



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO

Sede Alto Valle - Valle Medio – Trabajo final de la Licenciatura en Geología

**ANÁLISIS DEL TERRITORIO FLUVIAL, EL CAUDAL ECOLÓGICO Y EL
RIESGO ASOCIADO A LA DINÁMICA DEL RIO NEGRO EN GENERAL
ROCA Y ALREDEDORES**

Autor: Enzo Martínez

Director: Dr. Darío Orts

Co-Directora: Lic. M. Cecilia Cábana

ÍNDICE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO	0
1.0 RESUMEN	1
2.0 ABSTRACT.....	1
3.0 INTRODUCCIÓN	2
3.1. CONTEXTO HIDROGEOGRÁFICO Y ANTECEDENTES	4
4.0 MATERIALES Y MÉTODOS	6
4.1. CAUDAL ECOLÓGICO	6
4.1.1. <i>Teledetección y observación de crecidas</i>	9
4.1.2. <i>Cambios en la vegetación riparia</i>	12
4.2. RESPUESTA GEOMORFOLÓGICA A LOS EFECTOS DE LAS PRESAS	15
4.2.1. <i>Parámetros hidrogeomorfológicos</i>	15
4.2.2. <i>Cambios temporales de sinuosidad de los ríos</i>	20
4.3. TERRITORIO FLUVIAL	20
5.0 RESULTADOS	25
5.1. CAUDAL ECOLÓGICO	25
5.1.1. <i>Teledetección y observación de crecidas</i>	29
5.1.2. <i>Cambios en la vegetación riparia</i>	34
5.2. RESPUESTA GEOMORFOLÓGICA A LOS EFECTOS DE LAS PRESAS	35
5.3. DEFINICIÓN DE UN TERRITORIO FLUVIAL EN EL RÍO NEGRO.....	42
6.0 DISCUSIÓN	47
7.0 CONCLUSIONES	49
8.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
8.1. BASES DE DATOS ONLINE	55
9.0 ANEXOS	57

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las distintas presas construidas en el río Limay y Neuquén.	5
Tabla 2. Método Montana para establecer regímenes de caudal ecológico para la pesca, vida silvestre, recreación y recursos medioambientales, desarrollado por Tennant (1976).	9
Tabla 3. Bandas de radar y los rangos de longitud de onda y frecuencia que operan. Modificado de Fernández-Ordoñez (2020).	10
Tabla 4. caudal ecológico calculado utilizando el método Montana para el río Negro. Estación de aforo 1808 Paso Córdoba [1].	25
Tabla 5. Características de las imágenes de radar Sentinel 1B y ópticas Landsat 8 utilizadas.	30

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio junto con las presas de la cuenca del río Limay y Neuquén.	3
Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio en el alto valle del río Negro, en el municipio de General Roca y entre las localidades de Allen y Cervantes.	4
Figura 3. Perfil longitudinal de los ríos Negro, Neuquén y Limay.	5
Figura 4. Funciones ecológicas y beneficios de los componentes del régimen hidrológico.	8
Figura 5. Ejemplificación del grado de penetración de las ondas electromagnéticas en la que operan las bandas X, C y L de los sensores SAR. Imagen modificada de Podest (2017).	10
Figura 6. Imágenes satelitales demuestran visualmente los cambios en la vegetación riparia a través del tiempo.	12
Figura 7. Proceso para el desarrollo de una imagen de cambios de vegetación (entre 1976 y 2019) a través de la plataforma online de Google Earth Engine.	13
Figura 8. Proceso de generación de una imagen binaria de vegetación.	14
Figura 9. Proceso de generación de una imagen de cambios de vegetación.	14
Figura 10. Modelo conceptual de las relaciones entre los factores que influyen la geomorfología del valle y el canal fluvial. Las represas pueden modificar directamente el régimen hidrológico y de transporte sedimentario. Modificado de Grant et al. (2003).	16
Figura 11. Cambios esperados en la textura, forma del lecho, forma en planta debido a los ajustes de los ríos en respuesta a cambios de aporte sedimentario en relación con la capacidad de transporte. Modificado de Grant et al. (2003).	18
Figura 12. Cambios geomorfológicos en el canal fluvial en respuesta a la relación de las variables T^* y S^* . Modificado de Grant et al. (2003).	19
Figura 13. Proceso de determinación del territorio fluvial. Modificado de Ollero (2014).	22
Figura 14. Captura de pantalla de la plataforma Google Earth Engine con el mapa de intensidad de cambios del agua superficial desarrollado por el programa Copernicus. Ver en: https://code.earthengine.google.com/76f14b94d0cbef74b9f6328085eb4cda	23
Figura 15. Determinación del territorio fluvial para ríos anastomosados. Modificado de Ollero, 2014.	24
Figura 16. Periodicidad probabilística de caudales de crecida con la regulación de las presas y sin la regulación de las presas. Realizado a partir de los datos del trabajo de Jong y Mare (2007).	26
Figura 17. Cálculo del caudal ecológico del río Negro. Se compara el caudal medio mensual en condiciones naturales (línea discontinua azul) con el actual (línea negra), junto a los rangos de estado de caudales calculados (sectores coloreados).	27
Figura 18. Hidrogramas promedios realizados cada 10 años.	28
Figura 19. Variación de la concentración de <i>Escherichia Coli</i> conforme a los niveles de caudal.	28
Figura 20. Regresiones entre la variable T y la concentración de <i>E. Coli</i>	29
Figura 21. Hidrograma correspondiente a la crecida de fines de julio del 2020. Basado en información de la AIC (Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas) [2].	30

Figura 22. Comparación de la detección de agua superficial no permanente entre las polarizaciones VV y VH de imágenes SAR (sentinel 1B). Imagen base corresponde a Sentinel 1B (VV) al momento de la crecida.	31
Figura 23. Proceso de generación de detección de agua superficial a partir de la aplicación de índices NDWI a imágenes Landsat 8. Detección de agua en rojo.	32
Figura 24. Comparación entre los resultados de detección de inundaciones a partir de imágenes multiespectrales (Landsat 8) y SAR (Sentinel 1).....	33
Figura 25. Distintos procesos de retrodispersión de señales SAR, tanto en banda C como en L. Modificado de Evans, 2013.	33
Figura 26. Cambios de vegetación riparia producidos entre 1976-2019.	34
Figura 27. Hidrograma comparativo basado en caudales medios diarios entre cinco años pre represas (negro) y cinco años post represa (azul).	36
Figura 28. Estimación de la ubicación en el grafico bivariado entre S* y T* del sector estudiado del río Negro. Modificado de Grant <i>et al.</i> , 2003.	38
Figura 29. Modificación geomorfológica en el sector cercano al parque zoológico Bubalcó en el río Negro entre los años 1967 a 2019. <i>pb</i> : <i>point bar</i> , <i>pbv</i> : <i>point bar</i> vegetado y <i>aa</i> : abanico aluvial.	39
Figura 30. Cambios sectorizados en la sinuosidad a lo largo del río Negro a través del tiempo. Las Barras representan los valores de sinuosidad de cada año correspondiente. Ver Anexos A (I, II, III, IV, V y VI) para más detalles.	40
Figura 31. Comparación temporal entre el valor $\sum \Delta S $ y los caudales medios mensuales del río Negro. Las bandas grises verticales separan los periodos de medición de sinuosidad.	41
Figura 32. Cartografiado de los distintos cursos del río Negro en la zona de estudio, entre los años 1967 y 2019. Ver Anexos A (I, II, III, IV, V y VI) para más detalles.	43
Figura 33. Señalización de las zonas más susceptibles a seguir siendo erosionadas en un futuro por la dinámica fluvial (línea azul discontinua). En rojo las zonas de pérdida de agua superficial y en verde las zonas nuevas de agua superficial.	43
Figura 34. Definición del territorio fluvial del río Negro, en inmediaciones a la Ciudad de General Roca.	45
Figura 35. Vista de la determinación del territorio fluvial en zonas ribereñas urbanizadas de la ciudad de General Roca.	46
Figura 36. Vista de la determinación del territorio fluvial en zona ribereña cercana a la ciudad de Allen.	46

1.0 RESUMEN

En la actualidad son escasos los estudios sobre los cambios geomorfológicos o la dinámica fluvial debido a la instalación de los distintos complejos hidroeléctricos y diques en las cuencas de los ríos Neuquén y Limay. El presente Trabajo Final de Licenciatura aborda esta temática a través de distintos estudios y metodologías, para conocer y entender los cambios en el río Negro, enfocándose en las cercanías de la ciudad de General Roca. En primer lugar, se empleó el método Montana como una primera aproximación para estimar los caudales ecológicos actuales y compararlos con las condiciones naturales previas a la instauración de las presas. Luego, se analizaron los cambios hidrogeomorfológicos en respuesta al establecimiento de estas represas. En función de parámetros fluviales conocidos se pudieron caracterizar los cambios en el régimen hidrológico y de transporte sedimentario que las represas están ejerciendo al sistema. Para ello, se cuantificaron los cambios desde la década de 1960 al año 2019, en la sinuosidad fluvial y en la distribución areal de la vegetación riparia. También se aplicó un método para el seguimiento de crecidas a través de sistemas espaciales de Radar de Apertura Sintética (acrónimo SAR, del inglés *Synthetic Aperture Radar*). Por último, se generó un cartografiado del territorio fluvial, el cual consistió en enmarcar el área donde se desarrolla el dinamismo fluvial y ecológico; sus movimientos laterales, la extensión de sus inundaciones regulares, entre otros; y así poder distinguir o separar entre zonas propias del territorio fluvial y zonas o áreas urbanas y urbanizables. Esta distinción de zonas es indispensable para poder proteger los sistemas ecológicos ribereños de las urbanizaciones, como también proteger las urbanizaciones de las distintas acciones del sistema fluvial.

Esta serie de análisis han permitido establecer que el río Negro posee un caudal degradatorio, pero aún con condiciones saludables. La tendencia en general de sus caudales enmarca una degradación continua y sostenida. Esta disminución en el nivel de sus caudales reduce a su vez la capacidad de transporte sedimentario, propiciando además del establecimiento de islas y barras, como así también, el avance de vegetación invasora, favoreciendo una disminución de la dinámica lateral del río.

2.0 ABSTRACT

Currently, there are few studies focused on geomorphological changes or fluvial dynamics due to the different hydroelectric complexes and dams installed in the basins of the Neuquén and Limay rivers. So, in order to understand the changes in the Negro River, this Final Degree Project addresses this issue through different studies and methodologies in the vicinity of the city of General Roca. First, the Montana method is used as an approximation to estimate the Environmental Flows and compare them with the natural conditions prior to the establishment of the dams. Then, hydrogeomorphological changes in response to the establishment of dams were analyzed. Based on known fluvial parameters, it was possible to characterize the changes in the hydrological regime and sedimentary transport that the dams are exerting on the system. For this, changes in the fluvial sinuosity, and in the areal distribution of the riparian vegetation were quantified from the 1960s to 2019. Also, a method for monitoring floods

through satellite Synthetic Aperture Radar (acronym SAR) is evaluated. Finally, a study that consisted of mapping a River Territory was developed. It comprised framing the area where the river and ecological dynamism is developed (lateral movements, the extent of its regular floods, among others); and separate it from the developable areas. With the aim of protecting not only the riparian ecological systems from urbanizations and structural changes caused by dams, but also to protect urbanizations from the ecological alterations and dynamism of the river.

This series of analyzes and methodologies has made it possible to establish that the Negro River has a degrading flow, but still with healthy conditions. The general trend of its flows frames a continuous and sustained degradation. This decrease in the flow rates reduces the sedimentary transport capacity, promoting not only the establishment of islands and bars, but also the advance of invasive vegetation, promoting a decrease in the lateral dynamics of the river.

3.0 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se realizó un análisis de la dinámica del río Negro (entre 67,80°; 67,38° O) con énfasis en el análisis espacio-temporal de imágenes aéreas y satelitales de los últimos 50 años y se caracterizaron los cambios producidos en el ecosistema (Figura 1 y Figura 2). Uno de los principales objetivos de este análisis fue establecer el riesgo que conlleva la dinámica del río Negro, como por ejemplo durante las crecidas o la migración lateral de geoformas, y el riesgo que implica para la población. También caracterizar temporalmente los cambios en la geomorfología fluvial, y proponer soluciones relacionadas al manejo del ecosistema fluvial y el desarrollo urbanístico en esta región. En particular, se realizaron comparaciones geomorfológicas entre el aspecto actual y el estado previo a la instauración de represas hidroeléctricas o embalses (denominados en su conjunto Embalses del Comahue) y se establecieron las diferencias aparejadas al cambio de régimen fluvial. Estos cambios fueron estudiados por medio de un método simple de Caudales Ecológicos, el cual permitió conocer de forma sencilla, utilizando registros históricos, la salud de sus caudales. El concepto de Caudales Ecológicos, calculados por métodos hidrológicos, establece caudales mínimos y máximos en función de porcentajes del caudal medio mensual considerando una estadística de 10 años como mínimo. Se consideran Caudales Ecológicos si aseguran el mantenimiento del patrimonio hidrobiológico y sociocultural del medio fluvial, de forma compatible con la necesidad de abastecimiento doméstico, y de suministro agrícola e industrial (O'keefee y Le Quesne, 2010). Además, debe de ser representativo de la variabilidad natural del régimen de caudales del río y contemplar el correcto funcionamiento de las diversas componentes asociadas al ecosistema fluvial (flora y fauna, la calidad físico-química de las aguas superficiales y subterráneas, el dinámico equilibrio geomorfológico del sistema y el conjunto de valores sociales, culturales y paisajísticos del río) (Magdaleno, 2005). Por ello, es importante saber si los regímenes hidrológicos actuales aún mantienen condiciones saludables para conservar la ecología general de estos sistemas. Otro concepto clave en la dinámica ambiental, para la planificación territorial y el desarrollo urbano, es el de territorio fluvial (sensu Ollero et al., 2009). El territorio fluvial puede definirse como el terreno, espacio o paisaje dominado por un sistema fluvial e incluye el cauce, el corredor ribereño y, total o parcialmente, la llanura de inundación (Ollero et al., 2009). Se trata de un espacio a

reivindicar, que choca con los intereses socioeconómicos sobre la red fluvial. Es una banda geomorfológica y ecológicamente activa, de máxima eficiencia y complejidad como sistema natural (Ollero et al., 2009). En este trabajo se presenta una potencial delimitación de territorio fluvial para el área de estudio (Figura 2) contemplando los factores anteriormente mencionados.

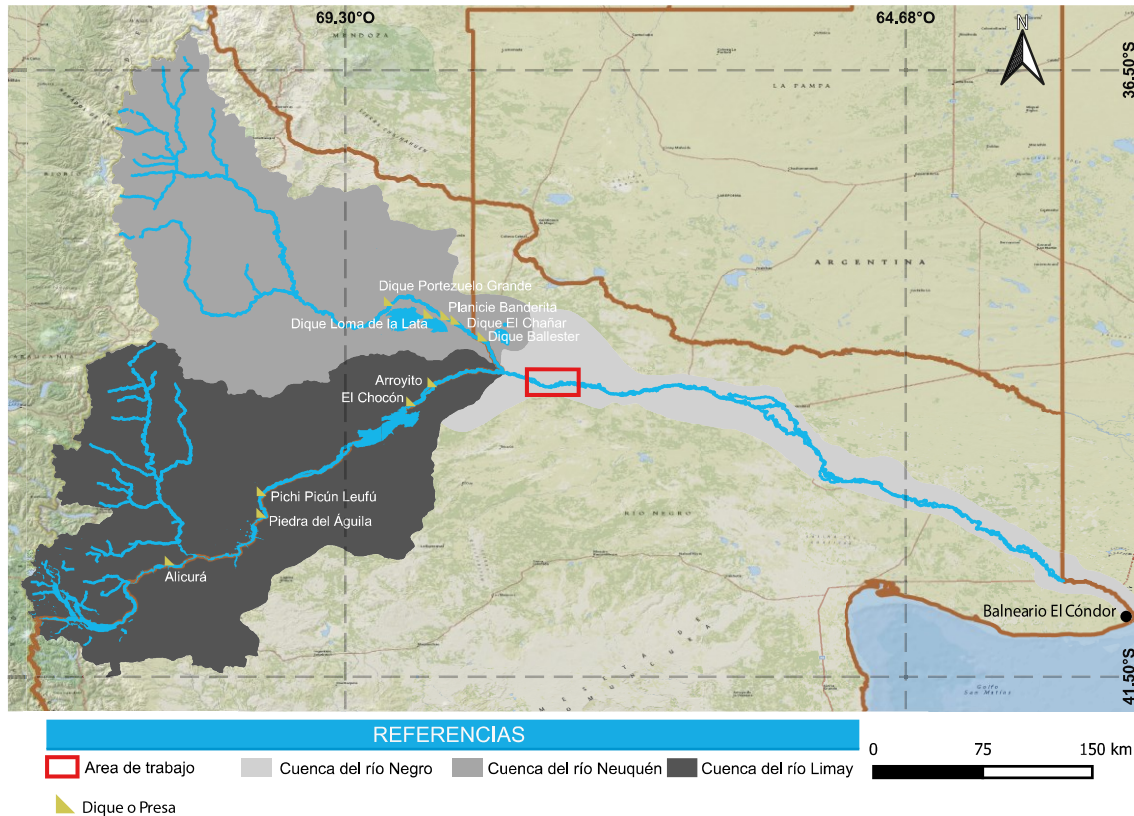


Figura 1. Ubicación del área de estudio junto con las presas de la cuenca del río Limay y Neuquén.

Por otro lado, se utilizan nuevas herramientas disponibles de grandes bases de datos (*Big Data*), como lo es la plataforma de Google Earth Engine (GEE), para el análisis de cambios en la vegetación riparia. Además, con el objetivo de observar las extensiones de las crecidas se usaron imágenes de radares de apertura sintética (acrónimo SAR, del inglés *Synthetic Aperture Radar*) e imágenes ópticas multiespectrales para corroborar los resultados, y saber si los métodos utilizados con las imágenes SAR demuestran resultados coherentes. Hacer un ejercicio del potencial de estos medios y técnicas modernas, resulta útil para una rápida aproximación y visualización de estas problemáticas en esta u otras regiones.

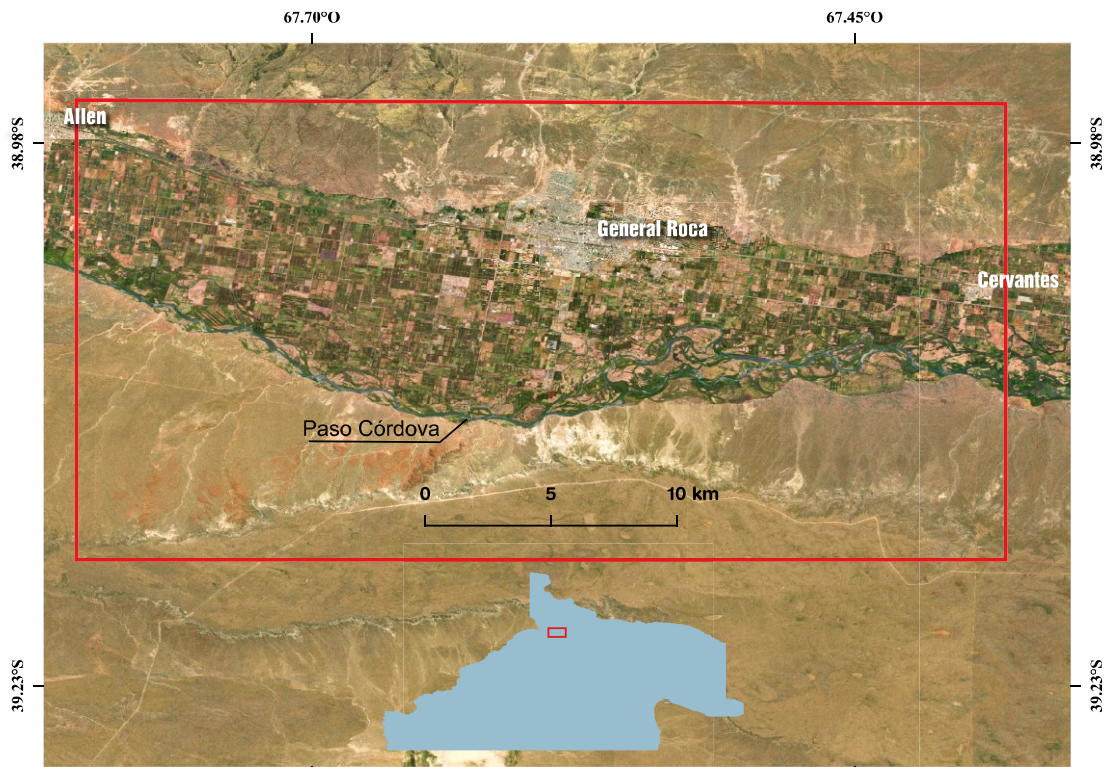


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio en el alto valle del río Negro, en el municipio de General Roca y entre las localidades de Allen y Cervantes.

3.1. Contexto hidrogeográfico y Antecedentes

El río Negro nace de la confluencia de los ríos Neuquén y Limay, y corre atravesando la provincia de Río Negro hasta su desembocadura sobre el mar argentino, en cercanías del poblado de El Cóndor (Figura 1). Tiene una extensión de alrededor de 637 km y un caudal medio de 930 m³/s, influenciado por regímenes pluviales y nivales. El río Neuquén le eroga aproximadamente 280 m³/s y el río Limay 650 m³/s (Ambrosio y Suarez, 2016). El curso actual del río atraviesa casi en su totalidad, una antigua planicie disectada, mostrando un piso de valle de características similares, ya que en algunos tramos el valle supera los 15 km de ancho (González Díaz y Malagnino, 1984). El cauce actual del río se encuentra totalmente establecido por debajo de los niveles superiores de la antigua planicie aluvial, siendo que esta planicie se encuentra compuesta por diversas terrazas pleistocenas de origen glacifluvial (González Díaz y Malagnino, 1984).

Un rasgo muy notable de la cuenca del río Negro es la carencia de afluentes naturales permanentes a lo largo de todo su trayecto y dadas las escasas precipitaciones en la cuenca inferior, y descartando los aportes de los acuíferos, puede entenderse que el caudal del río es prácticamente alóctono (Zattara et al., 2005).

Sin embargo, los afluentes temporarios de la cuenca del río Negro, a pesar de ser un aporte ínfimo en comparación con los del río Neuquén y Limay, son importantes debido a encontrarse en un ambiente desértico. Con periodos cortos pero intensos de aporte de sedimentos que influyen en la calidad de agua y en la fauna íctica (Zattara et al., 2005).

Por otro lado, a principios del siglo XX las cuencas del río Limay, Neuquén y Negro comenzaban a denotar el crecimiento poblacional de la región. Inicialmente, se destaca la

construcción y puesta en operación del Dique Ballester (ver Tabla 1) (Figuras 1 y 3), que permitió desarrollar una mayor extensión de áreas productivas en el Alto Valle rionegrino (Ambrosio y Suarez, 2016). Cumpliendo la función de abastecer el regadío agrícola y derivar crecidas hacia la cuenca Vidal, formando el lago Pellegrini. Décadas más tarde, la construcción del complejo Cerros Colorados (Dique Portezuelo Grande, Loma de la Lata, Mari Menuco, la planta hidroeléctrica Planicie Banderita y el dique compensador El Chañar) marcó un cambio en el control de crecidas del río Neuquén, dejando sobredimensionado los sistemas de derivación del Dique Ballester (Borús, 2018). Contemporáneamente se inició la edificación de diversos complejos hidroeléctricos sobre el río Limay, los cuales se pueden observar junto a los del río Neuquén en la Tabla 1.

Presa	Cuenca	Puesta en Operación	Usos predominantes
Pichi Picún Leufú	Limay - Río Negro	1999	Atenuación de crecidas y Generación Eléctrica
Piedra del águila	Limay - Río Negro	1993	Atenuación de crecidas y Generación Eléctrica
Alicurá	Limay - Río Negro	1984	Generación Eléctrica
Arroyito	Limay - Río Negro	1983	Compensadora de El Chocón y Generación Eléctrica
El Chañar	Neuquén - Río Negro	1979	Compensador de C.H. Planicie Banderita y Riego
Planicie Banderita	Neuquén - Río Negro	1977	Atenuación de crecidas, generación eléctrica, turismo y recreación
Marí Menuco	Neuquén - Río Negro	1974	Atenuación de Crecidas
Loma de la Lata	Neuquén - Río Negro	1974	Atenuación de Crecidas y Regulador para Riego
Portezuelo Grande	Neuquén - Río Negro	1972	Atenuación de Crecidas por Derivación
El Chocón	Limay - Río Negro	1972	Atenuación de crecidas, generación eléctrica, turismo y recreación
Ballester	Neuquén - Río Negro	1916	Atenuación de Crecidas y Riego

Fuente: ORSEP, 2010 y Ambrosio *et al.*, 2016.

Tabla 1. Resumen de las distintas presas construidas en el río Limay y Neuquén.

Esta serie de embalses forman diferentes saltos de agua observables en el perfil longitudinal de los ríos Neuquén, Limay y Negro de la Figura 3, generando una serie de anomalías artificiales que perturban el trazado típicamente cóncavo de los ríos maduros.

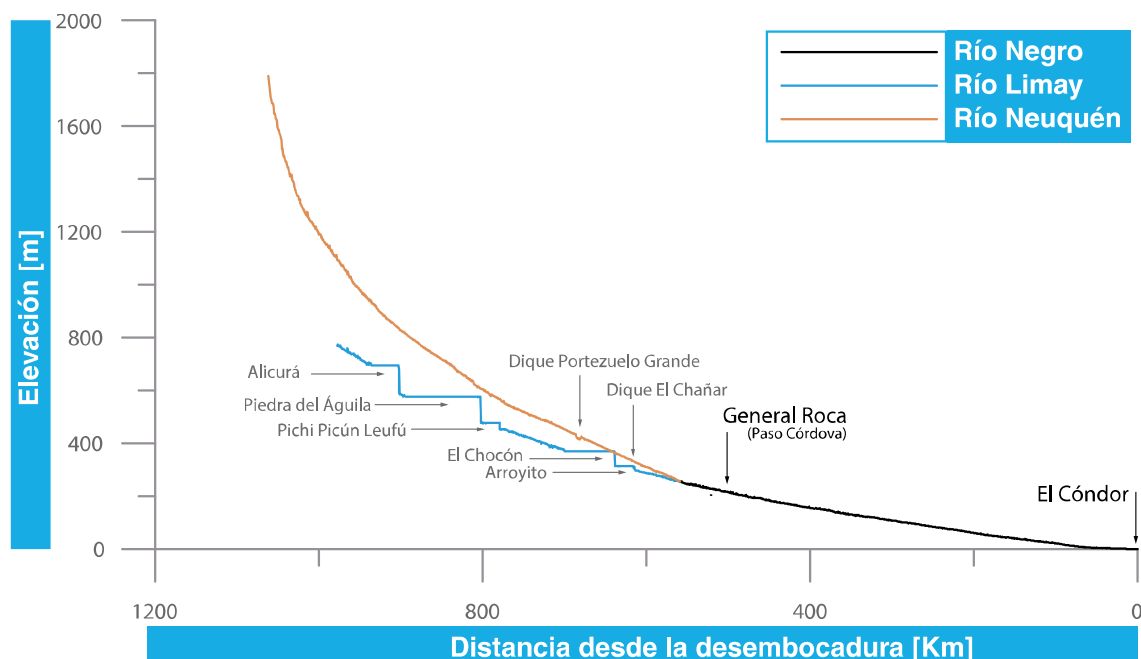


Figura 3. Perfil longitudinal de los ríos Negro, Neuquén y Limay.

4.0 MATERIALES Y MÉTODOS

Uno de los principales objetivos fue comprender los patrones hidrológicos del río, por lo que surge la necesidad de estudiar y aplicar el concepto de caudal ecológico. Dentro de la sección de Caudales Ecológicos se mencionan las metodologías utilizadas para el análisis de cambios en la vegetación riparia y la teledetección de crecidas. También, el estudio del dinamismo fluvial radica en la evolución de su vegetación, además de los cambios en la posición del cauce. Por ello, es importante detectar sus cambios en el tiempo por sus repercusiones ecológicas y geomorfológicas. Asociado a esta sección se presenta una metodología para la teledetección de inundaciones. Esta utiliza imágenes satelitales de radar (SAR) y permite registrar la extensión de las mismas aún en condiciones de nubosidad a diferencia de los sistemas espaciales pasivos, como los ópticos, cuyo registro se ve afectado por la presencia de nubes.

En la última sección se analiza la respuesta geomorfológica en función de los parámetros que modifican las represas en el sistema fluvial. Estas alteraciones generan cambios en los regímenes hidrológicos y de transporte sedimentario, acarreado distintas transformaciones geomorfológicas. Asimismo, dentro de la sección se emplean cálculos de sinuosidad y sus cambios a lo largo del tiempo (1967-2019).

Por último, en la sección de territorio fluvial se desarrollan las bases teóricas para poder delimitarlo en el contexto de la dinámica del río Negro. La definición de sus límites conlleva el objetivo de recuperar y/o conservar la dinámica hidrogeomorfológica, y con ella la diversidad ecológica del sistema fluvial. Permitiendo, al mismo tiempo, resolver problemas de ordenamiento de sectores inundables y mejorar el paisaje fluvial.

4.1. Caudal ecológico

Los ríos proveen numerosos bienes y servicios, los cuales van desde agua potable para consumo, hasta la producción de alimentos, para la industria, la navegación, la pesca, la recreación y actividades culturales. Estos beneficios socioeconómicos, de la misma forma que otros recursos naturales, son muy útiles si se usan razonablemente, e inútiles o hasta peligrosos si se explotan en exceso (O'Keeffe y Le Quesne, 2010). El fin de un caudal ecológico es que las personas, la flora y la fauna silvestre puedan subsistir y continuar utilizando los recursos hídricos río abajo, conservando algunos de los patrones naturales del flujo a lo largo de todo el curso fluvial.

Cabe señalar que los ríos con poco flujo o grandes cantidades de aguas residuales tienden a ser focos de enfermedades como la malaria, el cólera, la esquistosomiasis y la disentería (O'Keeffe y Le Quesne, 2010), como así también de fiebre tifoidea, hepatitis A, giardiasis (y demás parásitos intestinales), rotavirus, norovirus, etc. El río Negro no se encuentra exento de este tipo de problemáticas, por ejemplo, debido a un caudal degradado, en el año 2016, en un brazo del río que va desde la Ciudad de Luis Beltrán hasta Pomona, se declaró una emergencia hídrica y sanitaria, ya que la presencia de barro en estado de putrefacción podría ser foco de enfermedades (Redacción Río Negro, 2016). Un evento considerable ocurrió en el 2017 en la Ciudad de Allen donde aparecieron, en un brazo del río, aproximadamente 60 peces muertos (Redacción Río Negro, 2017). El Departamento Provincial de Aguas (DPA), luego de realizar estudios físico-químicos y bacteriológicos, concluyó que la mortandad se

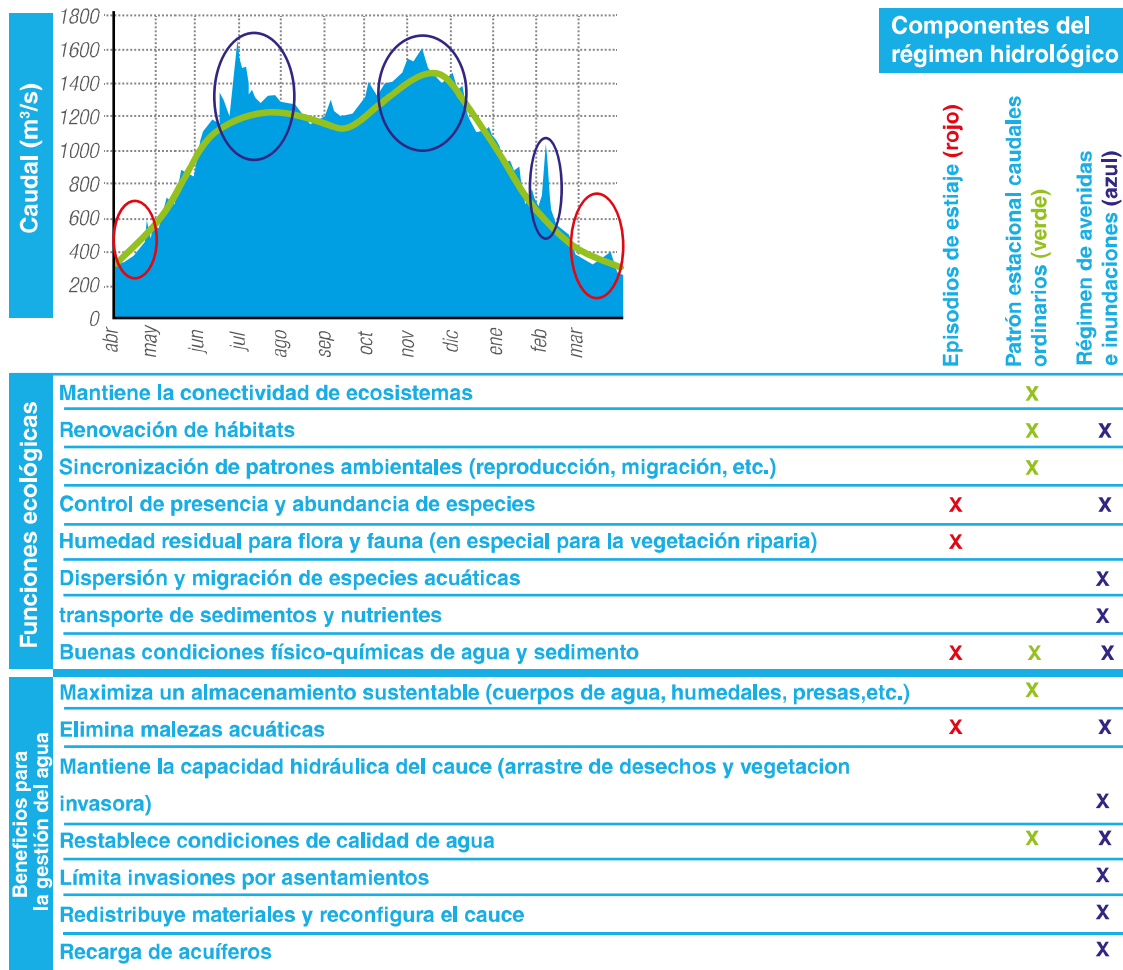
debió a la presencia de una elevada cantidad de agroquímicos y plaguicidas, en concentraciones normales y bajas, sumado a la alta temperatura y bajo nivel de oxígeno debido al escaso caudal presente en aquel brazo del río (Redacción ADN, 2017). Además, cabe mencionar las distintas clausuras de balnearios a lo largo de todo el curso fluvial como consecuencia de elevadas concentraciones de la bacteria *Escherichia coli*.

Se debe prestar atención en cuanto al contenido bacteriológico en cursos fluviales, sea por bajo caudal o por un deficiente sistema de tratamiento de las aguas servidas, ya que se suele pensar que con un río caudaloso existe suficiente agua para diluir la contaminación. Por esta razón es importante tener un sistema de saneamiento óptimo que evite el vertido de aguas con contenido bacteriológico.

Las condiciones ambientales que conserven los Caudales Ecológicos van a depender en cierta medida de lo que la comunidad requiera del río (riego de tierras, generación de electricidad, uso industrial, abastecimiento poblacional, conservación en un parque nacional, etc.). Por lo que el caudal ecológico va a depender de las necesidades de la población (O’Keeffe y Le Quesne, 2010). En general, las comunidades quieren aprovechar el agua y demás recursos, en consecuencia, no pretenden conservarlo en condiciones puramente naturales. Sin embargo, estas tampoco pretenden convertir el curso fluvial en un cauce seco o en un desagüe residual (O’Keeffe y Le Quesne, 2010).

Las inundaciones y sequías son elementos fundamentales de los regímenes naturales de un sistema fluvial, por lo que son importantes para el control de las características del río y de las comunidades naturales que lo habitan. En particular, los ríos con un régimen constante pueden correr el riesgo de ser invadidos rápidamente por especies exóticas. Esto es debido a que no se ven sometidos a episodios naturales de estrés producidos por las sequías y las crecidas (O’Keeffe y Le Quesne, 2010).

Para entender la importancia del caudal en un río, Bunn y Arthington (2002) proponen cuatro principios ecológicos básicos: (1) El caudal es el principal determinante del hábitat físico en las corrientes, (2) El desarrollo de las especies ribereñas se asocia sobre todo a los regímenes de caudales naturales, (3) La conectividad del caudal en todo el río y sus llanuras aluviales son esenciales para la conservación de los ecosistemas ribereños, y (4) Los regímenes de caudales alterados facilitan el crecimiento y la propagación de especies introducidas en el río. De todas maneras, existen diversas definiciones sobre la importancia ecológica de los caudales, desde las más sencillas a las más complejas, tienen en común que todas se refieren a la idea del volumen y calidad de agua que se debe mantener en un curso fluvial para conservar su funcionamiento ecológico y asegurar el ciclo de vida de los organismos que lo habitan (Aguilera y Pouilly, 2012). En la Figura 4 se resumen algunas de las funciones ecológicas y los beneficios que conlleva el régimen natural de perturbaciones de un río, donde se observa como todos los elementos del régimen hidrológico tienen importancia para lograr un equilibrio ecológico, tanto en las inundaciones como en las sequías. El peor cambio que se le puede hacer a un río perenne es detener su flujo, mientras que para un río estacional es regular su caudal haciéndolo activo todo el tiempo (O’Keeffe y Le Quesne, 2010).



Modificado de Gonzáles Mora *et al.*, 2014.

Figura 4. Funciones ecológicas y beneficios de los componentes del régimen hidrológico.

En la actualidad existe una gran variedad de métodos para la evaluación de caudales ecológicos, los cuales requieren tiempo y recursos variables, y van desde tablas con criterios preestablecidos, hasta investigaciones de campo que se prolongan años (O'Keeffe y Le Quesne, 2010). En este caso, se pretende utilizar el método Montana desarrollado por Tennant en 1976, que se basa solo en datos hidrológicos, siendo fácil y rápido de aplicar, sirviendo como primer acercamiento al conocimiento del caudal ecológico. Sin embargo, el método presenta algunos inconvenientes, ya que fue elaborado para ríos que poseen rangos medios de caudales, y al no tener en cuenta la variabilidad estacional del régimen de caudales, en algunos casos, puede recomendar valores de caudales mínimos difíciles de defender. Ya que no se ajustan a las características generales de cada curso fluvial: Por ejemplo, en ríos estables el 10% del caudal medio puede dar valores muy pequeños de caudal ecológico, mientras que en ríos muy variables un 30% puede dar valores muy altos (Montero, 2007). Este método proporciona una tabla que indica el porcentaje del caudal medio natural necesario durante el estiaje y la avenida (Tabla 2). Para aplicar el método Montana se emplean al menos diez años de caudales medios mensuales correspondientes a un periodo de flujo natural (sin perturbaciones antrópicas). A partir de este se calculan los caudales base de cada mes según los criterios de la Tabla 2. Por último, para realizar una

evaluación del estado de los niveles de flujo actuales de la cuenca se toman los últimos diez años de caudales medios mensuales.

Descripción Cualitativa de Caudales	Caudales Base recomendados		Observaciones
	Avenida	- Estiaje	
Crecida o Máximo	200% del Caudal Promedio		Valores mayores pueden causar severos procesos de erosión de ribera y degradación del ecosistema.
Rango óptimo	60% - 100% del Caudal Promedio		
Sobresaliente	40%	60%	
Excelente	30%	50%	Particularmente para los primeros estadios de desarrollo de la mayoría de los organismos acuáticos y la mayoría de usos recreativos.
Bueno	20%	40%	
Justo o Degradado	10%	30%	Caudal recomendado para mantener los hábitats y la vida acuática.
Pobre o mínimo	10%	10%	Mínimo: Permite proteger temporalmente algunos hábitats para los organismos acuáticos.
Degradación Severa	<10% del Caudal Promedio a 0 Caudal		Severa degradación para la mayoría de los elementos del medio acuático.

Modificado de O'Keefe y Le Quesne (2010) y Montero (2007).

Tabla 2. Método Montana para establecer regímenes de caudal ecológico para la pesca, vida silvestre, recreación y recursos medioambientales, desarrollado por Tennant (1976).

Para definir los periodos de avenidas y estiaje correspondientes al método de Tennant se emplea el siguiente criterio: los caudales medios mensuales del periodo de cálculo, inferiores al caudal medio anual del mismo periodo, se consideraron como meses de estiaje; además, se debe verificar el hidrograma de este periodo para constatar la consistencia del criterio (García y Martínez, 1997).

Para obtener el caudal ecológico del río Negro se emplearon los caudales medios mensuales naturales del periodo comprendido entre los años 1922 a 1967, siendo anterior al establecimiento de todos los complejos hidroeléctricos (Tabla 1). Sin embargo, estos caudales no son totalmente naturales debido a la existencia del dique Ballester, utilizado como derivador para riego y atenuador de crecidas. Se utilizaron datos de la estación de aforo de General Roca, proporcionados por la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación [1], que cuenta con registros desde el año 1922, a excepción del periodo 1968 a 1990 del cual no hay registro. Para este periodo se tomaron las alturas diarias del río Negro en la estación Paso Córdoba, para calcular la altura media mensual y luego extrapolar estos datos obteniendo finalmente un valor de caudal medio mensual y así poder observar las variaciones históricas.

4.1.1. Teledetección y observación de crecidas

Esta sección aborda la distribución areal de las crecidas actuales del río Negro. Mediante la aplicación de distintos métodos de teledetección se detectó y circunscribió arealmente las crecidas para poder registrar a futuro las zonas más vulnerables a distintos niveles de erogaciones.

El análisis consistió en detectar el agua superficial del río Negro mediante imágenes de radar de apertura sintética o SAR, por sus siglas en inglés (*Synthetic Aperture Radar*), y comparar los resultados con los obtenidos a partir de sistemas multispectrales. El radar de apertura

La sintética es un sistema de visión lateral que simula una antena de gran extensión para poder generar imágenes de detección remota de alta resolución (Fernández-Ordoñez *et al.*, 2020). Además, permiten obtener imágenes de la superficie terrestre independientemente de las condiciones climáticas o la luz solar. Mientras que los sensores ópticos, al ser pasivos, dependen de la presencia de luz solar y de las perturbaciones atmosféricas, como humo, cenizas o nubes. Las ondas electromagnéticas (espectro de las microondas) en la que operan los sensores SAR penetran la nubosidad y otras alteraciones atmosféricas, incluso logra penetrar, en cierto grado, el terreno (Fernández-Ordoñez *et al.*, 2020). La observación en este espectro puede dividirse en activa y pasiva, en la teledetección pasiva el sensor solo registra la energía que procede de las cubiertas terrestres. A diferencia de estos, los sensores activos no sólo registran, sino que también emiten su propio flujo de energía (Balmonte y Caamaño, 2009). El registro de las imágenes SAR se divide en bandas caracterizadas por su frecuencia y longitud de onda en la que opera cada sistema radar y esta determina el grado de penetración de la señal. En la Tabla 3 se expone la nomenclatura de las bandas de radar y en donde se subraya las que son más comúnmente utilizadas.

Banda	Longitud de onda (λ) (cm)	Frecuencia(GHz)
Ka	0.8 a 1.1	40.0 a 26.5
K	1.1 a 1.7	26.5 a 18.0
Ku	1.7 a 2.4	18.0 a 12.5
<u>X</u>	2.4 a 3.8	12.5 a 8.0
<u>C</u>	3.8 a 7.5	8.0 a 4.0
S	7.5 a 15.0	4.0 a 2.0
<u>L</u>	15.0 a 30.0	2.0 a 1.0
P	30.0 a 100.0	1.0 a 0.3

Tabla 3. Bandas de radar y los rangos de longitud de onda y frecuencia que operan. Modificado de Fernández-Ordoñez (2020).

Como ejemplifica la Figura 5, en general, cuanto más grande la longitud de onda mayor será el grado de penetración de la señal en distintas superficies. De esta manera, un sensor SAR en Banda L servirá de mejor manera para observar bajo la vegetación o la nieve seca que uno operando en banda X.

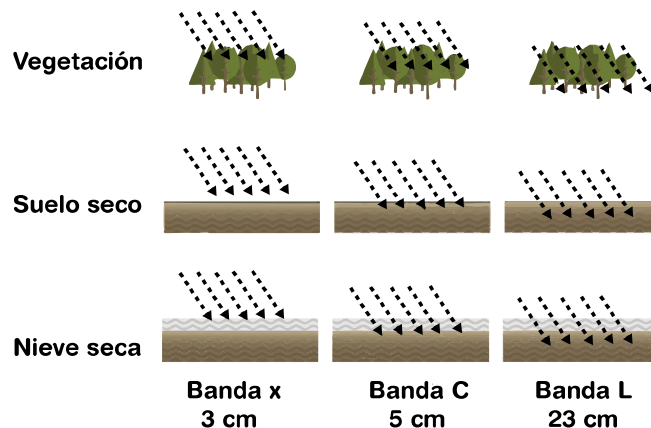


Figura 5. Ejemplificación del grado de penetración de las ondas electromagnéticas en la que operan las bandas X, C y L de los sensores SAR. Imagen modificada de Podest (2017).

Los sistemas SAR, de visión lateral, registran la superficie de la Tierra desde un punto de vista oblicuo, donde el ángulo de incidencia afecta la respuesta general (Evans, 2013). Usualmente, los ángulos más pronunciados permitirán una mayor penetración, mientras que las señales con menor ángulo de incidencia exhibirán los componentes superficiales (Evans, 2013). Además, tienen la capacidad de operar polarizando las señales, la transmisión puede ser polarizada vertical u horizontalmente, y el retorno o retrodispersión terrestre también puede ser horizontal o verticalmente polarizado (Fernández-Ordoñez *et al.*, 2020). Por lo tanto, existen cuatro tipos de combinaciones para transmitir y recibir polarizaciones:

- **HH:** Transmisión y recepción horizontal.
- **VV:** Transmisión y recepción vertical.
- **HV:** Transmisión Horizontal y recepción vertical.
- **VH:** Transmisión Vertical y recepción Horizontal.

Las dos primeras combinaciones se las llama simplemente “polarizadas”, porque transmiten y reciben en la misma dirección. Mientras que las otras dos combinaciones se las denomina polarizaciones cruzadas, porque transmiten y reciben polarizaciones con orientaciones cruzadas (Balmonte y Caamaño, 2009).

En cuanto a la retrodispersión de la energía electromagnética emitida, los suelos secos y rugosos tendrán un coeficiente de retrodispersión alto, por lo que en las imágenes de radar se verán en tonos claros. Mientras que el agua casi siempre refleja especularmente el pulso recibido, por lo que el retorno es bastante bajo y se verá en tonos más oscuros (Balmonte y Caamaño, 2009).

Para la detección de crecidas se utilizaron dos imágenes de radar, una de fecha previa a la crecida y otra de fecha coincidente con ella, repitiendo el mismo procedimiento con imágenes multiespectrales para comparar resultados. Las imágenes de radar fueron procesadas con el software SNAP Versión 7.0 (*Sentinel Application Platform*) de la ESA (*European Space Agency*). Primero se aplicó una calibración radiométrica, la cual consiste en crear una imagen donde el valor de cada pixel esté relacionado directamente con la retrodispersión de la escena. En otras palabras, la calibración radiométrica elimina valores altos de la señal de rebote en áreas con topografía compleja (Fernández-Ordoñez *et al.*, 2020). Luego, se eliminó el *speckle*, el cual es un efecto de “sal y pimienta” que distorsiona la información del terreno. Se las calibró geométricamente, para corregir distorsiones debido al rango oblicuo (*slant range*), a la inversión de relieve y a las sombras. Por último, se convirtieron los valores de retrodispersión de cada pixel a decibelios (dB) para una mejor interpretación de la señal (Fernández-Ordoñez *et al.*, 2020). El rango típico de valores para una superficie terrestre natural es de +5 dB, correspondiendo a una imagen muy brillante, mientras que valores -40 dB corresponde a una muy oscura. En general, los valores en áreas brillantes se refieren a que una porción importante de la energía fue rebotada hacia la antena, mientras que las áreas oscuras indican baja energía (Fernández-Ordoñez *et al.*, 2020).

En lo que respecta a los procesos de detección multiespectrales, se utilizaron imágenes de la misión Landsat 8, gestionada por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Esta misión incorpora dos instrumentos de barrido: *Operational Land Imager* (OLI) y un sensor térmico

infrarrojo denominado *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* (Ariza, 2013). Las imágenes obtenidas por estos sensores constan de 11 bandas espectrales, de las cuales 9 cuentan con una resolución espacial de 30 metros, la banda 1 a 7 y la 9. La banda pancromática (banda 8) tiene una resolución de 15 metros, y las dos bandas térmicas (10 y 11) que son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie, tienen 100 metros de resolución (Ariza, 2013).

Al procesamiento de las imágenes de Landsat 8, se le aplicó la técnica *pansharpening* para mejorar la resolución de la imagen. La cual consiste en la utilización de la banda pancromática para remuestrear el resto de las bandas a un tamaño homogéneo de 15 metros. Asimismo, a estas imágenes se les aplicó una corrección atmosférica con el objetivo de eliminar los efectos de dispersión y absorción de la atmósfera y obtener valores de reflectancia de la superficie estudiada sin distorsiones.

4.1.2. Cambios en la vegetación riparia

Las zonas ribereñas del río Negro ha suscitado distintos cambios a lo largo del tiempo. Una de esas alteraciones es el aumento en la vegetación riparia cuyas variaciones se pueden observar mediante imágenes satelitales Landsat (entre los años 1976 y 2019) y una fotografía panorámica (año 1967) Corona KH-4 desclasificada (Figura 6). Esta fotografía del año 1967 fue adquirida a través del explorador del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS [3]). De esta manera, resulta interesante realizar una cuantificación y observación más detallada de tales modificaciones.

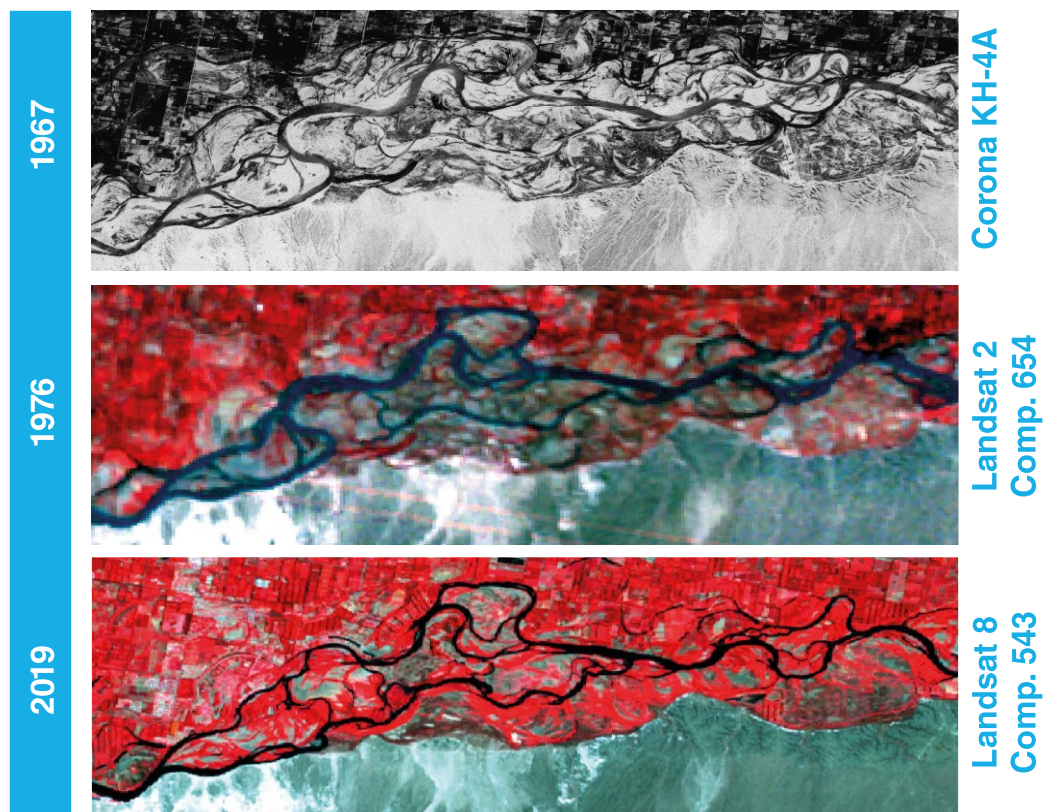


Figura 6. Imágenes satelitales demuestran visualmente los cambios en la vegetación riparia a través del tiempo.

Para la evaluación de estos cambios se utilizó la plataforma de geomática online de Google Earth Engine (GEE), la cual permite analizar de manera remota diferentes colecciones de imágenes satelitales y programar procesos, tanto simples como complejos, utilizando la capacidad computacional de los sistemas de Google LLC, permitiendo analizar gran volumen de datos en pocos segundos, como un claro ejemplo de las potencialidades del *Big Data*.

Para la producción de una imagen de cambios en la vegetación riparia se utilizó dos tipos de colecciones de imágenes satelitales: Landsat 2, para la imagen antigua (año 1976), y Landsat 8, para ver el estado actual de la vegetación (año 2019). En el esquema de la Figura 7 se resumen los procesos realizados en GEE para obtener la imagen deseada.

El procedimiento seguido para la generación de esta imagen está esquematizado en la Figura 7. Se parte de imágenes compuestas por cuatro píxeles, en donde cada uno de estos píxeles ejemplifica una situación distinta de cambios de vegetación: El píxel del árbol indica la vegetación que se mantuvo sin modificaciones entre el año 1976 y 2019, mientras que el arbusto ejemplifica la vegetación perdida y ganada según corresponda y, por último, el píxel que se mantiene blanco ilustra un área donde nunca hubo vegetación.

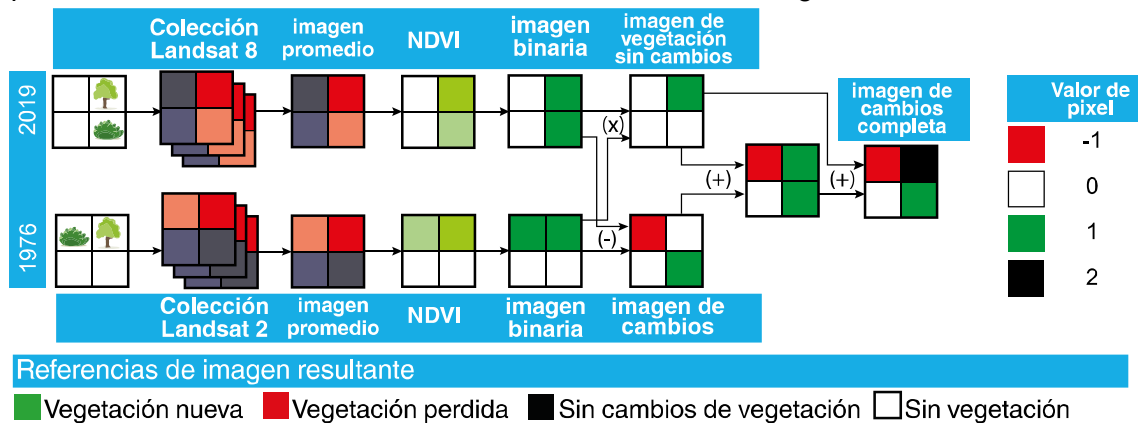


Figura 7. Proceso para el desarrollo de una imagen de cambios de vegetación (entre 1976 y 2019) a través de la plataforma online de Google Earth Engine.

Google Earth Engine provee colecciones de imágenes de las distintas misiones Landsat, seleccionándose las correspondientes para cada año. Por lo que, la colección de cada año (1976 y 2019) se compone de numerosas imágenes capturadas durante los doce meses de cada año. Para evitar las obstrucciones de las nubes, se realiza un filtrado de nubosidad y se descartan aquellas con más de un 10% de nubosidad. Por último, para lograr una sola imagen para cada año, se efectúa un promedio de cada colección anual, donde se obtiene una composición o imagen promedio, tanto para el año 1976 como para el 2019. A esta imagen obtenida se le aplica el índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Figura 8) para crear una imagen monocromática análoga a la abundancia, calidad y desarrollo de la vegetación. Esta imagen resultante se relaciona directamente con la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que refleja la vegetación. Esta imagen monocromática permite aplicar una umbralización en la imagen, que es una técnica de segmentación en la que se producen regiones de uniformidad dentro de la imagen basados en algún criterio de umbral (Balmonte y Caamaño, 2009), para determinar los píxeles donde existe o no vegetación. De esta forma se crea una imagen binaria, la cual tiene píxeles que valen 1 (con vegetación) y otros 0 (sin vegetación) (Figura 7).

Fórmula del índice NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NIR: Banda espectral en el rango del infrarrojo cercano.

RED: Banda espectral en el rango del rojo visible.

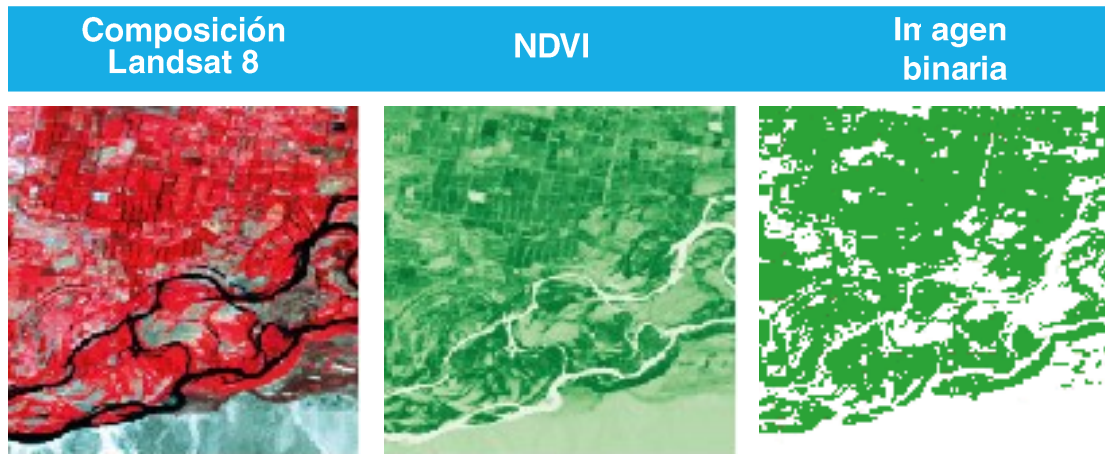


Figura 8. Proceso de generación de una imagen binaria de vegetación.

Posteriormente, se restan las imágenes binarias de cada año para obtener una imagen donde se observan los cambios, tanto la vegetación nueva como la perdida, correspondiendo los pixeles blancos a las zonas sin vegetación, los verdes a las nuevas zonas vegetadas y los pixeles rojos a las zonas con pérdida de vegetación (Figura 9, a). Sin embargo, no diferencia entre los pixeles donde en ambas imágenes existe contenido vegetal, y en los que se mantienen sin vegetación. Para lograr una clasificación de tales características, se multiplican las imágenes binarias logrando visualizar los espacios donde la vegetación no registró cambios (Figura 9, c) y así sumarla a otra imagen que contiene la misma información, además de los cambios de vegetación, consiguiendo pixeles con un valor de 2 que se observan en color negro (Figura 7 y Figura 9, d).

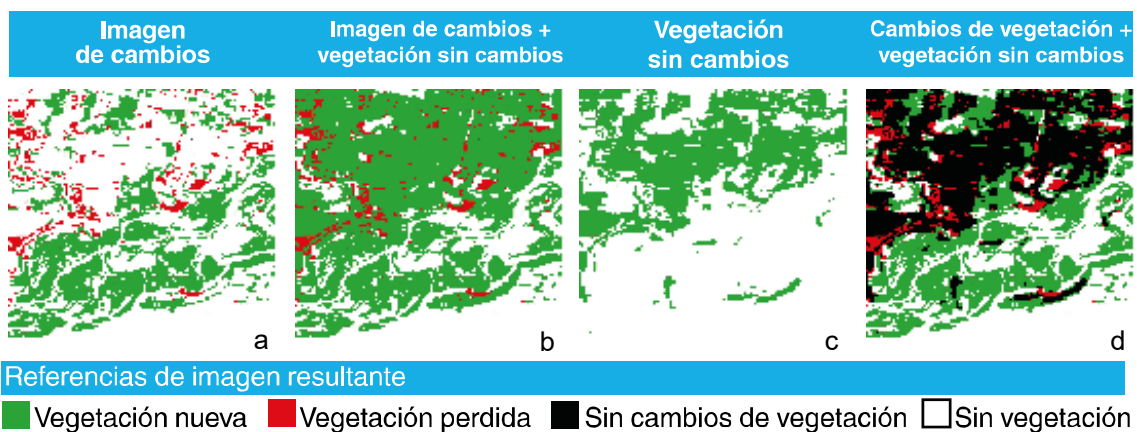


Figura 9. Proceso de generación de una imagen de cambios de vegetación.

Se logra así una imagen que diferencia las cuatro variantes de vegetación riparia expresadas según el color de los píxeles (Figura 9).

4.2. Respuesta Geomorfológica a los Efectos de las Presas

Con el objetivo de determinar, con mayor fiabilidad, qué respuestas geomorfológicas se deben a las presas se optó por relacionar los cambios geomorfológicos observados con modelos de predicción. Estos estiman qué cambios específicos efectuarían las presas al sistema fluvial para lograr los resultados geomorfológicos registrados.

Mientras que, en el segundo punto de la sección se analizan los cambios de sinuosidad de los últimos 50 años a partir de imágenes satelitales, partiendo desde el año 1967 con la imagen desclasificada de la misión Corona KH-4 hasta el año 2019 con las distintas misiones Landsat.

4.2.1. Parámetros hidrogeomorfológicos

La influencia de las presas en los sistemas fluviales radica en dos factores principales, el agua y el sedimento, estos elementos determinan la forma, el tamaño y la geomorfología general de un río (Grant *et al.*, 2003). Las presas alteran la capacidad de un río para transportar sedimentos y la cantidad de sedimentos disponible para su transporte; si la capacidad de transporte excede el sedimento disponible, existe un déficit sedimentario y puede esperarse que el río comience a retirar sedimentos del lecho, las barras o los laterales. En cambio, si la capacidad de transporte es menor al sedimento disponible, el río puede experimentar una acumulación sedimentaria. Las respuestas más comunes río abajo de las presas son la incisión o degradación del lecho, cambios texturales como un aumento o disminución de la distribución superficial del tamaño de grano, y ajustes laterales, incluyendo cambios en el ancho del río (Grant *et al.*, 2003).

Existen enfoques para predecir los impactos de las presas que se enfocan casi exclusivamente en relaciones empíricas entre respuestas hidrológicas pre y post represa, las cuales se reflejan en términos de algún cambio en la geometría del río, el tamaño de grano, o en la cantidad de sedimento disponible (Grant *et al.*, 2003).

La geología, ejerce un rol importante en el río, independientemente del factor humano. El factor geológico ejerce controles de primer orden en los procesos que ocurren tanto en la cuenca como en el río a través de un conjunto de procesos relacionados (Figura 10). A escala de la cuenca de drenaje, la geología, incluyendo tanto las propiedades físicas de las rocas y sus características estructurales y de deformación tectónicas, interactúan con el clima para producir la topografía y el relieve como el patrón del drenaje. El régimen hidrológico de la cuenca, definido como la frecuencia, magnitud, momentos, duración y variabilidad del caudal, resulta en una interacción entre la topografía y el clima (Grant *et al.*, 2003). Aquellos factores clave que dominan el régimen de descarga fluvial son el volumen y régimen de los reservorios de agua, como los lagos y el agua subterránea como reservorios de agua líquida, y los glaciares, hielo y nieve como almacenamientos de agua en estado sólido. A nivel de escala de la cuenca, las propiedades de las rocas, tales como su composición, grado de meteorización, y su dureza interactúan con los factores climáticos determinando tanto la

distribución de tamaños de grano y el grado de aporte sedimentario al sistema fluvial (Grant et al., 2003). Por lo que, tanto a grande como pequeña escala, la hidrología y los procesos de aporte sedimentario interactúan para determinar el régimen de transporte de sedimentos. Esta interacción da lugar a un conjunto de resultados geomorfológicos fluviales, como las terrazas, llanuras de inundación, barras e islas, que a su vez generan una retroalimentación dentro del sistema fluvial entre la hidrología y el régimen de transporte sedimentario (Grant et al., 2003). La geología ejerce controles de primer orden en la cuenca fluvial a través de otros mecanismos. En primer lugar, según los rasgos geológicos de la cuenca se pueden producir procesos en las laderas como grandes deslizamientos y movimientos de suelo, logrando mover rocas o masas de materiales hacia el curso del río, o los flujos de detritos pueden incorporar rápidamente material grueso por los afluentes, dando lugar a constricciones, bloqueos o presas naturales (Swanson et al., 1985; Kieffer, 1995; Schmidt y Graf, 1990; Schmidt y Rubin, 1995; Grant y Swanson, 1995). Por otro lado, un contexto geológico de afloramientos de rocas resistentes puede conllevar a la formación de acantilados o cañones, mientras que si las rocas circundantes al sistema fluvial son blandas y fáciles de erosionar formarán valles extensos (Grant et al., 2003). Además, las propiedades de almacenamiento de agua, como la porosidad y permeabilidad, van a definir a los acuíferos de la cuenca. Por lo que, las propiedades físicas de las rocas de la cuenca condicionan muchas características de las cuencas fluviales.

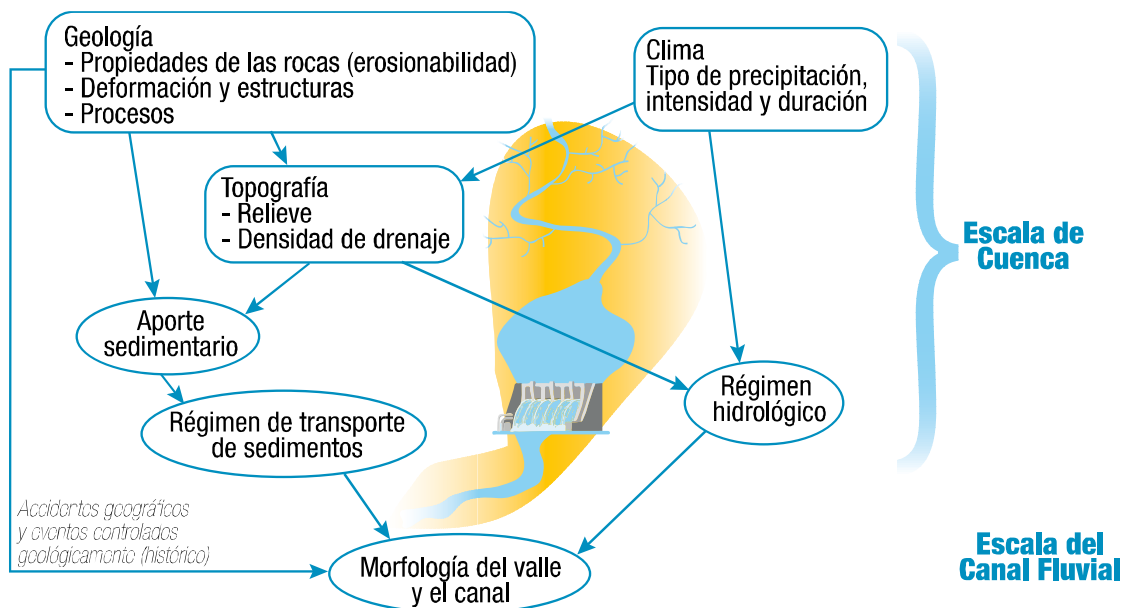


Figura 10. Modelo conceptual de las relaciones entre los factores que influyen la geomorfología del valle y el canal fluvial. Las represas pueden modificar directamente el régimen hidrológico y de transporte sedimentario. Modificado de Grant et al. (2003).

Además, entre los procesos geológicos se pueden incluir eventos tales como lahares volcánicos, flujos de lava, y derretimiento de glaciares (Grant et al., 2003). De este modo, se entiende que los ríos van a estar, en mayor o menor medida, influenciados por las características geológicas donde se encuentran. Debido a que la geología interviene implícitamente tanto en los regímenes hidrológicos como en los de transporte sedimentario.

En cuanto a las presas, Grant *et al.* (2003) proponen que las mismas modifican el control geológico que subyace al régimen de transporte sedimentario e introduce nuevos procesos al sistema fluvial, actuando como un disturbio geológico. Como consecuencia de esto, los regímenes de descarga y transporte van a responder tanto a los regímenes naturales, como también a los introducidos por las presas. Por lo que el grado de modificación geomorfológica dependerá del nivel de cambio del caudal pre-presa introducido, y estos cambios río abajo de la presa no pueden ser analizados independientemente del marco geológico de la cuenca (Figura 10) (Grant et al., 2003).

Para determinar dónde y en qué medida los ajustes río abajo de la presa pueden ocurrir (como incisión, ensanchamiento, y cambios texturales), teniendo en cuenta el marco geológico se toman los siguientes factores que modifican la capacidad de ajuste o "labilidad" del sistema fluvial: (1) la transportabilidad de la carga de lecho, la cual se debe al tamaño de grano relacionado a los esfuerzos ejercidos por el flujo de agua durante todo el régimen de descarga; (2) la erosionabilidad del lecho y los laterales, afectado por la cohesión y prevalencia de los cuerpos rocosos; y (3) la oportunidad de movimiento lateral, estando dentro de los límites topográficos y de anchura del valle fluvial (Grant et al., 2003).

En su trabajo del año 2003, Grant *et al.*, sugieren un modelo conceptual simple de cambios del canal fluvial como respuesta a modificaciones hidrogeomorfológicas impuestas por la represa. Para interpretar los efectos de las presas, cada variable hidrogeomorfológica debe ser examinada para ver cómo se encuentra influenciada por el funcionamiento de la represa. A pesar de que las presas pueden afectar toda la distribución de frecuencias del flujo, la respuesta hidrogeomorfológica río abajo estará relacionado a la medida en que el flujo geomorfológicamente efectivo sea alterado. Es decir, el cambio en la frecuencia y magnitud del flujo que es capaz de movilizar sedimentos. Es muy útil observar los cambios en el flujo como una fracción del tiempo T en que el caudal (Q) es mayor que el caudal crítico (Q_{cr}) para el transporte de sedimentos, donde se entiende que t_Q es el tiempo del caudal Q , expresado como:

$$T = \frac{\sum t(Q \geq Q_{cr})}{\sum t_Q}$$

Mientras que los cambios en la frecuencia de los flujos críticos se pueden comparar como la relación adimensional (T^*) entre la frecuencia T anterior a la represa (T_{pre}) y posterior a la represa (T_{post}) de los flujos de transporte de sedimentos:

$$T^* = \frac{T_{post}}{T_{pre}}$$

Debido a que las represas típicamente suprimen los picos del caudal, en general $T^* \leq 1$, ya que $T_{pre} \geq T_{post}$, lo que produce un engrosamiento sedimentario y un fortalecimiento del lecho, incrementando Q_{cr} .

En cuanto a los efectos de las presas al aporte sedimentario, la mayoría de las presas grandes atrapan virtualmente todo el sedimento proveniente desde aguas arribas al embalse, sin embargo, la eficiencia como trampa sedimentaria de presas más pequeñas oscila entre un 10 y 90% o más (Brune, 1953; Meade *et al.*, 1990). Por lo que, si tomamos el ejemplo de una

presa que captura teóricamente todos los sedimentos aportados río arriba, los efectos río abajo dependerán de la rapidez en que los sedimentos son reabastecidos al canal desde tributarios, las laderas, y la misma erosión del canal. Esta relación, a su vez, puede ser expresada matemáticamente como una relación adimensional (S^*) entre el aporte sedimentario en un punto determinado bajo la presa (S_B) y el aporte sobre la presa (S_A), siendo:

$$S^* = \frac{S_B}{S_A}$$

Por lo que puede notarse que, si calculamos S^* inmediatamente bajo la presa, esta al capturar teóricamente todos los sedimentos, entonces $S^*=0$. Aumentando el valor de S^* aguas abajo en función del ingreso sedimentario (Grant *et al.*, 2003).

Las respuestas a los cambios de aporte sedimentario por si solo puede generar diversos ajustes en geomorfología del canal, desde sutiles cambios texturales de la distribución de tamaños de granos en el lecho (aumento del acorazamiento o depositación de finos), cambios en el almacenamiento de sedimentos, o en la forma del canal (ensanchamiento o incisión), o cambios geomorfológicos complejos (de meandriforme a entrelazado o viceversa). Aunque los límites exactos en los que ocurren estas transiciones del comportamiento geomorfológico con respecto al aporte sedimentario pueden ser difíciles de discernir, las tendencias y direcciones generales están bien establecidas (Figura 11).

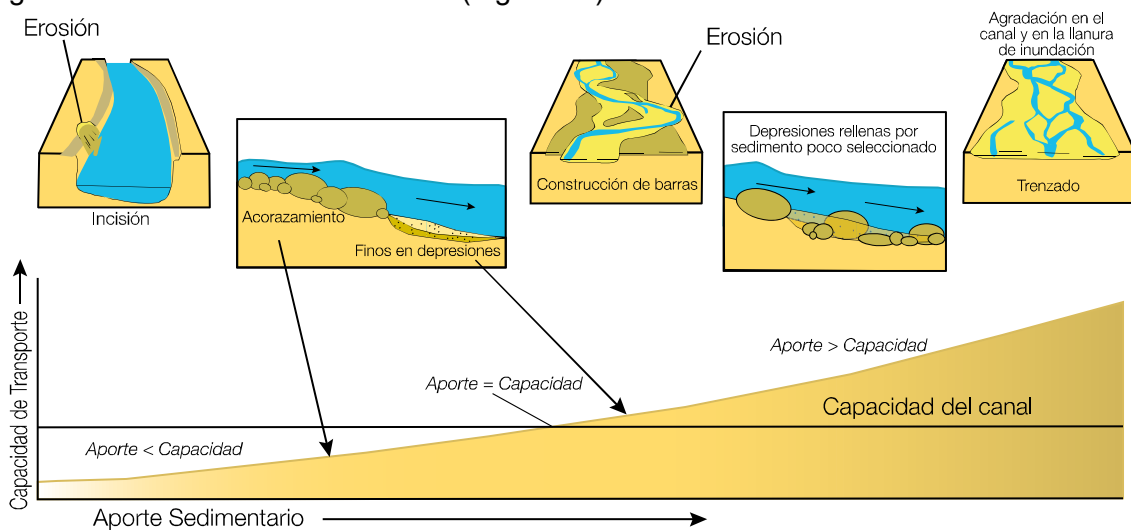
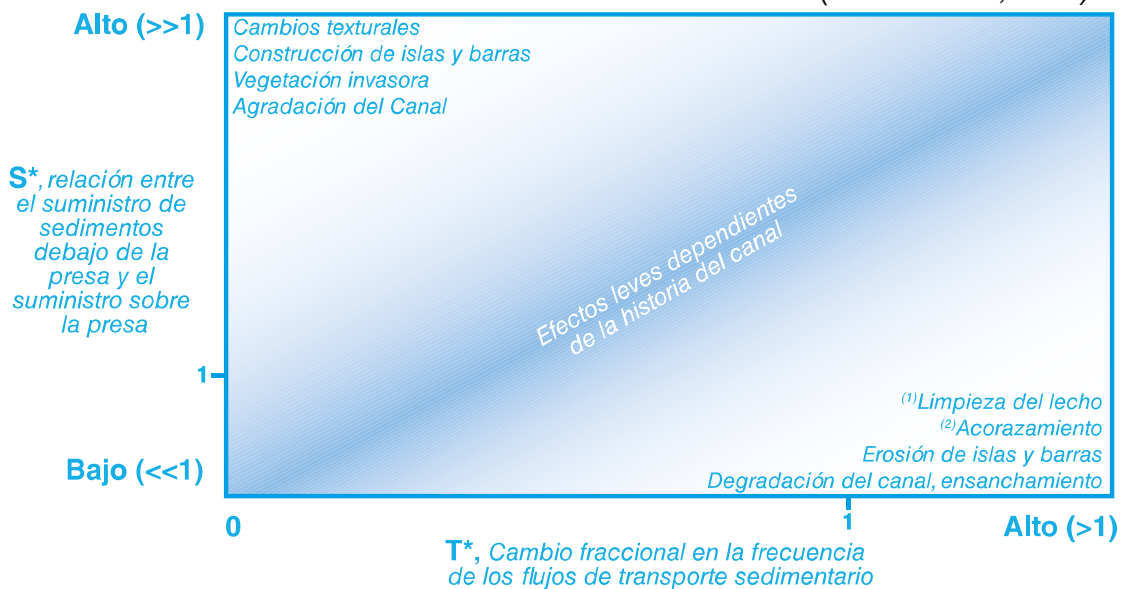


Figura 11. Cambios esperados en la textura, forma del lecho, forma en planta debido a los ajustes de los ríos en respuesta a cambios de aporte sedimentario en relación con la capacidad de transporte. Modificado de Grant *et al.* (2003).

A partir del caudal y el aporte sedimentario, entonces, puede predecirse los efectos de las represas río abajo. Para ello, se realiza una gráfica bivariada entre T^* y S^* (Figura 12). Como fue discutido anteriormente, las variables T^* y S^* pueden cambiar con la distancia río abajo, por lo que se debe iniciar la evaluación con los primeros kilómetros debajo de la presa. En la esquina inferior derecha del gráfico de la Figura 12 se representan las geoformas desarrolladas por ríos en los que el régimen alterado de caudales propicia eventos de

transporte sedimentario frecuentes, y el aporte sedimentario río abajo es relativamente bajo comparado al de río arriba. Produciendo un incremento del engrosamiento o acorazamiento del fondo del río, y se podría generar erosión del canal fluvial, de las barras, y los depósitos de islas (Leopold *et al.*, 1964; Williams and Woldman, 1984; Galay *et al.*, 1985). En cambio, la esquina superior izquierda del gráfico representa cuando el caudal de transporte sedimentario es infrecuente y el aporte sedimentario río abajo es alto, generando agradación (Church, 1995; Collier *et al.*, 1996), ensanchamiento (Petts, 1979, 1980; Xu, 1996), y/o cambios longitudinales abruptos en el patrón del material del lecho cerca de su fuente sedimentaria (Church y Kellerhals, 1978; Petts, 1984). También, puede haber formación de barras e islas en cercanía a la confluencia con tributarios (Grant *et al.*, 2003). Mientras que, en los lugares donde tanto la frecuencia de eventos de transporte y el aporte sedimentario son bajos, puede haber poco o ningún cambio río abajo, a parte de los cambios texturales leves de la distribución de tamaño de granos. Por otro lado, los ríos con altas cargas sedimentarias y frecuentes eventos de transporte introducidos, pueden generar canales con mala clasificación de los sedimentos del lecho o blindarse con abundantes finos (Dietrich *et al.*, 1989).



Aclaración terminológica: (1) Bed scour, (2) Armored channel.

Figura 12. Cambios geomorfológicos en el canal fluvial en respuesta a la relación de las variables T^* y S^* . Modificado de Grant *et al.* (2003).

Por otro lado, las respuestas dentro del dominio central del gráfico serán imperceptibles, ya que dependerán fuertemente por la relación entre el aporte sedimentario y la capacidad del caudal, las cuales variarán en el tiempo y el espacio (Grant *et al.*, 2003).

Por último, Grant *et al.* (2003) sostienen que la existencia de una cantidad de respuestas geomorfológicas río abajo se debe a la región de efectos leves. En esta zona del gráfico es factible que se dificulte determinar de forma clara las tendencias del canal, y es muy probable que la historia geológica tome un rol importante en el mismo. En especial, en esta región central los eventos geológicos pasados, como grandes inundaciones, deslizamientos de tierra e incisión del lecho fluvial, que pueden proporcionar distintos materiales del canal y valles erosionables o con una resistencia anómala que dificultan o facilitan los ajustes del canal fluvial a los cambios del régimen hidrológico (Grant *et al.*, 2003).

4.2.2. Cambios temporales de sinuosidad de los ríos

Para conocer con mayor profundidad los cambios geomorfológicos producidos por las represas, se realizaron cálculos de sinuosidad sectorizando longitudinalmente en partes iguales la región del río estudiada. Para el mismo se tomó el criterio de cálculo del índice de sinuosidad total de Mueller (1968):

$$\text{Sinuosidad Total} = \frac{\text{Long. del cauce principal}}{\text{distancia más corta entre el inicio y final del cauce}}$$

Se calcula midiendo la longitud del cauce de cada sector y luego dividirla por la distancia rectilínea entre el punto inicial y final de cada tramo del cauce principal, como muestra la ecuación anterior. Medir el índice de sinuosidad a lo largo del tiempo permite registrar tanto los cambios en la sinuosidad, como, además, la magnitud de estas variaciones. Aquí es donde entra en juego la variable $|\Delta S|$, esta es el valor absoluto de la diferencia entre el valor de sinuosidad medido en un tiempo t y el anterior ($t-1$) de un sector en particular, para graficar los cambios en la diferencia temporal de la sinuosidad. Por lo tanto, cuando $|\Delta S|$ aumenta: la magnitud del cambio en la sinuosidad aumenta, el río es más activo; mientras que si $|\Delta S|$ disminuye: la dinámica lateral merma, ya que no se registran grandes cambios en los valores de sinuosidad durante ese periodo de tiempo. Se desarrolló este cálculo como metodología de observación del movimiento del curso principal del río.

4.3. Territorio fluvial

El río a través de su dinámica y regímenes fluviales, con sequías e inundaciones, a lo largo del tiempo va conformando su propio territorio. Los sistemas fluviales cuando se producen crecidas generan su llanura de inundación, un espacio para autorregular los excesos de caudal. Por lo que, cuando un río genera su propio territorio es para ocuparlo en algún momento, ya que corresponde con las características de la cuenca, de los caudales de crecida, de la pendiente del cauce, junto con la cantidad y profundidad de sus aluviones, etc. (Ollero *et al.*, 2009).

El espacio generado por el río Negro, al igual que los demás sistemas fluviales, ofrecen numerosos bienes y servicios a la sociedad. Como, por ejemplo: agua dulce para los hogares, comercio e industria, peces para la pesca, espacios recreativos, terrenos paisajísticos para la construcción de viviendas, una vía de desagote de residuos urbanos e industriales, etc. Todas estas características que suponen ventajas socioeconómicas producen una pérdida del espacio fluvial. Además, con el avance de obras de defensa y cultivos de vegetación que fijan los márgenes del río deteniendo la dinámica hidrogeomorfológica natural concibe otro problema: el establecimiento de zonas más aptas que permiten nuevos asentamientos humanos (Ollero *et al.*, 2009). Esta incompatibilidad de las zonas urbanas con la dinámica fluvial genera un deterioro ambiental y un incremento en los riesgos (Ollero *et al.*, 2009), siendo la solución la devolución de los espacios usurpados al sistema fluvial (Ollero, 2007). Por lo que, mantener un territorio fluvial de un ancho y continuidad suficiente proporciona una disminución de los riesgos por erosión e inundaciones y un aumento en la conservación de los diversos hábitats fluviales, los cuales sostienen diversa flora y fauna. Estos hábitats al

estar sujetos al buen funcionamiento ecológico del río, se vuelven frágiles debido a la antropización del sistema. Por consiguiente, para conservar la función ecológica, bioclimática, paisajística del sistema fluvial y recuperar la dinámica hidrogeomorfológica es importante aplicar el concepto de territorio fluvial (Ollero *et al.*, 2009).

Un territorio fluvial se caracteriza por poseer límites dinámicos y continuos, adaptados a la dinámica fluvial, además, de estar libre de obstrucciones para su inundación y/o erosión, por lo que no debe ser urbanizable. Con el objetivo de recuperar y/o conservar la dinámica hidrogeomorfológica, y con ella la diversidad ecológica y la función bioclimática del sistema fluvial. Permitiendo, al mismo tiempo, resolver problemas de ordenamiento de sectores inundables y mejorar el paisaje fluvial (Ollero, 2014).

Determinar el territorio fluvial y la dinámica de sectores del río Negro, o de su totalidad, se convierte en una tarea importante, sabiendo que la región del Alto Valle se presenta como uno de los mayores aglomerados poblacionales de la Patagonia, por lo que sería útil para evitar consecuencias edilicias, ambientales, económicas y sobre todo humanas en la región. Ya que, de esta manera se disminuirían las consecuencias de las inundaciones y la erosión fluvial, procesos naturales, necesarios e inevitables. Para ello, la aplicación efectiva de un territorio fluvial conllevaría a que los gobiernos realicen inicialmente inversiones para eliminar defensas o desplazarlas, para comprar o expropiar propiedades, la rebaja de terrenos sobre elevados, favorecer los cambios de uso de suelo, cofinanciar seguros para aquellos propietarios que no quieran desplazarse del territorio fluvial, a expensas de la inundación y erosión. Por el contrario, la restauración del cauce y riberas no conlleva inversiones, ya que la realiza el propio río (Ollero, 2014).

La metodología para definir un territorio fluvial se basa en delimitar áreas entre el espacio fluvial, el cual debe conservar sus características naturales, y el espacio urbano. Estos límites no son estáticos y deben ser revisados periódicamente, dependiendo de la dinámica fluvial. En el territorio fluvial se debe incluir los trazados del río y la extensión máxima de su corredor ribereño de los últimos 100 años (Figura 13, recuadros 2 y 3), incluyendo meandros abandonados, masas de vegetación ribereña aisladas, los terrenos susceptibles a ser erosionados por la dinámica del cauce y todas las zonas inundadas por crecidas de 5 o 10 años (Figura 13, recuadros 4, 5 y 6) (Ollero, 2014).

Para el cartografiado de los cursos históricos del río Negro se realizó una recopilación de imágenes satelitales multiespectrales Landsat pertenecientes a capturas desde el año 1976 al 2019 (Misiones Landsat 2, 4, 5 y 8), con una aproximada resolución temporal decenal y 30 metros de resolución espacial. Estas imágenes fueron seleccionadas en el período entre enero y abril para disminuir las variaciones de la disposición del agua superficial del río por medio de los cambios estacionales del caudal. Asimismo, se utilizó una imagen satelital capturada el 6 de abril 1967 de la misión desclasificada Corona KH-4. Además, se cuenta con mapas de inundaciones cada 10 años desarrollados por la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC), información de vital importancia para la determinación del territorio fluvial. Para el mapeo de los terrenos susceptibles a la erosión fluvial se cuenta con imágenes producidas bajo el programa copernicus (Pekel *et al.*, 2016) proporcionados de manera gratuita por la European Commission Joint Research Centre (EC-JRC) y Google LLC (Figura 14).

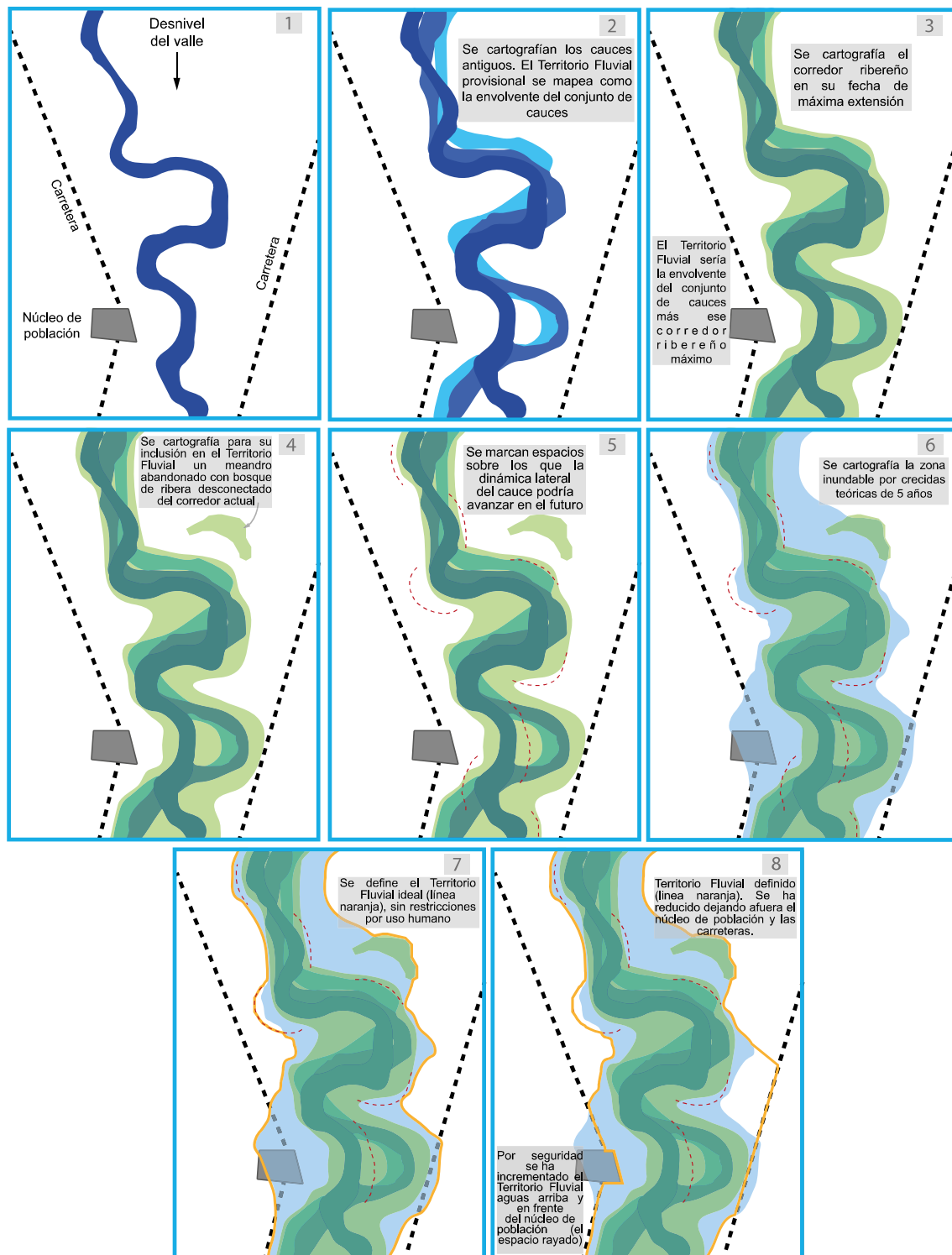


Figura 13. Proceso de determinación del territorio fluvial. Modificado de Ollero (2014).

Para el mapeo de los terrenos susceptibles a la erosión fluvial se cuenta con imágenes producidas bajo el programa copernicus (Pekel et al, 2016) proporcionados de manera gratuita por la European Comission Joint Research Centre (EC-JRC) y Google LLC (Figura 14). Este programa generó mapas de ubicación y de distribución temporal del agua superficial de casi todo el planeta, en el período comprendido entre el 16 de marzo de 1985 y 10 de

octubre de 2015. Los mismos proporcionan estadísticas sobre el alcance y cambios del agua superficial, y fueron creados utilizando 3.066.122 imágenes Landsat (5, 7 y 8) de 30 metros de resolución. Estos mapas de intensidad de cambios en los límites del agua superficial indica con colores rojos los pixeles donde dejó de haber agua, y en verde los pixeles donde antes no había agua y en la actualidad sí hay. Mientras que en color negro indica los sectores donde no existió cambios en el tiempo. Por lo tanto, las zonas de meandros coloreadas en verde al ser indicadores de erosión, manifiestan las zonas más probables a seguir siendo erosionadas en el futuro.

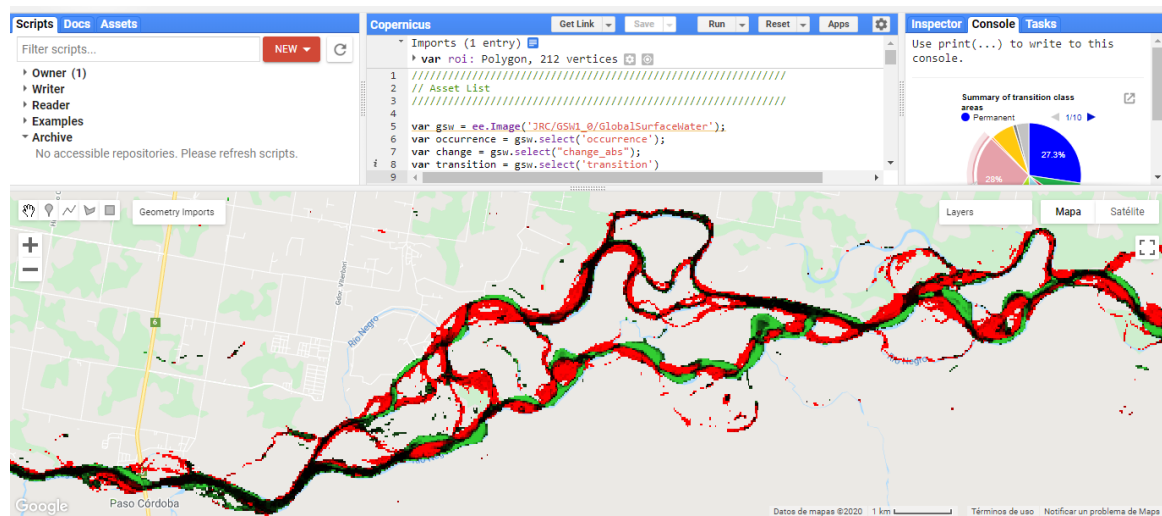


Figura 14. Captura de pantalla de la plataforma Google Earth Engine con el mapa de intensidad de cambios del agua superficial desarrollado por el programa Copernicus. Ver en: <https://code.earthengine.google.com/76f14b94d0cbef74b9f6328085eb4cda>

Del territorio fluvial se deben excluir todos los grandes asentamientos urbanos y determinados usos humanos consolidados, y para reducir el nivel de la cota en las crecidas se debe ensanchar el territorio fluvial aguas arriba y en frente de los núcleos poblacionales (Figura 13, recuadros 7 y 8) (Ollero, 2014).

Este método a pesar de su útil aplicación para el río Negro, no ejemplifica una metodología completa para ser utilizada en un río anastomosado con urbanizaciones dentro de sus islas, como sucede en este caso. Por lo que, con el objetivo de lograr un procedimiento definido para resolver dichas dificultades, se optó por criterios similares a los anteriores para desarrollar una metodología que aplique al río Negro.

Las primeras instancias del procedimiento propuesto se desarrollan de igual manera al de Ollero (2014), como muestra la Figura 15.

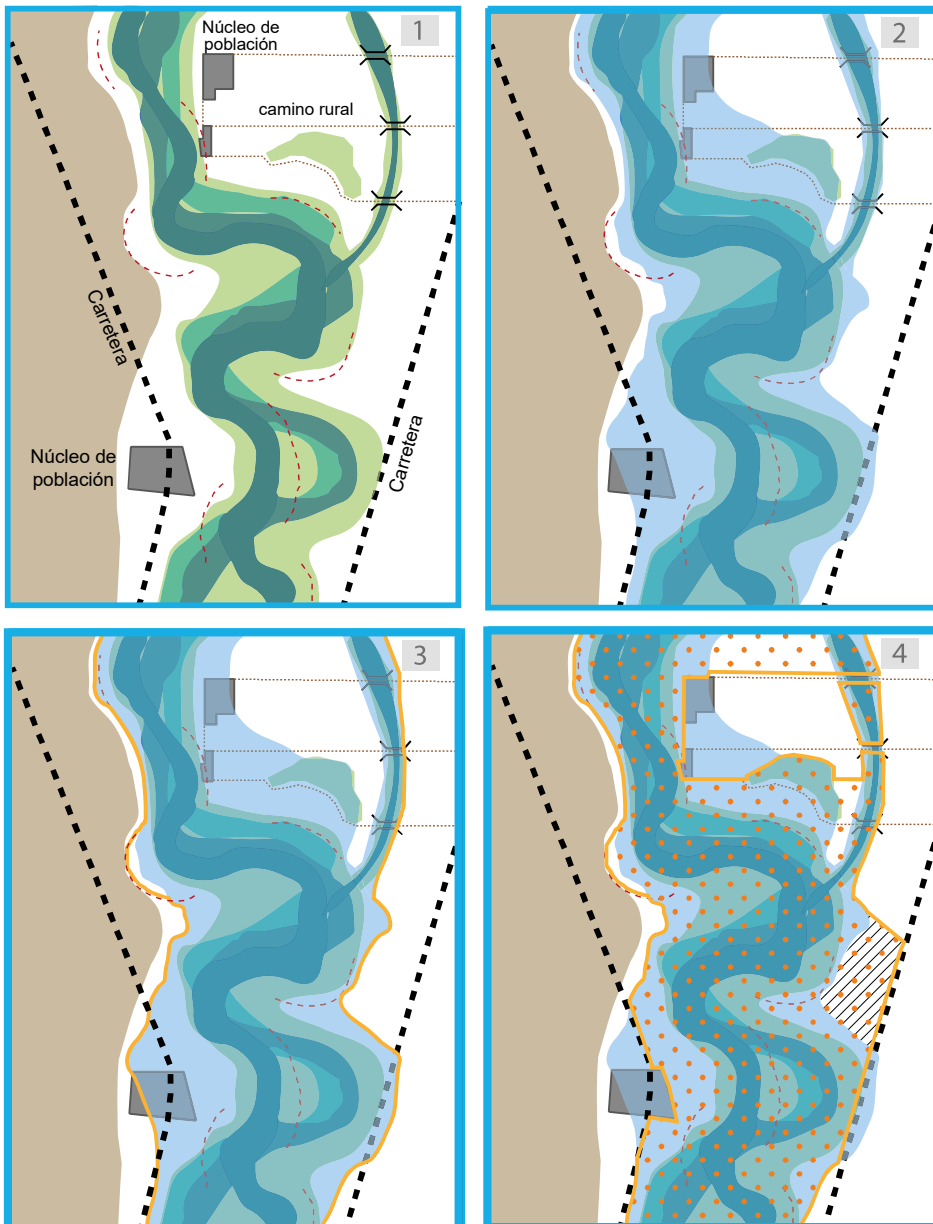


Figura 15. Determinación del territorio fluvial para ríos anastomosados. Modificado de Ollero, 2014.

Las diferencias que complejizan el procedimiento se deben a aquellos cursos fluviales que rodean las zonas urbanizadas, dando lugar a zonas pobladas dentro del territorio fluvial. Siendo de gran importancia evitar dejar estas zonas urbanas sin conexión con el exterior. De manera que, del territorio fluvial se deben excluir al menos un camino que los conecte al espacio urbano exterior, conservando siempre los meandros abandonados, como muestra el ejemplo de la Figura 15 .

5.0 RESULTADOS

5.1. Caudal ecológico

Para la determinación del caudal ecológico del río Negro se analizó el periodo 1922-1967, aplicando el método Montana a los datos de caudales históricos de la estación de aforo 1808 (Paso Córdoba) del Sistema Nacional de Información Hídrica [1]. Este análisis da como resultado los caudales bases expuestos en la Tabla 4. Obteniendo los valores para los caudales base mínimo, degradado, bueno, excelente, sobresaliente, óptimo y máximo. Los resultados representan los distintos rangos de caudales para el río Negro, en la estación de aforo de General Roca, correlacionados con el grado de salud ecológica. Los cuales son graficados en la Figura 17 para el análisis de los caudales actuales. Además, se analizaron las recurrencias de crecidas pre y post represas (Figura 16).

Mes	Caudal Ecológico [m ³ /s]						
	Mínimo	Justo o Degradado	Bueno	Excelente	Sobresaliente	Óptimo	Máximo
Enero	74,55	223,64	298,19	372,73	447,28	447,28	1490,93
Febrero	42,62	127,86	170,48	213,10	255,72	255,72	852,40
Marzo	31,08	93,25	124,33	155,41	186,49	186,49	621,64
Abril	33,05	99,14	132,18	165,23	198,27	198,27	660,91
Mayo	65,16	195,49	260,65	325,82	390,98	390,98	1303,26
Junio	118,42	118,42	236,83	355,25	473,66	710,49	2368,30
Julio	136,41	136,41	272,82	409,23	545,64	818,45	2728,18
Agosto	134,06	134,06	268,12	402,18	536,23	804,35	2681,17
Septiembre	124,24	124,24	248,48	372,72	496,97	745,45	2484,82
Octubre	148,64	148,64	297,29	445,93	594,57	891,86	2972,86
Noviembre	166,11	166,11	332,22	498,33	664,44	996,67	3322,21
Diciembre	128,69	128,69	257,38	386,07	514,77	772,15	2573,82

Tabla 4. caudal ecológico calculado utilizando el método Montana para el río Negro. Estación de aforo 1808 Paso Córdoba [1].

Para analizar el estado actual del río se tomaron datos de caudales medios mensuales pertenecientes al periodo 2008-2018 (Figura 17), junto con los valores indicativos de los niveles base del caudal ecológico calculado. Se observa que el río Negro conforma un flujo controlado y estabilizado. Donde el mismo pierde su régimen de fluctuaciones naturales, preservando solo un bajo porcentaje de la avenida pluvial, producto de las precipitaciones invernales.

La presencia de las presas afecta al flujo del río Negro, donde con posterioridad al hidrograma del período 1958-1967 (Figura 18) se genera un cambio tanto en los niveles generales del flujo, como en el patrón estacional de caudales. Se disipa, además de las crecidas nivales, los niveles de los ciclos de estiaje, inhibiendo algunas de las funcionalidades ecológicas mostradas en la Figura 4.

Durante el estiaje el caudal medio mensual actual resulta mayor al natural (Figura 17 Figura 18), reduciendo las sequías necesarias para un control de malezas acuáticas, un control de abundancia y diversidad de especies, entre otras funciones ecológicas. Por otra parte, las crecidas además de tener la función ecológica de controlar la presencia y abundancia de especies, arrastra desechos y vegetación invasora, restablece las condiciones de calidad del

agua, transporta sedimentos y nutrientes, y si genera desbordes reiterados limita el asentamiento ribereño, lo cual es ecológicamente positivo ya que evita la antropización del corredor ribereño. Estos caudales de crecida son los componentes naturales del régimen hidrológico más distorsionado del río Negro. Los procesos de inundación siguen teniendo lugar en el río controlado, pero con mucha menor energía (Figura 16). Con los ríos sin presencia de represas ni diques, el Negro probabilísticamente cada 10 años erogaba crecidas de aproximadamente 6200 m³/s, mientras que en el presente tiene el potencial estadístico de llegar a inundaciones de 2700 m³/s. Estas crecidas son de periodos de tiempo acotados, por lo que no se ven reflejadas en los hidrogramas de caudales medios mensuales. El río Negro en sus condiciones naturales tiene el potencial de aumentar el doble de su caudal en un solo día. Durante los años 1945 y 1950 la crecida máxima registrada en un solo día fue de 1980m³/s, pasando de unos 2065 m³/s a 4045 m³/s el día 1 de junio de 1945, según el registro de la estación de aforo de paso Córdoba [1], y los aumentos promedio de caudales diarios fueron de unos 60,8 m³/s. Mientras que, en la actualidad, desde el 2014 al 2019, la crecida máxima en un día fue de 413,9 m³/s y los aumentos promedio de caudales diarios fueron de 11,2 m³/s. Este tipo de comportamiento tan repentino en el período sin regulación definía una importante capacidad de transporte sedimentaria y de arrastre de vegetación y materiales, impidiendo el crecimiento de vegetación riparia y el avance de la población hacia la costa del río.

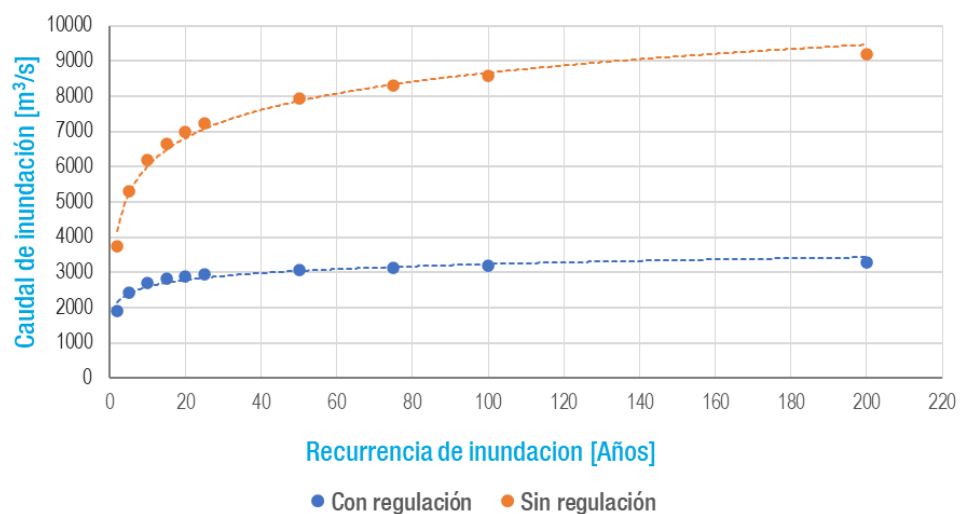


Figura 16. Periodicidad probabilística de caudales de crecida con la regulación de las presas y sin la regulación de las presas. Realizado a partir de los datos del trabajo de Jong y Mare (2007).

Si bien en el cálculo del caudal ecológico se evidencia un control en el flujo, los porcentajes de caudal promedio de los últimos años son de buena calidad para desarrollar y mantener la vida acuática del río según los resultados del método Montana (Tabla 2 y Figura 17). Sin embargo, para conocer con más certeza la relación entre los regímenes de caudales y la vida acuática se deben realizar estudios concentrados en la biota, ya que el método Montana sólo instrumenta datos hidrológicos. De todas maneras, es preferente tener un río aún más saludable, que conserve el patrón estacional de caudales naturales y así favorecer a las especies autóctonas sobre las invasoras (O’Keeffe y Le Quesne, 2010) manteniendo la dinámica ecológica y geomorfológica (González Mora *et al.*, 2014).

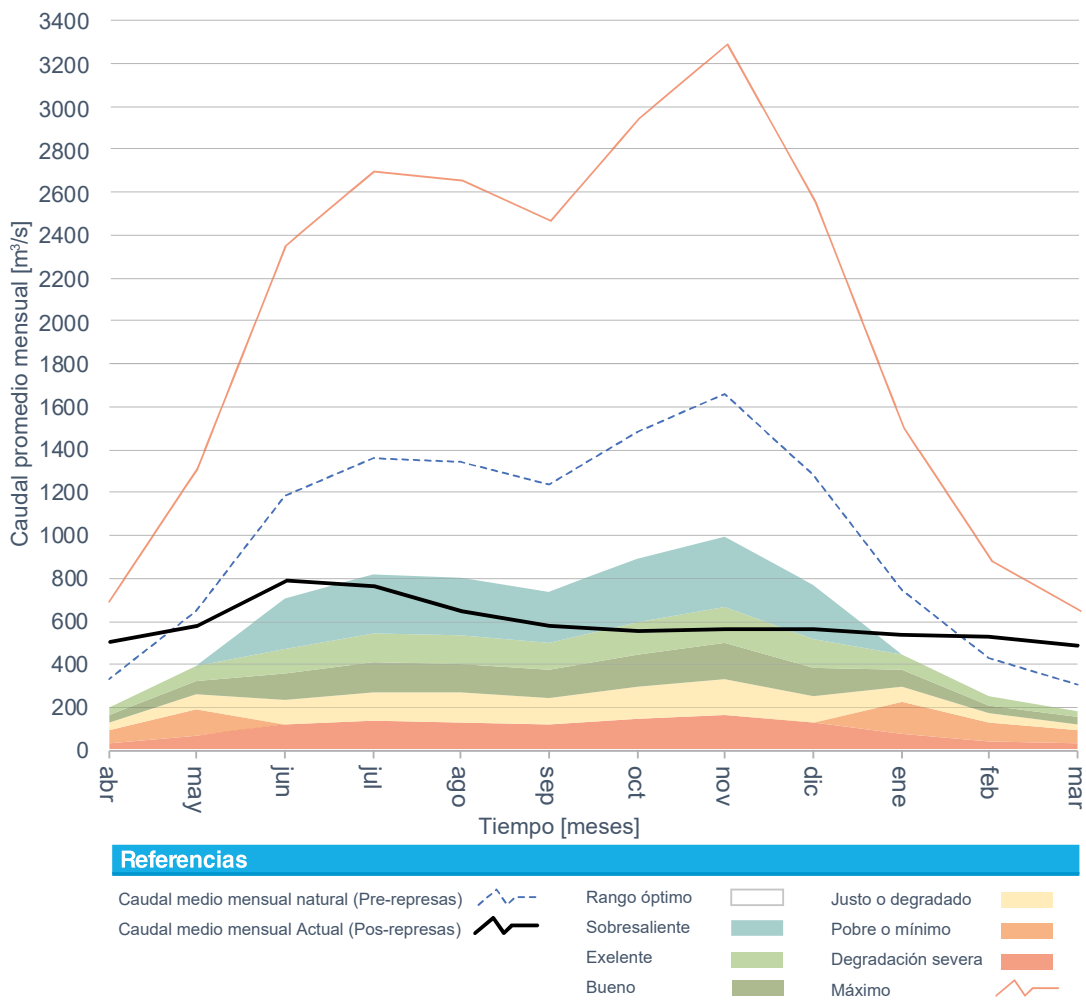


Figura 17. Cálculo del caudal ecológico del río Negro. Se compara el caudal medio mensual en condiciones naturales (línea discontinua azul) con el actual (línea negra), junto a los rangos de estado de caudales calculados (sectores coloreados).

Para llevarse a cabo una instrumentación del caudal ecológico se debería reducir el caudal durante el estiaje y aumentarlo en los periodos de avenidas. Sin embargo, bajar el caudal en periodos de estiaje para alcanzar objetivos ambientales puede resultar inconcebible debido al grado de contaminación en determinados sectores del curso fluvial. A pesar de ello, los caudales ecológicos se eximen de las responsabilidades de dilución de la contaminación (González Mora *et al.*, 2014), siendo evidentemente preferible reducir los contaminantes desde su origen.

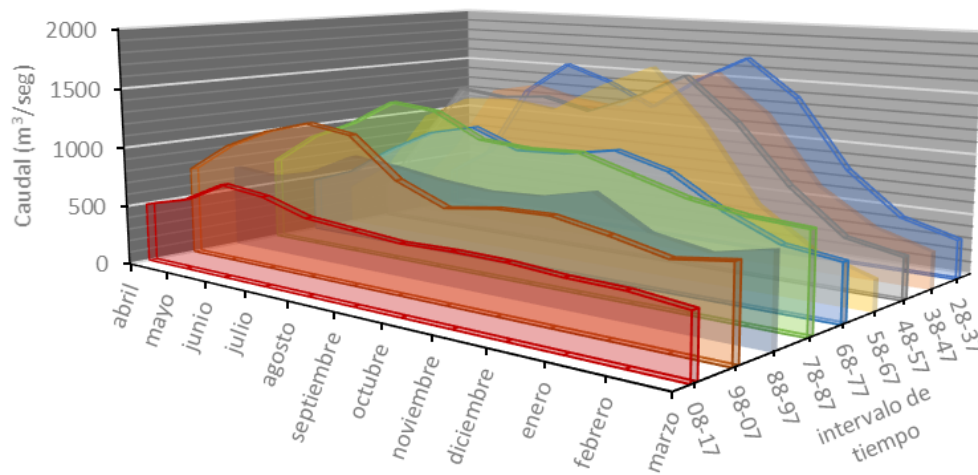


Figura 18. Hidrogramas promedio realizados cada 10 años.

Las subas durante los regímenes de avenidas son necesarias para mantener el sistema fluvial en buenas condiciones ambientales. En particular, en la Figura 19 se expone el caudal del río Negro junto a las concentraciones de la bacteria *Escherichia Coli* en tres puntos particulares del río: En la estación de muestreo de la AIC de la zona de la pasarela en la Ciudad de Allen, en Paso Córdoba y Apycar de la Ciudad de General Roca (AIC-SGA, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020).

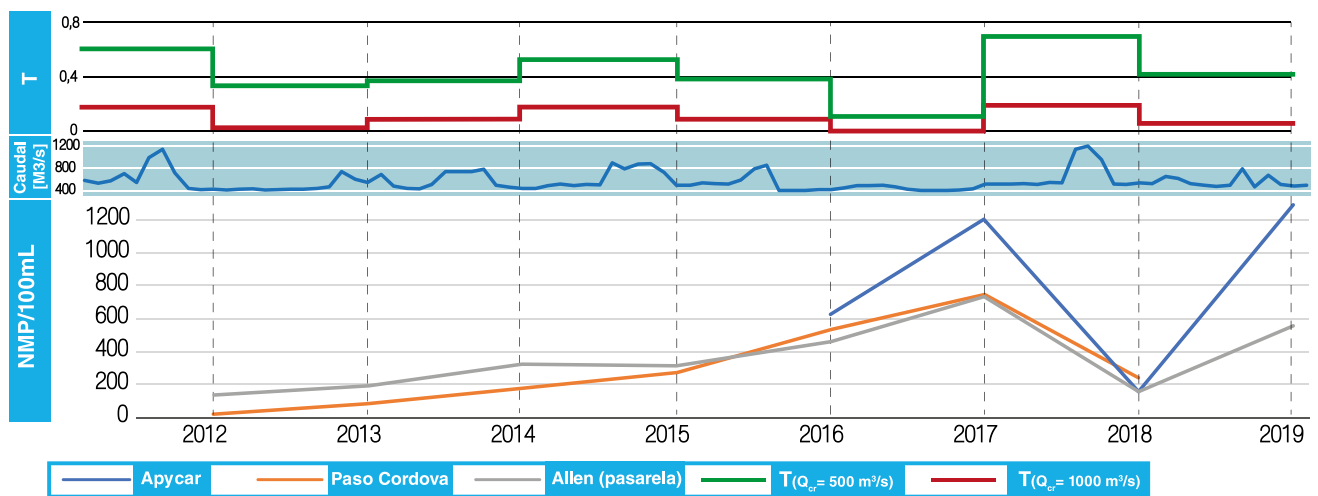


Figura 19. Variación de la concentración de *Escherichia Coli* conforme a los niveles de caudal.

En el gráfico cada punto de muestreo es coincidente con el hidrograma de caudales medios mensuales ubicado en la parte superior, además de los valores T anuales para caudales críticos de 500 y 1000 m³/seg calculado con los caudales medios diarios. El término T indica el porcentaje de tiempo en el cual el caudal supera el caudal crítico durante un intervalo de tiempo definido, permitiendo observar la capacidad de arrastre de los caudales en periodos de tiempo diferentes.

Entre los años 2013 y 2017 el caudal promedio mensual escasamente supera los 800 m³/seg. coincidiendo con un aumento sostenido de la concentración bacteriológica. Asimismo, durante el 2017 se produjo una fuerte estabilización del flujo a niveles bajos de caudal y sin ninguna perturbación durante este período de tiempo, se genera una aceleración en la concentración de bacterias. En el siguiente año (2018) se produce una avenida de volúmenes elevados (1200 m³/seg) (Figura 19) causando un arrastre de sedimentos, desechos, nutrientes, etc. Disminuyendo la concentración bacteriológica a valores muy bajos con respecto a las mediciones anteriores. Esto es debido al aumento en la capacidad de arrastre de los caudales. Finalmente, durante el 2019 se reduce nuevamente la capacidad de arrastre de los caudales, dando un aumento en la concentración de bacterias en las estaciones de muestreos de la AIC (Pasarela, Paso Córdoba y Apycar).

Una regresión profundiza la relación entre la capacidad de arrastre de los caudales (T) y la concentración de *E. Coli* (Figura 20). Tomando las diferencias entre los valores de las mismas variables en tiempos consecutivos ($[T_t - T_{t-1}]$ y $[E. Coli_t - E. Coli_{t-1}]$) para observar la relación entre los cambios de caudales y los cambios en la concentración de bacterias. Resultando en regresiones inversas, con un buen nivel de ajuste R², que demuestran que al disminuir la capacidad de arrastre de los caudales se ve aumentada la concentración bacteriológica en las tres estaciones estudiadas (Figura 20). De todas maneras, se recomienda recrear el mismo estudio, pero con mayor número de casos. De manera que, las regresiones cuenten con un mayor sustento estadístico, sobre todo para la estación "Apycar" que contiene cuatro tomas de muestras, y por lo tanto solo tres datos para la regresión.

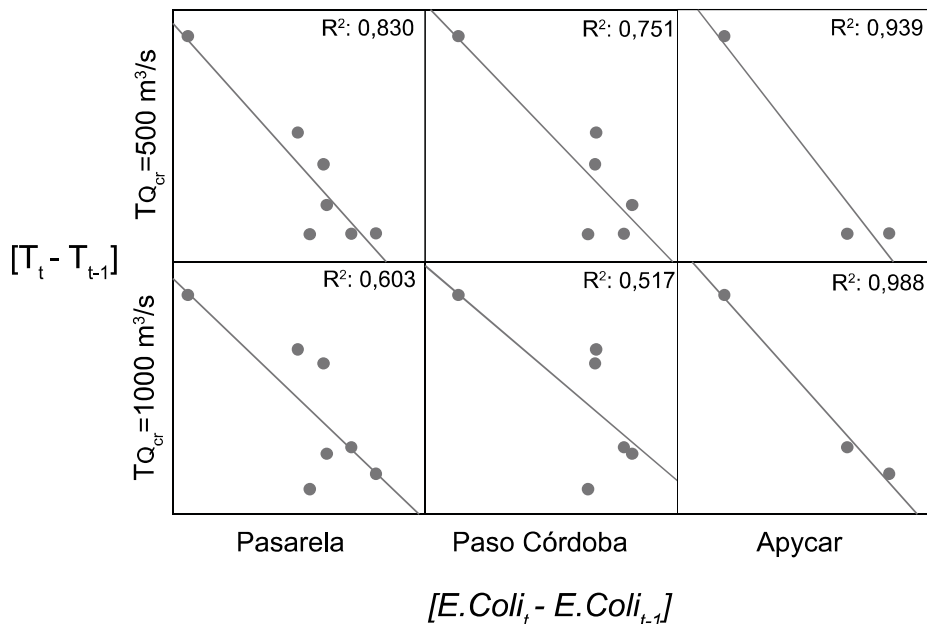


Figura 20. Regresiones entre la variable T y la concentración de *E. Coli*.

5.1.1. Teledetección y observación de crecidas

La crecida estudiada en esta sección tuvo lugar a fines del mes de julio del año 2020 y alcanzó caudales máximos de aproximadamente 1500 m³/s (Figura 21). Su génesis fue estrictamente antrópica, a razón de un aumento en la erogación de los distintos complejos hidroeléctricos debido a un acrecentamiento en la demanda energética invernal (Redacción

Río Negro, 2020), propiciando un aumento significativo en los niveles de caudal con la ausencia causativa de las precipitaciones.

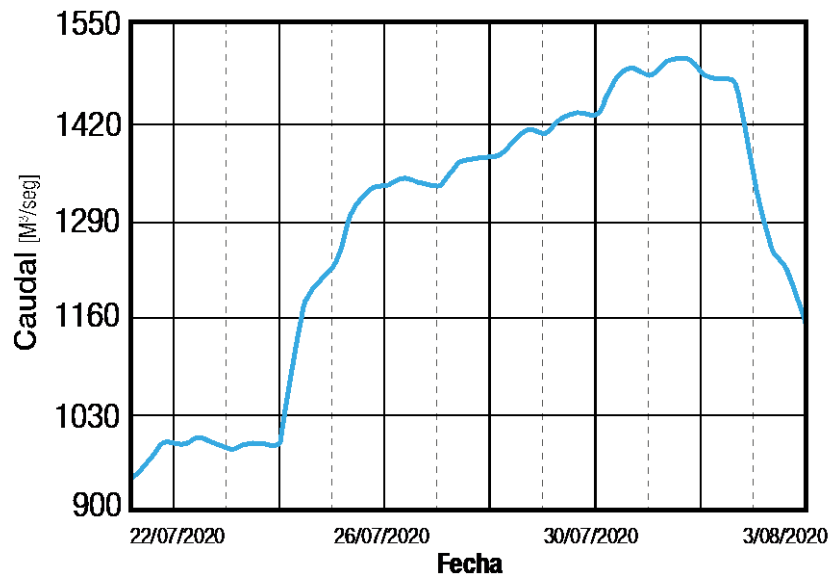


Figura 21. Hidrograma correspondiente a la crecida de fines de julio del 2020. Basado en información de la AIC (Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas) [2].

El propósito de esta comparación entre sistemas ópticos multiespectrales y SAR, es el de cotejar la teledetección de las crecidas, y poder aplicarlos al momento en que la nubosidad no permita observar la superficie terrestre.

Para el estudio de este caso, coincidió la fecha de adquisición de las imágenes de Landsat 8 y Sentinel 1B (Tabla 5), y además, estas capturas concordaron con el día del flujo máximo de la crecida (Figura 21).

Tipo de imagen	Multiespectral	SAR
Misión	Landsat 8	Sentinel 1B (Banda C)
Fecha de toma	15/07/2020 (previo) 31/07/2020 (crecida)	19/07/2020 (previo) 31/07/2020 (crecida)
Resolución (procesada)	15x15 m	10x7 m

Tabla 5. Características de las imágenes de radar Sentinel 1B y ópticas Landsat 8 utilizadas.

En cuanto a la imagen de radar, se utilizó el producto Sentinel 1B GRD (*Ground Range Detection*) con paso descendente y polarizaciones duales (VV + VH). Optando por la imagen polarizada VV para la detección de agua superficial, ya que se aprecia que este tipo de polarización registra un mayor contraste de la retrodispersión entre las superficies acuosas y las terrestres (Figura 22). Para detectar los sectores inundados se calculó la diferencia entre la imagen de la crecida y una imagen previa (Tabla 5).

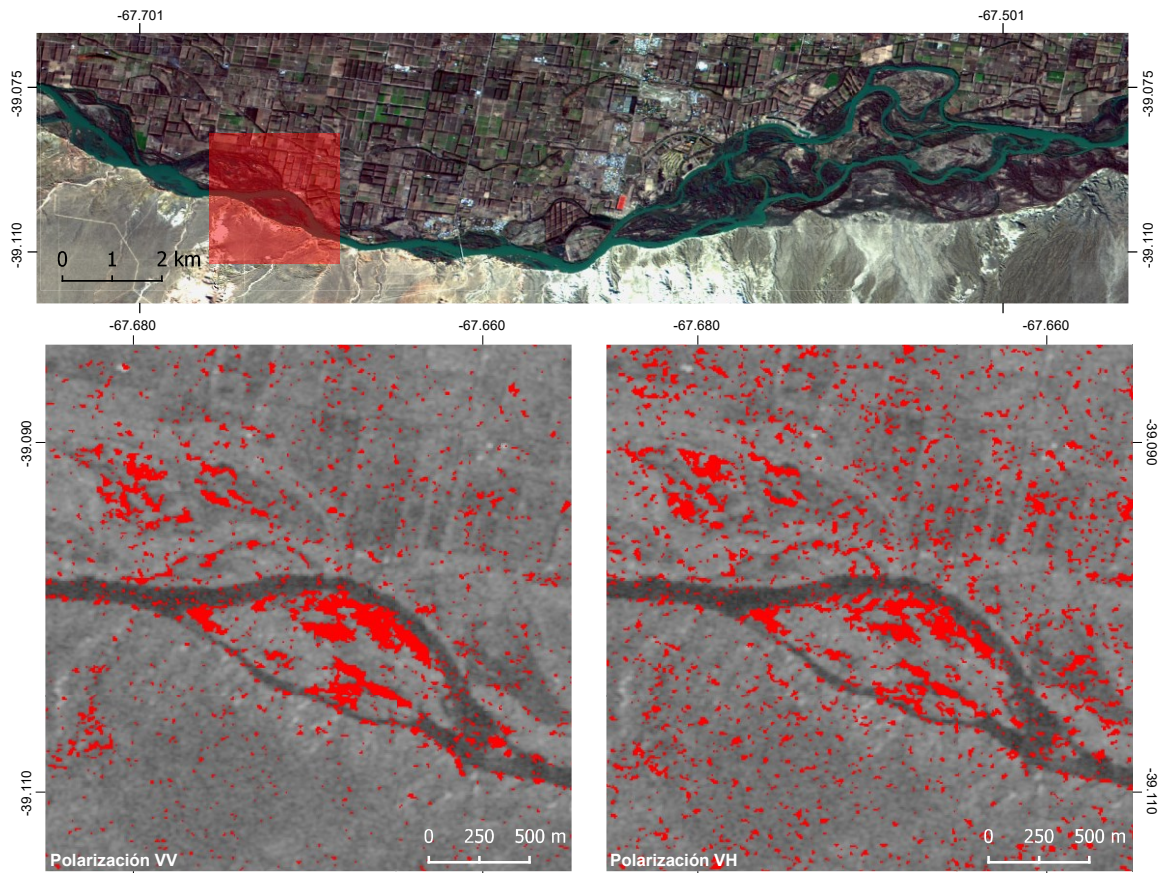


Figura 22. Comparación de la detección de agua superficial no permanente entre las polarizaciones VV y VH de imágenes SAR (sentinel 1B). Imagen base corresponde a Sentinel 1B (VV) al momento de la crecida.

Luego, a ambos resultados se le aplicó un mismo nivel de umbralización. La polarización VH distingue con menor precisión el agua superficial, también reproduce mucho más ruido a su alrededor que la imagen con polarización VV (Figura 22).

En cuanto a la teledetección con las imágenes Landsat 8, se aplicó el índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*) el cual es útil para la identificación de masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad. El trabajo de Mcfeeters (1996), determinó un Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) haciendo uso de la radiación infrarroja cercana reflejada y la luz verde visible para detectar tales características. Estableciendo la siguiente ecuación:

$$NDWI = \frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$$

Posteriormente, se procedió a calcular la diferencia entre la imagen NDWI previa a la crecida con respecto a la captada durante el evento con la calculadora ráster del software QGIS. Al resultado se le aplicó una umbralización para obtener una imagen binaria de la detección de agua superficial (Figura 23). En este caso la detección se caracteriza por contener niveles muy bajos de ruido (casi nulo), a diferencia de la detección a partir de imágenes SAR.

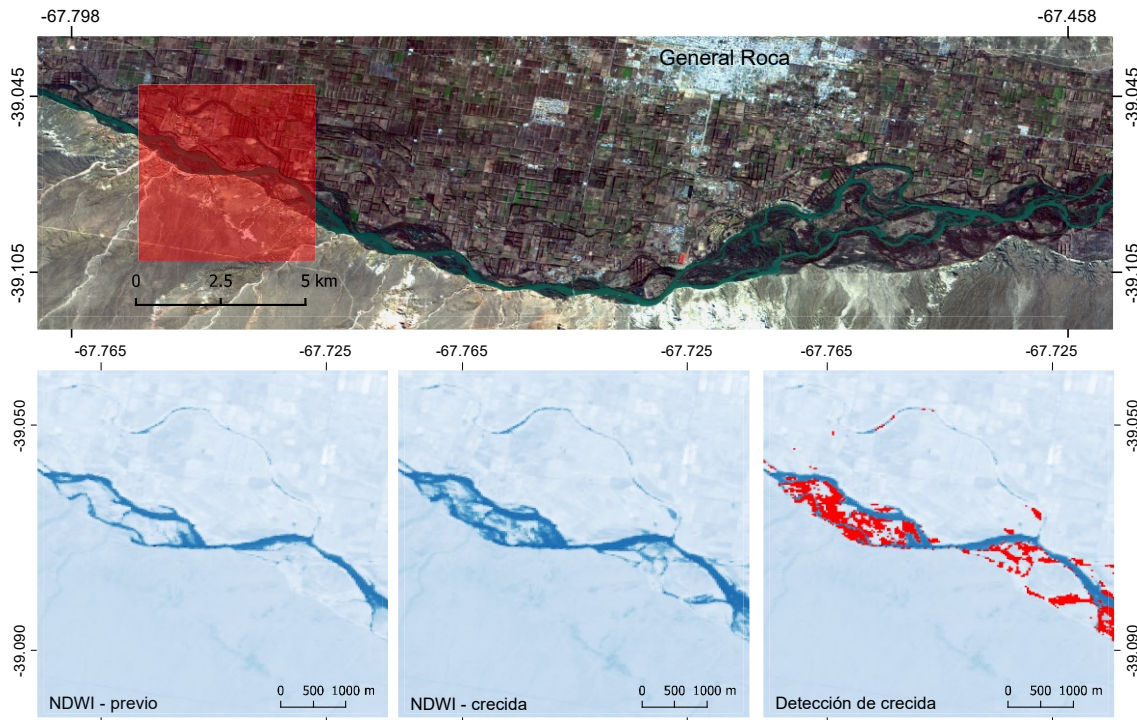


Figura 23. Proceso de generación de detección de agua superficial a partir de la aplicación de índices NDWI a imágenes Landsat 8. Detección de agua en rojo.

Por último, se contrastan los resultados de ambos métodos (Figura 24). Aquí, los resultados indican que la metodología utilizada para el procesamiento de las imágenes SAR es adecuada para la detección de zonas inundadas. El radar detecta en menor magnitud las zonas con agua que el método con imágenes ópticas. Esto quizás se deba a la existencia de procesos de retrodispersión como la dispersión volumétrica y el doble rebote del pulso energético entre el agua y la vegetación baja, generando un aumento de retrodispersión en zonas vegetadas inundadas (Figura 25). Cabe destacar que si se utilizara un radar que emita radiación en longitudes de onda superior a 5 cm (banda C), como los SAR en banda L o P, estos sectores no presentarían dificultad para su discriminación. Esto se debe a que estas señales no rebotan en la vegetación baja, sino que la atraviesan, dando valores de retrodispersión bajos, derivado en una dispersión especular producida en el agua superficial (Figura 25). Debido a esta propiedad de las bandas L o P, posiblemente su señal logre atravesar algunas copas de los árboles del margen del cauce y poder divisar los sectores inundados que se encuentran cubiertos por los mismos.

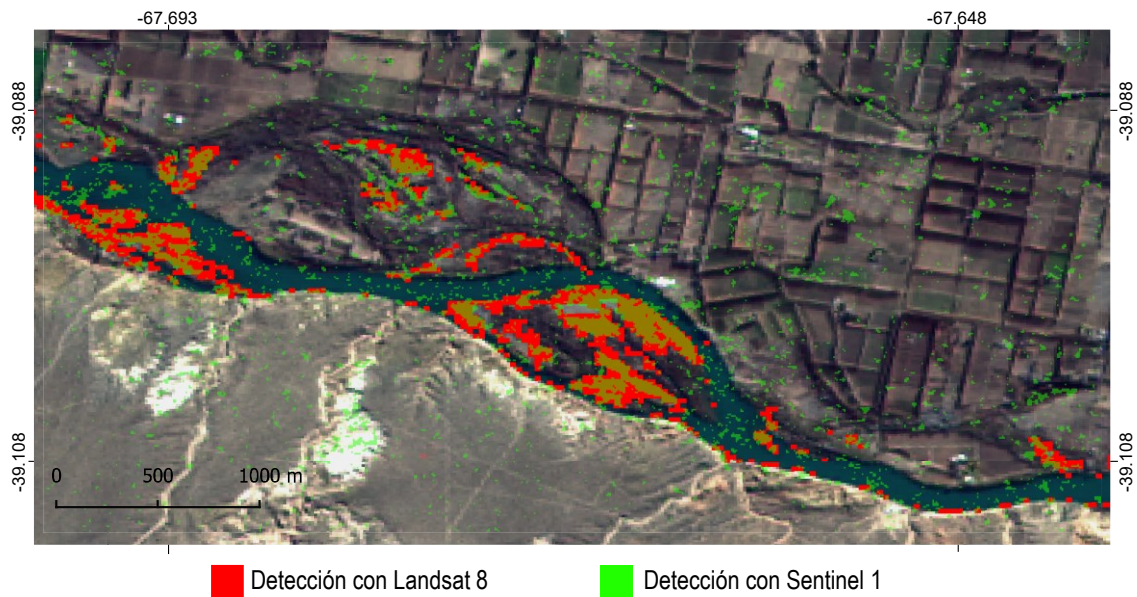


Figura 24. Comparación entre los resultados de detección de inundaciones a partir de imágenes multiespectrales (Landsat 8) y SAR (Sentinel 1).

Finalmente, se observa que no se generan grandes desbordes de las aguas del río Negro con un caudal aproximado a $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Mayoritariamente los sectores inundados fueron las islas. Aquellas viviendas que registraron ingreso de agua por el río Limay, en la provincia de Neuquén, se encuentran en depresiones del terreno y al subir el nivel del río, sube la napa, quedando anegados (Redacción Río Negro, 2020). Siendo estas inundaciones producto del nivel freático y no de desbordes fluviales directamente. Por otro lado, esta crecida en la provincia de Río Negro no registró inconvenientes graves hacia las viviendas costeras.

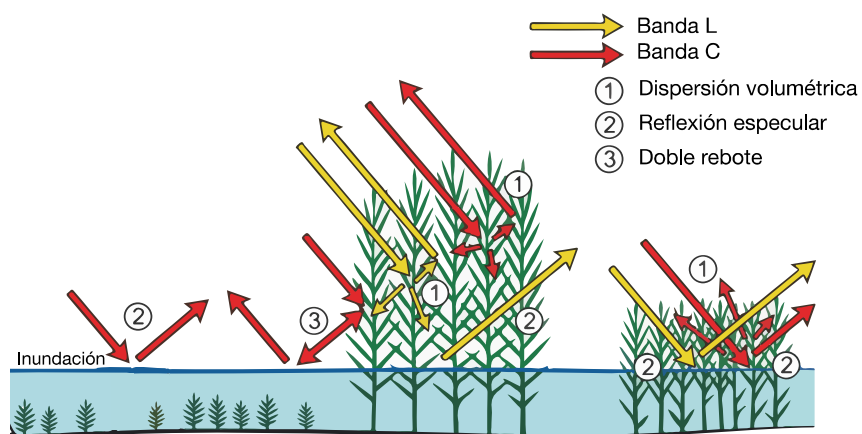


Figura 25. Distintos procesos de retrodispersión de señales SAR, tanto en banda C como en L. Modificado de Evans, 2013.

Para culminar, cabe señalar, que una crecida de estas magnitudes ($\sim 1500 \text{ m}^3/\text{s}$) no representa niveles importantes de caudal comparativamente a las crecidas naturales del río

Negro. El flujo natural del mismo tenía gran capacidad de aumentos en sus crecidas, y generalmente al menos una vez anualmente ocurría una crecida de caudales cercanos a 2000 m³/s, y, además, en muchas oportunidades se registran avenidas de estas dimensiones.

5.1.2. Cambios en la vegetación riparia

Con el transcurrir del tiempo los asentamientos poblacionales e infraestructurales han ido en aumento en las regiones ribereñas, tanto de la Provincia de Río Negro como de Neuquén, condicionando el estado ecológico de los ríos. Como ejemplo de esto, se puede enumerar varios avances infraestructurales importantes: la construcción del Dique Ballester que abastece el regadío para permitir el aumento de las áreas productivas, los distintos complejos hidroeléctricos que condicionan enormemente los regímenes hidrológicos, el avance productivo y habitacional que refuerza los márgenes erosionables del cauce, etc. Estos progresos condicionan un escenario propicio para el establecimiento poblacional, ya que al controlar los caudales de crecidas se reduce el riesgo de inundaciones y permite, además, el avance de vegetación invasora sobre los márgenes fluviales, la cual dificulta la migración lateral del río, lo que, a su vez, evita y reduce la pérdida de terrenos debido a la erosión. Asimismo, las personas que viven en la costa se convierten en un factor muy influyente en el crecimiento de la vegetación riparia debido a que realizan plantaciones de árboles en la zona con el objetivo de evitar la migración lateral sobre sus propiedades. La vegetación tiene un rol geomorfológico activo sobre el suelo, ya que sus raíces fijan los sedimentos sueltos, favoreciendo la acreción fluvial. Este tipo de fijación suele ocurrir en las orillas del cauce principal, en las barras en el interior del cauce o en las llanuras de inundación (Martín Vide, 2003).

Por lo tanto, con el objetivo de observar los cambios en la presencia y distribución de vegetación en el río Negro se generó un mapa de cobertura, realizado a partir de la plataforma Google Earth Engine (Figura 26). Los resultados se pueden observar de forma online en el siguiente enlace: <https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users%2Fenzomartinez%2Fprueba%3ACAMBIO%20DE%20LA%20VEGETACION%20RIPARIA>

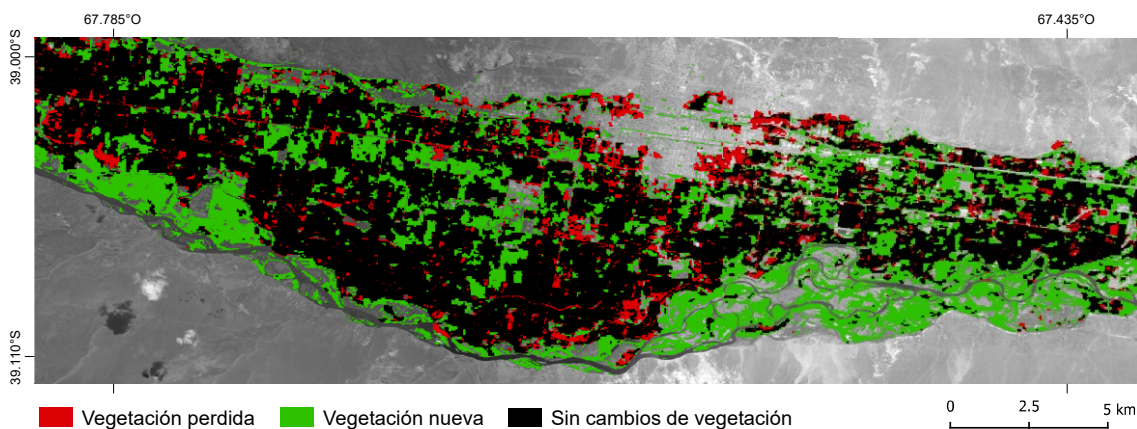


Figura 26. Cambios de vegetación riparia producidos entre 1976-2019.

Se obtuvo una estimación de los cambios en cantidad de vegetación riparia. Donde, en primer lugar, se seleccionó un área de 59,33Km², equivalente al corredor ribereño, alrededor del río

para cuantificar dichos cambios. Resultando en un aumento areal de aproximadamente 22,59 Km² de vegetación nueva (color verde) y una pérdida de unos 0,83 Km² (color rojo). En conclusión, partiendo de un área vegetada de alrededor de 3,9 Km² en el año 1976, se entiende que existió un aumento aproximado del 558% de vegetación en la región seleccionada durante los últimos 43 años. Estos aumentos se deben a dos factores, la alteración del régimen hidrológico por parte de las represas y diques, que al disminuir la recurrencia o frecuencia de los caudales críticos y la magnitud de las crecidas permiten el avance de la vegetación a áreas fluviales, ya que no se desarrollan grandes caudales de arrastre. El segundo factor es el humano, ya que este introdujo nueva vegetación a la región.

5.2. Respuesta Geomorfológica a los Efectos de las Presas

El emplazamiento de una presa en una cuenca fluvial impone disturbios al sistema, debido a que interviene en los regímenes hidrológicos y de transporte sedimentario. El grado de modificación de estos regímenes, va a influir en la magnitud de las perturbaciones geomorfológicas que se hallen río abajo de las edificaciones.

La geología ejerce controles de primer orden al sistema fluvial. Los cuales definen, por ejemplo, las características texturales del río. Como ejemplo del río Negro pueden nombrarse los depósitos conocidos como Rodados Patagónicos, los cuales están disponibles de forma casi continua a lo largo de la cuenca y sobre el lecho del cauce (Bonomo y Prates, 2014). Este tipo de depósitos otorgan características texturales al sistema fluvial. A los rodados Patagónicos se le ha atribuido origen marino, glacial y/o fluvial, pero también se propone que se deben a diversos procesos, principalmente glacioluviales (Cortelezzi *et al.*, 1968; Teruggi *et al.*, 1964; Trebino, 1987). Diversos autores (Fidalgo y Rigi, 1970; Teruggi *et al.*, 1964; Trebino, 1987) observan que la composición litológica de los clastos posee un elevado porcentaje de rocas volcánicas intermedias y básicas (andesitas y basaltos), mientras que, en menor proporción, Cortelezzi *et al.* (1968) registraron rocas piroclásticas, granitos, pórfidos, calcedonias, lavas vesiculares y piedra pómez. Sin embargo, no todos los depósitos de grava que se encuentran en el valle actual del río corresponden a los Rodados Patagónicos. Fidalgo y Rigi (1970) proponen que se deben considerar como tales solo a los desarrollados con anterioridad a los sedimentos glaciares y fluvioglaciares del Pleistoceno. Luego sobre esta serie de depósitos se formaron los grandes valles actuales, y aunque la carga sedimentaria de fondo del río Negro no puede ser equiparada con los antiguos Rodados Patagónicos, esto no implica que un porcentaje de esta correspondan a clastos de tal origen, y retrabajados por la acción fluvial (Bonomo y Prates, 2014). Por lo que, estos distintos depósitos de gravas, no solo los Rodados Patagónicos, hoy conforman las texturas del lecho del río, y a pesar de que en este trabajo no se estudien los cambios texturales, es significativo mencionarlos.

Otra importante regulación dada por la geología al sistema fluvial del río Negro, es el marcado control estructural que ejerce el sistema de fallas del Río Negro (Hugo y Leanza, 2001) sobre su morfología en la región del Alto Valle y Valle Medio. Extendiéndose con rumbo aproximado N 80° E en el sentido del curso actual del río hasta la localidad de Chelforó (Hugo y Leanza, 2001). La misma corresponde a una prolongación hacia el Este de la falla de Huincul (Orchuela y Ploszkiewicz, 1984), y se habría generado como una zona de fallas normales de rumbo general ONO-ESE durante el triásico superior-jurásico inferior, para posteriormente durante el jurásico superior-cretácico inferior alto comenzar a ser compresiva/transpresiva

(García, 2015). Este control geológico al emplazamiento del cauce actual del río crea condiciones, que muy probablemente, dificulten en gran magnitud un desplazamiento, en términos generales, incitado por los cambios introducidos al sistema por parte del conjunto de presas. Este control no significa una reducción y/o dominio en la dinámica fluvial, sino que representaría un control general en la alineación del río con respecto al sistema de fallas en subsuelo asociado a los efectos de subsidencia diferencial.

Uno de los controles históricos más importantes de la geología a este sistema fluvial es la orografía de los Andes. El cual se debe a su importante rol en el origen de la carga de fondo de los ríos, y, además, debido a su altitud que suscita el origen de nevadas y glaciares, define un importante factor para el patrón estacional de caudales ordinarios, dando lugar al régimen nival (Figura 17). Mientras que el clima de las cuencas define el régimen pluvial. Romero *et al.* (2014) concluyeron que la variabilidad interanual de los caudales medios y la precipitación acumulada sobre el año hidrológico muestran una buena relación, demostrando que los valores de las precipitaciones se reflejan en los caudales de las cuencas del Limay y del Neuquén, mientras que el caudal del río Negro se correlaciona mejor con las precipitaciones en las cuencas del Limay y Neuquén. Posiblemente, esto se deba a la falta de afluentes permanentes en toda la cuenca del río Negro, conformando su caudal con flujos casi totalmente alóctonos.

Las presas modifican este tipo de factores, que anteriormente se sometían a dominio exclusivo de la naturaleza geológica, climatológica, topográfica, etc. Las alteraciones que producen no solo se basan en cambios hidrológicos al nivel de los regímenes, con sus periodos de avenidas y estiaje, como muestra la Figura 17, sino que, además, anulan la mayor parte de las crecidas (Figura 27). Esta omisión reduce el tiempo de los caudales críticos. Por lo que, aquellos materiales y sedimentos que eran desplazados por crecidas y/o avenidas de más de 2000 m³/s o hasta 6000 m³/s, como muestra la Figura 27, no podrán ser desplazados, dejando depósitos antiguos de rocas gruesas a lo largo y ancho del canal fluvial, ya que quedan fuera del rango de competencia del nuevo régimen de descarga.

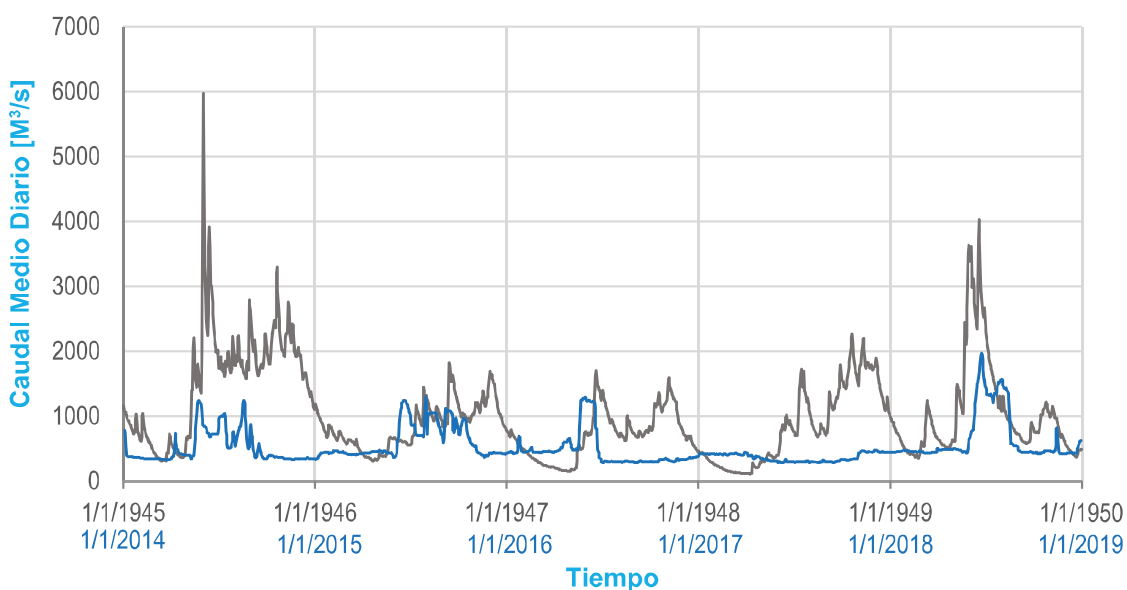


Figura 27. Hidrograma comparativo basado en caudales medios diarios entre cinco años pre represas (negro) y cinco años post represa (azul).

Esta reducción en los picos del caudal produce tanto un engrosamiento sedimentario, como también un fortalecimiento del lecho, en consecuencia, se incrementa el valor del caudal crítico (Q_{cr}). Evolucionando a depósitos que efectivamente tienen el potencial de “congelar” la posición del canal, tanto en su movimiento lateral como vertical (Grant *et al.*, 2003). Este aumento en el caudal crítico acaba disminuyendo el valor de T , el cual representa una fracción del tiempo t en que el caudal (Q) es mayor que el caudal crítico (Q_{cr}), y sus valores varían de 0 a 1, cuando el valor de T es igual a 1 representa que el caudal (Q) en todo momento supera al caudal crítico (Q_{cr}):

$$T = \frac{\sum^t (Q \geq Q_{cr})}{\sum^t Q}$$

Al disminuir el valor fraccional T , del mismo modo decrece el valor de T^* , que representa los cambios en la frecuencia de los caudales críticos posteriores a la represa y anteriores a esta:

$$T^* = \frac{T_{post}}{T_{pre}}$$

Esta reducción en el valor T^* representa una disminución en la frecuencia y la magnitud del caudal que es capaz de movilizar sedimentos. Este valor, de igual forma que el anterior, varía de 0 a 1. Cuando alcanza el valor de 1, representa que no existieron cambios en la frecuencia y magnitud de los caudales, en virtud de que el valor de T_{pos} y T_{pre} serían idénticos. Por el contrario, cuanto más cercano a cero, más disminuye el tiempo en que la caudal post represa es capaz de trasladar sedimentos.

Por otra parte, en cuanto a los efectos de las presas y el aporte sedimentario es interpretado por el valor de S^* :

$$S^* = \frac{S_B}{S_A}$$

Donde, si el mismo ocupa valores menores a 1: indica un menor suministro de sedimentos en un punto determinado bajo la presa (S_B) con respecto al suministro sobre la presa (S_A); si S^* resulta igual a 1: indica que no hay diferencias entre el aporte sedimentario entre S_A y S_B ; mientras que si S^* supera el valor de 1: se infiere que en el punto bajo la presa (S_B) existe un mayor aporte sedimentario que sobre la presa (S_A). A causa de no disponer la información necesaria para realizar el cálculo, el valor de S^* es el más difícil de inferir. Probablemente, el mismo se encuentre en valores cercanos o superiores a 1, a razón de que en el gráfico bivariado entre S^* y T^* para determinar los cambios geomorfológicos futuros, se advierte que los cambios geomorfológicos observados en el río Negro concuerdan con la región superior izquierda del mismo (Figura 28).



Figura 28. Estimación de la ubicación en el grafico bivariado entre S^* y T^* del sector estudiado del río Negro. Modificado de Grant *et al.*, 2003.

En esta región del gráfico, Grant *et al.* (2003), ubican a los cambios texturales y agradación del canal; además, mencionan la extensión de vegetación invasora, la cual en la sección anterior se demostró como esta aumentaba sobre las costas ribereñas en los últimos años, producto del control de caudales y del desarrollo socioeconómico en la región (Figura 26). Finalmente, mencionan la construcción de islas y barras, siendo que esta agradación se debe al aporte sedimentario que es mayor a la capacidad de transporte del canal (Figura 11). A lo largo del tramo estudiado del río Negro se registra una estabilización y construcción de barras e islas. Cabe destacar que este tipo de respuestas pueden ir variando en magnitud a lo largo del río, ya que las variables T^* y S^* pueden cambiar río abajo. Los cambios registrados desde el año 1967 al 2019 se evidencian en la Figura 29. En la imagen de la década de 1960, el río carecía de controles por parte de los diques y represas hidroeléctricas del río Limay y del complejo hidroeléctrico Cerros Colorados. En esta imagen se observa una ausencia de vegetación en las islas y barras, las cuales se encuentran activas. Las redes de drenaje del margen Sur del río aportan sedimentos temporalmente, pero las fuertes corrientes evitan la acumulación de estos sedimentos, que posteriormente con la disminución del caudal se generan los abanicos aluviales (*aa*). En el año 1967, además, se destaca el tamaño del *point bar* (*pb*) formado sobre el margen Norte del canal fluvial (Figura 29).

Veinte años después, en 1987, ya se encuentran construidos todos los diques y presas de la región, con excepción de la central de Piedra del Águila y Pichi Picún Leufú que fueron construidos en 1993 y 1999 respectivamente (Tabla 1), para esta fecha se evidencia una disminución de la capacidad de transporte sedimentario, comenzando a crearse una acumulación de sedimentos sobre el margen Sur, impulsados por la descarga sedimentaria procedente de los periodos precipitacionales en las redes de drenaje (*aa*). Asimismo, se observa un leve avance de la vegetación sobre las barras e islas, y del desarrollo de zonas de producción agrícola. Sin embargo, estas no limitan el desplazamiento lateral del curso fluvial.

La Figura 30 muestra como en el sector 2, aproximadamente equivalente al área de la Figura 29, configura un pico de la sinuosidad en el año 1987 y en el $|\Delta S|$.

Cabe recordar que el valor del $|\Delta S|$ supone una medición de la magnitud del movimiento del curso principal del río. Por lo tanto, el valor pico del $|\Delta S|$ del sector representa un pico en la magnitud del movimiento lateral (Figura 29).

Posteriormente, en el año 2003, en la zona ribereña, con una avanzada ocupación frutícola, prospera el asentamiento de la vegetación invasora sobre la costa del río y el interior de las barras e islas. Los abanicos aluviales (*aa*) del borde meridional se hacen más prominentes, proporcionando sedimentos para la formación de nuevas barras en el interior del canal. Durante este periodo hay un avance en la formación de nuevas barras y una estabilización en las ya existentes, en general la sinuosidad y ($|\Delta S|$) descienden, ver Figura 30.

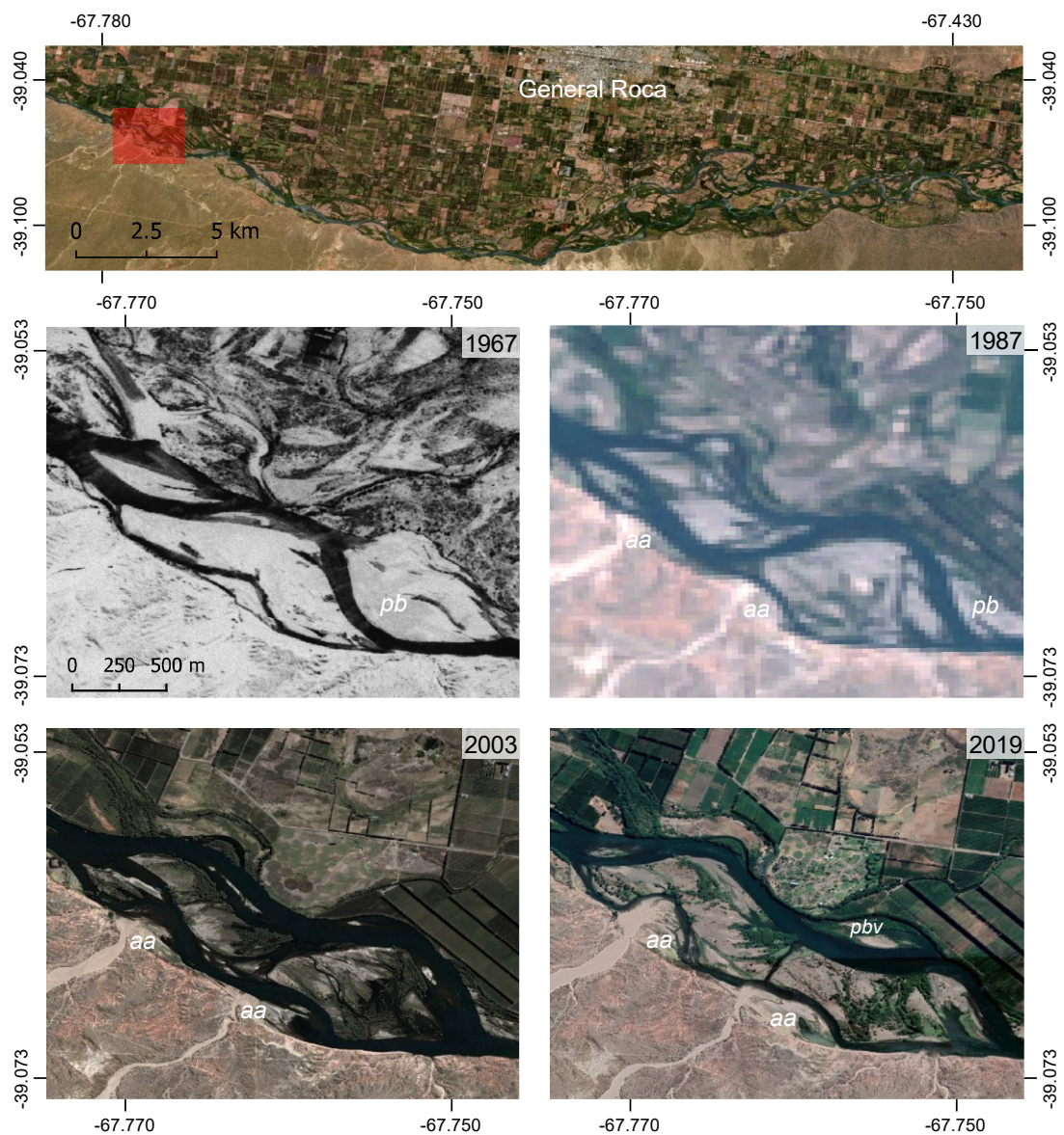


Figura 29. Modificación geomorfológica en el sector cercano al parque zoológico Bubalcó en el río Negro entre los años 1967 a 2019. *pb*: point bar, *pbv*: point bar vegetado y *aa*: abanico aluvial.

La geomorfología fluvial en el año 2019 se caracteriza por una importante estabilización y crecimiento de las barras e islas. La sinuosidad se ve disminuida junto con la magnitud de cambios del curso fluvial ($|\Delta S|$) (Figura 30). Durante este último intervalo de tiempo se desarrolla un *point bar* (*pbv*) en el margen septentrional, siendo rápida y densamente vegetado (Figura 29). Asimismo, crecen las islas y se forman barras en el centro del canal (borde occidental de la imagen). Entre tanto, el crecimiento de los abanicos aluviales (*aa*) interfiere en el emplazamiento del brazo secundario del río. Demostrando que las represas se encuentran interviniendo en los flujos pico del caudal, disminuyendo su capacidad de arrastre (Figura 29). Es por ello, que se infiere que el valor de S^* es igual o superior a 1 y que, en este sector estudiado, el río Negro se ubica orientado sobre el margen superior izquierdo del grafico bivariado entre S^* y T^* (Figura 28).

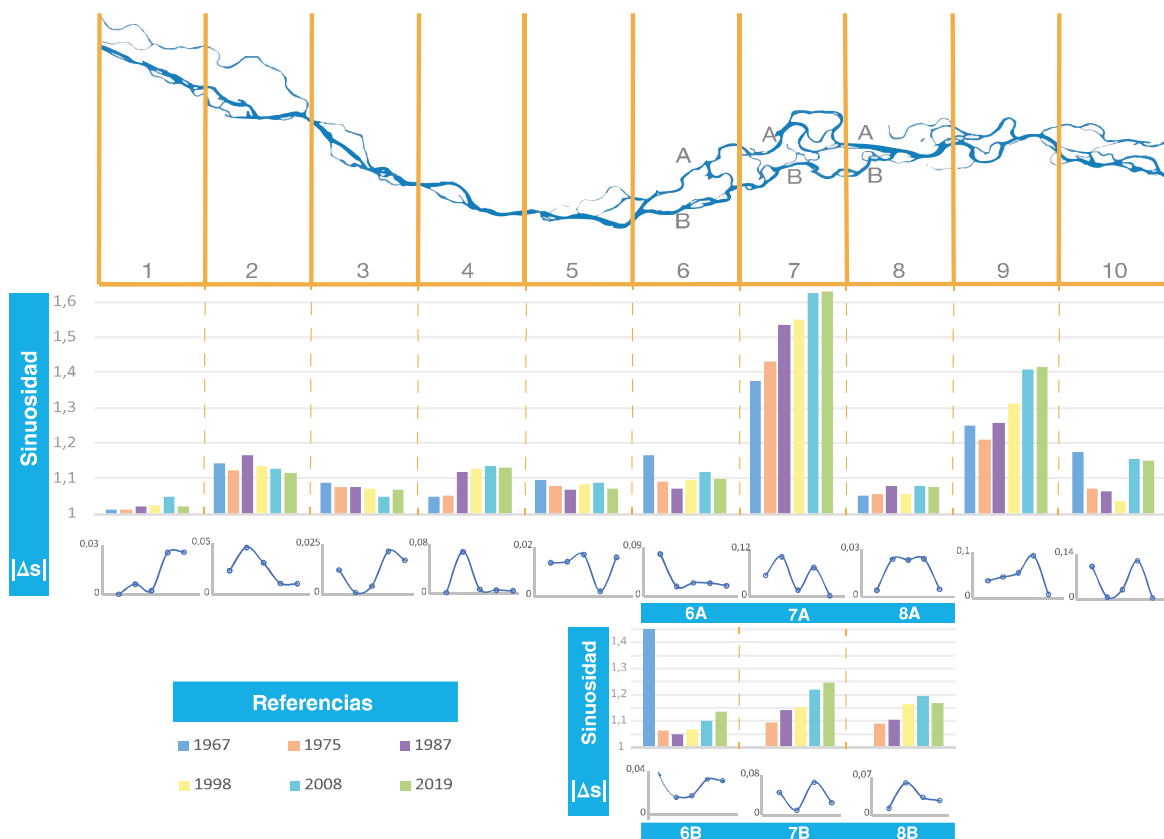


Figura 30. Cambios sectorizados en la sinuosidad a lo largo del río Negro a través del tiempo. Las Barras representan los valores de sinuosidad de cada año correspondiente. Ver Anexos A (I, II, III, IV, V y VI) para más detalles.

Finalmente, en cuanto al valor $|\Delta S|$ general del sector estudiado, se registra una aparente disminución en muchos sectores (Figura 30), mientras que en algunos sectores se incrementa. Los sectores 2, 4, 6A, 7A, 8A, 8B y 9 muestran una clara disminución del cambio de sinuosidad, volviéndose más estables. Por otro lado, los sectores 1, 3, 5 y 6B aumentaron su movimiento lateral. Los segmentos 7B y 10 si bien culminan en una disminución en su actividad, parecen seguir un ciclo de aumentos y descensos en los valores de $|\Delta S|$.

Para observar las variaciones generales de la magnitud de cambios del curso fluvial estudiado, se suman los valores $|\Delta S|$ de cada sector por cada año medido obteniendo $\sum |\Delta S|$.

Se exceptúan los sectores 7B y 8B debido a que no eran activos en 1967. Además, cabe destacar que en el sector 6B en el año 1975 se produce una avulsión obteniendo distintos valores $\sum|\Delta S|$ en dicho período si se lo incluye o excluye del cómputo (Figura 31).

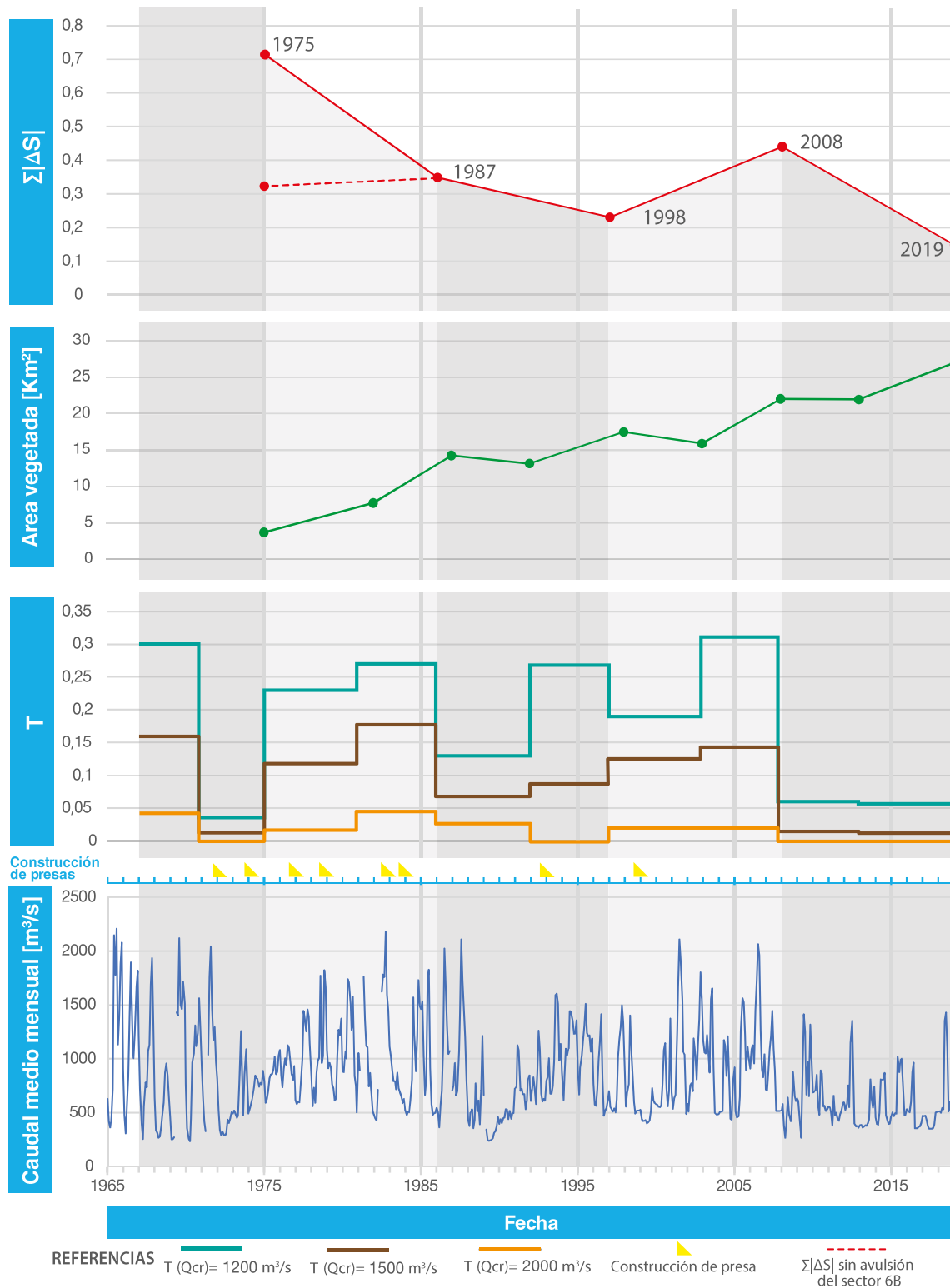


Figura 31. Comparación temporal entre el valor $\sum|\Delta S|$ y los caudales medios mensuales del río Negro. Las bandas grises verticales separan los periodos de medición de sinusoidad.

Como resultado del cómputo de $\sum|\Delta S|$ se obtiene una serie temporal de la magnitud de los cambios en la sinuosidad del canal fluvial. Esta curva es comparada con los valores T descrito por Grant *et al.* (2003), los cuales fueron determinados para caudales críticos de 1200, 1500 y 2000 m³/s. Estos valores de T disminuyen drásticamente en el período previo a 1975, correlacionándose con la puesta en marcha de las represas El Chocón (1972), Portezuelo Grande (1972) y Loma de la Lata (1974). En los periodos siguientes, T adquiere valores similares a los naturales produciendo un leve aumento de $\sum|\Delta S|$ (descartando la avulsión).

Entre los años 1986-1997 se registra una disminución de la capacidad de arrastre de los caudales, sobre todo de los valores T correspondiente a los caudales críticos de 1500 y 2000 m³/s. Desarrollando una disminución en los movimientos laterales del canal fluvial ($\sum|\Delta S|$).

Para el año 2008 aumenta el valor $\sum|\Delta S|$ debido a un aumento de la capacidad de arrastre de los caudales. Demostrando un acrecentamiento de los valores de T, especialmente para los caudales críticos de 1200 y 1500 m³/s.

En el último intervalo de tiempo estudiado (2008-2019) los controles de los caudales incrementan, reduciendo la capacidad de arrastre. Descartando la presencia de caudales críticos de 2000 m³/s para los valores de T, mientras que los de 1200 y 1500 m³/s decaen significativamente. Este control de los caudales influye en la merma del movimiento lateral del río ($\sum|\Delta S|$) que se registra en el año 2019.

Por otro lado, la vegetación opera como un control adicional a la estabilización de la dinámica lateral. Aumentando linealmente, contabilizando una superficie vegetada en el corredor ribereño menor a 5 Km² en el año 1975, mientras que en 2019 se superan los 25 km² de área vegetada.

En conclusión, las presas y diques alteraron la frecuencia y magnitud de los picos de caudal y, si bien, se interpreta que las represas captan todos los sedimentos provenientes aguas arriba, el río Negro, como el Limay y el Neuquén, al emplazarse sobre depósitos aluviales no le es un problema captar sedimentos. Culminando en una acumulación sedimentaria, con generación de barras e islas, y una disminución general en la dinámica fluvial. Debido a que los flujos actuales no son eficientes para el desplazamiento de muchos sedimentos, más aún teniendo en cuenta que cambios texturales pueden estar fortaleciendo el lecho incrementando el caudal crítico (Q_{cr}).

5.3. DEFINICIÓN DE UN TERRITORIO FLUVIAL EN EL RÍO NEGRO

Para obtener y delimitar un territorio fluvial es necesario desarrollar un registro de los antiguos cursos fluviales, un trazado de las zonas susceptibles a la erosión y un mapa de inundaciones, el cual fue realizado por la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas. Por lo tanto, a partir de las distintas imágenes satelitales Landsat junto a la imagen del satélite Corona KH-4 se logró mapear el curso del río Negro, en la zona de estudio, cada aproximadamente 10 años desde 1967 al 2019 (Figura 32). Resultando en una imagen para observar la evolución fluvial a través del tiempo, útil para mapear la envolvente de los cauces.

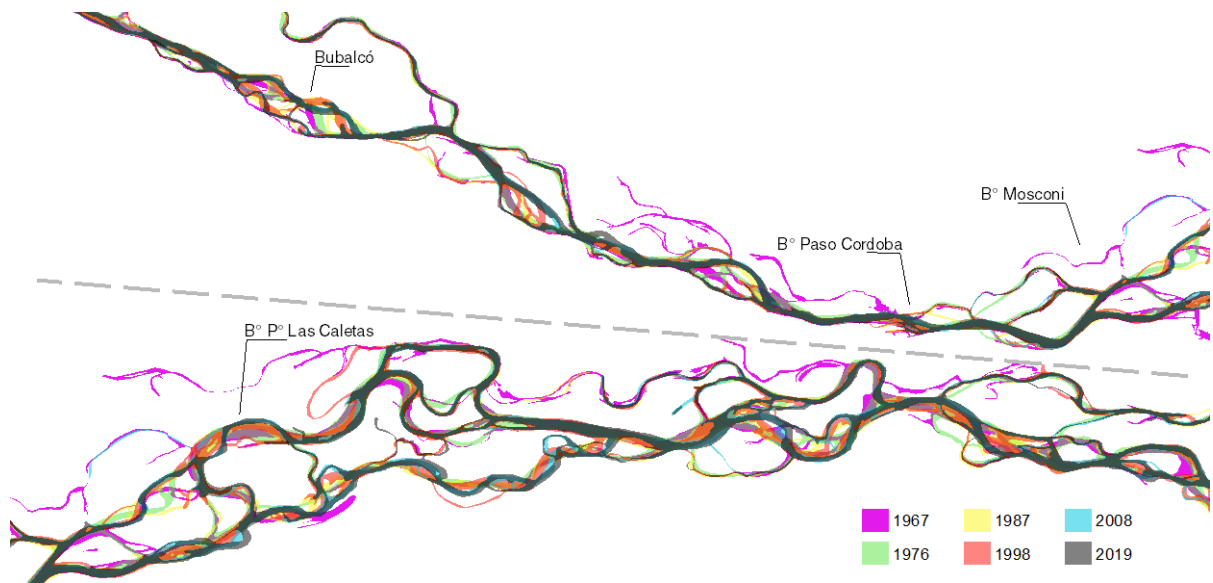


Figura 32. Cartografiado de los distintos cursos del río Negro en la zona de estudio, entre los años 1967 y 2019. Ver Anexos A (I, II, III, IV, V y VI) para más detalles.

Los sectores más susceptibles de ser erosionados en el futuro se cotejaron con el mapeo de intensidad de cambios del agua superficial desarrollado por el programa Copernicus de la ESA (Figura 33). Esencialmente, los sectores susceptibles a la erosión fluvial se distinguen gracias a las zonas donde se registran nuevos avances del agua superficial, graficado en color verde, debido a que es probable que la tendencia en los desplazamientos de los meandros se mantenga en el futuro cercano.

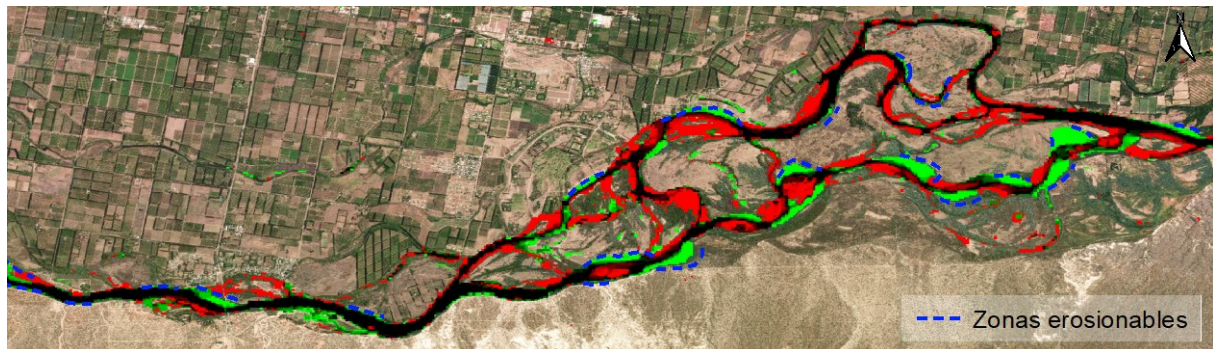


Figura 33. Señalización de las zonas más susceptibles a seguir siendo erosionadas en un futuro por la dinámica fluvial (línea azul discontinua). En rojo las zonas de pérdida de agua superficial y en verde las zonas nuevas de agua superficial.

Como resultado de la integración de los datos y observaciones mencionadas se realizó una propuesta de delimitación del territorio fluvial para el sector de estudio del río Negro (entre $-67,80^\circ$; $-67,38^\circ$) (Figura 34) (Anexo B). El cual si cuenta con el ancho y continuidad necesaria para dar espacios al desarrollo de inundaciones reduce la peligrosidad de las futuras crecidas, al menos en la mayor parte de este. Debido a que en sectores costeros de la Ciudad de General Roca se ubican distintos barrios dentro del llano de inundación, los mismos fueron

excluidos del territorio fluvial debido a que se trata de grandes asentamientos urbanos. Sin embargo, el río al estar encajonado por la barda sur no cuenta con espacio inundable en frente o río arriba de esos asentamientos (B° Paso Córdoba, B° Mosconi, B° P° Las Caletas, B° La costa, etc.). Por esta razón, no es posible generar espacios de seguridad donde se expanda las superficies inundables para reducir los riesgos. Por lo cual, no es posible reducir los riesgos para estos barrios, y crear contenciones para los mismos solo forjaría un ensanchamiento de la zona de inundación río abajo.

Cabe destacar que para aplicar de manera correcta un territorio fluvial conservando la dinámica hidrogeomorfológica, que se pueda desplazar lateralmente erosionando, sedimentando y desbordándose, es necesario quitar toda estructura de defensa que impida su movimiento, incluida aquella vegetación que fue colocada para tales fines. Aplicar estas medidas estabilizarían la dinámica vertical, deteniendo los procesos de incisión del río, manteniendo un nivel freático elevado, fundamental para la biocenosis (Ollero *et al*, 2009).

Por último, en las Figuras 35 y 36 se visualiza de forma ampliada el cartografiado del territorio fluvial en los sectores urbanos cercanos al río. En ellas se representan los puentes que permiten conectar los sectores rodeados de cuerpos de agua con el exterior y así comprender de mejor manera los resultados planteados.

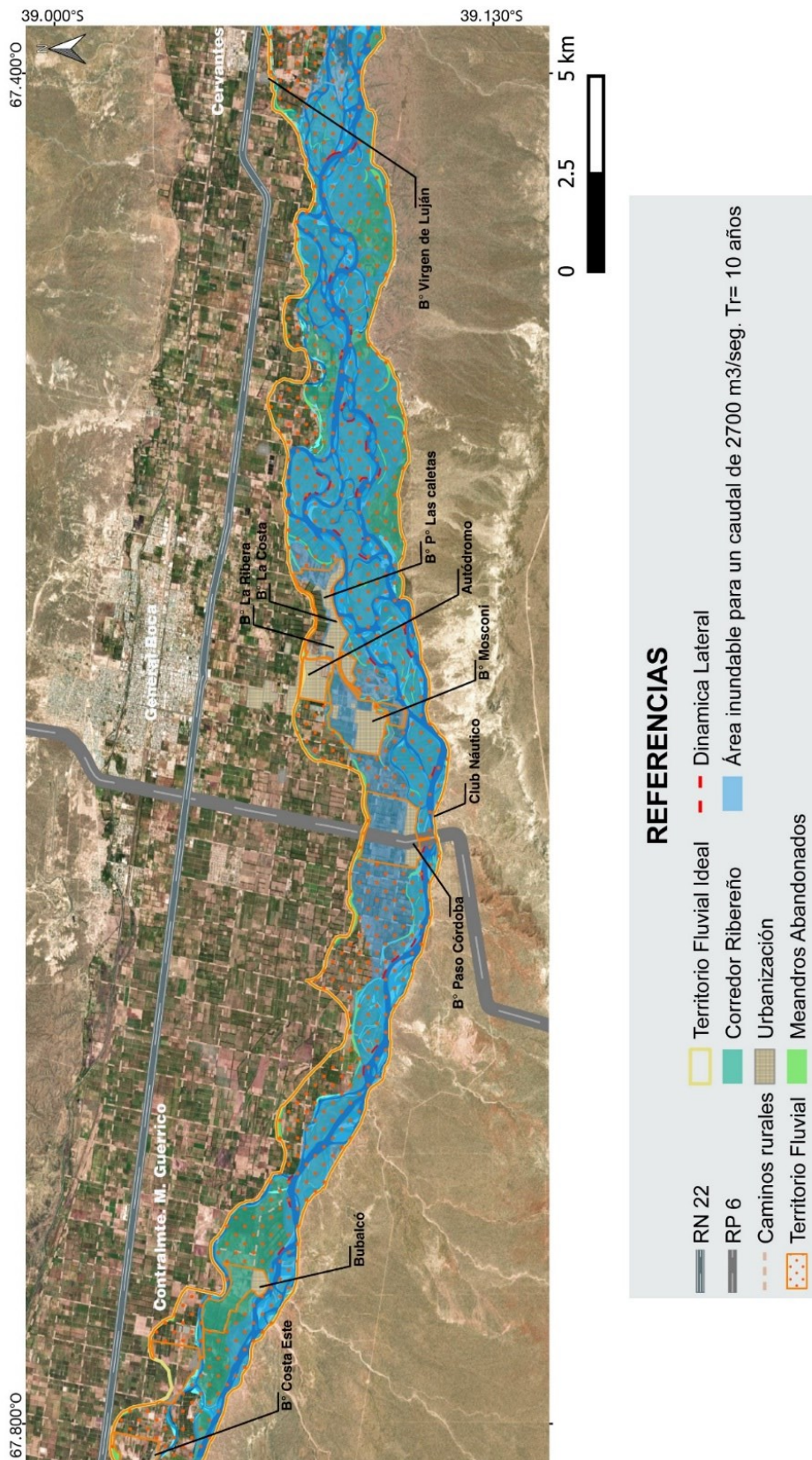


Figura 34. Definición del territorio fluvial del río Negro, en inmediaciones a la Ciudad de General Roca.

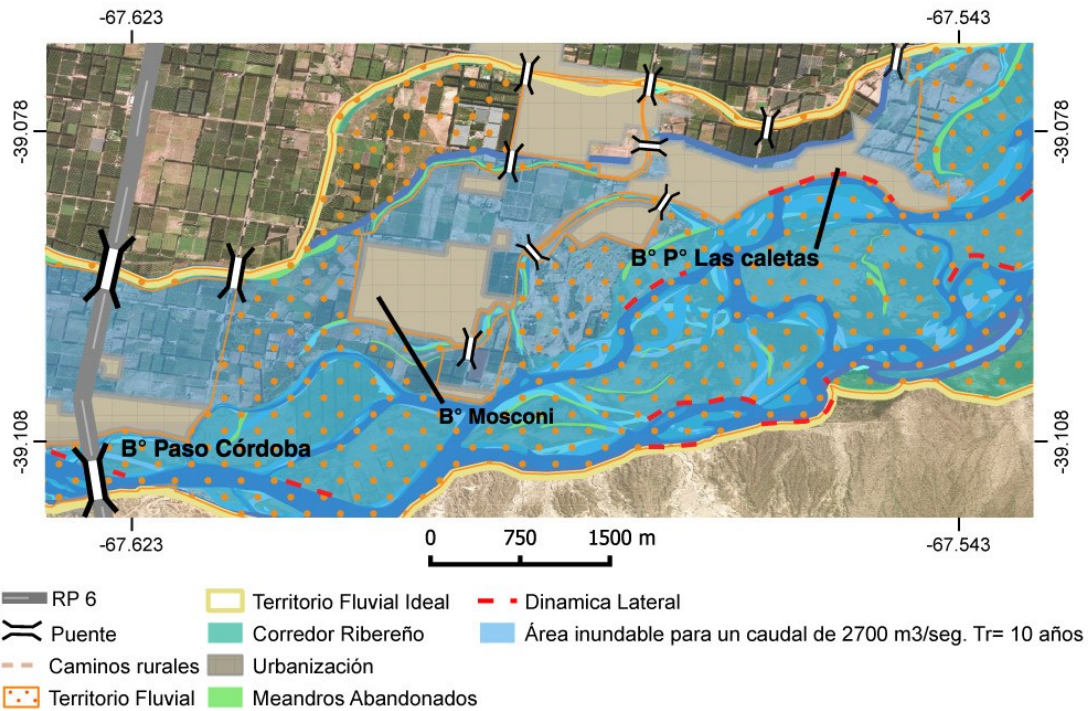


Figura 35. Vista de la determinación del territorio fluvial en zonas ribereñas urbanizadas de la ciudad de General Roca.

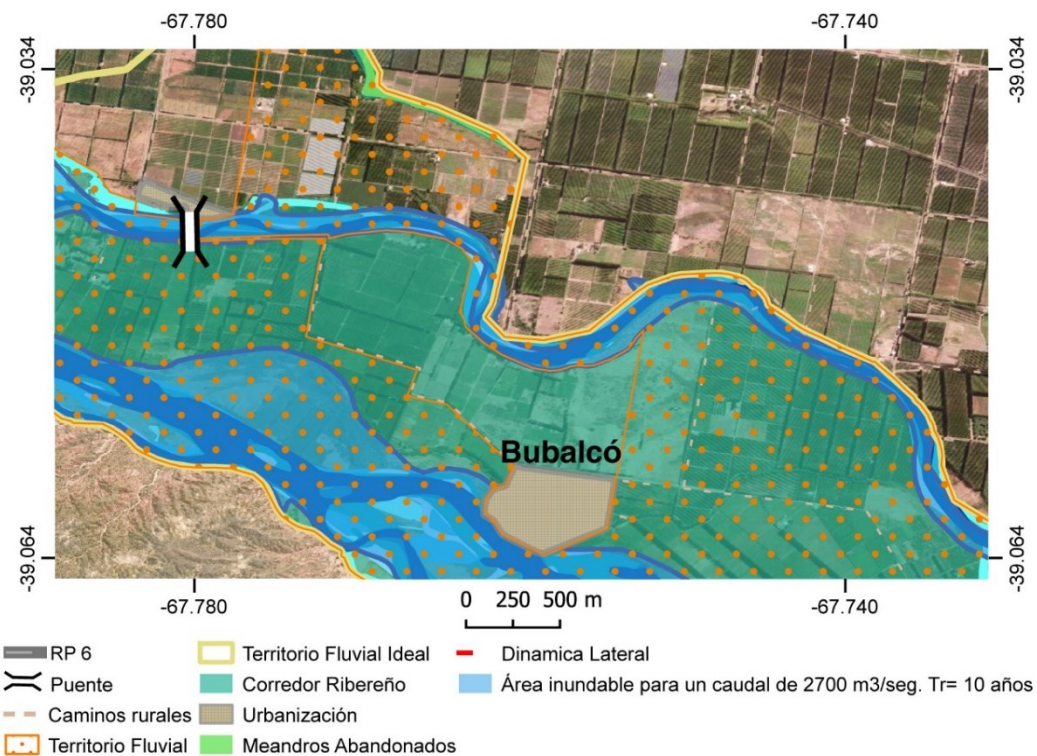


Figura 36. Vista de la determinación del territorio fluvial en zona ribereña cercana a la ciudad de Allen.

6.0 DISCUSIÓN

El control de los caudales por parte de las presas del río Neuquén y Limay infiere cambios significativos en la dinámica del río Negro. Estos reducen tanto las dimensiones del régimen hidrológico como del hidrogeomorfológico, disminuyendo la dinámica ecológica y geomorfológica del río. A su vez, estas alteraciones influyen en un aumento en la concentración de contaminantes en el agua, como la bacteria *Escherichia coli*. Para contribuir a una dinámica ecológica y geomorfológica saludable se recomienda la instrumentación de Caudales Ecológicos y de un territorio fluvial. Este último restringe el avance urbano sobre las costas ribereñas, para no confinar el movimiento fluvial y evitar malos usos del suelo con potencial contaminante, además, de reducir los riegos ante crecidas o los movimientos laterales del río. Ollero *et al.* (2009) resuelven que es imprescindible educar a la población sobre los riesgos fluviales, que conozcan su funcionamiento y como convivir con ello. Para eliminar las connotaciones negativas de las crecidas e inundaciones para la sociedad, es preciso que esta se encuentre preparada en un territorio bien ordenado. Aplicar una zonificación de usos de suelo permite mantener las actividades humanas y recuperar el aprovechamiento recreativo de los ríos y riberas. Además, mantiene y mejora el paisajismo, y por, sobre todo, con un territorio fluvial se logra que los ríos funcionen realmente como ríos, y no como canales de riego. Cabe destacar que la zonificación del territorio fluvial propuesta en el presente trabajo final de licenciatura tiene sus limitaciones, debido a que, para su implementación, el mismo debe ser de mayor resolución espacial y contar con un análisis más exhaustivo, escapando de los objetivos y tiempos de un trabajo de finalización de una carrera de Grado.

Por otro lado, con los Caudales Ecológicos se propone encontrar el equilibrio entre el uso y la protección de los recursos hídricos naturales para la población. Para calcular el estado de las corrientes del río Negro se utilizó el método Montana, desarrollado por Tennant en 1976. Este método al basarse solo en datos hidrológicos permite obtener de manera rápida una estimación preliminar de la calidad de los caudales, pero cuenta con limitaciones, debido que para calcular un caudal ecológico adecuadamente se deben contemplar otros factores, como por ejemplo variables biológicas. En el río Negro se obtuvo que las condiciones de los caudales medios son de rango óptimos, sobresalientes y excelentes, con una tendencia de degradación continua en el tiempo. Sin embargo, también se debe considerar el desempeño de los regímenes hidrológicos.

Los registros de caudales, desde el año 1922 hasta el presente, en la estación de aforo 1808 de Paso Córdova de la Red Hidrológica Nacional [1], indican que previo al establecimiento de las presas (1972), con sólo el dique Ballester instalado en 1916, los flujos hídricos poseían un carácter más dinámico y de mayor magnitud que en la actualidad. Estas características hidrológicas fueron atenuadas a medida que más presas fueron instaladas, las crecidas comenzaron a ser menos periódicas, y de menores caudales y duración, además, en los últimos años se atenuaron los regímenes nivales a casi su totalidad. No sólo se atenuaron los regímenes de crecidas y avenidas, sino también los periodos de sequía se vieron afectados, ya que en la actualidad revisten caudales mayores a los naturales. Tales características del régimen hidrológico son importantes para mantener la dinámica ecológica y geomorfológica del río. Estos cambios en el régimen hidrológico afectan los bienes y servicios naturales que recibimos de los ríos que normalmente damos por garantizados, como el suministro confiable

de agua, pescado y otros alimentos, la purificación del agua, el transporte de nutrientes aguas abajo, las llanuras de inundación fértiles, así como valores culturales y recreativos (O'keeffe y Le Quesne, 2010). Resh *et al.* (1998) concluyen que el régimen de perturbaciones de los ríos no solo es la característica más importante por estudiar de los caudales; es el factor de organización dominante en la ecología de los caudales. Estas establecen una serie de condiciones que mantienen la biodiversidad de los ríos y evitan el predominio de especies particulares y/o invasoras (O'keeffe y Le Quesne, 2010).

El control de los caudales también afecta la contaminación en el río, al comparar los datos de concentración de la bacteria *Escherichia Coli*, proporcionados por la AIC (Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas), con los caudales medios mensuales indican que la estabilización de los flujos hidrológicos y la disminución de las crecidas impactan sobre la concentración bacteriológica, de esta manera, cuanto más se estabilizan los caudales más aumentan las concentraciones.

De todas maneras, O'Keeffe y Le Quesne (2010) afirman que los problemas de contaminación causados por una gestión deficiente de las tierras deben ser abordadas desde su raíz, mejorando la gestión de la tierra, y no mediante la asignación de caudales; de manera similar, los problemas causados por las especies introducidas no pueden resolverse cambiando los caudales, aunque un régimen de caudales saludable generalmente va a favorecer a las especies autóctonas sobre las invasoras. Por lo que, la utilización de Caudales Ecológicos debe ser para recuperar la dinámica ecológica del río, no para disminuir los efectos negativos que se le infieren. Siendo evidente que es preferible mejorar las prácticas administrativas para reducir los contaminantes desde su origen que la utilización de caudales de dilución.

Para entender las modificaciones geomorfológicas que las presas generaron en el río Negro, se utilizó un modelo de predicciones de respuestas geomorfológicas elaborado por Grant *et al.* (2003). El mismo fue utilizado para comprender las causas de los cambios geomorfológicos registrados en sistemas fluviales. Este modelo concluye que las presas modifican factores fundamentales que determinan la geomorfología general de los ríos: el agua y el sedimento. Mermando la capacidad de transporte sedimentario y de arrastre de las corrientes, resultando en un superávit de sedimentos con respecto a la capacidad de transportarlos. Como consecuencia se genera una agradación en el canal fluvial, por ende, un mayor desarrollo de barras e islas. Por otro lado, la disminución en la capacidad de arrastre de los caudales permite que la vegetación invada terrenos más cercanos al cauce. Esta vegetación invasora comienza a fijar los márgenes del canal fluvial y de las barras e islas, contribuyendo a la estabilización de los movimientos laterales del río. A partir de colecciones de imágenes Landsat en la plataforma online de Google Earth Engine se observa que desde el año 1976 al 2019 hay un aumento de la vegetación en el corredor ribereño de la zona estudiada de aproximadamente el %558.

Según el modelo predictivo de Grant *et al.* (2003) en el río Negro también se deberían registrar cambios texturales como depósitos poco seleccionados en el fondo del canal. Por lo tanto, sería indispensable realizar relevamientos de las texturas del fondo del río en futuras investigaciones para ser comparadas y registrar la evolución de los regímenes de transporte sedimentario en el tiempo.

La reducción de la capacidad del transporte sedimentario, del poder erosivo de los caudales y la habilidad de fijación del suelo de la vegetación invasora, motiva la estabilización del curso fluvial, reduciendo el movimiento lateral del mismo. Para cuantificar estos cambios en la dinámica fluvial se calculó la diferencia en los valores de sinuosidad del río. Por lo tanto, cuanto más se desplacen los brazos del río, mayor será la diferencia entre los valores de sinuosidad. Un río totalmente estabilizado entrega valores cercanos a cero, mientras que cuanto más dinámico sea el curso fluvial, mayor será este valor. Al realizar tales estudios en el río Negro se encuentra que la estimación de la diferencia en la sinuosidad desarrolla una tendencia en baja, acercándose a valores cercanos a cero en la actualidad.

Por otro lado, los sensores remotos resultan clave para la supervisión de inundaciones, siendo útiles para la construcción de mapas de peligrosidad y riesgo. Las crecidas al desarrollarse, por lo general, asociadas a precipitaciones, hace que los sensores pasivos no sean adecuados para su registro debido a la presencia de nubosidad. Por esta razón, para el relevamiento de inundaciones es vital poder utilizar imágenes de radar de apertura sintética (SAR). Por lo tanto, se puso en práctica la utilización de las imágenes SAR para la detección de inundaciones aprovechando una crecida causada por un aumento en la erogación de los complejos hidroeléctricos. A su vez, se pudieron contrastar los resultados con los obtenidos por medio de imágenes multiespectrales (Landsat 8) gracias a la ausencia de nubosidad durante ese periodo.

Como resultado, a partir de imágenes Sentinel-1 se obtuvo una detección satisfactoria de los límites desarrollados por la crecida, los cuales fueron constatados por imágenes Landsat 8, exponiendo la potencialidad de las técnicas de procesamiento de imágenes SAR para monitorear estos procesos.

Por último, entendiendo la tendencia en aumento en la degradación ecológica y geomorfológica del río Negro, es vital comenzar a discutir e implementar soluciones ambientales enfocadas en la restauración fluvial, que naturalicen el funcionamiento del sistema ribereño. Siendo destacable la coincidencia entre las reflexiones de los autores como Ollero et al. (2010) y O'keeffe y Le Quesne (2010), en la importancia de la educación ambiental, ya que para que los Caudales Ecológicos y el territorio fluvial funcionen van a depender de la voluntad social, económica y política. Por lo que, cuanto mayor sea la comprensión científica y la educación ambiental, mayor será la probabilidad de que la comunidad opte por aplicar estas medidas.

7.0 CONCLUSIONES

Las alteraciones producidas por las presas en los caudales del río Negro han deteriorado su dinámica ecológica y su dinámica geomorfológica. Si bien el volumen actual de los caudales se puede catalogar como saludables, estos se encuentran en un detrimento constante y al no preservar un régimen hidrológico natural, abandonan los beneficios ecológicos que aportan las características de los caudales naturales. Además, se halló que el control y estabilización de los caudales estimula la acumulación de contaminantes en el agua del río. Sin embargo, no es recomendable la utilización de caudales de dilución para la reducción de las concentraciones de los contaminantes, siendo mucho mejor reducir los desechos que se arrojan al sistema fluvial.

A partir de la cuantificación de los cambios en la sinuosidad del río se pudo determinar que este se halla en un proceso de estabilización. Se infiere que esta tendencia es debido principalmente a la reducción en la capacidad de transporte sedimentario y de arrastre de los caudales. Este aminoramiento en la magnitud y frecuencia de caudales críticos posibilita el avance de la vegetación hacia las costas ribereñas que, a su vez, estabiliza los suelos favoreciendo la disminución en la dinámica fluvial.

Finalmente, para la recuperación de las capacidades ecológicas y geomorfológicas del sistema fluvial del río Negro se recomienda la instrumentación de Caudales Ecológicos y de un territorio fluvial. La conservación y mejoramiento del río junto con el desarrollo sustentable de su territorio propiciará beneficios a la sociedad y la biodiversidad que habitan en él.

8.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, G. y Pouilly, M. (2012). caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. *Acta zoológica Lilloana* 56, 15- 30.

AIC-SGA, (2013). Determinación de la aptitud del agua para uso recreativo con contacto directo: Informe Temporada 2012 – 2013. *Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro, Secretaría de Gestión Ambiental*. Recuperado de: http://www.aic.gov.ar/sitio/archivos/201803/informe%20balnearios%202012_2013.pdf

AIC-SGA, (2014). Determinación de la aptitud del agua para uso recreativo con contacto directo. Informe Temporada 2013 – 2014. *Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro, Secretaría de Gestión Ambiental*. Recuperado de: http://www.aic.gov.ar/sitio/archivos/201803/informe%20balnearios%202013_2014.pdf

AIC-SGA, (2015). Determinación de la aptitud del agua para uso recreativo con contacto directo. Informe Temporada 2014 – 2015. *Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro, Secretaría de Gestión Ambiental*. Recuperado de: <http://aic.gov.ar/sitio/archivos/201803/informe%20balnearios%202014%202015.pdf>

AIC-SGA, (2016). Determinación de la aptitud del agua para uso recreativo con contacto directo. Informe Temporada 2015 – 2016. *Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro, Secretaría de Gestión Ambiental*. Recuperado de: <http://www.aic.gov.ar/sitio/archivos/201803/informe%20balnearios%202015%202016.pdf>

AIC-SGA, (2017). Determinación de la aptitud del agua para uso recreativo con contacto directo. Informe Temporada 2016 – 2017. *Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro, Secretaría de Gestión Ambiental*. Recuperado de: <http://www.aic.gov.ar/sitio/archivos/201803/informe%20balnearios%202016-2017.pdf>

AIC-SGA, (2018). Determinación de la aptitud del agua para uso recreativo con contacto directo. Informe Temporada 2017 – 2018. *Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro, Secretaría de Gestión Ambiental*. Recuperado de: http://aic.gov.ar/Sitio/archivos/201806/informe%20balnearios_2017-2018.pdf

AIC-SGA, (2019). Determinación de la aptitud del agua para uso recreativo con contacto directo. Informe Temporada 2018 – 2019. *Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro, Secretaría de Gestión Ambiental*. Recuperado de: http://www.aic.gob.ar/sitio/archivos/201907/informe%20balnearios%202018_2019.pdf

AIC-SGA, (2020). Determinación de la aptitud del agua para uso recreativo con contacto directo. Informe Temporada 2019 – 2020. *Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro, Secretaría de Gestión Ambiental*. Recuperado de: http://www.aic.gob.ar/sitio/archivos/202010/informe%20balnearios%202019_2020.pdf

Ambrosio, M. B. y Suarez, M. I. (2016). La Patagonia Norte y la organización territorial del valle del río Negro. *El Ojo del Cóndor, Instituto Geográfico Nacional*, 7, 4-9.

Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8. LDCM. *Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica del IGAC -CIAF*, 46.

Balmonte, I. y Caamaño, S. (2009). Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de inundaciones en Argentina (Tesis de pregrado). *Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba*.

Borús, A. (2018). El dique Ballester. En: A. Piluso (Ed.). *Diques Argentinos en realidad aumentada* (pp. 120-121). ORSEP.

Bonomo, M. y Prates, L. (2014). La explotación de depósitos secundarios de rodados en el curso medio del río Negro y el litoral marítimo Pampeano. *Artefactos líticos, movilidad y funcionalidad de sitios en Sudamérica. Problemas y perspectivas*, 77-92.

Bunn, S. y Arthington, A. (2002). Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Deflation Basin Lakes. *Environmental management*, 30 (4).

Brune, G. M. (1953). Trap Efficiency of Reservoirs. *Transactions American Geophysical Union*, 34(3), 407-418.

Church, M. (1995). Geomorphic response to river flow regulation: case studies and timescales. *Regulated Rivers*, 11(1), 3-22.

Church, M. y Kellerhals, R. (1978). On the statistics of grain size variation along a gravel river. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15(7), 1151-1160.

Collier, M., Webb, R. H. y Schmidt, J. C. (1996). Dams and Rivers: A Primer on the Downstream Effects of Dams. *U.S. Geological Survey Circular, Vol. 1126*.

Cortelezzi, C., De Francesco, F. y De Salvo, O. (1968). Estudio de las Gravas Tehuelches en la Región Comprendida entre el Río Negro y el Río Colorado. *Desde la Costa Atlántica hasta la Cordillera. Terceras Jornadas Geológicas Argentinas III*, 123-145.

- Dietrich, W. E., Kirchner, J. W., Ikeda, H. y Iseya, F. (1989). Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature*, 340(6230), 215-217.
- Evans, T. (2013). Habitat mapping of the Brazilian Pantanal using synthetic aperture radar imagery and object based image analysis. *Functional Plant*, 10(3), 313-327.
- Fernández-Ordoñez, Y., Soria-Ruiz, J. Leblon, B., Macedo, A., Elva, M., Ramírez Guzmán, M. E. y Escalona-Maurice, M. (2020). Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel-1A y Radarsat-2. *Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de estadística y geografía*.
- Fidalgo, F. y Riggi, J. (1970). Consideraciones Geomórficas y Sedimentológicas sobre los Rodados Patagónicos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 25(4), 430-443.
- Galay, V. J., Pentland, R. S. y Halliday, R. A. (1985). Degradation of the South Saskatchewan River below Gardiner Dam. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12(4), 849-862.
- García, V. H. (2015). Caracterización cinemática de la falla río Negro en el bloque sísmico General Roca, cuenca Neuquina, provincia de Río Negro. *Acta resúmenes 16º Reunión de Tectónica*, 170.
- García, E. y Martínez, P. F. (1997). Métodos de cálculo del caudal de reserva ecológico para corrientes superficiales: el caso de los Ríos Tonto y Santo Domingo, en el estado de Oaxaca, México. *Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, Zacatecas*.
- Gonzales Díaz, E. F. y Malagnino, E. C. (1984). Geomorfología de la provincia de Río Negro. *9º Congreso Geológico Argentino*. San Carlos de Bariloche, Argentina. Relatorio I(13), 347-364.
- González Mora, I. D., Salinas Rodríguez, S. A., Guerra Gilbert, A., Sánchez Navarro, R., y Ríos Patrón, E. (2014). Ríos libres y vivos, introducción al caudal ecológico y reservas de agua. *CECADESU/SEMARNAT, Cuaderno de divulgación ambiental*.
- Grant, G. E. y Swanson, F. J. (1995). Morphology and processes of valley floors in mountain streams, western Cascades, Oregon. En Costa, J. E., Miller, A. J., Potter, K. W. y Wilcock P. R. (Eds.). *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology: the Wolman Volume* (pp. 83-101). *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 89, 83-83.
- Grant, G. E., Schmidt, J. C. y Lewis, S. L. (2003). A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. En O'Connor, J. E. y Grant, G. E (Eds.). *A Peculiar River: Geology, Geomorphology, and Hydrology of the Deschutes River* (pp. 203– 219). *Water Science and Application*, 7, 209-225.
- Hugo, C.A. y Leanza, H.A. (2001). Hoja Geológica 3969-IV, General Roca, provincias del Neuquén y Río Negro. *Instituto de Geología y Recursos Naturales, SEGEMAR*.

- Jong, M. G. y Mare, M. D. (2007). Regulación de caudales, ecosistemas y asentamientos humanos en el Alto Valle del río Negro. *Boletín geográfico, Universidad Nacional del Comahue*, 29, 40-58.
- Kieffer, S. W. (1995). The 1983 hydraulic jump in Crystal Rapid –Implications for river-running and geomorphic evolution in the Grand Canyon. *Journal Geology*, 93(4), 385-406.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G. y Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman and Company, 1, 522.
- Magdaleno, F. (2005). Caudales ecológicos: conceptos, métodos e interpretaciones. *Monografías CEDEX, M-82*, 194.
- Martín Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de los ríos*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Mcfeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17:7, 1425-1432.
- Meade, R. H., Yuzyk, T. R. y Day, T. J. (1990). Movement and storage of sediment in rivers of the United States and Canada. En Wolman, M.G., y Riggs, H.C. (Eds.). *Surface Water Hydrology* (pp. 255-280). The Geological Society of America.
- Montero Alcázar, J. (2007). El método del caudal básico para la determinación de caudales de mantenimiento. Aplicación a la cuenca del Ebro. *Universidad de Lleida. Escuela técnica superior de ingeniería agraria. Departamento de medio ambiente y ciencias del suelo*.
- Mueller, J. E. (1968). An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the Association of American Geographers*, 58(2), 371-385.
- O’Keeffe, J. y Le Quesne, T. (2010). Cómo conservar los ríos vivos, Guía sobre Caudales Ecológicos. Serie Seguridad Hídrica de WWF – 2. *World Wildlife Fund*.
- Ollero, A. (2007). Territorio fluvial. Diagnóstico y propuesta para la gestión ambiental y de riesgos en el Ebro y los cursos bajos de sus afluentes. *Bakeaz y Fundación Nueva Cultura del Agua*, 255.
- Ollero, A., Ibisate, A. y Elso, J. (2009). El territorio fluvial y sus dificultades de aplicación. *Geographicalia*, 56: 37-62.
- Ollero, A. (2010). Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, 117: 247-260.
- Ollero, A. (2014). Guía metodológica sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para gestores. *Contrato de río del Matarraña, Fundación Ecología y Desarrollo*, 143.
- Orchuela, I. y Ploszkiewicz, V. (1984). La Cuenca Neuquina. *Relatorio 9º Congreso Geológico Argentino*, Actas 163-188.

ORSEP, 2010. Más de 10 años fiscalizando la seguridad estructural y operativa de las presas. *1ra Ed. ORSEP.*

Pekel, J., Cottam, A., Gorelick, N. y Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418-422.

Petts, G. E. (1979). Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography*, 3(3), 329-362.

Petts, G. E. (1980). Long-term consequences of upstream impoundment. *Environmental Conservation*, 7(4), 325-332.

Petts, G. E. (1984). Impounded River: Perspectives for Ecological Management. *John Wiley & Sons*, 10(1):143-145.

Podest, E. (2017). Conceptos básicos del radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR). *Applied remote sensing training program, NASA.*

Redacción ADN. (2017). Agroquímicos causaron mortandad de peces en Allen. *ADN*. Recuperado de: <https://www.adnrionegro.com.ar/2017/11/agroquimcos-causaron-mortandad-de-peces-en-allen/>

Redacción Río Negro. (2016). El bajo caudal del río Negro impulsó una alerta hídrica y sanitaria. *Diario Río Negro*. Recuperado de: <https://www.rionegro.com.ar/el-bajo-caudal-del-rio-negro-impulso-una-alerta-hidrica-y-sanitaria-XC1206624/>

Redacción Río Negro. (2017). Analizan las causas de la mortandad de peces en Allen. *Diario Río Negro*. Recuperado de: <https://www.rionegro.com.ar/analizan-las-causas-de-la-mortandad-de-peces-en-allen-MH3229916/>

Redacción Río Negro. (2020). Aumento de los caudales de los ríos: Neuquén y Cipolletti en alerta. *Diario Río Negro*. Recuperado de: <https://www.rionegro.com.ar/en-confluencia-el-agua-entra-a-los-patios-y-en-cipolletti-estan-preocupados-por-el-negro-1445347/>

Resh, V. H., Brown, A. V., Covich, A. P., Gurtz, M. E., Li, H. W., Minshall, G. W., Reice, S. R., Sheldon, A. L., Wallace, J. B. y Wissmar, R. C. (1988). The role of disturbance in stream ecology. *Journal of the North American benthological society*, 7(4), 433-455.

Romero, P. E., Garbarini, E. M. y González, M. H. (2014). Características hídricas y climáticas del norte Patagónico. *IFRH 2º Encuentro de investigadores en formación de recursos hídricos.*

Schmidt, J. C. y Graf, J. B. (1990). Aggradation and degradation of alluvial-sand deposits, 1965 to 1986, Colorado River, Grand Canyon National Park, Arizona. *U. S. Geological Survey professional paper 1493.*

Schmidt, J. C., y Rubin, D. M. (1995). Regulated streamflow, finegrained deposits, and effective discharge in canyons with abundant debris fans. En Costa, J. E., Miller, A. J., Potter,

K. W. y Wilcock, P. R. (Eds.). *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology* (pp.177-195). *American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series*, vol. 89.

Swanson, F. J., Graham, R. L. y Grant, G. E. (1985). *Some effects of slope movements on river channels*. Tsukuba, Japan: International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, 273-278.

Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimenes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *US Fish and Wild Life Service*, 1(4): 6-10.

Teruggi, M., Etchichury, M. y Remiro, J. (1964). *Las Arenas de las Costas de la Provincia de Buenos Aires entre Bahía Blanca y el Río Negro*. *LEMIT*, serie II, 8, 1-46.

Trebino, L. G. (1987). Geomorfología y Evolución de las Costas en los Alrededores del Pueblo de San Blas, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina XLII* (1-2).

Williams, G. P. y Wolman, M. G. (1984). Downstream effects of dams on alluvial rivers. *Geological Survey professional paper 1286*.

Xu, J. (1996). Underlying gravel layers in a large sand bed river and their influence on downstream-dam channel adjustment. *Geomorphology*, 17(4), 351-359.

Zattara, E. E., Denegri, M. A., y Vigliano, P. (2005). Plan Modular para el Relevamiento y Evaluación de los Recursos Ícticos del Río Negro con Miras a su Manejo. *MÓDULO 1: Caracterización General y Limnológica del Río Negro Entre Su Nacimiento (Confluencia de los Ríos Limay y Neuquén) y Su Desembocadura en el Océano Atlántico*. Grupo de Evaluación y Manejo de Recursos Icticos, Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue.

8.1. Bases de datos Online

[1] Base de Datos Hidrológica Integrada de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica. *Estación de aforo 1808 Paso Córdoba*. [Base de datos]. Recuperado de: <http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/>

[2] AIC. *Estación de aforo Allen*. [Base de datos]. Recuperado de: <http://www.aic.gov.ar/sitio/estaciones-detalle?a=22&z=1343599674>

[3] Servicio Geológico de Estados Unidos, USGS. *Explorador de imágenes satelitales*. [Base de datos]. Recuperado de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>



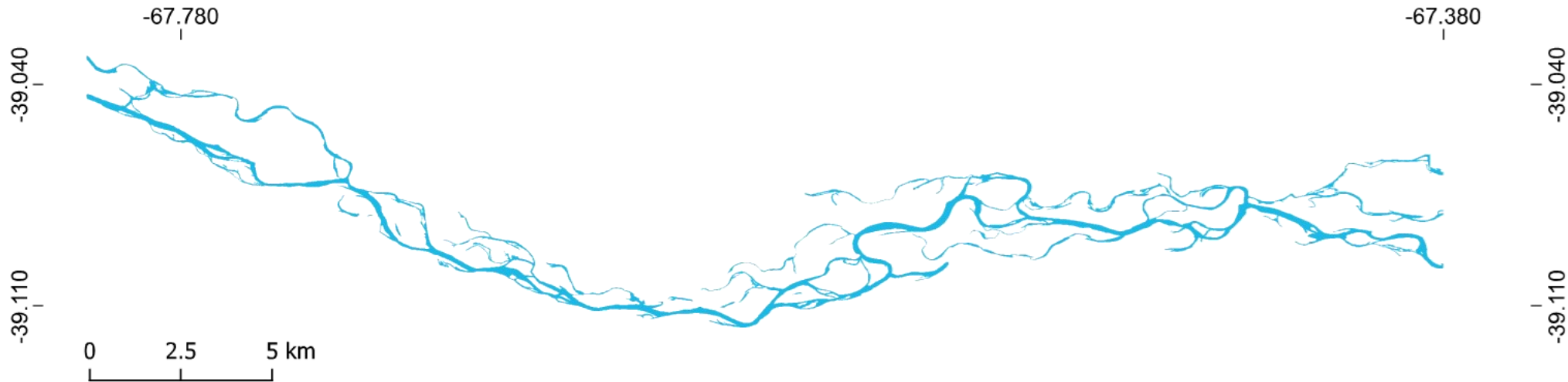
Licenciatura en Geología
Martínez Enzo

Trabajo Final de Licenciatura
Análisis del territorio fluvial, el caudal ecológico y el riesgo asociado
a la dinámica del río Negro en General Roca y alrededores.

Anexo A - I

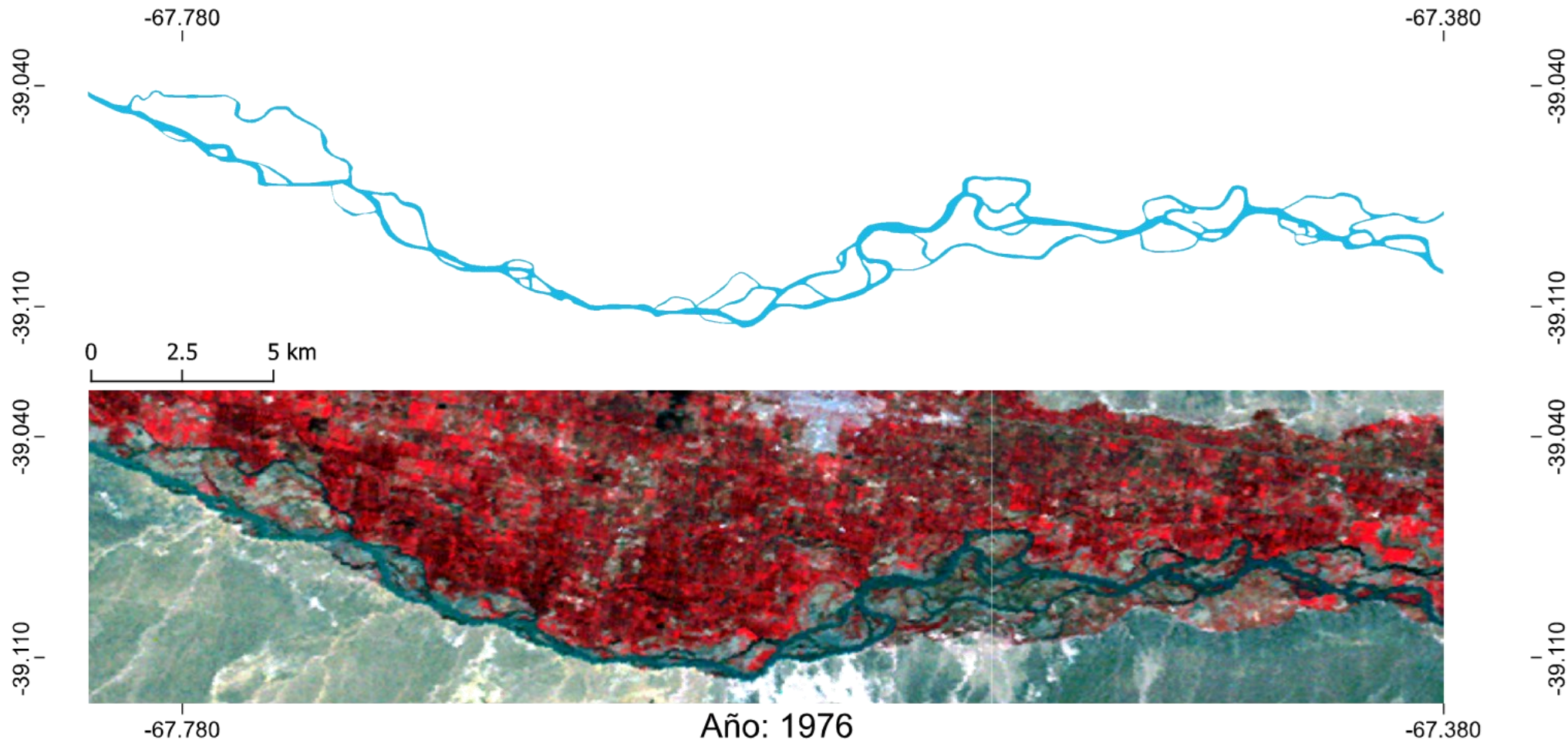
9.0

ANEXOS

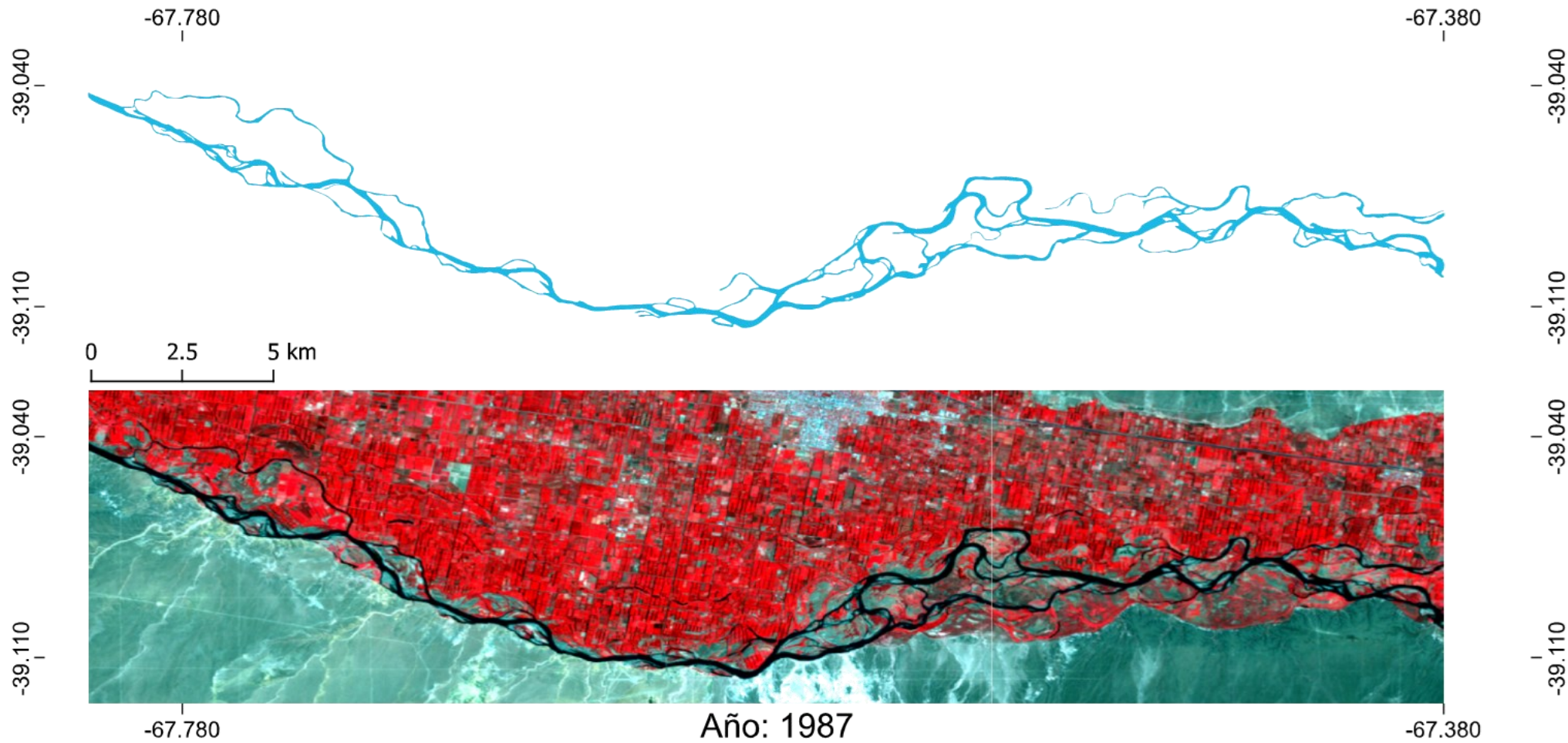


Año: 1967

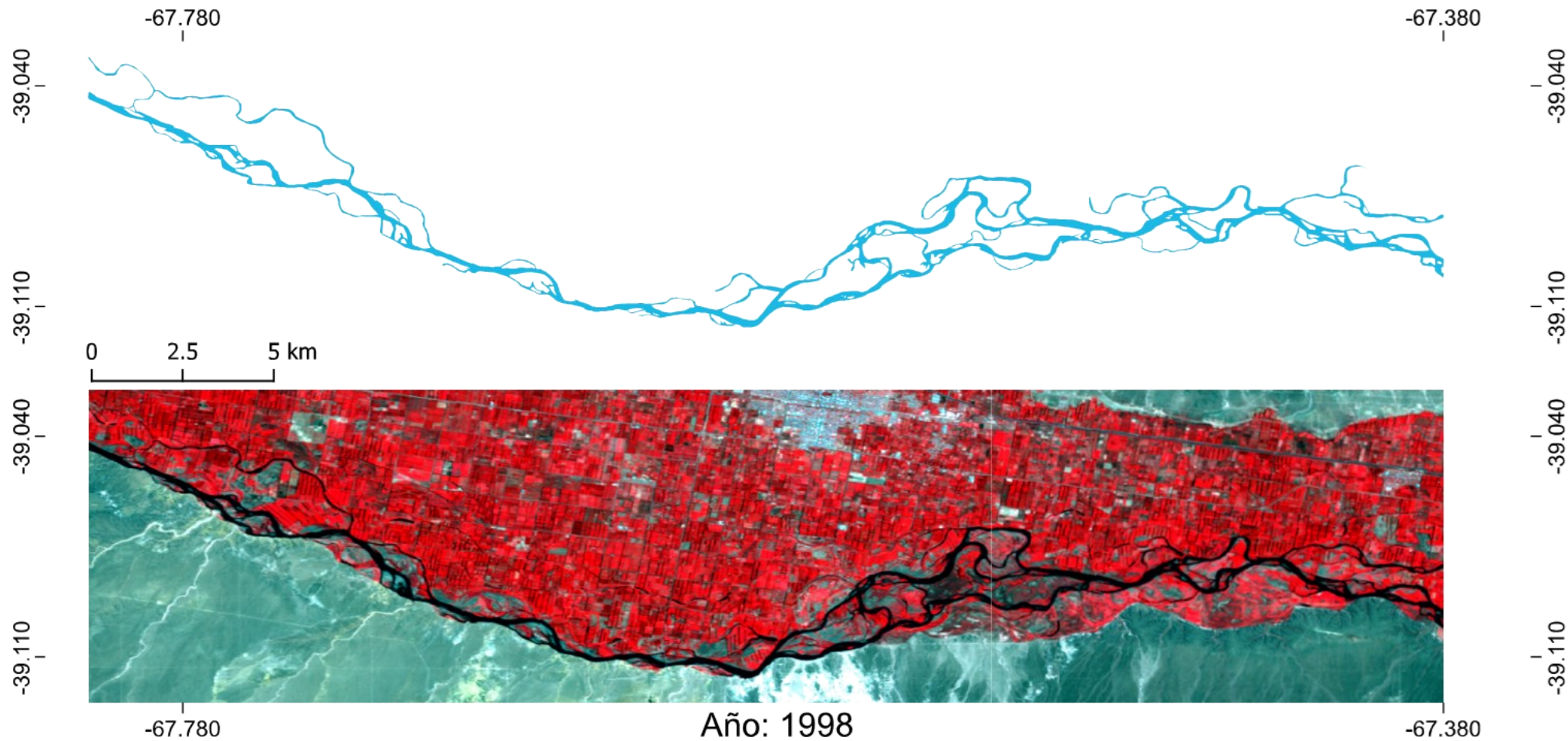
Anexo A - II



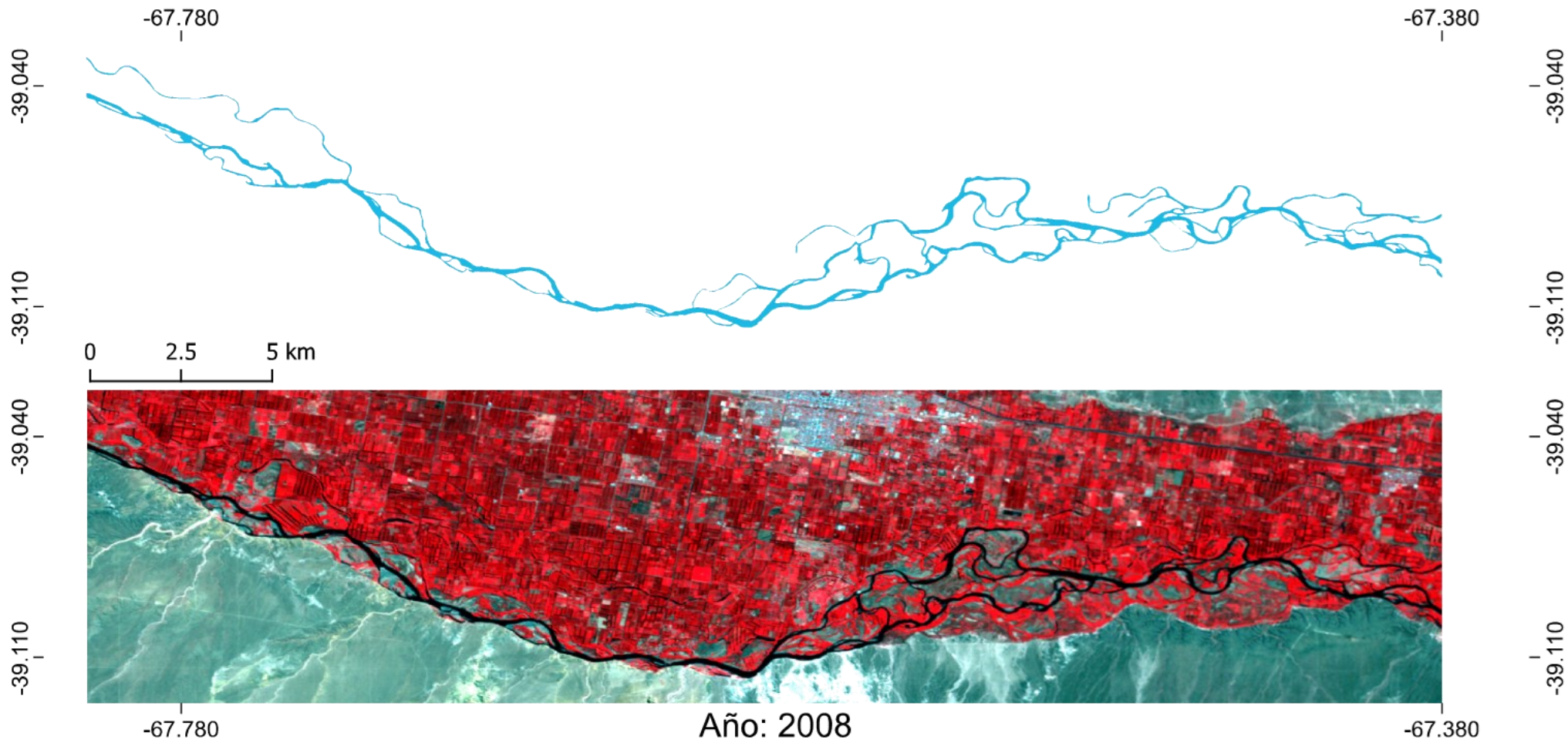
Anexo A - III



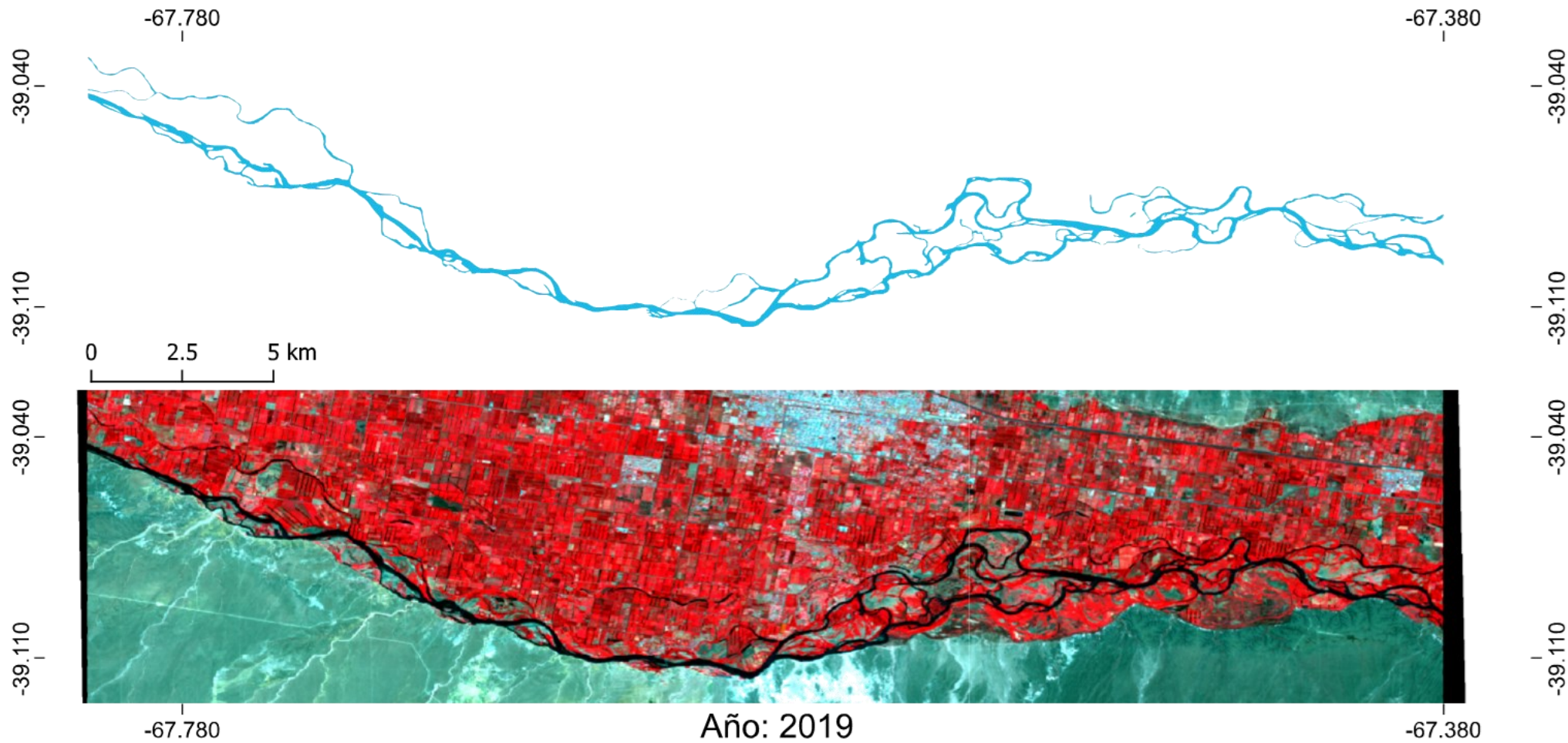
Anexo A - IV



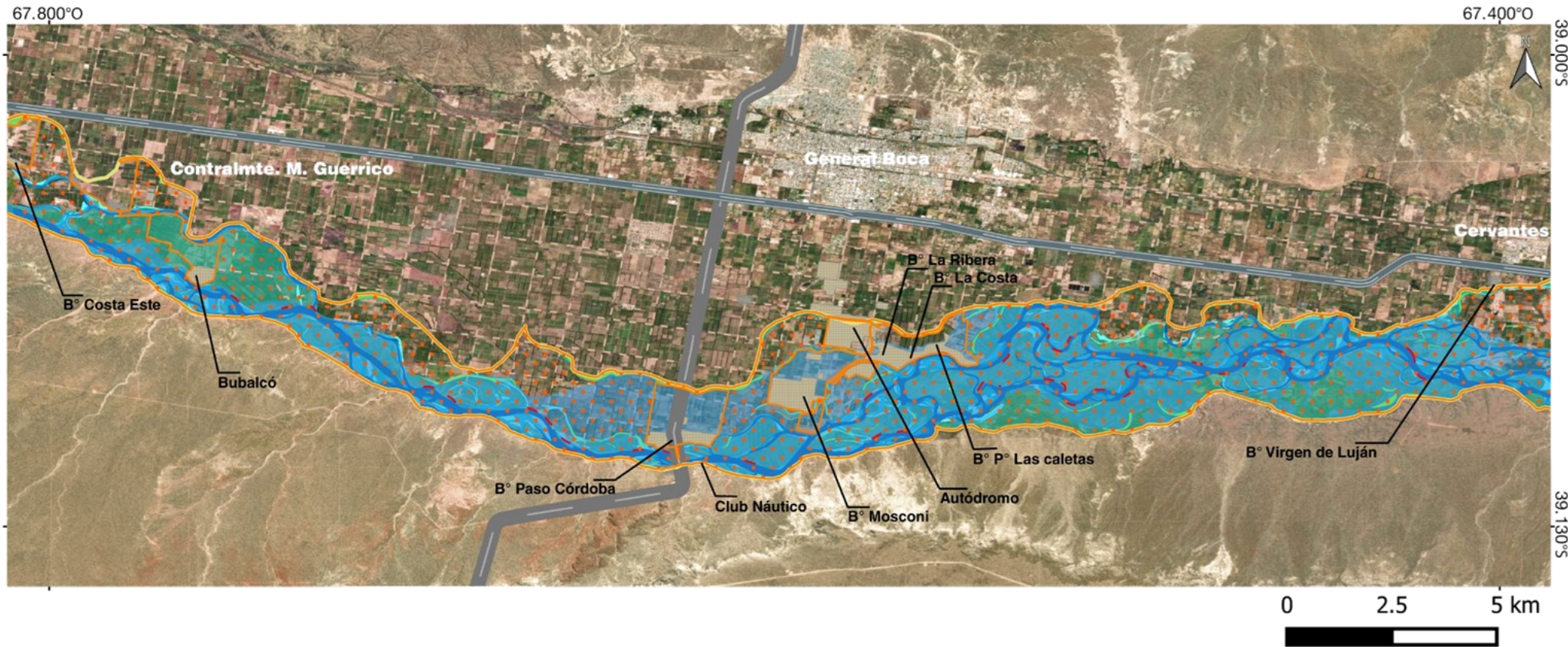
Anexo A - V



Anexo A - VI



Anexo B



REFERENCIAS

- | | | |
|--|---|---|
|  RN 22 |  Territorio Fluvial Ideal |  Dinamica Lateral |
|  RP 6 |  Corredor Ribereño |  Área inundable para un caudal de 2700 m3/seg. Tr= 10 años |
|  Caminos rurales |  Urbanización | |
|  Territorio Fluvial |  Meandros Abandonados | |