

GEOMORFOLOGÍA Y DINÁMICA DEL RÍO QUEMQUEMTREU EN EL SECTOR DE EL BOLSÓN, PROVINCIA DE RÍO NEGRO.



Trabajo Final de Licenciatura en Geología

Autora: Rocío Belén Muñiz Fredes

Director: Dr. Alberto Caselli

Co Director: Mg. Ing. Martín Nini

2020

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Objetivos	6
1.2. Metodología	6
2. GEOLOGIA	9
2.1. Geología Regional.....	9
2.2. Geomorfología Regional	13
3.1. Elementos del sistema fluvial.....	18
3.1.1. Generalidades	18
3.2. Análisis morfométrico de la cuenca.....	19
3.3. Análisis morfológico del río Quemquemtreu.....	28
3.3.1. Generalidades	28
3.3.2. Resultados	34
3.4. Índice Hidrogeomorfológico (IHG)	46
3.4.1. Generalidades	46
3.4.2. Análisis hidrogeomorfológico	51
3.4.3. Impacto antrópico	54
3.5. Modelo de inundación.....	58
3.5.1. Fundamentación.....	58
3.5.2. Metodología	60
3.5.3. Resultado del análisis.....	62
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	67
AGRADECIMIENTOS	68
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
ANEXO I	72

RESUMEN

Se desarrolló el análisis de la geomorfología y dinámica del río Quemquemtreu en el sector de El Bolsón, provincia de Río Negro. Se trata de un río cordillerano que cruza varias localidades y desemboca en el río Azul para luego alcanzar las aguas del Lago Puelo. Para su estudio se utilizaron diversas técnicas, entre ellas, el análisis morfométrico de la cuenca a la que pertenece, el relevamiento con Vehículo Aéreo No Tripulado del tramo del río en estudio para la generación de un ortomosaico y modelo digital del terreno de detalle, con los que se generó un mapa geomorfológico. Estos productos permitieron generar un modelo de inundación del río a partir de valores de caudal según diferentes periodos de recurrencia, además se aplicó un Índice Hidrogeomorfológico para evaluar la calidad hidrogeomorfológica del río. El análisis en conjunto de estas técnicas permitió conocer la dinámica del río Quemquemtreu y su interacción con la comunidad aledaña.

ABSTRACT

The analysis of the geomorphology and dynamics of the Quemquemtreu river was developed in the El Bolsón sector, Río Negro province. It is a mountain river that crosses several towns and empties into the Azul River and then reaches the waters of Lago Puelo. For its study, different techniques were used, among them, the morphometric analysis of the basin to which it belongs, the survey with Unmanned Aerial Vehicle of the section of the river under study for the generation of an orthomosaic and digital model of the detailed terrain, with which generated a geomorphological map. These products allowed to generate a flood model of the river from flow values according to different recurrence periods, in addition a Hydrogeomorphological Index was applied to evaluate the hydrogeomorphological quality of the river. The joint analysis of these techniques allowed us to know the dynamics of the Quemquemtreu river and its interaction with the surrounding community.

1. INTRODUCCIÓN

El río Quemquemtreu atraviesa de norte a sur el paraje Mallín Ahogado, las localidades de El Bolsón y Lago Puelo, para finalmente desembocar en el río Azul, ya en provincia de Chubut (fig. 1.1). El río Quemquemtreu es un río aluvial de montaña que se forma en la unión de los ríos El Ternero y Los Repollos conformando la subcuenca del río Quemquemtreu. Esta pequeña subcuenca, con una superficie de 273 km², forma parte de la gran Cuenca Internacional de los ríos Puelo y Manso (fig. 1.2).

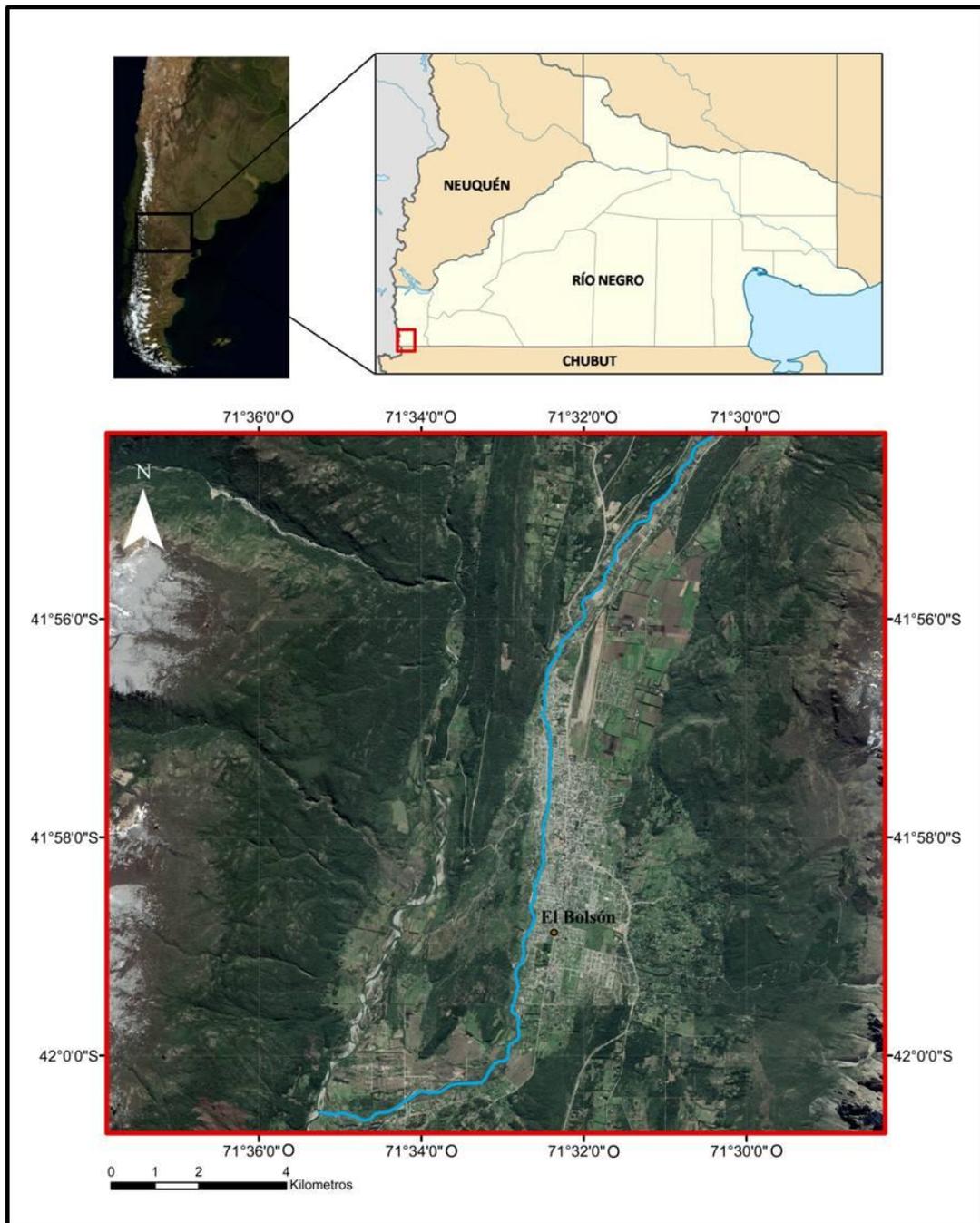


Figura 1.1. Ubicación del río Quemquemtreu en la provincia de Río Negro atravesando el valle de El Bolsón.

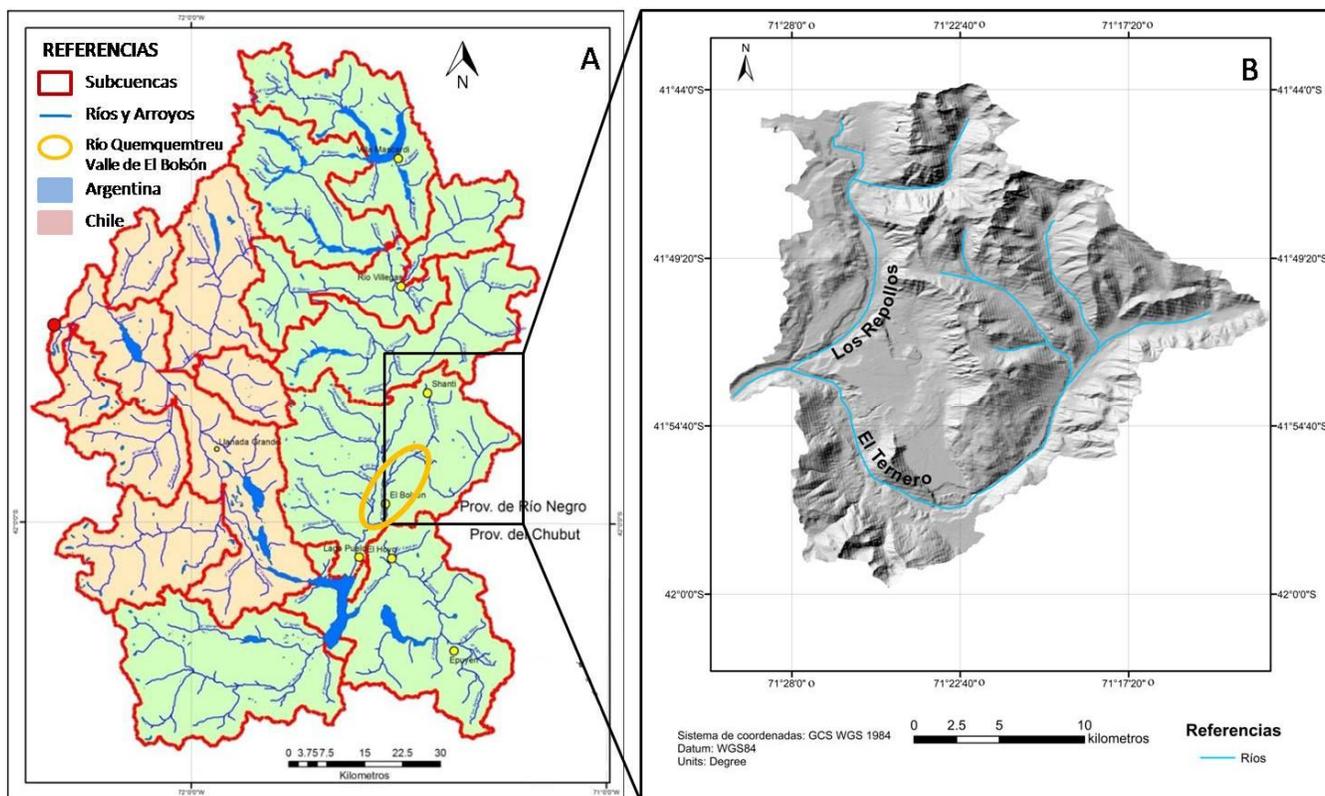


Figura 1.2. A. Cuenca Internacional de los ríos Puelo y Manso remarcando el valle de El Bolsón por donde fluye el río Quemquemtreu. B. Subcuenca del río Quemquemtreu. Modificado de Nini (2016).

La localidad de El Bolsón, ubicada al SO de la provincia de Río Negro, con un total de 20.000 habitantes (INDEC 2010) vive principalmente del turismo y la producción agrícola-forestal entre las que se destacan la producción de lúpulo, fruta fina y sus derivados, huertas orgánicas y aserraderos. Junto con los parajes Mallín Ahogado, Las Golondrinas, Entre Ríos y otras localidades ubicadas en la provincia de Chubut como Lago Puelo, El Hoyo, Epuyén, entre otras, forman parte de lo que se conoce como Comarca Andina del Paralelo 42°.

El rápido crecimiento urbano produjo la necesidad de ocupar terrenos sobre las riberas del río Quemquemtreu. Toda la ciudad está ubicada sobre la planicie de inundación del río y muchos de sus barrios se encuentran sobre ambos márgenes, a tan solo metros del cauce. Esta situación genera, en el momento de las crecidas, inundaciones sobre los barrios localizados en sus riberas.

El río Quemquemtreu presenta un régimen pluvio-nival que se rige por las precipitaciones y fuertes nevadas que ocurren en la zona. Con un módulo (caudal medio anual) de $9.7 \text{ m}^3/\text{s}$ es un río caudaloso que frente a abundantes precipitaciones se desborda e inunda las zonas aledañas a su cauce. Antecedentes históricos y testimonios de pobladores que han sufrido las inundaciones, muestran la problemática sobre el peligro geológico generado por habitar las zonas inundables.

Antecedentes históricos tomados de Nini (2016) muestran el registro de inundaciones en los años 1961, 1969, 1977, 1993, 1997, 1999, 2002 y 2004. Desde el año 1964, cuando se produjo una gran crecida del río,

comenzaron a formularse planes de ordenamiento en los que se realizaron acciones como control de laderas, tratamiento de los cauces principales, obras de atenuación de crecidas, entre otras. Barrios ubicados a orillas del río, como el 36° y 38° viviendas, se construyeron en el año 1994 sobre lo que era lecho del mismo. En los años 2002 y 2004 se produjeron fuertes inundaciones que generaron la evacuación de personas; años más tarde se realizaron tareas de dragado del río y defensas fluviales para evitar este tipo de sucesos (Sánchez¹, com.verb.).

Todos los cambios antrópicos generados tanto en el río como en su cuenca para su aprovechamiento, ya sea riego, extracción de áridos para construcción u obras para mitigar dichas crecidas sobre la población, alteran la dinámica natural del río, el cual tratará a largo plazo de recuperar su estabilidad y equilibrio ante la nueva situación.

1.1. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es la caracterización geomorfológica del río Quemquemtreu y el análisis de su dinámica mediante la aplicación de diferentes técnicas. Por una parte, la utilización de Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) para generar un ortomosaico y modelo digital del terreno de detalle para su caracterización y la generación de un modelo de inundación a través de softwares específicos. Por otra parte, conocer la calidad hidrogeomorfológica del río mediante la aplicación de un Índice Hidrogeomorfológico. Para dicho objetivo se pone en contexto su origen, el clima, el relieve y las modificaciones antrópicas con las que interactúa, para conocer su dinámica y de esta manera poder generar planes de manejo hacia el futuro.

1.2. Metodología

En primera instancia se realizó trabajo de gabinete previo a las tareas de campo, en donde se recopiló la bibliografía necesaria para el conocimiento del área de estudio. Esto incluye tanto trabajos regionales como locales del valle del río Quemquemtreu. Además informes inéditos y antecedentes históricos sobre inundaciones, evacuaciones, construcción de defensas, etcétera.

A través de imágenes satélites visualizadas por medio del software Google Earth se realizó el primer reconocimiento visual del valle y cauce del río Quemquemtreu para programar las actividades en el terreno.

Los trabajos de campo consistieron en dos tareas principales:

i) El relevamiento del área cercana al río con VANT desde el puente de la Ruta Nacional N°40 hasta la confluencia del río Quemquemtreu con el río Azul. Esta tarea tuvo como objetivo obtener un ortomosaico y modelo digital de elevación (MDE) del terreno. El mismo se realizó con un VANT Phantom 4 pro v.2.0, a una altura de 100 metros, y un solapamiento de 80% en línea de vuelo y 60% lateral, utilizando el software DJI Ground Station Pro. Para obtener mayor precisión se seleccionaron 8 puntos de control repartidos a lo largo de toda el área. Los puntos de control se tomaron con GPS diferencial TRIMBLE R3 (fig. 1.3 a y b).

¹ Stella Sánchez, amiga y ciudadana de la localidad de El Bolsón.

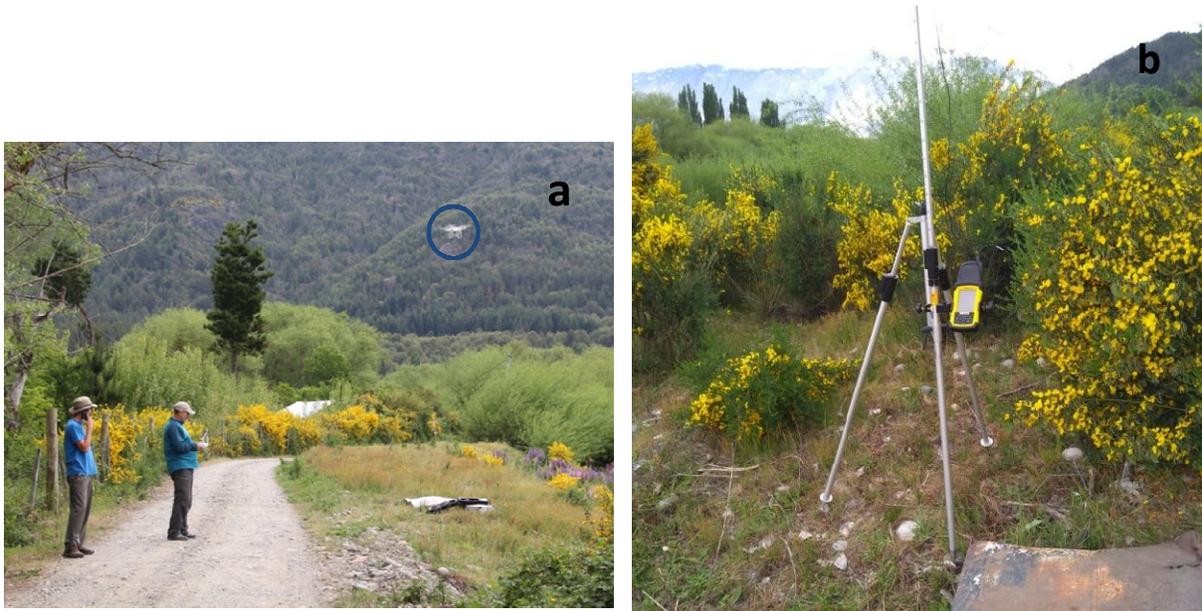


Figura 1.3. (a) Relevamiento con VANT. (b) Toma de puntos de control con GPS diferencial TRIMBLE R3.

ii) Las observaciones y toma de datos en el terreno vinculado a la dinámica del río Quemquemtreu, como la presencia de rápidos, barras, granulometría de los sedimentos tanto del lecho como de las barras, profundidad, vegetación ribereña y los diferentes tipos de construcción sobre las márgenes de este (casas, puentes, pasarelas, defensas, etc). Se realizó un registro fotográfico con cámara digital y de forma aérea con el VANT.

Posteriormente, en el trabajo de gabinete se realizaron las siguientes tareas:

i) con el software Arcgis 10.5 (licencia gratuita otorgada por ESRI hasta el 31 de Agosto de 2020) se mapeo y analizó la subcuenca del río Quemquemtreu, calculando sus parámetros morfométricos como área, perímetro, coeficiente de forma, coeficiente de compacidad, longitud del cauce más largo, curva hipsométrica, red de drenaje, entre otros, así como las pequeñas subcuencas que componen a su vez a la subcuenca del río Quemquemtreu. Esto se trabajó sobre un MDE con resolución de 30 metros descargado del Instituto Geográfico Nacional (IGN). También se confeccionaron mapas regionales de la geología y geomorfología de la zona, también por medio de MDE de 30 metros.

Además se realizó un mapa geomorfológico de detalle del río Quemquemtreu que fue dividido en tres partes para una mejor visualización. Esta vez, el MDE utilizado fue el generado a través de VANT con el software Agisoft (Licencia del Dr. Alberto Caselli), con una resolución de 1 metro.

ii) Procesamiento de las imágenes obtenidas por el VANT, con el programa Agisoft Metashape para la realización de un ortomosaico de detalle, de cm/px y un MDE exportado a una resolución menor a la obtenida de 1 metro para poder trabajar con los softwares específicos.

iii) A partir del ortomosaico y MDE de detalle, se realizó un mapa geomorfológico del río Quemquemtreu. Además, con el ortomosaico acompañado de imágenes satelitales de Google Earth Pro, actuales y antiguas, se estudió la geomorfología del río. Para ello se lo dividió en segmentos dependiendo de las características geomorfológicas y a cada uno se le aplicó el índice de sinuosidad.

iv) Con el software ArcGIS 10.5 y el complemento Hec GeoRAS y su herramienta de Pre-procesamiento, se procedió al mapeo de la geometría del río (cauce, orillas, secciones transversales y obstáculos antrópicos) para luego exportarlo al programa HEC RAS 5.0.6 y de esta manera lograr un modelado de inundación para el río Quemquemtreu.

v) Finalmente se analizó la calidad hidrogeomorfológica del río en el tramo en estudio. Este tramo, de 10 kilómetros aproximadamente se dividió en dos segmentos, basado en las diferencias geomorfológicas entre ambos sectores. El análisis se realizó a partir de un índice denominado Índice Hidrogeomorfológico (IHG) que se basa en la observación y análisis de tres grandes grupos: calidad funcional del sistema, calidad del cauce y calidad de las riberas (Ollero *et al.* 2007). Cada uno de ellos presenta diferentes parámetros que son los que se evalúan con la finalidad de caracterizar el estado hidrogeomorfológico del río.

2. GEOLOGIA

2.1. Geología Regional

El área de estudio comprende mayormente el SO de la Hoja Geológica 4172-IV San Carlos de Bariloche, provincia de Río Negro (Giacosa y Heredia, 2001) y parte del NO de la Hoja Geológica 4372 – III Esquel, provincia del Chubut (Lizuiain, 2010). El presente capítulo se basa en la estratigrafía y descripción de la Hoja San Carlos de Bariloche.

La estratigrafía del área se resume en las figuras 2.1 y 2.2, basado en los antecedentes de la región, utilizando la nomenclatura más actualizada.

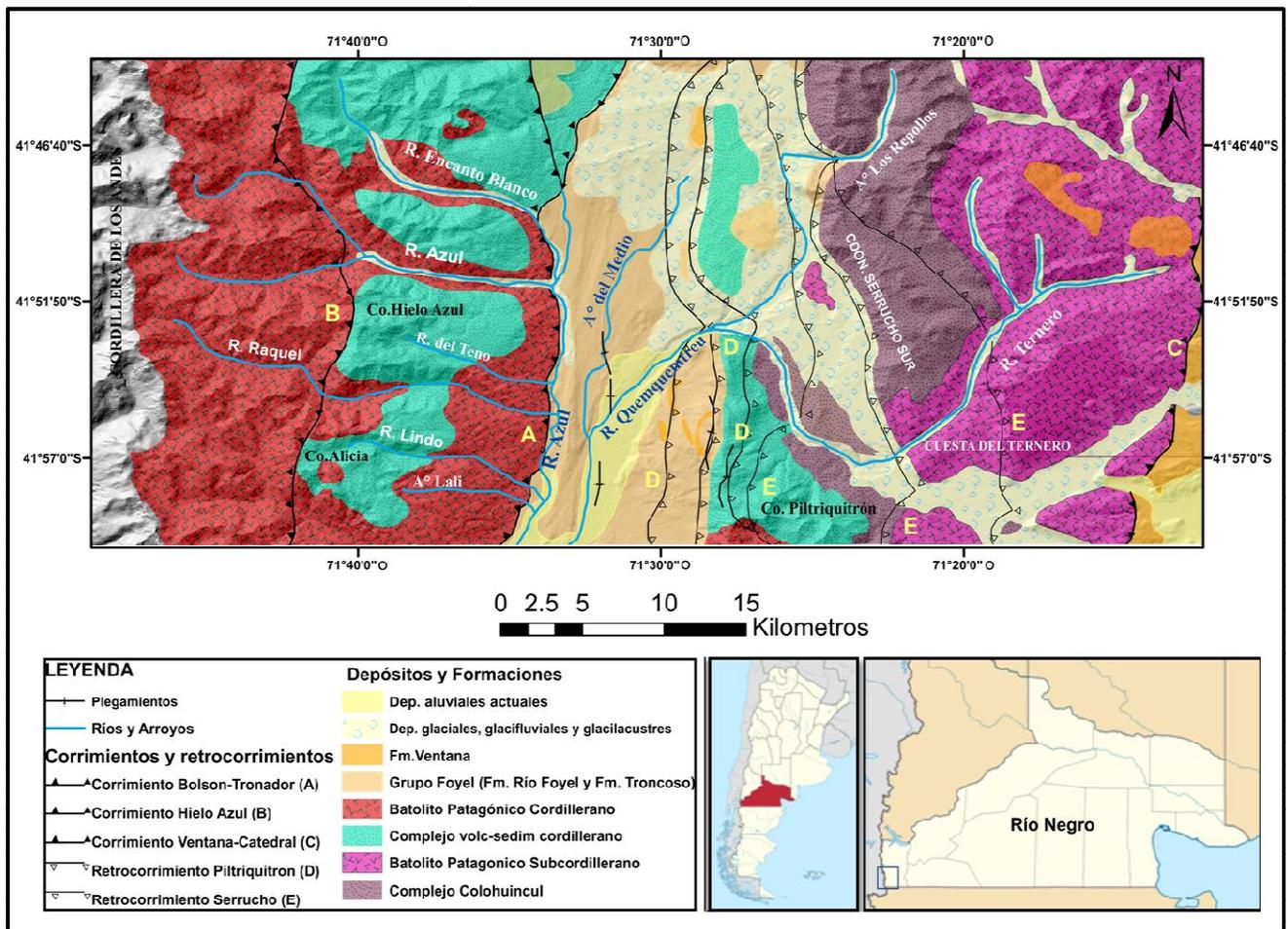


Figura 2.1. Mapa geológico estructural regional del área de estudio en el SO de la provincia de Río Negro. Modificado de Giacosa y Heredia (2001).

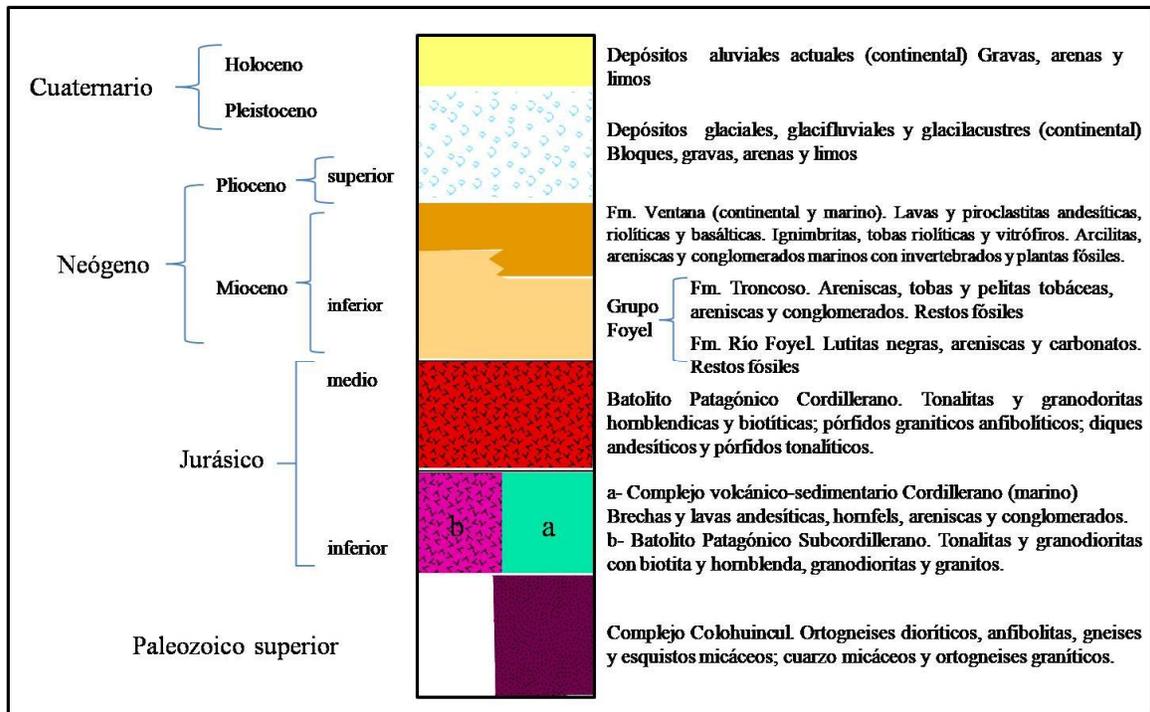


Figura 2.2. Columna estratigráfica del mapa geológico del área de estudio.

La estratigrafía de la región se inicia con un basamento ígneo – metamórfico de ortogneises de grado metamórfico medio a alto e intrusión de granitoides tardiotectónicos denominado Complejo Colohuincul, por Dalla Salda *et al.* (1991) para referirse a las rocas ubicadas en el sector cordillerano. En el sector oriental precordillerano esta unidad es denominada como Formación Cushamen (Volkheimer, 1964). Inicialmente Dalla Salda *et al.* (1991) ubicaban a esta unidad en el Paleozoico inferior; estudios recientes de Bechis *et al.* (2014) sitúan a dicha unidad en el Paleozoico Superior. En el área de estudio integra la totalidad del Cordón Serrucho (norte y sur), una serranía al este del río El Ternero y el faldeo oriental del Cordón Piltriquitrón (Giacosa y Heredia, 2001).

En el sector preandino por encima del basamento y en contacto tectónico, se encuentran depósitos de piroclastitas y sedimentitas correspondientes al Complejo Volcánico - Sedimentario; como también intrusiones de composición tonalítica y granodiorítica pertenecientes al Batolito Patagónico Subcordillerano. Giacosa y Heredia (2001) y Bechis *et al.* (2014) atribuyen una edad jurásica inferior para ambas unidades. Por otro lado, en la mayor parte de las cumbres del sector andino se encuentran granitoides pertenecientes al Batolito Patagónico Cordillerano (Gordon y Ort, 1993). Estudios previos de diversos autores como Lizuain (2010) y Rapela *et al.* (1987) ubican a estos granitoides en el Cretácico Superior, describiéndolo como un pulso más joven del mismo proceso que originó los granitoides del Batolito Patagónico Subcordillerano. Sin embargo, estudios actuales ubicarían al Batolito Andino Patagónico en el Jurásico Medio (Bechis *et al.* 2014).

Sedimentitas cenozoicas afloran en el valle de El Bolsón bajo la denominación de Formación Mallín Ahogado (Diez y Zubia, 1979), quienes distinguen dos secciones, una inferior fosilífera de carácter marino y una superior transicional hacia un ambiente puramente continental (Diez y Zubia, 1981), a las que ubican con una edad entre el Eoceno - Oligoceno. Estudios recientes, demuestran una equivalencia entre la Formación Mallín Ahogado con las formaciones Río Foyel y Troncoso, pertenecientes al Grupo Foyel (Bechis *et al.* 2014). La Formación Río Foyel está compuesta de lutitas negras, areniscas y carbonatos, mientras que la Formación Troncoso se compone de areniscas verdes, tobas y pelitas tobáceas, areniscas y conglomerados, ambas con una rica fauna marina (Bechis *et al.* 2014). El conjunto de sedimentitas forma parte del relleno de uno de los depocentros pertenecientes a la Cuenca del Ñirihuau, ubicado en el valle de El Bolsón (Tobal *et al.* 2012) (fig. 2.3). Bechis *et al.* (2014) proponen una edad miocena para la secuencia sedimentaria.

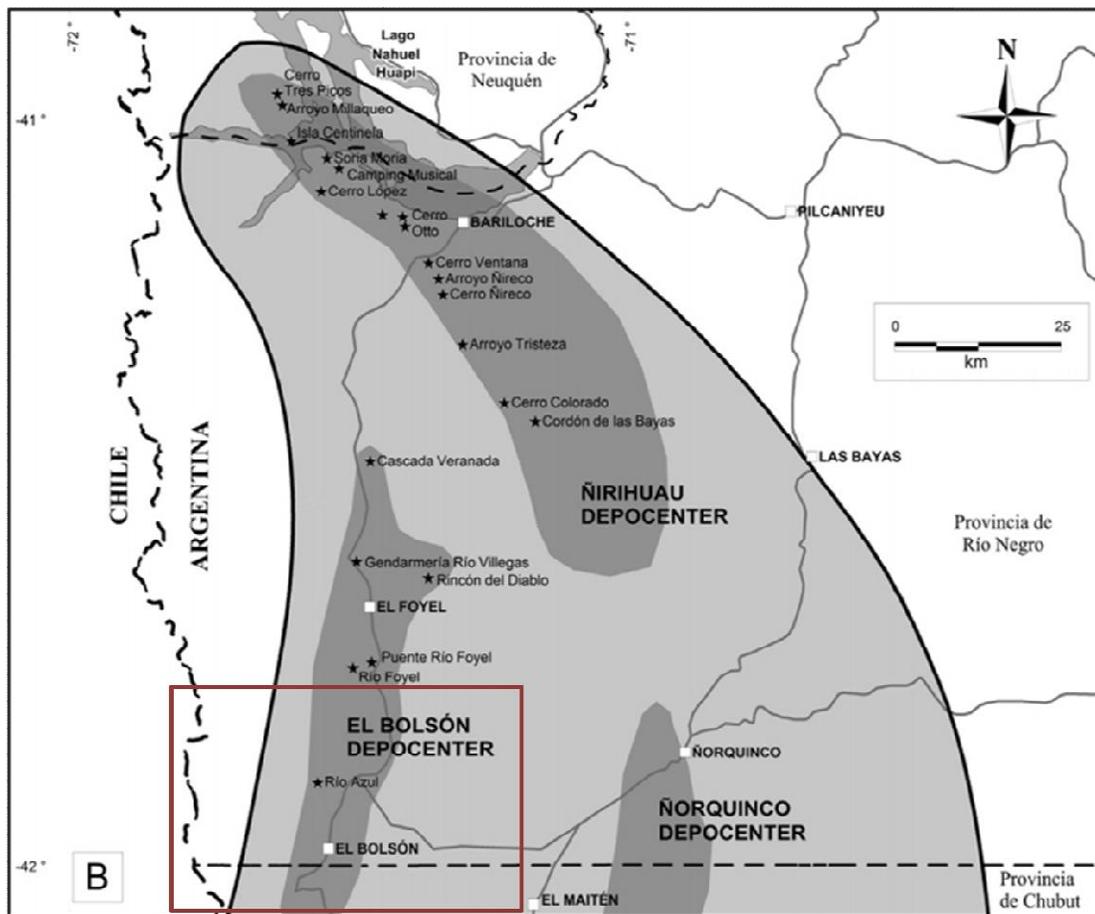


Figura 2.3. Sector norte de la Cuenca del Ñirihuau mostrando sus depocentros. En rojo se demarca el área de estudio.

Las sedimentitas del grupo Foyel se encuentran en contacto con un conjunto de rocas volcánico – sedimentarias pertenecientes a la Formación Ventana, término propuesto por Gonzalez Bonorino (1973) para referirse a la unidad inferior del Grupo Nahuel Huapi. Sus facies volcánicas están representadas por lavas y piroclastitas de composición andesítica, riolítica y basáltica; y cuerpos subvolcánicos como diques y

filones capa de la misma composición. Las facies sedimentarias incluyen arcilitas, areniscas y conglomerados marinos y continentales (Giacosa y Heredia, 2001). Estos autores, basándose en estudios radiométricos previos asignaron a la Formación Ventana una edad oligocena, aunque posteriormente Bechis *et al.* (2014) de acuerdo a observaciones sobre la exposición completa del Grupo Nahuel Huapi sugieren una edad miocena. Resultando de esta manera una depositación coetánea entre el Grupo Foyel y el Grupo Nahuel Huapi, ambos grupos depositados en dos depocentros diferentes dentro de la Cuenca del Ñirihuau, pero que en algún momento habrían estado conectados.

En el área de estudio se encuentran depósitos glaciales, glacifluviales y glacialacustres asignados al Plioceno Superior a Pleistoceno Superior (Giacosa y Heredia, 2001). Su génesis se relaciona a glaciares provenientes del norte que se encauzaron por el valle de El Bolsón hasta el Lago Puelo (Giacosa y Heredia, 2001). Estos depósitos consisten en sedimentos estratificados de planicies fluvioglaciales que cubren gran parte del valle, con espesores visibles de entre 100 y 200 metros (Gonzalez Bonorino, 1944). Diez y Zubia (1981) describieron una sucesión de bloques, gravas, arenas y lentes de arcilla en bancos bien estratificados. Entre los depósitos no estratificados pueden encontrarse morenas con diseño en arco, compuestas por arenas y limos con bloques de hasta 2 metros de diámetro de granitos y gneises (Giacosa y Heredia, 2001).

Ruiz (2013) realizó un exhaustivo análisis geomorfológico, sedimentológico y crono-estratigráfico de depósitos glaciogénicos en la Cordillera de los Andes y zonas adyacentes entre el paralelo 42° y 43° desde la última glaciación. Desde el Pleistoceno Superior la región estuvo englasada dando lugar a los rasgos erosivos y depositacionales glaciogénicos que se detallan en la sección de Geomorfología.

Finalmente, desde el Holoceno hasta la actualidad, se depositan materiales aluviales que se componen de gravas, arenas y limos ubicados en la planicie de inundación actual y en algunos niveles de terraza más antiguos. Se ven bien desarrollados tanto en los ríos del sector preandino como en el sector andino (Giacosa y Heredia, 2001).

Desde el punto de vista estructural, el área de interés está ubicada en la Faja Plegada y Corrida de los Andes Patagónicos (Giacosa y Heredia, 1999, 2000). Esta faja plegada y corrida se caracteriza por una serie de corrimientos con vergencia este, acompañado de retrocorrimientos de vergencia opuesta. El valle de El Bolsón se ve afectado por el corrimiento Bolsón-Tronador y el retrocorrimiento Piltriquitrón; el primero superpone los granitoides del Batolito Patagónico sobre las sedimentitas del Grupo Foyel (Giacosa y Heredia, 2001). Estos episodios tectónicos han deformado las sedimentitas formadas en la primer etapa del levantamiento andino, generando un sinclinal que hace que la actual red de drenaje tienda a desplazarse hacia el oeste (fig. 2.1). Este estructuramiento da origen a dos regiones bien definidas, una cordillerana y otra subcordillerana (Giacosa y Heredia, 2001).

2.2. Geomorfología Regional

Los sectores cordillerano y precordillerano del área de trabajo, fueron modelados por eventos glaciarios durante el Cuaternario y posteriormente modificados por la actual red de drenaje y procesos de remoción en masa. El mapa de la figura 2.4 muestra los rasgos geomórfológicos regionales que involucra el área de estudio.

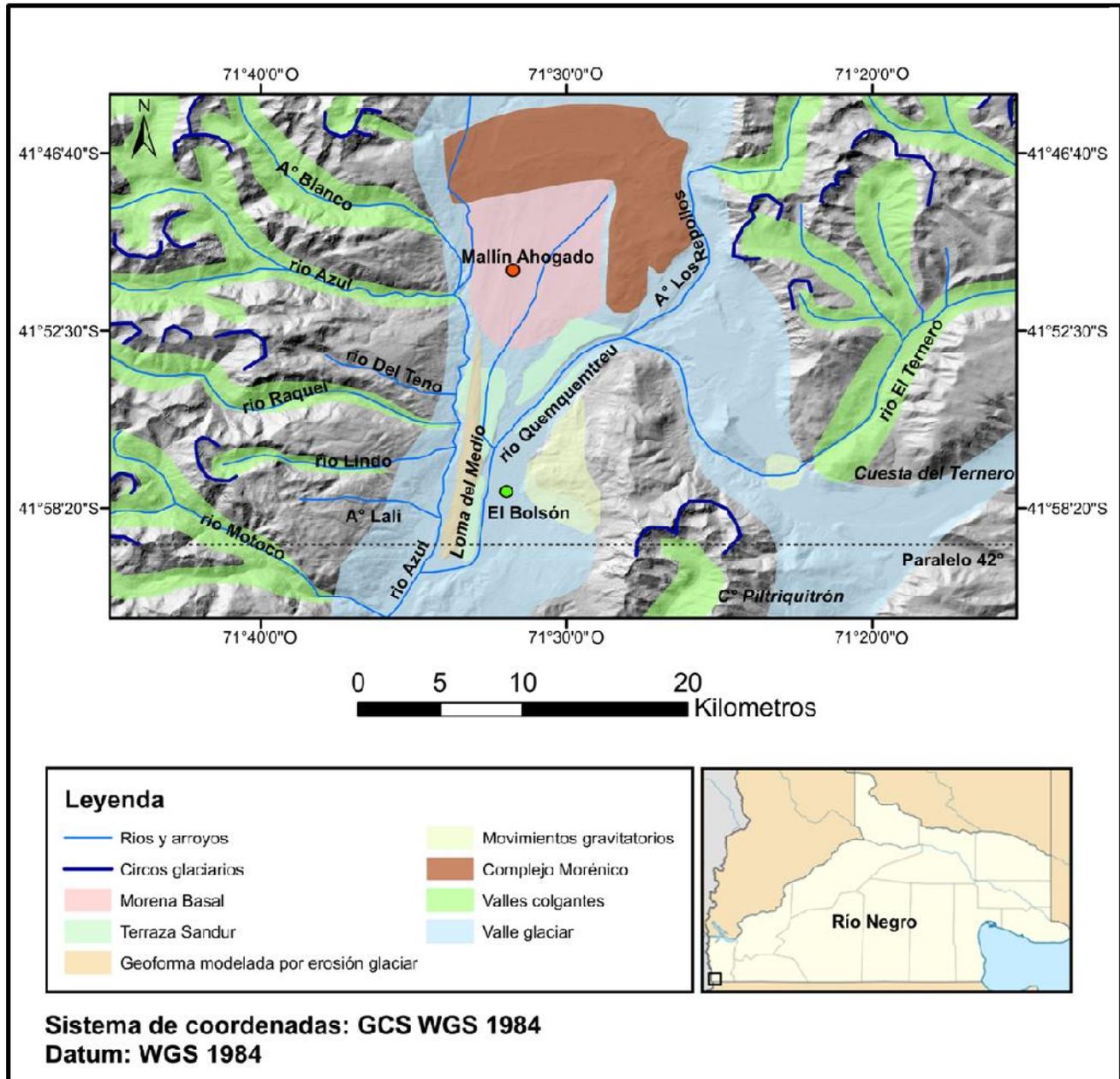


Figura 2.4. Mapa geomorfológico regional de los valles de los ríos Azul y Quemquemtrey.

En este mapa pueden observarse las siguientes geoformas:

Circos glaciarios: son las grandes depresiones semicirculares de forma cóncava, que pueden observarse en las cumbres de las montañas (Elorza, 2008). Estos han sido ocupados o pueden estarlo por hielo, y en varios casos se encuentran lagunas en su interior. En el área descrita, en los cerros Piltriquitrón, Serrucho,

Alicia, Hielo Azul, entre otros, su tamaño varía entre 1 y 2 kilómetros de diámetro, y esto depende, al igual que su forma, del tipo de roca en el cual se formaron (Elorza, 2008).

Valle glaciar principal: son formados por grandes masas de hielo que al avanzar sobre el terreno, excavan grandes artesas de cientos de metros y que al retirarse dejan un valle con perfil transversal en forma de “U” (Elorza, 2008). En el área puede reconocerse un gran valle glaciar que actualmente corresponde a las planicies fluviales de diversos ríos, entre ellos los ríos Azul, Quemquemtreu, Del Medio y Los Repollos. El perfil longitudinal de un valle glaciar se caracteriza por presentar irregularidades como cuencas y umbrales (Elorza, 2008). Las cuencas al retirarse el hielo pueden convertirse en lagos, como el Lago Puelo, alimentado entre tantos, por los ríos mencionados anteriormente.

Valles colgantes: en este caso, son valles glaciares donde la excavación es menor que en el valle principal, por lo que una vez que se retira el hielo, quedan expuestos como valles colgantes o secundarios, que alimentan al valle principal (Elorza, 2008). En el área de estudio pudo observarse que por todos los valles colgantes actualmente fluyen diversos ríos y arroyos.

Morenas: son depósitos glaciares de till mal clasificados y de diverso tamaño de grano (Elorza, 2008). Presentan diferentes tipos de modelados dependiendo de la acción glaciar, entre ellos se pueden distinguir, morenas terminales, laterales y centrales. Las dos primeras indican posiciones de avance o retroceso del glaciar mientras que las morenas centrales se forman en la unión de dos glaciares de valle (Elorza, 2008). También existen las morenas basales o de fondo, que indican acción subglaciaria, es decir, el suministro de sedimentos se origina del deshielo de la base del glaciar. Generan una topografía irregular de lomadas y bajos (Elorza, 2008). La delimitación de las morenas en el área de estudio se basó en las observaciones a través de imágenes satelitales y en mapa geomorfológico de Ruiz (2013). Puede observarse un Complejo Morénico ubicado al norte de Mallín Ahogado (paraje rural ubicado a 15 km al norte de El Bolsón) que conforman una divisoria de aguas entre las cuencas del río Foyel y Azul.

Geoformas de erosión glaciaria: se observan rasgos, como en el caso de la Loma del Medio, que han sido sometidos a la erosión glaciaria. El pliegue conocido como Loma del Medio es anterior a la glaciación y ha sido clasificado por Ruiz (2013) como una zona de abrasión glaciaria.

Terrazas Sandur: formadas por sedimentos fluvio-glaciales, generalmente gravas y arenas, provenientes de la fusión de los glaciares. Estos forman extensas llanuras conocidas como sandur u outwash (Elorza, 2008).

Movimientos gravitatorios: pudieron observarse depósitos de movimientos en masa como cono de detritos o deslizamientos rotacionales, muchos de los cuales están sumamente vegetados, lo que los hace difícil de caracterizar.

La formación de valles en “U” es evidencia de que los glaciares han modelado el paisaje, y hoy en día pueden encontrarse pequeños glaciares en las nacientes de varios ríos de la cordillera que fluyen por valles glaciarios. Del estudio de miles de geoformas, Ruiz (2013) pudo reconstruir la historia paleoclimática en siete etapas (fig. 2.5). La primera corresponde al Último Máximo Glacial (LGM) de un tiempo de 27 a 22 Ka, la segunda al primer evento de deglaciación (17 a 15 Ka), la tercera, una etapa de reversión (14 a 12

Ka), donde la deglaciación fue brevemente interrumpida y el frente de los glaciares avanzó o se mantuvo estable. La cuarta etapa corresponde a un segundo evento de deglaciación (12 a 6 Ka). Las etapas 5 y 6 indican neoglaciaciones (6 a 2 Ka), con el avance de los glaciares de valle, para finalmente culminar en la etapa 7 representando la actualidad, donde se observa un retroceso de los glaciares probablemente relacionada al aumento de la temperatura global.

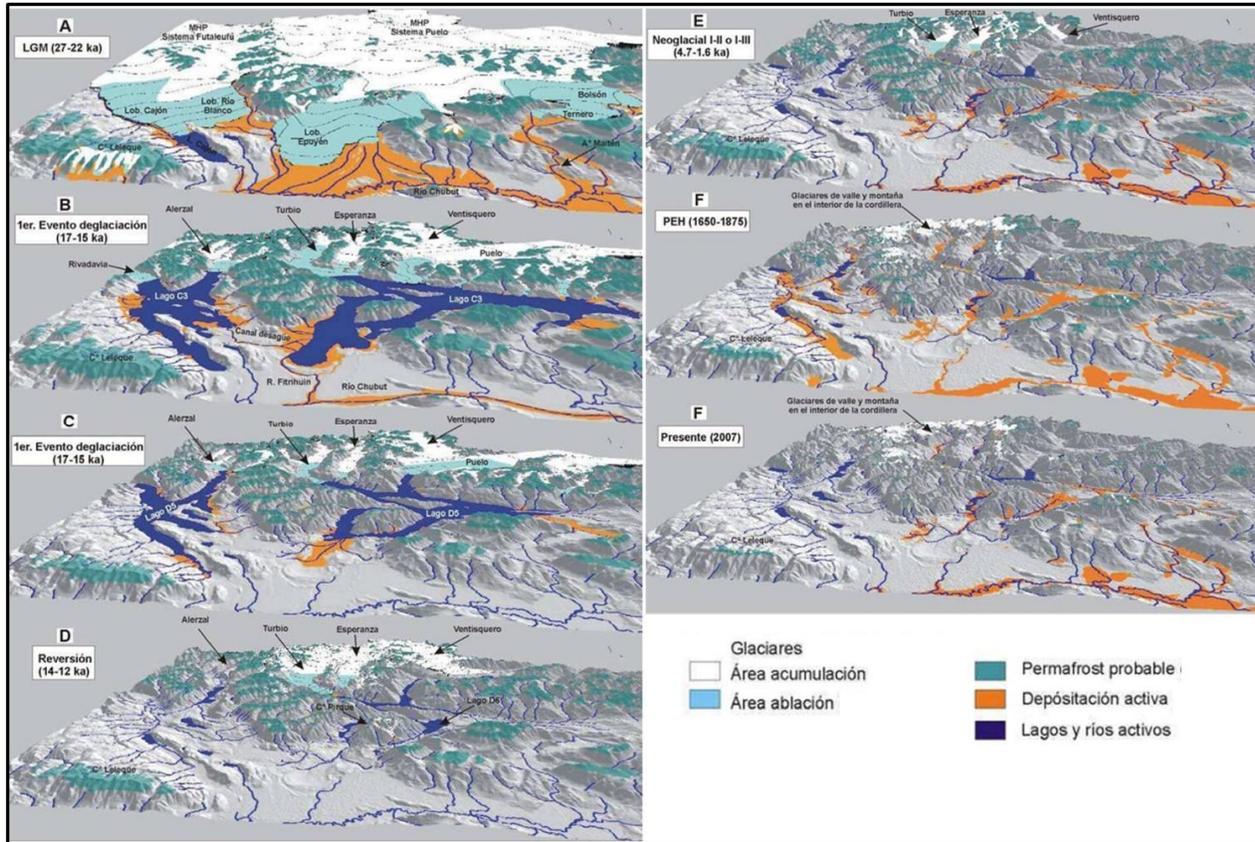


Figura 2.5. Reconstrucción paleoclimática de la zona cordillerana y extraandina entre los 42° y 43° de latitud sur. Desde el Último Máximo Glacial hasta la actualidad. Tomado de Ruiz (2013).

Para la región de estudio que abarca el valle de El Bolsón, Ruiz (2013) describe cinco sistemas de paisaje:

- Sistema Subglaciar del Manto de Hielo Patagónico (A): representa áreas con abrasión glaciaria y los elementos que lo componen son los lineamientos de flujo y morenas basales (fig. 2.6).
- Sistema de glaciares de descarga del Manto de Hielo Patagónico (B): se representa por la combinación de geformas generadas por procesos supraglaciares y proglaciares. Entre los elementos que se pudieron distinguir mediante imágenes satelitales se encuentran complejos morénicos con sus crestas morénicas y terrazas sandur (fig. 2.6).

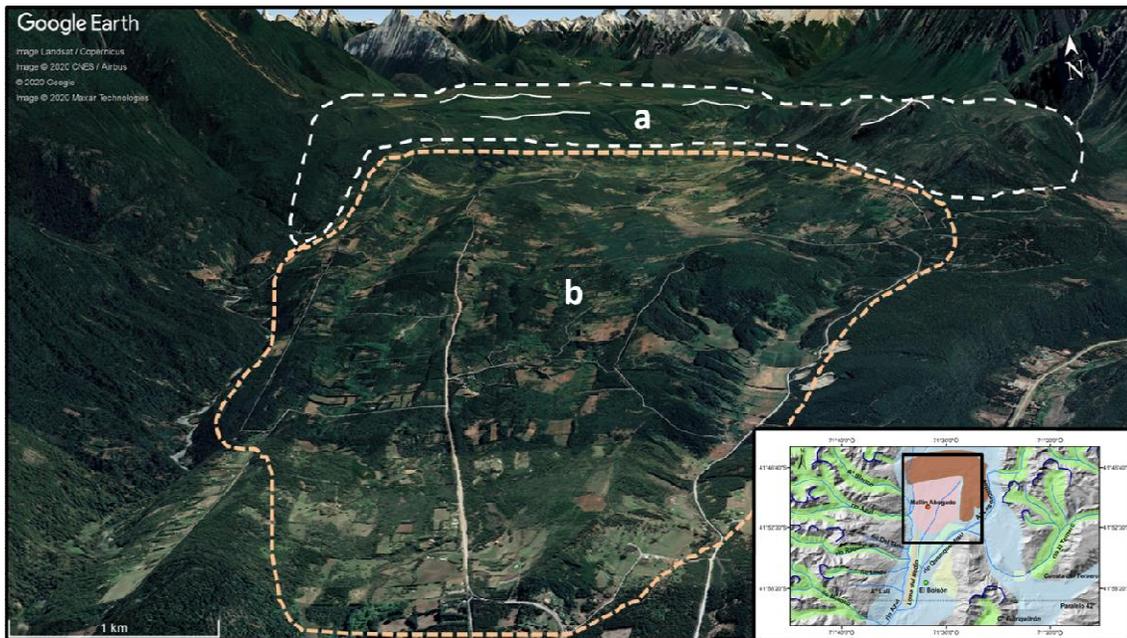


Figura 2.6. Imagen tomada del software Google Earth mostrando dos rasgos geomorfológicos. (a) Complejo morénico. (b) Morena Basal.

- Sistema de lagos proglaciarios endicados por morenas (C): representa geoformas que han sido generadas por procesos asociados a lagos proglaciarios que estaban contenidos por morenas terminales del sistema anterior (sistema de glaciares de descarga). Entre las geoformas que se pudieron distinguir por medio de imágenes satelitales se destacan terrazas sandur y deslizamientos en masa (fig. 2.7).

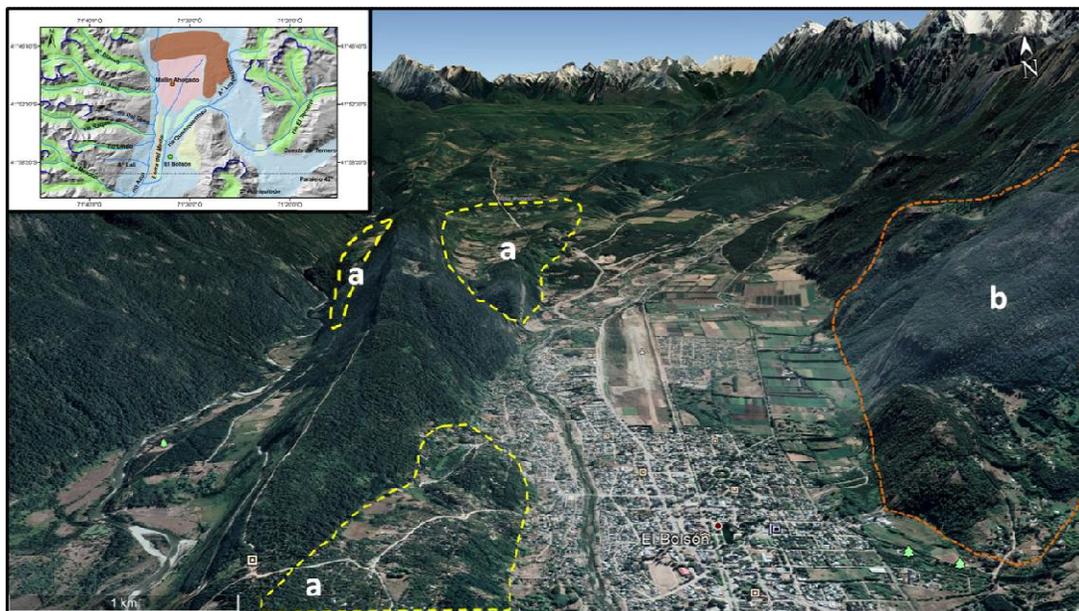


Figura 2.7. Imagen tomada del software Google Earth mostrando dos rasgos geomorfológicos. (a) Terrazas Sandur. (b) Remoción en masa.

- Sistema de lagos proglaciarios endicados por glaciares (D): a diferencia del sistema C donde los lagos estaban contenidos por morenas, los lagos proglaciarios de este sistema tenían un nivel de base más

elevado, controlado por los glaciares de valle que ocupaban estas zonas. En este sistema también se reconocieron mediante imágenes satelitales terrazas sandur (fig. 2.8).

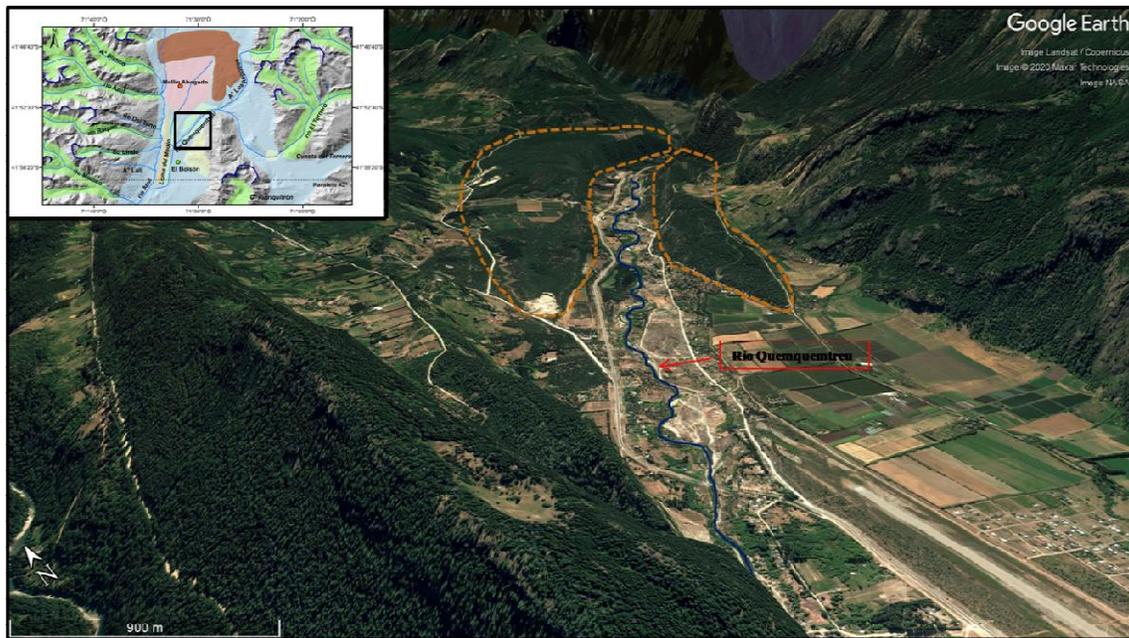


Figura 2.8. Imagen tomada de software Google Earth mostrando terrazas sandur pertenecientes al sistema D. Entre ambas terrazas puede apreciarse el río Quemquemtreu.

- **Sistemas fluviales:** representa geformas generadas por procesos fluviales pasados y actuales. Entre los elementos observados se distingue la planicie de inundación y cono de talud (fig. 2.9).

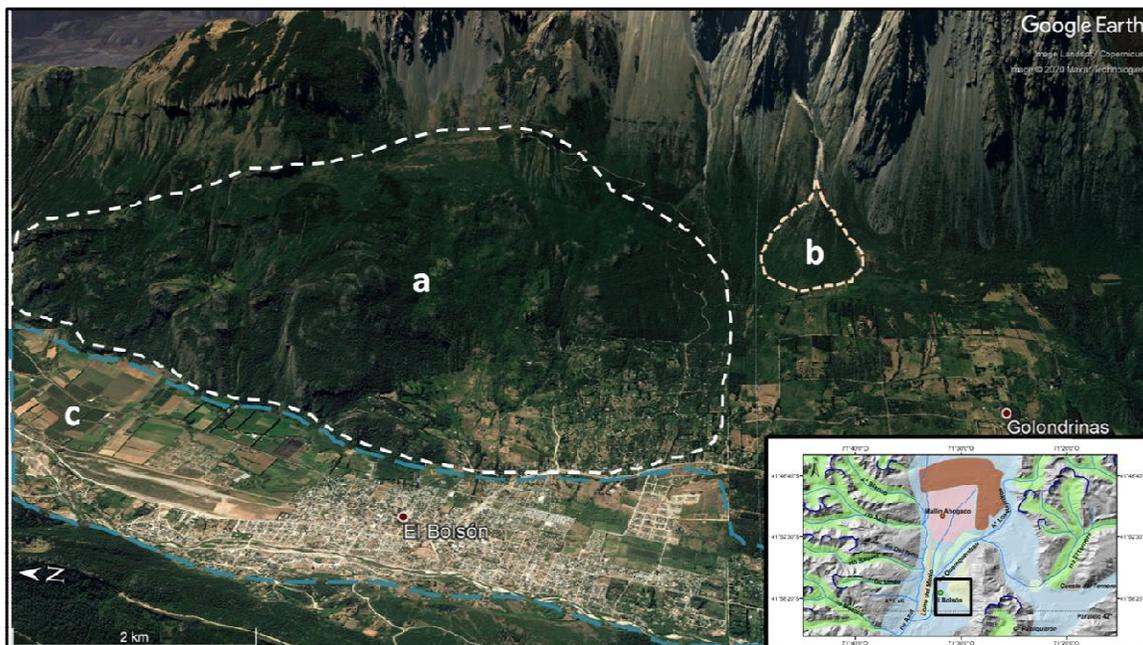


Figura 2.9. Imagen tomada de software Google Earth mostrando tres rasgos geomorfológicos. (a) Remoción en masa. (b) Cono de Talud. (c) Planicie de inundación del río Quemquemtreu.

3. CARACTERIZACIÓN Y DINÁMICA DEL RÍO

3.1. Elementos del sistema fluvial

3.1.1. Generalidades

Los ríos drenan gran parte de la superficie terrestre y sus distintas morfologías y variedades reflejan la gran cantidad de diferentes entornos en los que se encuentran. Schumm (1977) considera al tiempo, el relieve, la geología y el clima como las variables que pueden modificar la dinámica y morfología del cauce, y en base a éstas, surgen variables secundarias como vegetación, hidrología y morfologías de la red de drenaje, de la cuenca, del valle, el canal y sistema depositacional.

Un río funciona como un sistema natural que en determinados momentos alcanza el equilibrio entre sus factores medioambientales; cualquier modificación en alguno de sus parámetros genera un cambio en la dinámica y morfología del cauce (Garzón, 1987)

Para que se inicie un sistema fluvial se debe generar una concentración de agua superficial en el terreno, donde a partir de allí la cuenca hidrográfica se adapta para recibir y distribuir una cierta cantidad de agua; en este momento comienza a configurarse la red de drenaje (Garzón, 1987).

Charlton (2008), a su vez considera al sistema fluvial como un sistema abierto y activo, en donde hay un intercambio de energía y materiales con el ambiente que lo rodea. Se pueden distinguir tres sectores, de producción en las cabeceras, de transferencia en la parte media y de depositación (fig. 3.1), y describe tres tipos de sistema: sistemas morfológicos, sistemas en cascada y sistemas de proceso-respuesta. El primero se refiere a los accidentes geográficos (por ejemplo canales) y como cada componente de esa forma se relaciona con otros componentes del sistema. Esto puede observarse por ejemplo en las laderas que dividen las corrientes de cabecera de una cuenca, si las corrientes son muy cercanas, las laderas que las separan serán más pronunciadas que si las corrientes están muy separadas entre sí.

El sistema en cascada se refiere al flujo de agua y sedimento que pasa a través del sistema morfológico, y ambos sistemas (morfológico y en cascada), interactúan como uno solo de “proceso-respuesta”. Este tipo de sistema describe los ajustes entre los primeros dos, es decir, que hay una retroalimentación bidireccional entre proceso y forma. Por ejemplo, en una sección empinada de un canal, la velocidad del flujo aumenta al igual que la tasa de erosión; y con el tiempo la erosión hace que la pendiente disminuya, reduciendo la velocidad y las tasas de erosión (Charlton, 2008).

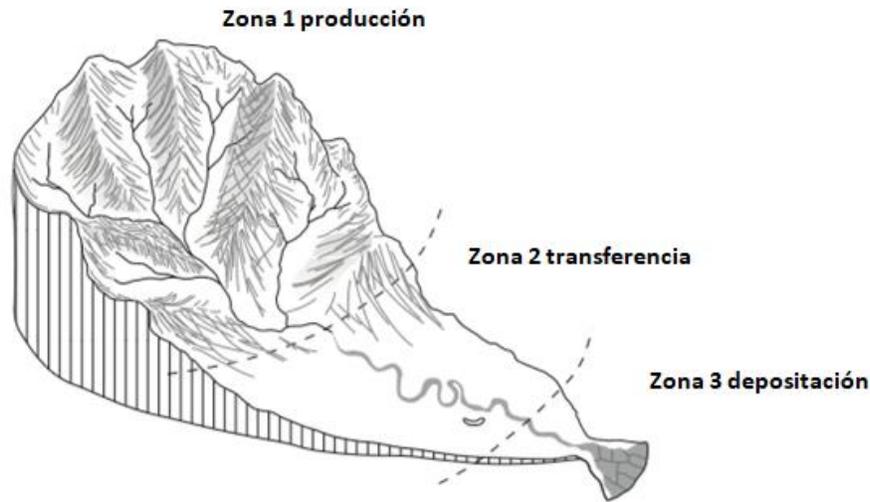


Figura 3.1. Zonificación de una cuenca fluvial. Modificado de Charlton (2008).

Dentro del sistema, además, hay variables internas y externas. Las variables internas incluyen tipo de suelo, patrón y profundidad del canal, densidad de drenaje, entre otras, y están influenciadas tanto por otras variables internas como externas. Las variables externas, también llamadas controles externos de la cuenca, hacen alusión al clima, nivel de base, tectónica y actividad humana (Charlton, 2008).

3.2. Análisis morfométrico de la cuenca

El área de tierra que cada río drena se conoce como **cuenca de drenaje**, también conocida como cuenca hidrográfica. Esta suministra agua y sedimentos al canal y está limitada por una división de drenaje, que en áreas montañosas se observa como una cresta. La salida, que es por donde el canal principal sale de la cuenca se encuentra a una elevación más baja que el resto del área de la cuenca (Charlton, 2008) (fig. 3.2).

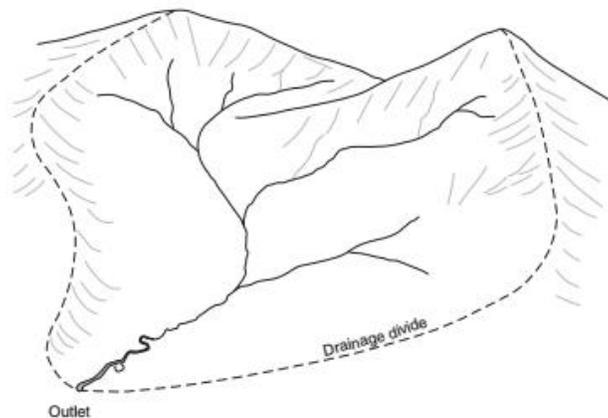


Figura 3.2. Divisoria de aguas y salida de una cuenca. Tomado de Charlton (2008).

Las características físicas de una cuenca influyen mucho en el comportamiento de los caudales que circulan por ella. El análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, drenaje y relieve que permite conocer las características físicas de una cuenca, lo que ayuda a interpretar su funcionalidad hidrológica y formular estrategias de manejo (Gaspari *et al.* 2012). Cardona (2016) describe los siguientes parámetros:

- Área de la cuenca (A): superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio, se expresa en kilómetros cuadrados.
- Perímetro (P): longitud sobre un plano horizontal que recorre la divisoria de aguas. Se expresa en metros o kilómetros.
- Longitud (L): distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca hasta otro punto aguas arriba donde el río principal corte la línea de contorno de la cuenca.
- Ancho (B): relación entre el área y la longitud de la cuenca.
- Factor de forma (Kf): relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca (fig. 3.3). Intenta medir cuan alargada es la misma; una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecientes que una cuenca con el mismo área y un factor de forma mayor. Un factor de forma mayor a 1 indica que la cuenca es achatada por lo que ante fuertes precipitaciones concentra grandes volúmenes de agua formando fácilmente crecidas. Se representa como $Kf = A/L^2$. La forma de la cuenca influye en el hidrograma (gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica) de descarga de una corriente, o sea, cuencas de igual área pero diferente forma generan hidrogramas diferentes. Además, la forma de la cuenca también influye en la velocidad de escurrimiento superficial (Cardona, 2016).

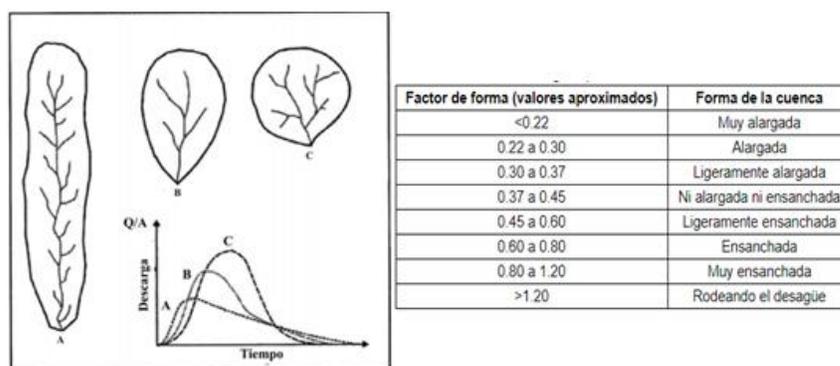


Figura 3.3. Forma de la cuenca según el factor de forma y tabla de valores para clasificarla. Tomado de Worschitz (2018).

- Coeficiente de compacidad (Kc): compara la forma de la cuenca con un círculo, en el cual éste es de igual área que la cuenca. Un valor igual a 1 es para una cuenca imaginaria perfectamente circular. El grado de aproximación a este valor indica la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de

agua de escurrimiento. Los valores del coeficiente de compacidad nunca son inferiores a 1. Se representa como $Kc = P/Pc = P/2\pi R$ donde P es el perímetro de la cuenca, Pc es el perímetro de la circunferencia y R es el radio de la circunferencia. Hay 3 clasificaciones para este parámetro (tabla 3.1):

Clase de Forma	Índice de Compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval - redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval - Redonda a oval oblonga
Clase III	1.51 ó más de 2	Oval - oblonga a rectangular - oblonga

Tabla 3.1. Tabla de clasificación para el coeficiente de compacidad. Tomado de Cardona (2016).

- Razón de elongación (Re): relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la cuenca y la longitud máxima de la misma. El valor se acerca a 1 cuando la cuenca es plana y achatada. Se representa como $Re = D/Lc = 1.1284*(\sqrt{A}/L)$ donde D es el diámetro de un círculo del mismo área que la cuenca, A es el área de la cuenca y L es la longitud de la cuenca.

Entre los parámetros asociados al relieve se encuentran (Cardona, 2016):

- Curva hipsométrica: sirve para determinar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca. Se obtiene a partir de la relación de las curvas de nivel a través de un MDE y la estimación de la superficie acumulada por cada cota. Se puede analizar con el modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión (fig. 3.4).

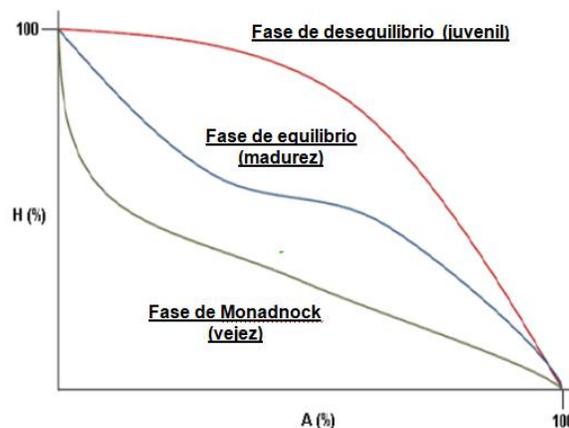


Figura 3.4. Gráfico de curvas hipsométricas mostrando las diferentes fases de una cuenca dependiendo del ciclo de erosión. Modificado de Cardona (2016).

- Pendiente media de la cuenca: a mayor pendiente, menor tiempo de concentración de las aguas de esorrentía en la red de drenaje y afluentes del cauce principal. Permite hacer comparaciones entre cuencas para observar fenómenos de erosión en la superficie. Se representa

como: $J = 100 * ((\sum Li)(E)/A)$ donde J es la pendiente media de la cuenca en porcentaje, $\sum Li$ es la sumatoria de las longitudes de las curvas de nivel en kilómetros, E es la equidistancia entre curvas y A es el área de la cuenca.

- Elevación media: tiene importancia principalmente en zonas montañosas ya que influye en el escurrimiento superficial. Se puede determinar a partir de la curva hipsométrica, se ingresa por el eje que representa el área con un valor de 50% y se lee el valor de cota correspondiente (fig. 3.5).

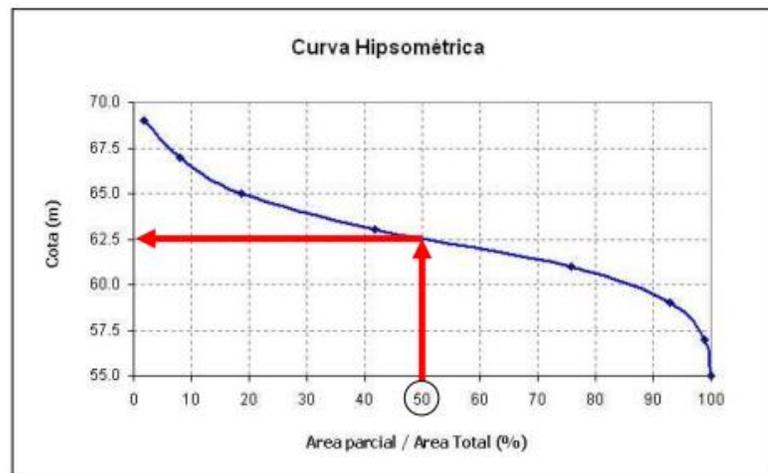


Figura 3.5. Obtención de la elevación media de la cuenca a partir de la curva hipsométrica. Tomado de sitio web <http://ing.unne.edu.ar/pub/hidrologia/hidro-tp1.pdf>.

Parámetros asociados al drenaje (Cardona, 2016):

- Tiempo de concentración (t_c): se refiere al tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo más alejado de la cuenca a la salida de la misma. Siguiendo la fórmula del Servicio de Carreteras de California, que es una de las más utilizadas, se representa como: $t_c = [0.87L^2/(H/L)]^{0.385}$ donde t_c es el tiempo de concentración, L es la longitud en km del cauce más largo, H es la diferencia entre las dos elevaciones extremas de la cuenca en metros.

La densidad de la red de drenaje refleja controles geomorfológicos, geológicos, climáticos, florísticos y antrópicos. Asignarles un orden a los cauces que forman la red de drenaje, es simplemente una clasificación que muestra cómo se bifurcan éstos dentro de la cuenca. Strahler (1952) fundamenta que un curso sin afluentes, que fluye desde su nacimiento, se considera de primer orden, y del mismo modo, uno de tercer orden es el resultado de la unión entre dos cursos de segundo orden y así sucesivamente con todos los cursos fluviales pertenecientes a la cuenca (fig. 3.6).

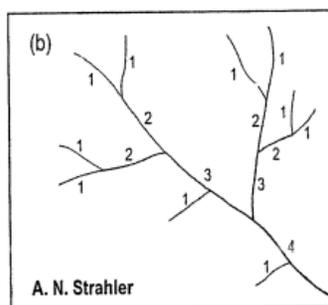


Figura 3.6. Clasificación de la red de drenaje según Strahler. Tomado de Elorza (2008).

3.2.1. Resultados

El análisis morfométrico de la subcuenca del río Quemquemtreu (fig.3.7) es de vital importancia ya que ayuda a comprender la dinámica del río. Los valores expuestos a continuación (tablas 3.2 y 3.3) son importantes para su caracterización.

La pequeña subcuenca del río Quemquemtreu pudo caracterizarse gracias a una serie de factores y parámetros tanto de superficie como de relieve que permiten conocer su funcionamiento. El factor de forma (Kf) por ejemplo, con un valor de 0.15 caracterizó a la subcuenca como muy alargada, lo que la hace menos susceptible a inundaciones. El coeficiente de compacidad (Kc) con un valor de 1.60 la clasifico entre ovalada y rectangular, lo que genera que no concentre grandes volúmenes de agua para escurrimiento.

La curva hipsométrica, uno de los parámetros asociados al relieve, mostró que la subcuenca se encuentra en una fase de madurez avanzada, lo que significa que ésta ya ha pasado su potencial erosivo y está en equilibrio. En relación a esto, la elevación media es de 1443.41 m.s.n.m., que según lo propuesto por Fuentes (2004) es de elevación baja.

La pendiente media es de 27.84% que está entre moderada y fuerte y se relaciona con el tiempo de concentración (tc) de 4.68 horas que según la clasificación de Fuentes (2004) es rápido. Este a su vez está influenciado por la longitud del cauce principal que es de 48.84 km.

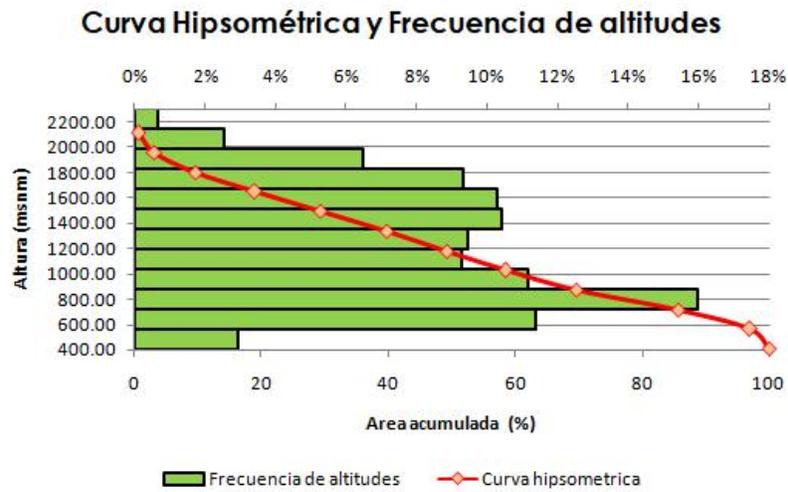
Como análisis final de los parámetros morfométricos, se realizó la jerarquización del orden de la red hídrica, dando un resultado de orden 6, que indicaría un gran desarrollo fluvial (fig.3.8).

Valores de superficie						
Área	Perímetro	Cota mín.	Cota máx.	Ancho	Kf	Kc
273.03 km ² .	109.58 km.	409.51 m.s.n.m.	2230.63 m.s.n.m.	7.63 km.	0.15	1.6

Tabla 3.2. Valores de superficie de la subcuenca del río Quemquemtreu.

Valores de relieve				
Altitud media	Altitud mas frecuente	Altitud de frecuencia media	Pendiente media	Long. Del cauce principal
1443.41 m.s.n.m.	796.68 m.s.n.m.	1289.58 m.s.n.m.	27.84%	48.84 km
Orden de la red	Long. De la red	Pendiente promedio de la red	tc	Curva hipsométrica =
6	1103.61 km.	1.81%	4.69 horas	

Tabla 3.3. Valores de relieve de la subcuenca del río Quemquemtreu.



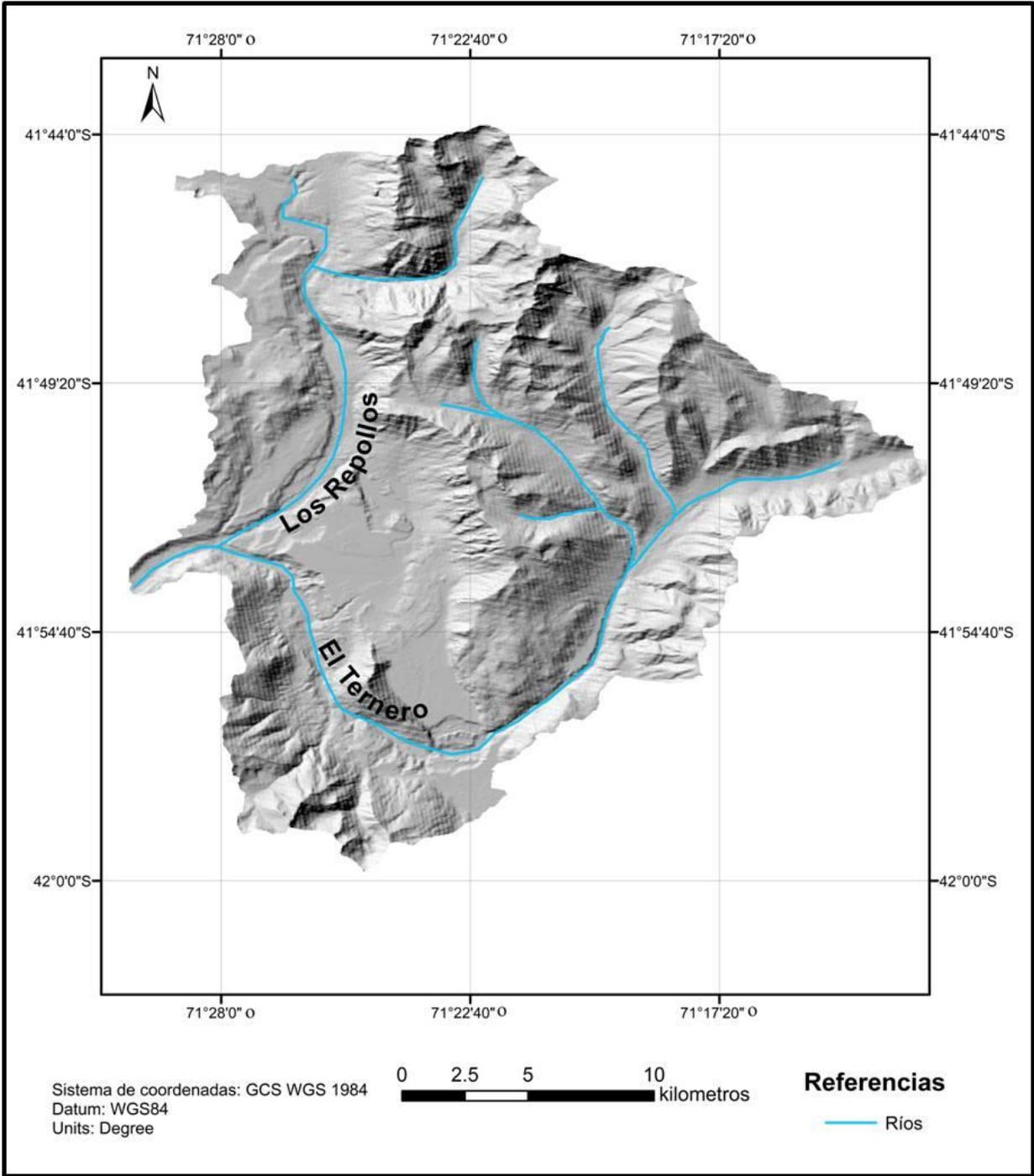


Figura 3.7. Subcuena del río Quemquemtreu.

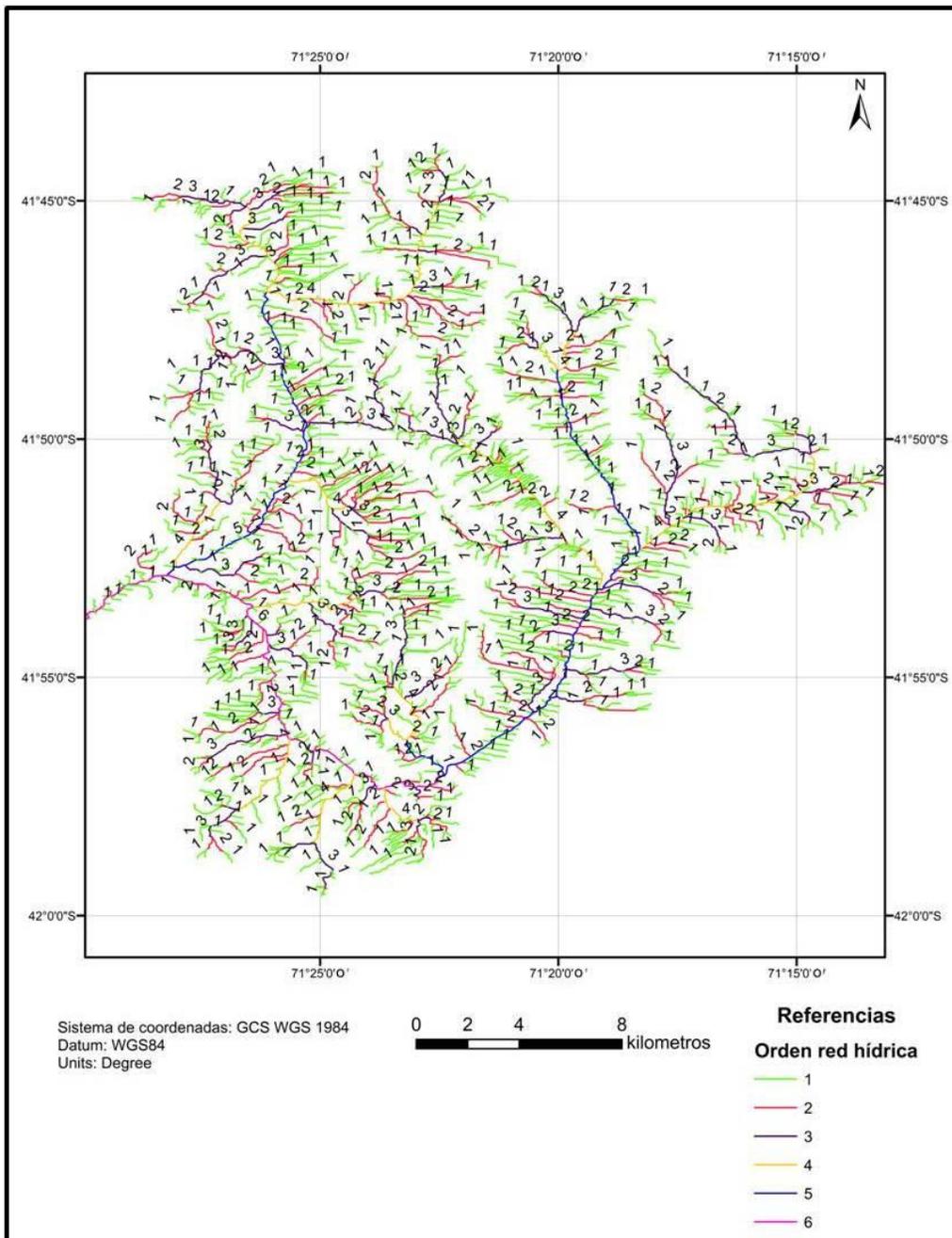


Figura 3.8. Red de drenaje de la subcuenca del río Quemquemtreu mostrando el orden de jerarquía según la clasificación de Strahler.

Como complemento a los resultados comentados, se analizaron también las subcuencas pertenecientes a los ríos El Ternero y Los Repollos para corroborar si el estudio en conjunto de ambas alteraba los resultados de la subcuenca del río Quemquemtreu. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Subcuenca Los Repollos (Tabla 3.4 y fig. 3.9):

Área	Perímetro	Ancho	Cota mínima	Cota máxima
126.67 km ²	76.69 km	4.78 km	445.56 msnm	2234.31 msnm
Pendiente media	Cauce principal	Orden de drenaje	Kc	Kf
16.13	26.45 km	5	1.92	0.18

Tabla 3.4. Valores obtenidos para la subcuenca Los Repollos.

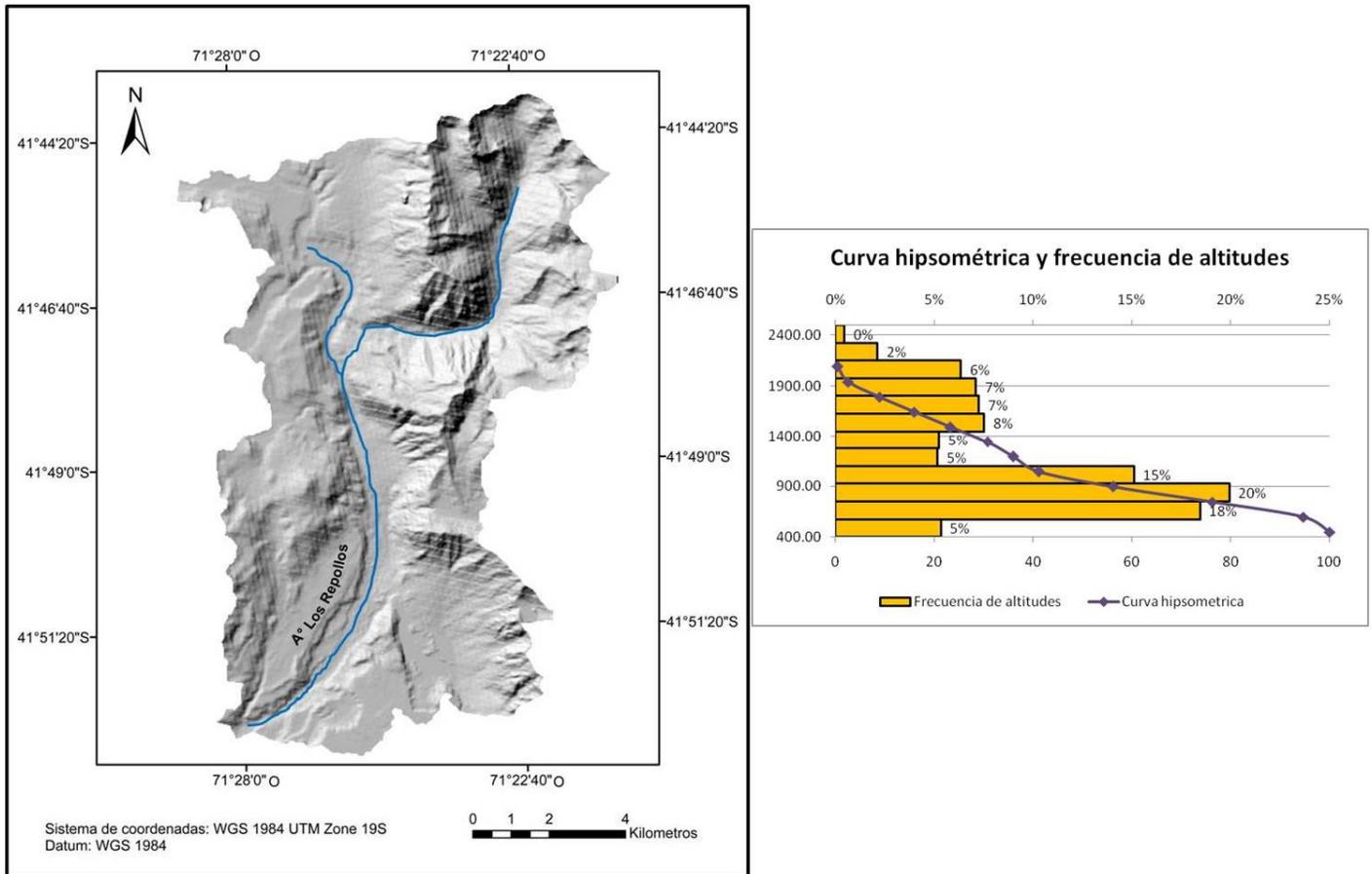


Figura 3.9. Curva hipsométrica de la subcuenca Los Repollos.

Subcuenca El Ternero (Tabla 3.5 y fig. 3.10):

Área	Perímetro	Ancho	Cota mínima	Cota máxima
240.17 km ²	108.92 km	5.32 km	446.21 msnm	2234.34 msnm
Pendiente media	Cauce principal	Orden de drenaje	Kc	Kf
13.04	45.11 km	6	1.98	0.11

Tabla 3.5. Valores obtenidos para la subcuenca El Ternero

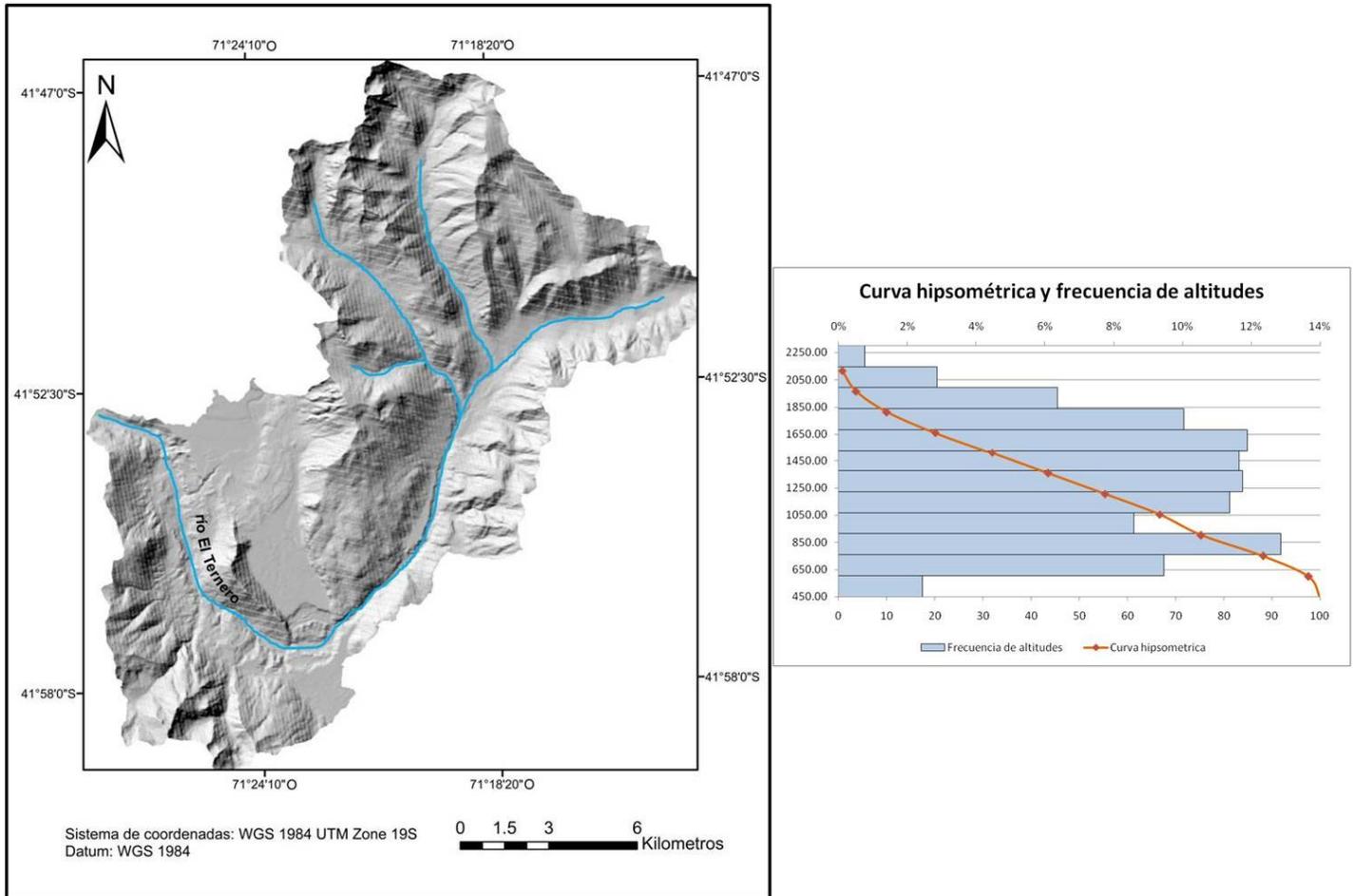


Figura 3.10. Curva hipsométrica de la subcuenca El Ternerero.

Estos resultados demostraron que ciertos aspectos de la subcuenca del río Quemquemtreu se vieron afectados al calcular los parámetros como una sola unidad. Sin embargo, los parámetros de superficie y relieve como el coeficiente de compacidad (K_c), el factor de forma (K_f) y la curva hipsométrica, no mostraron diferencias groseras con los resultados obtenidos para la subcuenca del río Quemquemtreu, por lo que se sigue sosteniendo que la misma es ovalada, muy alargada y se encuentra en una etapa de madurez, lo que lleva a suponer que la misma ha pasado su potencial erosivo, lo que no significa que no erosiona material en sus cabeceras sino que la erosión no es tan intensa.

3.3. Análisis morfológico del río Quemquemtreu

3.3.1. Generalidades

Planicie de inundación: la planicie de inundación (o llanura de inundación) es una superficie plana que se encuentra adjunta al canal, es construida por el río y está sujeta a inundaciones. Junto al canal podría haber otras llanuras, a mayor altura y más antiguas correspondientes a épocas anteriores (Munro, 2010) (fig. 3.11).

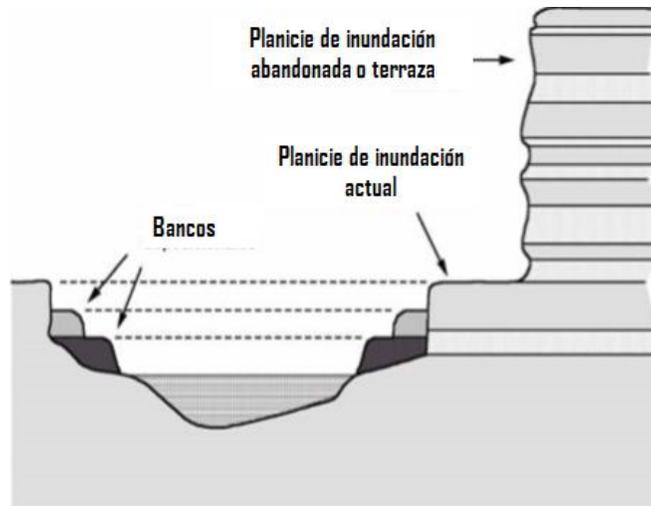


Figura 3.11. Representación de la formación de la planicie de inundación. En la figura puede observarse la planicie actual y los depósitos correspondientes a una antigua planicie de inundación. Modificado de Munro (2010).

Su morfología está relacionada con la forma y el comportamiento de los canales que le dan origen. Varios procesos de depositación, reelaboración y erosión están involucrados con la formación y desarrollo de las planicies de inundación (Charlton, 2008). Diferentes autores describen que los principales procesos de formación de la planicie de inundación son la acreción vertical y acreción lateral, que se da cuando se produce el desbordamiento del río y el material fino que viaja en suspensión se deposita en las áreas adyacentes al canal, en donde se genera una secuencia grano decreciente, depositándose primero el material grueso seguido del material fino.

La formación de las planicies de inundación representa una transición en el sistema, marcando el inicio de los procesos fluviales fuera del canal. Se genera una reserva de sedimentos, lo que incrementa el tiempo de permanencia de los mismos dentro del sistema fluvial (Munro, 2010).

Canales: según Dietrich y Dunne (1993), un canal fluvial es una incisión lineal en el terreno con paredes laterales claramente definidas, donde en su interior ocurren el flujo de agua concentrado y el transporte de sedimentos, de manera que si el agua dejara de escurrir en él, la evidencia morfológica del escurrimiento sería aparente.

Se pueden encontrar diferentes patrones de canales, definidos por la cantidad de cauces y su sinuosidad: rectos, trenzados, meandriiformes y anasomosados (Charlton, 2008).

En áreas montañosas como el área de estudio, los canales suelen ser rectos. Son poco comunes y existen en cortas distancias, poseen una sinuosidad muy baja en una distancia de varias veces el ancho del mismo. Se entiende que un canal es recto cuando tiene una sinuosidad menor a 1.1, este valor está dado por el índice de sinuosidad que relaciona la longitud del canal en un alcance dado, con la longitud del valle (fig. 3.12) (Charlton, 2008). Estos canales pueden cambiar su posición por acreción lateral, la erosión está localizada en los pozos y la sedimentación en playones y barras (Ochoa, 2011).

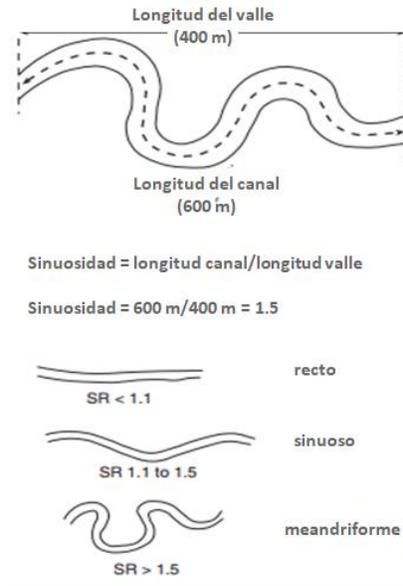


Figura 3.12. Ejemplo del cálculo del índice de sinuosidad y valores para clasificación. Modificado de Charlton (2008).

Según Brice (1964), los principales componentes morfológicos de los ríos aluviales son barras, rápidos y pozos. Las barras surgen de la depositación en un canal activo, mientras que los rápidos y pozos representan altos y bajos topográficos dentro del río. Estos últimos deben considerarse como una secuencia, ya que no suceden de forma aislada.

Barras: es la acumulación de sedimento que puede estar formada por rocas, grava, arena o limo; se pueden dividir en dos grupos: barras unitarias y barras compuestas (fig. 3.13). Las barras unitarias son simples, su morfología esta principalmente regida por procesos de depositación. De manera contraria, las barras compuestas han sido moldeadas por múltiples episodios de erosión y depositación (Charlton, 2008).

Hay cuatro tipos principales de barras unitarias: longitudinales, transversales, point bar y diagonales. Las *barras longitudinales* se alargan en dirección al flujo, se forman en el centro del canal y su crecimiento se forma por acumulación de material más fino. Las *barras transversales* tienen forma de lóbulo y se encuentran típicamente en donde el canal se expande abruptamente y aguas abajo de las confluencias.

Las *barras diagonales* son comunes en los canales de lecho de grava y pueden tener un frente empinado aguas abajo (Charlton, 2008).

Las barras complejas se dividen en dos tipos, *lingoides* y *laterales*. Las *barras lingoides* son simétricas, están separadas de los bancos y tienen forma lobulada; a diferencia de las *barras laterales* que están en contacto con el banco y son asimétricas. Por último, las *barras de canto rodado*, son formadas en canales donde domina el material de lecho grueso (Charlton, 2008).

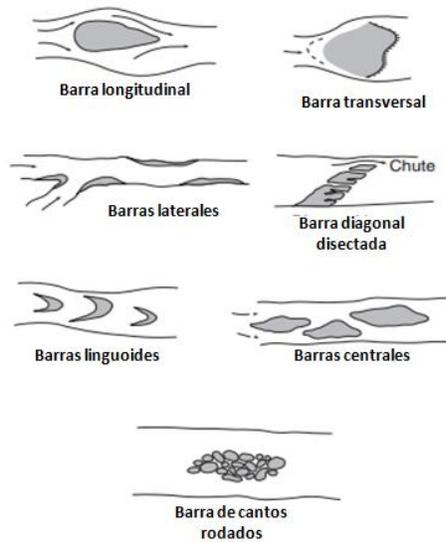


Figura 3.13. Distintos tipos morfológicos de barras. Modificado de Charlton (2008).

Rápidos y pozos (riffles and pools): se refieren a ondulaciones de gran escala sobre la topografía del lecho y generalmente se forman en canales de lecho de grava con pendientes que van de bajas a moderadas (Charlton, 2008). El flujo se mueve rápidamente en los rápidos y disminuye en los pozos, donde la topografía se profundiza. Esta secuencia se puede encontrar en canales rectos, trezados o meandriiformes y debe considerarse como una unidad ya que no suelen darse de manera aislada (Brice, 1964) (fig. 3.14).

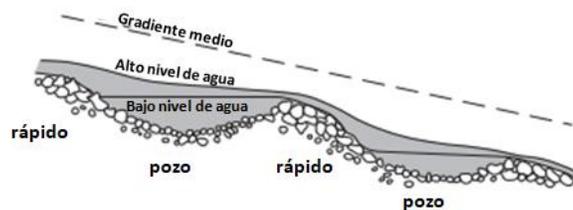


Figura 3.14. Representación de la formación de secuencias de rápidos y pozos. Modificado de Charlton (2008).

Escalones y pozos (Steps and pools): al igual que los rápidos, los escalones se forman a partir de material grueso, y forman estructuras verticales en donde el flujo choca y se sumerge en las piscinas que están inmediatamente aguas abajo (fig. 3.15) (Charlton, 2008).

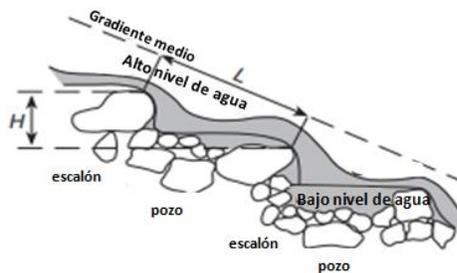


Figura 3.15. Representación de la formación de escalones y pozos. Modificado de Charlton (2008).

Cuando se describe la forma del canal, generalmente se consideran secciones individuales o “alcances”. El alcance comprende una escala de cientos de metros, en donde hay una homogeneidad de forma (fig. 3.16). Se utiliza ya que a lo largo de un mismo río se pueden encontrar diferentes patrones, entre ellos, canales trenzados, meandriiformes, rectos, múltiples, entre otros.

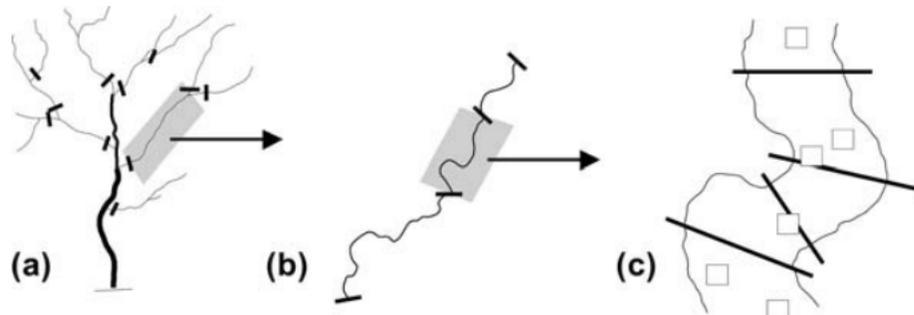


Figura 3.16. Selección de alcances de un río para su estudio. Tomado de Boove y Milhous (1978).

Boove y Milhous (1978) proponen ciertas pautas para el análisis de las secciones del río, entre ellas:

- *Identificar y eliminar áreas anómalas*: los sitios con puentes o presas, cruces de carreteras, cascadas, segmentos de corriente canalizadas u otras características atípicas deben eliminarse del área de estudio a menos que representen una gran parte de la corriente o sean objeto de estudio.
- *Dividir una secuencia en segmentos*: un segmento de la corriente es una sección donde el flujo y la morfología son bastante uniformes. Recomiendan ubicar los límites de los segmentos en lugares donde el flujo promedio de la corriente cambia en más del 10%, como en los principales afluentes o desvíos. También donde hay cambios abruptos en la pendiente, entrada de sedimentos, material de los bancos y morfología del canal.
- *Dividir los segmentos en alcances*: sirven para hacer inferencias sobre todo el segmento. Se pueden ubicar de manera uniforme (todos de igual longitud) si el segmento es homogéneo o cambia suavemente.
- *Selección de transectas, parcelas o sitios de medición de puntos*: un alcance puede caracterizarse, por ejemplo, ubicando puntos para medir el tamaño del material del lecho, haciendo perfiles de la sección transversal, etc. Las transectas, parcelas o medición de puntos se pueden ubicar al azar, de manera uniforme o en sitios representativos.

Los sistemas fluviales se consideran sistemas abiertos porque experimentan continuamente entradas y salidas de energía y materia; y a su vez son sistemas dinámicos ya que conllevan cambios que ocurren en escalas de tiempo de un instante a geológico. Entre estos cambios pueden observarse, migración de meandros, inundaciones que depositan nuevo material, cambios en el nivel de la corriente, colapso de los bancos, crecimiento de las barras, fluctuación en la carga de sedimentos, etc. (Gordon *et al.* 2004).

En las cabeceras, el material de lecho suele tener grandes dimensiones y excede la capacidad de acarreamiento del flujo. A medida que se avanza aguas abajo el tamaño del substrato que transporta el río decrece a medida que las rocas se van fragmentando y desgastando; y los sedimentos más pequeños son transportados. En los primeros kilómetros de la corriente esto ocurre rápidamente y más lentamente a partir de entonces (Gordon *et al.* 2004).

Según lo propuesto por Charlton (2008) generalmente se reconocen cuatro tipos principales de canales aluviales: recto, anastomosado, meandriforme y trenzado (fig. 3.17).

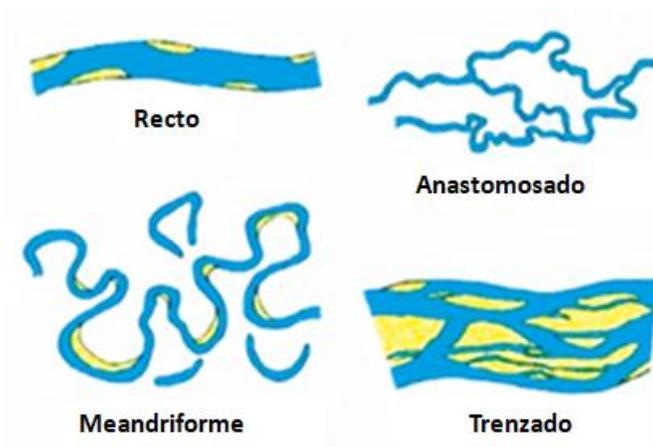


Figura 3.17. Geomorfología de los tipos principales de canales. Modificado de Charlton (2008).

Flujo y carga de sedimentos: el flujo en canales naturales fluctúa constantemente pasando por periodos de flujos normales, inundaciones y sequías (Charlton, 2008). La cantidad de material transportado, erosionado o depositado en un río aluvial es función del suministro de sedimentos y de la capacidad de transporte del río. La capacidad de transporte está relacionada con el tamaño del sedimento, del caudal del río y de las propiedades hidráulicas de este. Cuando el ingreso de sedimentos al sistema es igual a la cantidad que sale del mismo, se dice que existe un estado de equilibrio (Ochoa, 2011).

Los procesos de erosión, transporte y deposición dentro del canal, están influenciados por el suministro de sedimentos aguas arriba, así como el sedimento que se erosiona de los bancos y orillas. Estos procesos son distintos para el sedimento grueso y fino, por lo que el suministro de sedimentos tiene una gran influencia en la forma y comportamiento del canal (Charlton, 2008).

Munro (2010) reconoce 2 tipos de substrato aluvial:

- Substrato aluvial grueso: el material aluvial grueso es no cohesivo, generalmente con clastos redondeados por la abrasión. Litológicamente es polimíctico y el tamaño varía desde gravas a bloques.
- Substrato aluvial fino: entre estos se encuentran las arenas, arcillas y limos. Predominan en canales con poca inclinación, generalmente hacia las zonas de depositación, son fáciles de erosionar

y no generan estructuras estables, esto hace que aunque las riberas de arena por ejemplo, son rápidamente vegetadas, no se mantienen estables en el tiempo por la facilidad de erosión que presentan.

Los limos y arcillas en cambio, son materiales cohesivos muy finos, que se transportan en suspensión, por lo cual suelen ser depositados fuera del canal, sobre las riberas y planicies de inundación. Las paredes cohesivas suelen ser escarpadas generando canales hidráulicamente eficientes, profundos y estrechos. Los lechos de este tipo de material demuestran baja energía y son colonizados rápidamente.

3.3.2. Resultados

Para el análisis geomorfológico, el río Quemquemtreu fue dividido en tres alcances, desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Azul (fig. 3.18). A cada alcance se le aplicó el índice de sinuosidad resultando, 1.12 y 1.26 para los tramos 1 y 3 respectivamente, clasificándolos como sinuosos. Mientras que el tramo 2 arrojó un valor de 1.03 que lo clasifica como recto (fig.3.19).

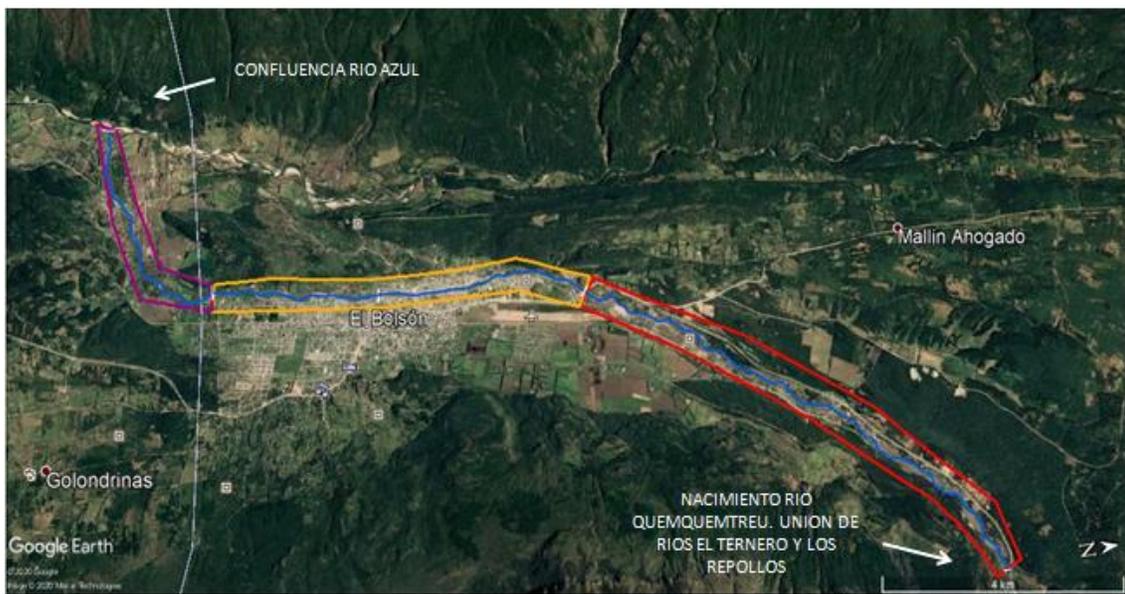


Figura 3.18. División del río Quemquemtreu en alcances para su estudio. Rojo: primer alcance; naranja: segundo alcance; violeta: tercer alcance.



Figura 3.19. Diferencia en planta de un tramo sinuoso (A) y uno recto (B). Imágenes aéreas tomadas con VANT.

Cada alcance fue estudiado en detalle, observando los cambios en el thalweg, la presencia de barras, la vegetación de las riberas y las modificaciones antrópicas sobre éstos. Esto permitió observar que en toda su extensión, el río presenta cambios en el patrón, observándose un leve carácter trezado que en ciertas zonas se hace más notorio. Esto puede apreciarse por la presencia de islas y barras que dividen el flujo en dos o más brazos e imágenes satelitales antiguas que atestiguan el movimiento del río.

También se realizó un mapa geomorfológico de detalle utilizando como base el ortomosaico generado por imágenes adquiridas con el VANT. Este mapa, a los fines de una mejor visualización fue dividido en tres secciones (fig. 3.20 a,b,c).

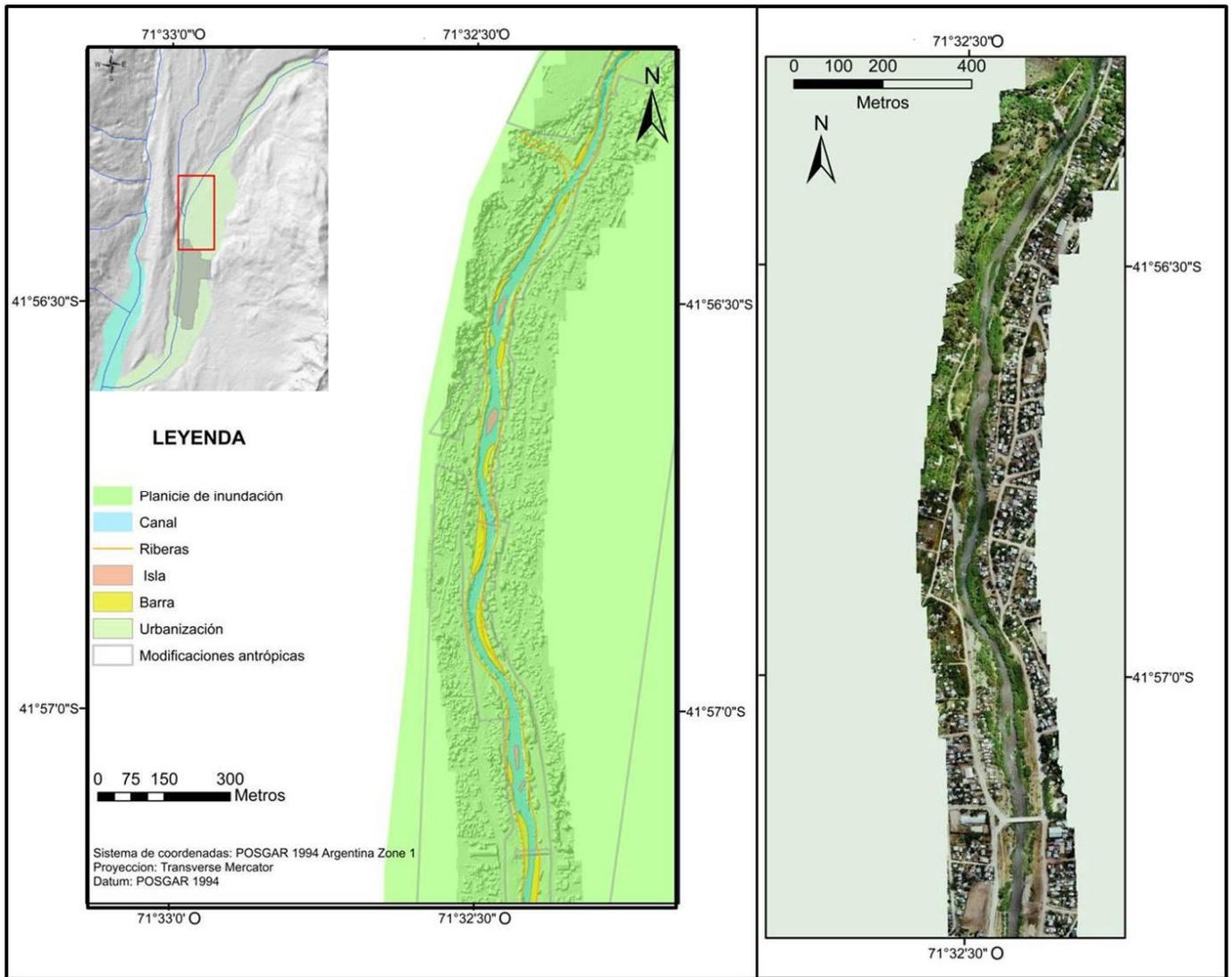


Figura 3.20a. Mapa geomorfológico del río Quemqmtreu. Tramo superior.

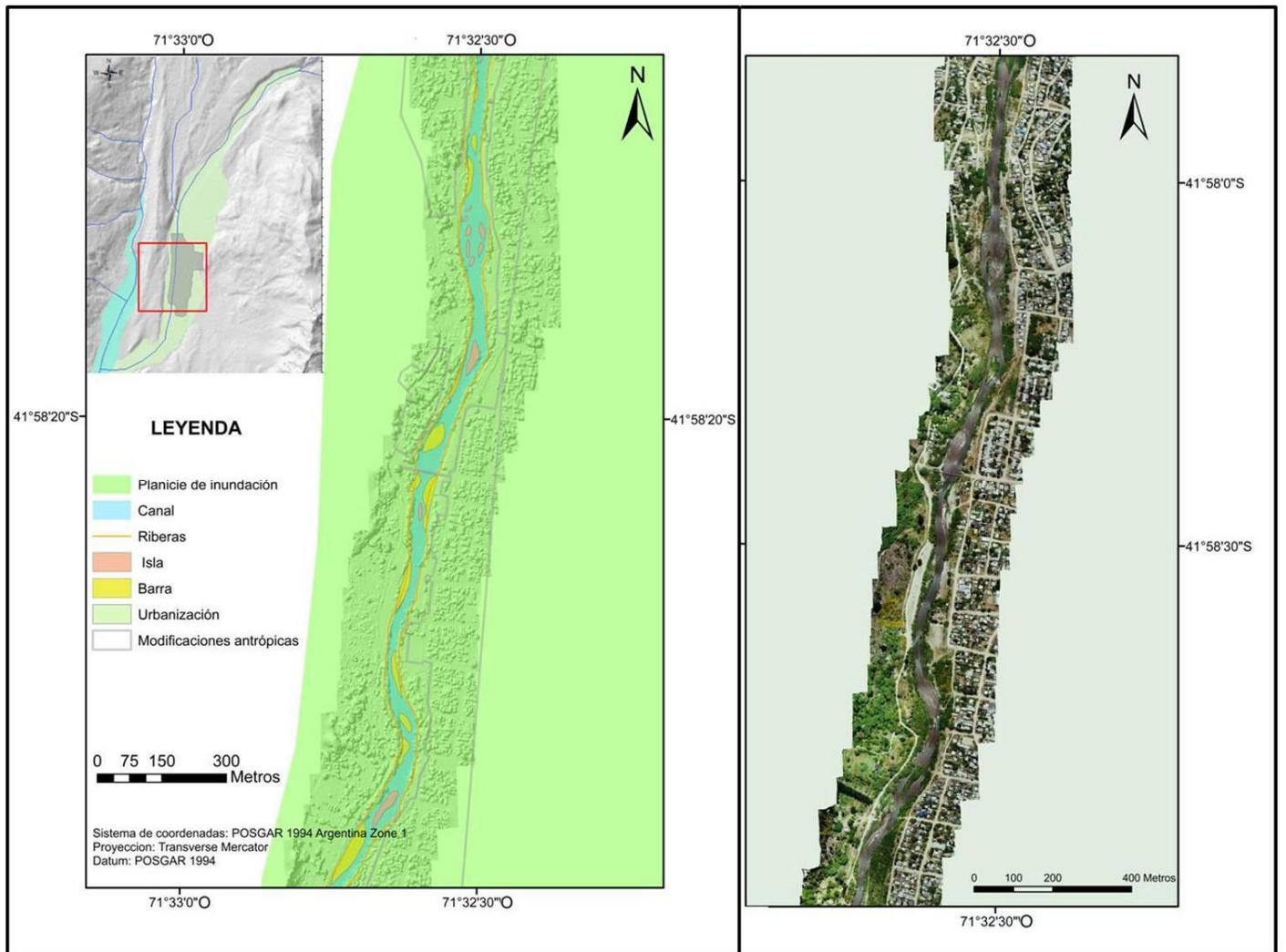


Figura 3.20b. Mapa geomorfológico de detalle del río Quemquemtreu. Tramo central.

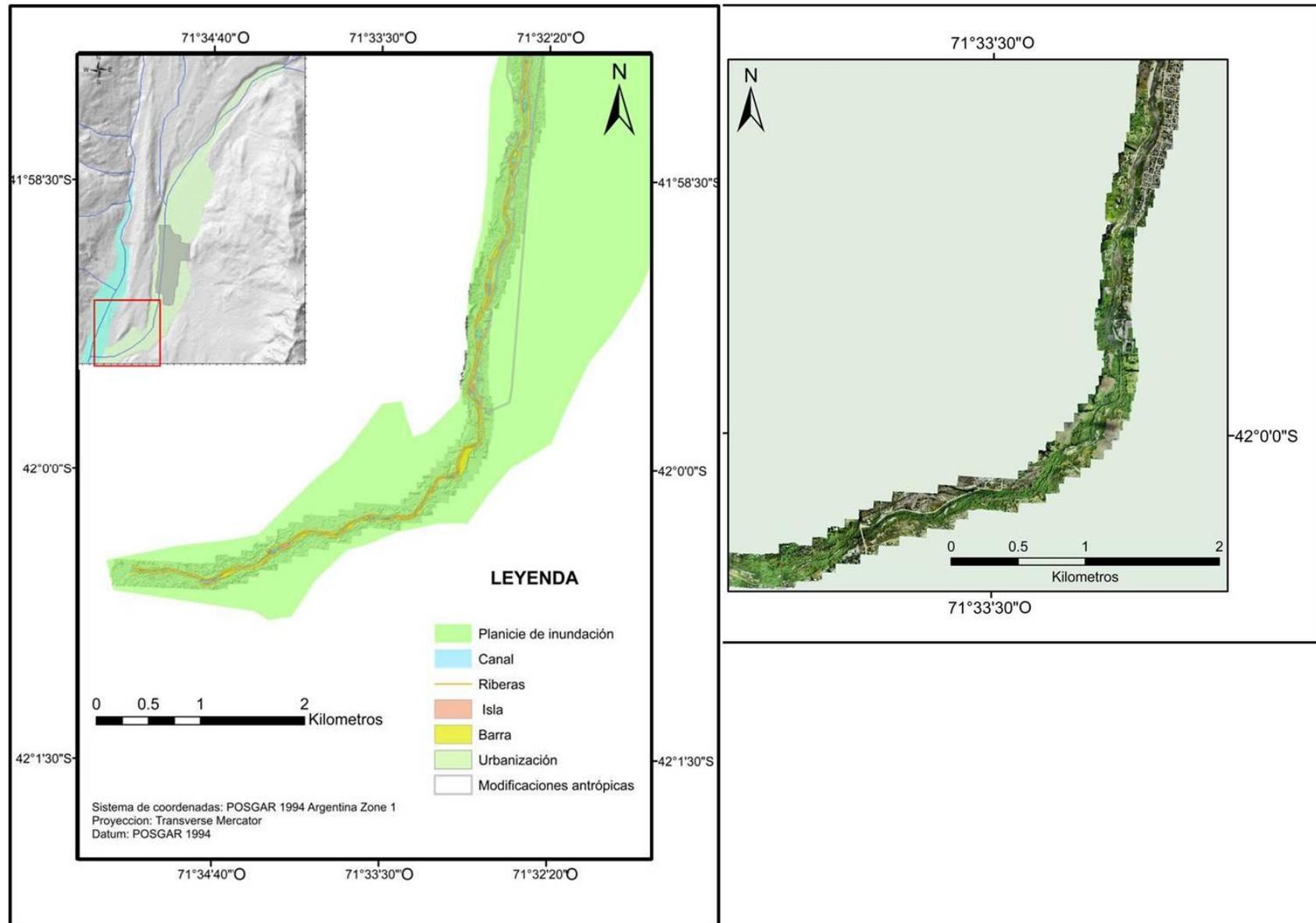


Figura 3.20c. Mapa geomorfológico del río Quemquemtrey en su tramo inferior. Confluencia con el río Azul.

En la división de los tres alcances del río (fig. 3.18) se observó una transición en la forma del río del tipo “sinuoso-recto-sinuoso”. El segundo alcance es recto y coincide con la zona de mayor urbanización, mientras que el primer y tercer alcance son sinuosos y corresponden a las zonas poblacionales donde predominan las chacras y cultivos.

Dentro de las características sedimentarias del río, el lecho presenta una litología heterogénea con predominancia de rocas graníticas. El sustrato es una mezcla de aluvial fino y grueso, con una granulometría que va desde arenas a grandes bloques (fig. 3.21a), manteniéndose constante en toda su extensión excepto hacia su desembocadura y confluencia con el río Azul donde se observa una leve disminución en el tamaño de los clastos aunque se mantiene algún que otro clasto aislado de mayor tamaño (fig. 3.21b).

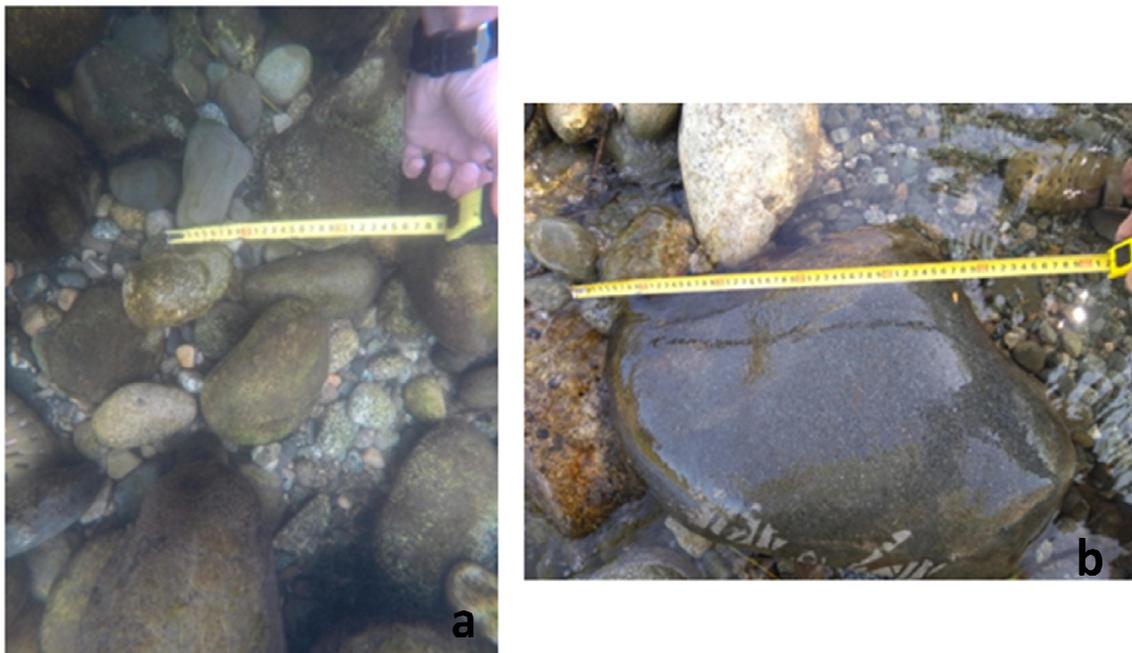


Figura 3.21a. Sustrato del lecho aguas arriba en cercanías del puente de la Ruta Nacional n°40. La escala es de 30 cm. **b:** sustrato del lecho cerca a la desembocadura del río, la escala es de 60 cm.

Entre los rasgos geomorfológicos del canal se observaron:

Secuencia rápidos/pozos (riffle/pool): se encuentra en todos los ríos permanentes con granulometría mayor a arena gruesa, típicamente en lechos de grava y cantos, como es el caso del río Quemquemtreu. En el campo pudieron observarse los rápidos formados por rocas mayores a 30 cm de diámetros culminando en pozones y desde las imágenes satelitales se pueden reconocer estas zonas en donde el flujo aumenta su velocidad para disminuir en los pozones (fig. 3.22).

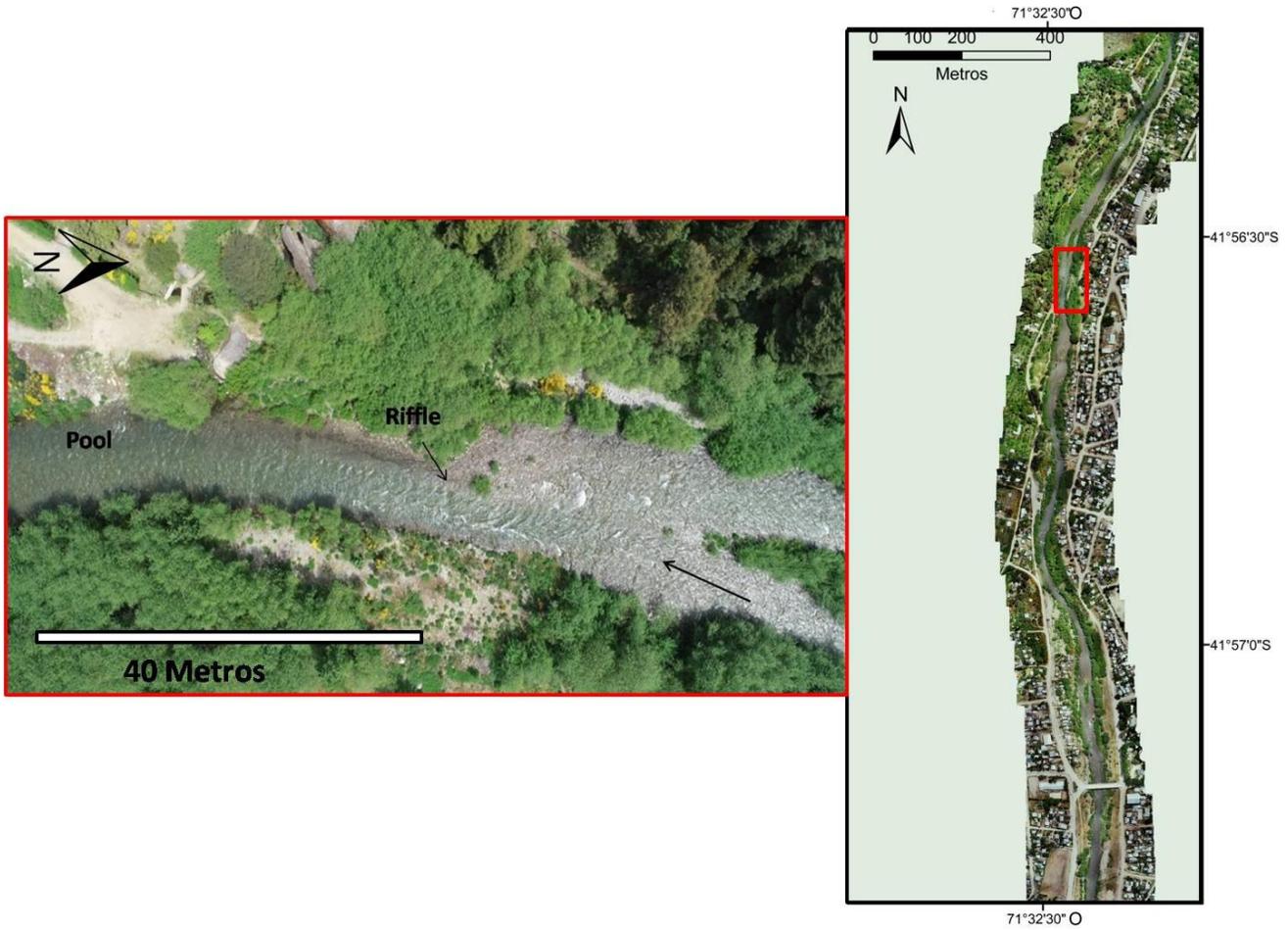


Figura 3.22. Secuencia rápido/pozo en el tramo superior del río Quemquemtreu. En la imagen puede observarse un aumento en la velocidad de flujo debido a la desviación por acumulación de material sobre la barra en la margen derecha. Imagen aérea tomada con VANT.

Secuencia escalones/pozos (step/pool): se observaron secuencias aisladas de escalones y pozos formados por grandes rocas que producen el aumento de la velocidad del flujo. En las imágenes aéreas se pueden observar como una franja transversal al flujo (fig. 3.23).

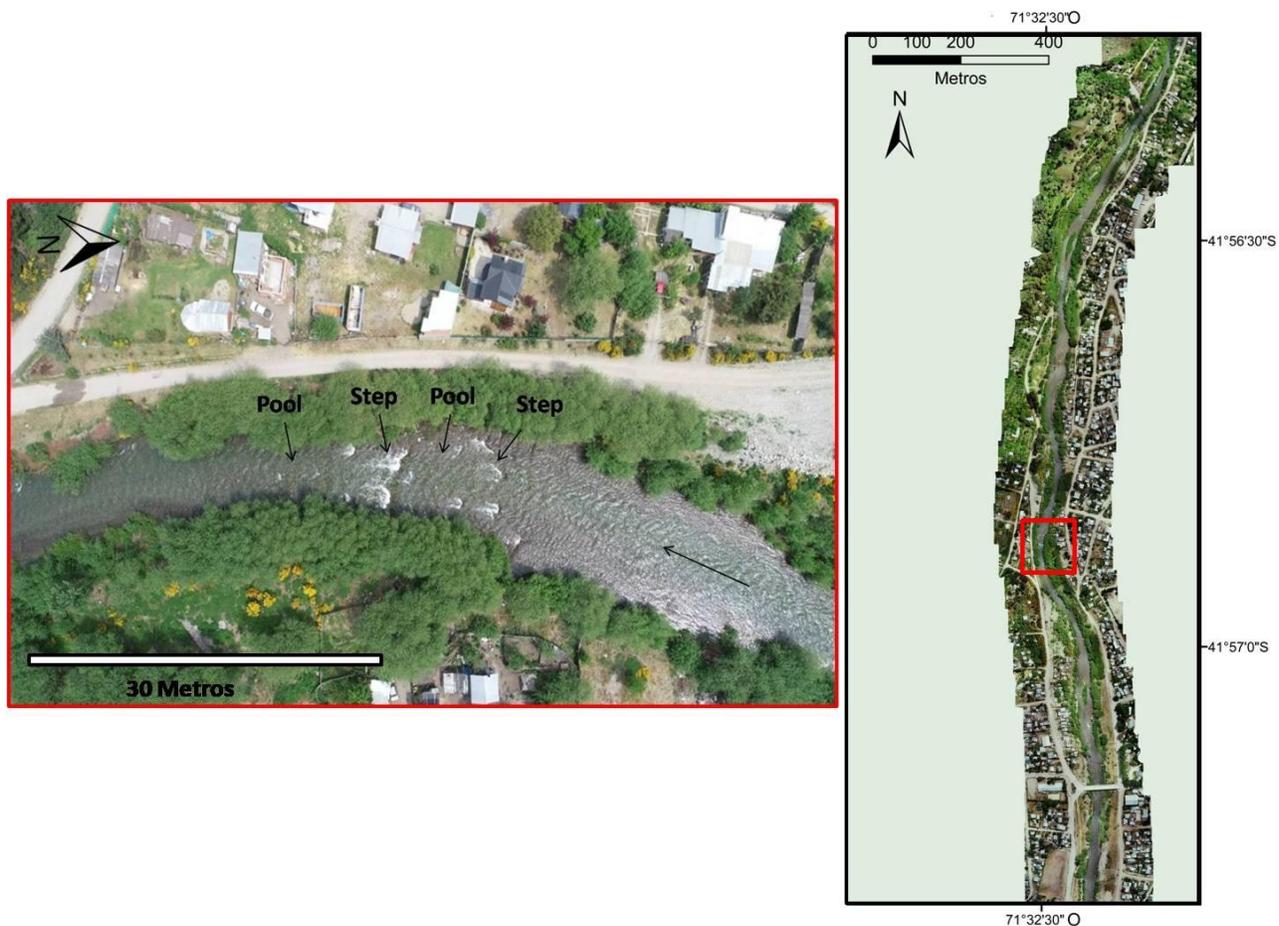


Figura 3.23. Secuencia de escalones y pozos por acumulación de grandes rocas sobre el lecho del río. Tramo superior. Imagen aérea tomada con VANT.

Barras: a lo largo de todo el río se observaron diversos tipos de barras, entre ellas laterales, longitudinales y transversales disectadas en barras centrales, siendo simple y compuestas respectivamente. Las barras longitudinales y centrales, al estar estabilizadas por la vegetación y encontrarse en el centro del canal rodeadas de agua, se categorizarán como islas (fig. 3.24). Se ha contabilizado un total de 108 barras e islas, de las cuales la gran mayoría están estabilizadas por vegetación ribereña (fig. 3.25). Todas ellas están compuestas por una granulometría variada, que va desde tamaño arena a clastos de hasta 50 centímetros de longitud en su eje mayor, todos ellos subredondeados (figs. 3.26 y 3.27). Hacia la zona de confluencia con el río Azul se observó una mejor selección de clastos.

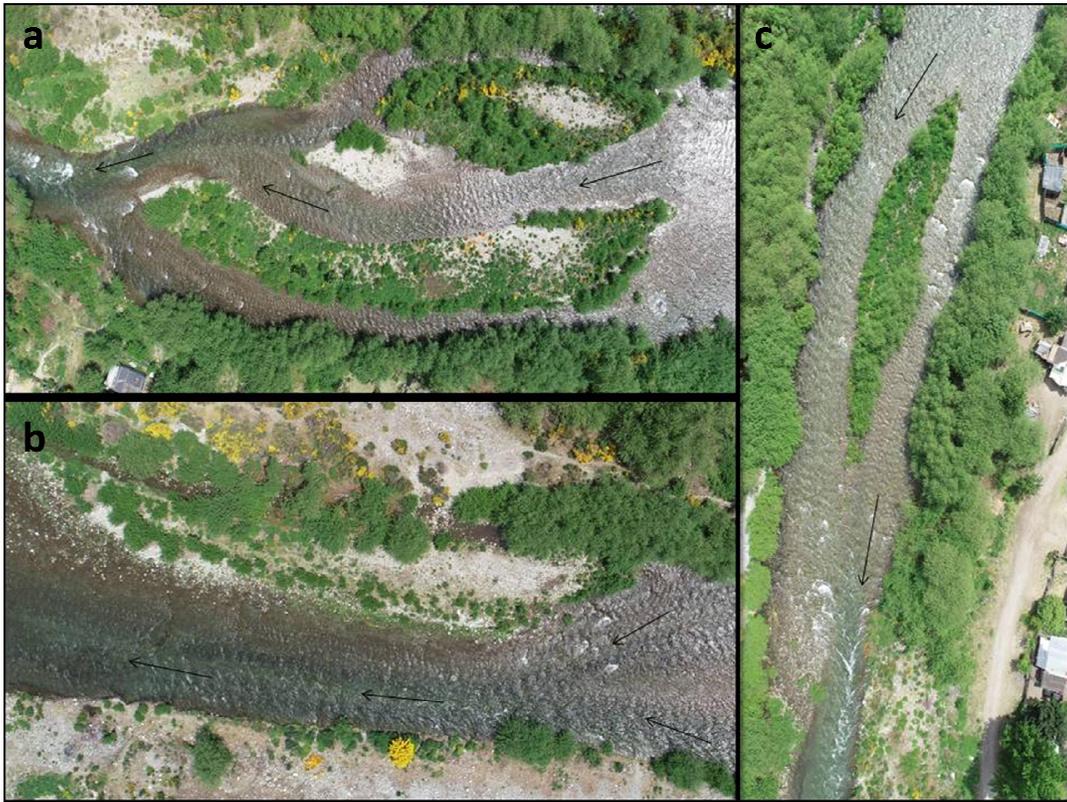


Figura 3.24. Tipos morfológicos de barras, a: barra transversal disectada (islas), b: barra lateral y c: barra longitudinal (isla).



Figura 3.25. Isla estabilizada por vegetación densa y madura.



Figura 3.26. Formación de una barra lateral en el tramo medio del río donde puede apreciarse el tamaño y redondez de los clastos.



Figura 3.27. Tamaño de los clastos que forman una barra lateral en zona de confluencia con el río Azul.

Cada alcance se caracteriza por la presencia de barras en su mayoría laterales alternando con islas. Se observó que la mayor cantidad se encuentran en los tramos sinuosos. Dichas barras se componen en su mayoría, de clastos de rocas graníticas, posiblemente debido a que la cuenca que da origen al río Quemquemtreu se construyó sobre un basamento ígneo-metamórfico tal como se

aprecia en el mapa geológico regional. El tamaño de clasto va desde arena a grandes bloques, mal seleccionados y subredondeados, pero hacia la zona de confluencia están mejor seleccionados, dando una apariencia de homogeneidad. La diversidad de tamaños demuestra que el río Quemquemtreu es un río caudaloso y quizás antiguamente lo fue más aún, ya que actualmente se observan pocos procesos de erosión y depositación activos, como alguna que otra barra juvenil que está comenzando a vegetarse y otras que están sumergidas. Ambas riberas, así como la mayoría de las barras están muy vegetadas (fig. 3.28), impidiendo en gran medida, que el río cumpla con sus procesos hidrogeomórficos.



Figura 3.28. Vista del río aguas abajo desde el puente de la RN N°40. En la imagen pueden apreciarse ambas riberas totalmente vegetadas y estabilizadas.

Finalmente se realizó el análisis de los caudales del río Quemquemtreu a lo largo de 56 años, desde 1956 a 2019. Dicho análisis se efectuó a partir de valores de caudales medios diarios de los cuales se generaron seis hidrogramas, cinco de los cuales representan un periodo de diez años y el sexto un lapso de cuatro años (ver Anexo I) y valores medios diarios máximos a partir del cual se generó un hidrograma anual (fig. 3.29). Los datos pertenecen a la Estación Hidrológica Escuela N°139 y fueron obtenidos de la base de datos hidrológica integrada perteneciente a la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación.

En el hidrograma anual pueden apreciarse picos de caudal correspondientes a los años 1961, 1965, 1966, 1969, 1977, 1993, 1997, 1999, 2002 y 2009 de los cuales los años 1961, 1969, 1977, 1993, 1997, 1999 y 2002 coinciden con las inundaciones históricas registradas del río Quemquemtreu.

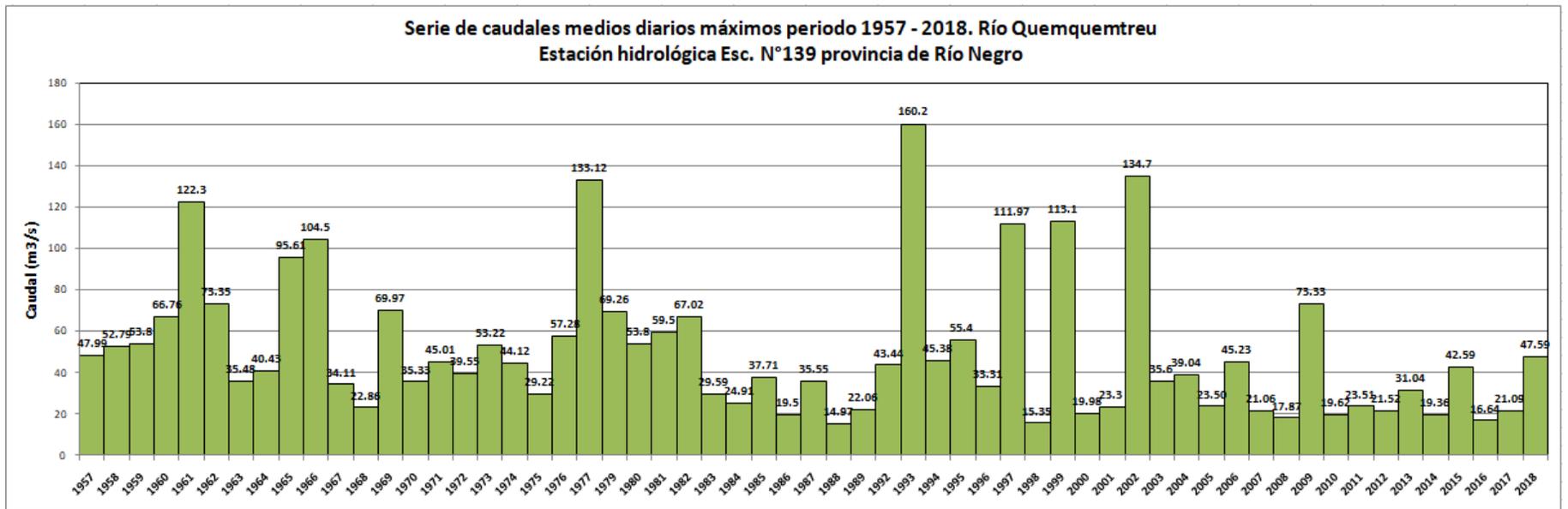


Figura 3.29. Hidrograma anual del río Quemquemtreu. Serie de datos 1957 - 2018. Datos obtenidos de la Base integrada de Recursos Hídricos Nacional.

3.4. Índice Hidrogeomorfológico (IHG)

3.4.1. Generalidades

Mantener la dinámica fluvial es esencial tanto en el funcionamiento del sistema como en su valor ecológico, paisajístico y ambiental. Una pequeña mejora en la dinámica fluvial responderá a corto plazo, incrementando la biodiversidad y calidad de los ecosistemas; del mismo modo, una pequeña alteración también tendrá un efecto rápido (Ballarín *et al.* 2010).

Solo los sistemas que mantienen la dinámica hidrogeomorfológica pueden llevar a cabo todas sus funciones. Un río sin impactos antrópicos, ya sea en su cuenca o en su cauce, tendrá una dinámica natural activa, respondiendo a las características de la cuenca de manera natural (Ollero, 2009).

Para estimar si un río funciona de manera natural, el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, España desarrolló el Índice Hidrogeomorfológico (IHG), que consta de tres grandes grupos de indicadores, que a su vez se dividen en tres componentes cada uno:

Calidad funcional del sistema

- *Naturalidad del régimen de caudales*: tiene en cuenta tanto el régimen como el volumen de caudales en relación a un estado natural sin alteraciones, es decir, si se mantienen las fluctuaciones de caudal. Los problemas más graves de esta componente son los embalses.
- *Disponibilidad y movilidad de sedimentos*: similar a la anterior, pero en este caso afecta a los sedimentos arrastrados por los cursos fluviales ¿El río lleva todos los sedimentos que puede llevar y es capaz de transportarlos?
- *Funcionalidad de la llanura de inundación*: se refiere a las modificaciones y restricciones sobre la llanura de inundación. Las impermeabilizaciones, urbanizaciones, canalizaciones y defensas son los impactos más graves.

Calidad del cauce

- *Naturalidad del trazado y morfología en planta*: el estilo fluvial es el resultado de todos los elementos y procesos geomorfológicos que se dan en la cuenca, por lo que constituye un indicador básico de naturalidad de todo el sistema fluvial. Algunos de los cambios en esa forma y trazado del cauce pueden responder a causas antrópicas, tanto directas como indirectas. Si el cauce ha sido modificado, la presencia de canalizaciones, rectificaciones o desviaciones son los impactos más importantes de esta componente.

- *Continuidad y naturalidad de los procesos longitudinales y verticales:* en esta componente se evalúa el perfil del río, la continuidad del cauce como forma de relieve y la naturalidad de su fondo o lecho. Ambos parámetros controlan las dinámicas longitudinal y vertical del sistema fluvial. La presencia de barreras en el cauce como represas, azudes, puentes, dragados o extracciones, son los impactos a tener en cuenta.
- *Naturalidad de las márgenes y la movilidad lateral:* hay que observar si el cauce se encuentra defendido, ya sea por alteraciones menores de los márgenes como por presencia de muros o gaviones.

Calidad de las riberas

- *Continuidad longitudinal:* tiene en cuenta los impactos que hacen que la ribera sea menor de lo que se espera por las características del cauce y el valle. Las alteraciones incluyen canalizaciones, escolleras, cultivos, urbanizaciones, etc.
- *Anchura del corredor ribereño:* se analiza teniendo como valor máximo un corredor ribereño natural, en el que no hubiese impactos. Se pueden consultar imágenes satelitales o aéreas para tener una visión del corredor ribereño antes de las condiciones actuales del río.
- *Estructura, naturalidad y conectividad lateral:* analiza la presencia o ausencia de un buen desarrollo de las riberas, así como la presencia de vegetación alóctona que no debería aparecer.

Para valorar el IHG, se utiliza una ficha de valoración que en este caso ha sido dividida en tres partes para una mejor visualización (fig. 3.30 a,b,c). En dicha tabla, cada uno de los apartados suman un máximo de 30 puntos (10 para c/u de las componentes), sumando un valor de 90 puntos para el sistema. Este valor correspondería a un funcionamiento totalmente natural (Ballarín *et al.* 2010).

El índice IHG se basa en el hecho de que todos los impactos humanos sobre el sistema fluvial, sean directos sobre el cauce o indirectos sobre cuencas y vertientes o diferidos en el tiempo, cuentan con una respuesta en el funcionamiento hidrológico y geomorfológico del sistema y en sus propias morfologías de cauce y riberas. El hecho de que el índice IHG se base en un trabajo de búsqueda o identificación de impactos o presiones puede hacerlo también muy útil en la planificación y en la restauración fluvial (Ollero *et al.* 2007).

CALIDAD FUNCIONAL DEL SISTEMA

Naturalidad del régimen de caudal

Tanto la cantidad de caudal circulante por el sector como su distribución temporal y sus procesos extremos responden a la dinámica natural, por lo que el sistema fluvial cumple perfectamente su función de transporte hidrológico		10
Aguas arriba o en el propio sector funcional hay actuaciones humanas (embalses, derivaciones, vertidos, detracciones, retornos, trasvases, urbanización de la cuenca, incendios, repoblaciones, etc.) que modifican la cantidad de caudal circulante y/o su distribución temporal	si hay alteraciones muy importantes de caudal, de manera que se invierte el régimen estacional natural, o bien circula de forma permanente un caudal ambiental estable	-10
	si hay alteraciones marcadas en la cantidad de caudal circulante, al menos durante algunos periodos, lo cual conlleva inversiones en el régimen estacional de caudales	-8
	si hay variaciones en la cantidad de caudal circulante pero las modificaciones del régimen estacional son poco marcadas	-6
	si hay algunas variaciones en la cantidad de caudal circulante pero se mantiene bien caracterizado el régimen estacional de caudal	-4
	si hay modificaciones leves de la cantidad de caudal circulante	-2

Disponibilidad y movilidad de sedimentos

El caudal sólido llega al sector funcional sin retención alguna de origen antrópico y el sistema fluvial ejerce sin cortapisas la función de movilización y transporte de esos sedimentos.		10
Hay presas con capacidad de retener sedimentos en la cuenca vertiente y en los sectores superiores del sistema fluvial	si más de un 75% de la cuenca vertiente hasta el sector cuenta con retención de sedimentos	-5
	si entre un 50% y un 75% de la cuenca vertiente hasta el sector cuenta con retención de sedimentos	-4
	si entre un 25% y un 50% de la cuenca vertiente hasta el sector cuenta con retención de sedimentos	-3
	si hay presas que retienen sedimentos, aunque afectan a menos de un 25% de la cuenca vertiente hasta el sector	-2
En el sector hay síntomas o indicios de dificultades en la movilidad de los sedimentos (<i>armouring, embeddedness</i> , alteraciones de la potencia específica, crecimiento de ciertas especies vegetales...) y pueden atribuirse a factores antrópicos	notables	-2
	leves	-1
Las vertientes del valle y los pequeños afluentes que desembocan en el sector cuentan con alteraciones antrópicas que afectan a la movilidad de sedimentos, o bien su conexión con el valle, la llanura de inundación o el propio lecho fluvial no es continua	alteraciones y/o desconexiones muy importantes	-3
	alteraciones y/o desconexiones significativas	-2
	alteraciones y/o desconexiones leves	-1

Funcionalidad de la llanura de inundación

La llanura de inundación puede ejercer sin restricción antrópica sus funciones de disipación de energía en crecida, laminación de caudales-punta por desbordamiento y decantación de sedimentos		10
La llanura de inundación cuenta con defensas longitudinales que restringen las funciones naturales de laminación, decantación y disipación de energía	si son defensas continuas	-5
	si son discontinuas pero superan el 50% de la longitud de la llanura de inundación	-4
	si alcanzan menos del 50% de la longitud de la llanura de inundación	-3
La llanura de inundación tiene obstáculos (defensas, vías de comunicación elevadas, edificios, acequias...), generalmente transversales, que alteran los procesos hidro-geomorfológicos de desbordamiento e inundación y los flujos de crecida	si predominan defensas directamente adosadas al cauce menor	-4
	si están separadas del cauce pero restringen más del 50% de la anchura de la llanura de inundación	-3
	si sólo hay defensas alejadas que restringen menos del 50% de la anchura de la llanura de inundación	-2
La llanura de inundación presenta usos del suelo que reducen su funcionalidad natural o bien ha quedado colgada por dragados o canalización del cauce	si hay abundantes obstáculos	-2
	si hay obstáculos puntuales	-1
La llanura de inundación presenta usos del suelo que reducen su funcionalidad natural o bien ha quedado colgada por dragados o canalización del cauce	si los terrenos sobreelevados o impermeabilizados superan el 50% de su superficie	-3
	si los terrenos sobreelevados o impermeabilizados constituyen entre el 15% y el 50% de su superficie	-2
	si hay terrenos sobreelevados o impermeabilizados aunque no alcanzan el 15% de su superficie	-1

VALORACIÓN DE LA CALIDAD FUNCIONAL DEL SISTEMA

Figura 3.30a. Primer grupo de evaluación de la tabla del Índice Hidrogeomorfológico. Calidad funcional del sistema.

CALIDAD DEL CAUCE

Naturalidad del trazado y de la morfología en planta

El trazado del cauce se mantiene natural, inalterado, y la morfología en planta presenta los caracteres y dimensiones acordes con las características de la cuenca y del valle, así como con el funcionamiento natural del sistema					10
Se han registrado cambios de trazado artificiales y modificaciones antrópicas directas de la morfología en planta del cauce	si afectan a más del 50% de la longitud del sector	si afectan a una longitud entre el 25% y el 50%	si afectan a una longitud entre el 10% y el 25%	si afectan a menos del 10% de la longitud del sector	
	-8	-7	-6	-5	
	si, no habiendo cambios drásticos, sí se registran cambios menores (retranqueo de márgenes, pequeñas rectificaciones...)	-6	-5	-4	-3
si, no habiendo cambios recientes drásticos o menores, sí hay cambios antiguos que el sistema fluvial ha renaturalizado parcialmente	-4	-3	-2	-1	
En el sector se observan cambios retrospectivos y progresivos en la morfología en planta derivados de actividades humanas en la cuenca o del efecto de infraestructuras				notables	-2
				leves	-1

Continuidad y naturalidad del lecho y de los procesos longitudinales y verticales

El cauce es natural y continuo y sus procesos hidrogeomorfológicos longitudinales y verticales son funcionales, naturales y acordes con las características de la cuenca y del valle, del sustrato, de la pendiente y del funcionamiento hidrológico					10
En el sector funcional hay infraestructuras transversales al cauce que rompen la continuidad del mismo	si embalsan más del 50% de la longitud del sector	si embalsan del 25 al 50% de la longitud del sector	si embalsan menos del 25% de la longitud del sector		
	-5	-4	-3		
	si hay al menos una presa de más de 10 m de altura y sin bypass para sedimentos	-4	-3	-2	
si hay varios azudes o al menos una presa de más de 10 m con bypass para sedimentos	-4	-3	-2		
si hay un solo azud	-3	-2	-1		
Hay puentes, vados u otros obstáculos menores que alteran la continuidad longitudinal del cauce	más de 1 por cada km de cauce			-2	
	menos de 1 por cada km de cauce			-1	
La topografía del fondo del lecho, la sucesión de resaltes y remansos, la granulometría-morfometría de los materiales o la vegetación acuática o pionera del lecho muestran síntomas de haber sido alterados por dragados, extracciones, solados o limpiezas	en más del 25% de la longitud del sector			-3	
	en un ámbito de entre el 5 y el 25% de la longitud del sector			-2	
	de forma puntual			-1	

Naturalidad de las márgenes y de la movilidad lateral

El cauce es natural y tiene capacidad de movilizarse lateralmente sin cortapisas, ya que sus márgenes naturales presentan una morfología acorde con los procesos hidrogeomorfológicos de erosión y sedimentación					10
El cauce ha sufrido una canalización total o hay defensas de margen no continuas o infraestructuras (edificios, vías de comunicación, acequias...) adosadas a las márgenes	en más del 75% de la longitud del sector			-6	
	entre un 50% y un 75% de la longitud del sector			-5	
	entre un 25% y un 50% de la longitud del sector			-4	
	entre un 10 y un 25% de la longitud del sector			-3	
	entre un 5 y un 10% de la longitud del sector			-2	
en menos de un 5% de la longitud del sector			-1		
Las márgenes del cauce presentan elementos no naturales, escombros o intervenciones que modifican su morfología natural				notables	-2
				leves	-1
En el sector se observan síntomas de que la dinámica lateral está limitada o no hay un buen equilibrio entre márgenes de erosión y de sedimentación, pudiendo ser efecto de actuaciones en sectores funcionales aguas arriba				notables	-2
				leves	-1

VALORACIÓN DE LA CALIDAD DEL CAUCE

Figura 3.30b. Segundo grupo de evaluación del Índice Hidrogeomorfológico. Calidad del cauce.

CALIDAD DE LAS RIBERAS				
Continuidad longitudinal <input type="checkbox"/>				
El corredor ribereño es continuo a lo largo de todo el sector funcional y en ambas márgenes del cauce menor, siempre que el marco geomorfológico del valle lo permita				10
La continuidad longitudinal de las riberas naturales puede estar interrumpida bien por usos del suelo permanentes (urbanización, naves, granjas, graveras, edificios, carreteras, puentes, defensas, acequias...) o bien por superficies con usos del suelo no permanentes (choperas, cultivos, zonas taladas, caminos...)	si más del 70% de las discontinuidades son permanentes	si entre un 30% y un 70% de las discontinuidades son permanentes	si menos del 30% de las discontinuidades son permanentes	
	si las riberas están totalmente eliminadas	-10	-10	-10
	si la longitud de las discontinuidades supera el 85% de la longitud total de las riberas	-10	-9	-8
	si las discontinuidades suponen entre el 75% y el 85% de la longitud total de las riberas	-9	-8	-7
	si las discontinuidades suponen entre el 65% y el 75% de la longitud total de las riberas	-8	-7	-6
	si las discontinuidades suponen entre el 55% y el 65% de la longitud total de las riberas	-7	-6	-5
	si las discontinuidades suponen entre el 45% y el 55% de la longitud total de las riberas	-6	-5	-4
	si las discontinuidades suponen entre el 35% y el 45% de la longitud total de las riberas	-5	-4	-3
	si las discontinuidades suponen entre el 25% y el 35% de la longitud total de las riberas	-4	-3	-2
	si las discontinuidades suponen entre el 15% y el 25% de la longitud total de las riberas	-3	-2	-1
si las discontinuidades suponen menos del 15%	-2	-1	-1	
Anchura del corredor ribereño <input type="checkbox"/>				
Las riberas naturales supervivientes conservan toda su anchura potencial, de manera que cumplen perfectamente su papel en el sistema hidrogeomorfológico.				10
La anchura de la ribera superviviente ha sido reducida por ocupación antrópica	si la anchura media del corredor ribereño actual es inferior al 40% de la potencial			-8
	si la anchura media del corredor ribereño actual se encuentra entre el 40% y el 60% de la anchura potencial			-6
	si la anchura media del corredor ribereño actual se encuentra entre el 60% y el 80% de la anchura potencial			-4
	si la anchura media del corredor ribereño actual es superior al 80% de la potencial			-2
si la <i>Continuidad longitudinal</i> ha resultado 0 (ribera totalmente eliminada)	-10	si al aplicar estos puntos el resultado final es negativo, valorar 0		
si la <i>Continuidad longitudinal</i> ha resultado 1	-2			
si la <i>Continuidad longitudinal</i> ha resultado 2 ó 3	-1			
Estructura, naturalidad y conectividad transversal <input type="checkbox"/>				
En las riberas supervivientes se conserva la estructura natural (orlas, estratos, hábitats), la naturalidad de las especies y toda la complejidad y diversidad transversal, no existiendo ningún obstáculo antrópico interno que separe o desconecte los distintos hábitats o ambientes que conforman el corredor.				10
Hay presiones antrópicas en las riberas (pastoreo, desbroces, talas, incendios, explotación del acuífero, recogida de madera muerta, relleno de brazos abandonados, basuras, uso recreativo...) que alteran su estructura, o bien la ribera se ha matorralizado por desconexión con el freático (cauces con incisión)	si se extienden en más del 50% de la superficie de la ribera actual	si se extienden entre el 25% y el 50% de la superficie de la ribera actual	si se extienden en menos del 25% de la superficie de la ribera actual	
	si las alteraciones son importantes	-4	-3	-2
	si las alteraciones son leves	-3	-2	-1
La naturalidad de la vegetación ribereña ha sido alterada por invasiones o repoblaciones	si las alteraciones son significativas		-2	
	si las alteraciones son leves		-1	
En el sector hay infraestructuras lineales, generalmente longitudinales o diagonales, (carreteras, defensas, acequias, pistas, caminos...) que alteran la conectividad transversal del corredor	si se distribuyen por todo el sector y la suma de sus longitudes supera el 150% de la longitud de las riberas			-4
	si la suma de sus longitudes da un valor entre el 100% y el 150% de la longitud de las riberas			-3
	si la suma de sus longitudes da un valor entre el 50% y el 100% de la longitud de las riberas			-2
	si la suma de sus longitudes es inferior al 50% de la de las riberas			-1
si la <i>Continuidad longitudinal</i> ha resultado 0 (ribera totalmente eliminada)	-10	si al aplicar estos puntos el resultado final es negativo, valorar 0		
si la <i>Continuidad longitudinal</i> ha resultado 1	-2			
si la <i>Continuidad longitudinal</i> ha resultado 2 ó 3	-1			
VALORACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS RIBERAS <input type="checkbox"/>				

Figura 3.30c. Tercer grupo de evaluación de la tabla del Índice Hidrogeomorfológico. Calidad de las riberas.

3.4.2. Análisis hidrogeomorfológico

El análisis del río Quemquemtreu, desde el punto hidrogeomorfológico, se realizó para conocer cómo responde a su dinámica natural, es decir, sin presiones antrópicas. Para ello, se dividió el tramo del río que va desde el puente de la ruta N°40 hasta la confluencia con el río Azul en dos sectores dependiendo de su morfología (fig. 3.31) y se analizó de manera puntual cada parámetro del río que finaliza con una puntuación (tabla 3.6) (cuadros 3.1 y 3.2).

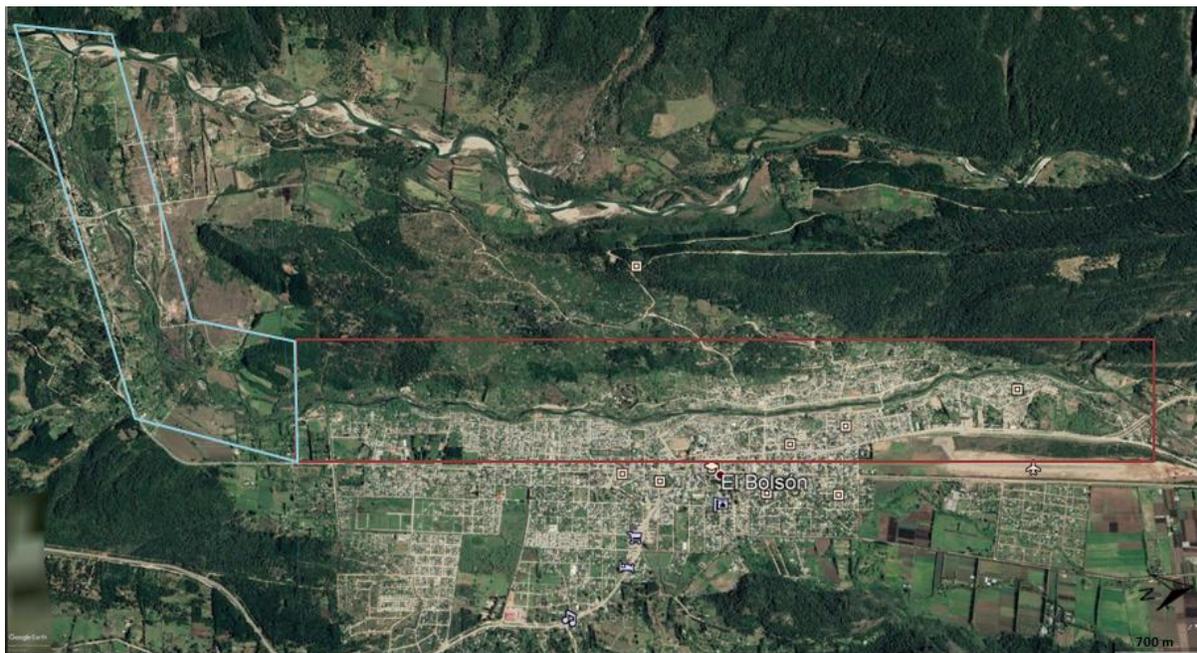


Figura 3.31. Tramos en que se dividió el río Quemquemtreu para su análisis hidrogeomorfológico. Desde el puente de la RN N°40 (41°56'5.11" S; 71°32'8.14"O) hasta la confluencia con el río Azul (42°0'32.38"S; 71°35'14.20"O).

CALIFICACIÓN HIDROGEOMORFOLÓGICA	
PARA CADA PARÁMETRO	VALORACIÓN TOTAL
25 a 30 puntos: Muy buena	75 a 90 puntos: Muy buena
20 a 24 puntos: Buena	60 a 74 puntos: Buena
14 a 19 puntos: Moderada	42 a 59 puntos: Moderada
7 a 13 puntos: Deficiente	21 a 41 puntos: Deficiente
0 a 6 puntos: Muy mala	0 a 20 puntos: Muy mala

Tabla 3.6. Tabla de valoración para el IHG.

ANÁLISIS HIDROGEOMORFOLÓGICO DEL TRAMO 1 DEL RIO QUEMQUEMTREU		
PARÁMETRO	EXPLICACION	PUNTOS
<i>Naturalidad del régimen de caudal</i>	Debido a que no se observan alteraciones como represas, embalses o derivaciones que puedan alterar de manera significativa el régimen natural del río, se establece que el caudal circundante responde a la dinámica natural	10
<i>Disponibilidad y movilidad de sedimentos</i>	En el sector ha habido extracciones de áridos en el pasado para la construcción de puentes y extracción de aridos de las barras naturales del río evitar que el cauce tenga movilidad lateral (-2). En sectores hay crecimiento de ciertas especies vegetales como musgos, que producen una especie de acorazamiento sobre los sedimentos, debido a alteraciones antrópicas (-1)	7
<i>Funcionalidad de la llanura de inundación</i>	Presenta obstáculos transversales como defensas y urbanización que perjudican los procesos de desbordamiento (-2). Además estos usos del suelo, sobre todo para urbanización, lo que genera la impermeabilización del suelo reduce su funcionalidad (-3)	5
CALIDAD FUNCIONAL DEL SISTEMA FLUVIAL: BUENO		22
<i>Naturalidad del trazado y morfología en planta</i>	En sectores puntuales se observó la desviación de un brazo del cauce para uso antrópico, pero el río ha renaturalizado este sector	8
<i>Continuidad y naturalidad del lecho</i>	En el sector hay puentes y espigones que alteran los procesos longitudinales (-2). También se han registrado extracción de áridos en sectores puntuales (-1)	7
<i>Naturalidad de las márgenes</i>	Se observan defensas y estructuras en mas del 75% del sector (-6), y escombros sobre ambos márgenes en sectores puntuales (-1)	3
CALIDAD DEL CAUCE: MODERADA		18
<i>Continuidad longitudinal</i>	Hay mucha urbanización sobre las riberas que produce una discontinuidad importante y permanente	1
<i>Anchura del corredor ribereño</i>	En este sector la urbanización ocupa toda la llanura de inundación, reduciendo la anchura potencial de la ribera (-8). Como la continuidad longitudinal resultó 1 (-2)	0
<i>Estructura, naturalidad y conectividad transversal</i>	Hay presiones antrópicas sobre las riberas pero una gran parte de la vegetación se mantiene densa y madura (-2). Muchas calles corren paralelas a las riberas, cortando la conectividad transversal (-3). Como la continuidad longitudinal resulto 1 (-2)	3
CALIDAD DE LAS RIBERAS: MUY MALA		4
VALOR FINAL DE LA CALIDAD HIDROGEOMORFOLÓGICA DEL TRAMO 1 DEL RIO QUEMQUEMTREU: MODERADA = 44 PUNTOS		

Cuadro 3.1. Resultado del análisis del tramo 1 del río Quemquemtreu.

ANÁLISIS HIDROGEOMORFOLÓGICO DEL TRAMO 2 DEL RÍO QUEMQUEMTREU		
PARÁMETRO	EXPLICACION	PUNTOS
<i>Naturalidad del régimen de caudal</i>	Tal como en el tramo 1, no se observan alteraciones como represas, embalses o derivaciones que puedan alterar de manera significativa el régimen natural del río, se establece que el caudal circundante responde a la dinámica natural	10
<i>Disponibilidad y movilidad de sedimentos</i>	En el pasado hubo extracción de aridos para la construcción de un puente y caminos (-2)	8
<i>Funcionalidad de la llanura de inundación</i>	Hay urbanización en el sector pero la gran parte corresponde a chacras y cultivos, por lo que no restringe en gran medida la funcionalidad de la llanura de inundación (-1)	9
CALIDAD FUNCIONAL DEL SISTEMA FLUVIAL: MUJ BUENA		27
<i>Naturalidad del trazado y morfología en planta</i>	Se observan cambios en el valle hacia la zona de la confluencia, antiguos brazos abandonado que el río no ha vuelto a llenar (-3) esta zona, es la mas urbanizada de todo el tramo (-2).	5
<i>Continuidad y naturalidad del lecho</i>	Hay un solo puente, pero este no impide los procesos hidrogeomorfológicos del río	10
<i>Naturalidad de las márgenes y movilidad lateral</i>	Las orillas del tramo son naturales y el cauce puede moverse lateralmente. Sin embargo aguas arriba hay intervenciones que modificaron el equilibrio entre erosión y depositación del río (-2)	8
CALIDAD DEL CAUCE: BUENA		23
<i>Continuidad longitudinal</i>	La continuidad longitudinal está interrumpida por urbanización (chacras en mayor medida) (-6)	4
<i>Anchura del corredor ribereño</i>	Está limitada por la ocupación antrópica, aunque en menor medida que el tramo 1 por lo que el 50% aproximadamente de la anchura potencial de las riberas se mantiene (-4)	6
<i>Estructura, naturalidad y conectividad transversal</i>	Hay presiones antrópicas como deforestaciones, cultivos, pero la mayor parte de la vegetación se mantiene madura y densa (-2). Hay caminos paralelos a las riberas que generan discontinuidad transversal (-2)	6
CALIDAD DE LAS RIBERAS: MODERADA		16
VALOR FINAL DE LA CALIDAD HIDROGEOMORFOLÓGICA DEL TRAMO 2 DEL RÍO QUEMQUEMTREU: BUENA = 66		

Cuadro 3.2. Resultado del análisis del tramo 2 del río Quemquemtreu.

3.4.3. Impacto antrópico

Presiones hidrogeomorfológicas: Las presiones son aquellas acciones humanas que pueden afectar negativamente a los sistemas fluviales alterando y modificando su comportamiento natural. Dentro de la diversidad de presiones que hay, algunas de las que podemos reconocer son: extracción de agua, alteraciones morfológicas como extracción de áridos, rectificaciones de cauce, urbanización y construcción de estructuras en las márgenes, ocupación de llanuras de inundación, entre otras (Ballarín y Rodríguez, 2013).

Quizás una de las presiones más comunes de observar es la urbanización sobre las llanuras de inundación del río, por el hecho de ser zonas altamente productivas y bellas para la percepción humana. Sin embargo, son zonas altamente vulnerables a las crecidas e inundaciones, y la progresiva urbanización sobre las llanuras repercute en factores como la escorrentía, la depositación natural de sedimentos, la infiltración y el aporte de sedimentos, ya que es la encargada de disipar la energía frente a eventos de crecida. La construcción de infraestructuras como espigones y puentes, generan cambios en la corriente y sedimentación. Los espigones frenan la corriente de río evitando que golpee directamente sobre las orillas, pero modificando la hidrodinámica y de esta manera el patrón de erosión-sedimentación, ya que además pueden retener sedimentos en su camino aguas abajo. Los puentes generan insuficiencia hidráulica para evacuar caudales de crecida (Ballarín y Rodríguez, 2013).

Las actuaciones directas en el cauce como defensas, dragados, extracciones, etc., tienen repercusiones tanto localmente como aguas abajo que se manifiestan con el tiempo. Al alterar la forma del cauce, se modifican todos los procesos geomorfológicos, generalmente se tiende a reducir la complejidad natural del trazado del río, lo que implica un aumento en la pendiente y en los procesos de incisión en el fondo del lecho (Ollero, 2009).

En la zona de estudio que va desde el puente de la Ruta Nacional N° 40 hasta la desembocadura del río Quemquemtreu (fig. 3.31) se observaron abundantes presiones antrópicas, principalmente urbanización (figs. 3.32 y 3.33) y a raíz de ello, la construcción de puentes que conectan ambas riberas (fig. 3.34), la construcción de defensas transversales como espigones (fig. 3.35), extracción de áridos y dragados del cauce (fig. 3.36), deforestación para cultivos, etc. Todas ellas producen un impacto en la dinámica natural de río, limitando y alterando a largo plazo las capacidades naturales del mismo (fig. 3.37)



Figura 3.32. Imagen aérea tomada con VANT mostrando la urbanización a orillas del río Quemquemtreu.



Figura 3.33. Imagen aérea tomada con VANT del río Quemquemtreu con abundante urbanización sobre sus riberas.



Figura 3.34. Puente que conecta ambas orillas del río en el cual se observa acumulación de sedimentos sobre sus pilares.



Figura 3.35. Espigón de un metro de alto sobre la ribera izquierda del río.



Figura 3.36. Imagen satelital del año 2011 donde se observa la extracción de áridos del río.



Figura 3.37. Construcción de puente donde puede apreciarse como tuvo que adaptarse el río ante las nuevas condiciones.

El análisis hidrogeomorfológico a través del Índice Hidrogeomorfológico (IHG) mostró que el primer tramo del río Quemquemtreu presenta una calidad hidrogeomorfológica moderada, a diferencia del segundo tramo con una calidad hidrogeomorfológica buena. Esto principalmente se debe a que el núcleo poblacional está ubicado sobre el primer tramo (desde el puente de la RN N°40 hasta el Paralelo 42°), ocupando toda la planicie de inundación e incluso ambas riberas. Las presiones antrópicas sobre este sector son mucho más marcadas que en el tramo 2, el cual pese a tener presiones antrópicas, mantiene mejor las características morfológicas del río.

El principal impacto es la urbanización y de ella se derivan situaciones como impermeabilización del suelo, defensas fluviales, derivaciones del cauce, construcción de calles e infraestructuras, extracción de áridos para construcción, etc. Es lógico que cuando se produce el asentamiento de una población en cercanías al río, se priorice su seguridad, por lo que una de las acciones más comunes en los ríos es el de detener la dinámica del mismo, sobre todo su movilidad lateral. En el río Quemquemtreu, para evitar este tipo de situaciones, se construyeron espigones cuyas principales funciones son la reducción de velocidad de flujo sobre las orillas, evitar la erosión de las márgenes, mantener un ancho fijo del río, entre otras.

3.5. Modelo de inundación

3.5.1. Fundamentación

El río Quemquemtreu es un río aluvial de montaña con un módulo (caudal anual promedio) de $9.7 \text{ m}^3/\text{s}$ de régimen pluvio-nival (fig. 3.38).

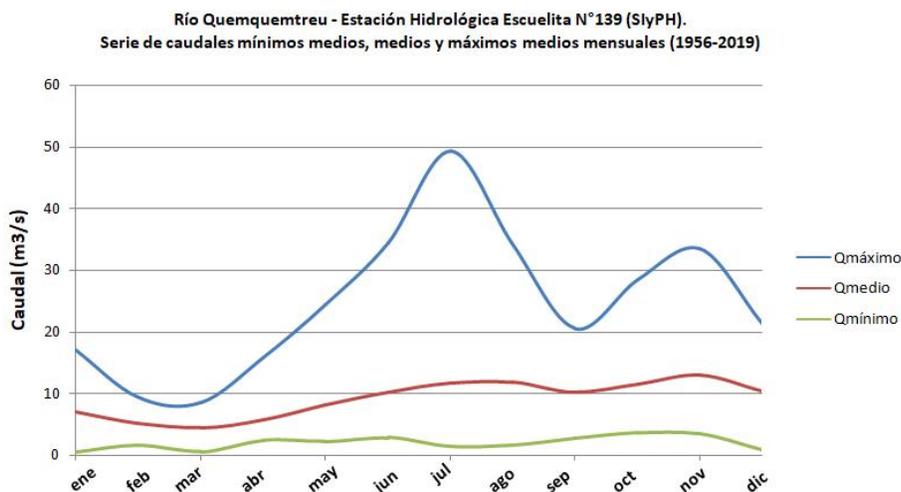


Figura 3.38. Serie de caudales mínimos, medio y máximos medios mensuales del río Quemquemtreu (periodo 1957-2019). Datos obtenidos de la Base de Recursos Hídricos Nacional.

Como se comentó al principio de este trabajo, el río Quemquemtreu atraviesa de norte a sur el Paraje Mallín Ahogado y las localidades de El Bolsón y Lago Puelo respectivamente.

En el año 1883 la Comarca Andina comienza a poblarse por agricultores chilenos, a los que les siguen argentinos de diferentes regiones y extranjeros de diversos lugares contratados para armar la infraestructura del entonces, pueblo de El Bolsón (Nini, 2016).

Desde ese momento, y gracias a la fertilidad del valle, el crecimiento poblacional incrementó rápidamente, lo que llevó a ocupar el tramo medio e inferior del río Quemquemtreu. Además, se intensificaron las tareas de deforestación para la explotación maderera y se destinaron tierras para la actividad ganadera y agrícola en la cuenca del río (Nini, 2016).

La utilización de las tierras para la actividad agropecuaria, industrial y urbanización sobre el río Quemquemtreu dificulta la función natural de esas zonas que corresponden a la disipación de la energía transportada por el agua y sedimentos, especialmente durante las crecidas (Nini, 2016).

Los antecedentes históricos de inundaciones sobre dichas zonas, se remontan al año 1961 con la primera gran inundación del río en el año 1969, seguida de inundaciones en los años 1977, 1993, 1997, 2000, 2002 y 2004, que coinciden con los picos de precipitación registrados (fig. 3.39).

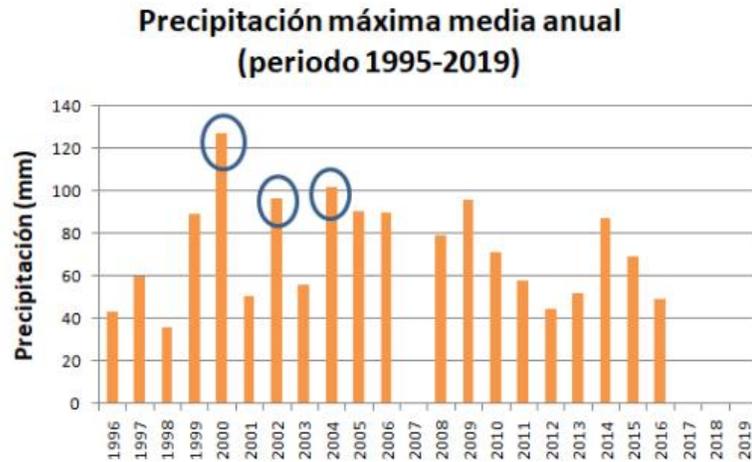


Figura 3.39. Pluviograma de precipitaciones diarias de El Bolsón (periodo 1995-2019) mostrando los picos coincidentes con las inundaciones del río. Datos facilitados por Departamento Provincial de aguas (DPA).

Esta problemática llevó a la construcción de obras de defensa como espigones para la estabilización del cauce y recuperación de las riberas por parte del Departamento Provincial de Aguas y la Secretaria de Obras Públicas (Reverter *et al.* 2005; Merg *et al.* 2010; Nini, 2016).

Una de las estrategias utilizadas para reducir la vulnerabilidad en zonas de riesgo hídrico es la determinación de las líneas de ribera y riesgo hídrico. La línea de ribera se define como el límite entre la propiedad privada y el dominio público hídrico (Nini, 2016). Debe haber restricciones sobre el uso e interés público sobre las zonas de riesgo hídrico para prevenir o mitigar daños causados por inundaciones (Cano, 1988) (fig. 3.40).

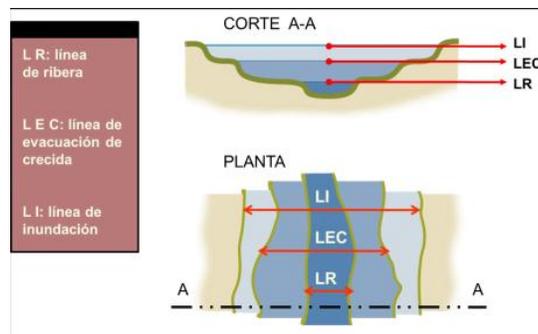


Figura 3.40. Representación de sección transversal y en planta de la línea de ribera, línea de evacuación de crecidas y línea de inundación. Tomado de Nini (2016).

Como complemento a dichos estudios, se generó un modelo de inundación para conocer qué zonas son las afectadas ante un nuevo evento de crecida y de esta manera poder generar planes de manejo.

3.5.2. Metodología

A partir del ortomosaico de detalle generado con VANT y el MDE con resolución de 1 metro exportado desde el software Agisoft Metashape se procedió al mapeo de la geometría del río Quemquemtreu (río, orillas, secciones transversales y construcciones antrópicas) con el software ArcGIS 10.5 y su complemento HecGeoRAS con la herramienta de Pre-procesamiento, para luego exportarla al programa de modelación HEC RAS 5.0.6

El software HEC RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) es un programa de modelización hidráulica unidimensional compuesta por 4 tipos de análisis en ríos: modelización de flujo en régimen permanente, modelización de flujo en régimen no permanente, modelización del flujo de sedimentos y análisis de la calidad de aguas. Permite simular flujos tanto en cauces naturales como artificiales por lo que su objetivo principal es el de generar estudios de inundabilidad determinando las zonas inundables.

En este caso se trabajó la modelización en flujo permanente ya que se trata de un río permanente. Una vez creado el proyecto en HEC RAS e importada la geometría proveniente de ArcGIS, es necesario asignarle valores de caudal, que en este caso se utilizaron los valores estipulados por el DPA para la línea de ribera (**151 m³/s**), línea de evacuación de crecidas (**196 m³/s**) y línea de inundación (**243 m³/s**), con periodos de recurrencia de 25, 50 y 100 años respectivamente. A las secciones de control se le asignó la distancia tanto de la orilla izquierda como de la orilla derecha que había entre una sección de control y la siguiente aguas abajo, y los valores de rugosidad de Manning, también basados en los valores utilizados por DPA que corresponden a **0.030 – 0.050** para fondo de grava, canto rodado y algunas rocas; **0.040 – 0.055** para zonas aledañas al cauce principal sin vegetación o con muy poca; **0.1 – 0.2** para zonas con árboles densos; **0.08 – 0.130** para zonas con árboles y arbustos; **0.045 – 0.110** para zonas de arbustos y **0.030 – 0.050** para zonas cultivadas. Una vez insertados los valores correspondientes a las condiciones de contorno, caudal, geometría y pendiente (1.11 %) (fig. 3.41) se corre el modelo para corregir cualquier error que pueda surgir y se exporta el trabajo nuevamente a ArcGIS para generar el modelo de inundación esta vez con la herramienta de Post-procesamiento del complemento HecGeoRAS. Para dicho modelado se utilizó como modelo de terreno el MDE mencionado del que se generó una superficie TIN (red irregular de triángulos) ya que el programa para ciertas operaciones responde mejor ante este tipo de terreno (fig. 3.42).

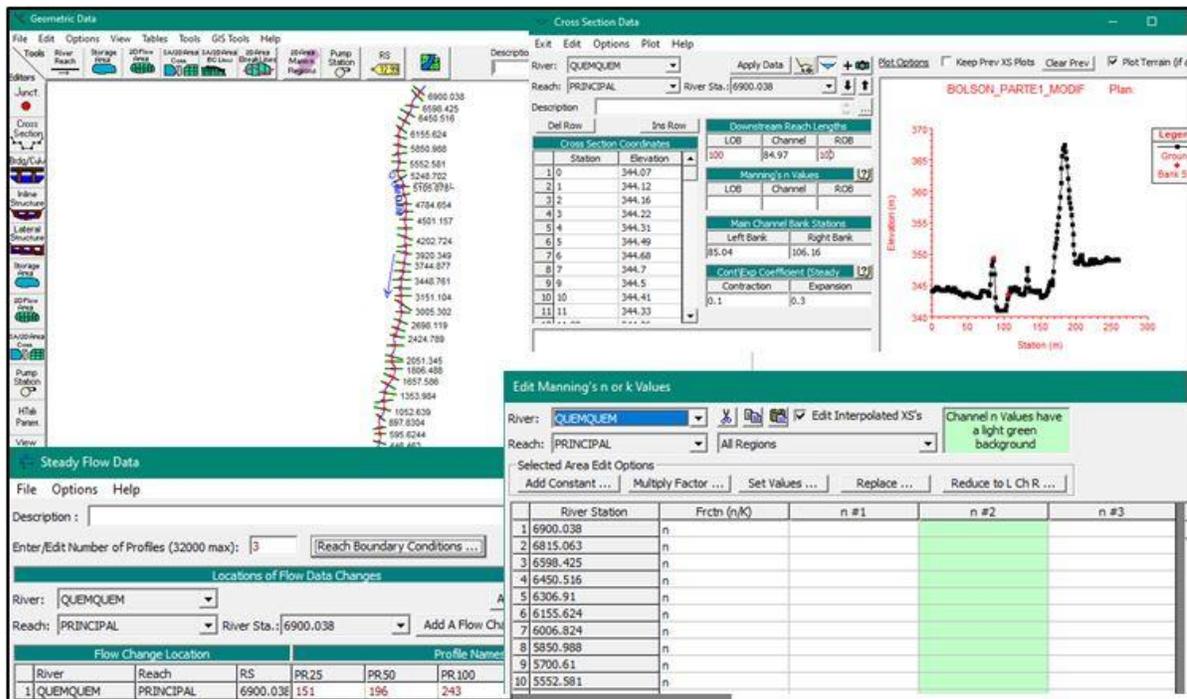


Figura 3.41. Ingreso de datos en software HEC RAS. Izq. sup: geometría río Quemquemtreu. Der.sup: ingreso de valores entre secciones de control. Izq. inf: ingreso de caudales para los diferentes periodos de retorno. Der.inf: tabla para valores de rugosidad.

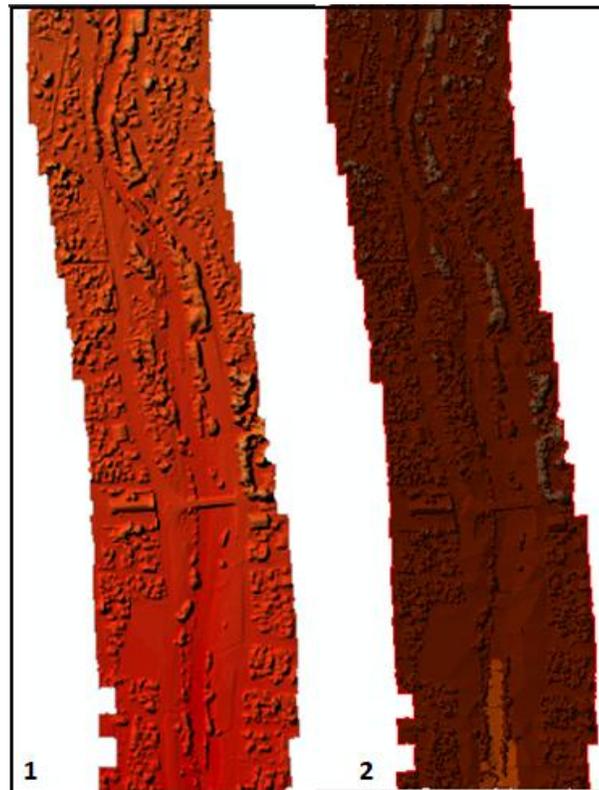


Figura 3.42. 1: Modelo Digital de elevaciones. 2: TIN generado a partir del MDE.

3.5.3. Resultado del análisis

El modelo de inundación se realizó en el segmento 2 del río Quemquemtreu (fig.3.43) ya que es donde está asentado el núcleo poblacional. Se muestra el límite de la línea de ribera para un periodo de retorno de 25 años (fig. 3.44), la línea de evacuación de crecidas para un periodo de retorno de 50 años (fig. 3.45) y la línea de inundación para un periodo de retorno de 100 años (fig. 3.46). Tanto la línea de evacuación de crecidas como la línea de inundación están restringidas a la superficie del MDE utilizado (fig. 3.47) y no se contaba con perfiles transversales del río para complementar el MDE, por lo que se observa hasta dónde puede llegar el agua pero no en toda su extensión sobre el terreno.

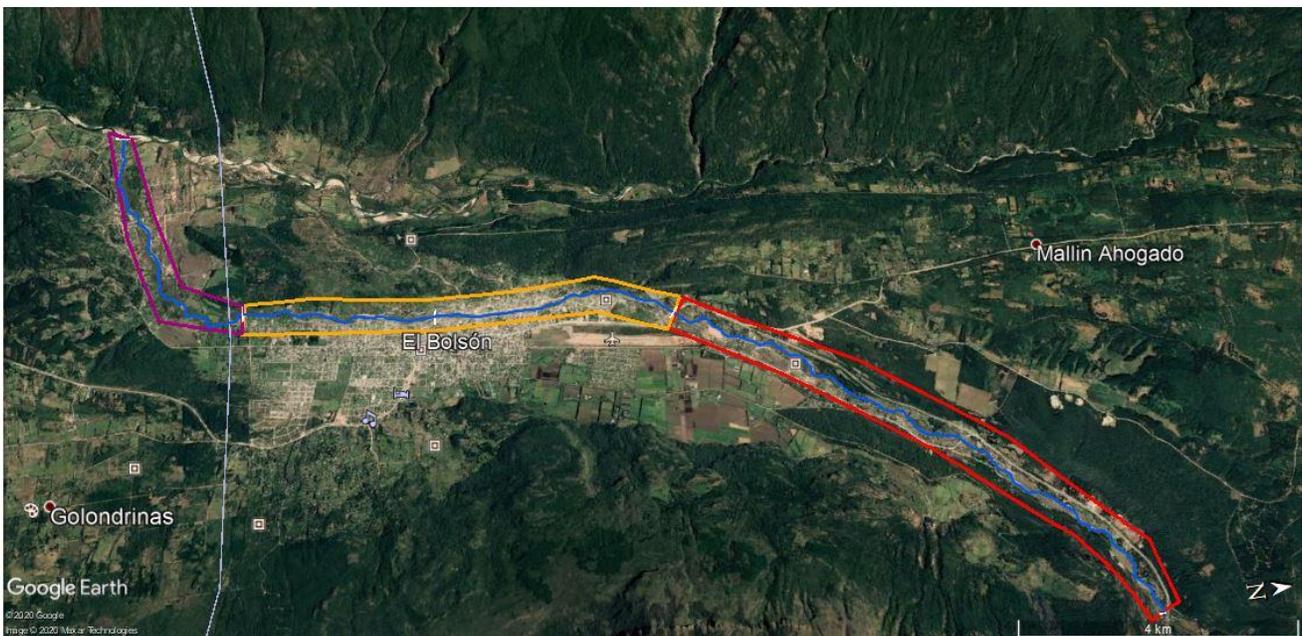


Figura 3.43. Figura de ubicación del tramo seleccionado para el estudio de inundación. El área puede observarse delimitada por un polígono naranja.



Figura 3.44. Izquierda: línea de ribera sobre ortomosaico generado con VANT. Derecha: línea de ribera en formato KML sobre imagen satelital de Google Earth.

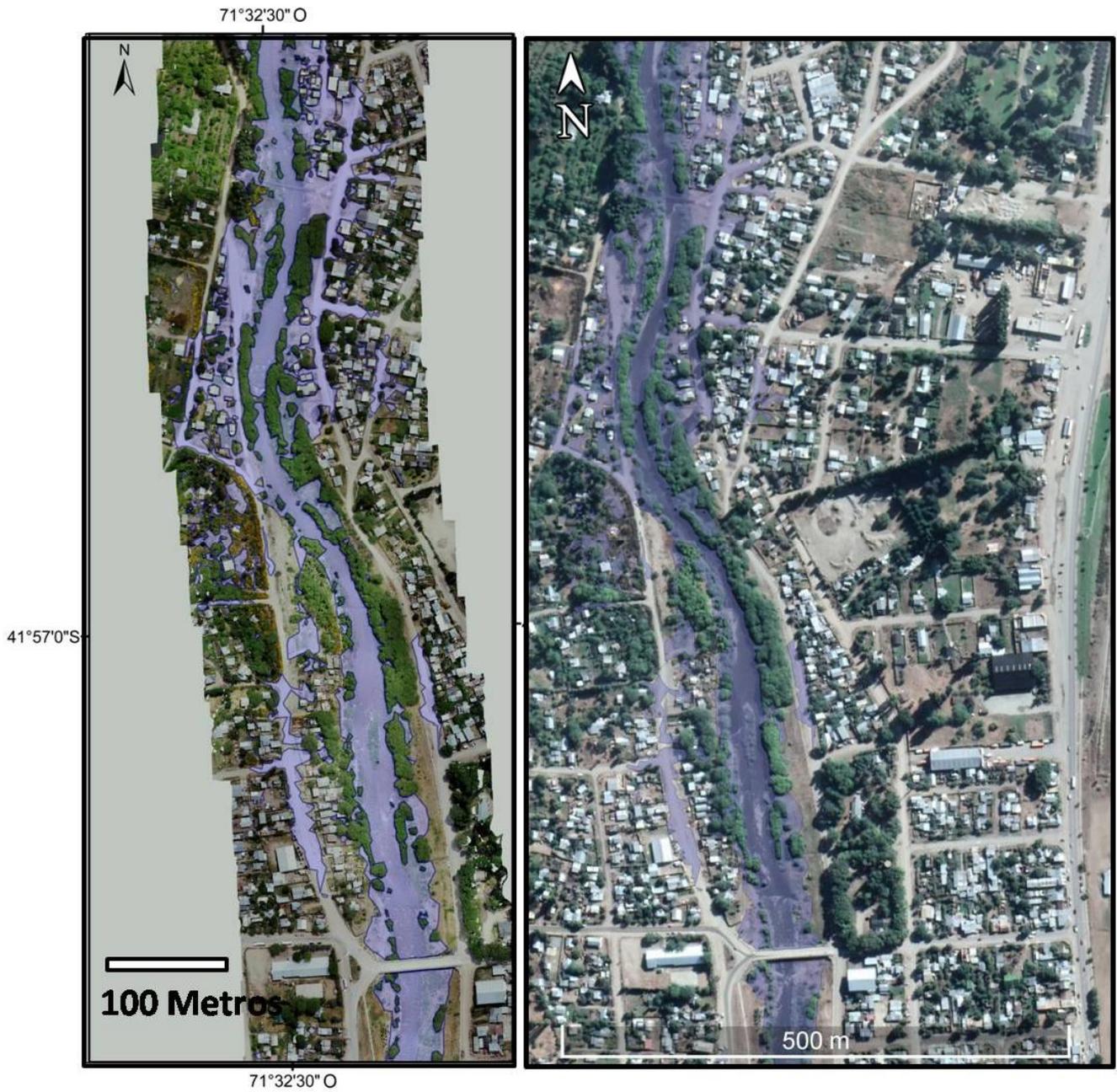


Figura 3.45. Izquierda: línea de evacuación de crecidas sobre ortomosaico generado con VANT. Derecha: línea de evacuación de crecidas en formato KML sobre imagen satelital de Google Earth.

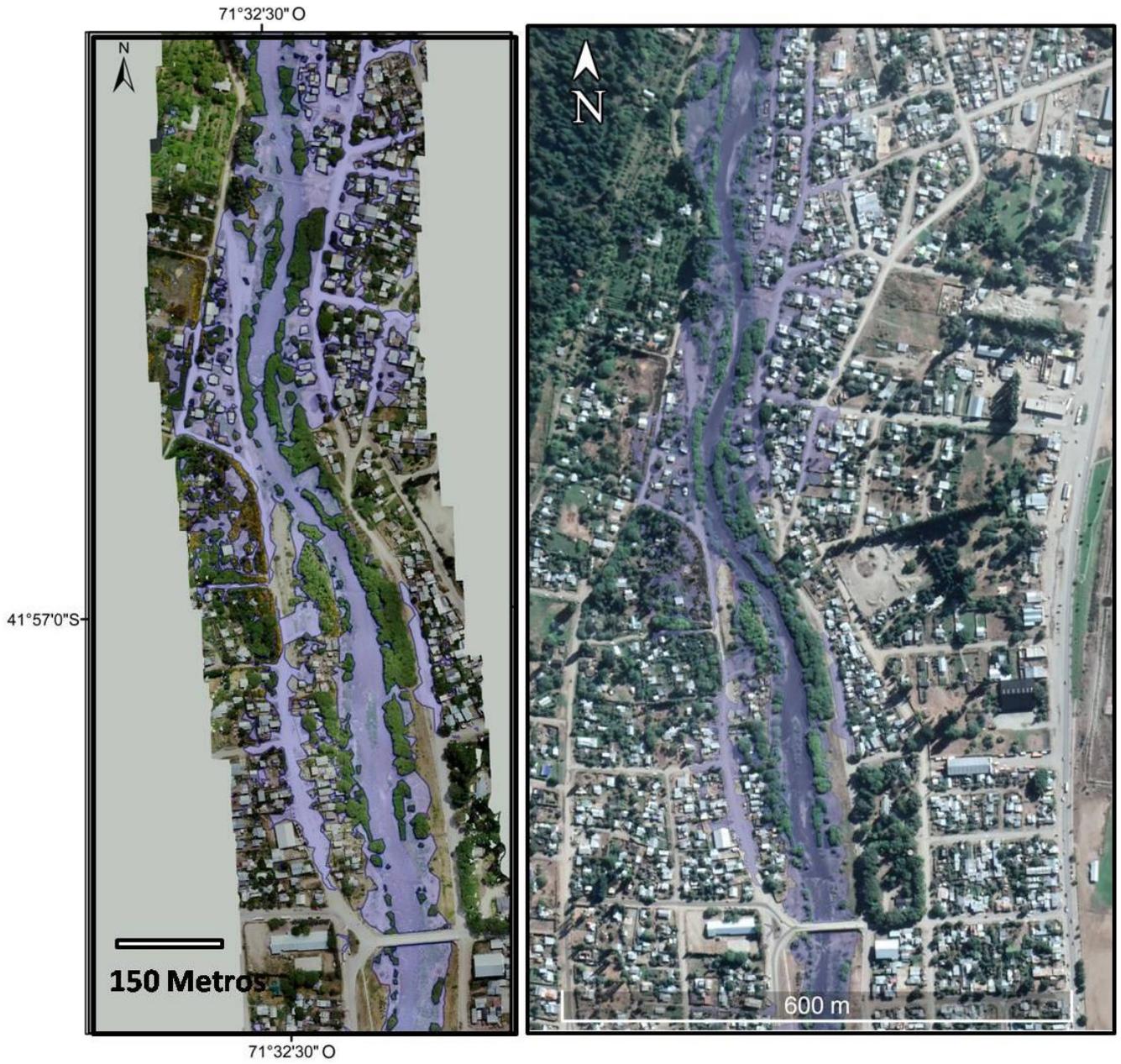


Figura 3.46. Izquierda: línea de inundación sobre ortomosaico generado con VANT. Derecha: línea de inundación en formato KML sobre imagen satelital de Google Earth.

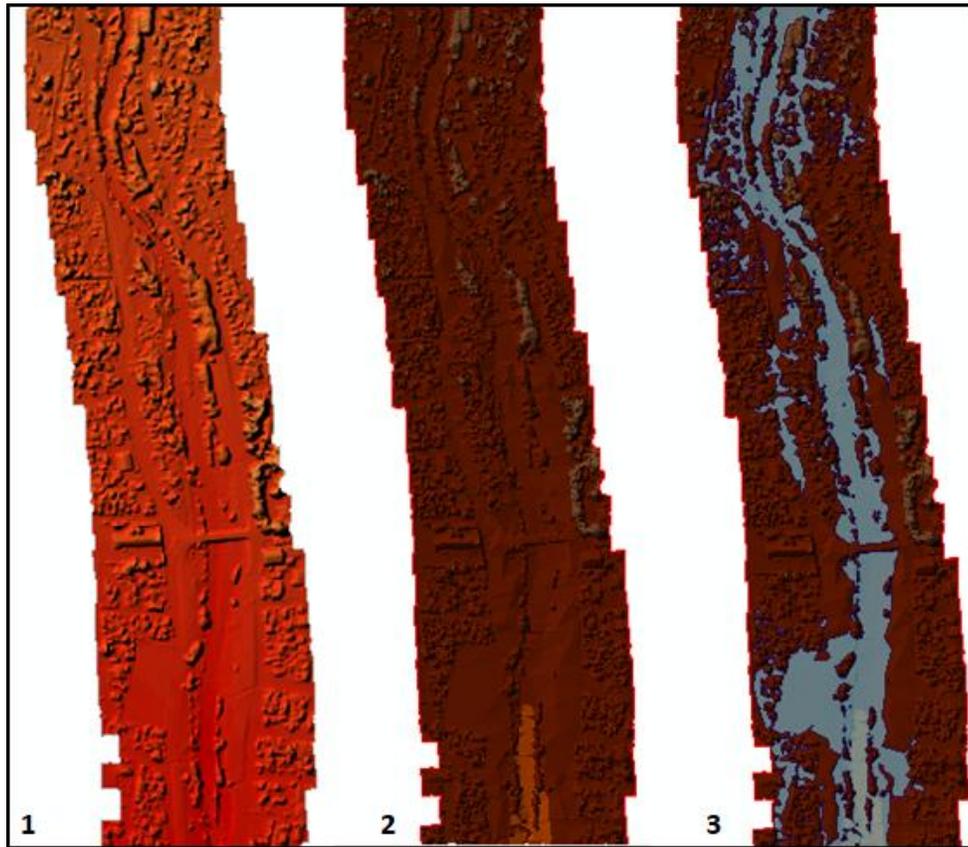


Figura 3.47. Detalle del modelo de terreno para el modelado donde se aprecia la superficie sobre la que se trabajo. 1: MDE con resolución de 1 metro. 2: TIN generado a partir del MDE. 3: Inundación para un periodo de retorno de 50 años sobre terreno.

En el modelado de inundación para el río Quemquemtreu pudo observarse que el agua cuando desborda ingresa por las zonas bajas del terreno como calles, ribera con escasa vegetación, terrenos a orillas del río en donde se ha quitado la vegetación ribereña y zonas de desmonte como canchas, plazas, etc. Mientras que zonas con obstáculos como la propia vegetación de las orillas, hacen de reparo ante las crecidas del río.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El río Quemquemtreu es un río aluvial de zona montañosa que presenta una transición de forma que pasa de sinuoso a recto para volver a retomar la sinuosidad en su tramo final. El tramo que se clasifica como recto coincide con la ubicación del núcleo urbano de El Bolsón, por lo que es probable que la pérdida de sinuosidad se deba a esto. Se sabe que junto con el asentamiento de una comunidad en cercanías de un río se produce la construcción de defensas fluviales, lo que inevitablemente cambia la dinámica natural del río. Esto además ha sido corroborado con el resultado del IHG, con una calidad hidrogeomorfológica moderada para dicho sector, mientras que en las zonas que no están tan perturbadas por cambios antrópicos la calidad hidrogeomorfológica se mantiene buena.

Entre las características geomorfológicas del río, quizás uno de los puntos más importantes es haber notado, gracias al análisis de caudales, que el río hace aproximadamente 17 años, luego de la inundación del año 2002, mantiene caudales que no superan los $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig. 3.28) a excepción del último pico importante, en el año 2009, con un valor de $73.33 \text{ m}^3/\text{s}$. Los valores de caudal están condicionados por las precipitaciones y en menor medida por los deshielos. Comparando el pluviograma con los hidrogramas, puede comprobarse que los valores altos de caudal coinciden con los meses más lluviosos del año para la zona de estudio.

El hecho de que la gran mayoría de las barras e islas del río Quemquemtreu, así como ambas orillas, estén estabilizadas por vegetación densa que supera el metro de altura, se relaciona con la disminución del caudal del río.

Esto además, posiblemente esté relacionado con características morfométricas de la subcuenca del río Quemquemtreu, como por ejemplo el estado de madurez de la misma, donde el poder erosivo no es tan intenso. Además de la disminución en el potencial erosivo, la subcuenca es alargada y ovalada lo que significa que no concentra grandes volúmenes de agua. Sin embargo, la pendiente es pronunciada y el tiempo de concentración es rápido, lo que puede generar que en momentos de importantes precipitaciones el escurrimiento sea elevado y se evacúe con gran rapidez. Esto deriva en otro punto importante y es que la comunidad de El Bolsón y zonas aledañas, están sujetas a esta dinámica. El modelado de inundación ha demostrado que frente a grandes crecidas el nivel del agua sobrepasa las orillas e inunda muchos de los barrios localizados allí, inundando preferentemente zonas bajas del terreno. La buena resolución del modelo de elevación digital hace que puedan apreciarse sin dificultad todos los elementos adyacentes al río (desde arbustos hasta casas). Sin embargo el área de inundación está limitada por el área del MDE, esto se confirma con la inundación del periodo de retorno de 100 años, donde se ve como el agua llega hasta los límites del área. Se recomienda efectuar un vuelo con VANT que abarque una mayor superficie y de esta manera generar un modelo de inundación de toda la zona.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mis directores, Alberto Caselli y Martín Nini por el apoyo durante todo lo que conllevó realizar mi trabajo final de licenciatura. Por estar en cada momento para mis dudas y consultas. Gracias Alberto por la paciencia y por dedicarme hasta un domingo para ayudarme con la tesis.

Al jurado, Raúl Giacosa, Cecilia Cávana y Darío Orts por aceptar mi trabajo de licenciatura y tomarse el tiempo de leerlo y corregirlo.

A la dirección de carrera y Universidad Nacional de Río Negro, por dar la oportunidad de cursar esta hermosa carrera con buenos profesionales de manera pública y gratuita.

También quiero agradecer a Fernando Bodoira, del Departamento Provincial de Aguas por haberme facilitado sin ningún problema información sobre mi lugar de trabajo.

A mi familia, mis padres Liliana y Laudino y mis hermanos Lautaro y Miguel por el apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y en particular a lo largo de toda mi carrera, siempre presente tanto en los buenos como en los malos momentos.

A mi pareja, Gerardo, que no solo es amigo y compañero de vida, cursadas y campo, sino que hoy también es colega. Un pilar importantísimo en mi vida.

A todos mis amigos, los que están cerca como los que están lejos. Gracias por darle calidez a mi vida.

A todos los profesores a lo largo no solo de la Carrera de Geología sino también de la Carrera de Biología, allí comenzó mi camino por la universidad y fue donde gracias a Marisa González y Oscar Martínez conocí la geología. De todos me llevo algo y espero seguir encontrándolos a lo largo de mi carrera profesional.

Por último quiero agradecer a la Fundación YPF con su programa de becas, fue una ayuda importantísima y una experiencia muy linda. Me dio no solo la oportunidad de conocer muchas personas sino también de asistir a congresos de geología.

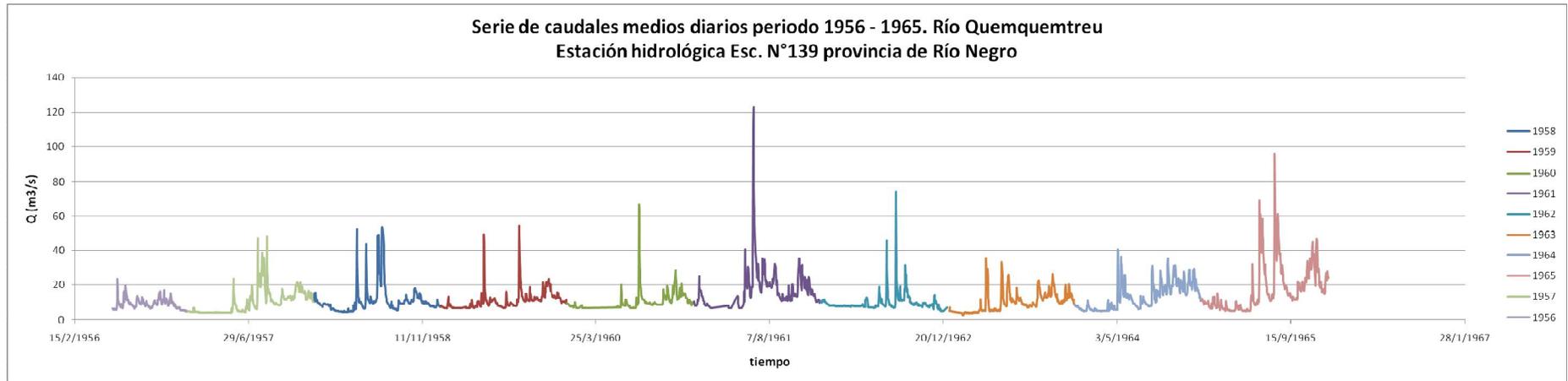
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ballarín, D. y Rodríguez, I. 2013. Hidromorfología fluvial: algunos apuntes aplicados a la restauración de ríos de la cuenca de Duero. Confederación Hidrográfica del Duero (Ministerio de agricultura, Alimentación y Medio ambiente). 129 p., Valladolid, España.
- Bechis, F., Encinas, A., Concheyro, A., Litvak, V.D., Aguirre-Urreta, B. Y Ramos, V.A. 2014. New age constraints for the Cenozoic marine transgressions of northwestern Patagonia, Argentina (41° - 43°): Paleogeographic and tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences* 52: 201421.
- Bovee, K.D. y Milhous, R.I. 1978. Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques. Cooperative Instream Flow Services Group. 88 p., Fort Collins, Colorado.
- Brice, J.C. 1964. Channel patterns and Terraces of the Loup Rivers in Nebraska. Geological Survey Professional paper: 422 D. 47 p., Washington.
- Cano, G. 1988. Estudio sobre línea de ribera. Informe final. 3 volúmenes. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires. En: Nini, M.I. 2016. Líneas de ribera y riesgo hídrico en el marco de la GIRH en la provincia de Río Negro. Caso del río Quemquemtreu en El Bolsón. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. 170 p.
- Cardona, B. 2016. Conceptos Básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. Facultad de Ingeniería. 8 p., Guatemala.
- Charlton R., 2008. *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Routledge: Taylor and Francis Group. 224 p., London.
- Dalla Salda, L., Cingolani, C y Varela, R. 1991. El basamento cristalino de la región nordpatagónica de los lagos Gutiérrez, Mascardi y Guillermo. Provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 46 (3-4): 263-273. Buenos Aires.
- Dietrich, W.E. y Dunne, T. 1993. The Channel Head. En: Charlton R., 2008. *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Routledge: Taylor and Francis Group. 224 p., London.
- Diez, O. y Zubia, M. 1979. Informe preliminar de la Hoja 41a, El Bolsón, provincia de Río Negro. Servicio Minero Nacional, Plan Patagonia Comahue (inédito). Comodoro Rivadavia.
- DIEZ, O. y M. ZUBIA, 1981. Sinópsis estratigráfica de la región de "El Bolsón", provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 36 (1): 19-28. Buenos Aires.
- Elorza, M. 2008. *Geomorfología*. Pearson Education, S.A. 920 p., Madrid, España.
- Garzón, H.G. 1987. Las avenidas como fenómeno geológico. *Geología y prevención de daños por inundaciones*. IGME, 5-54.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158.

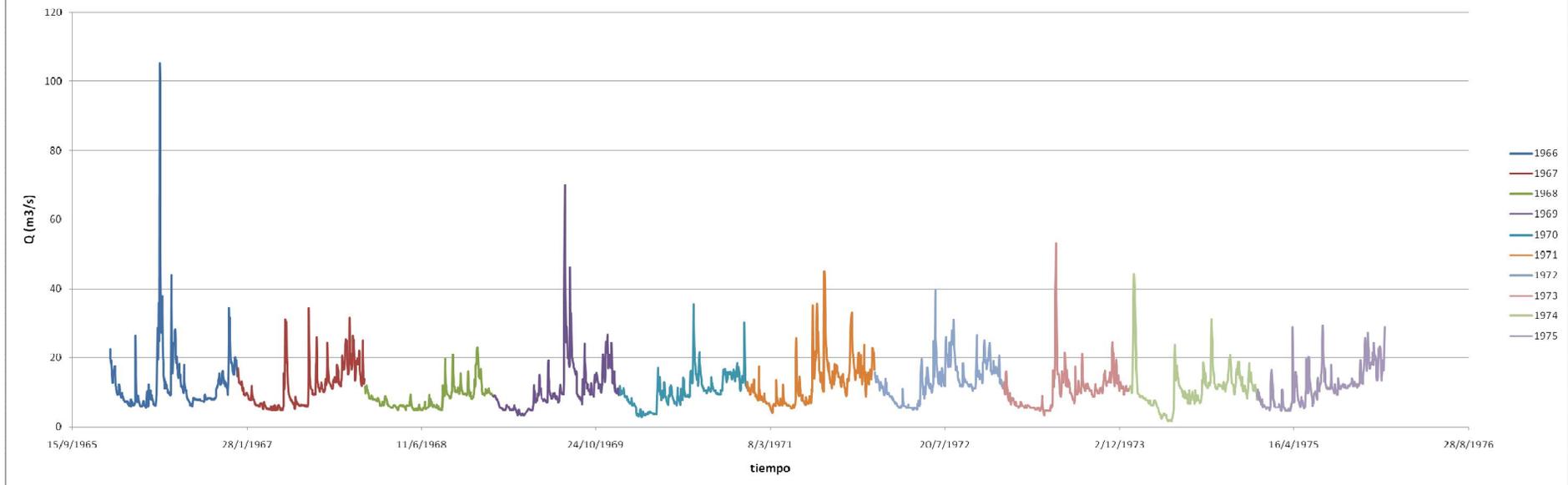
- Giacosa, R. y Heredia, N. 2001. Hoja Geológica 4172 – IV San Carlos de Bariloche, provincia de Río Negro. Instituto de geología y recursos minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 279, 85 p., Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1973. Geología del área entre San Carlos de Bariloche y Llao-Llao. Fundación Bariloche, Publicación Departamento Recursos Naturales y Energía: 1-53. San Carlos de Bariloche, Río Negro.
- Gonzalez Bonorino, F. 1974. La Formación Millanqueo y la “Serie Porfirica” de la Cordillera Patagónica. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 29 (2): 145-154. Buenos Aires.
- Gordon, A. y Ort, M. 1993. Edad y correlación del plutonismo subcordillerano en las provincias de Río Negro y Chubut. Actas 12° Congreso Geológico Argentino, 4:120-127. Buenos Aires.
- Gordon, N.D., McMahon, T.A., Finlayson, B.L., Gippel, C.J. y Nathan, R.J. 2004. Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists. En: Charlton R., 2008. Fundamentals of Fluvial Geomorphology. Routledge: Taylor and Francis Group. 224 p., London.
- Lizuain, A. 2010. Hoja Geológica 4372 I y II Esquel, provincia de Chubut. Instituto de geología y recursos minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 369, 80 p., Buenos Aires.
- Merg, C. 2010. En. Informe Técnico del río Quemquemtreu. El Bolsón, provincia de Río Negro.
- Munro, E.S. 2010. El río y la forma. Introducción a la geomorfología fluvial. RIL editores. 324 p., Santiago de Chile.
- Nini, M.I. 2016. Líneas de ribera y riesgo hídrico en el marco de la GIRH en la provincia de Río Negro. Caso del río Quemquemtreu en El Bolsón. Facultad de ingeniería y ciencias hídricas, Universidad Nacional del Litoral. 170 p.
- Ochoa, T. 2011. Hidráulica de ríos y procesos morfológicos (1° Edición). Ecoe Ediciones. 704 p., Bogotá, Colombia.
- Ollero, A. 2009. Aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG en la cuenca del Ebro: Guía metodológica. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, Zaragoza, España.
- Ollero, A., Ballarín, D., Díaz, E., Mora, D., Sánchez, M., Acín, V., Echevarría, M.E., Granado, D., Gonzales, A. I., Sánchez, L. y Sánchez, N. 2007. Un Índice Hidrogeomorfológico (IHG) para la evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales. Geographicalia (52): 113-141.
- Rapela, C.W., Munizaga, F., Dalla Salda, L., Hervé, F., Parada, M.A. y Cingolani, C. 1987. Nuevas edades K-Ar de los granitoides del sector nororiental de los Andes Patagónicos. 10° Congreso Geológico Argentino, 4: 18-19. San Miguel de Tucumán.
- Reverter, M., Gines Asensio, G. y Magnin, S. 2005. Estabilización de cauce y recuperación de riberas en el río Quemquemtreu, El Bolsón, Río Negro. Segundo Simposio Regional sobre hidráulica de ríos, Neuquen, Argentina.

- Ruiz, L.E. 2013. Análisis geomorfológico, sedimentológico y crono-estratigráfico, de depósitos glaciales, periglaciales y glaciogénicos, en la Cordillera de los Andes y zonas adyacentes entre el paralelo 42° y 43° LS, desde la última glaciación. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. 293 p., Buenos Aires.
- Schumm, S.A. 1977. The Fluvial System. En: Elorza, M. 2008. Geomorfología. Pearson Education, S.A. 920 p., Madrid, España.
- Strahler, A.N. 1952. Dynamic basis of geomorphology. En: Elorza, M. 2008. Geomorfología. Pearson Education, S.A. 920 p., Madrid, España.
- Tobal, J., Rojas Vera, E., Folguera, A., Ramos, V.A. 2012. Deformación andina en el cordón del Hielo Azul al oeste de El Bolsón. Implicancias en la evolución tectónica de la Cordillera Norpatagónica en Río Negro, Argentina. *Andean Geol.* 39 (3): 442 a 463.
- Volkheimer, W. 1964b. Estratigrafía de la zona extraandina del Departamento Cushamen (Chubut) entre los paralelos 42° y 42° 30' y los meridianos 70° y 71°. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 19 (2): 85-107. Buenos Aires.
- Worschitz, R.O. 2018. Cátedra de Topografía e Hidrografía. Obtenido de: <https://es.scribd.com/document/391342574/topografia-e-hidrologia>

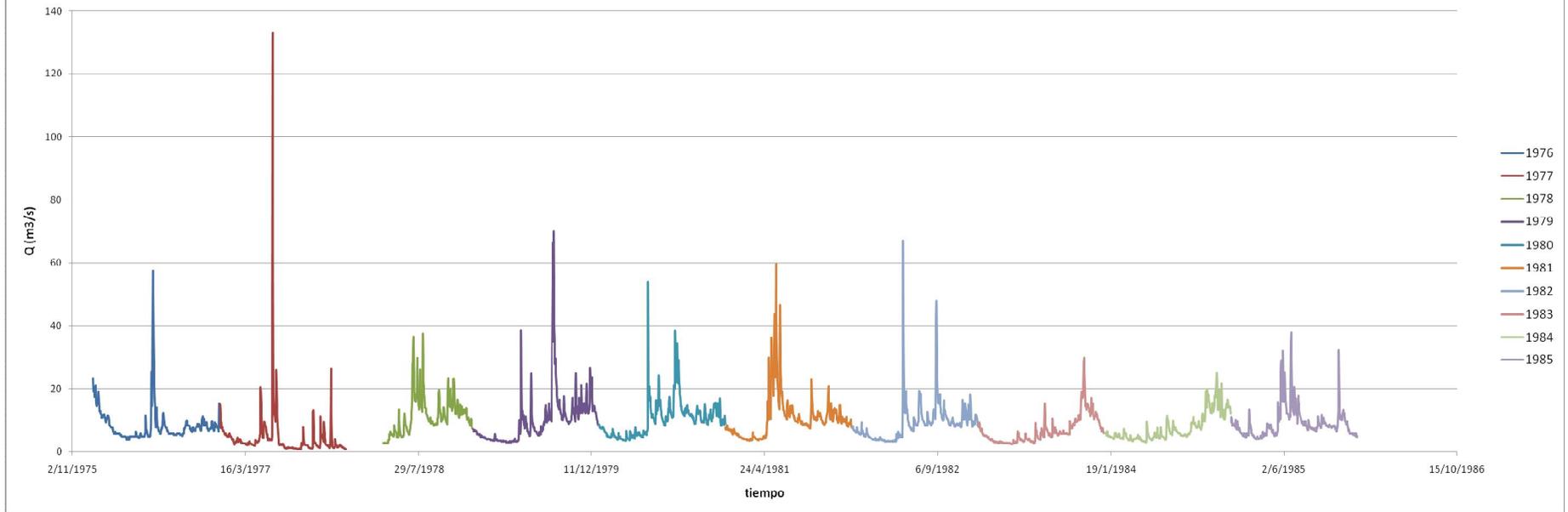
ANEXO I



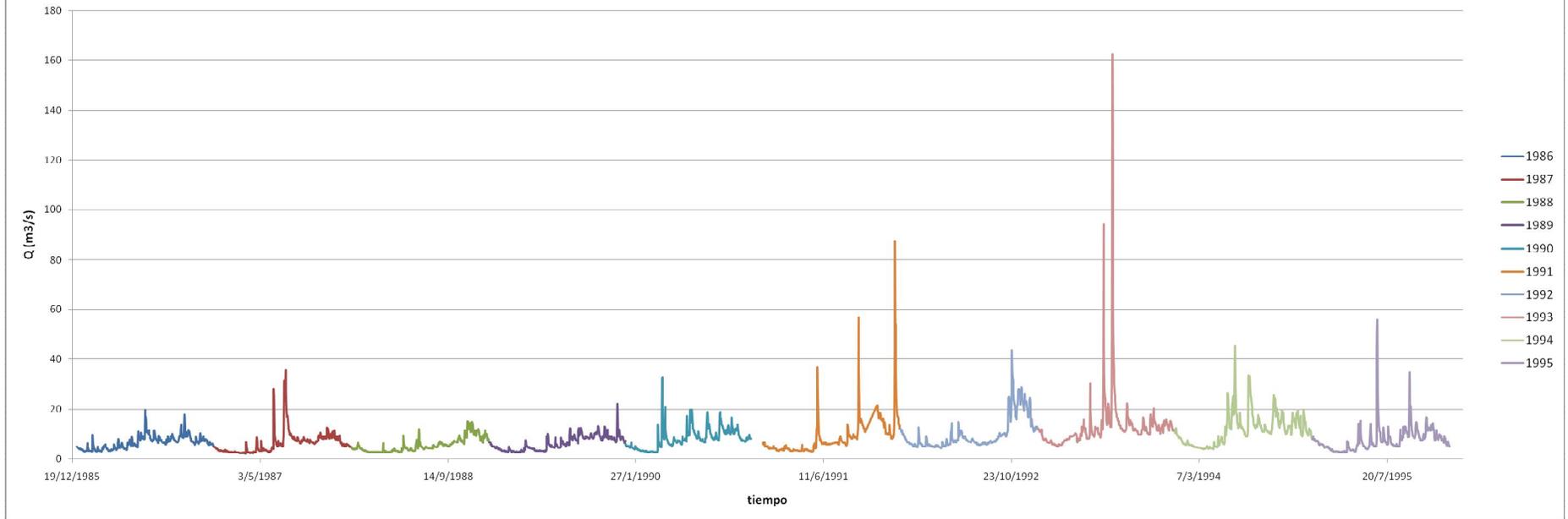
Serie de caudales medios diarios periodo 1966 - 1975. Río Quemquemtreu
Estación hidrológica Esc. N°139 provincia de Río Negro

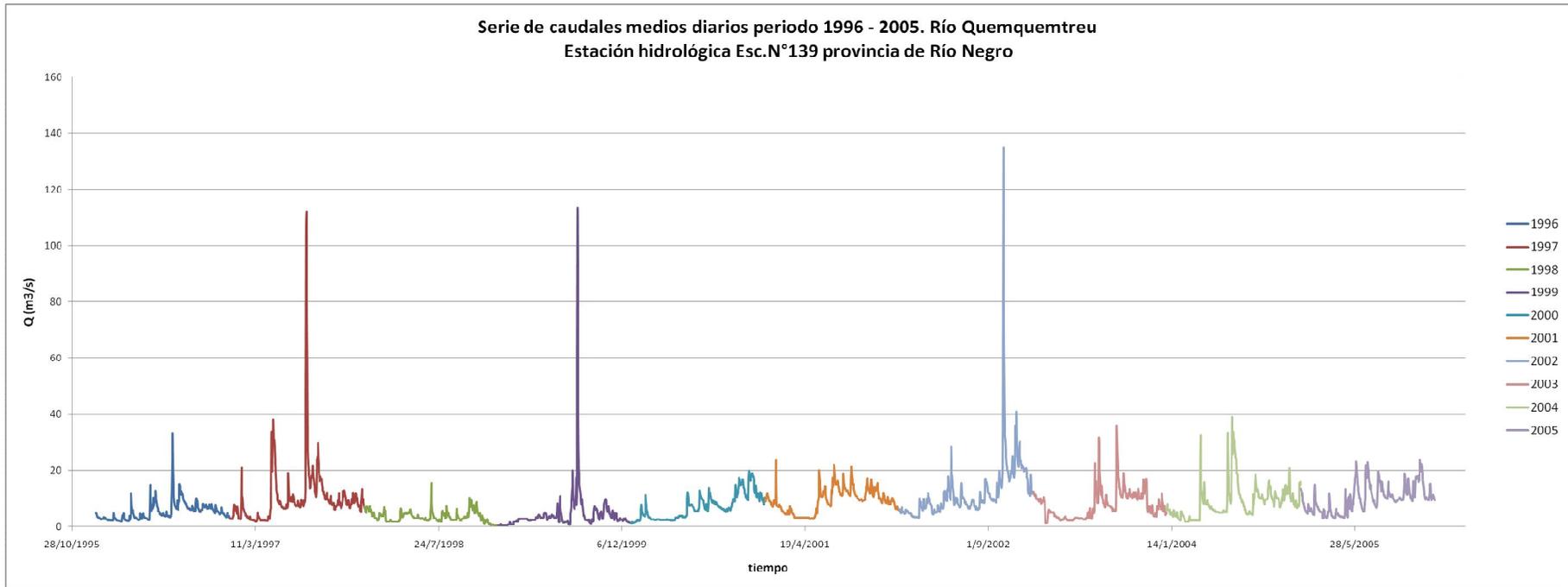


Serie de caudales medios diarios periodo 1976 - 1985. Río Quemquemtreu
Estación hidrológica Esc. N°139 provincia de Río Negro

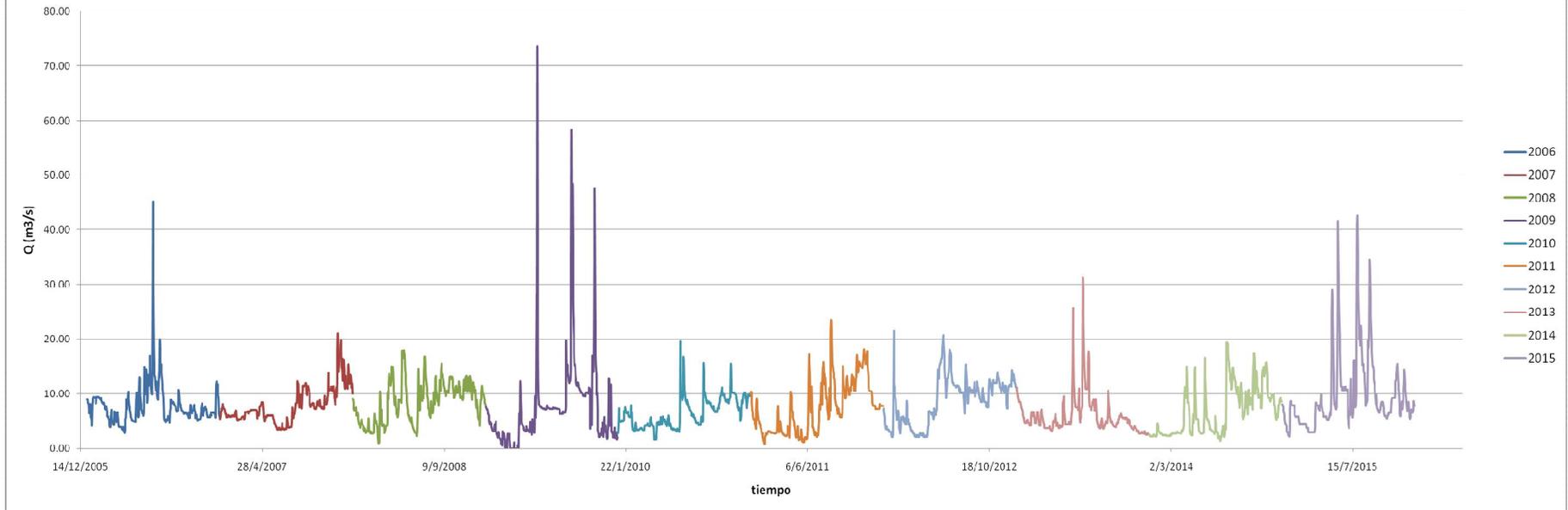


Serie de caudales medios diarios periodo 1986 - 1995. Río Quemquemtreu
Estación hidrológica Esc. N°139 provincia de Río Negro





Serie de caudales medios diarios periodo 2006 - 2015. Río Quemquemtreu
Estación hidrológica Esc. N°139 provincia de Río Negro



Serie de caudales medios diarios periodo 2016 - 2019. Río Quemquemtreu
Estación hidrológica Esc. N°139 provincia de Río Negro

