



**Riesgo aluvional de áreas recientemente urbanizadas  
en la margen sur de la naciente del Río Negro.  
Departamento El Cuy. Provincia de Río Negro.**

**Alumno: Saavedra, Juan Martín**

**DNI: 37771099**

**Legajo: ING 3241**

**Director: Lic. Bassani, Santiago**

**Codirector: Lic. Decurgez, Diego**

**Neuquén, febrero 2023**

## **Agradecimientos**

Mi sincero agradecimiento, primeramente, a Dios por guiarme en este camino y darme la oportunidad de realizar esta hermosa carrera.

A mis padres Raúl y Cecilia por enseñarme valores y proporcionarme los recursos para lograr cumplir este sueño.

A mi hermana por sus consejos y apoyo constante.

A mi familia, en especial a mi tía Rebeca y mi abuela Lucy, que me ayudaron con su aliento y oraciones.

A mis geoamigos y amigos de la vida, por su acompañamiento en esta gran etapa.

A la Universidad Nacional del Comahue, y a los maravillosos profesionales que tuve el privilegio de conocer.

A mis directores de tesis, Santiago Bassani y Diego Decurgez por su gran ayuda a lo largo de esta última etapa. Por las salidas a la barda, videollamadas, correcciones y recomendaciones.

A Ignacio Tomasevich por tomarse el tiempo para ayudarme con el QGIS, a José Gatica por enseñarme a usar el HEC-RAS, y a Cecilia Dufilho por prestarme el infiltrómetro y transmitirme los primeros conceptos hidrogeológicos.

## Resumen

La falta de planificación del crecimiento urbano de diversas localidades ha permitido el crecimiento de asentamientos sobre sectores hidrológicamente activos, a partir de lo cual la dinámica de los aluviones y sus riesgos asociados cobra significativa importancia y debiera ser considerado por municipios y gobiernos.

En la zona del Alto Valle de Río Negro y valle Inferior de los ríos Limay y Neuquén, en los últimos años, se produjo un importante crecimiento demográfico, con lo que la ocupación de territorios no aptos se volvió una práctica habitual.

En el ejido de Cipolletti y Fernández Oro, actualmente se están ocupando tierras en la margen sur de la naciente del Río Negro. Estos loteos se encuentran al pie de las bardas<sup>1</sup>, las cuales presentan pendientes muy abruptas orientadas hacia la zona en ocupación.

Las precipitaciones torrenciales combinadas con la geología, geomorfología, suelos y cobertura vegetal presentes en el área de estudio originan caudales importantes, cuya velocidad de escurrimiento asociada a las pendientes del sector en análisis, promueve procesos erosivos significativos y posterior sedimentación de un volumen importante de detritos, así como inundaciones en las zonas topográficamente más bajas. De lo precedentemente expuesto, surge la necesidad de la realización de este Trabajo Final de Licenciatura, donde se identificaron, delimitaron y caracterizaron 10 cuencas hidrológicas que aportan caudales líquidos y arrastre de sedimentos a la zona de loteos, algunas de las cuales de acuerdo a los análisis y cálculos realizados podrían erogar caudales de hasta aproximadamente 13 m<sup>3</sup>/s para tormentas con un período de retorno de 100 años.

Mediante la simulación hidráulica bidimensional realizada con el programa HEC-RAS, se analizaron las zonas de afectación asociadas a tormentas con períodos de retorno de 5, 10, 25 y 100 años, con lo que se pudo confeccionar un mapa de peligrosidad aluvional. Este mapa se entregará a los municipios de Cipolletti y Fernández Oro, junto a algunas recomendaciones tendientes a mitigar dicha problemática y gestionar apropiadamente la ocupación de zonas con características similares.

**Palabras claves:** loteos, precipitaciones, detritos, sedimentos, erosión, inundación, simulación hidráulica, peligrosidad aluvional.

## Abstract

The effects caused by flood events in relation to demographic expansion in unauthorized areas, is a relevant issue that must be addressed by the municipalities, mainly those that have steep slopes inside their jurisdiction. In the area of the Upper Valley of Río Negro and the Lower Valley of the Limay and Neuquén rivers, in recent years, there has been significant population growth, with which the occupation of unsuitable territories has become a common practice.

In the municipal common of Cipolletti and Fernández Oro, lands are currently being occupied on the southern bank of the Río Negro course. These parcels are located at the foot of the very steep slopes that surround the area.

<sup>1</sup>Bardas: término local para referirse a las pendientes abruptas que limitan el valle y que están coronadas por una meseta.

The torrential rainfall combined with the geology, geomorphology, soils and vegetation cover present in the study area originate important flows, whose runoff speed associated with the granulometry of the sediments on the sector under analysis, results in a significative erosion processes and subsequent sedimentation of a significant volume of detrits, as well as flooding in the topographically lower areas. From the foregoing, the need arises to carry out this Final Degree Project, where 10 hydrological basins that contribute liquid flows and sediments entrainment to the parcelled area were identified, delimited and characterized, some of which according to the analyzes and calculations carried out could deliver flows of up to approximately  $13 \text{ m}^3/\text{s}$  for storms with a return period of 100 years.

Through the two-dimensional hydraulic simulation carried out with the HEC-RAS software, the affected areas associated with storms with return periods of 5, 10, 25 and 100 years were analyzed, with which it was possible to draw up a map of alluvial danger. This map will be delivered to the municipalities of Cipolletti and Fernández Oro, along with some recommendations aimed to mitigating this problem and properly managing the occupation of areas with similar characteristics.

**Keywords:** rainfall, debris, sediments, erosion, flooding, hydraulic simulation, alluvial hazard.

## Índice

1	Introducción .....	9
2	Ubicación del área de estudio.....	10
3	Descripción del área de estudio.....	12
3.1	Clima .....	12
3.2	Suelos .....	13
3.3	Vegetación.....	13
3.4	Geomorfología .....	15
3.5	Geología .....	15
4	Objetivos .....	16
4.1	Objetivo general .....	16
4.2	Objetivos específicos.....	16
5	Antecedentes .....	17
6	Problemática del área de estudio .....	20
7	Marco teórico .....	24
7.1	Definición y objetivo de la hidrología.....	24
7.2	El ciclo hidrológico .....	24
7.3	La cuenca hidrológica .....	25
7.3.1	Concepto y tipos de cuencas .....	25
7.3.2	Características principales de la cuenca hidrológica y los cauces.....	26
7.4	Precipitación.....	28
7.4.1	Concepto. Tipos. ....	28
7.4.2	Medición de la precipitación .....	28
7.5	Infiltración.....	30
7.5.1	Definición.....	30
7.5.2	Conceptos generales .....	30
7.5.3	Factores que intervienen en la capacidad de infiltración.....	31
7.5.4	Medición de la infiltración .....	31
7.5.5	Ecuación de la curva de capacidad de infiltración .....	31
7.6	Escorrentamiento .....	32

7.6.1	Definición.....	32
7.6.2	Fuentes y tipos de escurrimientos .....	32
7.6.3	Curva Número .....	33
7.7	Relación precipitación – escorrentía .....	34
7.7.1	Tiempo de concentración ( <b>T<sub>c</sub></b> ) .....	35
7.7.2	Coefficiente de escorrentía ( <b>C</b> ) .....	36
7.7.3	Método racional.....	37
7.8	Peligrosidad.....	38
8	Metodología .....	39
8.1	Estudio de imágenes satelitales .....	39
8.2	Observación y seguimiento de cauces efímeros.....	39
8.3	Elaboración del mapa de pendientes .....	39
8.4	Confección del mapa de Cobertura de Vegetación y del mapa Topográfico – Geológico - Geomorfológico .....	41
8.5	Estudio hidrológico .....	41
8.5.1	Delimitación y caracterización de cuencas hidrológicas.....	41
8.5.2	Ensayos de infiltración .....	41
8.5.3	Aplicación del modelo de Horton. ....	41
8.5.4	Elaboración del mapa de grupo hidrológico de suelo (GHS).....	42
8.5.5	Elaboración del mapa de curva número (CN) en condición de humedad II.....	42
8.5.6	Tormentas de diseño para períodos de retorno de 5, 10, 25 y 100 años.....	42
8.5.7	Determinación del coeficiente de escorrentía (C) .....	43
8.5.8	Cálculo de caudales máximos en los puntos de aforo de las cuencas .....	43
8.5.9	Modelación hidráulica bidimensional con el programa HEC-RAS .....	46
8.5.10	Análisis del comportamiento de los sedimentos utilizando la curva de Hjulström 47	
8.6	Confección del mapa de peligrosidad .....	47
9	Resultados .....	47
9.1	Mapa de Pendientes (Fig. 30).....	47
9.2	Mapa Topográfico-Geológico-Geomorfológico (Fig. 31) .....	50
9.3	Mapa de Cobertura de Vegetación (Fig. 32) .....	50
9.4	Delimitación y caracterización de las cuencas hidrológicas .....	54
9.5	Ensayos de infiltración (Horton).....	56
9.6	Mapa de Grupos Hidrológicos del Suelo (GHS).....	58



9.7	Mapa de curva número (CN).....	58
9.8	Tormentas de proyecto para períodos de retorno de 5, 10, 25 y 100 años .....	58
9.9	Determinación del coeficiente de escorrentía .....	59
9.10	Cálculo de caudales máximos en los puntos de aforo de las cuencas .....	60
9.11	Modelación hidráulica bidimensional (HEC-RAS) .....	60
9.12	Análisis del comportamiento de los sedimentos .....	61
9.13	Mapa de peligrosidad aluvional .....	61
10	Conclusiones .....	73
11	Recomendaciones.....	73
12	Bibliografía .....	76

### Índice de tablas:

Tabla 1: Cuadro con el régimen de heladas, calculado para el período 1923-1980. (EEA Alto Valle INTA).....	12
Tabla 2: Clasificación según el tamaño de la cuenca (Campos Aranda, 1998).....	26
Tabla 3: Grupos hidrológicos de suelos según las definiciones del NRCS (Natural Resources Conservation Service); modificada de López Alonso (2001).....	46
Tabla 4: Tabla de CN para zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos (para condición II de humedad y $P_0 = 0,2 * S$ , según SCS (1991), adaptada por Martínez de Azagra (1996).....	48
Tabla 5: Coeficientes de n de Manning (Ven te Chow, 2000).....	49
Tabla 6: Precipitaciones (mm) para períodos de recurrencia de 5, 10, 25 y 100 años. ....	50
Tabla 7: Parámetros morfométricos de las cuencas hidrológicas. ....	54
Tabla 8: Parámetros de las cuencas respecto a la red de drenaje.....	54
Tabla 9: Ecuación de Horton ajustada para cada ensayo de infiltración. Fo:Capacidad de infiltración inicial. fb: Capacidad de infiltración final. K: Constante de decaimiento. ....	58
Tabla 10: Intensidades máximas media ( $I_D$ ) para las duraciones D según la recurrencia estipulada.....	59
Tabla 11: Intensidades máximas media ( $I_D$ ) para las duraciones D según la recurrencia estipulada.....	59
Tabla 12: Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca según la recurrencia estipulada. ....	59
Tabla 13: Caudales obtenidos para cada cuenca según recurrencia estipulada. ....	60

### Índice de Figuras:

Figura 1: Ubicación del área de estudio. ....	10
Figura 2: Ubicación general y caminos de acceso al área de estudio.....	11
Figura 3: Clasificación textural de los suelos del Alto Valle. EEA Alto Valle INTA. (Bestvater y Casamiquela, 1983). ....	14
Figura 4: Ubicación de la Provincia Fitogeográfica del Monte. Extraído de Karlin et.al, 2017. ....	14
Figura 5: A la izquierda el esquema litoestratigráfico del Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina de Cazau & Uliana (1973), modificado según Uliana&Dellapé (1981) y Ramos (1981). A la derecha es esquema litoestratigráfico del Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina modificado por Garrido (2010) .....	16
Figura 6: Recortes de diarios de la región donde se muestran los destrozos generados por la tormenta de 1975 (Extraído de <a href="https://mas neuquen.com/1975-gran-tormenta-e-inundacion-en-neuquen-cutral-co-la-mas-afectada/">https://mas neuquen.com/1975-gran-tormenta-e-inundacion-en-neuquen-cutral-co-la-mas-afectada/</a> ). 18	
Figura 7: Destrozos producidos por los distintos aluviones generados por el paso de la tormenta “Lucrecia” en el Alto Valle, en el año 2014 (extraído de <a href="https://prensaobrera.com/ambiente/inundaciones-en-neuquen-y-rio-negro-la-culpa-no-es-de-la-lluvia/">https://prensaobrera.com/ambiente/inundaciones-en-neuquen-y-rio-negro-la-culpa-no-es-de-la-lluvia/</a> ). ....	20
Figura 8: Curvas IDF de la ciudad de Cipolletti (Extraído de Ventura, 2020). ....	21
Figura 9: Se observa el daño provocado en los caminos que cruzan cauces efímeros por la lluvia del 19 de abril del 2021. ....	21
Figura 10: Lotes disectados a causa de la tormenta.....	22
Figura 11: Piscina de fibra de vidrio destruida por los caudales generados a efectos de la tormenta. ....	22
Figura 12: Procesos de sedimentación e inundación de las zonas bajas (terrazas modernas).....	23
Figura 13: A la izquierda se observa el camino que interseca un cauce efímero, fuertemente disectado por los caudales generados en la tormenta del 19 de abril del 2021 y posteriormente (a la derecha), rellenado por sedimentos arenosos por la lluvia del 20/21 de abril.....	23
Figura 14: “Canales de guarda” rellenos con sedimentos arenosos y limo-arcillosos luego de la tormenta producida el 16 de diciembre del año 2021. ....	24
Figura 15: Esquema del ciclo hidrológico. La numeración presente en la imagen hace referencia, en unidades relativas, a un volumen de precipitación global anual de 100. (Chow et al., 1994). ....	25
Figura 16: Cuenca de tipo exorreica. En nuestra zona de estudio contamos con este tipo de cuenca hidrológica. (Extraído de Breña & Jacobo, 2006). ....	26
Figura 17: Parámetros morfométricos principales (Extraído de Aparicio, 1992). ....	27
Figura 18: esquema representativo de los distintos tipos de lluvia (extraído de Breña & Jacobo, 2006). ....	29
Figura 19: Esquema representativo de un pluviómetro (a) y de un pluviógrafo (b). (Extraído de Sánchez Román 2010). ....	29
Figura 20: Curva de capacidad de infiltración (Campos Aranda, 1988). ....	30
Figura 21: Esquema representativo de un infiltrómetro de doble anillo (Extraído de Campos Aranda, 1998).....	31
Figura 22: Hidrograma construido a partir de una precipitación constante en una cuenca impermeable (Modificado de Azagra, 2006). (S = superficie (S) o área (A)). ....	37
Figura 23: Clasificación de pendientes propuesta por la FAO (Extraído de Vargas Rojas, 2009). ....	39

<i>Figura 24: Clasificación de las amenazas o peligros como fenómenos con potencial destructivo según su origen (Extraído de Massera, 2018).</i>	40
<i>Figura 25: ubicación de transectas (Canfield).</i>	44
<i>Figura 26: infiltrómetro de doble anillo.</i>	45
<i>Figura 27: Ubicación de los 5 puntos donde se realizaron los distintos ensayos de infiltración.</i>	45
<i>Figura 28: Adaptación de la curva de Hjulström (1935). Extraído de De Jager, 2015.</i>	49
<i>Figura 29: Mapa de pendientes clasificado en 10 clases (FAO 2009).</i>	51
<i>Figura 30: Mapa Topográfico – Geológico – Geomorfológico. Se observan las curvas de nivel (con equidistancia de 5 metros), las principales geoformas y afloramientos de la Fm. Plottier presentes en el área de estudio.</i>	52
<i>Figura 31: Representación de las distintas clases de cobertura de vegetación en relación a su porcentaje de cobertura.</i>	53
<i>Figura 32: Delimitación de las cuencas hidrológicas dentro del área de estudio.</i>	55
<i>Figura 33: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en el sector de pedimentos cubiertos por depósitos modernos aluviales y coluviales.</i>	56
<i>Figura 34: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en el sector de pedimentos cubiertos por depósitos modernos aluviales y coluviales.</i>	56
<i>Figura 35: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en la zona de ladera.</i>	57
<i>Figura 36: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en las terrazas modernas.</i>	57
<i>Figura 37: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en la zona de laderas compuestas.</i>	57
<i>Figura 38: Determinación del Grupo Hidrológico del Suelo para el área de estudio.</i>	62
<i>Figura 39: Índices de Curva Número (CN) presentes en el área de estudio.</i>	63
<i>Figura 40: Altura de lámina de agua generada por una tormenta con una recurrencia de 5 años.</i>	64
<i>Figura 41: Altura de lámina de agua generada por una tormenta con una recurrencia de 10 años.</i>	65
<i>Figura 42: Altura de lámina de agua generada por una tormenta con recurrencia de 25 años.</i>	66
<i>Figura 43: Altura de lámina de agua generada por una tormenta con recurrencia de 100 años.</i>	67
<i>Figura 44: Velocidades de escurrimiento generadas por una tormenta con período de retorno de 5 años.</i>	68
<i>Figura 45: Velocidades de escurrimiento generadas por una tormenta con período de retorno de 10 años.</i>	69
<i>Figura 46: Velocidades de escurrimiento generadas por una tormenta con período de retorno de 25 años.</i>	70
<i>Figura 47: Velocidades de escurrimiento generadas por una tormenta con período de retorno de 100 años.</i>	71
<i>Figura 48: Mapa de peligrosidad aluvional del área en análisis.</i>	72
<i>Figura 49: Clasificación de las medidas paliativas que son de aplicación para mitigar el peligro aluvional (Herrero et al 2009).</i>	75
<i>Figura 50: Azudes o espigones de contención.</i>	75
<i>Figura 51: Acceso al barrio por la RP N°76 afectado por los caudales generados por la cuenca 1 en la tormenta del 19 de abril.</i>	76

## 1 Introducción

En las últimas décadas, en el Alto Valle del Río Negro, se produjo un rápido crecimiento demográfico que generó una alta demanda de tierras en loteos no autorizados por los municipios que lo integran, extendiéndose los mismos a las zonas de bardas y sectores ribereños. Recientemente, en su mayoría habitantes de las ciudades de Cipolletti y Fernández Oro, optaron por ocupar las márgenes de las nacientes del Río Negro. La primera expansión demográfica se produjo sobre la margen norte de dicho río en una zona conocida como “Isla Jordán”, perteneciente al ejido municipal de Cipolletti. A esta expansión le siguió la del municipio de Fernández Oro, que debido a que no cuenta con muchos espacios libres para urbanizar; inició la ocupación la margen Sur del Río Negro, provocando una serie de disputas en relación a la delimitación de ambos ejidos urbanos, aún no resuelto.

Actualmente se están llevando a cabo una serie de loteos en el área comprendida entre el puente Julio Rodolfo Salto, el cual finalizó su construcción en el año 2016, posibilitando la expansión urbana en la margen sur, y una zona conocida como “Cueva del León” que actualmente es muy concurrida con intenciones turísticas, este último año. Dichos loteos son conocidos como barrio “Río Barda” y se encuentran ubicados entre el sector superior de la meseta y las terrazas modernas del Río Negro (Fig. 1).

Geomorfológicamente, a esta zona le corresponde un ambiente de terrazas fluviales antiguas (3<sup>er</sup> nivel de terrazas de los ríos Limay y Negro, según Hugo y Leanza, 2001), pedimento de flanco y terrazas modernas labradas por el Río Negro, el cual presenta un diseño de cauce meandroso–anastomosado. El río (alóctono y regulado) se desplaza a través de mesetas áridas con un valle de ancho variable, una reducida pendiente y la existencia de numerosos brazos secundarios que se activan en oportunidad de ocurrencia de alguna crecida, producto de las erogaciones de las presas ubicadas aguas arriba en los ríos Limay y Neuquén (AIC, 2020).

La litología del sector está constituida por fangolitas rojas como el litotopo dominante, a las que se asocian subordinadamente lentes de areniscas verdosas, micáceas, de grano fino pertenecientes a la Formación Plottier (Hugo y Leanza 2001). Estos niveles sedimentarios se encuentran cubiertos por las arenas, gravas y conglomerados del 3<sup>er</sup> nivel de terrazas de los ríos Limay y Negro.

La zona en análisis presenta un clima árido a semiárido, meso termal y con lluvias deficientes durante todo el año y, en la clasificación de Koppen, la zona está dentro de la región climática Bwk: clima seco, desértico fresco (Sverre Petterssen, 1962).

En las zonas áridas y semiáridas donde los cursos secundarios no son permanentes, las crecidas causadas por lluvias torrenciales originan el desprendimiento, transporte y depositación de material aluvional, con consecuencias catastróficas en aquellas cuencas donde existen asentamientos urbanos (Rapacioli, 2008). Este tipo de clima condiciona la existencia de escasa cobertura vegetal lo cual facilita el transporte de grandes volúmenes de material durante las tormentas convectivas (Dufilho *et al.*, 2001).

Dichos eventos pudieron ser observados recientemente en la zona de estudio a causa de la tormenta ocurrida en el mes de abril del año 2021, la cual produjo el carcavamiento de caminos principales y loteos, inundaciones en los lotes ubicados topográficamente más bajos y daños en algunas de las construcciones recientemente establecidas.

De esta problemática surge la necesidad de hacer un estudio de peligrosidad aluvional a fin de contribuir a una futura gestión tendiente a mitigar los efectos que generan dichos eventos en la zona en análisis, marcando la importancia de realizar este tipo de estudios en forma previa a la concreción de futuros loteos en estos ambientes.

## 2 Ubicación del área de estudio

El área de estudio (Fig. 1) se ubica al sur de las localidades de Cipolletti y Fernández Oro, extendiéndose de oeste a este, desde la ruta provincial N°76 hasta la zona donde se encuentra, la denominada “Cueva del León”. Posee una superficie aproximada de 540 hectáreas y se puede acceder a esta a partir del puente Julio Rodolfo Salto, ubicado en la zona conocida como Isla Jordán.

Para acceder a la zona de estudio desde el ejido urbano de Cipolletti, se debe transitar en sentido Norte – Sur por la calle Julio D Salto aproximadamente 3 km, desde la intersección con la Ruta Nacional N° 22, hasta llegar a la entrada de la “Isla Jordán”. A partir de allí se debe girar a la izquierda y seguir el camino señalizado hasta cruzar el puente que conecta con la margen sur del Río Negro. Los caminos de acceso se encuentran detallados en la Figura 2.

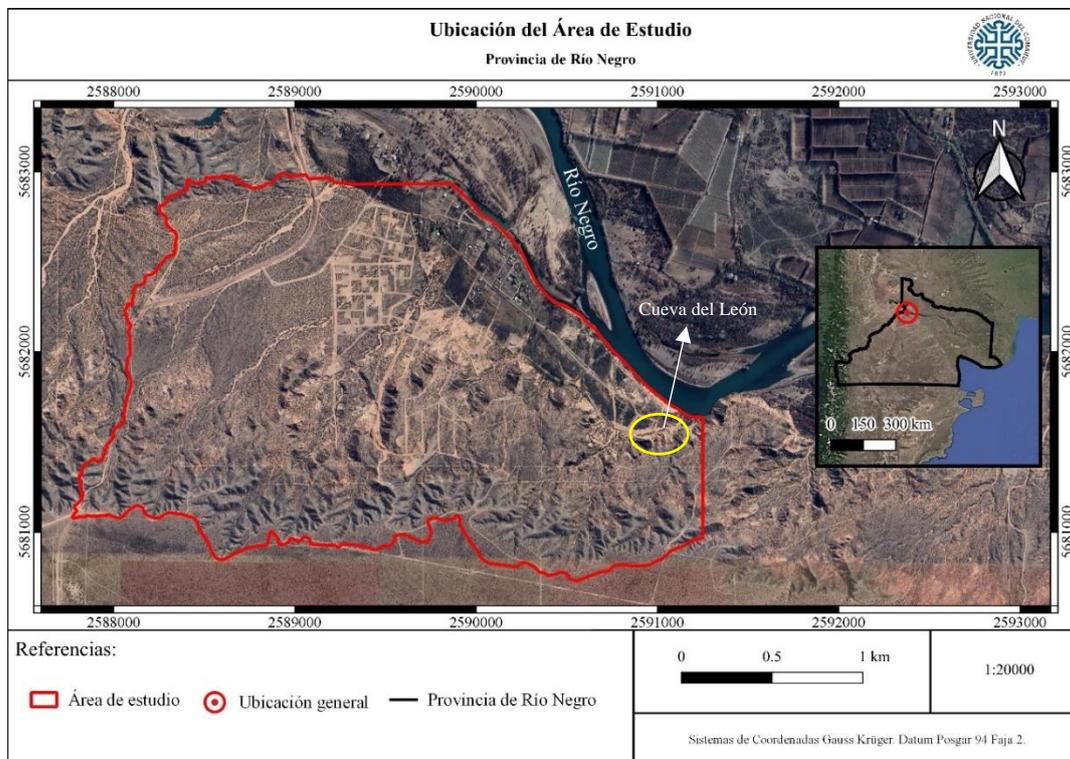


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

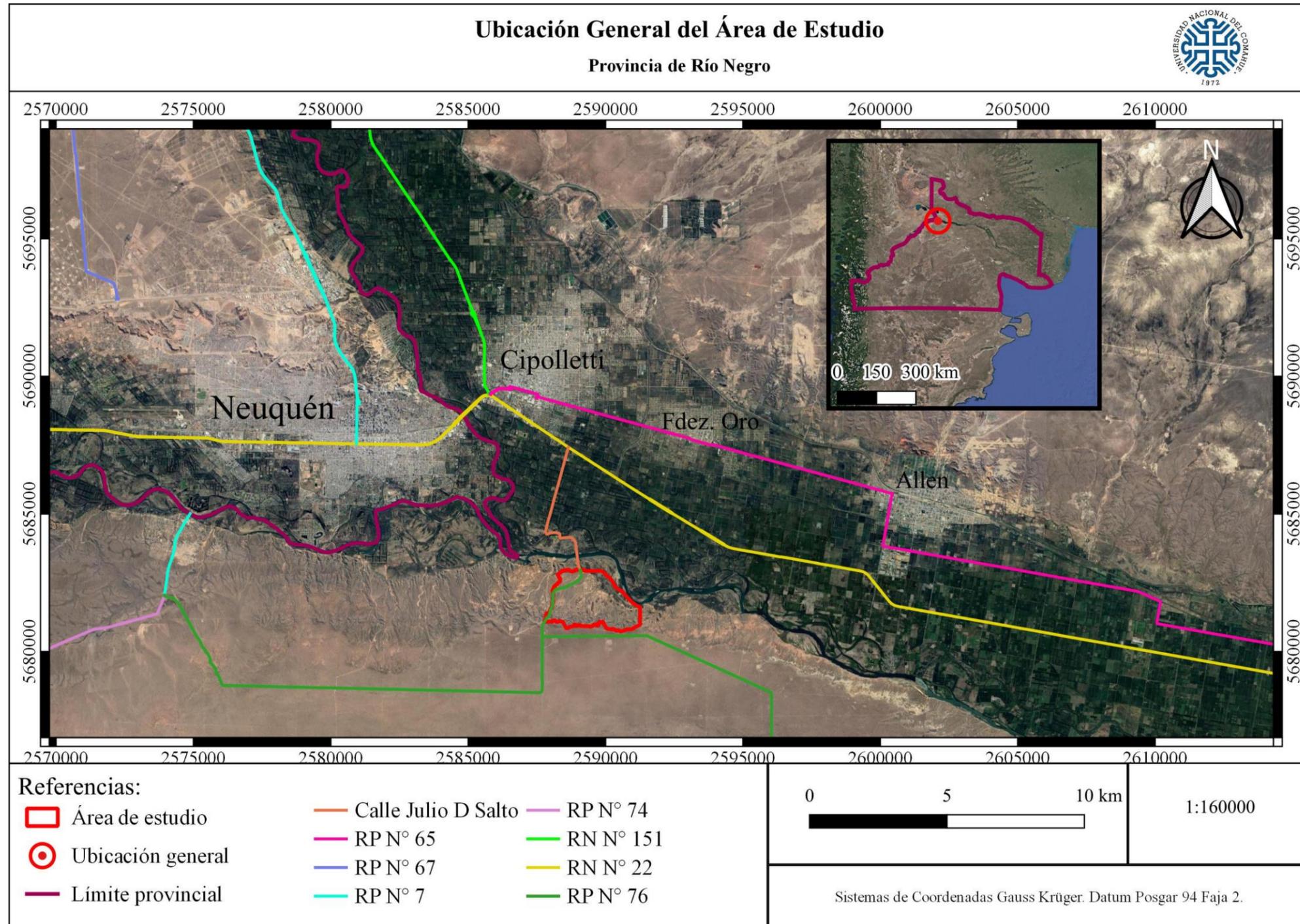


Figura 2: Ubicación general y caminos de acceso al área de estudio.

### 3 Descripción del área de estudio

#### 3.1 Clima

El sector presenta un clima árido a semiárido, mesotermal, con lluvias deficientes durante todo el año; en la clasificación de Köppen la zona está dentro de la región climática Bwk: clima seco, desértico fresco (Petterssen, 1962). Papadakis en 1980 incluye a la región en un clima mesotermal, sin exceso de agua, xerofítico seco. Según datos históricos obtenidos de la EEA Alto Valle INTA (Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), el área presenta precipitaciones medias anuales históricas de 236 mm. en la serie 1971-2009. En cuanto a la precipitación máxima diaria, existen datos registrados por las estaciones meteorológicas, cuando se produjeron los principales “aluviones” que afectaron la zona del Alto Valle. Por ejemplo, en el año 1966, el registro pluviométrico de la EEA Alto Valle INTA fue de 85 mm en aproximadamente 24 horas, y en el año 1975 se registraron 113 mm caídos en un solo día. En el caso del “aluvión” de 1999, los pluviómetros del aeropuerto de Neuquén, midieron 51 mm. en dos horas y 4 mm. más durante la noche, haciendo la salvedad que este registro fue superado en la parte alta de las “bardas”, donde pudo haber alcanzado aproximadamente los 100 mm (Chávez *et al.*, 2004). Mas recientemente, en abril del 2014 ocurrió una tormenta muy grande, en la que las precipitaciones llegaron a 200 mm. en 6 días con un pico máximo de 118 mm en aproximadamente 12 horas (Etchichury *et al.*, 2016).

Según datos de la última década, la temperatura media anual en la región del Alto Valle es de 14,2°C, siendo la máxima media anual de 21,7°C y la mínima media anual de 6,9°C. La temperatura máxima absoluta registrada es de 40,5°C y la mínima absoluta de -11,2°C (Chávez y Caba, 2004).

Una de las principales características del clima del Alto Valle es la baja presencia de nubosidad durante los meses de primavera y verano dando una radiación solar alta que junto a la elevada amplitud térmica día-noche, coloca a la región como uno de los más importantes centros productores de frutas. Sin embargo, existe un elevado riesgo de daño en la producción por heladas primaverales, consideradas como tardías (Tabla 1) (Chávez y Caba, 2004).

<b>Fecha media 1° helada</b>	<b>5 de Abril</b>
<b>Fecha media última helada</b>	<b>12 de Octubre</b>
<b>Fecha extrema de 1° helada</b>	<b>11 de Enero</b>
<b>Fecha extrema última helada</b>	<b>14 de Diciembre</b>
<b>Período medio libre de heladas</b>	<b>174 días</b>
<b>Período medio con heladas</b>	<b>191 días</b>

Tabla 1: Cuadro con el régimen de heladas, calculado para el período 1923-1980. (EEA Alto Valle INTA).

### 3.2 Suelos

Los suelos de la región del Alto Valle son típicos de desierto, clasificados como Entisoles y Aridisoles. Suelen ser pedregosos con un horizonte superficial claro y pobre en materia orgánica (epipedón ócrico) con presencia de horizontes petrocálcicos en la zona de terrazas antiguas. Los Entisoles son suelos de escaso a nulo desarrollo y por lo general no presentan otros horizontes diagnósticos. Tienen un perfil simple, poco diferenciado, A-C y suelen encontrarse en las geoformas más jóvenes o en los depósitos actuales. Los Aridisoles son los suelos de climas áridos, que presentan mayor grado de desarrollo, con diferenciación de horizontes diagnósticos como puede ser el horizonte Bt (argílico), en los Haplargides. En general son comunes en geoformas más antiguas y estables (Chávez y Caba, 2004). Ambos suelos (Entisol y Aridisol) se caracterizan por su baja meteorización y son clasificados en suelos de barda, suelos de media barda, suelos de media costa y suelos de costa (Fig. 3). Los suelos de Barda se encuentran formados por una gama de arenas en ocasiones muy gruesas y gravilosas, que se encuentran al pie de las elevaciones que bordean el Alto Valle. Los suelos de Media Barda (Fig. 3) están constituidos por texturas que van de franco-limoso hasta franco y suelen estar asociados a problemas de salinidad y alcalinidad, su productividad aparece directamente vinculada al drenaje. Los suelos de Media Costa están constituidos por texturas que van de franco-arenosa a arenosa-franca, siendo más difusa su ubicación que los dos grupos anteriores. Los suelos de Costa poseen texturas arenosas y bordean la margenes del Río Negro en una franja de ancho variable, en ocasiones interrumpidas por cauces vinculados transitoria o permanentemente con el curso principal del río. En características generales, los suelos del Alto Valle de Río Negro son de origen fluvial, de texturas no muy pesadas, entre arenosos y francos limosos, escasos en materia orgánica, con velocidad de infiltración media a alta y con un perfil profundo, sin gran desarrollo edáfico. Sin embargo, dado que posee una historia de 100 años de cultivo, los suelos de costa (Fig. 3) sufrieron cambios a nivel de composición del suelo, encontrándose por ejemplo hoy, en algunas zonas, valores de materia orgánica de 2% o más (Rodríguez y Holzman, 2017).

### 3.3 Vegetación

La flora presente en la zona de estudio pertenece a una clasificación conocida como vegetación de Monte. Las primeras definiciones de este término fueron las de Lorentz (1876) y de Holmberg (1898), cuyas diferencias en sus trabajos se fundamentan con distintos límites asociados a este tipo de flora. Un trabajo más reciente propuso una modificación a los límites esta región conocida como Provincia Fitogeográfica del Monte (Karlin *et.al*, 2017), los cuales se pueden observar en la Figura 4.

En nuestra zona de estudio, el municipio de Fernández Oro solicitó un estudio de impacto ambiental para autorizar la venta de loteos. Según dicho informe, el tipo de vegetación predominante es la estepa arbustiva alta, caracterizada mayormente por la comunidad del jarillal, una asociación de *Larrea divaricata* (Jarilla hembra), *Larrea cuneifolia* (Jarilla macho), *Larrea nitida* (Jarilla de río), *Atriplex lampa* (Zampa), *Monttea aphylla* (Matasebo), *Boungainvillea spinosa* (Monte negro) y cactáceas. Otra comunidad importante en el Monte es la que tiene-dominancia de *Prosopis flexuosa* var. *depressa* (Alpataco) o *Geoffroea decorticans* (Chañar común). Según Rapaccioli *et al.* 2010, la vegetación natural predominante son estepas arbustivas xerófilas, sammófilas o halófitas, y solamente en las márgenes de los ríos se encuentran especies hidrófilas que

originalmente formaban un bosque en galería de sauce criollo o colorado (*Salix humboldtiana*).

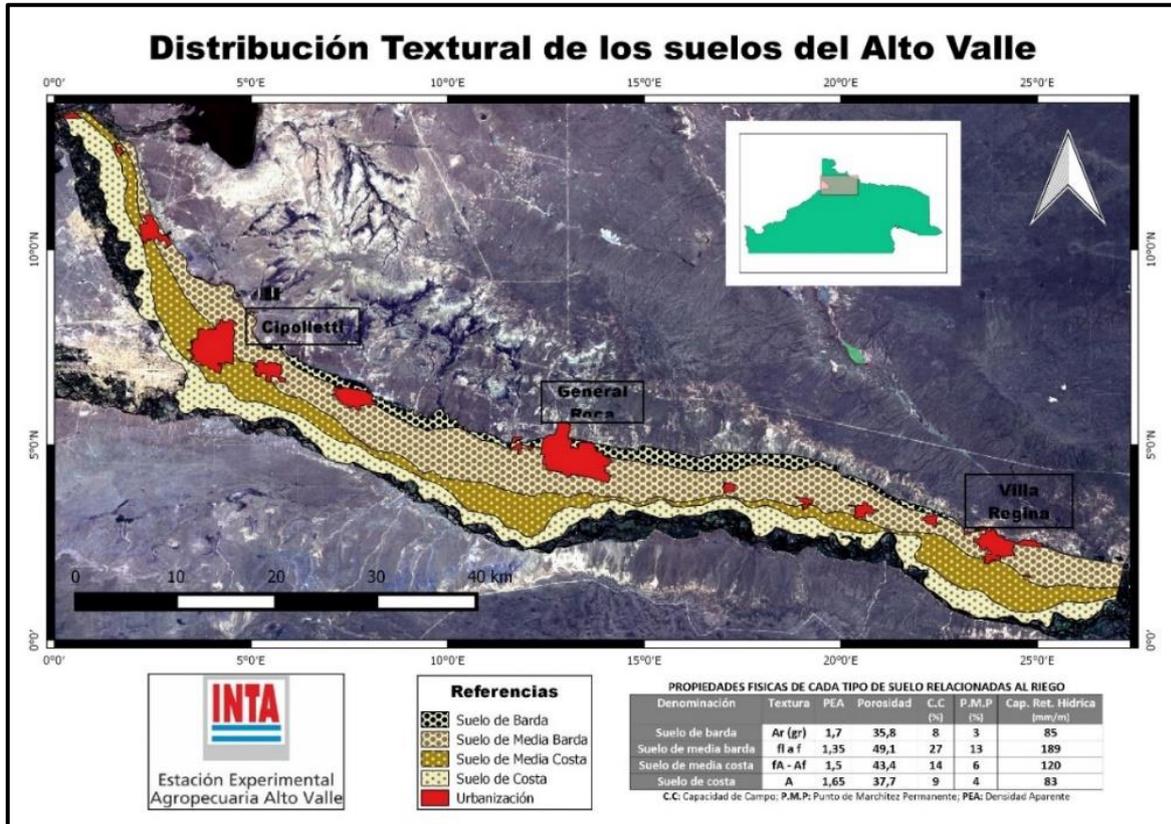


Figura 3: Clasificación textural de los suelos del Alto Valle. EEA Alto Valle INTA. (Bestvater y Casamiquela, 1983).



Figura 4: Ubicación de la Provincia Fitogeográfica del Monte. Extraído de Karlin et.al, 2017.

### 3.4 Geomorfología

Geomorfológicamente, se trata de un ambiente de terrazas fluviales antiguas (3<sup>er</sup> nivel de terrazas de los ríos Limay y Negro, según Hugo y Leanza 2001) que se presentan con diverso grado de disección, donde se evidencia desde líneas de escurrimiento hasta cárcavas y cursos aluvionales de mayor envergadura (Rapacioli *et al.*, 2010). Estas terrazas antiguas están compuestas por arenas, gravas, y niveles conglomerádicos. Disminuyendo en altitud desde las terrazas antiguas, en sentido Sur-Norte, la litología dominante corresponde a los afloramientos arenosos y fangolíticos de la Fm. Plottier. Estos afloramientos continúan hacia el norte abarcando la zona de laderas y laderas compuestas (escarpa + ladera), las cuales presentan procesos de caída de bloques producto del retroceso erosivo de la barda. En ambos márgenes del valle del Río Negro, se diferencian pedimentos de flanco, cubiertos por depósitos aluviales y coluviales modernos, los cuales están relacionados con el progresivo retroceso de las escarpas de erosión y con su pendiente general inclinándose hacia el valle (Chavez y Caba, 2004). En la zona baja, aledaña al Río Negro, se evidencian terrazas modernas caracterizadas por su cobertura arcillosa y sus pendientes casi nulas. La información provista por perforistas permite confirmar la escasa profundidad del acuífero libre asociado al Río Negro. Además, se pudo certificar que ese sector corresponde a un ambiente de terrazas modernas, debido a que las gravas, y por ende los acuíferos, se encuentran a los escasos 3 metros de profundidad en dicho sector las cuales fueron labradas por el Río Negro que presenta una forma meandrosa–anastomosada.

En algunos sectores del mapa se observan algunos elementos geomorfológicos conocidos como “Inselberg” (cerritos testigos), el cual indica el proceso de retroceso de la barda. Otros elementos geomorfológicos que se encontraron, en algunos sectores, en la zona de laderas compuestas, son los conocidos como “Badlands” (tierras malas).

### 3.5 Geología

La litología del sector se encuentra constituida por fangolitas rojas como el litotopo dominante, a las que se asocian subordinadamente a lentes de areniscas verdosas, micáceas, de grano fino pertenecientes a la Formación Plottier (Hugo y Leanza 2001). Estos niveles sedimentarios se encuentran cubiertos por las arenas, gravas y conglomerados del 3<sup>er</sup> nivel de terrazas de los ríos Limay y Negro. En algunos sectores, los cuerpos canalizados presentan bancos de areniscas cuarzolíticas de granulometría mediana con un ligero contenido de matriz fangosa, adquiriendo tonalidades rojizas. La presencia de pequeños septarios y de concreciones carbonáticas de aspecto botroidal, resulta un rasgo relativamente frecuente en esta unidad (Garrido 2010). La Formación Plottier, de edad Cenociana Tardía, pertenece al Subgrupo Río Neuquén, el cual está incluido en el Grupo Neuquén (Hugo y Leanza 2001). Este grupo constituye una secuencia litológica (Fig. 5) de aproximadamente 1.200 metros de espesor máximo (Cazau & Uliana, 1973) que está integrada por una sucesión de depósitos rojos continentales del Cretácico Superior, compuesta principalmente de areniscas, fangolitas y grauvacas con una reducida participación de horizontes conglomerádicos (Garrido, 2010) limitados en su base por la discordancia Patagónica (Keidel, 1917; Leanza, 2009)

y en su techo por la discordancia Huantráiquica (Méndez et al., 1987). Otra característica importante es que el valle del Río Negro, en la región de estudio, presenta un marcado control estructural, ya que por él pasa la falla del Río Negro (Leanza y Hugo, 1999).

Edad	Esquema litoestratigráfico vigente (*)	Esquema litoestratigráfico propuesto		
65.5 Ma	<b>Grupo Malargüe (parcial)</b>	<b>Grupo Malargüe (parcial)</b>		
Maastrichtiano				
70.6 Ma	Discordancia Huantráiquica			
Campaniano	<b>Grupo Neuquén</b> Subgrupo Río Colorado	<b>Grupo Neuquén</b> Subgrupo Río Colorado		
83.5 Ma				
Santoniano	F. Anacleto	F. Anacleto		
85.8 Ma	F. Bajo de la Carpa	F. Bajo de la Carpa		
Coniaciano	<b>Grupo Neuquén</b> Subgrupo Río Neuquén	<b>Grupo Neuquén</b> Subgrupo Río Neuquén		
88.6 Ma				
Turoniano	F. Plottier	F. Plottier		
93.6 Ma	F. Portezuelo	F. Sierra Barrosa		
Cenomaniano	<b>Grupo Neuquén</b> Subgrupo Río Limsay	<b>Grupo Neuquén</b> Subgrupo Río Limsay		
			F. Cerro Lisandro	F. Los Bastos
			F. Huincul	F. Portezuelo
99.6 Ma	F. Candeleros	F. Candeleros		
	Discordancia Miránica Principal			
	Discordancia Patagónica			

Figura 5: A la izquierda el esquema litoestratigráfico del Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina de Cazau & Uliana (1973), modificado según Uliana & Dellapé (1981) y Ramos (1981). A la derecha es esquema litoestratigráfico del Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina modificado por Garrido (2010)

## 4 Objetivos

### 4.1 Objetivo general

Se plantea como objetivo del presente Trabajo Final de Licenciatura, analizar la peligrosidad aluvional en el área de estudio, de forma de contribuir a una futura gestión tendiente a mitigar los efectos que genera esta problemática en estos ambientes tan vulnerables a dichos procesos.

### 4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar geológicamente, geomorfológicamente, y edafológicamente el área teniendo en cuenta litología, estructuras sedimentarias, factores climáticos y ambientales.

- Caracterizar hidrológicamente la zona haciendo un relevamiento de cauces efímeros y zonas de inundación por procesos aluvionales.
- Elaborar un mapa de pendientes. Esc. 1:15.000.
- Elaborar un mapa Topográfico-Geológico-Geomorfológico. Esc. 1:15.000.
- Delimitar y caracterizar las cuencas hidrológicas en área de estudio.
- Elaborar un mapa de cobertura de vegetación. Esc. 1:15.000.
- Elaborar un mapa de Grupos Hidrológicos del Suelo (GHS). Esc. 1:15.000.
- Elaborar un mapa de Curva Número (CN). Esc. 1:15.000.
- Cálculo de caudales máximos que aportan las cuencas hidrológicas debido a tormentas con distinto período de retorno.
- Realizar simulaciones hidráulicas bidimensionales en las cuencas previamente delimitadas.
- Elaborar un mapa de peligrosidad aluvional. Esc. 1:15.000.

## 5 Antecedentes

Los registros de aluviones en el Alto Valle se remontan al año **1953**, cuando según lo publicado en el Diario Río Negro: “Fuertes aluviones en General Roca”, se precipitaron 21 mm. el 22 de diciembre de ese año, dejando bajo 1 metro de agua las fincas, calles y veredas de la población de General Roca (Chávez *et al.*, 2004).

Otro aluvión importante fue el ocurrido el 29 de marzo del año **1966**, cuando se produjo una intensa precipitación que comenzó aproximadamente a las 16 horas prolongándose hasta el 30 de marzo al mediodía. La lluvia registrada por la Estación Agro-Meteorológica (INTA), alcanzó a 98,2 mm en la zona de las bardas, y el registro de precipitación en la Estación Experimental del Alto Valle, en J. J. Gómez, fue de 85 mm. En General Roca se anegaron la mayoría de las calles céntricas. Resultó destruido el puente sobre el canal matriz, en la calle Maipú, que unía la ciudad con los barrios Norte y Tiro Federal. Hubo importantes daños en viviendas del barrio Tiro Federal, resultando destruido al ceder sus cimientos el polígono de la Asociación Patriótica Tiro Federal. Se anegó completamente el barrio J. J. Gómez y se rompió un borde del canal principal. Otros barrios afectados fueron: Villa Obrera, Villa San Martín y Bagliani. Se registraron 7 personas muertas, en los distintos barrios afectados (Chavez *et al.*, 2004). Luego de este evento, se conformó una comisión vecinal en dicha ciudad con el fin de mantener latente el pedido de las soluciones oficiales y promover las actividades necesarias para acelerar el proceso de ejecución de un sistema anti-aluvional (Tapia, 2017).

El otro antecedente, la gran inundación que se produjo el 12 de marzo **1975**, producto de lluvias torrenciales extraordinarias (150 mm en 24 hs.), tuvo mayores repercusiones en la ciudad de Neuquén donde tuvieron que evacuarse 2.200 personas y una cifra similar en Río Negro (ver Figura 6). Para dar cuenta de las consecuencias encontramos que los servicios públicos, los comercios y las oficinas administrativas estuvieron paralizados durante una semana y el saldo de víctimas fatales fue de 20 personas. En la provincia del Neuquén, además de los desastres sufridos en la capital, hubo numerosos inconvenientes en Plottier, Centenario, Senillosa, Cutral Co y Plaza Huincul con pérdidas millonarias en producción e infraestructura (Etchichury *et al.*, 2016). En la ciudad de General Roca el

“aluvión” depositó en las calles un volumen aproximado de 20.000 toneladas de lodo y sedimentos, originando cuantiosos daños y pérdidas en las viviendas (Chávez *et al.*, 2004). En respuesta a este episodio, en el año 1980, la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la nación publicó un informe en el que se realizó un análisis hidrológico generalizado en un área equivalente al 32% de la Provincia de Neuquén, cuyos resultados se presentaron en forma de curvas y nomogramas, que permiten el cálculo rápido de caudales y volúmenes de crecientes para diferentes tiempos de retorno para ser usados en el dimensionado hidráulico de estructuras de desagüe en caminos y vías férreas (Fernández *et al.*, 1980). En dicho trabajo se identificaron 234 cuencas aluvionales que se clasificaron de acuerdo a su peligrosidad y se le dieron a cada una de ellas los parámetros físicos más importantes, así como los caudales y volúmenes de diseño para diferentes períodos de retorno y áreas o estructuras afectadas en caso de crecientes.



Figura 6: Recortes de diarios de la región donde se muestran los destrozos generados por la tormenta de 1975 (Extraído de <https://masneuquen.com/1975-gran-tormenta-e-inundacion-en-neuquen-cutral-co-la-mas-afectada/>).

Lässig *et al.* (1995) hacen mención de una precipitación ocurrida en la región del Alto Valle comprendida entre el 13 y 15 de marzo del año 1994. Dicho evento registró una precipitación acumulada de 91,4 mm en la localidad de Neuquén, muy similar a la que generó la tormenta de abril de 2021. En esa época las ciudades de la región no contaban con un sistema de desagües para precipitaciones de tal magnitud. Debido a esto, en la ciudad de Neuquén, 200 familias debieron ser asistidas con ropas, techo y alimentos luego de perder la mayoría de sus bienes. En 15 escuelas debieron suspenderse las clases ya que el agua caída impedía el acceso a los establecimientos. El aeropuerto neuquino quedó inoperable por algunas horas, por haberse inundado la sala de preembarque, y quemado el sistema de balizamiento. Las ciudades de Cipolletti, General Roca y Villa Regina vivieron una situación similar ya que las calles inundadas imposibilitaban el tránsito de vehículos y peatones. En Villa Regina se cayó un puente construido en un desvío de la Ruta Nacional 22, en un tramo que une esa ciudad con la localidad de General Godoy, obviamente las defensas previstas fueron derrumbadas por la torrencial lluvia. En la

ciudad de Gral. Roca, uno de los barrios más afectados, recibía agua pluvial y aguas servidas proveniente de los barrios aledaños ubicados a mayor altura. Además, hubo algunos vehículos que se hundieron en los pozos abiertos por la correntada. Otra consecuencia del temporal fue lo ocurrido en zona de chacras; cubriéndose parte de las mismas con el material sólido arrastrado desde las bardas debido al fenómeno aluvional, perjudicando de esta manera la producción.

En el mes de abril del año **2014** se produjo un evento muy significativo en la región del Alto Valle, en los márgenes de los ríos Neuquén y Limay, el cual afectó al 80% de la ciudad de Neuquén Capital. La intensidad de la lluvia llegó a 200 mm en 6 días con un pico máximo de 118 mm en aproximadamente 12 horas -entre los días 6 y 7 de abril-, un volumen casi equivalente a la media anual para la capital de la provincia. Hubo dos tipos de afectación como resultado de estas precipitaciones extraordinarias una de ellas localizada a lo largo de las escarpadas laderas de mesetas que limitan la ciudad de este a oeste a lo largo de toda su extensión. Dadas las pendientes propias de estas geoformas, se generaron enormes zanjones que destruyeron las calles trazadas a favor de la pendiente y por donde se encauzó el agua al encontrar obstruidos sus cauces naturales (Fig. 7). Esto redundó en el deterioro del tendido de los servicios básicos, e incluso las bases de muchas de las viviendas que quedaron descalzadas o fueron arrasadas por el agua. El segundo tipo de afectación está directamente relacionado a procesos de inundación, los cuales afectaron al resto de la ciudad, asentada sobre el piso del valle, donde en algunos lugares el espesor de la lámina de agua superó el metro de altura. Este proceso también provocó el desborde de los sistemas cloacales, de canales pluviales y de brazos secundarios del río Limay (Etchichury et al., 2016). Más de 1.300 personas fueron evacuadas en la ciudad de Neuquén como consecuencia de la tormenta denominada “Lucrecia” por los medios regionales. Hubo calles inundadas, barrios destrozados y pérdidas millonarias. Algunos de los barrios más afectados fueron aquellos situados al pie de la meseta, así como aquellos ubicados sobre la ruta Nacional N° 22 (Multitrocha), la cual, tal como ocurrió en 1975, funcionó como un dique al estar situada en sentido perpendicular al sentido de escurrimiento de las aguas hacia el río Limay (Etchichury et al., 2016). En la ciudad de Cipolletti, el temporal dejó a más de 2.000 personas damnificadas, entre evacuados y autoevacuados. La combinación de abundantes precipitaciones y el desborde de desagües provocó gravísimos inconvenientes en los barrios periféricos, que quedaron inundados. En algunos lugares el agua llegó a un metro de altura. También un joven se electrocutó cuando se trasladaba en bicicleta y al apoyarse en un poste de luz, sufrió una fuerte descarga (Diario La Mañana de Neuquén: “Cipolletti quedó sitiada por las intensas lluvias” 8 de abril de 2014).

Como se indicó anteriormente, la zona del alto valle sufre importantes eventos aluvionales de forma recurrente que provocan destrozos y pérdidas de vidas humanas. Otro recurso afectado por dichos episodios son los suelos, cuyo cuidado es de vital importancia para esta zona, ya que una parte importante de su economía es la actividad fruti-hortícola.



*Figura 7: Destrozos producidos por los distintos aluviones generados por el paso de la tormenta “Lucrecia” en el Alto Valle, en el año 2014 (extraído de <https://prensaobrera.com/ambiente/inundaciones-en-neuquen-y-rio-negro-la-culpa-no-es-de-la-lluvia/>).*

En el año 2008, los autores Marta S. Marizza y Raúl Rapacioli, publicaron un trabajo en el cual se desarrolló una metodología para predecir la escorrentía y la degradación de los suelos de las cuencas aluvionales en el alto valle de Río Negro. En el año 2010, Marta S. Marizza, Raúl Rapacioli y Luis Vives publicaron un nuevo trabajo, en el que se presenta un diagnóstico inicial de la degradación de suelos, a partir de la vinculación de un modelo de pérdida de suelo y un modelo lluvia escorrentía, utilizando técnicas SIG. Estos autores hicieron énfasis en las precipitaciones intensas que aportan el 50% o más de la lluvia anual, originando crecidas aluvionales que se desplazan hacia las zonas bajas, donde generalmente se encuentran núcleos urbanos, produciendo su anegamiento y resultando afectados y/o destruidos puentes, caminos y rutas, tal como sucedió el pasado 19, 20 y 21 de abril del año 2021 en nuestra zona de estudio que con aproximadamente 10 horas de precipitación total alcanzó poco más de la mitad del promedio de las precipitaciones anuales (106,5 mm).

## **6 Problemática del área de estudio**

El día 19 de abril de 2021 a las 21:35 se produjo una tormenta con una duración de 40 minutos, donde se registró una precipitación de 26,5 mm. (Estación Meteorológica Cipolletti). Recurriendo a un gráfico de curvas IDF<sup>2</sup> propuesto para la ciudad de Cipolletti (Fig.8) se determinó que dicha tormenta corresponde a una recurrencia de 25 años. Este evento causó graves daños en el área de estudio, como disección e interrupción de caminos (Fig. 9), carcavamiento en loteos (Fig. 10) y algunos daños materiales como la destrucción de una piscina de fibra de vidrio (Fig. 11) instalada en un loteo ubicado sobre las terrazas modernas. También produjo inundaciones en las zonas bajas.

<sup>2</sup>Las curvas IDF (Intensidad–Duración–Frecuencia) son un elemento de diseño que relacionan la intensidad de lluvia, la duración de la misma y la frecuencia con que se puede presentar, es decir su probabilidad de ocurrencia o el período de retorno.

Al día siguiente se produjo un nuevo evento donde precipitaron 90 mm. pero en el lapso de aproximadamente 10 horas. En este suceso no dominaron los procesos erosivos, pero si los procesos de sedimentación e inundación en las partes bajas (Fig. 11). Un claro ejemplo de la fuerte sedimentación que se produce en la zona, como consecuencia de fuertes tormentas, se detalla en la Figura 12, donde se observa un camino fuertemente disectado por la activación de un cauce efímero en el episodio del 19 de abril. En este punto con la lluvia del 20/21 de abril depositó aproximadamente 1 metro de sedimentos arenosos.

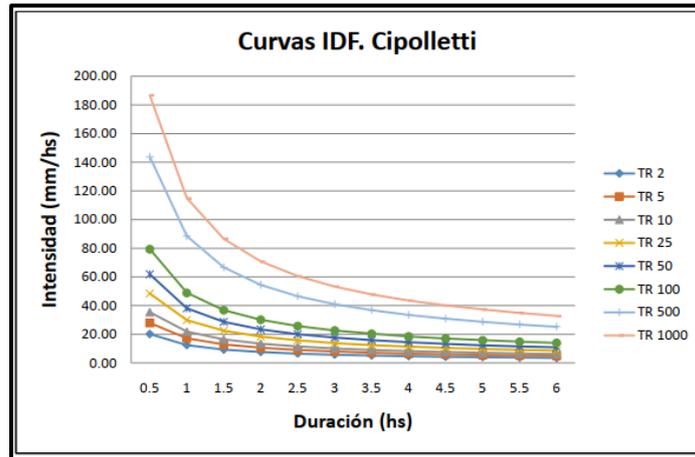


Figura 8: Curvas IDF de la ciudad de Cipolletti (Extraído de Ventura, 2020).



Figura 9: Se observa el daño provocado en los caminos que cruzan cauces efímeros por la lluvia del 19 de abril del 2021.



*Figura 10: Lotes disectados a causa de la tormenta*



*Figura 11: Piscina de fibra de vidrio destruida por los caudales generados a efectos de la tormenta.*

En respuesta a lo acontecido en dichas fechas se iniciaron obras en el barrio “Río Barda” para reacondicionar los caminos afectados. También se realizaron “canales de guarda” de entre 1 y 2 metros de profundidad por aproximadamente 2 a 3 metros de ancho, paralelos a un camino intersectado por cauces efímeros.

El 16 de diciembre del mismo año ocurrió un nuevo evento, asociado a una tormenta de menor magnitud, con una recurrencia estimada de 10 años. Este evento también tuvo efectos negativos en el barrio a pesar de la construcción de “canales de guarda” los cuales, debido a la carga sedimentaria, se colmataron de sedimentos arenosos y limo-arcillosos (Fig. 14) resultando ser una acción de nula utilidad para la problemática presente en la zona en análisis.



*Figura 12: Procesos de sedimentación e inundación de las zonas bajas (terrazas modernas).*



*Figura 13: A la izquierda se observa el camino que intersecta un cauce efímero, fuertemente disectado por los caudales generados en la tormenta del 19 de abril del 2021 y posteriormente (a la derecha), rellenado por sedimentos arenosos por la lluvia del 20/21 de abril.*



Figura 14: “Canales de guarda” rellenos con sedimentos arenosos y limo-arcillosos luego de la tormenta producida el 16 de diciembre del año 2021.

## 7 Marco teórico

### 7.1 Definición y objetivo de la hidrología

Una de las definiciones más completas de hidrogeología es la propuesta por Aparicio Mijares en 1992, en donde la plantea como una ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”.

### 7.2 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. Este se produce en un espacio llamado hidrósfera, que se extiende 15 kilómetros arriba en la atmósfera (tropósfera) hasta 1 kilómetro por debajo de la litósfera (aguas subterráneas) y unos 4 kilómetros por debajo de los océanos (Chow *et al.*, 1994). En la Figura (Fig. 15) se muestra en forma esquemática cómo el agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera 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 de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde

emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa.

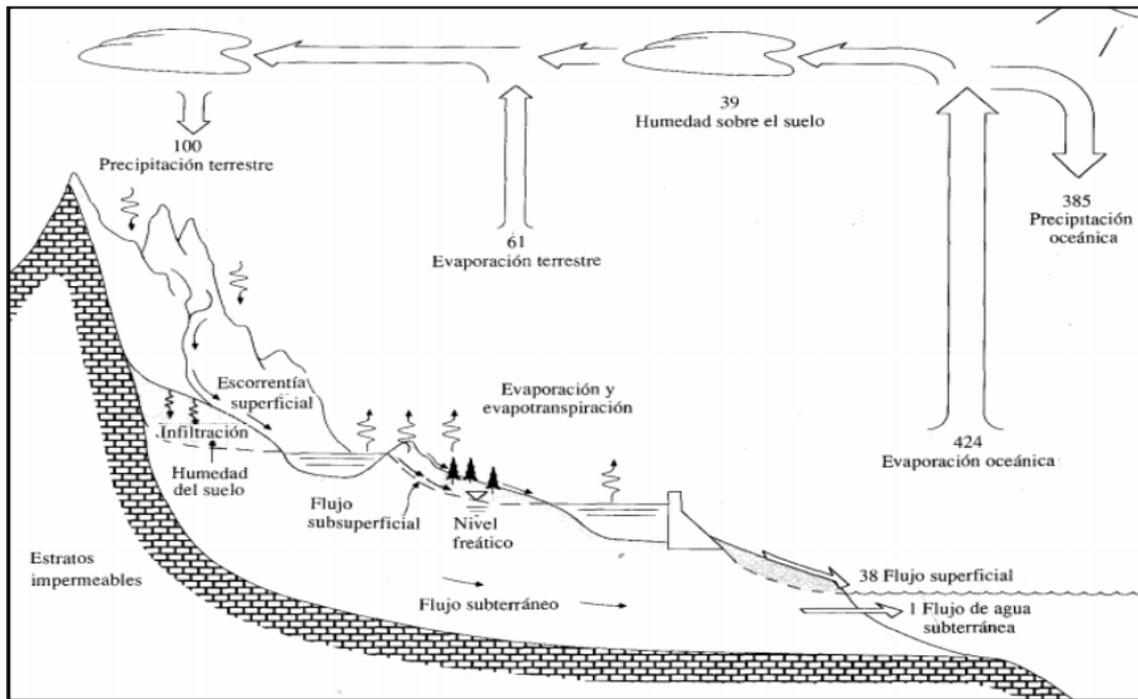


Figura 15: Esquema del ciclo hidrológico. La numeración presente en la imagen hace referencia, en unidades relativas, a un volumen de precipitación global anual de 100. (Chow et al., 1994).

## 7.3 La cuenca hidrológica

### 7.3.1 Concepto y tipos de cuencas

Es la unidad básica de estudio del ciclo hidrológico. Es aquella superficie en la cual el agua precipitada se transfiere a las partes topográficas bajas por medio del sistema de drenaje, concentrándose generalmente en un colector que descarga a otras cuencas aledañas, o finalmente al océano. La cuenca hidrológica, junto con los acuíferos, son las unidades fundamentales de la hidrología (Breña & Jacobo, 2006)

Desde el punto de vista de su salida existen dos tipos de cuencas: endorreicas (cerradas) y exorreicas (abiertas).

- En el primer tipo, el punto de salida se ubica dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago o una laguna efímera.
- En el segundo tipo, el punto de salida se localiza en los límites de la cuenca y a su vez la descarga se vierte en una corriente o en el mar, tal como se observa en la Figura (Fig. 16).

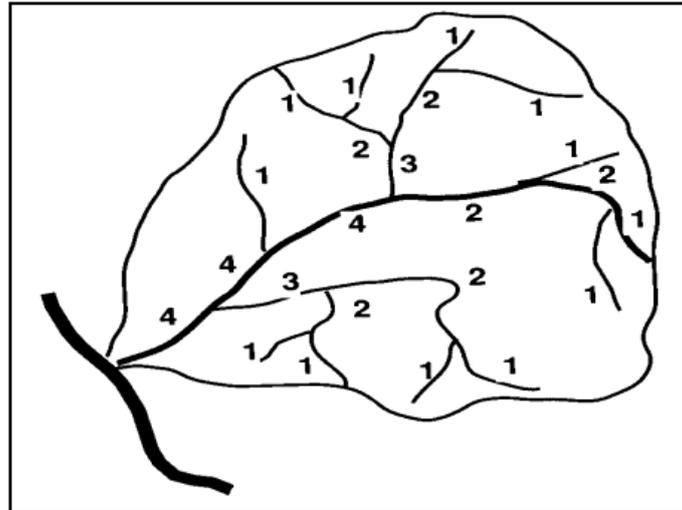


Figura 16: Cuenca de tipo exorreica. En nuestra zona de estudio contamos con este tipo de cuenca hidrológica. (Extraído de Breña & Jacobo, 2006).

### 7.3.2 Características principales de la cuenca hidrológica y los cauces

El ciclo hidrológico visto al nivel de una cuenca se puede esquematizar como un estímulo constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren dentro de la cuenca varios fenómenos que modifican esta última. Estos fenómenos en gran parte están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca. Los parámetros morfométricos intentan reflejar dichas características y sus influencias en la respuesta ante las precipitaciones. (Gámez Morales, 2010).

Los parámetros morfométricos de mayor importancia se presentan a continuación:

**Parteaguas o divisoria de aguas:** Línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa dos cuencas adyacentes.

**Área de la cuenca (A):** Es la proyección de la divisoria de aguas a un plano horizontal, caracterizándose así el tamaño de la cuenca. El valor del área se obtiene de los mapas topográficos a través del uso del planímetro o de otros métodos. Generalmente se expresa en kilómetros cuadrados ( $Km^2$ ) o en hectáreas (Ha) si la cuenca es pequeña. Con fines prácticos se propone la clasificación de las cuencas indicada en la Tabla 2, en base a su magnitud. (Campos Aranda, 1998).

Tamaño de la cuenca ( $km^2$ )	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Pequeña - Intermedia
500 a 2500	Intermedia - Grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Tabla 2: Clasificación según el tamaño de la cuenca (Campos Aranda, 1998).

**Perímetro de cuenca (P):** Es la longitud total de la divisoria de aguas.

**Índice de compacidad o de Gravelius (Kg):** La forma de la cuenca influye directamente en los escurrimientos que se producen. 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 hasta dicha sección) será mayor que en las cuencas alargadas, en las cuales las gotas de aguas llegan antes al cauce principal, por ende, salen antes (Azagra & Navarro, 1996). Esta característica se representa con el índice de Gravelius, que se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el de un círculo con igual área que la cuenca.

Sea: P = perímetro de la cuenca

A = área de la cuenca

Entonces:

$$Kg \text{ (Indice de Gravelius)} = 0,28 \times \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$$

Si:

$1 \leq Kg < 1,25 =$  cuencas redondas

$1,25 \leq Kg < 1,50 =$  cuencas ovaladas

$1,50 \leq Kg < 1,75 =$  cuencas oblongas

**Corriente principal:** Es la corriente de mayor longitud que pasa por la salida de la cuenca hidrológica.

**Corrientes tributarias:** Serie de corrientes tributarias que aportan a un cauce principal, con un diferente grado de bifurcación.

Estos últimos 4 parámetros morfométricos se representan en la Figura 17.

**Pendiente del cauce principal (J):** Es la relación entre la diferencia de alturas existente entre los 2 extremos del cauce principal y la longitud del mismo (L).

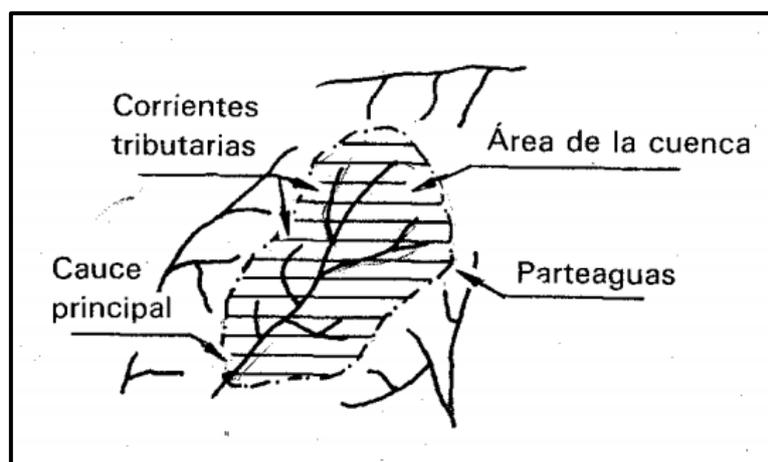


Figura 17: Parámetros morfométricos principales (Extraído de Aparicio, 1992).

## 7.4 Precipitación

### 7.4.1 Concepto. Tipos.

Precipitación es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye básicamente: lluvia, nieve y granizo (también rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total) (Sánchez Román, 2010).

En relación a su origen, pueden distinguirse los siguientes tipos (Fig. 18):

- Orográficas: se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa.
- Ciclónicas: son provocadas por los frentes asociados a una borrasca o ciclón. La mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca se debe a este tipo de precipitaciones.
- Convectivas: Se producen por el ascenso de bolsas de aire caliente; son las tormentas de verano.

### 7.4.2 Medición de la precipitación

Podemos cuantificar las precipitaciones caídas en un punto mediante cualquier recipiente de paredes rectas, midiendo después la lámina de agua recogida. La unidad de medida es el milímetro. Para facilitar y aumentar la precisión ( $\pm 0,1$  mm) de la lectura del agua caída precisamos de un pluviómetro (Fig. 19), el cual recoge el agua en una bureta de sección menor a la de la boca del pluviómetro. Dicha lectura se efectúa una vez al día o en algunos casos cada 6 horas. En general, una medición al día es suficiente, pero en algunas ocasiones necesitamos un registro continuo de la precipitación. Por ejemplo, si en un día cayeron 100 mm, el aluvión que se generará será muy diferente si dicha precipitación ocurrió a lo largo del día, o si se precipitaron los 100 mm en una hora. En dicha ocasión precisaríamos de un pluviógrafo (Fig. 20), que es un instrumento que registra automáticamente la profundidad de lluvia en intervalos tan pequeños como un minuto de duración.

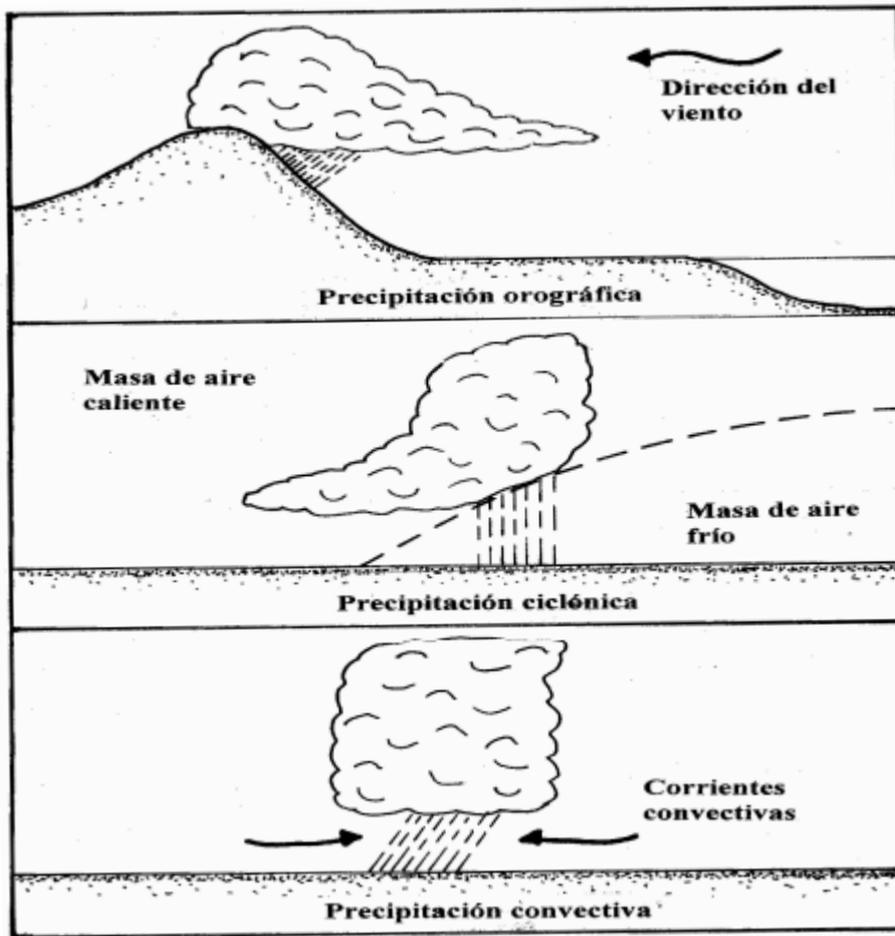


Figura 18: esquema representativo de los distintos tipos de lluvia (extraído de Breña & Jacobo, 2006).

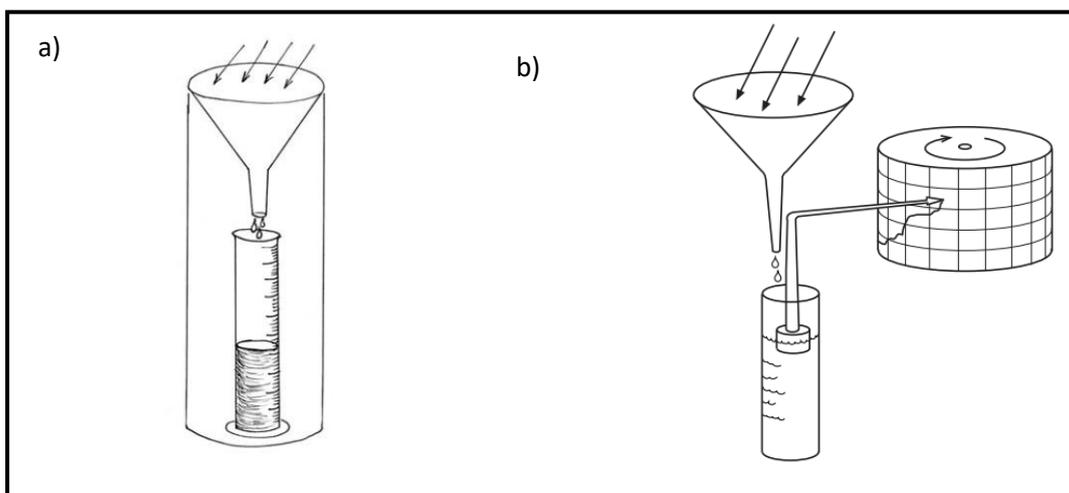


Figura 19: Esquema representativo de un pluviómetro (a) y de un pluviógrafo (b). (Extraído de Sánchez Román 2010).

## 7.5 Infiltración

### 7.5.1 Definición

La infiltración es el movimiento del agua a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Chow *et al.*, 1994). Otra definición, propuesta por Salas *et al.*, (2014), nos dice que la infiltración es el proceso por el cual el agua ingresa en el suelo a través de la superficie terrestre. Dicho parámetro presenta un valor inicial alto, el cual disminuye durante las lluvias continuas, hacia una magnitud reducida y prácticamente constante, como se indica en la siguiente figura:

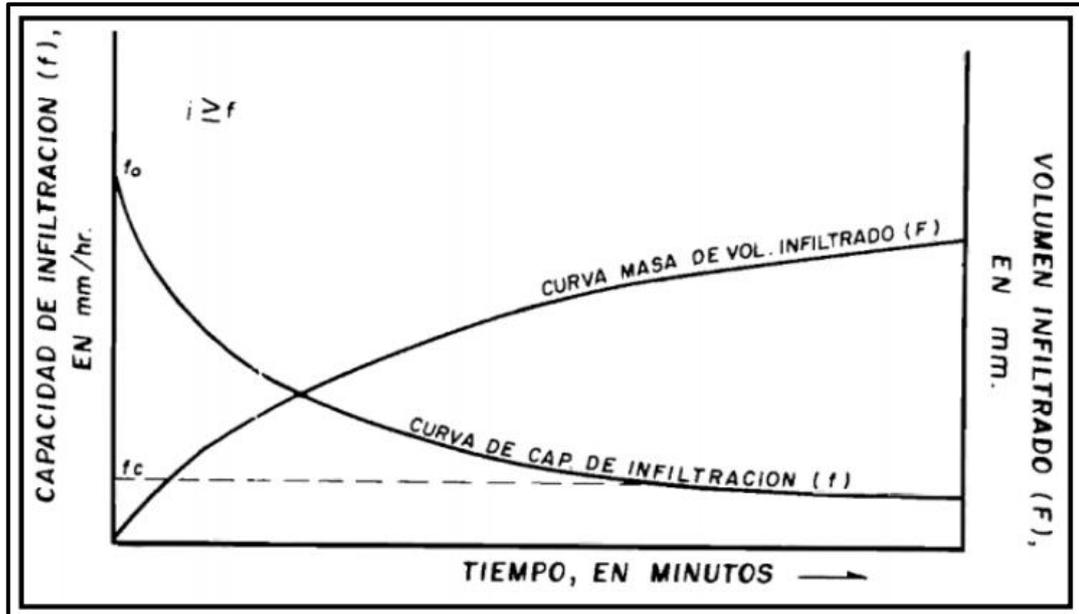


Figura 20: Curva de capacidad de infiltración (Campos Aranda, 1988).

### 7.5.2 Conceptos generales

**Tasa de infiltración:** Cantidad de agua que pasa a través del perfil del suelo en un determinado instante, se suele expresar en mm/hora (Martínez de Azagra & Navarro Hevia, 1996). Las propiedades del suelo tales como la porosidad, conductividad hidráulica, y el contenido de humedad influyen directamente en la tasa de infiltración (Chow *et al.*, 1994).

**Capacidad de infiltración (f):** Es la cantidad máxima de agua que puede introducirse en un suelo por unidad de tiempo y en un instante dado (Martínez de Azagra & Navarro Hevia, 1996). Este factor depende de la naturaleza del terreno y su contenido de humedad (a mayor humedad del suelo menor capacidad de infiltración).

**Coefficiente de infiltración:** Cociente entre la intensidad de infiltración y la intensidad de la lluvia. Si es mayor o igual a la unidad, no se produce escorrentía superficial, en cambio sí es menor, se producirá encharcamiento y escorrentía superficial (Martínez de Azagra & Navarro Hevia, 1996).

**Volumen infiltrado (F):** Es el área bajo la curva de capacidad de infiltración y representa la lámina de agua infiltrada durante dicho lapso (Ventura & Ramos Williams, 2020). Se expresa en milímetros (mm.).

### 7.5.3 Factores que intervienen en la capacidad de infiltración

La forma en que ocurre el proceso de infiltración depende de un gran número de factores. Entre estos, los más destacados son: pendiente del terreno, textura del suelo, contenido de humedad inicial, contenido de humedad de saturación, cobertura vegetal, uso del suelo, aire atrapado, lavado de material fino, compactación y temperatura, sus cambios y diferencias (Ventura & Ramos Williams, 2020).

### 7.5.4 Medición de la infiltración

Actualmente, la infiltración se mide utilizando infiltrómetros o mediante el análisis de hidrogramas en cuencas pequeñas. En este trabajo, por las condiciones físicas de las cuencas, se optó por la utilización de infiltrómetros. Específicamente se utilizará el conocido como anillo doble de Horton o de anillos concéntricos.

Infiltrómetro de doble anillo o de anillos concéntricos (Fig. 21): consiste de dos cilindros (abiertos en ambos extremos) de 20 y 40 centímetros (cm) de diámetro por 15 centímetros de alto, unidos entre sí para mantenerse concéntricos al hincarlos en el suelo a una profundidad de entre 5 y 10 cm.

### 7.5.5 Ecuación de la curva de capacidad de infiltración

Se han hecho numerosos intentos por representar el proceso de infiltración con una fórmula más o menos empírica. La fórmula (Ecuación 1) más conocida y que usaremos en este trabajo es la de Horton, publicada por primera vez en 1921 por Gardner y Widstoe y años después, en 1940, y de manera aparentemente independiente, por Horton. Dicho autor redactó un postulado conocido como postulado de Horton, el cual indica que la curva que representa la capacidad de infiltración se manifiesta de esa manera, solo si la intensidad de precipitación es mayor que la capacidad de infiltración del suelo analizado. Este principio o postulado es debidamente respetado en el ensayo de infiltración de doble anillo, porque siempre hay agua en superficie que supera la capacidad de absorción que tiene el suelo en su grado máximo o potencial, cualquiera sea el tiempo que transcurre desde el inicio del ensayo.

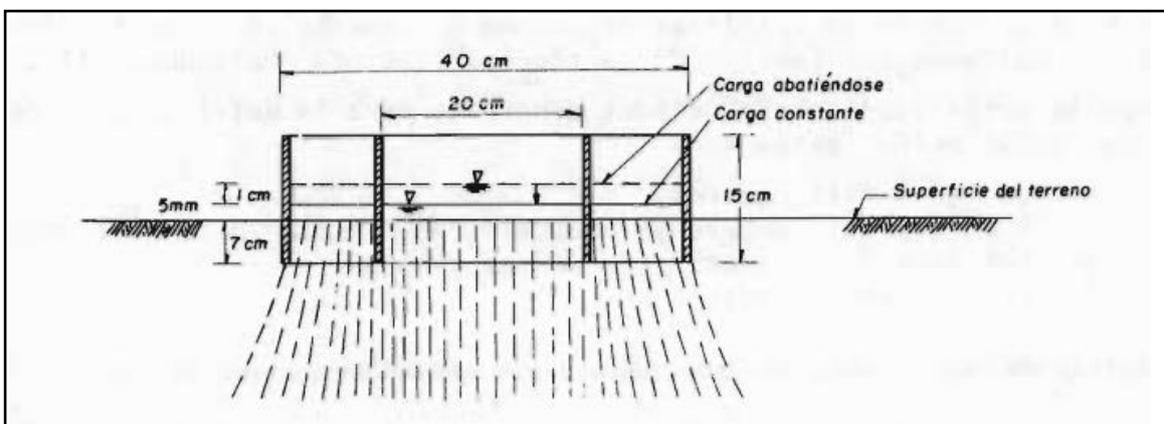


Figura 21: Esquema representativo de un infiltrómetro de doble anillo (Extraído de Campos Aranda, 1998).

*Ecuación 1: Siendo  $I > f$*

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \times e^{-k \times t}$$

Siendo:

$f$ : capacidad de infiltración en el tiempo  $\left(\frac{mm}{h}\right)$ .

$f_c$ : capacidad de infiltración final  $\left(\frac{mm}{h}\right)$ .

$f_0$ : capacidad de infiltración inicial cuando  $t = 0$   $\left(\frac{mm}{h}\right)$ .

$k$ : constante empírica  $\left(\frac{1}{min}\right)$ .

$t$ : tiempo de duración de la lluvia (min).

Transformando la ecuación de Horton en una forma logarítmica se obtiene:

*Ecuación 2:*

$$\log(f - f_c) = \log(f_0 - f_c) - k \cdot \log e \cdot t$$

Con esta fórmula, es posible graficar la infiltración (mm/h) y la infiltración acumulada (mm/h) en base a un tiempo (hs).

## 7.6 Escurrimiento

### 7.6.1 Definición

El escurrimiento 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 (Aparicio Mijares, 1992).

### 7.6.2 Fuentes y tipos de escurrimientos

Los distintos tipos de escurrimientos o escorrentías se pueden agrupar en dos grupos. El primero es en relación al camino que sigue el agua hasta alcanzar la red de drenaje y el segundo se basa en el tiempo que tarda el agua de escorrentía en alcanzar el cauce.

El primer grupo se divide en escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y escorrentía subterránea.

**Escorrentía superficial:** se produce cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo. Dicha precipitación alcanza la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno bajo la acción de la gravedad (Chow *et al.*, 1994). En este trabajo se hará énfasis en este tipo de escurrimiento.

**Escorrentía subsuperficial:** fracción de la precipitación que penetra el suelo y se mueve lateralmente por los horizontes edáficos superiores.

**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 (Chow *et al* 1994).

El segundo grupo de escurrimientos hace énfasis en el tiempo que el agua de escorrentía tarda en alcanzar el cauce, y se distingue entre escorrentía directa y escorrentía retardada.

**Escorrentía directa:** está formada por la escorrentía superficial y la que cae directamente sobre la lámina libre de los cursos de agua.

**Escorrentía retardada:** corresponde a la que alcanza los cauces fluviales al cabo de cierto tiempo, (una semana o más después del aguacero) a través de los horizontes profundos en el suelo.

### 7.6.3 Curva Número

En hidrología existen varios métodos para la estimación de la escorrentía superficial. En este trabajo nos enfocaremos en el método conocido como “Curva Número” (CN), el cual fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos en el año 1972.

El número de curva es un parámetro hidrológico que permite caracterizar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica y se determina a partir de algunas características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de las coberturas, así como por el grupo hidrológico de suelo (Carvajal y Fernández, 2017). Este parámetro se basa en el cociente entre las pérdidas reales durante el aguacero y las pérdidas máximas posibles, lo que es equivalente al cociente entre el escurrimiento superficial real y el escurrimiento superficial máximo (Ecuación 3):

*Ecuación 3:*

$$\frac{P - Es - P_0}{S} = \frac{Es}{P - P_0}$$

Siendo:

$P$  = Precipitación total.

$Es$  = Precipitación efectiva o lluvia neta (lluvia total menos la intercepción menos la retención superficial y menos la infiltración).

$P_0$  = Umbral de escorrentía (altura de la lámina de lluvia a partir de la cual se produce escorrentía).

$S$  = Retención máxima (máxima cantidad de lluvia que la cuenca puede absorber).

Después de numerosas experiencias en cuencas aforadas realizadas por el “Soil Conservation Service” (S.C.S) y agregando una serie de operaciones algebraicas, nos queda que (Ecuación 4):

*Ecuación 4:*

$$P_0 = \frac{5080 - 50,8 \times N}{N}$$

Los números de curva (CN) para diferentes grupos hidrológicos de suelo vienen tabulados, y tienen valores que van de 0 a 100, donde un CN de 100 nos indica que toda la lluvia precipitada va a escurrir y un CN de 0 todo lo contrario.

Un grupo hidrológico de suelo (GHS) es un conjunto de suelos que tienen similar comportamiento frente a la generación de escorrentía y se clasifican según las siguientes categorías:

- Grupo A: son suelos predominantemente arenosos, donde el agua se transmite libremente a través del perfil y por ende tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos.
- Grupo B: son suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas que tienen un potencial de escorrentía moderadamente bajo cuando están completamente húmedos.
- Grupo C: Son suelos con una capa que limita el movimiento vertical del agua y texturas de moderadamente finas a finas. El potencial de escorrentía es moderadamente alto cuando están húmedos.
- Grupo D: son suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas. Las texturas son arcillosas, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable.

Por otro lado, las condiciones de cobertura en una cuenca se caracterizan a través del tipo de cobertura, la densidad de la vegetación, también llamada condición hidrológica, y el tratamiento del terreno en las zonas de cultivo (Díaz Carvajal & Mercado Fernandez, 2017).

En nuestro trabajo utilizamos la curva número (CN) para la obtención del umbral de escorrentía ( $P_0$ ).

## 7.7 Relación precipitación – escorrentía

Uno de los objetivos principales de la hidrología, en especial la hidrología superficial, es conocer mediante cálculos la escorrentía que puede generar una precipitación. Estos datos son requeridos para revisar o diseñar las estructuras hidráulicas, que están localizadas en las áreas de aportación de las cuencas, con el fin de evitar pérdidas económicas y en casos extremos de vidas humanas.

Existen diversos métodos para el cálculo de la escorrentía producida por una determinada precipitación: Método Racional, Hidrogramas Sintéticos, Hidrograma Unitario, etc.

Según lo establecido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Neuquén, para áreas menores a 120 Ha se puede usar el Método Racional y para mayores a 120 Ha se debe realizar una modelación hidrológica (Modelo HMS). En este trabajo utilizamos el Método Racional debido a que las cuencas hidrológicas del área de estudio (Fig. 35) presentan áreas menores a 120 Ha.

Antes de explicar dicho método hay que conocer dos parámetros importantes que son el tiempo de concentración ( $T_c$ ) y el coeficiente de escorrentía ( $C$ ):

### 7.7.1 *Tiempo de concentración (Tc)*

El tiempo de concentración se puede definir como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la superficie de la cuenca contribuyan simultáneamente al caudal recibido en la salida de la misma (Sánchez Román, 2010). En otras palabras, es el tiempo que transcurre desde el inicio de la precipitación, hasta alcanzar el equilibrio, en el que el volumen de lluvia que entra a la cuenca por unidad de tiempo es igual que el de salida (Azagra & Navarro, 1996).

Se desarrollaron numerosas fórmulas para el cálculo aproximado de este parámetro. En este trabajo, el tiempo de concentración se evalúa por medio de tres fórmulas de acuerdo a lo requerido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Neuquén: la fórmula propuesta por la Dirección General de Carreteras (Témez), Kirpich y SCS.

Fórmula propuesta por la Dirección General de Carreteras (Ecuación 5, M.O.P.U., 1987).

*Ecuación 5:*

$$T_c = 0,3 \times \left( \frac{L}{Jc^{1/4}} \right)^{0,76}$$

Siendo:

*Tc: Tiempo de concentración (horas)*

*L: longitud del curso principal (km)*

*Jc: pendiente del curso principal (expresada en metro/metro)*

Fórmula propuesta por Kirpich (Ecuación 6, en Wanielista, 1997, modificada aquí a unidades métricas), la cual solo aplica a cuencas entre 0.5 y 45 hectáreas con cauces con pendientes entre 3 y 10%

*Ecuación 6:*

$$T_c = 3,97 \times \left( \frac{L^{0,77}}{J_{0,385}} \right)$$

Siendo:

*Tc: Tiempo de concentración (minutos)*

*L: longitud del curso principal (km)*

*J: pendiente del curso principal (m/m)*

Fórmula propuesta por el SCS: La ecuación (Ecuación 7) es desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) a partir de información de cuencas de uso agrícola. Esta aplica para cuencas con áreas menores a 50 km<sup>2</sup>

*Ecuación 7:*

$$Tc = \left( \frac{Lc^{0.8} \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{441 \cdot Jc^{0.5}} \right)$$

Siendo:

*Tc: Tiempo de concentración (minutos)*

*Lc: Longitud del curso principal*

*Jc: pendiente del curso principal (expresada en porcentaje)*

### 7.7.2 Coeficiente de escorrentía (C)

La escorrentía superficial provocada por un aguacero ( $E_s$ ) puede compararse con la precipitación caída ( $P$ ). Al cociente entre ambos valores se le denomina coeficiente de escorrentía (Ecuación 8 Azagra, 2006).

*Ecuación 8:*

$$C = \frac{E_s}{P}$$

Este coeficiente toma valores comprendidos entre cero y uno ( $0 \leq C \leq 1$ ) y se encuentra tabulado, aunque para aumentar la exactitud de este coeficiente, lo cuantificaremos con el método de curva número. Admitiendo la relación habitual  $P_0 = 0,2 \times S$ , tenemos como resultado la siguiente expresión (Ecuación 9)

*Ecuación 9:*

$$C = \frac{E_s}{P} = \frac{(P - P_0)^2}{P^2 + 4 \times P \times P_0}$$

Obteniendo los datos de CN de las tablas (ver anexo) (en condición de humedad II y admitiendo que  $P_0 = 0,2 \times S$ ) nos queda que (Ecuación 10):

*Ecuación 10:*

$$C = \frac{\left( P - \frac{5080 - 50,8 \times N}{N} \right)^2}{P^2 + P \frac{20320 - 203,2 \times N}{N}}$$

Como en nuestro caso nos interesa obtener el caudal punta, optaremos por utilizar la fórmula de MOPU 1987. La fórmula es la siguiente (Ecuación 11):

Ecuación 11:

$$C = \frac{(P - P_0) \cdot (P + 23 \cdot P_0)}{(P + 11 \cdot P_0)^2}$$

### 7.7.3 Método racional

Este método empírico es el más sencillo para evaluar el caudal producido por una precipitación. Este modelo toma en cuenta, además del área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación y es hoy en día muy utilizado, particularmente en el diseño de drenajes urbanos (Aparicio Mijares, 1992). Es generalmente usado en cuencas con áreas menores a 1 Ha.

Supongamos que una precipitación constante con una intensidad  $I$  (mm/hora) cae homogéneamente sobre una cuenca impermeable sin vegetación de área ( $S$  o  $A$ ). Al principio el caudal que sale por la vertiente de la cuenca será creciente hasta alcanzar el punto de equilibrio (Fig. 22).

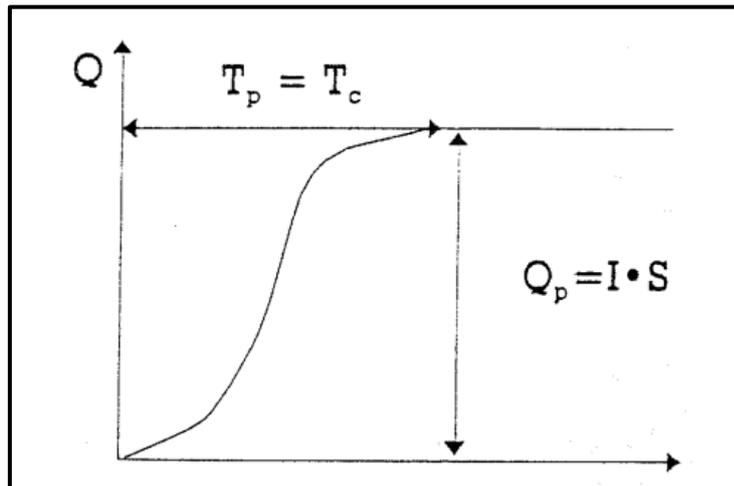


Figura 22: Hidrograma construido a partir de una precipitación constante en una cuenca impermeable (Modificado de Azagra, 2006). ( $S$  = superficie ( $S$ ) o área ( $A$ )).

La fórmula resultante en ese caso sería  $Q_p = I \times A$ , siendo  $I$  la intensidad de la lluvia y  $A$  el área de la cuenca. En el caso de que la cuenca no sea impermeable (como sucede en nuestra área de estudio) solo una parte de la lluvia producirá escorrentía. Si suponemos que una vez que se alcance el punto de equilibrio la capacidad de infiltración de nuestra cuenca no cambia, llegamos a la fórmula racional:

Ecuación 12:

$$Q_p = C \times I \times A \text{ (Azagra, 2006).}$$

Siendo:

$Q_p$  = Caudal punta (Caudal que vierte la cuenca después de alcanzar el punto de equilibrio)

$C$  = *coeficiente de escorrentía*

$I$  = *Intensidad de la precipitación*

$A$  = *Area de la cuenca*

Al añadirle el coeficiente de escorrentía a la fórmula transformamos la precipitación real en precipitación neta.

Si trabajamos con el caudal en  $m^3/s$ , la intensidad de la lluvia en  $mm/hora$  y la superficie de la cuenca en hectáreas (ha), la ecuación adopta la forma:

*Ecuación 13:*

$$Q_p \left( \frac{m^3}{s} \right) = \frac{C \times I \left( \frac{mm}{h} \right) \times A(ha)}{3,6}$$

## 7.8 Peligrosidad

Las definiciones adoptadas en el presente trabajo para el concepto de peligrosidad siguen la propuesta del I.S.D.R (*International Strategy for Disaster Reduction*) del año 2009.

Según la propuesta del I.S.D.R, una amenaza o peligro natural es un proceso o fenómeno natural que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.

Según Lavell (Lavell, 2000), existen 3 tipos de amenazas o peligros (Fig. 24):

- **Amenazas naturales:** Pueden ser de carácter geológico e hidrometeorológico, y tienen su origen en la dinámica propia del planeta Tierra, normalmente los seres humanos no intervienen en la ocurrencia de estos fenómenos, ni pueden evitar que se produzcan.
- **Amenazas socio naturales:** Se originan por la reacción de la naturaleza frente a la acción humana perjudicial para los ecosistemas, pero quienes sufren los efectos de esas reacciones, no son siempre los mismos que las han causado. Se expresan a través de los fenómenos que parecen ser producto de la dinámica de la naturaleza, pero que en su ocurrencia o en la agudización de sus efectos intervienen la acción humana.
- **Amenazas antrópicas contaminantes:** Son las atribuibles a la acción humana sobre los elementos de la naturaleza (aire, agua, tierra) o sobre la población que pone en grave peligro la integridad física o la calidad de vida de la comunidad.

Es muy importante el análisis de las amenazas, tanto para prevenirlas como para el desarrollo de una comunidad. Al respecto Cardona (2001) dice: *Evaluar la peligrosidad es “pronosticar” la ocurrencia de un fenómeno con base en el estudio de su mecanismo generador, el monitoreo del sistema perturbador y/o el registro de eventos en el tiempo.*

Según Burton (1993) y Gares (1994) las medidas que caracterizan la peligrosidad de un evento natural son: magnitud, frecuencia, duración, extensión areal, velocidad de ataque, dispersión espacial y espaciado temporal. La principal función es la de obtener información de base sobre la peligrosidad del evento, a partir de la cual sustentar el diseño de estrategias de gestión del riesgo.

A esta TFL le corresponde una combinación de Amenaza o Peligro Natural/Hidrometeorológico y Socio Natural por la construcción de obras de infraestructura sin las precauciones ambientales apropiadas (implantación de barrios en forma inadecuada).

## 8 Metodología

### 8.1 Estudio de imágenes satelitales

Observación y estudio imágenes satelitales modernas e históricas (1980 – 2022) a través del SIG (Sistema de Información Geográfica) Google Earth versión 7.3.4.8248 (64-bit). Para la elaboración de mapas, se utilizaron imágenes del mismo proveedor, pero descargadas en el programa QGIS a través del complemento *Quick Map Service*.

### 8.2 Observación y seguimiento de cauces efímeros

La observación y el seguimiento de cauces efímeros se realizó a través de un *tracker* con seguimiento GPS (*Global Positioning System*) y fotografías en formato JPG georreferenciadas, utilizando la aplicación FieldMove Clino 2.5.19 (clinómetro-brújula digital para la captura de datos en smartphones con sistema operativo Android).

### 8.3 Elaboración del mapa de pendientes

El mapa de pendientes se confeccionó con el programa QGIS versión 3.10.10 a partir de dos Modelos Digitales de Elevación (DEM) correspondiente con el área de estudio (3969-24-1-a y 3969-18-3-c). Estos archivos .TIFF se combinaron utilizando las herramientas de dicho programa y cuentan con una resolución espacial de 5 metros y fueron descargados del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La información fue proyectada al sistema de coordenadas POSGAR 94 Zona 2 para su correcto procesamiento y análisis. La clasificación utilizada para las pendientes (Fig. 24) corresponde a la propuesta por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (Vargas Rojas, 2009).

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

Figura 23: Clasificación de pendientes propuesta por la FAO (Extraído de Vargas Rojas, 2009).

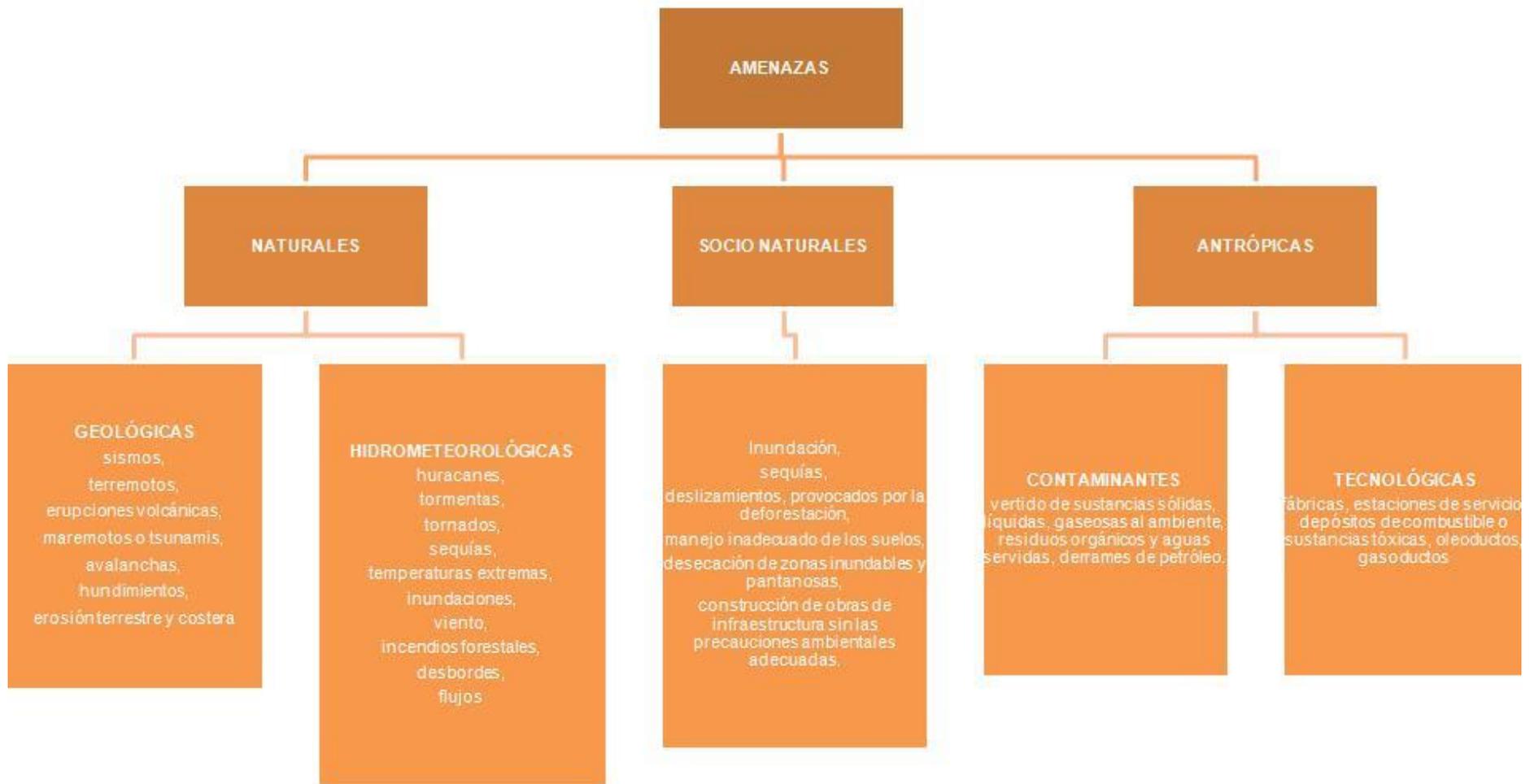


Figura 24: Clasificación de las amenazas o peligros como fenómenos con potencial destructivo según su origen (Extraído de Massera, 2018).

## **8.4 Confección del mapa de Cobertura de Vegetación y del mapa Topográfico – Geológico - Geomorfológico**

El mapa de cobertura de vegetación (Fig. 31) se realizó a través de la observación de imágenes satelitales, y datos de campo obtenidos utilizando el método de Canfield<sup>3</sup> (Fig. 25) con transectas de 20 metros de longitud en sentido norte-sur y este-oeste, con el que se obtuvieron porcentajes de cobertura de vegetación. Una vez obtenidos los datos, se digitalizaron y clasificaron las zonas con el programa QGIS, según su porcentaje de cobertura de vegetación, en vegetación muy escasa (<25%), vegetación escasa (25 a 75%), vegetación densa (75 a 90%), vegetación muy densa y vegetación arbórea (>90%). Dicha clasificación de cobertura de vegetación se realizó a criterio personal del autor de esta TFL. El mapa Topográfico – Geológico - Geomorfológico (Fig. 30) se confeccionó a partir de la Hoja Geológica 3969-IV GENERAL ROCA y de la Carta de Peligrosidad Geológica 3969-IV GENERAL ROCA, ajustando con datos de campo. También se utilizaron los datos provistos por el mapa de pendientes (Fig. 29) y se precisó generar, a partir del DEM, una capa vectorial de curvas de nivel con equidistancia de 5 metros para una mejor interpretación de la topografía de la zona en análisis.

## **8.5 Estudio hidrológico**

### **8.5.1 Delimitación y caracterización de cuencas hidrológicas**

Para la delimitación y caracterización de las propiedades principales de las cuencas se utilizó el programa QGIS, con el que a partir del DEM utilizado para la elaboración del mapa de pendientes se procedió a delimitar las cuencas en la zona de estudio y determinar sus propiedades principales (forma, área, perímetro y redes de drenaje).

### **8.5.2 Ensayos de infiltración**

Para llevar a cabo estos ensayos se utilizó un infiltrómetro de doble anillo (Fig. 26) proporcionado por la cátedra de Hidrogeología, en el cual se le introdujo agua en ambos anillos (hasta llenarlos) e inmediatamente se tomaron datos de infiltración mediante la medición del descenso del nivel de agua en función del tiempo. Los ensayos se ubicaron en 5 puntos dentro del área de estudio (Fig. 27) teniendo en cuenta las distintas coberturas encontradas (arenosas, arcillosas, pedregosas, etc.) y luego se tomaron datos de infiltración hasta llegar a la capacidad de campo, momento en el cual los descensos, en función del tiempo, se vuelven constantes.

### **8.5.3 Aplicación del modelo de Horton.**

Para representar el proceso de infiltración de forma empírica se utilizó el modelo de Horton (Horton, 1940), obteniendo la ecuación de la curva de capacidad de infiltración. Para realizar este método se utilizó el programa Microsoft Excel (versión 2021), en el que se volcaron los datos de infiltración obtenidos en campo y se procedió a calcular la ecuación de Horton (ecuación 2), que luego se expresó en forma logarítmica para graficar (utilizando la herramienta “gráfico de dispersión” del programa anteriormente mencionado), la infiltración (mm/h) y la infiltración acumulada (mm/h) en base a un tiempo (horas).

<sup>3</sup> Método o Línea de Canfield: sistema de muestreo de la vegetación, basado en la medición de todas las plantas interceptadas por un plano vertical de líneas de igual longitud que se disponen de manera aleatoria.

#### 8.5.4 *Elaboración del mapa de grupo hidrológico de suelo (GHS)*

Teniendo en cuenta la capacidad de infiltración final obtenida con los ensayos de infiltración, y haciendo uso de la tabla de grupos hidrológicos de suelo (Tabla 3), se obtuvieron los distintos grupos hidrológicos de suelo presentes en el área de estudio, los cuales fueron posteriormente digitalizados haciendo uso de imágenes satelitales obtenidas de Google Earth que fueron importadas al programa QGIS mediante el complemento *Quick Map Service*.

#### 8.5.5 *Elaboración del mapa de curva número (CN) en condición de humedad II*

El mapa de CN se confeccionó utilizando herramientas del programa QGIS relacionando los porcentajes de cobertura de vegetación y los grupos hidrológicos de suelo. Esta relación se llevó a cabo mediante la tabla de CN (Tabla 4) para zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos (para condición II de humedad y  $P_0 = 0,2 * S$ ), según SCS (1991), adaptada por Martínez de Azagra (1996). Se consideró la condición II de humedad (humedad previa normal) por conveniencia y facilidad en el cálculo y obtención de los valores de CN.

#### 8.5.6 *Tormentas de diseño para períodos de retorno de 5, 10, 25 y 100 años*

Las tormentas de diseño adoptadas se basan en el instructivo de estudios de riesgo hídrico provisto por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Neuquén. En dicho trabajo se recomienda la utilización de la siguiente ecuación para duraciones D menores a 1 hora (Cartaya)

$$\text{Ecuación 14: } I_D \left( \frac{mm}{h} \right) = \frac{P_D}{D} = 1.041 * D^{0.49} * P_{1h}$$

Donde:

$I_D$ : Intensidad máxima media para la duración D y recurrencia elegida.

D: Duración en horas (mayor a 1 hora)

$P_{1h}$ : Precipitación máxima acumulada en 1 hora y recurrencia estipulada.

$$\frac{P_{1h}}{P_{24h}} = 0.59 \text{ Para la zona aluvional de la provincia del Neuquén}$$

Para duraciones mayores a una hora se recomienda utilizar la siguiente ecuación (Método de Intensidad Contigua).

$$\text{Ecuación 15: } I_D \left( \frac{mm}{h} \right) = 13.98 * I_{24} * D^{-0.83}$$

Donde:

$I_D$ : Intensidad máxima media para la duración D y recurrencia elegida.

D: Duración en horas,  $1 < D \leq 24$  horas.

$I_{24}$ : Intensidad máxima media de la lluvia de 24 horas en mm/h, para la recurrencia estipulada.

Los datos de precipitación utilizados fueron, por su cercanía al área de estudio, los de la estación Aero Neuquén, para recurrencias de 5, 10, 25 y 100 años (Tabla 6). Dichos datos se obtuvieron del SMN (Servicio Meteorológico Nacional).

### 8.5.7 *Determinación del coeficiente de escorrentía (C)*

Para el cálculo de coeficiente de escorrentía utilizamos la ecuación (ecuación 15) de MOPU, 1987 (Azagra, 2006).

$$\text{Ecuación 16: } C = \frac{(P - P_0) \cdot (P + 23 \cdot P_0)}{(P + 11 \cdot P_0)^2}$$

Siendo:

$P = I_D$  (Intensidad máxima media para la duración  $D$  y recurrencia elegida), y

$P_0 =$  Umbral de escorrentía calculado con la ecuación 4.

### 8.5.8 *Cálculo de caudales máximos en los puntos de aforo de las cuencas*

Según el instructivo de estudios de riesgo hídrico para la provincia de Neuquén, se recomienda del método racional para cuencas con áreas menores a 120 hectáreas, por lo que se recurrió a la ecuación 16:

$$\text{Ecuación 17: } Q_p \left( \frac{m^3}{s} \right) = \frac{C \times I \times A}{3,6}$$

Siendo:

$C$ : Coeficiente de escorrentía.

$I = I_D$  : Intensidad máxima media para la duración  $D$  y recurrencia elegida.

$A$ : Area de la cuenca expresada en hectáreas (Ha).

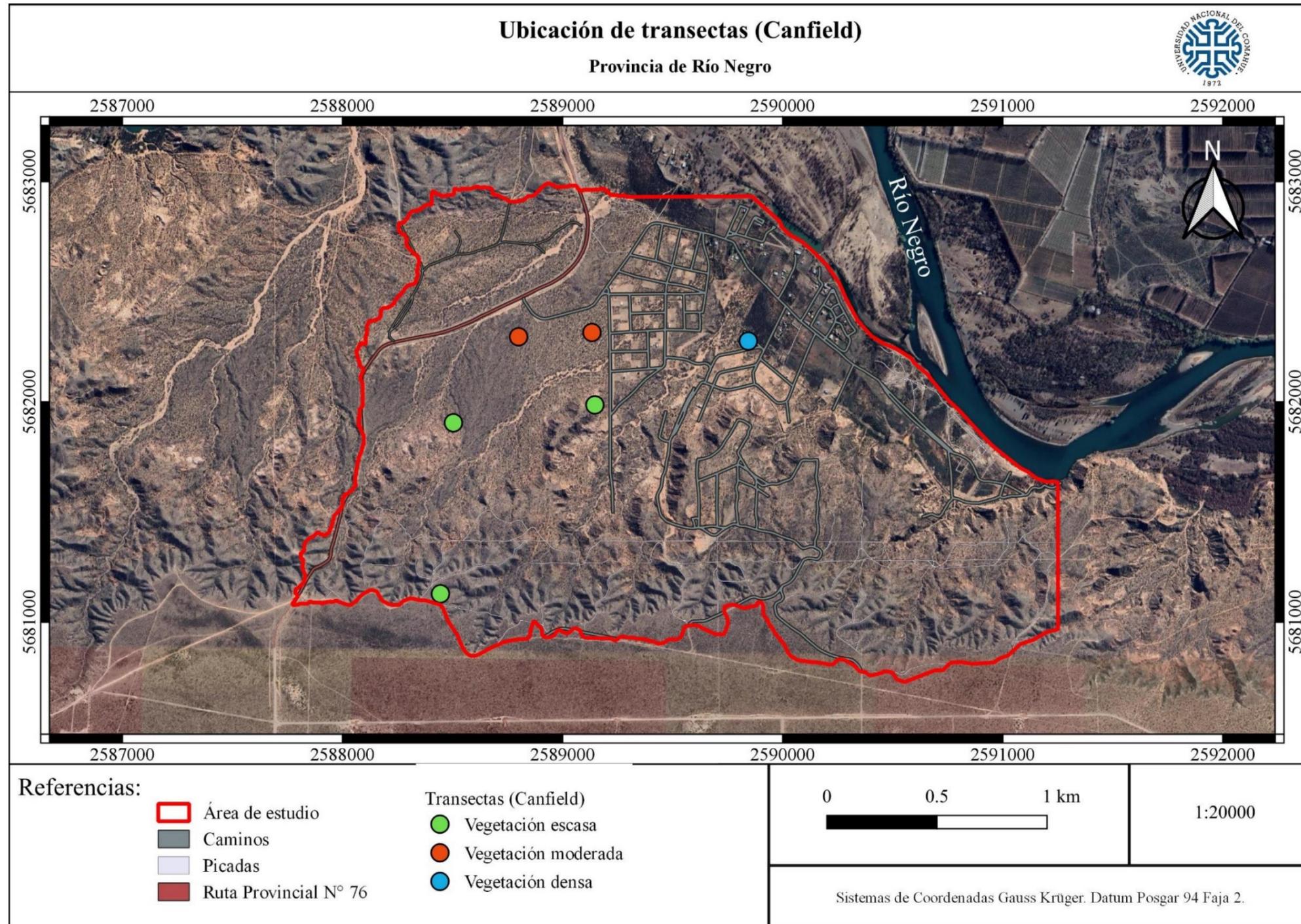


Figura 25: ubicación de transectas (Canfield).



Figura 26: infiltrómetro de doble anillo.

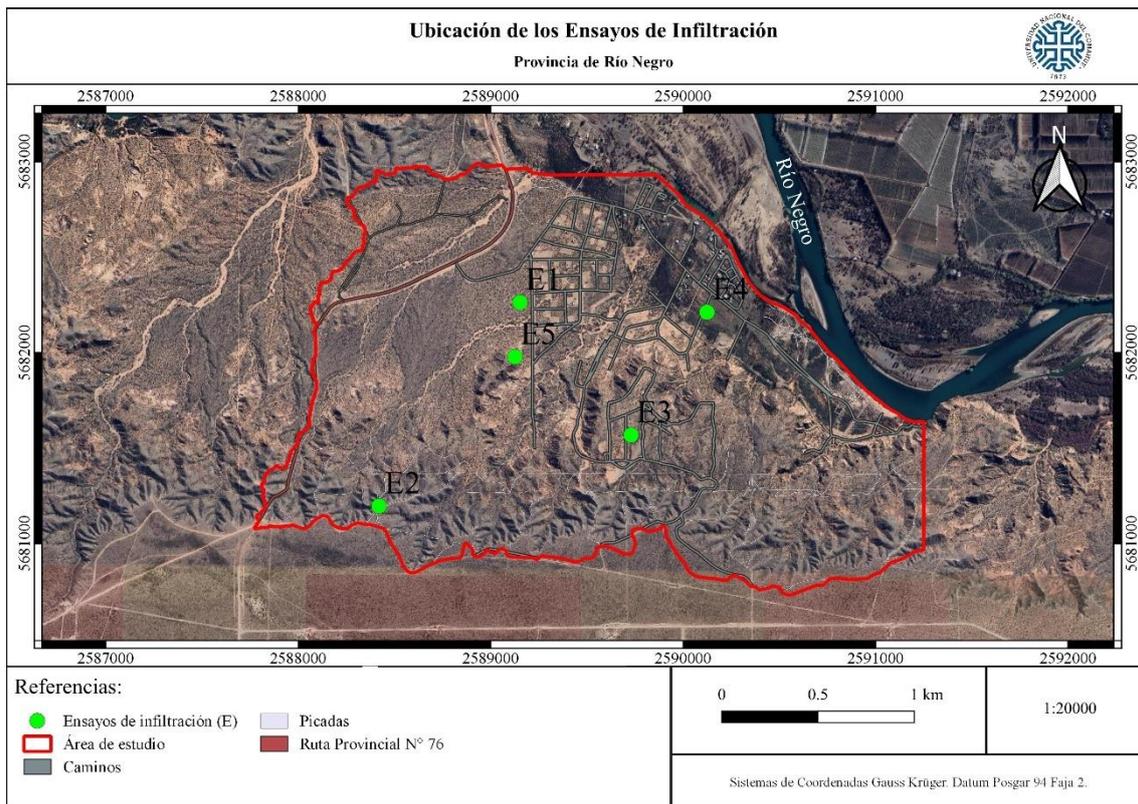


Figura 27: Ubicación de los 5 puntos donde se realizaron los distintos ensayos de infiltración.

SUELO	CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN CON HUMEDAD ELEVADA	TASA DE INFILTRACIÓN (mm·h <sup>-1</sup> )	PROFUNDIDAD	TEXTURA	DRENAJE
A	Alta	7,62-11,43	Elevada	Arenosa Areno-limosa	Muy bueno
B	Moderada	3,81-7,62	Mediana a elevada	Franca-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Escasa	1,27-3,81	Mediana a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy escasa	0-1,27	Con horizontes arcillosos. Litosuelos. Suelos con nivel freático permanentemente alto	Arenosa	Pobre o muy pobre

Tabla 3: Grupos hidrológicos de suelos según las definiciones del NRCS (Natural Resources Conservation Service); modificada de López Alonso (2001).

### 8.5.9 Modelación hidráulica bidimensional con el programa HEC-RAS

Para la determinación del manto de escorrentía generado por el comportamiento de las microcuencas se utilizó el programa HEC-RAS (USACE, 2016) versión 5.0.7. Este software libre, desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* y dependiente del *U.S Army Corp Of Engineers*, permite simular el flujo de agua combinando modelos 1D/2D, así como totalmente 2D.

El modelado 2D se generó a partir de un DEM con resolución de 5 metros correspondiente con el área de estudio (3969-24-1-a y 3969-18-3-c) obtenido del IGN y un mapa de coeficiente de rugosidad o  $n$  de *Manning*<sup>4</sup>. Este último se elaboró con el programa QGIS, donde se digitalizaron los caminos, cauces y loteos del área de estudio, discretizando los parámetros de rugosidad ( $n$ ) de *Manning*, en función de la clase textural y la geomorfología. Los valores de  $n$  de *Manning* asignados a los polígonos creados se encuentran tabulados (Tabla 5).

Para correr la simulación de manera correcta se realizó un mallado englobando las microcuencas estudiadas. La precisión y fidelidad de la información obtenida dependen mucho de este proceso, además de la cantidad de celdas que se utilicen para la corrida del modelo. En este caso, se optó por un mallado de 5 x 5 metros.

Una vez obtenida la geometría con el mallado se procedió a cargar los datos de caudales obtenidos con el método racional, para cada condición de borde. Estos datos se cargaron en la sección *Unsteady Flow Data* del programa HEC-RAS. Se utilizó la herramienta *Flow Hydrograph* empleada para modelar el flujo que ingresa al área 2D previamente delimitada. Con la herramienta *Normal Depth* se cargaron los datos de condición de borde de salida, a los cuales se estableció una pendiente de 0,01.

Con la geometría y los datos de caudales cargados se procedió a correr el modelo en HEC-RAS con la herramienta "*Unsteady Flow Análisis*". En la sección "*computation settings*" se eligieron tiempos de iteración de 0,5 segundos para el tiempo de cálculo y 1 minuto para los tiempos de salida. Estos tiempos son adecuados para un mallado de 5 x 5.

### **8.5.10 Análisis del comportamiento de los sedimentos utilizando la curva de Hjulström**

Con el fin de determinar el comportamiento de los sedimentos en el área de estudio frente a los caudales generados en las tormentas de recurrencia estipuladas, se utilizó el gráfico de Hjulström (Fig. 28) el cual, relacionando la velocidad de escorrentía de los caudales generados y la granulometría de los sedimentos, nos indica si los mismos van a presentar erosión (arranque), transporte o sedimentación.

### **8.6 Confección del mapa de peligrosidad**

Para la elaboración del mapa de peligrosidad (Fig. 48) se utilizaron los archivos *raster* generados en HEC-RAS a partir de las simulaciones realizadas con la herramienta “*Unsteady Flow Análisis*”. Las amenazas se clasificaron en muy alta, alta, media, baja y muy baja, teniendo en cuenta las probabilidades de ocurrencia de eventos aluvionales y los sectores afectados por los mismos. Se importaron los archivos raster generados con HEC-RAS en el programa QGIS y se digitalizaron posteriormente usando la herramienta de creación de polígonos, a los cuales se le asignaron las distintas peligrosidades.

A estos resultados se le añadieron zonas de peligrosidades alta y baja teniendo en cuenta la distancia a las redes de drenaje, asignándole la clasificación de peligrosidad alta a los sectores que se encuentran a menos de 5 metros de las redes de drenaje, y la clasificación de peligrosidad baja a los sectores que se encuentran a una distancia de entre 5 y 15 metros de las redes de drenaje presentes en el área de estudio.

## **9 Resultados**

### **9.1 Mapa de Pendientes (Fig. 29)**

En el sector noreste y en la parte alta de la meseta se observa un predominio de inclinaciones muy bajas, que van de la clase 1 (plano) a la clase 3 (cercano al nivel). Bajando por la parte alta de la meseta a zonas de menor altitud, se denota un marcado aumento de las inclinaciones, evidenciándose en su mayoría pendientes de clase 8 (moderadamente escarpado). Avanzando hacia el norte las pendientes disminuyen (clase 5 a 7) hasta que vuelven a aumentar abruptamente observándose las mayores inclinaciones de la zona de estudio. Las mismas van (en sentido sur-norte), de la clase 10 (muy escarpado), a clase 8 (moderadamente escarpado) en el sector central de área de estudio. Inmediatamente al norte las pendientes vuelven a presentar una disminución caracterizándose por presentar inclinaciones de clase 4 (muy ligeramente inclinado), clase 5 (ligeramente inclinado) y clase 6 (inclinado).

TIPO DE VEGETACIÓN	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	TIPO DE SUELO			
		A	B	C	D
1. Herbazal con algo de matorral	Pobre	70*	80	87	93
	Media	60*	71	81	89
	Buena	50*	62	74	85
2. "Oak brush", "aspen", "mountain mahogany", "bitter brush", "maple"	Pobre	55*	66	74	79
	Media	37*	48	57	63
	Buena	25*	30	41	48
3. "Pinyon", "juniper", o ambos, con cubierta herbácea	Pobre	60*	75	85	89
	Media	45*	58	73	80
	Buena	25*	41	61	71
4. "Sagebrush" con cubierta herbácea	Pobre	55*	67	80	85
	Media	40*	51	63	70
	Buena	25*	35	47	55
5. Matorral desértico: palo verde, mesquite, cactus, "bursage", "saltbrush", etc.	Pobre	63	77	85	88
	Media	55	72	81	86
	Buena	49	68	79	84

Especies mencionadas en la descripción del tipo de vegetación:	
<p><u>Tipo 2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Oak brush" = <i>Quercus gambelii</i></li> <li>- "Aspen" = <i>Populus tremuloides</i> y <i>P. fremontii</i></li> <li>- "Mountain mahogany" = <i>Cercocarpus ledifolius</i></li> <li>- "Bitter brush" = <i>Purshia tridentata</i></li> <li>- "Maple" = <i>Acer grandidentatum</i></li> </ul> <p><u>Tipo 3</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Pinyon" = <i>Pinus edulis</i> y <i>Pinus monophylla</i></li> <li>- "Juniper" = <i>Juniperus osteosperma</i></li> </ul>	<p><u>Tipo 4</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Sagebrush" = <i>Artemisia tridentata</i></li> </ul> <p><u>Tipo 5</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Saltbrush" = <i>Atriplex reptans</i></li> <li>- "Greasewood" = <i>Ambrosia dumosa</i></li> <li>- "Creosotebrush" = <i>Larrea tridentata</i></li> <li>- "Blackbrush" = <i>Coleogyne ramosissima</i></li> <li>- "Bursage" = <i>Bursera californica</i></li> <li>- Palo verde = <i>Cercidium americanum</i></li> <li>- Mesquite = <i>Prosopis glandulosa</i></li> <li>- Cactus = <i>Carnegiea gigantea</i>; <i>Opuntia</i> spp.</li> </ul>

<p>El significado de los adjetivos de la condición hidrológica es:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pobre.- Si menos del 30 % del suelo está cubierto por hojarasca, hierba o matorral.</li> <li>- Media.- Si la cobertura está comprendida entre el 30 y el 70 %.</li> <li>- Buena.- Si la protección vegetal del suelo es superior al 70 %.</li> </ul> <p>* Valores añadidos por Smith &amp; Maidment (1995)</p>
--

Tabla 4: Tabla de CN para zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos (para condición II de humedad y  $P_0 = 0,2$   
\* S, según SCS (1991), adaptada por Martínez de Azagra (1996).

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
<b>A Cauces naturales</b>			
<b>A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida &lt; 30 m)</b>			
<b>A.1.1 Cursos en planicies</b>			
- Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
- Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0,033	0,040	0,045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
- Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
- Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
<b>A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida</b>			
- Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
- Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
<b>A.2 Cursos en planicies inundadas</b>			
<b>A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos</b>			
- Pasto corto	0,025	0,030	0,035
- Pasto alto	0,030	0,035	0,050
<b>A.2.2 Zonas cultivadas</b>			
- Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
- Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
<b>A.2.3 Zonas arbustivas</b>			
- Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070
- Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0,035	0,050	0,060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
<b>A.2.4 Zonas arbóreas</b>			
- Saúces densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0,100	0,120	0,160
<b>A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida &gt; 30 m)</b>			
En este caso, los valores del coeficiente <i>n</i> son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
- Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

Tabla 5: Coeficientes de *n* de Manning (Ven te Chow, 2000).

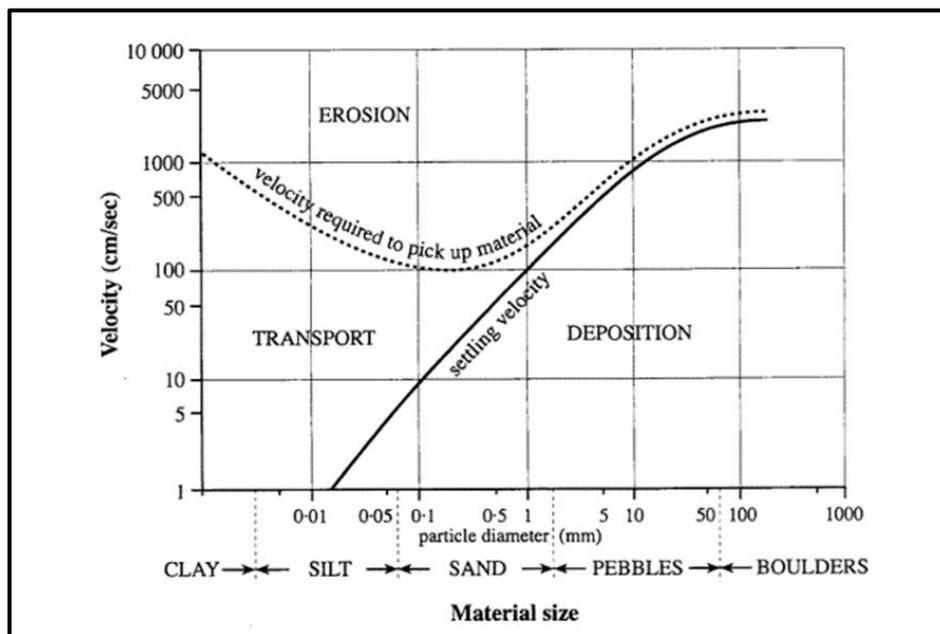


Figura 28: Adaptación de la curva de Hjulström (1935). Extraído de De Jager, 2015.

<b>Estación Aero Neuquén</b>		
Recurrencia (años)	P24h (mm)	P1h (mm)
5	57	33.63
10	74	43.66
25	100	59
100	146	86.14

Tabla 6: Precipitaciones (mm) para períodos de recurrencia de 5, 10, 25 y 100 años.

## 9.2 Mapa Topográfico-Geológico-Geomorfológico (Fig. 30)

Entre las cotas de 345 y 360 msnm. dominan las terrazas antiguas (3<sup>er</sup>. nivel de terrazas del Río Negro), las cuales continúan hacia el norte abarcando la zona de laderas y laderas compuestas (escarpa + ladera), que presentan procesos de caída de bloques producto del retroceso erosivo de la barda. Desde el pie de la ladera compuesta, hacia el norte, comienzan a predominar los pedimentos de flanco cubiertos por depósitos aluviales y coluviales modernos. Estos pedimentos cubren la superficie hasta aproximadamente los 255 msnm., donde comienza la zona de terrazas modernas, aledañas al Río Negro, caracterizadas por su cobertura arcillosa y sus pendientes casi nulas.

En algunos sectores del mapa se observan algunos elementos geomorfológicos conocidos como “Inselberg” (cerritos testigos), y “Badlands” (tierras malas), en algunos sectores de la zona de laderas compuestas.

## 9.3 Mapa de Cobertura de Vegetación (Fig. 31)

El área en análisis se caracteriza por presentar mayormente una cobertura moderada de vegetación (30 a 70%), abarcando el sector de pedimentos, la zona de laderas y el área donde se encuentran los afloramientos de la Formación (Fm.) Plottier. En el sector perteneciente a las terrazas antiguas (3<sup>er</sup>. nivel de terrazas del Río Negro), la cobertura de vegetación es escasa (entre 0 y 30%). También se observan sectores con escasa vegetación en el pie de algunas laderas. Sobre la terraza moderna del Río Negro se denotan algunos sectores con cobertura de vegetación densa (70-90%), y muy densa (>90%). Sobre la margen sur del Río Negro y de un brazo de este mismo, que se activa en épocas de crecida, se desarrolla naturalmente la vegetación arbórea (>90%), mayormente variedades de sauces y álamos. En algunos loteos de esta misma zona hay plantaciones artificiales de álamos.

Por otro lado, los sectores que presentan una nula cobertura de vegetación (suelo desnudo) están relacionados a acciones antrópicas como loteos, caminos y picadas; así como también, pero por acción natural, a redes de drenaje y a zonas de “Badlands”

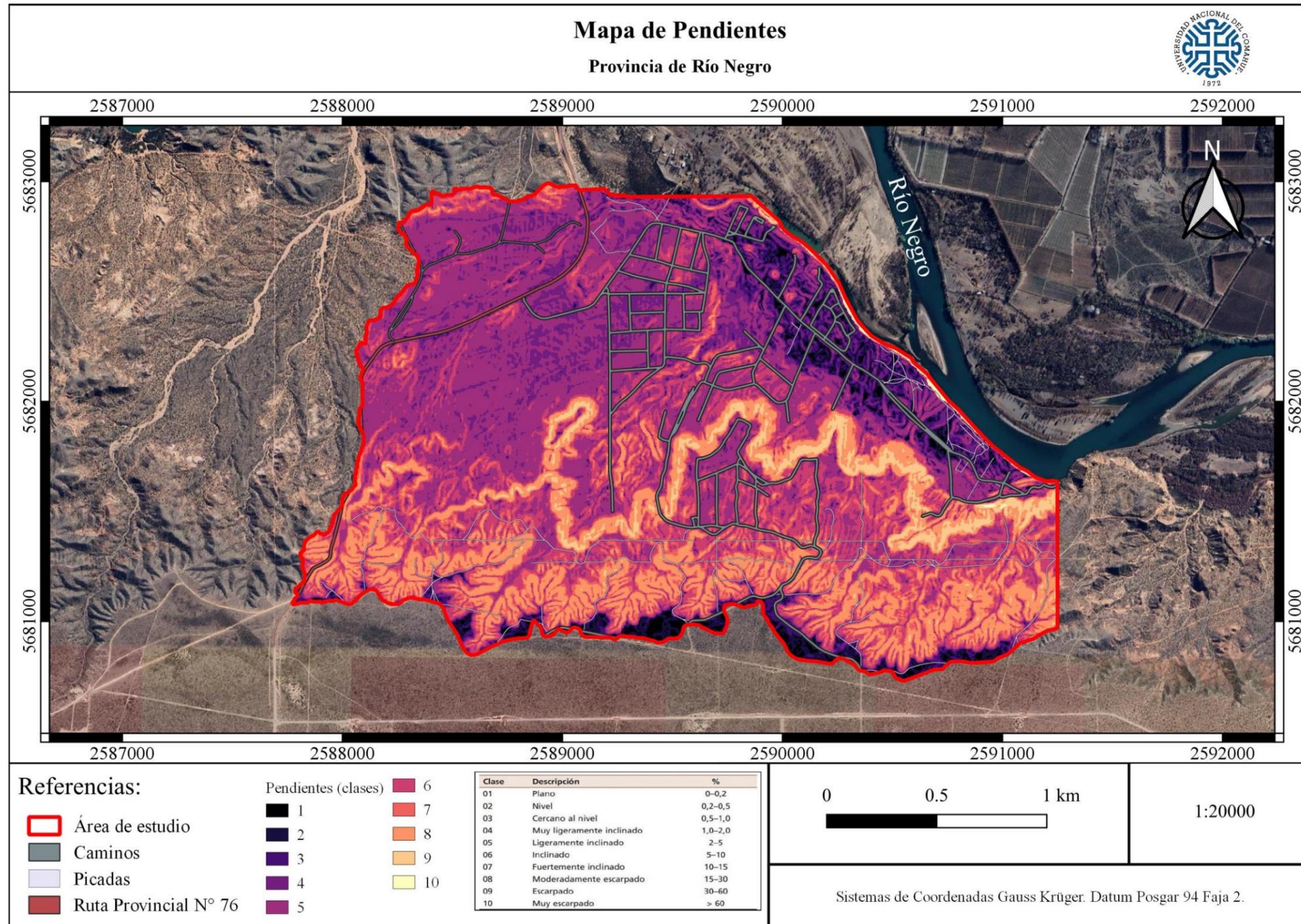


Figura 29: Mapa de pendientes clasificado en 10 clases (FAO 2009).

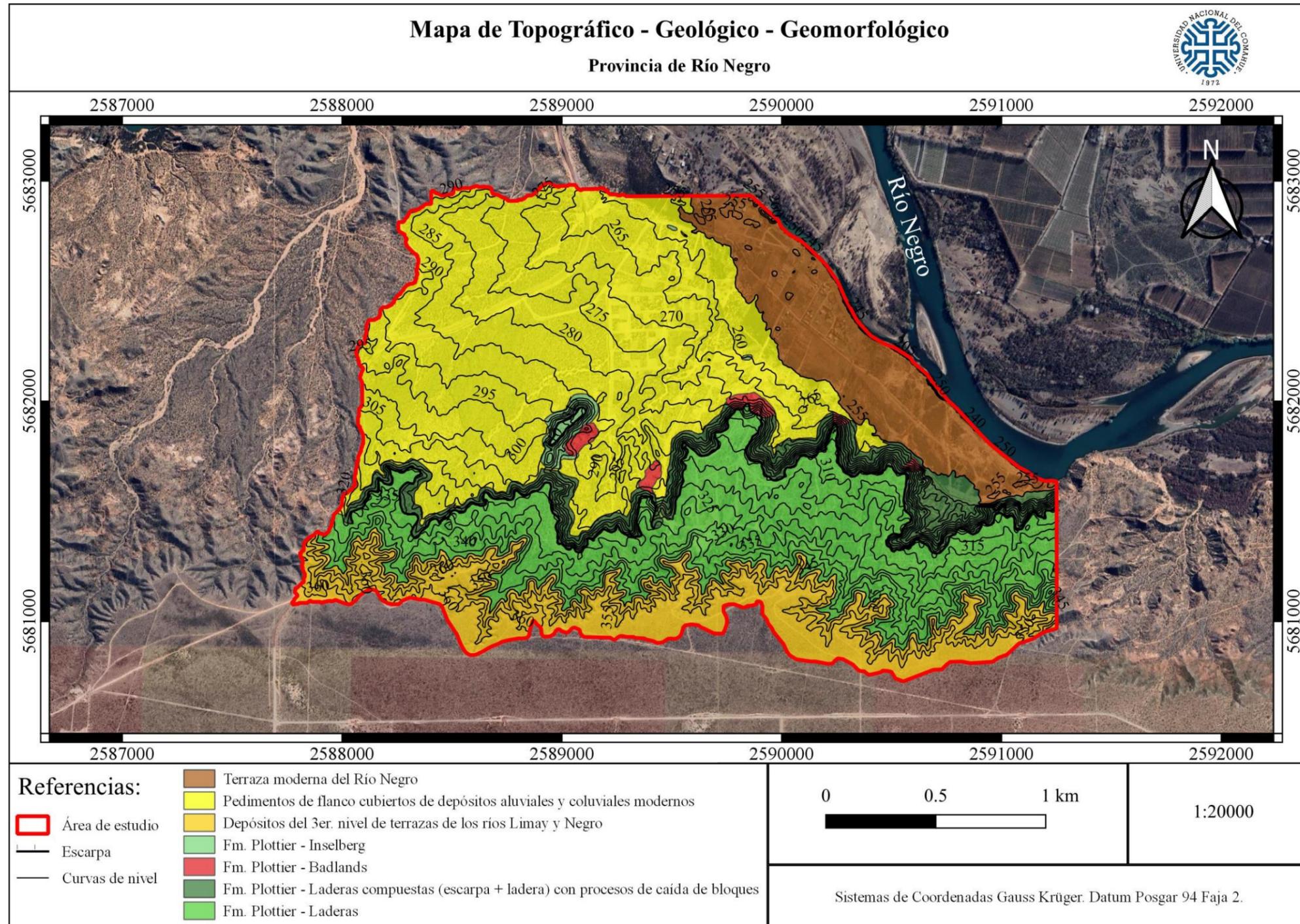


Figura 30: Mapa Topográfico – Geológico – Geomorfológico. Se observan las curvas de nivel (con equidistancia de 5 metros), las principales geoformas y afloramientos de la Fm. Plottier presentes en el área de estudio.

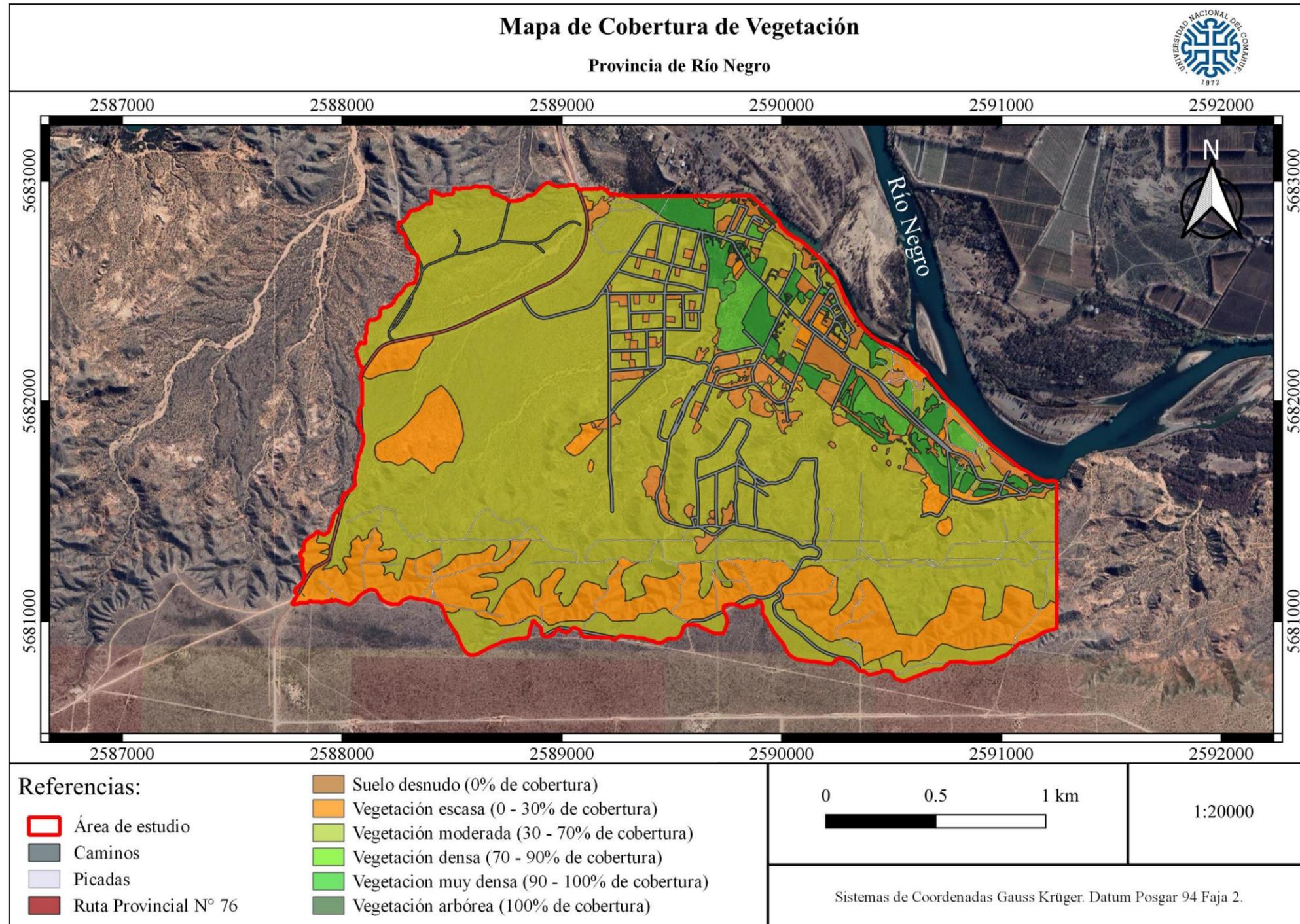


Figura 31: Representación de las distintas clases de cobertura de vegetación en relación a su porcentaje de cobertura

## 9.4 Delimitación y caracterización de las cuencas hidrológicas

Haciendo uso del programa QGIS se delimitaron 10 cuencas hidrológicas (Fig. 32), las cuales presentaron áreas de variadas magnitudes. Respecto a sus características morfométricas (Tabla 7), la cuenca de menor extensión (cuenca 6) presentó un área de 7,7 Ha y la de mayor extensión (cuenca 1) un área de 113,31 Ha. Estas mismas poseen una forma, según el índice de Gravelius, “alargada” a excepción de la cuenca 8, que es de forma “ovalada”.

Los parámetros de las cuencas respecto a la red de drenaje (Tabla 8) las cuencas de menor superficie poseen las mayores pendientes media (m/m), las cuales van de 0.08 (cuenca 5) a 0.11 m/m (cuenca 10). Las cuencas de mayor superficie presentan inclinaciones más bajas de aproximadamente 0.03 m/m debido a que gran parte de su extensión se encuentra sobre el pedimento, mientras que en las de menor superficie, la mayor parte de su extensión se encuentra sobre las laderas compuestas y los afloramientos de la Fm.Plottier.

Los tiempos de concentración promedio de las cuencas van de 0.19 horas (cuenca 6) hasta 1.34 horas (cuenca 1) y los CN se encuentran entre 59 (cuenca 2) y 80 (cuenca 10)

Cuenca	Area (Ha)	Perímetro (Km)	Índice de Gravelius	Forma
C1	113.31	6.58	1.75	Alargada
C2	13.18	2.24	1.75	Alargada
C3	65.48	5.31	1.84	Alargada
C4	90.6	5.49	1.62	Alargada
C5	8.17	2.27	2.13	Alargada
C6	7.7	2.21	2.20	Alargada
C7	35.08	4.31	2.06	Alargada
C8	20.18	2.32	1.46	Ovalada
C9	42.55	4.15	1.79	Alargada
C10	15.18	2.21	1.61	Alargada

Tabla 7: Parámetros morfométricos de las cuencas hidrológicas.

Cuenca	Lc (Km)	Jc (m/m)	Tc (h) Kirpich	Tc (h) SCS	Tc (h) Temez	Tc (h) Promedio	CN
C1	2.61	0.032	N/A	2.83	1.19	1.34	60
C2	0.737	0.024	0.22	1.22	0.48	0.64	59
C3	2.255	0.036	N/A	1.99	1.04	1.01	67
C4	1.976	0.047	N/A	1.33	0.90	0.74	73
C5	0.732	0.08	0.14	0.47	0.38	0.33	72
C6	0.522	0.103	N/A	0.30	0.28	0.19	74
C7	1.418	0.068	0.24	0.74	0.65	0.54	78
C8	0.634	0.113	N/A	0.32	0.32	0.21	76
C9	1.217	0.081	0.20	0.58	0.56	0.45	79
C10	0.714	0.116	N/A	0.31	0.35	0.22	80

Tabla 8: Parámetros de las cuencas respecto a la red de drenaje. N/A: No aplica.

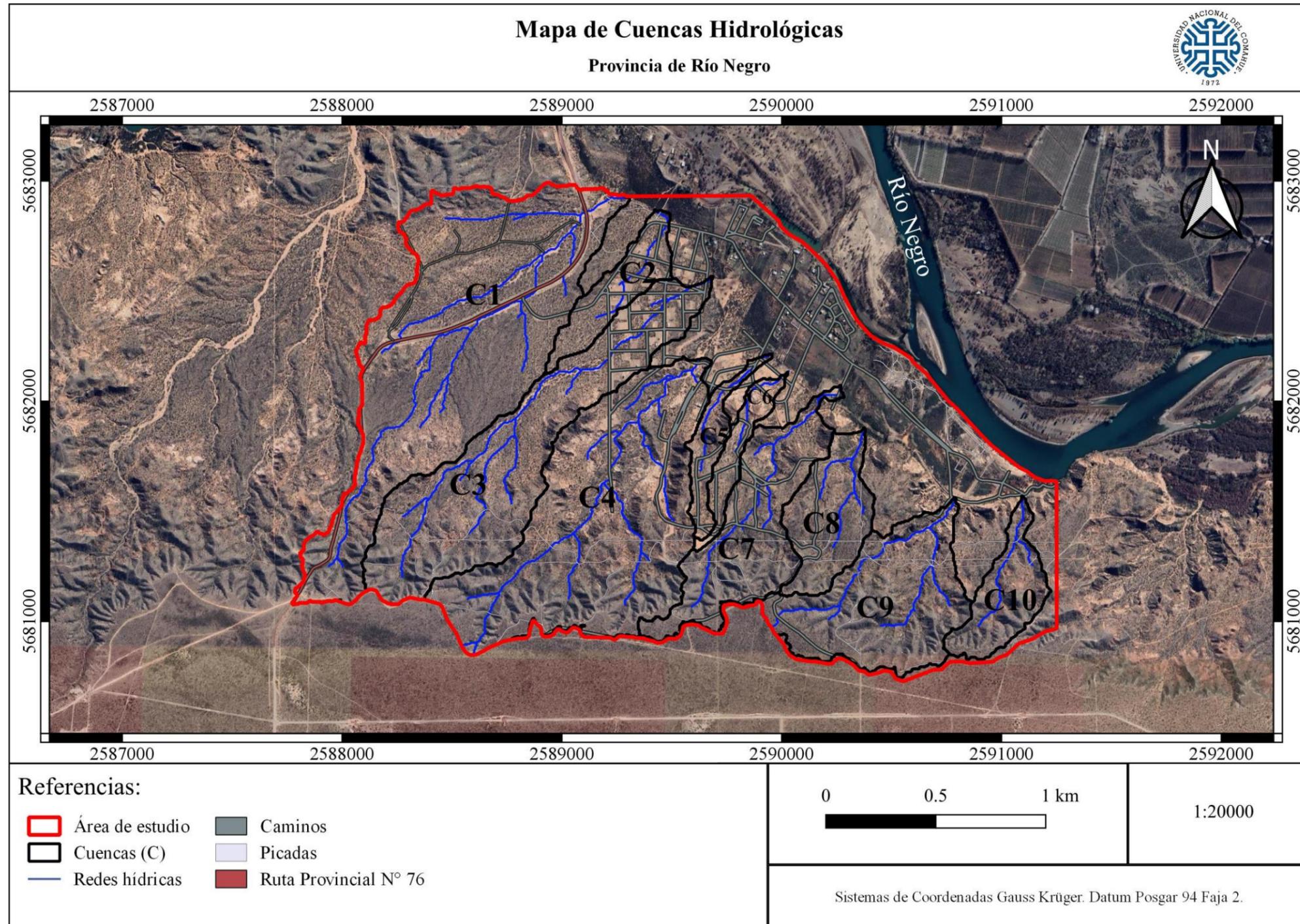


Figura 32: Delimitación de las cuencas hidrológicas dentro del área de estudio.

### 9.5 Ensayos de infiltración (Horton)

Los sitios en donde se realizaron los ensayos de infiltración se observan en la Fig. 27 (Pág. 45). Las mayores tasas de infiltración (infiltración alta) se obtuvieron en el punto E1 (Fig. 33), el cual se ubica sobre el pedimento, y en el punto E3 (Fig. 35), ubicado sobre la ladera donde se ven los principales afloramientos de la Fm. Plottier, donde se obtuvieron tasas de infiltración moderadas. Por otro lado, en el punto E2 (Fig. 34), ubicado en las terrazas antiguas (3<sup>er</sup>. Nivel de terrazas del Río Negro), en el punto E4 (Fig. 36), ubicado sobre las terrazas modernas del Río Negro y en el punto E5 (Fig. 37), perteneciente a la zona de laderas compuestas, se obtuvieron tasas de infiltración muy bajas. En la tabla 9 se muestran las ecuaciones de Horton ajustadas para cada ensayo de infiltración.

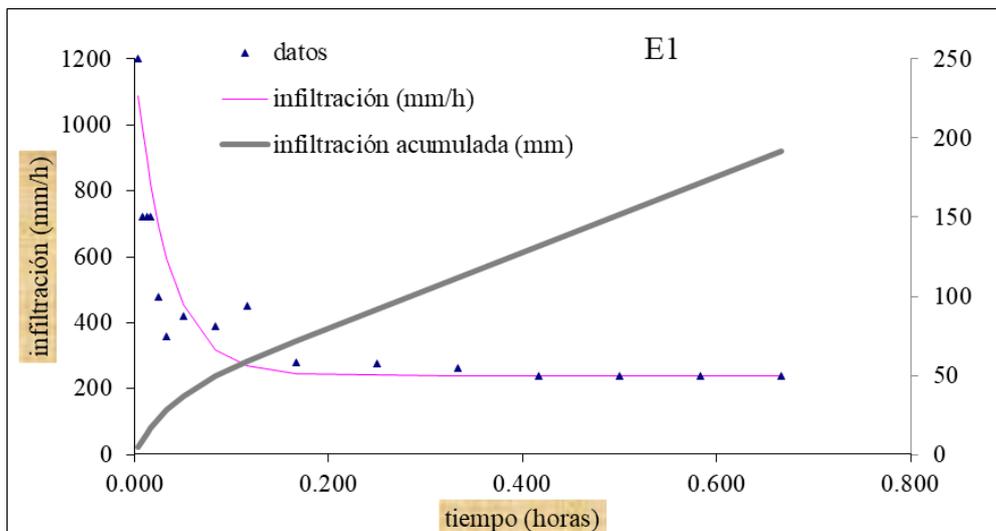


Figura 33: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en el sector de pedimentos cubiertos por depósitos modernos aluviales y coluviales.

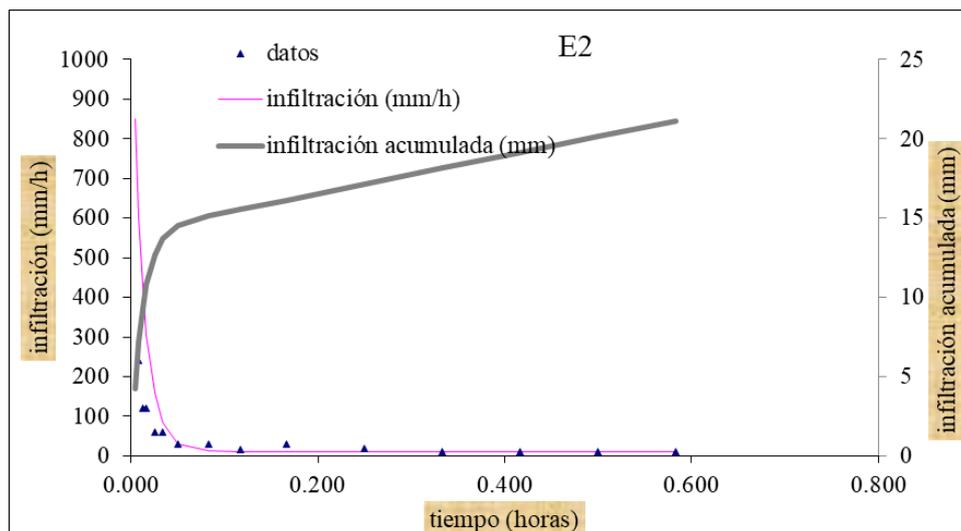


Figura 34: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en el sector de pedimentos cubiertos por depósitos modernos aluviales y coluviales.

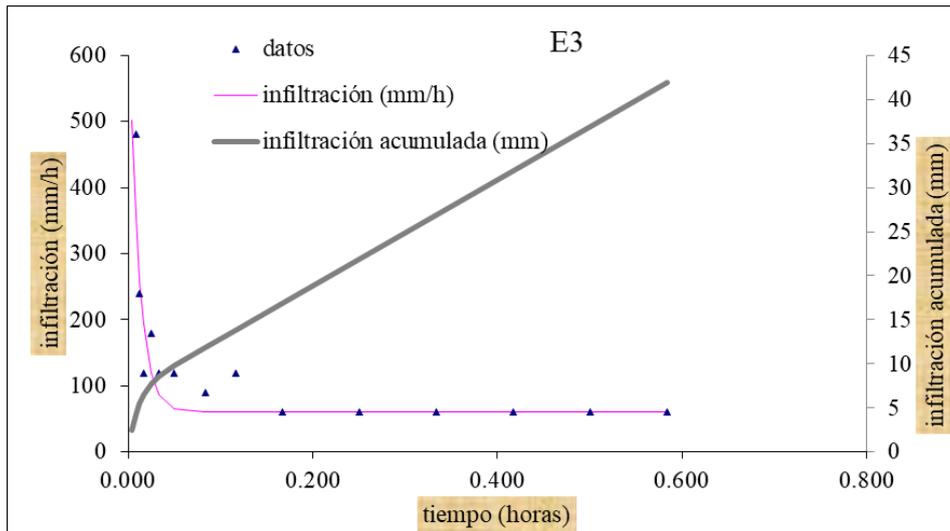


Figura 35: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en la zona de ladera.

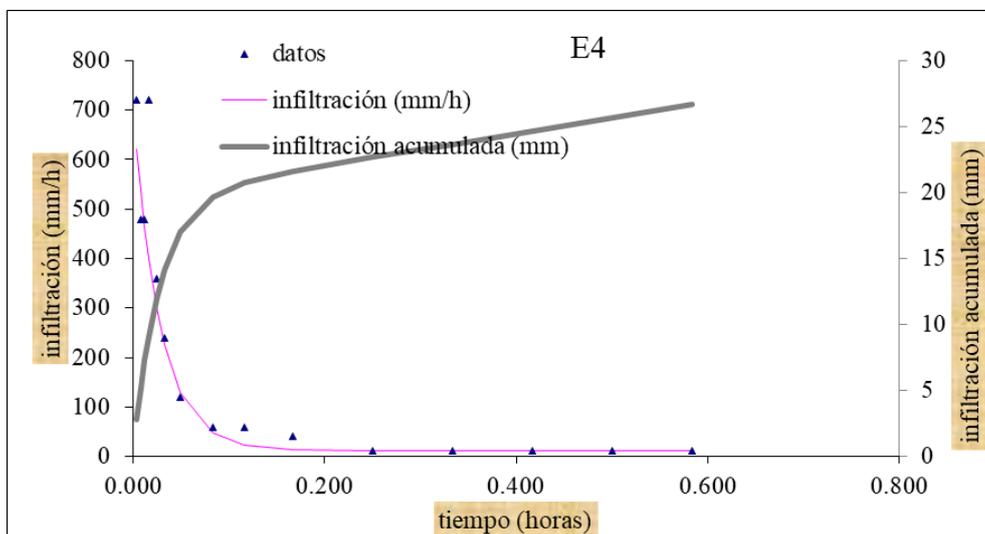


Figura 36: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en las terrazas modernas.

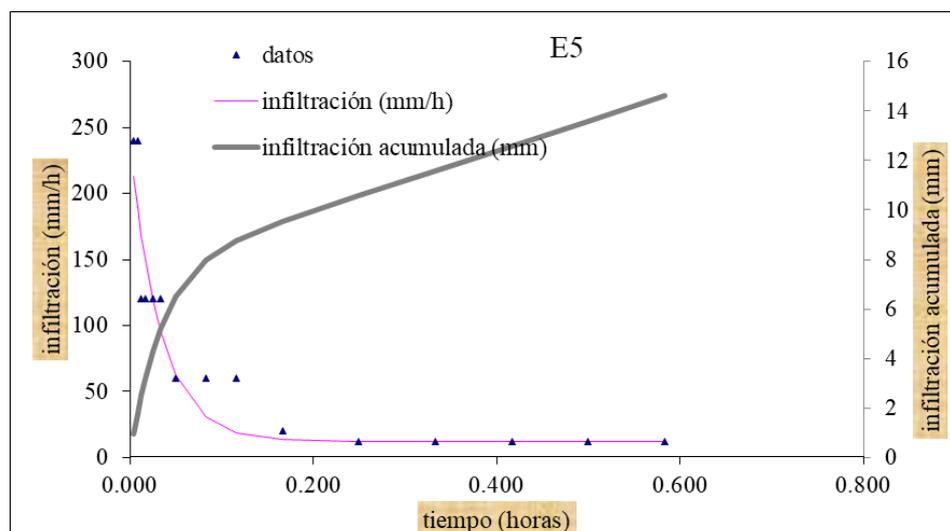


Figura 37: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos en la zona de laderas compuestas.

Ensayos de infiltración	Ecuación de Horton	fo (mm/h)	fb (mm/h)	k (1/h)
E1	$f(t) = 1200 + 960 \cdot e^{-0.5 \cdot t}$	1200	240	0.5
E2	$f(t) = 1200 + 1188 \cdot e^{-1.4 \cdot t}$	1200	12	1.4
E3	$f(t) = 720 + 660 \cdot e^{-1.6 \cdot t}$	1200	60	1.6
E4	$f(t) = 720 + 708 \cdot e^{-0.6 \cdot t}$	720	12	0.6
E5	$f(t) = 240 + 232 \cdot e^{-0.5 \cdot t}$	240	12	0.5

Tabla 9: Ecuación de Horton ajustada para cada ensayo de infiltración. Fo: Capacidad de infiltración inicial. fb: Capacidad de infiltración final. K: Constante de decaimiento.

## 9.6 Mapa de Grupos Hidrológicos del Suelo (GHS)

En la Figura 38 se muestran los distintos Grupos Hidrológicos del Suelo (ver Tabla 3, Pág. 46), donde se indican los distintos tipos de GHS). Se observa que el área cubierta por depósitos aluviales y coluviales modernos, donde se registraron las tasas de infiltración más altas (240 mm/h), caracterizada por tener un GHS de tipo A. La zona de laderas, dentro de la cual se encuentran los principales afloramientos de la Fm. Plottier, poseen un GHS de tipo B y C. Por otro lado, las terrazas antiguas, las terrazas modernas y las laderas compuestas presentaron tasas muy bajas de infiltración (12 mm/h), por lo que les corresponden un GHS de tipo D.

## 9.7 Mapa de curva número (CN)

En la Figura 39, se muestran los índices de CN, donde los más bajos pertenecen al sector de pedimentos (50-70), mientras que los más altos (85-93) se encuentran en las terrazas antiguas, las terrazas modernas y en las laderas compuestas. Los afloramientos de la Fm. Plottier dieron como resultados índices intermedios entre los sectores anteriormente mencionados (71-74).

## 9.8 Tormentas de proyecto para períodos de retorno de 5, 10, 25 y 100 años

Se muestran los resultados de las intensidades máximas media ( $I_D$ ) en mm/h, calculadas a partir de las ecuaciones de Cartaya (Tabla 10) y MIC (Tabla 11).

<b><math>I_D</math> (Cartaya) en mm/h</b>				
	<b>Recurrencias (años)</b>			
<b>Cuencas</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>100</b>
C2	43.99	57.11	84.46	112.67
C4	40.75	52.90	71.49	104.38
C5	61.52	79.87	107.93	157.58
C6	80.66	104.72	141.52	206.61
C7	47.80	62.05	83.85	122.43
C8	77.04	100.02	135.16	197.33
C9	52.77	68.51	92.58	135.17
C10	76.01	98.68	133.35	194.68

Tabla 10: Intensidades máximas media ( $I_D$ ) para las duraciones  $D$  según la recurrencia estipulada.

<b><math>I_D</math> (MIC) en mm/h</b>				
	<b>Recurrencias (años)</b>			
<b>Cuencas</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>100</b>
C1	27.21	33.81	45.68	66.70
C3	32.90	42.72	57.72	84.28

Tabla 11: Intensidades máximas media ( $I_D$ ) para las duraciones  $D$  según la recurrencia estipulada.

### 9.9 Determinación del coeficiente de escorrentía

En la tabla 12 se muestran los coeficientes de escorrentía calculados con la ecuación 15, MOPU, 1987 (Azagra, 2006) (Pág. 43), para cada cuenca teniendo en cuenta las recurrencias adoptadas.

<b>Coefficientes de escorrentía</b>				
	<b>Recurrencias (años)</b>			
<b>Cuencas</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>100</b>
C1	0.006	0.025	0.087	0.184
C2	0.040	0.096	0.172	0.285
C3	0.062	0.122	0.203	0.321
C4	0.170	0.246	0.343	0.475
C5	0.277	0.364	0.469	0.600
C6	0.402	0.494	0.598	0.717
C7	0.299	0.387	0.493	0.623
C8	0.423	0.515	0.618	0.735
C9	0.352	0.443	0.548	0.674
C10	0.501	0.591	0.688	0.792

Tabla 12: Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca según la recurrencia estipulada.

### 9.10 Cálculo de caudales máximos en los puntos de aforo de las cuencas

En la tabla 13 se muestran los caudales obtenidos con la ecuación 13. Ante tormentas con recurrencias de 5, 10, 25 y 100 años, las cuencas 4 y 9 (ver Fig .32, Pág. 55), van a erogar los mayores caudales, mientras que las cuencas 2, 5 y 6 van a producir las menores erogaciones.

<b>Caudales (<math>m^3/s</math>)</b>				
	<b>Recurrencias (años)</b>			
<b>Cuencas</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>100</b>
C1	0.05	0.31	1.45	4.45
C2	0.06	0.20	0.48	1.16
C3	0.38	1.01	2.27	5.25
C4	1.75	3.28	6.20	12.52
C5	0.43	0.73	1.26	2.36
C6	0.72	1.15	1.88	3.29
C7	1.39	2.34	4.02	7.42
C8	1.81	2.86	4.64	8.06
C9	2.22	3.62	6.06	10.88
C10	1.59	2.43	3.83	6.43

Tabla 13: Caudales obtenidos para cada cuenca según recurrencia estipulada.

### 9.11 Modelación hidráulica bidimensional (HEC-RAS)

A partir de la simulación hidráulica bidimensional se pudo visualizar de manera gráfica, la superficie del manto de escorrentía generado para los períodos de retorno (recurrencias) propuestos. Además, se obtuvieron variables hidráulicas de importancia como la altura de la lámina de agua (Figuras 40, 41, 42 y 43) y la velocidad de escorrentía para las recurrencias propuestas (Figuras 44, 45, 46, 47).

En las simulaciones se observa que, en una tormenta con una recurrencia igual o mayor a 5 años, se verán afectados, por erosión hídrica, los caminos y picadas construidos en el área de estudio, en especial los que facilitan la movilidad automotriz en los loteos ubicados sobre los depósitos coluviales. También se verá afectada, en algunos sectores, la ruta provincial N°76.

Sobre las terrazas modernas del Río Negro, teniendo en cuenta las bajas velocidades de escorrentía obtenidas, no se producirá erosión hídrica, pero si inundación y depositación de sedimentos. En algunos de los sectores topográficamente más bajos de estas terrazas, para recurrencias de 5, 10, 25 y 100 años, se producirán láminas de agua mayores al metro de profundidad. Por otro lado, en el sector de laderas, se presentan las mayores velocidades de escorrentía, superando los 5 metros por segundo, por lo que se genera una fuerte erosión hídrica.

## 9.12 Análisis del comportamiento de los sedimentos

En base a las velocidades obtenidas con la modelación hidráulica bidimensional, y relacionando las mismas con la curva de Hjulström (Fig.28, Pag. 49) se observa que, con los caudales generados en las tormentas con las recurrencias estipuladas, se produce el arranque y posterior transporte de partículas de granulometría muy fina (arcillas y limos), partículas finas a medias (arena fina y arena media), y partículas gruesas (arena gruesa y gravas) en los sectores con velocidades de escurrimiento más altas. Por otro lado, en los sectores con velocidades nulas y casi nulas, se produce la depositación de partículas de tamaño arcilla.

## 9.13 Mapa de peligrosidad aluvional

En relación a la probabilidad de ocurrencia de eventos aluvionales y la magnitud de estos eventos se confeccionó el mapa de peligrosidad aluvional (Fig. 48) donde, según los resultados obtenidos, se observa que las peligrosidades muy bajas ocupan las mayores extensiones. A esta le siguen las peligrosidades muy altas que, aunque abarcan menor superficie que las peligrosidades muy bajas, indican que los eventos aluvionales para las recurrencias estipuladas afectarán en gran medida a los loteos presentes en el área en análisis, como así también a la mayoría de los caminos, picadas y a la ruta provincial N°76.

Los loteos y caminos ubicados sobre las terrazas modernas presentan, en mayor medida, peligrosidades aluvionales muy altas, en especial en los lugares más cercanos a los aforos de las cuencas. Esta peligrosidad va disminuyendo hacia el noreste viéndose peligrosidades que van de peligrosidades altas a muy baja. Las terrazas modernas poseen pendientes muy bajas, por lo que, con tormentas con recurrencias iguales o mayores a 5 años se verán afectados por procesos aluvionales que generan inundación y depósito de sedimentos finos. Por otro lado, en el sector de pedimentos con depósitos modernos aluviales y coluviales, las inclinaciones son de mayor magnitud, por lo que es una zona propensa a ser sometida a procesos aluvionales erosivos de muy alto grado de peligrosidad.

Cabe destacar que los sectores de la terraza moderna con peligrosidad muy baja, hacen referencia a eventos aluvionales provenientes de la barda, no así respecto a crecidas del Río Negro, en donde dicho sector sería el de mayor peligrosidad.

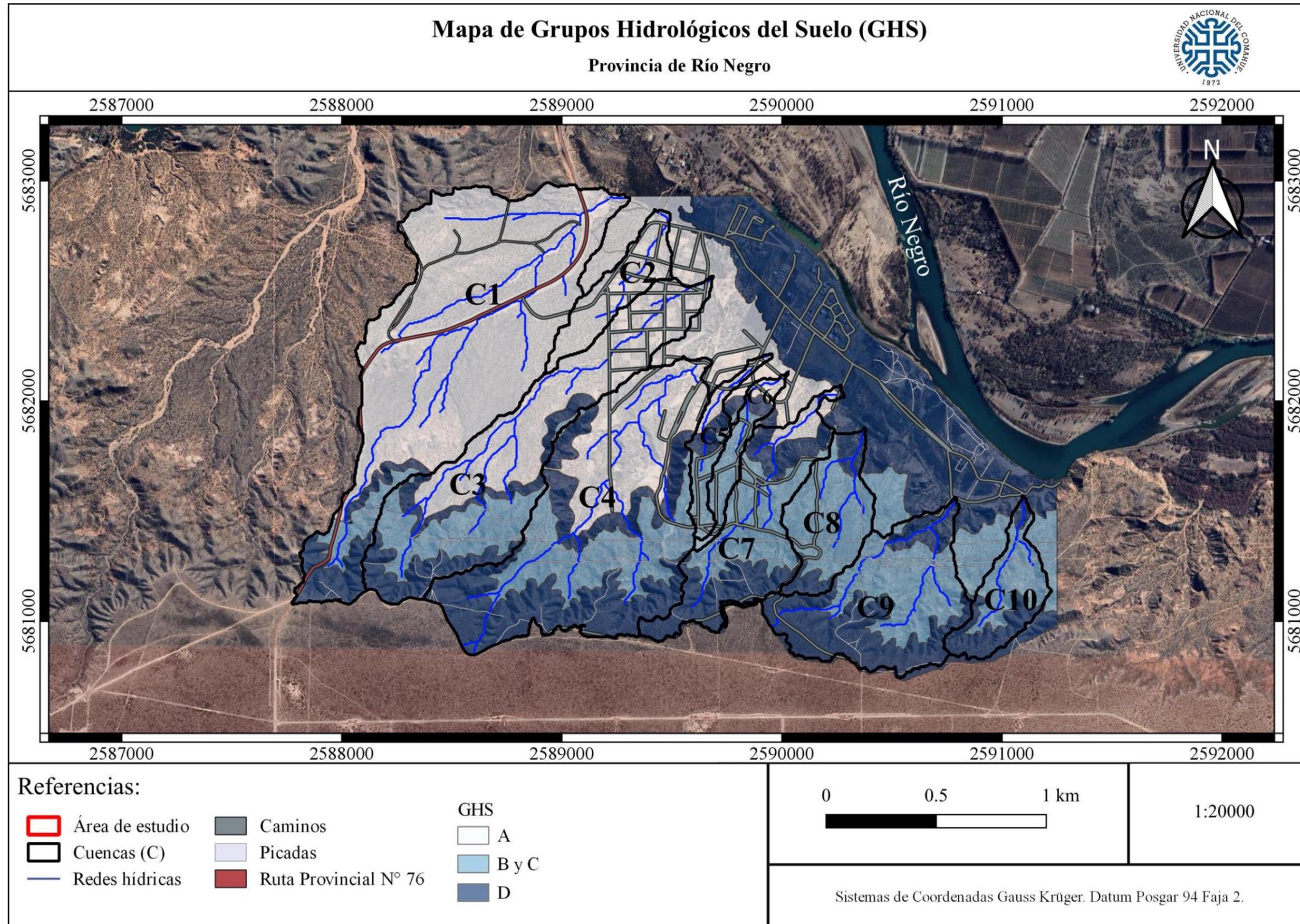


Figura 38: Determinación del Grupo Hidrológico del Suelo para el área de estudio.

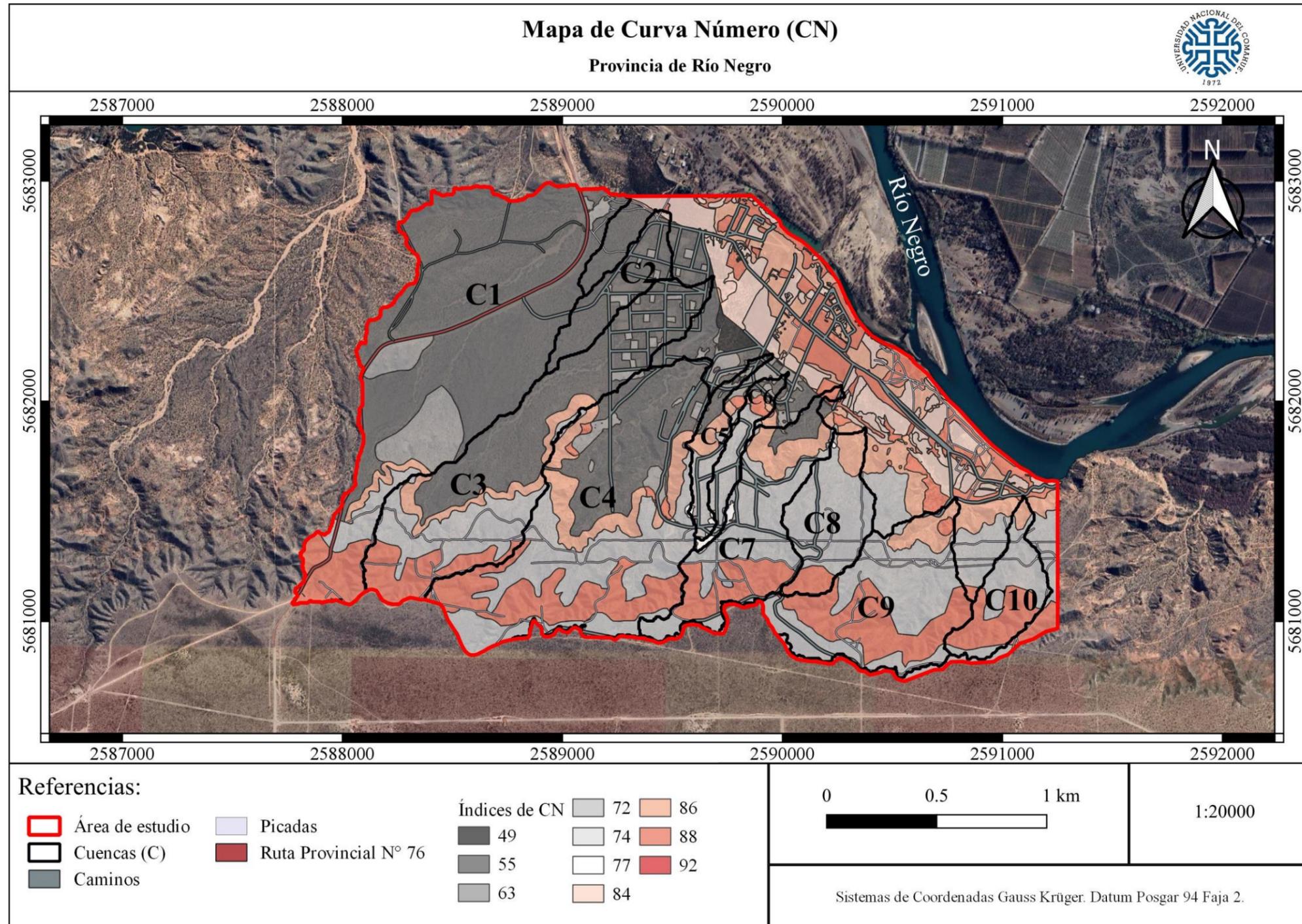


Figura 39: Índices de Curva Número (CN) presentes en el área de estudio.

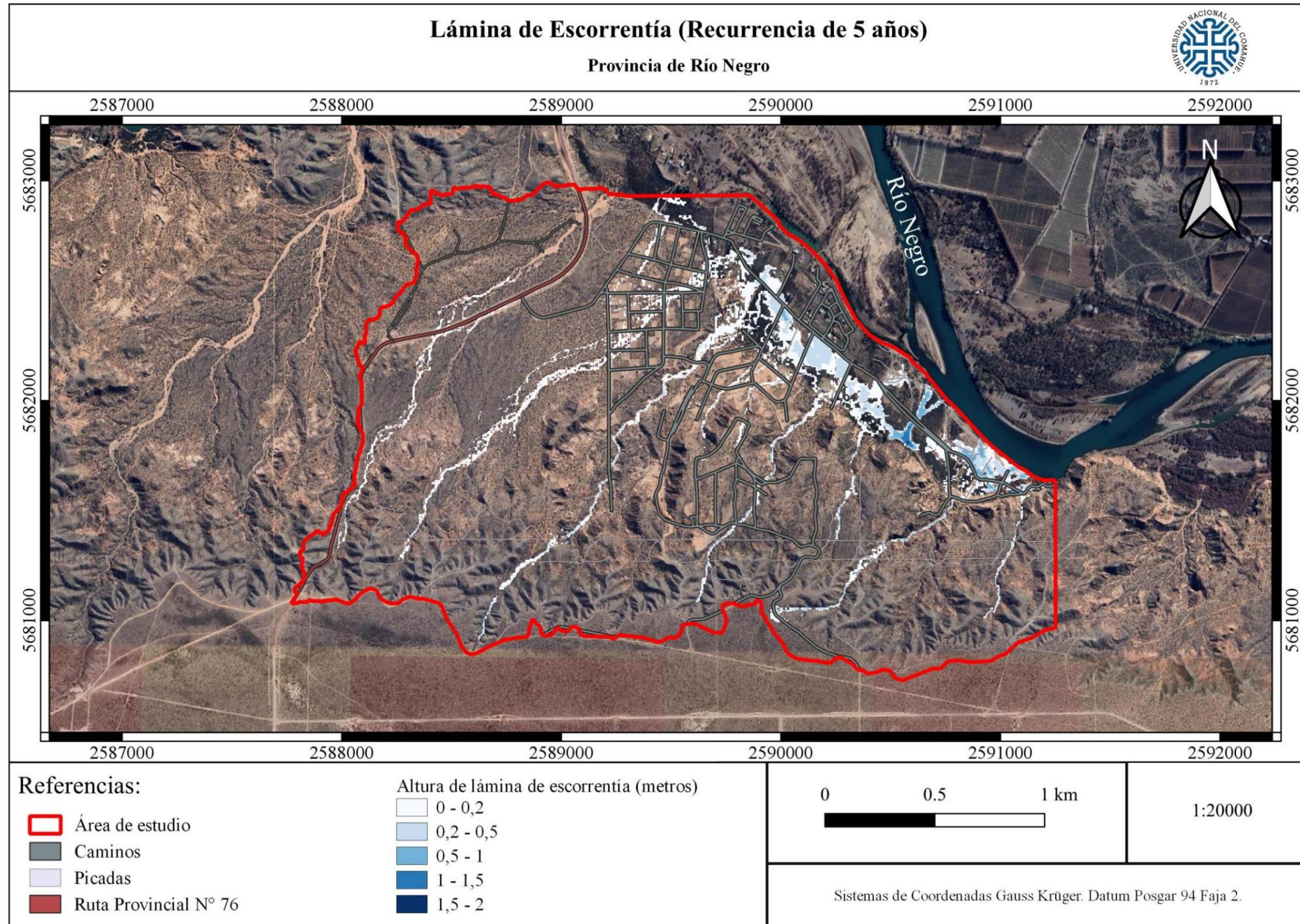


Figura 40: Altura de lámina de agua generada por una tormenta con una recurrencia de 5 años.

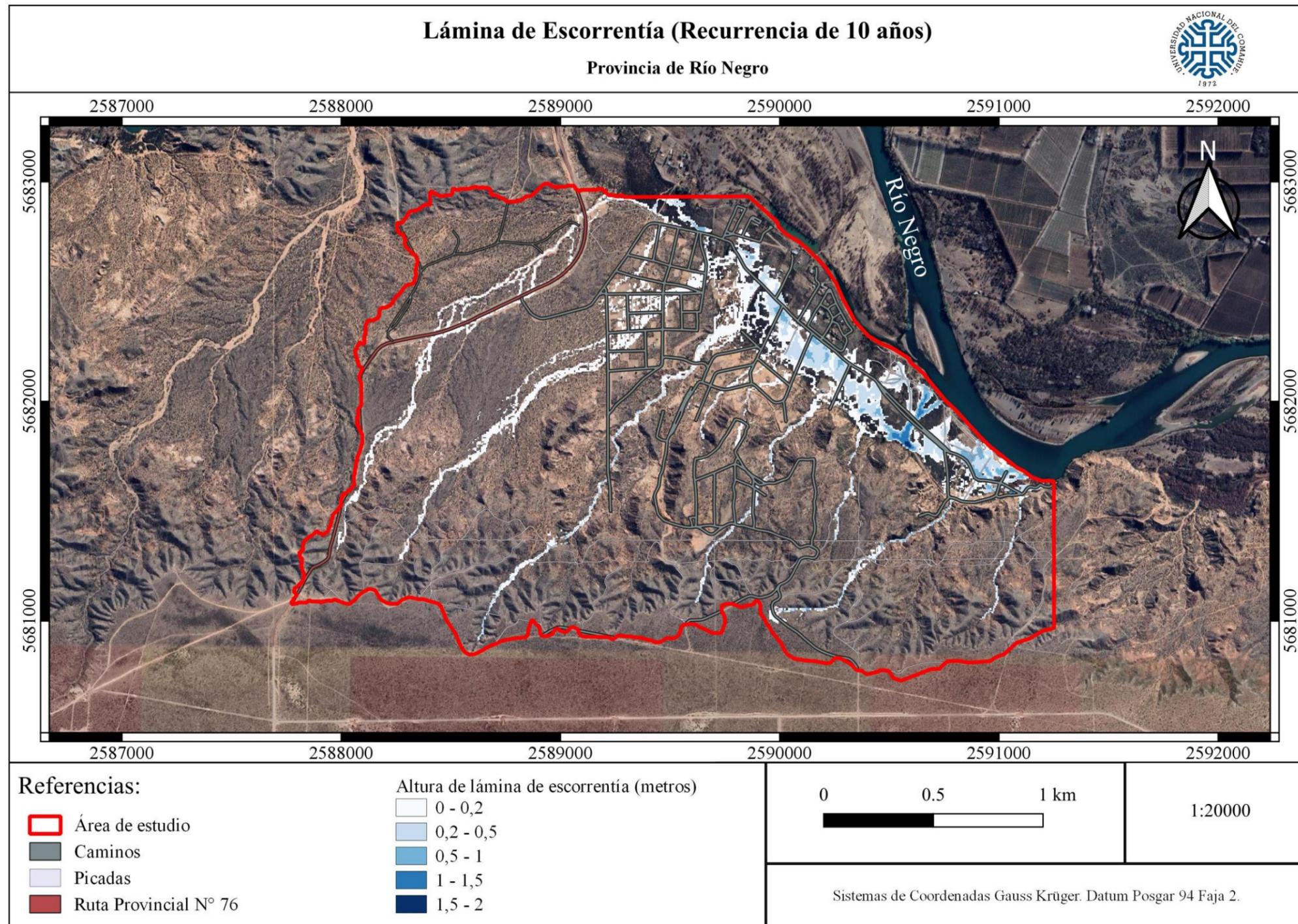


Figura 41: Altura de lámina de agua generada por una tormenta con una recurrencia de 10 años.

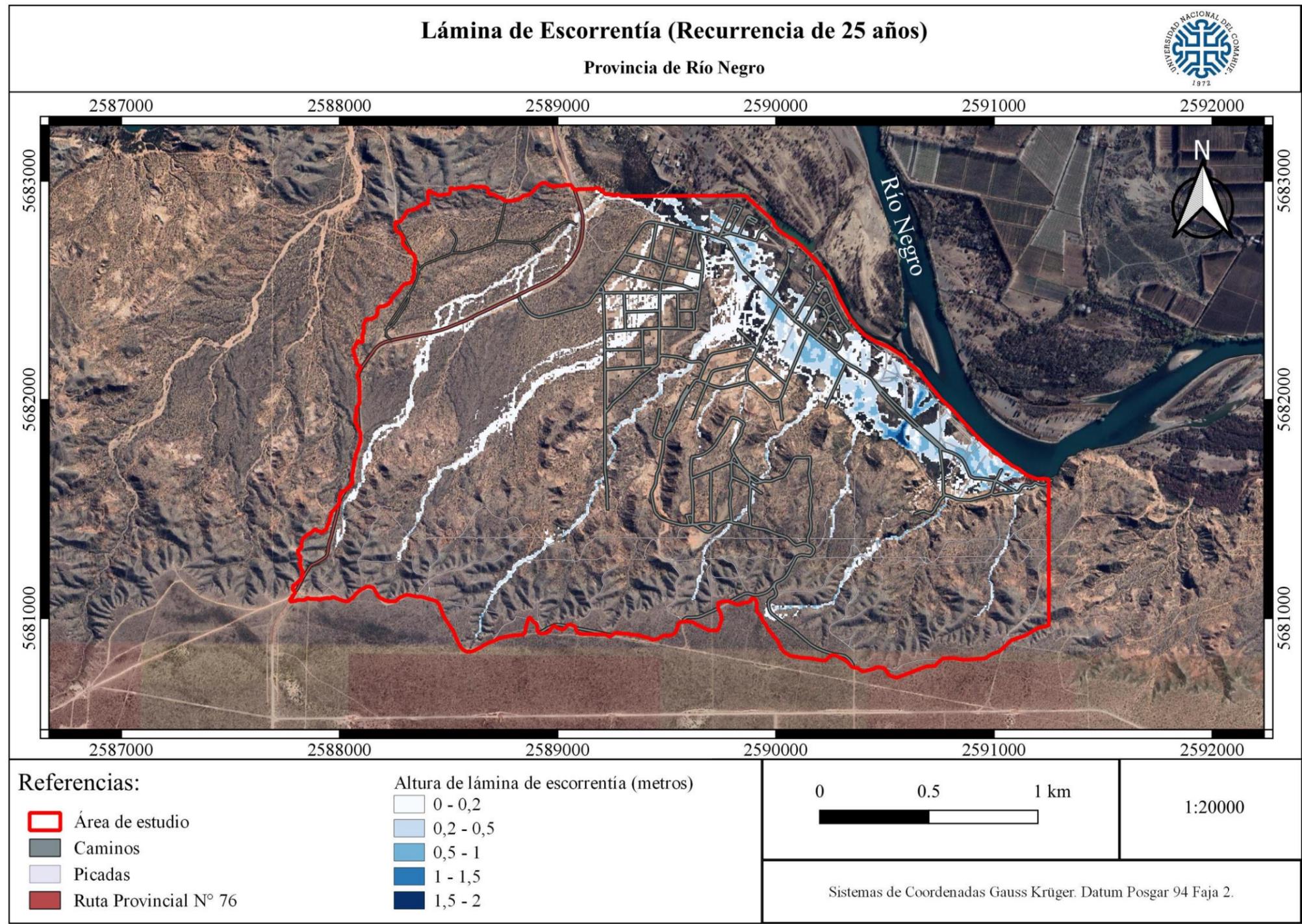


Figura 42: Altura de lámina de agua generada por una tormenta con recurrencia de 25 años.

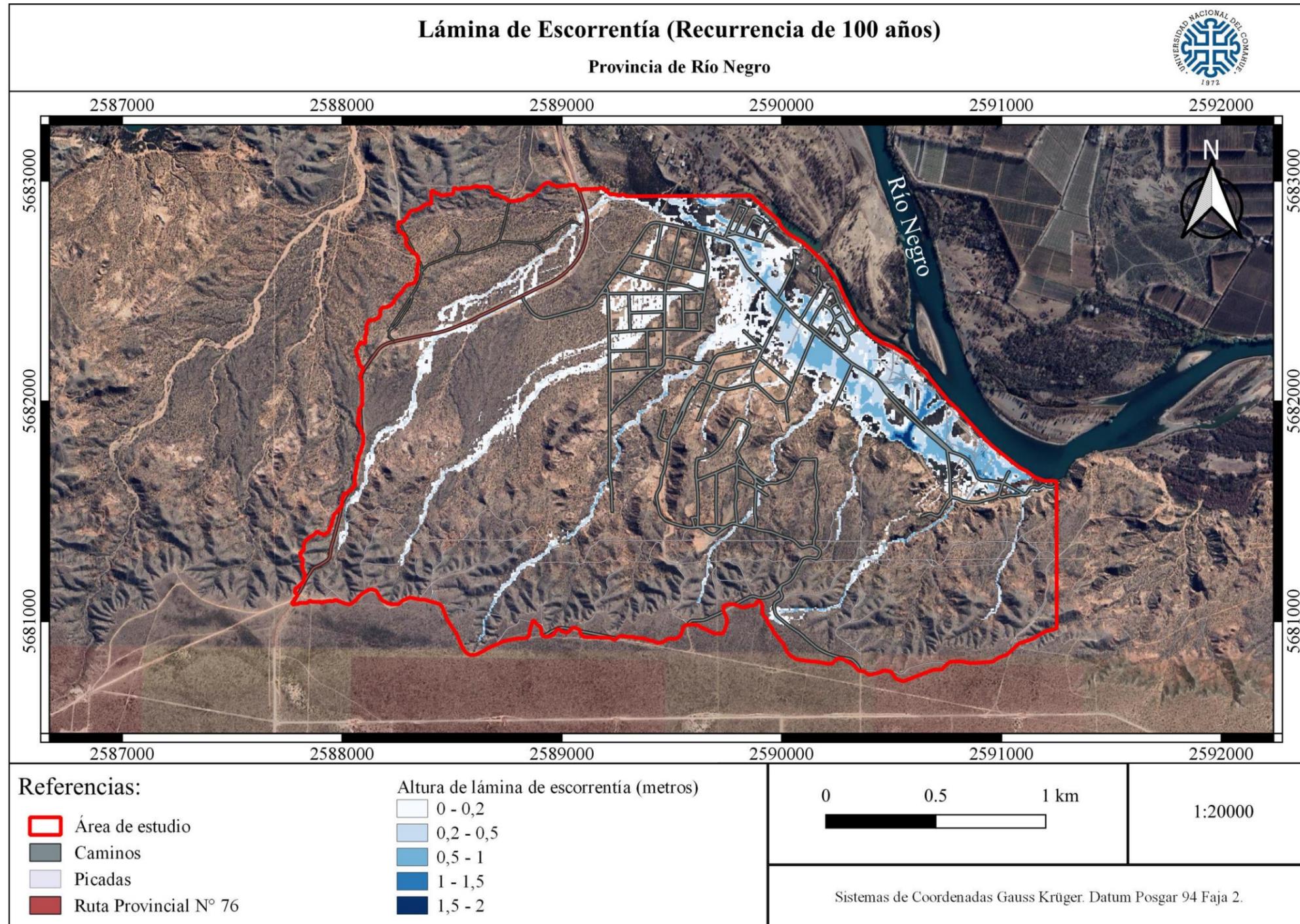


Figura 43: Altura de lámina de agua generada por una tormenta con recurrencia de 100 años.

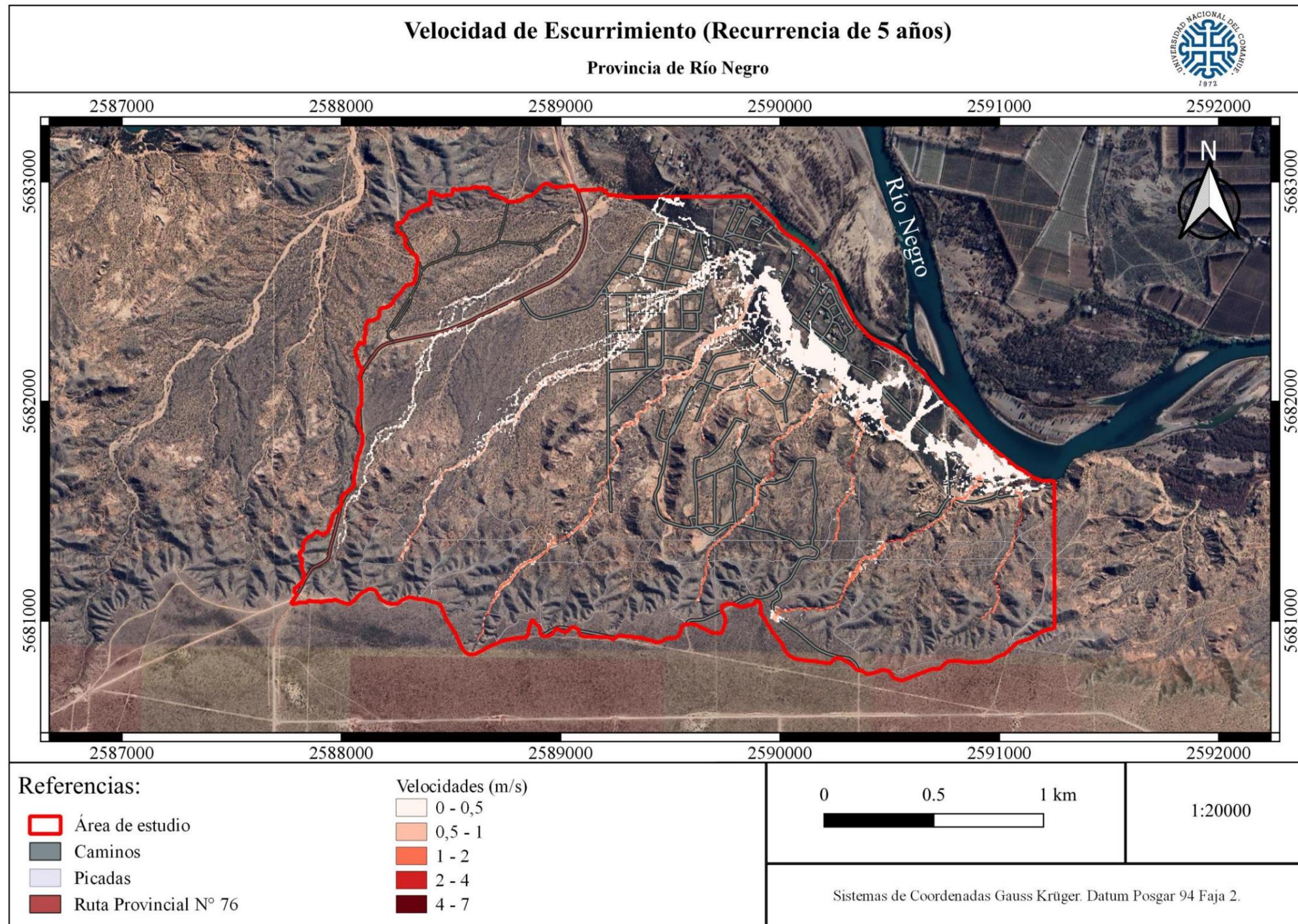


Figura 44: Velocidades de esguerrimiento generadas por una tormenta con período de retorno de 5 años

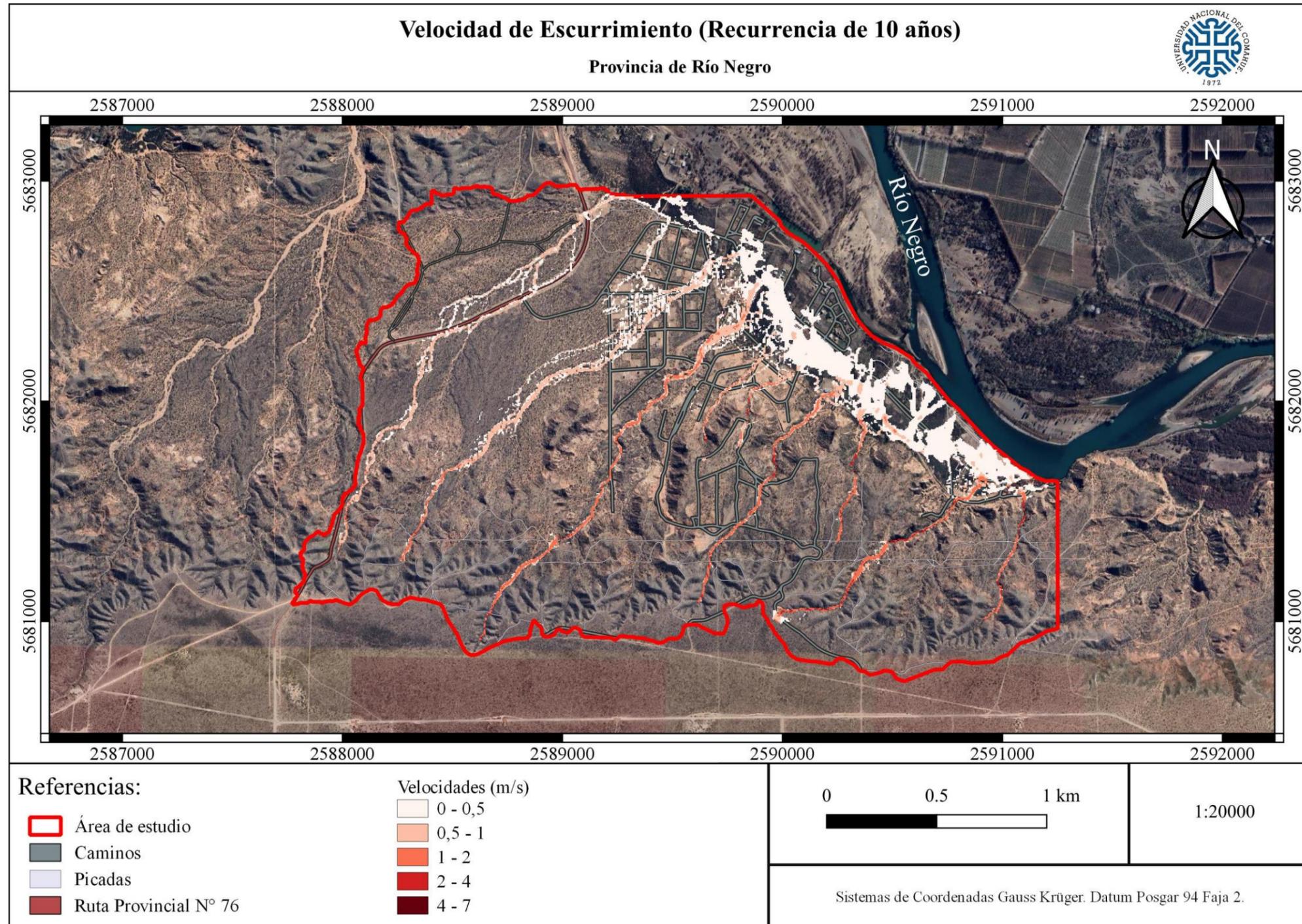


Figura 45: Velocidades de escurrimiento generadas por una tormenta con período de retorno de 10 años.

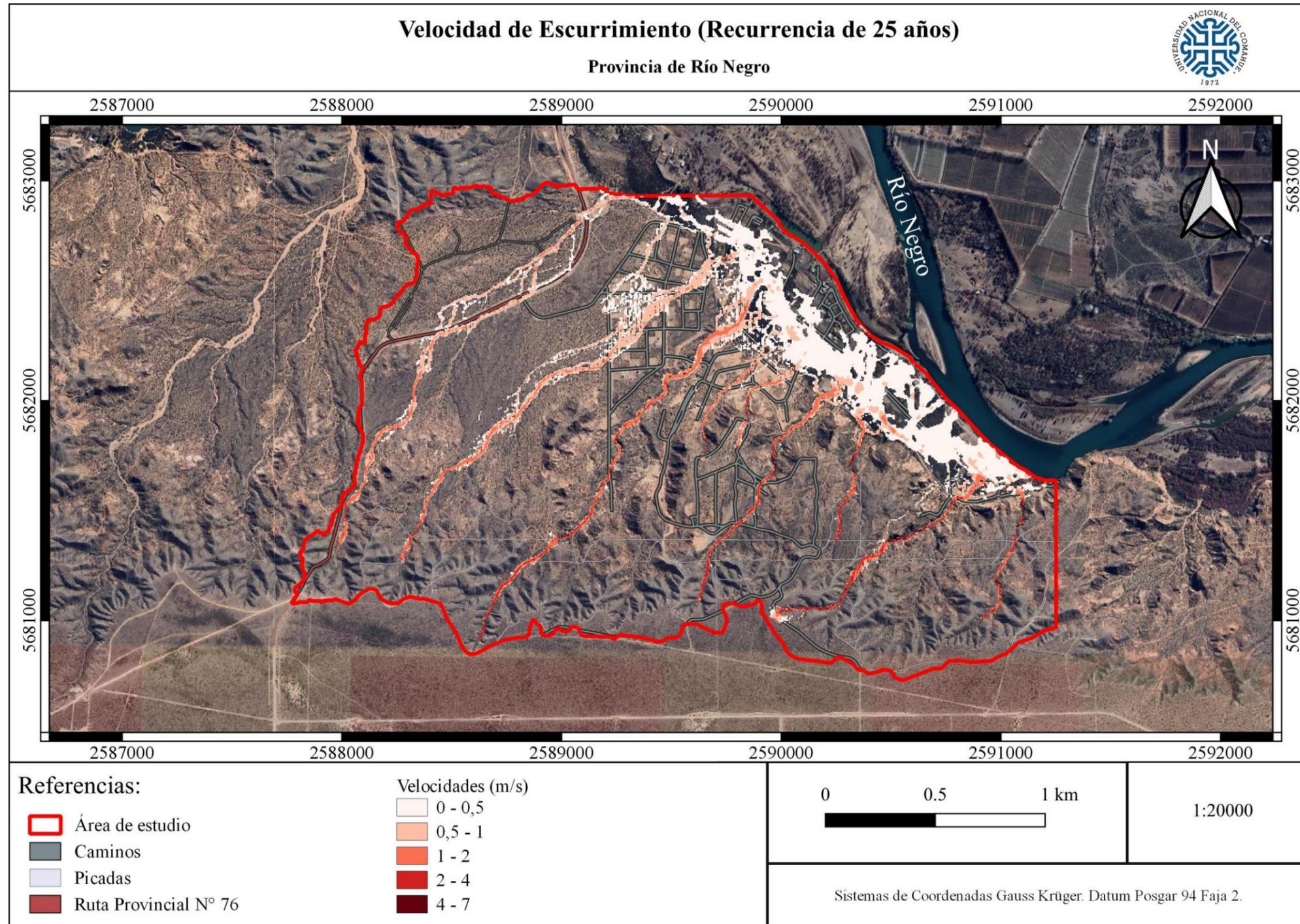


Figura 46: Velocidades de escurrimiento generadas por una tormenta con período de retorno de 25 años.

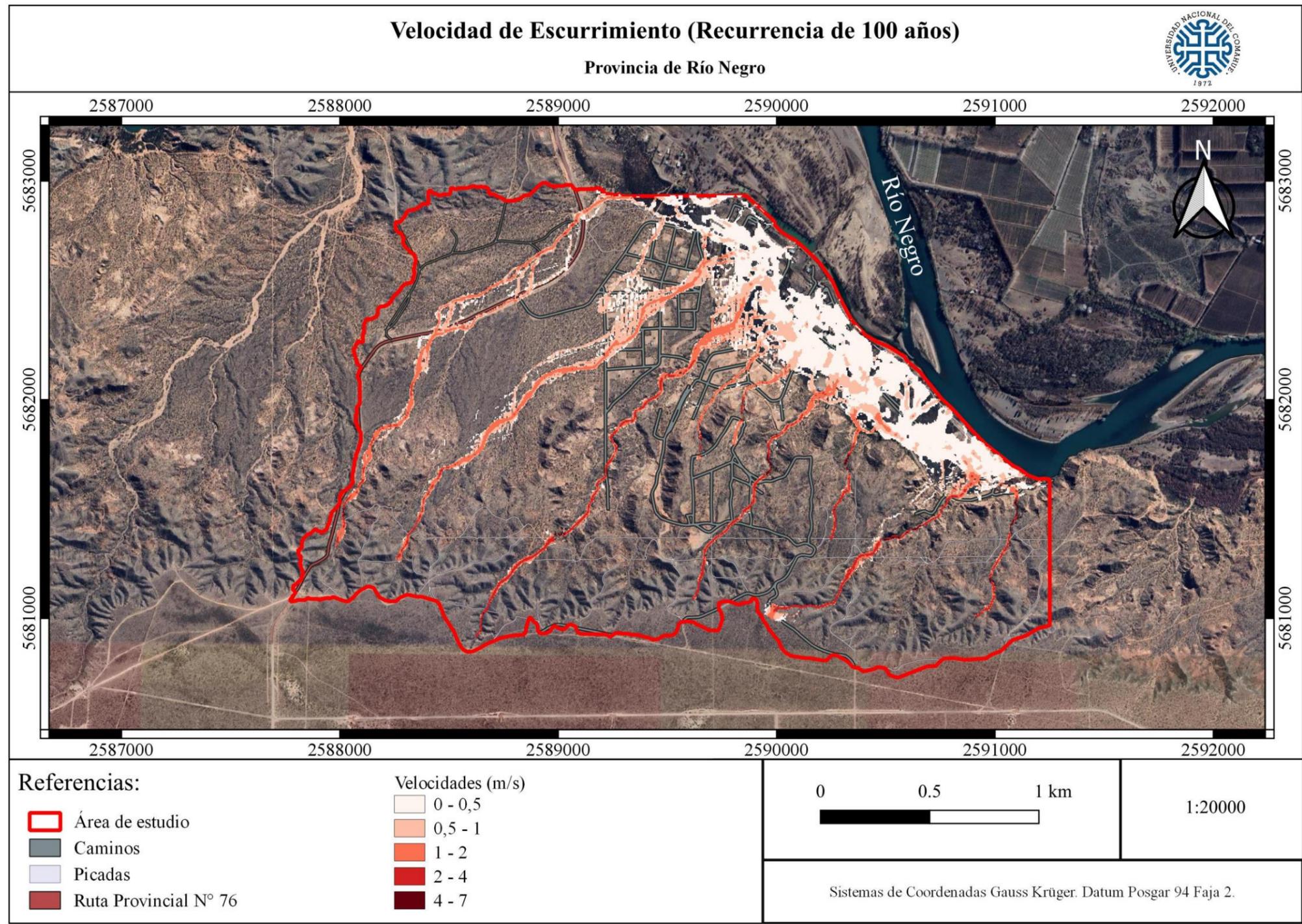


Figura 47: Velocidades de esguerrimiento generadas por una tormenta con período de retorno de 100 años.

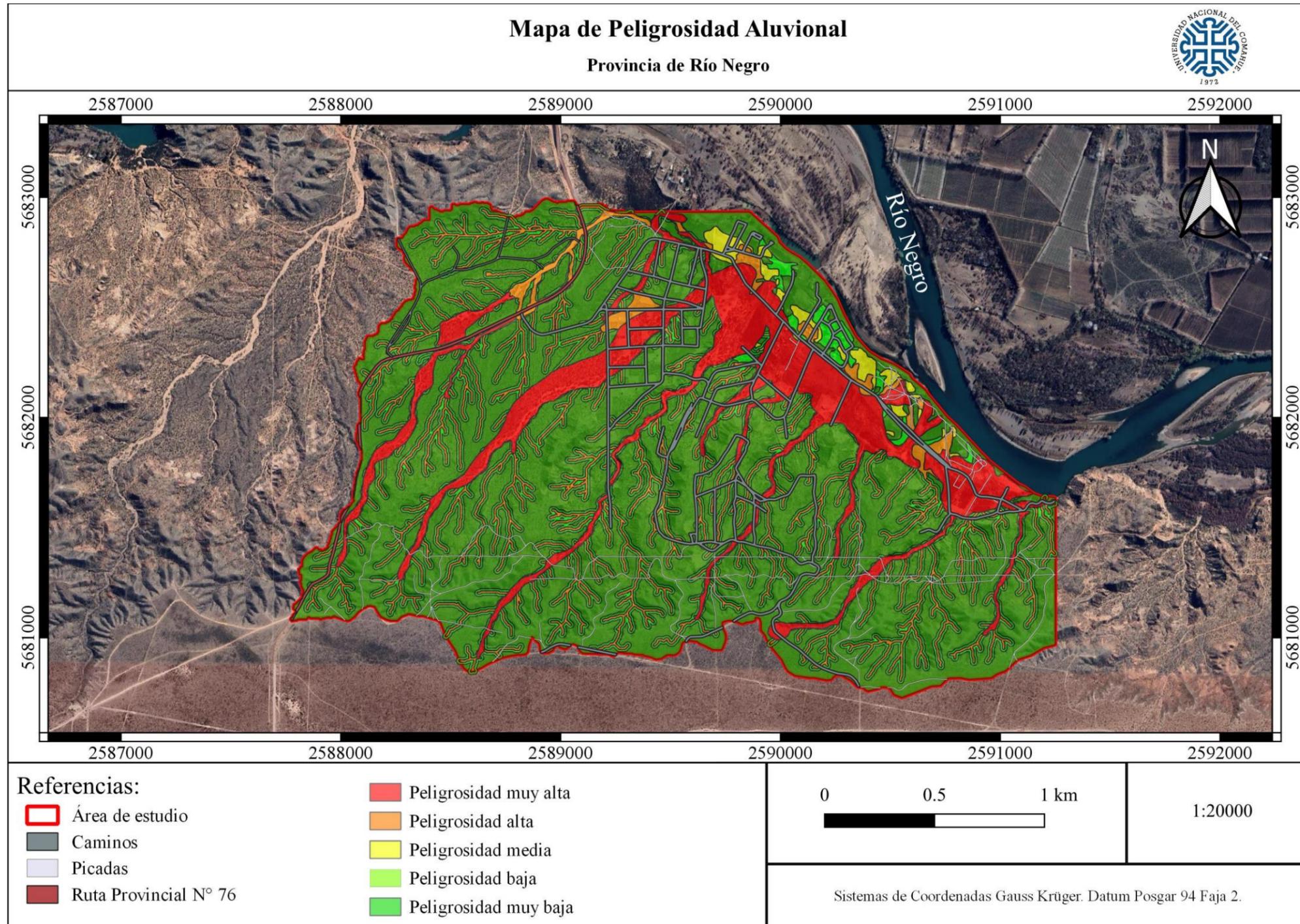


Figura 48: Mapa de peligrosidad aluvional del área en análisis.

## 10 Conclusiones

De acuerdo a los antecedentes analizados y los estudios realizados en este trabajo, los procesos aluvionales en los ambientes de barda revisten suma importancia y deben ser analizados en detalle en las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) con un estudio específico al respecto antes de ocupar determinados territorios, de forma de definir previamente pautas claras de ordenamiento territorial.

En el caso que nos ocupa de los loteos denominados “Río Barda” se elaboró su correspondiente EIA pero no se tomaron en cuenta los posibles peligros aluvionales. Las precipitaciones torrenciales combinadas con la geología, geomorfología, pendientes, suelos y cobertura vegetal presentes en el área de estudio originan caudales importantes, cuya velocidad de escurrimiento asociado a la granulometría de los sedimentos del sector en análisis, da como consecuencia una fuerte erosión y posterior sedimentación de un volumen importante de sedimentos, así como inundaciones en las zonas topográficamente más bajas. Los caudales estimados estarían contenidos por los cauces efímeros, excepto en el sector que se está expandiendo actualmente (loteos en la zona de pedimentos), donde no se siguieron pautas de ordenamiento territorial apropiadas por lo que se alteraron las condiciones naturales de drenaje. La implementación de la grilla de manzanas y calles en los loteos que se desarrollan, principalmente en la zona de pedimentos cubiertos con depósitos modernos, se está realizando de una forma totalmente anárquica y sin respetar los drenajes naturales. Muchos caminos están ubicados a favor de la pendiente del terreno. No hay normas en relación a que un porcentaje de la superficie de los lotes dejen la vegetación nativa del monte, actualmente en la mayoría se elimina totalmente dicha vegetación y se reemplazan por árboles, arbustos y herbáceas bajo riego. Los escurrimientos generados, junto a su probabilidad de ocurrencia, generan zonas de alta peligrosidad aluvional, con procesos erosivos en los cursos de canales efímeros. Respecto a la peligrosidad aluvional de los sectores topográficamente más bajos, cuyas pendientes van de nulas a casi nulas, está relacionada a inundaciones y/o encharcamientos con acumulaciones de material arcilloso. Como fue analizado, los eventos aluvionales en nuestra región se producen con una alta periodicidad. En el caso particular de la zona estudiada deberían realizarse acciones de mitigación de forma de tratar de minimizar los efectos peligrosos de los eventos aluvionales presentes.

## 11 Recomendaciones

La mitigación o medidas paliativas en relación al peligro aluvional, clásicamente se ha abordado mediante tres grandes grupos de medidas (Figura 49): **predictivas, preventivas y correctivas** (Ayala-Carcedo, 2002).

Las medidas **predictivas** buscan evitar la exposición y vulnerabilidad al peligro tratando de conocer dónde y cuándo se producirán eventos aluvionales.

Las medidas **preventivas** buscan evitar la exposición y vulnerabilidad al peligro tratando de conocer dónde se producirán los eventos aluvionales, reduciendo su peligrosidad, o minimizando la vulnerabilidad de los elementos expuestos (personas o bienes).

Las medidas **correctivas** buscan únicamente minimizar los efectos de los eventos aluvionales una vez que éstos ya han ocurrido.

En base a los resultados obtenidos se recomienda como medida **predictiva**: preparar a los habitantes para acceder a los datos meteorológicos de las estaciones cercanas (Estación Meteorológica Cipolletti, AERO Neuquén e INTA) con el fin de estar alertas y tomar los recaudos necesarios para enfrentar las futuras tormentas.

Como medidas **predictivas** se recomienda:

- Tener presente los cambios en las intensidades de precipitación anual, verificando los datos provistos por las estaciones meteorológicas Cipolletti, AERO Neuquén e INTA.
- Educar a los habitantes sobre como acceder y leer los datos obtenidos por las estaciones meteorológicas cercanas, así como aprender a visualizar las imágenes satelitales provistas por las mismas.

Como medidas **preventivas** se deberá tener en cuenta:

- Diagramar pautas de ordenamiento territorial que replanteen la grilla actual de red de manzanas y caminos, teniendo en cuenta principalmente los cauces efímeros que se disponen sobre la zona de pedimentos.
- Construir azudes (Fig. 50) en los cauces efímeros principales para contener el agua y hacer que esta escurra más lentamente. Estas construcciones deber ser observadas después de una tormenta, y si es necesario remover los sedimentos atrapados por las mismas.
- La entubación o construcción de una alcantarilla en el acceso a los loteos desde la RP N°76. Este camino se ve afectado por el flujo generado en la cuenca 1, en el que se vierte un caudal significativo en cada tormenta con una recurrencia mayor o igual a 5 años (Fig. 51).
- Realizar proyectos de alcantarillas para los cruces.
- Aumentar la cobertura vegetal con especies nativas del Monte en la superficie de las cuencas para disminuir los valores de Curva Número (CN) afín de disminuir la escorrentía superficial. En el mismo sentido en todos los lotes actualmente ocupados o en proceso de ocupación se observa una conducta tendiente a hacer una tala rasa de toda la vegetación nativa existente. Debería incluirse en las pautas de Ordenamiento Territorial una cláusula clara en relación a dejar entre los lotes, superficies (corredores) con vegetación nativa de Monte, de forma de mejorar la infiltración, disminuir la escorrentía y preservar apropiadas condiciones de “hábitat” para las especies de flora y fauna presentes. En los lotes ya desmontados se debería realizar tareas de revegetación con plantas nativas.
- Evitar la apertura de caminos normales a las pendientes para disminuir la formación de cárcavas. Así mismo analizar la reubicación de los caminos ya existentes que presentan dicha característica.

- Evaluar la posibilidad de implementar conocimientos sobre retención y utilización del agua pluvial para riego de parques y jardines, limpieza de interiores y exteriores, cisternas de inodoros y cualquier otro uso adecuado a sus características.
- Analizar y planificar la construcción de bermas de protección para desviar los caudales generados por las cuencas en estudio.
- Redimensionar los canales de guarda ya implantados en la zona en análisis.

Como medidas Correctivas se recomienda:

- Aplicar medidas de protección civil (emergencia, rescate y evacuación).
- Pago de pólizas de seguro.
- Declaración de zona catastrófica e indemnizaciones especiales.

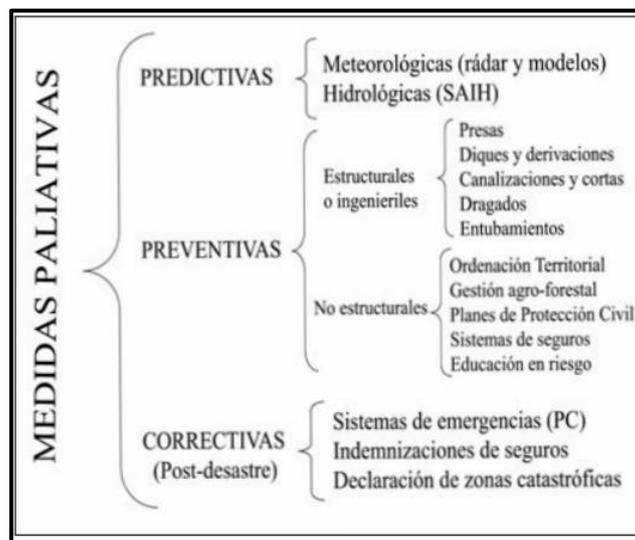


Figura 49: Clasificación de las medidas paliativas que son de aplicación para mitigar el peligro aluvional (Herrero et al 2009).



Figura 50: Azudes o espigones de contención.



*Figura 51: Acceso al barrio por la RP N°76 afectado por los caudales generados por la cuenca I en la tormenta del 19 de abril.*

## 12 Bibliografía

AIC 2020. El control de las crecidas. Sistema de Emergencias Hídricas y Mitigación del Riesgo. 8pp.

Ayala-Carcedo, F. J., & Cantos, J. O. (Eds.). (2002). Riesgos naturales (pp. 889-912). Barcelona: Editorial Ariel.

Azagra, A. (2006). Particularización al método de los coeficientes de escorrentía. Valladolid, España.

Bestvater C.R. y Casamiquela C. H. 1983. Distribución textural de los suelos del Alto Valle del Río Negro. EEA ALTO VALLE del INTA (Biblioteca INTA Alto Valle).

Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis de Potosí, México: Universitaria Potosina.

Cazau, L.B. y Uliana, M.A. 1973. El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina. V° Congreso Geológico Argentino. Actas 3: 131-163.

Chávez, R., y Caba, R. (2004). Carta de Peligrosidad Geológica 3969-IV GENERAL ROCA, Provincias de Río Negro y Neuquén. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 302.

- De Jager, M. J. (2015). An Anlysis of Soil Properties Associated with Badland and Gully Erosion in Rural Catchments of the Ngqushwa District, Eastern Cape Province (Doctoral dissertation, Nelson Mandela Metropolitan University).
- Dufilho, A.C., Horne, F., Navedo, R., 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, v.5, n.2, 198 pp.
- Etchichury L., Gatti, I., Fabio L., Membribe A., Murgida A M. 2016. Eventos extremos y riesgos. Diferencias y similitudes en políticas de gestión local del riesgo. Casos de ingeniero Jacobacci, Neuquén, La Plata y Quilmes. V Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas. Departamento de Geografía. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Comahue.
- FERNÁNDEZ, P., SEGERER, C.D., FERNÁNDEZ, J.M., DE SEGERER, E.C., DELGADOS, C. and BUK, E.M. Estudio hidrológico de cuencas aluvionales en la Provincia del Neuquén y curvas generalizadas para el cálculo hidráulico de estructuras viales. Buenos Aires: INCYTH-CRA, 1980.
- Gamez Morales, W. R. (2010). Texto básico de hidrología.
- Garrido, A. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales. 12. 121-177.
- Herrero, A. D., Isidro, M. L., Ballesteros, J. A., & Ruiz, V. (2009). Riesgos por avenidas e inundaciones fluviales. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 17(3), 254-263.
- HOLMBERG, E. L., 1898. La Flora de la República Argentina. Segundo Censo de la República Argentina 1: 385-474.
- Hugo, C.A., y Leanza, H.A. (2001). Hoja Geológica 3969-IV General Roca, Provincias de Río Negro y Neuquén. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 308.
- Karlin U.O., Karlin M.S., Zapata R.M., Coirini R.O., Contreras., A.M., Carnero M. La Provincia Fitogeográfica del Monte: límites territoriales y su representación. Universidad Nacional de Córdoba - Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2017.
- Keidel, J. 1917. Über das patagonische Tafelland und ihre ziehungen zu den geologischen ercheinungen in den Argentinischen Anden gebiet und Litoral. Zeitschrift der Deutsche Akademie Wiissenschaft 3(5-6): 219-245. Stuttgart.
- Lavacara, V., Villa, C., & Tapia, M. A. (2017). Trazas naturales, río seco-ciudad. IV Jornadas Patagónicas de Morfología, organizado por ARS Ptagonia, Sociedad de Estudios Morfológicos de la Argentina. Lugar General Roca, Río Negro.

Lässig, J.L., Marizza, M.S., Palese, C., Cogliati, M.G., Rapacioli, R., Bastanski, M.A.: Lluvias intensas en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén y su riesgo hídrico. Congreso Brasileiro de Meteorología. Belo Horizonte. 1995.

Leanza, H. A. y C. A. Hugo, 1999. Descripción Geológica de la Hoja 3969-IV, General Roca, provincias de Neuquén y Río Negro. Boletín Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.

Leanza, H.A. 1999. The Jurassic and Cretaceous terrestrial beds from Southern Neuquen Basin, Argentina. Field Guide. Instituto Superior de Correlación Geológica. INSUGEO. Serie Miscelánea 4:1-30. San Miguel de Tucumán.

Leanza, H.A. 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie 11 (2): 145-184. Buenos Aires.

López Alonso, R.; 2001. Consideraciones acerca de los límites de aplicación del método del número de curva del Soil Conservation Service. Montes, 66: 92-97

LORENTZ, P. G., 1876. Cuadro de la vegetación de la República Argentina. En: Napp, R. (Ed.). La República Argentina. Pp. 77-136.

Marizza, M. S., Rapacioli, R., & Vives, L. (2010). La problemática aluvional en el Alto Valle del Río Negro, Argentina. Tecnología y ciencias del agua, 1(1), 21-34.

Martínez de Azagra, A.; Navarro, J.; (1996). Hidrología forestal. El ciclo hidrológico. Servicio de publicaciones de la Universidad de Valladolid. Valladolid.

Massera, C. B. (2018). Modelo ambiental con Sistemas de Información Geográfica aplicado a la gestión de riesgo de desastres urbano: el caso Comodoro Rivadavia (Chubut, Argentina) 2008-2017.

Méndez, V., Zanettini, J.C., y Zappetini, E.O. (1987). Aspectos geológicos del Orógeno Andino Central de la República Argentina. X° Congreso Geológico Argentino. Actas 1: 181-184.

Papadakis, J. (1980). El clima: con especial referencia a los climas de América Latina, Península Ibérica, Ex-colonias Ibéricas y sus potencialidades agropecuarias (No. 551.5 P3y). Buenos Aires: Albatros. Petterssen, S. 1962. Introducción a la meteorología. Ed. Espasa – Calpe S.A. Madrid. 417p.

Petterssen, S. (1962). Introducción a la meteorología. Ed. Espasa – Calpe S.A. Madrid. 417p.

Ramos, V.A. (1981). Descripción Geológica de la Hoja 33c, Los Chihuidos Norte. Provincia del Neuquén. Servicio Geológico Nacional. Boletín 182: 1-103. Buenos Aires.

Rapacioli R., Marizza M. (2008). Hidrología aluvional en el alto valle del Río Negro (ARG).

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - UNL - Santa Fe – Argentina.

Rodríguez, A., & Muñoz, A. (2006). Síntesis Agrometeorológica para el período 1990-2004. EEA Alto Valle. Ed. INTA. Boletín Divulgación Técnica, (53), 38.

Vargas Rojas, R. (2009). Guía para la descripción de suelos (No. FAO 631.44 G943 2009). FAO, Roma (Italia).

Ventura, M. D., & Ramos Williams, C. A. (2020). Caracterización de la dinámica hídrica de las cuencas aluvionales diques Catini y Roca, ubicadas en General Roca, Río Negro (Bachelor's thesis, Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería).

### **Links:**

<http://www.redagraria.com/meteorologia/Alto%20Valle%20Clima.html>

<https://inta.gob.ar/documentos/caracteristicas-edafoclimaticas-los-valles-irrigados-de-la-norpatagonia>).

<https://inta.gob.ar/documentos/distribucion-textural-de-los-suelos-del-alto-valle>