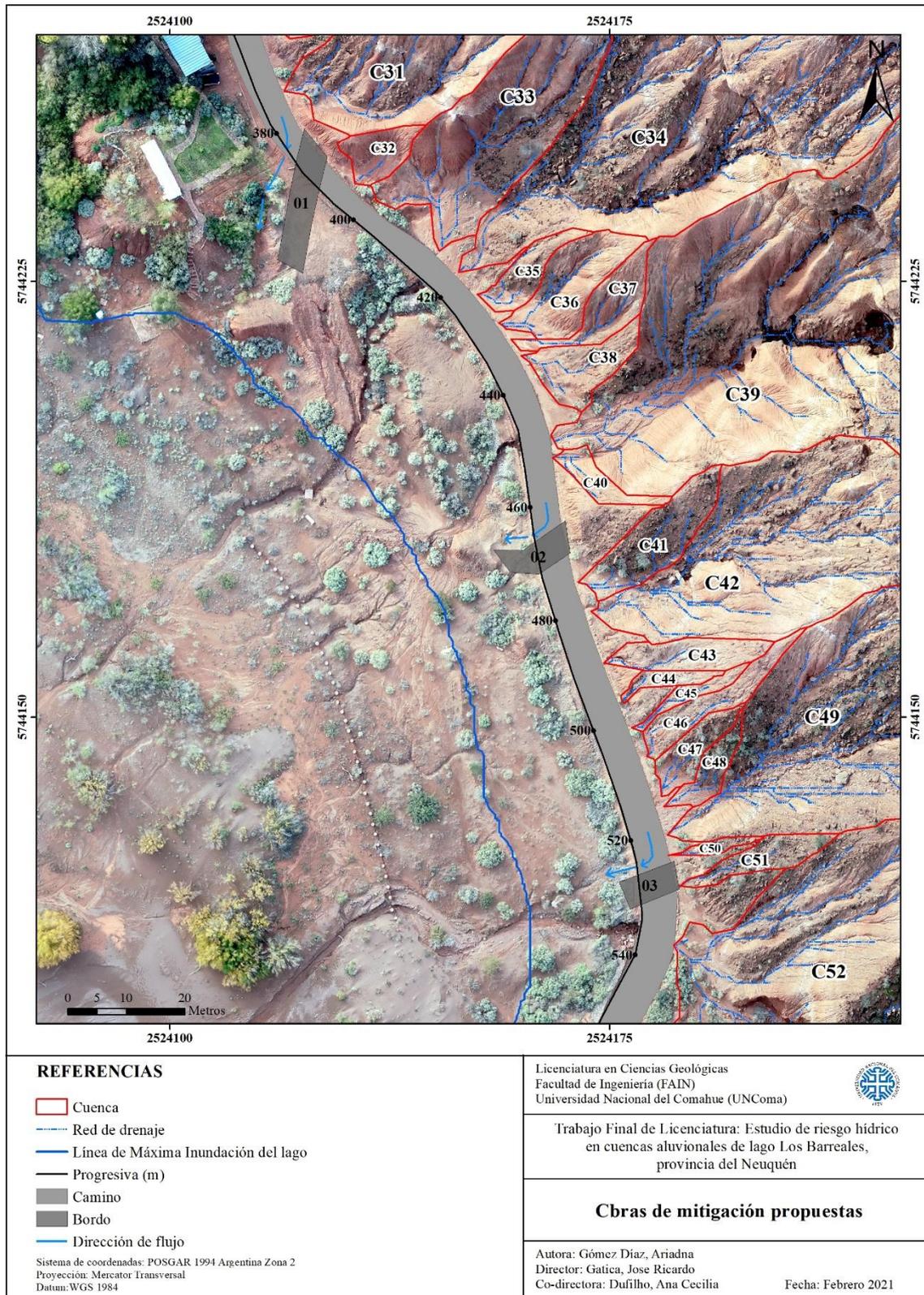


Figura 5.16. Obras de mitigación propuestas (bordos) sobre el camino (las flechas indican hacia donde se desviaría el flujo de agua)

5.6.1. Efecto de las obras propuestas

Como resultado de la modelación hidráulica se obtuvieron los mapas de tirante y velocidad de flujo máximos de la lámina de agua para una crecida de 100 años de retorno afectada por la intervención de las obras de mitigación.

A partir de los resultados de la modelación se puede observar un seccionamiento del flujo. Las cuencas C24, C25, C26, C27, C28, C29 y C31 que escurren actualmente hacia el sur aportando caudal, ya no lo hacen debido al obstáculo que presenta el bordo 01 (en progresiva 380 a 400), descargando estas aguas en el cauce que se encuentra aguas abajo de la cuenca C31, aumentando el volumen de agua que circula por el mismo y disminuyendo el caudal que circula por el camino en comparación con la situación actual.

Por otro lado, el bordo 02 (en progresiva 460 a 480) evita que el caudal de las cuencas C32, C33, C34, C35, C36, C37, C38, C39 y C40 escurra hacia el sur y aporte al caudal resultante de las cuencas que se encuentran en ese sector. Las cuencas C32 a C40 escurren hacia los cauces que se encuentran aguas abajo de las cuencas C34 y C39, disminuyendo el volumen de agua que circula por estos cauces en comparación con la situación actual. Por lo tanto, la incorporación de este bordo disminuye fuertemente el volumen de agua que circula por el camino.

El bordo 03 (en progresiva 480 a 500) desvía el flujo de agua que genera el aporte de las cuencas C41, C42, C43, C46, C47, C48 y C49 hacia el cauce que se encuentra aguas abajo de la cuenca C50, aumentando el volumen de agua que circula por el mismo y disminuyendo el caudal que recibe el cauce aguas abajo de la cuenca C52 en la situación sin intervención de la obra, el cual con la incorporación de las obras solo recibe el aporte de esta última cuenca, reduciendo también el volumen de agua que circula por el mismo.

En el mapa de tirante (Figura 5.17) se observa principalmente un aumento en la altura de la lámina de agua en el cauce aguas abajo de la cuenca C31 en comparación con la situación actual, de 0,1 a 0,35 m, respectivamente. Los valores superiores a 0,50 m se deben a la presencia de saltos hidráulicos que el modelo 2D no simula, como ya se mencionó en el apartado 3.4.2.

En el mapa de velocidad máxima de flujo (Figura 5.18) se observa principalmente un aumento en la velocidad máxima de la lámina de agua en el cauce que se encuentra aguas abajo de la cuenca C31 en comparación con la situación sin obra, de 0,8 a 10 m/s, respectivamente. Las velocidades superiores a 10 m/s evidencian las limitaciones que presenta el modelo para reproducir los resaltes hidráulicos presentes en estos cauces.

En el mapa de erosión generalizada (Figura 5.19) se observa principalmente que el cauce que se encuentra aguas abajo de la cuenca C31 presenta un aumento de la erosión en comparación con la situación actual sin obras, de 0,3 a 1 m, respectivamente, llegando incluso a valores locales de 2 m. A su vez, el cauce que se halla aguas abajo de la cuenca C50 exhibe un aumento de la erosión en comparación con la situación actual, de 0,3 a 0,6 m, respectivamente. Valores de erosiones superiores a 2 m reflejan las limitaciones del modelo 2D para la obtención de los tirantes y velocidades utilizadas, al no simular resaltes hidráulicos.

Cabe destacar que, claramente, el camino presenta menor erosión debido a que el volumen de agua que circula por el mismo es menor que en la situación original, sin la intervención de obras.

Para la determinación y comparación de los caudales que circulan por los cauces aguas abajo de las cuencas C31, C34, C39, C50 y C52 antes y después de la intervención de las obras, se realizaron perfiles en los cauces en ambas situaciones (Figuras 5.20 y 5.21).

En la Tabla 5.7 se exponen los caudales para los cauces en cada una de las situaciones estudiadas. En concordancia con lo mencionado en párrafos anteriores, para el caso del cauce aguas abajo de la cuenca C31 (cauce C31) existe un aumento del caudal para la situación con obras (Figura 5.22) ya que en la situación actual prácticamente no presenta escorrentía y con la implementación del bordo si o si el agua escurra por este cauce.

Para los cauces aguas abajo de las cuencas C34, C39 y C52 (cauces C34, C39 y C52, respectivamente) hay una disminución de los caudales con la intervención de las obras (Figuras 5.23, 5.24 y 5.26, respectivamente), debido a que el caudal en la situación actual está constituido por la suma de los caudales que aportan las cuencas C24 a C52. En la situación con obras, el flujo que escurre por el camino disminuye al ser desviado en distintos sectores a través de los bordos y, por consiguiente, también disminuye el volumen de agua que fluye por estos cauces.

Por otro lado, el cauce aguas abajo de la cuenca C50 (cauce C50) aumenta el volumen de escurrimiento (Figura 5.25) como consecuencia de la suma de los caudales aportados por las cuencas C41, C42, C43, C46, C47, C48 y C49 ya que este flujo se encuentra obstaculizado por el bordo 3, generando que todo el caudal fluya por este cauce. Posiblemente, en la situación actual sin obras, el flujo aportado por estas cuencas se divide en los cauces C50 y C52, haciendo que el caudal escurrido por el cauce C50 sea menor.

Cauce	Caudal sin obra (m ³ /s)	Caudal con obra (m ³ /s)
C31	0,01	0,37
C34	0,57	0,24
C39	0,42	0,32
C50	0,04	0,10
C52	0,56	0,55

Tabla 5.8. Caudales máximos para los cauces aguas abajo para la condición actual y la condición con obras de mitigación

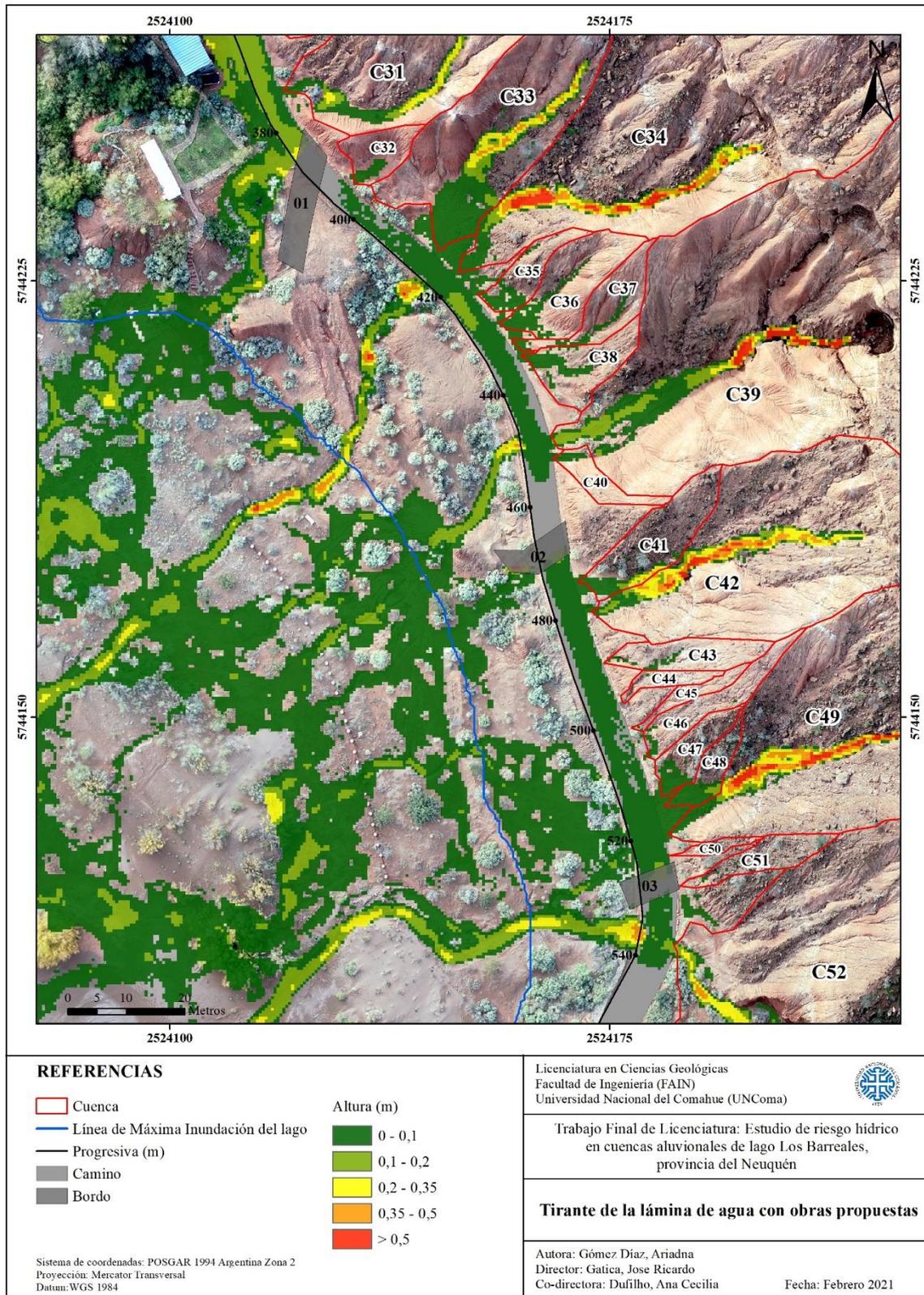


Figura 5.17. Tirante de la lámina de agua (en metros) para la crecida de diseño para 100 años de recurrencia con la intervención de las obras propuestas

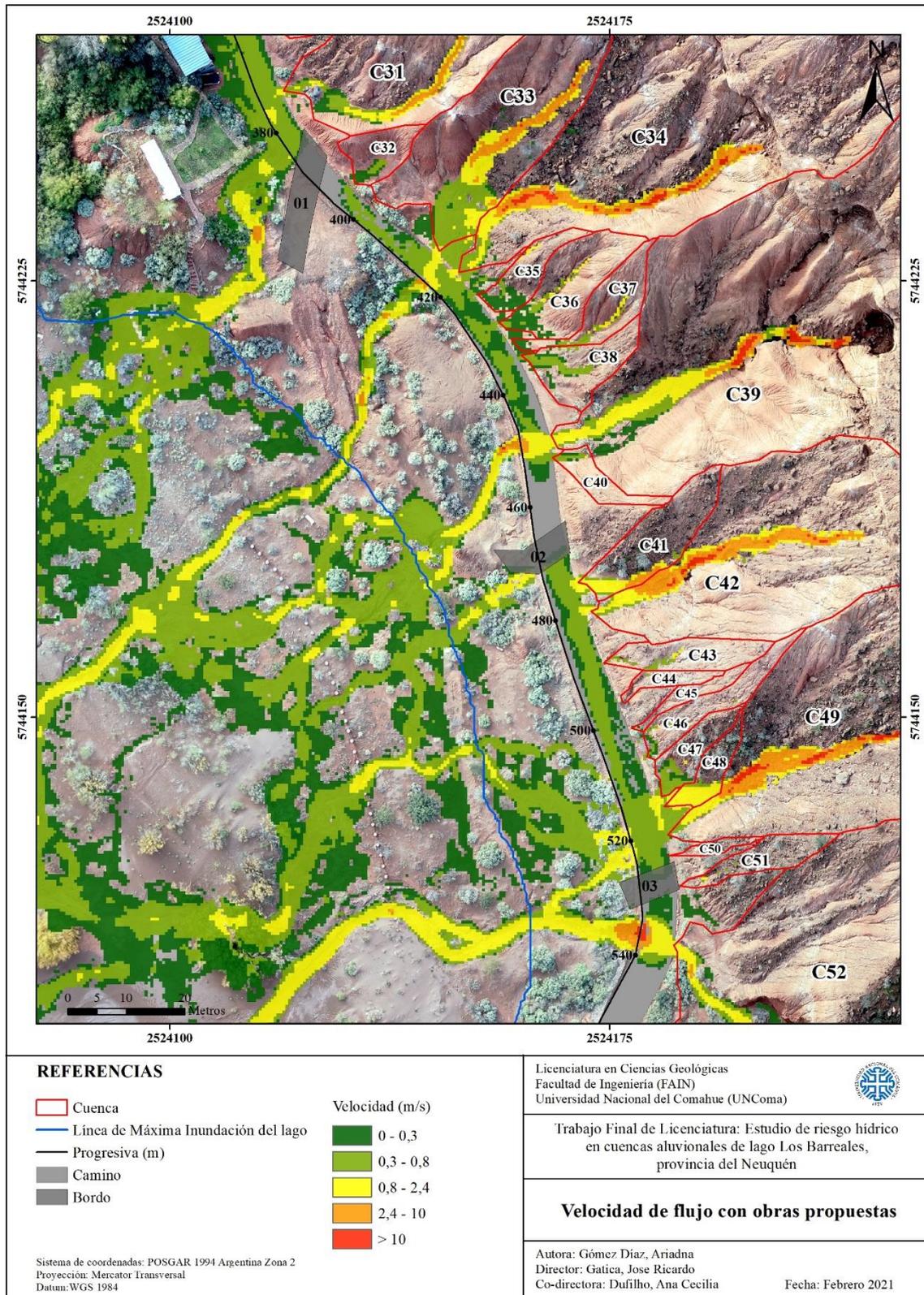


Figura 5.18. Velocidad de flujo de agua (en m/s) para la crecida de diseño para 100 años de recurrencia con la intervención de las obras propuestas

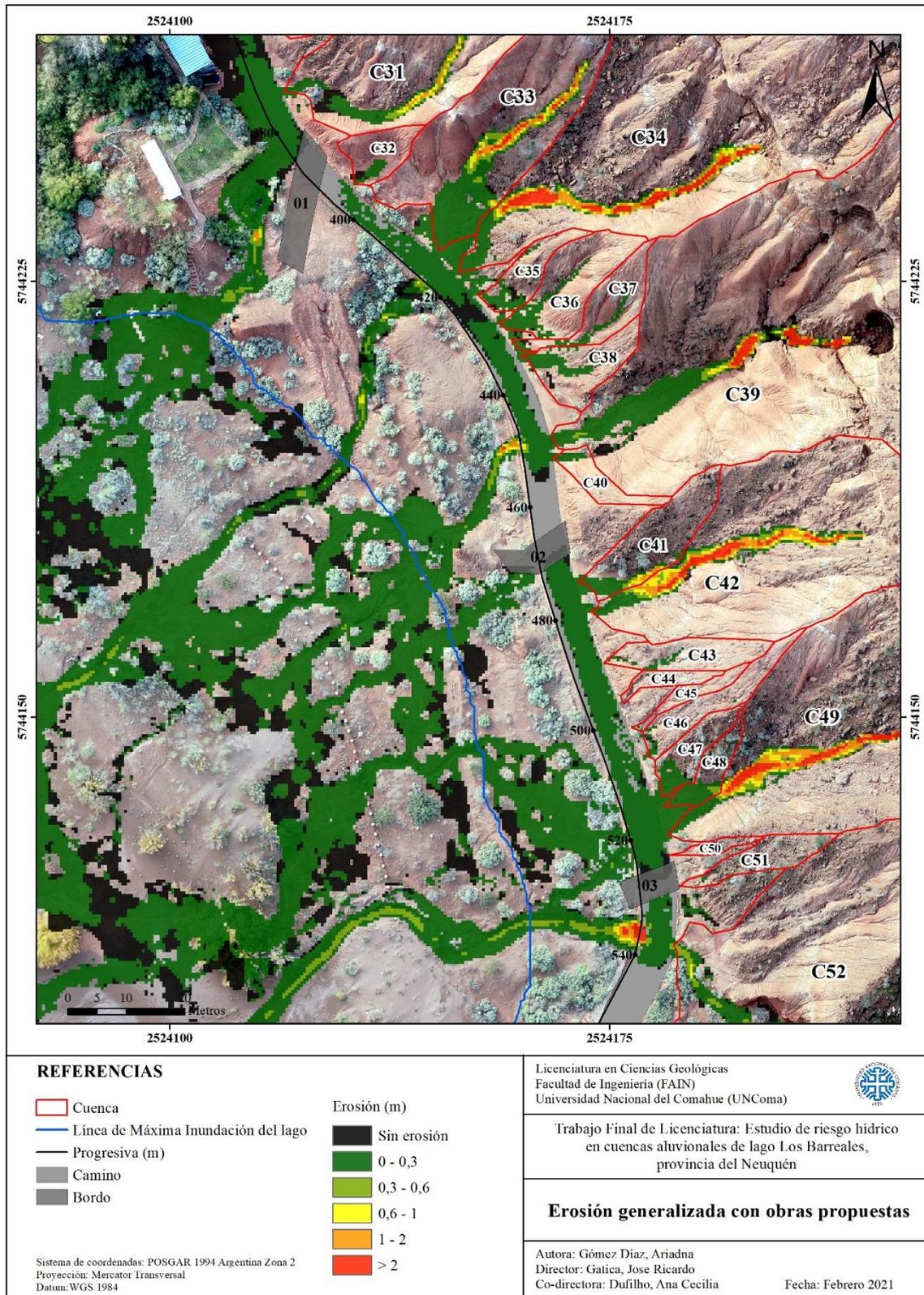


Figura 5.19. Erosión generalizada (en metros) del área de estudio con la intervención de las obras propuestas

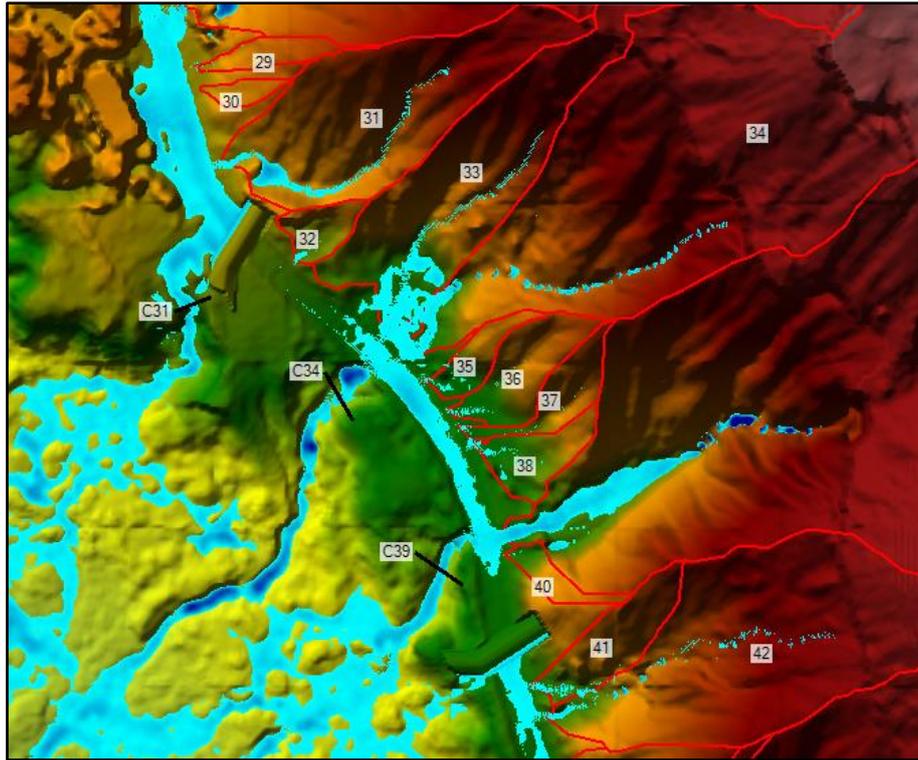


Figura 5.10. Caudal en los cauces analizados (líneas negras representan los hidrogramas estudiados)

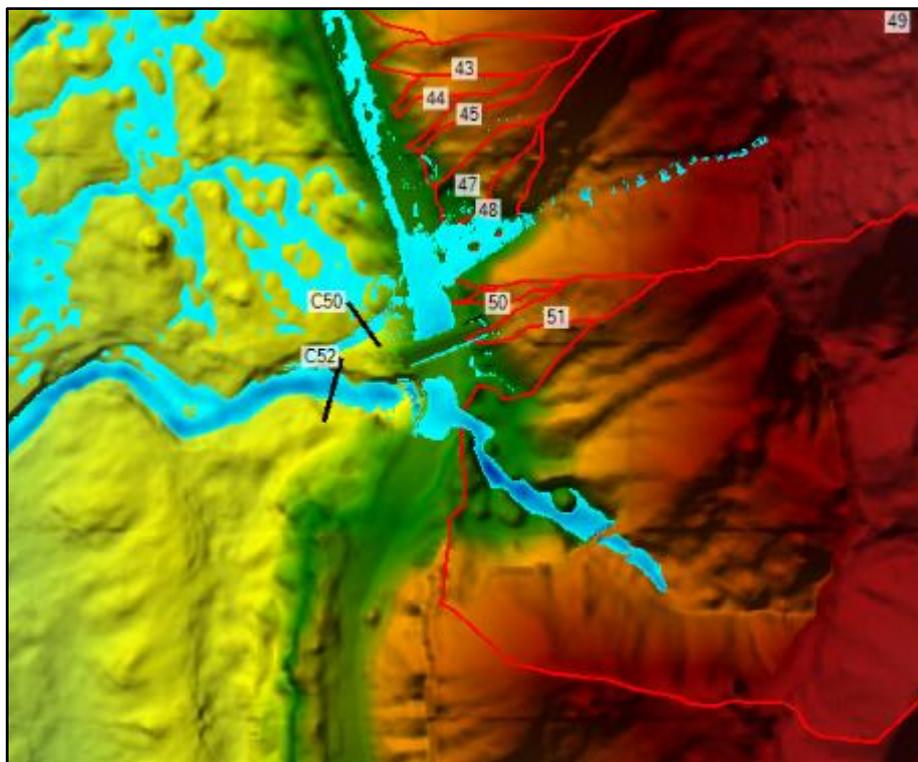


Figura 5.21. Caudal en los cauces analizados (líneas negras representan los hidrogramas estudiados)

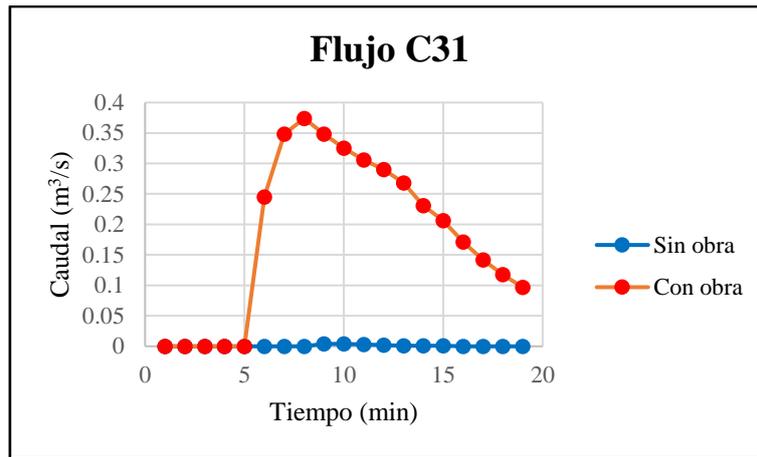


Figura 5.22. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C31 (cauce C31) para la situación actual y la situación con obra

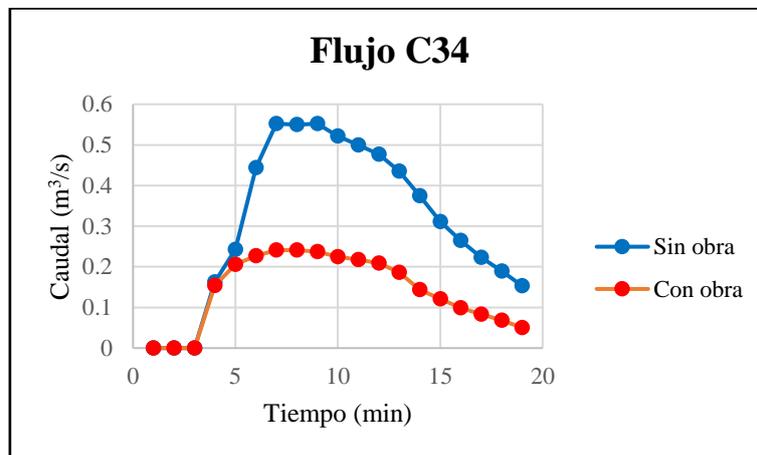


Figura 5.23. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C34 (cauce C34) para la situación actual y la situación con obra

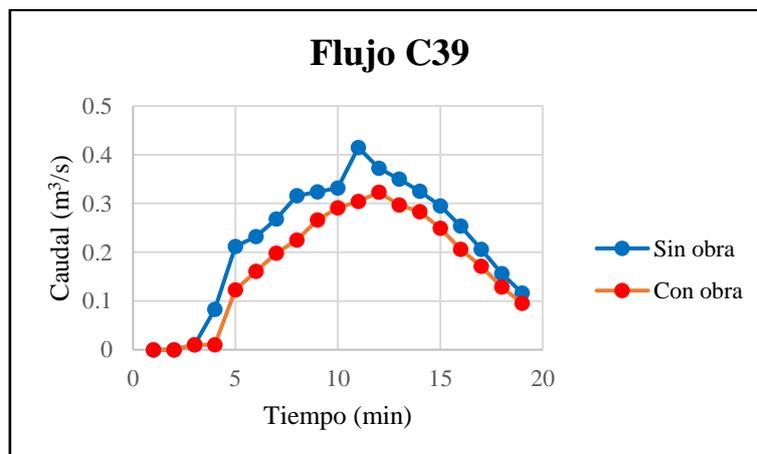


Figura 5.24. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C39 (cauce C39) para la situación actual y la situación con obra

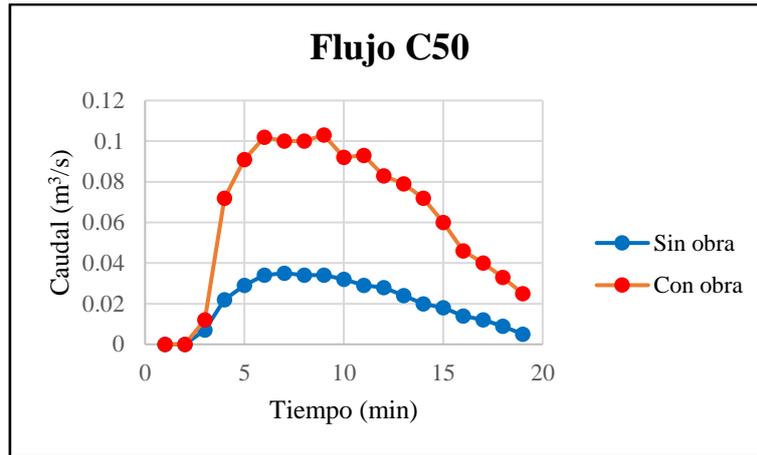


Figura 5.25. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C50 (cauce C50) para la situación actual y la situación con obra

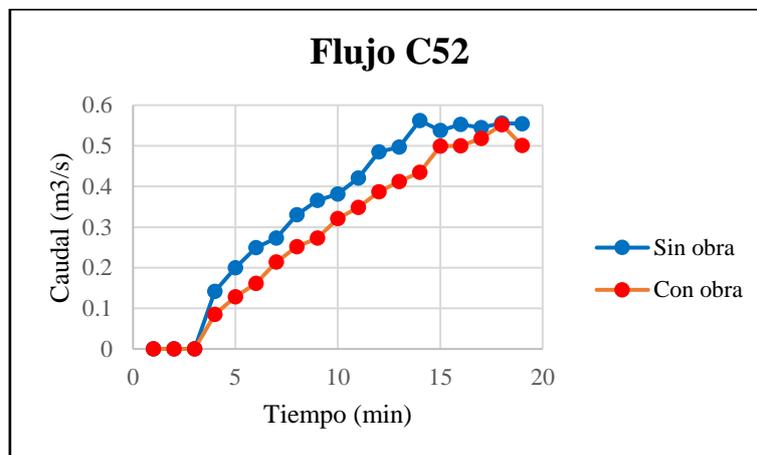


Figura 5.26. Hidrograma para el cauce aguas abajo de la cuenca C52 (cauce C52) para la situación actual y la situación con obra

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante este trabajo final de licenciatura se consiguió determinar el riesgo hídrico que producen las cuencas hidrográficas que afectan a las instalaciones del Centro Paleontológico Lago Barreales.

A través de Sistema de Información Geográfica y un Modelo de Elevación Digital del Terreno de elevada resolución espacial se lograron delimitar 52 cuencas y determinar sus parámetros morfométricos, de forma e hidrológicos necesarios para la caracterización de las mismas. Se trata de cuencas pequeñas, con áreas que no superan las 2 ha, por lo que los caudales generados por las mismas son bajos. La mayoría de las cuencas presentan forma alargada y ovalada, sin embargo, al ser cuencas de pendientes pronunciadas (superiores al 20%) se favorece la presencia de procesos erosivos y mayor velocidad de escorrentía, indicando tiempos de concentración bajos (inferiores a una hora) con altas probabilidades de que ocurra una crecida en poco tiempo ante precipitaciones intensas.

La estimación de los caudales máximos generados para una lluvia de diseño de período de recurrencia de 100 años se realizó utilizando los datos de precipitaciones de la estación meteorológica Paso de los Indios y aplicando el Método Racional de acuerdo con lo establecido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén, obteniéndose, en general, caudales inferiores a 1 m³/s. Los caudales obtenidos se encuentran condicionados tanto por la precipitación de diseño utilizada como por los coeficientes de escorrentía (CN y C) elegidos ya que estos parámetros dependen del criterio seguido por el profesional. A su vez, el parámetro CN depende del Grupo Hidrológico de Suelos, el cual se asigna en forma cuantitativa y en función de la experiencia del observador debido a que en la zona de estudio no se cuenta con cartografía que represente este parámetro.

La modelación hidráulica de los caudales máximos para 100 años de retorno se realizó mediante el *software* HEC-RAS con el fin de evaluar el comportamiento de cada cuenca, la velocidad de escorrentía, el tirante y la superficie de la lámina de agua. El modelado hidráulico permitió identificar, además, las zonas propensas a riesgo por inundación. En promedio, el tirante máximo de la lámina de agua no supera los 0,2 metros y la velocidad máxima de flujo es inferior a 0,8 m/s en el área de estudio. Para los cauces aguas abajo del cruce con el camino el tirante máximo es inferior a 0,35 metros y la velocidad máxima no supera los 2,4 m/s. Para la modelación hidráulica no se tuvieron en cuenta los caudales de las cuencas C12, C13, C16, C22, C30, C44, C45 y C50 ya que se consideraron despreciables.

La profundidad de socavación de la crecida de diseño en el área de estudio se determinó a través de la utilización de Sistema de Información Geográfica y la ecuación de Listchvan-Levediev, obteniéndose, en promedio, una erosión generalizada inferior a 0,3 metros y una profundidad máxima de socavación de hasta 2 metros en algunos sitios. A partir del mapa de erosión generalizada se puede determinar que, tanto el CePaLB como los actual y futuro estacionamientos, no presentan riesgos de socavación por la crecida aluvional, por el contrario, en estos últimos domina la sedimentación. Por otro lado, el sector sur del área de estudio es el que se encuentra mayormente afectado por la crecida, presentando riesgo de erosión encauzada.

A partir de los resultados obtenidos del cálculo de la erosión generalizada de la zona de estudio y en función del análisis de la pendiente natural, se propone llevar a cabo medidas estructurales pasivas en el sector sur del área ya que este se ve principalmente afectado por la crecida de diseño, presentando los valores más altos de socavación. Se recomienda realizar bordos amortiguadores de velocidades sobre el camino para controlar la escorrentía y la erosión en el acceso, con el propósito de desviar y fraccionar el flujo de agua a fin de disminuir tanto el caudal que circula por el mismo como el aporte hacia los cauces donde hay erosión, redireccionando el flujo de agua hacia su drenaje natural. Para ello, se empleó el Modelo de Elevación Digital del Terreno con la incorporación de las obras de mitigación propuestas, el *software* HEC-RAS y Sistema de Información Geográfica.

Se propone establecer tres bordos en las progresivas 380 a 400, 460 a 480 y 520 a 540. Como resultado, los cauces que se hallan aguas abajo de las cuencas C31 y C50 aumentan el caudal que circula por ellos, de 0,01 a 0,37 m³/s y de 0,04 a 0,10 m³/s, respectivamente. Por el contrario, los cauces que se encuentran aguas abajo de las cuencas C34, C39 y C52 disminuyen el volumen de agua que fluye por los mismos, de 0,57 a 0,24 m³/s, de 0,42 a 0,32 m³/s y de 0,56 a 0,55 m³/s, respectivamente. Como resultado de la implementación de estas obras, se reduce el volumen de escorrentía que fluye por el camino como consecuencia de que el flujo ya no está constituido por la suma y aporte de los caudales de todas las cuencas de este sector, dando como resultado una disminución de la erosión sobre el mismo.

La simulación de estas obras con HEC-RAS muestra que la colocación de bordos es eficiente para disminuir la velocidad y la profundidad de socavación en el camino. Sin embargo, es necesario recordar que esta alternativa de control requiere mantenimiento periódico a efecto de garantizar el buen funcionamiento.

Dado que la implementación del bordo 01 (progresiva 380 a 400) incrementa el caudal escurrido por el cauce que se halla aguas abajo del cruce del camino (cauce aguas abajo de la cuenca C31), esto genera un aumento en la erosión del mismo, por lo que se recomienda realizar a futuro un estudio para la elaboración de medidas de mitigación para el mismo.

Por otro lado, el CePaLB se encuentra fuertemente afectado por procesos erosivos probablemente debido a flujo subsuperficial. Por ello, se recomienda realizar, además, un estudio para determinar la posible causa, evaluar los problemas que puedan ocasionarse y proponer las medidas de protección necesarias.

Mediante este estudio se ha estimado que las instalaciones CePaLB presentan un bajo riesgo de erosión encauzada. Únicamente los caminos de acceso pueden sufrir cortes debido a procesos aluvionales. Esto ocurre a causa de que el material fino e incompetente de la Formación Plottier presenta escasa resistencia al transporte y posibilita la erosión hídrica encauzada aún con bajas pendientes y cuencas pequeñas. Asimismo, los procesos de escorrentía superficial y erosión hídrica se ven favorecidos por las características biofísicas del área de estudio, la cual presenta suelos cohesivos de baja a nula permeabilidad heredados del material parental, escasa cobertura vegetal debido al clima árido, y pendientes elevadas en los bordes de las mesetas. En la zona de talud predomina la erosión encauzada con arrastre de sedimentos que se depositan en la parte baja y dentro del área de inundación del lago Los Barreales.

El nivel de detalle del estudio es muy alto debido a que la modelación se realizó en base a topografía de detalle obtenida con dron. Los resultados obtenidos en las cuencas y sobre todo en la intersección del camino con los cauces son muy precisos, sin embargo, deben descartarse los resultados en los sitios que presentan saltos hidráulicos debido a las limitaciones de la modelación 2D, tal como se mencionó en el apartado 3.4.2. Estas consideraciones fueron tomadas en cuenta a la hora de ejecutar el modelo hidráulico en la zona de estudio, por lo que se decidió establecer la condición de borde aguas arriba (entrada) sobre el talud de la meseta baja, de esta forma los cursos que se modelan se hallan sobre un sector estabilizado de baja pendiente, donde el cauce es uniforme en todo su recorrido, y de este modo evitar los resaltos hidráulicos que puedan ocasionarse como consecuencia del relieve aterrazado. Sin embargo, cualquier resultado obtenido por HEC-RAS no es una solución real, sino más bien una aproximación de la misma y un posible resultado de ésta.

Por otro lado, los resultados están condicionados por aspectos hidrológicos, debido a que tanto los coeficientes de escorrentía (CN y C) adoptados, como la precipitación de diseño utilizada, continúan siendo la principal fuente de error e incertidumbre. No obstante, cabe destacar que los resultados, a priori, se encuentran del lado de la seguridad a la hora de proyectar obras de protección debido a que están sobreestimados ya que los parámetros utilizados garantizan la condición más desfavorable.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Tucubal, J.G., 2014. Control del resalto hidráulico mediante cuencos disipadores. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería (Tesis de grado): 148 pp.

Aparicio Mijares, F.J., 1992. Fundamentos de la hidrología de superficie. Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores. México.

Apaza Sejje, M.E., 2018. Modelamiento hidrológico del río Azángaro tramo: puente Azángaro – puente Yaraña, con aplicación de los programas ARCGIS y HEC-RAS, con fines de defensas. Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez”, Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras (Tesis de grado): 129 pp.

Barbosa Gil, S., 2013. Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente (Tesis de magister): 151 pp.

Basile, P.A., 2018. Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.

Breña Puyol, A.F. y Villa, M.A.J., 2006. Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. México.

Burgos, V.H., 2005. Modelación Hidrológica de Cuencas Piedemontanas: Uso de Sistemas de Información Geográfica en hidrología superficial. XX Congreso Nacional del Agua (CONAGUA).

Burgos, V.H. y Vargas Aranibar, A., 2008a. Estudio hidrológico aluvional urbano-rural de loteo en piedemonte, Mendoza – Argentina. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica: 15 pp.

Burgos, V.H. y Vargas Aranibar, A., 2008b. Estudio hidrológico aluvional en Alto Agrelo – Mendoza, Argentina. Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino (INA – CRA): 14pp.

Burgos, V.H., 2014. Estudio hidrológico e hidráulico para la determinación de drenajes pluviales. Proyecto del Centro Ambiental para los residuos del Área Metropolitana de Mendoza (INFORME FINAL): 85 pp.

Burgos, V., López, P., Maza, J. y Salcedo, A.P., 2015. Delimitación de áreas de riesgo hídrico por crecidas de los ríos El Tala y Paclín, Catamarca. XXV Congreso Nacional del Agua (CONAGUA).

Burgos, V.H. y Salcedo, A.P., 2016a. Evaluación del riesgo hídrico ante potencial rotura de presa El Carrizal, Mendoza, Argentina. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica: 10 pp.

Burgos, V.H. y Salcedo, A.P., 2016b. Evaluación de metodologías utilizadas para estimación de riesgos hídricos por inundación urbana. Casos de estudio en Mendoza y Catamarca. Libro de artículos del Segundo Congreso Latinoamericano de Estudios Urbano-Ambientales y Gestión de Riesgos.

Burgos, V.H., Quiroga, S. y Lobo, P., 2017. Propuesta metodológica para estimación de amenazas hídricas y gestión de riesgos de desastres en zonas serranas. Avances de caso de estudio en Río Balcozna, Catamarca. Noveno Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería.

Burgos, V.H., 2019. Evaluación de Amenazas Aluvionales en piedemonte del Área Metropolitana de Mendoza. Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino (INA-CRA): 307 pp.

Cadavid, J.H., 2006. Hidráulica De Canales: Fundamentos. Editorial Universidad EAFIT.



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W., 1988.** Applied Hygrology. McGraw-Hill: 498 pp.
- Chow, V.T., 1994.** Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill: 683 pp.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W., 1994.** Hidrología Aplicada. McGraw-Hill: 595 pp.
- Cisneros, J.M., Cholaky, C.G., Cantero Gutiérrez, A., González, J.G., Reynero, M.A., Diez, A. y Bergesio, L., 2012.** Erosión Hídrica: Principios y técnicas de manejo. Editorial de la Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Coello, C., 2013.** Estudios definitivos para el puente sobre el río Anzu, ubicado en los cantones Tena y Carlos Julio Arosemena Tola. Análisis Hidrológico – Hidráulico en el Anzu. Disponible en <https://bde.fin.ec/wp-content/>
- Consortio Pomca Quindío, 2018.** Morfometría. Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río La Vieja. Disponible en <https://www.cvc.gov.co/>
- Cordova Diaz, C.J., 2018.** Modelacion hidraulica del rio “La Leche” con el programa HEC-RAS en un tramo de 4km. En el distrito de Illimo, y departamento de Lambayeque. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil (Tesis de grado): 271 pp.
- Díaz de la Cruz, V., 2012.** Análisis hidrológico e hidráulico mediante técnicas SIG de la peligrosidad por inundaciones en la cuenca del Pla de Sant Jordi (Mallorca). Universidad Complutense, Madrid (Tesis de maestría): 97 pp.
- Dufilho, A.C., Horne, F., Navedo, R. y Polla, G., 2001.** Diseño de obras de control de aluviones basada en simulación de procesos hidrológicos torrenciales en cuencas de la Patagonia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – 5 (2): 198-203 pp.
- Dufilho, A.C., Frugoni, M.C., Macchi, P. y Toth, A., 2011.** Estimación de erosión hídrica de suelos para plan de manejo del Campo Forestal Aguas Frías, Patagonia Argentina. Boletín geográfico XXXII N°33. Universidad Nacional del Comahue, Departamento Geografía: 69-85 pp.
- Durante, M.P., 2015.** Mapa de riesgo hídrico de la localidad de “El Pueblito”. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: 71 pp.
- Escarcena Quiza, F.Y., 2012.** Determinación de áreas inundables de la parte media de la microcuenca del río Zapatilla – centro poblado de Ancoamaya – Ilave. Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Agrícola (Tesis de grado): 106 pp.
- Etxeberría Ramírez, P., Brazaola Rojo, A. y Edeso Fito, J.M., 2002.** Cartografía de peligro de inundación mediante Sistemas de Información Geográfica y modelos hidrológicos e hidráulicos. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Santander: 9 pp.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), 2009.** Guía para la descripción de suelos. Disponible en <http://www.fao.org/home/en>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), 2015.** Aspectos Físicos: Suelo, Clima y Agua Provincia del Neuquén. Disponible en <http://www.fao.org/home/en>
- Farias, H.D., 2009.** Propuesta metodológica para la evaluación del riesgo aluvional en cursos efímeros atravesados por conductos subterráneos. Estudios de casos en Mendoza, Argentina. Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos: 39-40 pp.
- Fattorelli, S. y Fernández, P.C., 2011.** Diseño Hidrológico. Edición digital, Water Assessment and Advisory Global Network (WASA-GN).
- Fernández, P., Segerer, C.D., Fernández, J.M., Segerer, E.C., Delgado, S.C. y Buk, E.M., 1980.** Estudio hidrológico de cuencas aluvionales en la Provincia del Neuquén y curvas



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

generalizadas para el cálculo hidráulico de estructuras viales. Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hídricas – Centro Regional Andino: 55 pp.

Ferrer Polo, F.J., 2000. Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas. Centro de Estudios Hidrográficos – CEDEX. Disponible en <http://hispagua.cedex.es/node/92786>

Ferrer, J.A., Irisarri, J.A. y Mendia, J.M., 2006. Suelos de la Provincia del Neuquén. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Consejo Federal de Inversiones (INTA-CFI).

French, R. H., 1988. Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill: 78-79 pp.

Garay, D.D. y Agüero, J.N.G., 2018. Delimitación hidrográfica y caracterización morfométrica de la cuenca del río Anzulón. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA): 32 pp.

García Lorenzo, R. y Conesa García, C., 2011. Estimación de caudales de avenidas y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos e hidráulicos y técnicas S.I.G., estudio aplicado al litoral sur de la región de Murcia. Papeles de Geografía 53-54: 107-123 pp.

García Tocto, D.Y., 2019. Modelado hidráulico del río Amojú aplicando el software IBER para zonificar áreas inundables en la ciudad de Jaén, Perú. Universidad Nacional de Jaén (Tesis de grado): 147 pp.

Garrido, A.C., 2011. El Grupo Neuquén (Cretácico Tardío) en la Cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: 231-244 pp. Neuquén.

Gaspari, F.J., Rodríguez Vagaría, A.M., Senisterra, G.E., Denegri, G., Delgado, M.I. y Besteiro, S., 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Actas VII Congreso de Medio Ambiente: 25 pp.

Gaspari, F.J., Rodríguez Vagaría, A.M., Senisterra, G.E., Delgado, M.I. y Besteiro, S.I., 2013. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Curso de manejo de cuencas hidrográficas, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

Guerra, F. y González, J., 2002. Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. Geoenseñanza 7 (1-2): 88-108 pp.

Guitelman, A., del Valle Leiva, A. y Bebczuk, A.S., 2006. Comparación de métodos de cálculo de erosión en puentes. III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos: 30 pp.

Kirpich, Z.P., 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Engineering. (N.Y.) 10 (6): 362 pp.

Lippi Dominguez, C.F., 2016. Caracterización experimental del flujo de aproximación a una obra hidráulica en un modelo físico 2D (H:V). Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: 89 pp.

López Vásquez, C., 2019. Estudio comparativo del componente hidráulico en la determinación de la ronda hídrica, desde las perspectivas nacional e internacional. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura (Tesis de grado): 133 pp.

Marizza, M.S., Rapacioli, R. y Vives, L., 2010. La problemática aluvional en el Alto Valle del Río Negro, Argentina. Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México 1 (1): 21-34 pp.

Martínez de Azagra, A. y Navarro Hevia, J., 1996. Hidrología Forestal: El ciclo hidrológico. Secretaria de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid. Manuales y textos universitarios: Ciencias 18.

Mayta Rojas, C.A. y Mamani Maquera, E.R., 2018. Modelación hidráulica de la defensa de Calana con el fin de determinar la vulnerabilidad ante máximas avenidas. Universidad Privada De Tacna, Facultad De Ingeniería (Tesis de grado): 124 pp.

Maza, J., Fernández, P., Vargas, A., Fornero, L., Trípodí, D., Yañez, H. y Nuñez, M., 1995. Estudios Hidrológicos e Hidráulicos para el Ordenamiento Territorial de una Cuenca. Revista INGENIERIA del AGUA 1 (2): 31-44 pp.

Maza, J.A. y Burgos, V.H., 2007. Análisis de la variabilidad espacial del riesgo de inundabilidad y sus factores en el río Blanco de Potrerillos, Mendoza. Instituto Nacional del Agua-Centro Regional Andino: 21 pp.

Maza, J. A., López, P.M. y Burgos, V.H., 2012. Delimitación de Áreas de Riesgo Hídrico en El Rodeo, departamento Ambato, Catamarca. Instituto Nacional del Agua-Centro Regional Andino (INA-CRA): 117 pp.

Maza, J.A, Burgos, V.H. y Cartagena, A.C, 2014. Actualización de la crecida de proyecto y simulación matemática de las condiciones de rotura de la presa El Carrizal, áreas de inundación y plan de acción de emergencia. Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino (INA-CRA): 308 pp.

Mussini, E., Crespo, G. y Bianco, H., 1984. Evolución de la materia orgánica de la provincia del Neuquén. Ciencia del Suelo 2 (1): 53-60 pp.

Ocaña, R.E., Flores, D.G., Pittaluga, M.A. y Cortez Taillant, V.S., 2020. Aplicación de índices geomorfométricos, para el análisis del sistema erosivo fluvial de la cuenca Matagusanos, Precordillera de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina 77 (1): 174-191 pp.

Oyola Romero, A.M. y Medina Troncos, O.A., 2019. Estimación de caudales máximos con fines de prevención de inundaciones aplicando el modelo hidrológico HEC-RAS, caso Rio Zarumilla – 2018. Universidad Nacional de Tumbes, Facultad de Ciencias Agrarias (Tesis de grado):69 pp.

Pereyra, F.X., Irisarri, J.A. y Ferrer, J.A., 2011. Suelos: factores de formación, procesos pedogenéticos y distribución. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: 871-880 pp. Neuquén.

Pérez Romo, A.T. y Vanegas Sandoval, L.J., 2016. Estudio hidrológico e hidráulico en la zona baja de la cuenca del río Frío en el municipio de Chía. Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería (Tesis de grado): 116 pp.

Pike, R.J. y Wilson, S.E., 1971. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis: Geological Society of America Bulletin, 82(4), 1079-1084 pp.

Quezada, J., Cerda, J.L. y Jensen, A., 2010. Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. Andean Geology 37 (1): 78-109 pp.

Quijano Cossío, J.E., 2015. Parámetros morfométricos, geomorfológicos y correlación estructural en cinco cuencas hidrográficas de la cuenca Amagá. Universidad EAFIT, Departamento de Geología (Tesis de grado): 85 pp. Colombia.

Quispe Torres, J.A. y Sullca Otazu, R.F., 2015. Aplicación del modelo matemático HEC-RAS para el cálculo del perfil hidráulico del río Ramis. Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez", Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras (Tesis de grado): 160 pp.

Rabassa, J., 1977. Cuencas aluvionales de la Provincia del Neuquén, mapa de valores. Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hídricas – Centro Regional Andino: 77 pp.



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

- Racca, J.M.G., 2007.** Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 77 (1-2): 31-38 pp.
- Ramos Moreno, A. y Pacheco Fontalvo, J.A., 2017.** Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Frio, municipios de Ciénaga y zona bananera, departamento del Magdalena. Revista LOGOS: CIENCIA & TECNOLOGÍA 9 (1): 156-178 pp.
- Rapacioli, R. y D'Amico, V., 2013.** Determinación de Curvas IDF en la Cuenca Superior del Río Colorado – Segunda Parte. Neuquén: Universidad Nacional del Comahue.
- Rodríguez, M.F., Leanza, H.A. y Salvarredy Aranguren, M., 2009.** Hoja geológica 3969-II Neuquén – Provincias del Neuquén, Río Negro y La Pampa. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 370: 165 pp.
- Saad, A. y Marizza, M., 2007.** Sistemas de Información Geográfica para la evaluación de la erosión hídrica en el yacimiento Aguada Baguales (Neuquén). TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional (Ed. Martin): 193-197 pp.
- Sánchez San Román, F.J., 2011.** Hidrología – Hidrogeología. Universidad de Salamanca, Departamento de Geología. Disponible en <http://web.usal.es/javisan/hidro>
- Sanchez Conci, G.O., 2016.** Modelación hidrológica e hidráulica de eventos para el diseño hidrológico de la cuenca del Río Ctalamochita. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: 102 pp.
- Secretaría de Energía, 2003.** Recursos Hídricos: Centrales hidráulicas, embalses, lagos y lagunas. Catálogos de Recursos Hídricos, Secretaría de Energía- República Argentina.
- Sierra Lopinta, H.W., 2018.** Modelamiento hidráulico bidimensional de un tramo del río Pativilca, en flujo no permanente. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola (Tesis de grado): 136 pp.
- Strahler, A.N., 1952.** Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. Bulletin of the Geological Society of America 63: 1117-1142 pp.
- Témez, J.R., 1978.** Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Ministerio de Obras Públicas y Urbanas, Dirección General de Carreteras: 113 pp.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2016.** Hydraulic Reference Manual – Version 5.0. Hydrologic Engineering Center – River Analysis System. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx>
- U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1973.** A method for estimating volumen and ratio of Runoff in small watersheds. SCS-TP-149.
- Vaccarino Pasquali, E.L.B., Manduca, F.R., Bizzoto, F.S. y Vich, A.I.J., 2012.** Morfometría de cuencas ubicadas en el piedemonte mendocino de la Precordillera. Instituto de Estudios del Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Nacional de Cuyo: 14 pp.
- Valdés-Pineda, R., Valdés, J. B. y García-Chevesich, P., 2017.** Modelación de Crecidas Aluvionales en la Cuenca del Río Copiapó, Chile. Ingeniería del agua 21(2): 135-152 pp. <https://doi.org/10.4995/Ia.2017.7366>
- Verdugo Cárdenas, M., 2017.** Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el bosque y vegetación protectora Aguarongo (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico. Universidad Politécnica Salesiana, Sede de cuenca: 127 pp.



Estudio de riesgo hídrico en cuencas aluvionales de lago Los Barreales, provincia del Neuquén

Villodas, R. 2008. Hidrología – Unidad 4: Las cuencas (I). Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería (Guía de estudio): 40 pp.

Villón, M., 2002. Hidrología. Editorial Villón. Perú.

Volonté, A., 2017. Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas. Cuenca del arroyo San Bernardo, Sistema de Ventania, Argentina. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo (Tesis doctoral): 182 pp.

8. ANEXO

8.1. Coeficiente n de Manning

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos			
A-1. Metal			
a. Latón, liso	0.009	0.010	0.013
b. Acero			
1. Estriado y soldado	0.010	0.012	0.014
2. Riveteado y en espiral	0.013	0.016	0.017
c. Hierro fundido			
1. Recubierto	0.010	0.013	0.014
2. No recubierto	0.011	0.014	0.016
d. Hierro forjado			
1. Negro	0.012	0.014	0.015
2. Galvanizado	0.013	0.016	0.017
e. Metal corrugado			
1. Subdrenaje	0.017	0.019	0.021
2. Drenaje de agua de lluvia	0.021	0.024	0.030
A-2. No metal			
a. Lucita	0.008	0.009	0.010
b. Vidrio	0.009	0.010	0.013
c. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
d. Concreto			
1. Alcantarilla, recta y libre de basuras	0.010	0.011	0.013
2. Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basuras	0.011	0.013	0.014
3. Bien terminado	0.011	0.012	0.014
4. Alcantarillado de aguas residuales, con pozos de inspección, entradas, etc., recto	0.013	0.015	0.017
5. Sin pulir, cimbra metálica	0.012	0.013	0.014
6. Sin pulir, cimbra en madera lisa	0.012	0.014	0.016
7. Sin pulir, cimbra en madera rugosa	0.015	0.017	0.020
e. Madera			
1. Machihembrada	0.010	0.012	0.014
2. Laminada, tratada	0.015	0.017	0.020
f. Arcilla			
1. Canaleta común de baldosas	0.011	0.013	0.017
2. Alcantarilla vitrificada	0.011	0.014	0.017
3. Alcantarilla vitrificada con pozos de inspección	0.013	0.015	0.017
4. Subdrenaje vitrificado con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018

Tabla 8.1. Valores de coeficiente de rugosidad n de Manning (Fuente: Chow, 1994)

Continuación de la Tabla 8.1.

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
g. Mampostería en ladrillo			
1. Barnizada o laqueada	0.011	0.013	0.015
2. Revestida con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
h. Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y babas de aguas residuales, con curvas y conexiones	0.012	0.013	0.016
i. Alcantarillado con batea pavimentada, fondo liso	0.016	0.019	0.020
j. Mampostería de piedra, cementada	0.018	0.025	0.030
B. Canales revestidos o desarmables			
B-1. Metal			
a. Superficie lisa de acero			
1. Sin pintar	0.011	0.012	0.014
2. Pintada	0.012	0.013	0.017
b. Corrugado	0.021	0.025	0.030
B-2. No metal			
a. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
b. Madera			
1. Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014
2. Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
4. Láminas con listones	0.012	0.015	0.018
5. Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica	0.011	0.013	0.015
2. Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de			
1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
5. Piedra partida suelta	0.020	0.030	0.035

Continuación de la Tabla 8.1.

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
1. Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra partida suelta	0.023	0.033	0.036
f. Ladrillo			
1. Barnizado o laqueado	0.011	0.013	0.015
2. En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2. Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal	0.030		0.500
C. Canal excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala o dragado			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120

Continuación de la Tabla 8.1.

2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.050
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.050
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que los bancos ofrecen resistencia menos efectiva.			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025		0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035		0.100

8.2. Análisis granulométricos

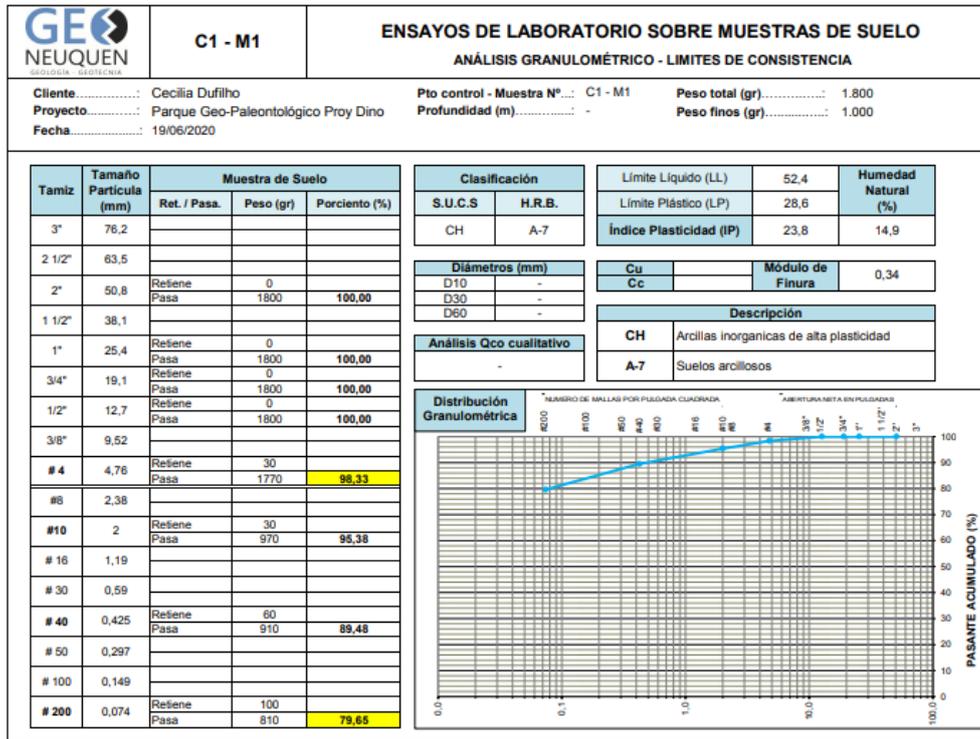


Figura 8.1. Análisis granulométrico del cauce que se encuentra aguas abajo de la cuenca C52 (muestra C1-M1)

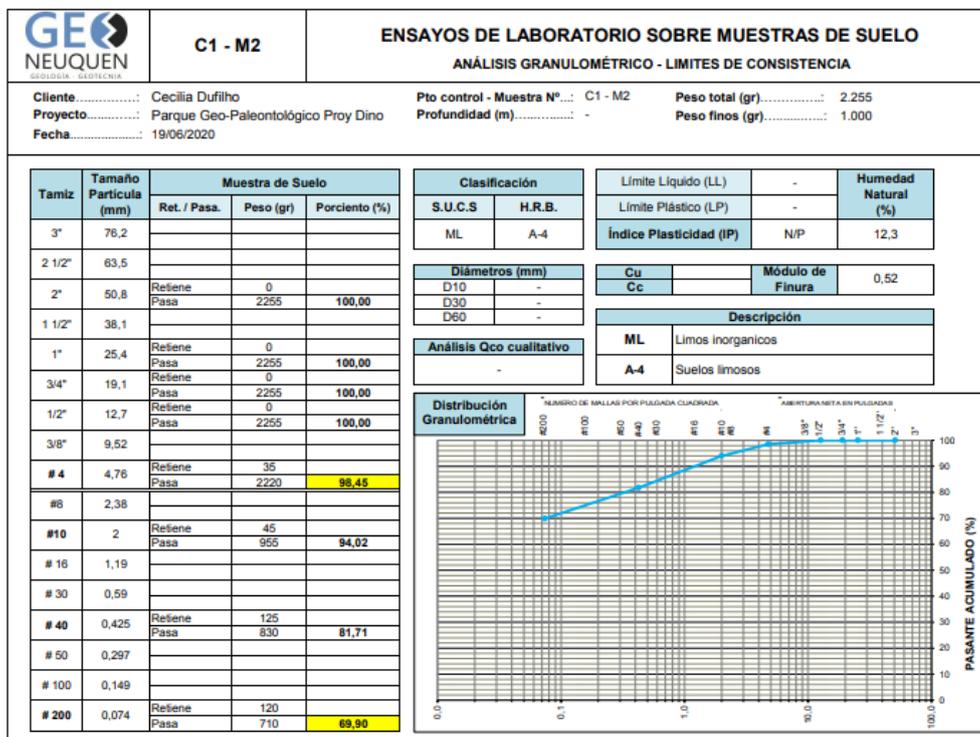


Figura 8.2. Análisis granulométrico del cauce de la cuenca C52 (muestra C1-M2)

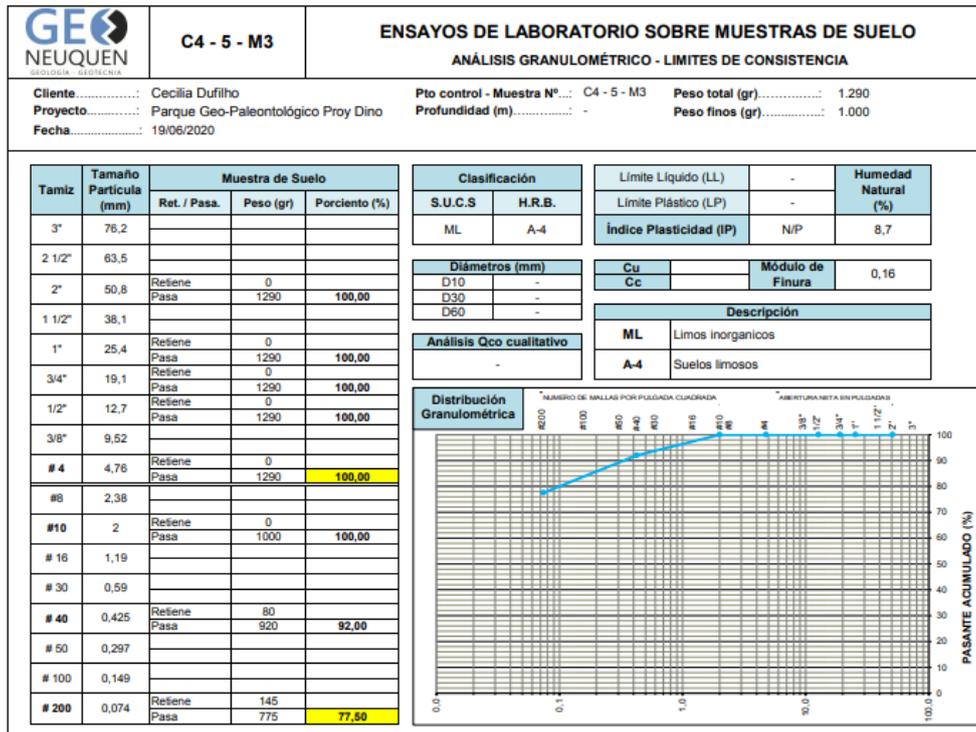


Figura 8.3. Análisis granulométrico del cauce formado por la confluencia de los cauces que se hallan aguas abajo de las cuencas C39 y C33-C34 (muestra C4-5-M3)

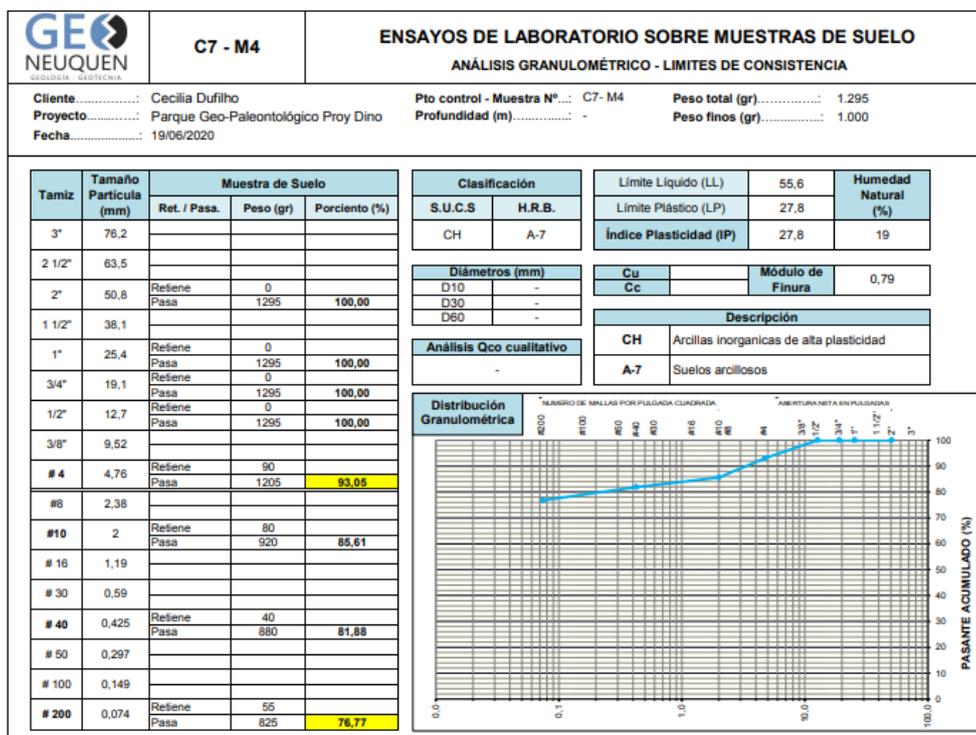


Figura 8.4. Análisis granulométrico del cauce de la cuenca C27 (muestra C7-M4)

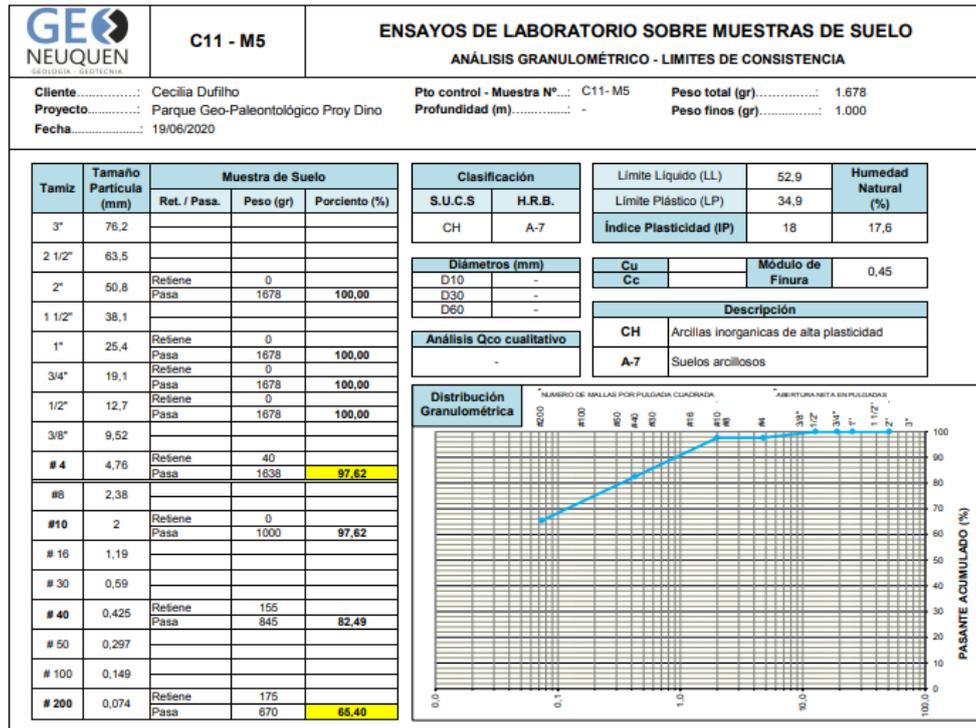


Figura 8.5. Análisis granulométrico del cauce de la cuenca C08 (C11-M5)

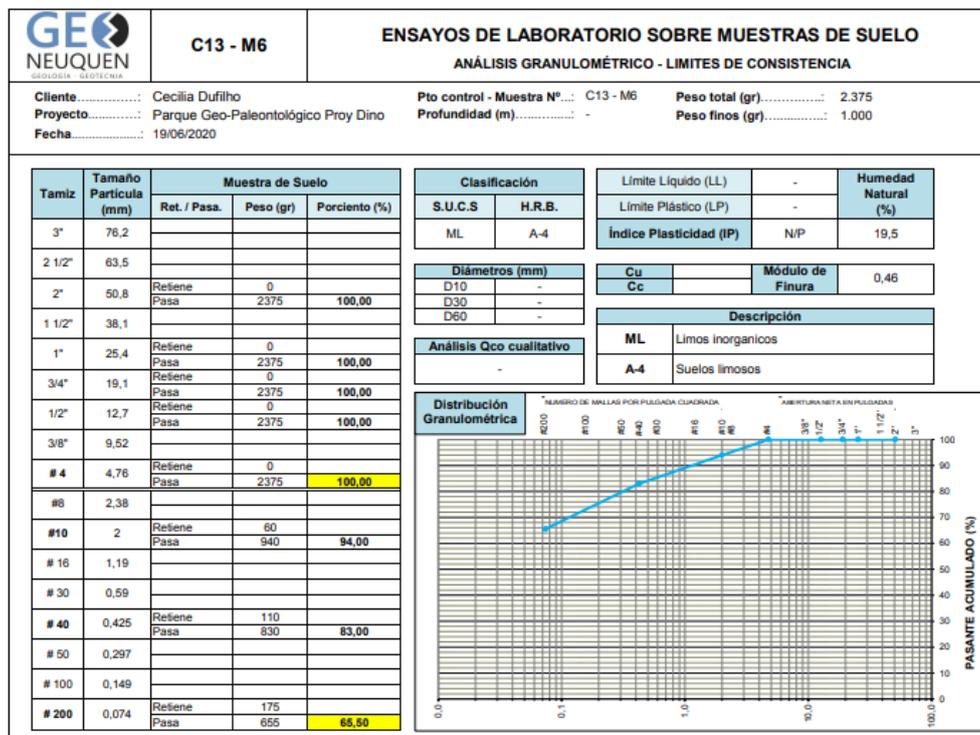


Figura 8.6. Análisis granulométrico del cauce de la cuenca C03 (muestra C13-M6)

8.3. Curvas hipsométricas

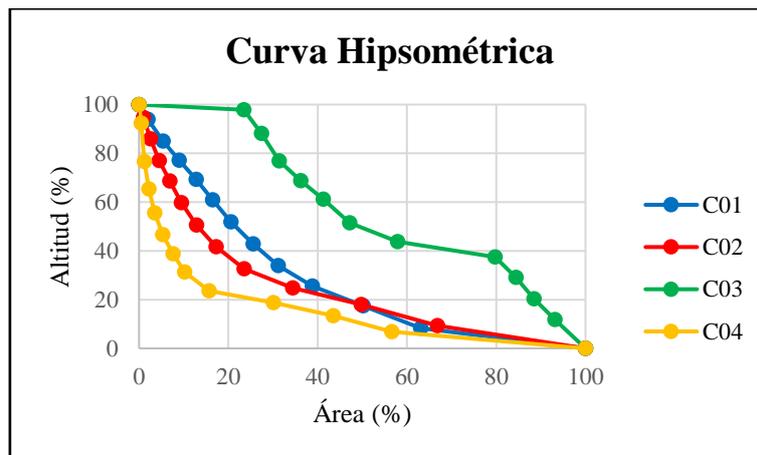


Figura 8.7. Curvas hipsométricas de las cuencas C01, C02, C03 y C04

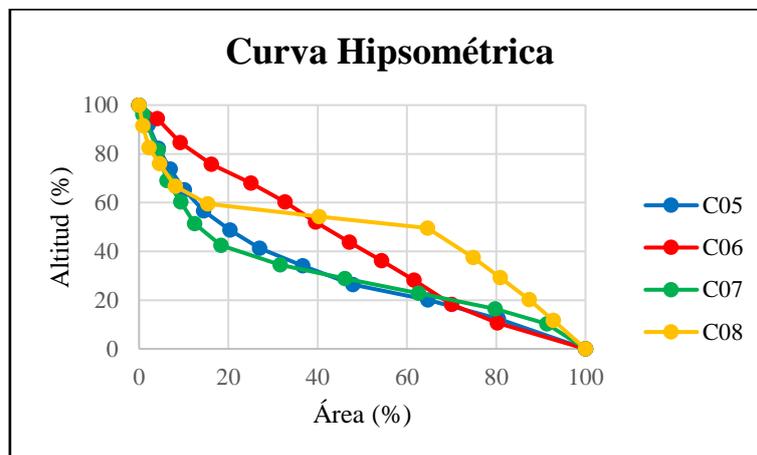


Figura 8.8. Curvas hipsométricas de las cuencas C05, C06, C07 y C08

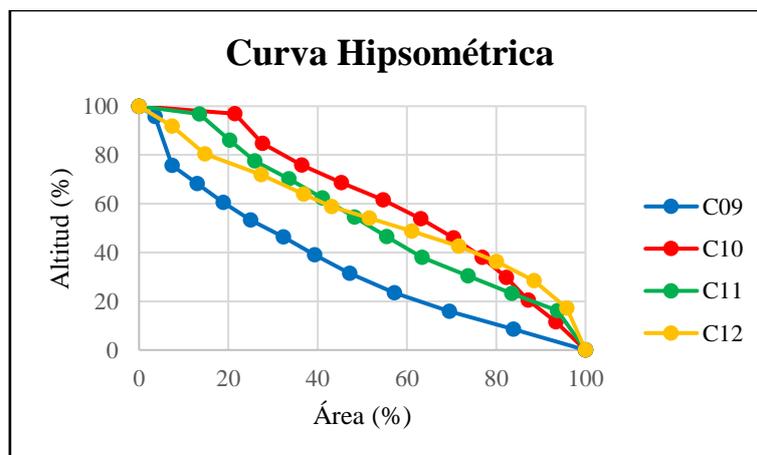


Figura 8.9. Curvas hipsométricas de las cuencas C09, C10, C11 y C12

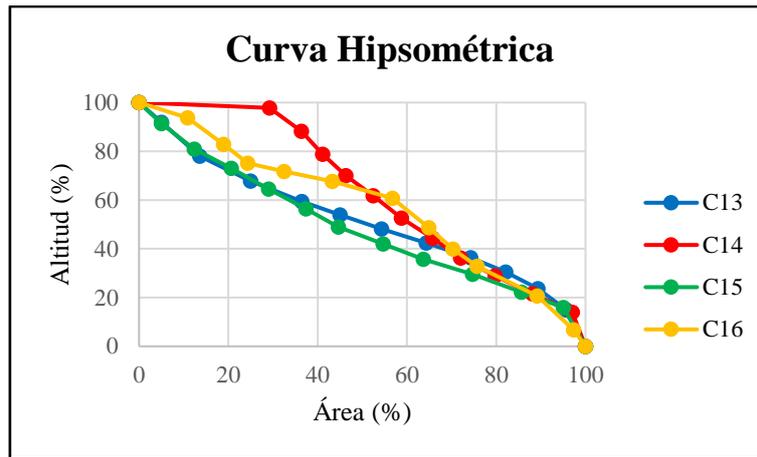


Figura 8.10. Curvas hipsométricas de las cuencas C13, C14, C15 y C16

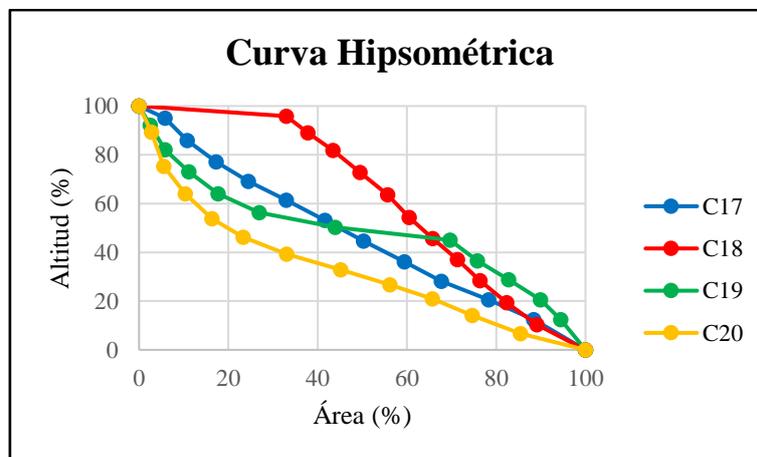


Figura 8.11. Curvas hipsométricas de las cuencas C17, C18, C19 y C20

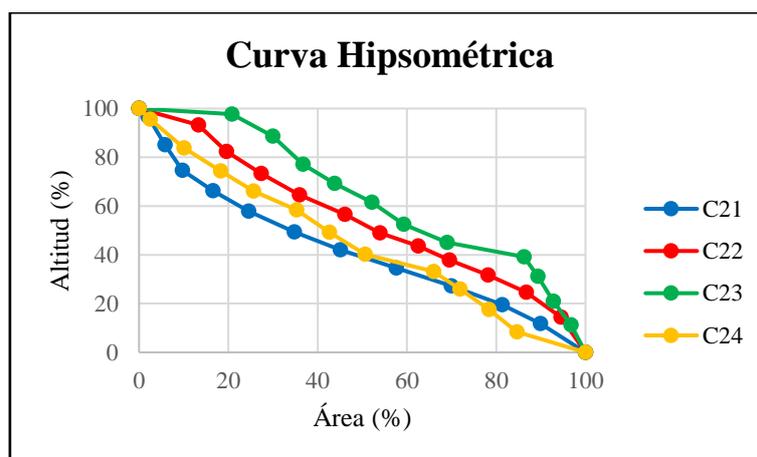


Figura 8.12. Curvas hipsométricas de las cuencas C21, C22, C23 y C24

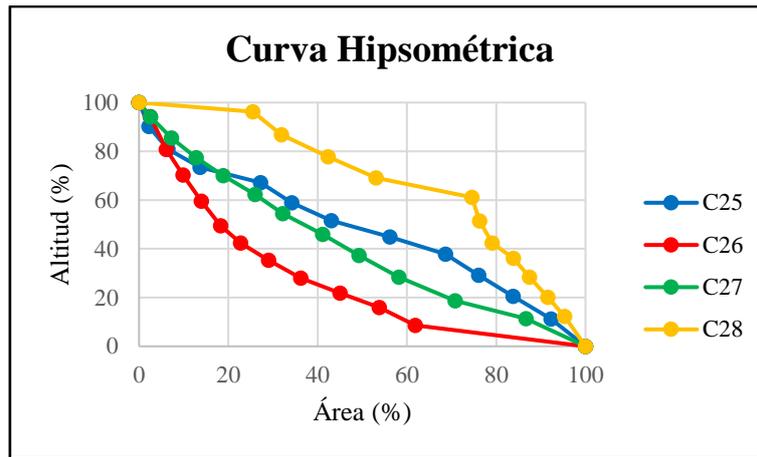


Figura 8.13. Curvas hipsométricas de las cuencas C25, C26, C27 y C28

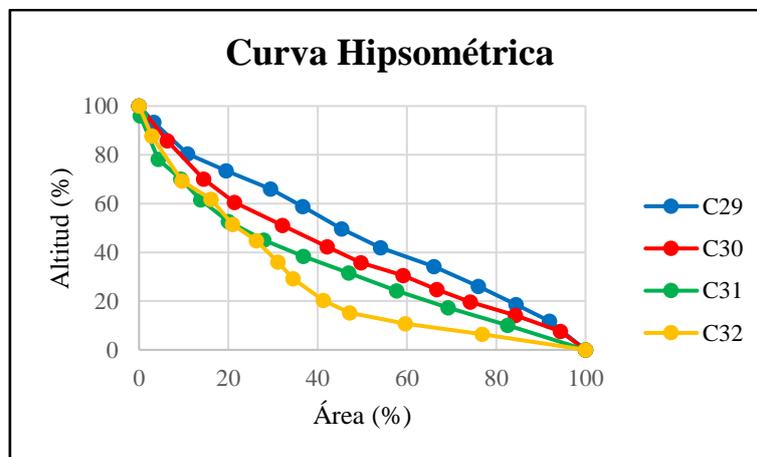


Figura 8.14. Curvas hipsométricas de las cuencas C29, C30, C31 y C32

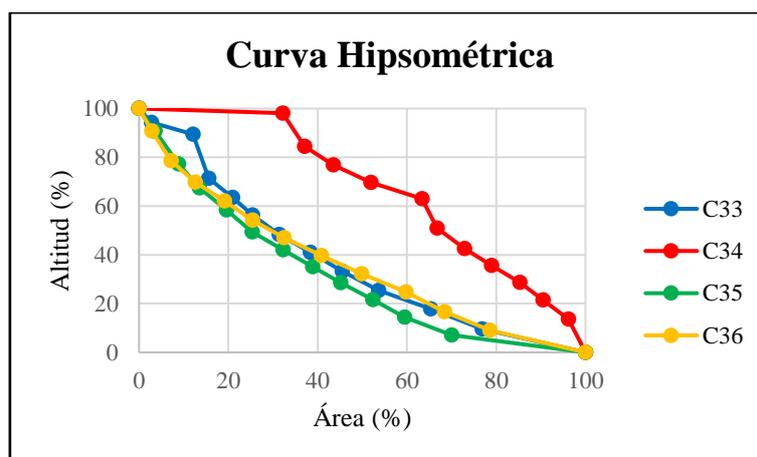


Figura 8.15. Curvas hipsométricas de las cuencas C33, C34, C35 y C36

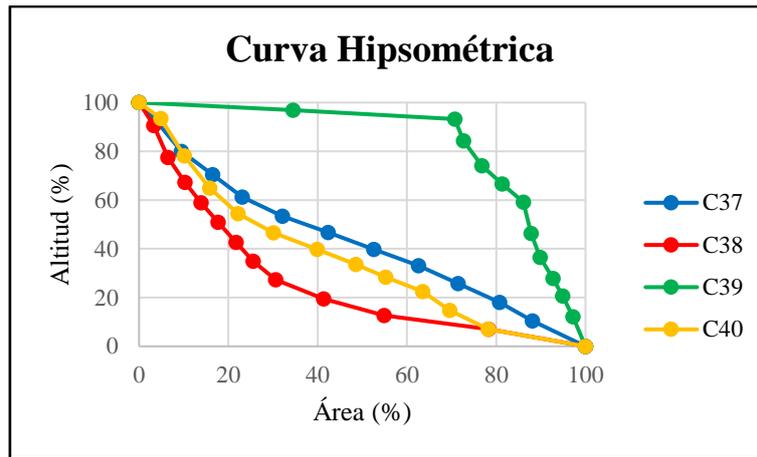


Figura 8.16. Curvas hipsométricas de las cuencas C37, C38, C39 y C40

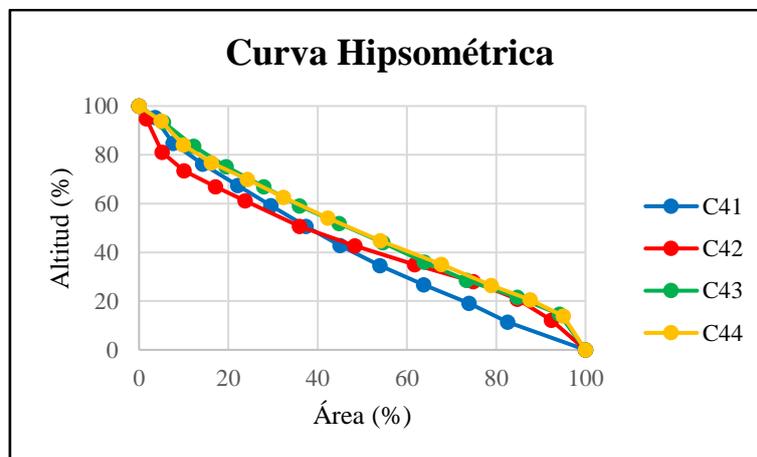


Figura 8.17. Curvas hipsométricas de las cuencas C41, C42, C43 y C44

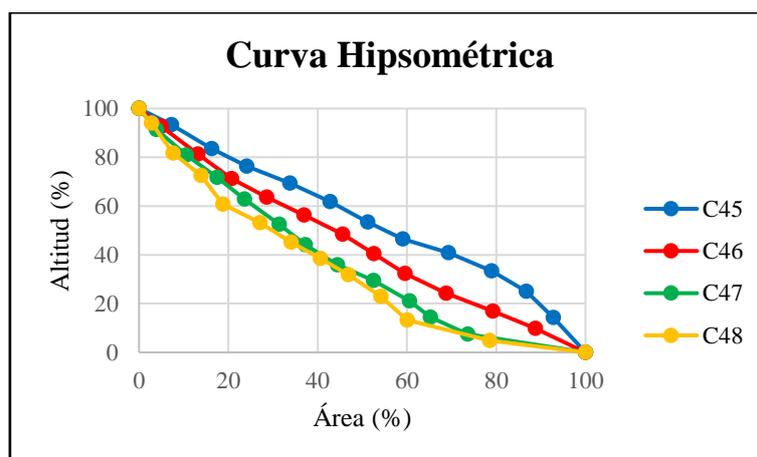


Figura 8.18. Curvas hipsométricas de las cuencas C45, C46, C47 y C48

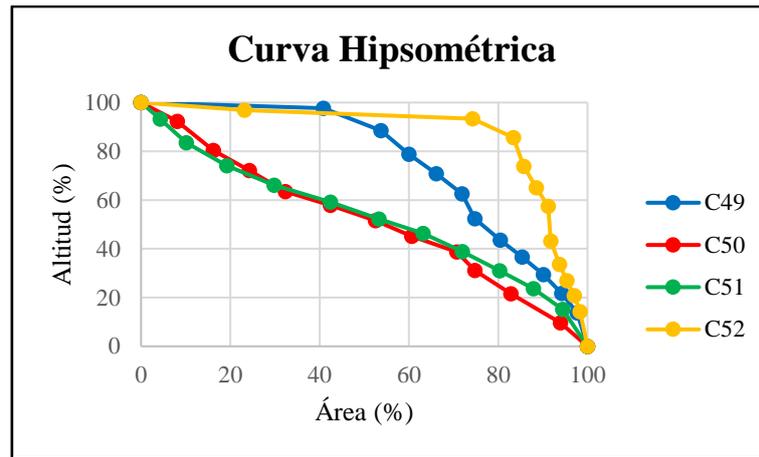


Figura 8.19. Curvas hipsométricas de las cuencas C49, C50, C51 y C52