



FaIn·UNCo
Facultad de Ingeniería

**TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA
LICENCIATURA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

**Zonificación del Riesgo Hídrico en área al
sur del lago Mari Menuco – Provincia de
Neuquén**

Alumna: Hernández, Ximena Ailén

Legajo: ING-6067

DNI: 40825394

Director: Gatica, José Ricardo

Co-Directora: Nieva, María Florencia

Neuquén, 2024

RESUMEN

El riesgo hídrico es una problemática ampliamente estudiada a nivel mundial. Es de especial importancia en áreas hidrocarburíferas, ya que la acción del agua puede producir daños no solo materiales, sino también al medio ambiente. El área de estudio del presente trabajo se encuentra ubicada al sur del lago Mari Menuco, y está caracterizada por un paisaje de planicies estructurales, pedimentos y bajos. Debido a esto, se pueden encontrar sectores con distintos niveles de riesgo hídrico, incluyendo sitios con riesgo alto, que deben ser estudiados y monitoreados para prevenir incidentes asociados a la actividad hidrocarburífera en el área.

En este trabajo, se busca analizar el riesgo hídrico mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978), ampliamente usada para cálculos de pérdida de suelo en el mundo, así como también en la Provincia del Neuquén (Dufilho, et al., 2007; Saad, 2008). Luego, este resultado se integrará con el cálculo del Índice de Potencia de la Corriente (SPI), que describe el potencial erosivo de los cauces (Bagnold, 1996), para así obtener una representación gráfica más completa sobre el riesgo en el área.

El objetivo de este trabajo es establecer una metodología para el estudio del riesgo hídrico aplicable al área de estudio y zonas similares, adaptada para su uso mediante Sistemas de Información Geográficos, que permita ilustrar en formato de mapa sectores de riesgo bajo, medio y alto. Este tipo de resultado permitiría analizar de forma rápida y general el riesgo potencial para instalaciones existentes y proyectadas, identificando de forma preliminar aquellos puntos que requieran estudios de mayor detalle.

Palabras clave: Riesgo hídrico, erosión, USLE, SPI, SIG

ABSTRACT

Water risk is a widely studied problem worldwide. It's especially important in the oil and gas industry, as the action of water can occasionate damage not only to material facilities, but also to the environment. The study area is located south of the Mari Menuco Lake, and it's characterized by a landscape of structural plains, pediments, and depressions ("bajos"). Because of this, sites with different levels of water risk can be found, some of them presenting a high risk, that must be studied and monitored to prevent incidents associated to the oil and gas industry in the area.

In this study, the water risk was analyzed using the Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978), widely used for soil loss assessment in the world, as well as in the Neuquén Province (Dufilho, et al., 2007; Saad, 2008). Then, this result was integrated with the Stream Power Index (SPI), which describes the erosive potential of streams (Bagnold, 1996), to obtain a more complete graphic representation of risk in the area.

This study aims to propose a methodology for the assessment of water risk, applicable to the study area and similar places and adapted for its use with Geographical Information Systems, that allows to represent in map format the sites with low, medium, and high risk. This type of result allows to analyze in a quick and general way the potential risk for existing and planned facilities, identifying in a preliminary way those points that require more detailed studies.

Keywords: Water risk, erosion, USLE, SPI, GIS

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo.....	2
1.1.1. <i>Objetivo General</i>	2
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	2
2. ANTECEDENTES.....	3
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	4
3.1. Clima.....	4
3.2. Suelo	5
3.3. Vegetación	9
3.4. Geomorfología.....	10
3.5. Litología	13
3.6. Red de drenaje	13
4. METODOLOGÍA	15
4.1. Riesgo hídrico.....	15
4.2. Determinación de la erosión mediante USLE	15
4.2.1. <i>Factor R</i>	17
4.2.2. <i>Factor K</i>	18
4.2.3. <i>Factor LS</i>	20
4.2.4. <i>Factor C</i>	22
4.2.5. <i>Factor P</i>	23
4.2.6. <i>Valorización de resultados</i>	23
4.3. Determinación de la erosión por SPI.....	24
4.4. Erosión hídrica.....	25
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
5.1. Factor R.....	26
5.2. Factor K.....	26
5.3. Factor LS.....	27
5.4. Factor C.....	30
5.5. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo	31
5.6. Índice de Potencia de la Corriente.....	34
5.7. Erosión Hídrica.....	34
5.7.1. <i>Análisis de riesgo general</i>	36
5.7.2. <i>Análisis de riesgo para ductos existentes</i>	39
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
7. BIBLIOGRAFÍA	47
8. ANEXOS	53
8.1. Puntos de interés hídrico	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del área de estudio	4
Figura 2: Planicies estructurales arrasadas	6
Figura 3: Valles interserranos y bajadas aluviales modernas	7
Figura 4: Cuencas endorreicas y tributarios temporarios a efímeros	8
Figura 5: Asomos rocosos con virtual ausencia de suelos	9
Figura 6: Vegetación del área de estudio.....	10
Figura 7: Topografía del área de estudio.....	11
Figura 8: Geomorfología del área de estudio	12
Figura 9: Geología del área de estudio. Fuente: Mapa Geológico de la Provincia del Neuquén (Leanza, et al., 2011).....	13
Figura 10: Red de drenaje del área de estudio.....	14
Figura 11: Metodología para cartografía de erosión. Tomado de Albaladejo Montoro, et al., (1988)	16
Figura 12: Nomograma de Erodabilidad del Suelo (tomado de Wischmeier & Smith, 1978)	18
Figura 13: Unidades cartográficas identificadas	20
Figura 14: Representación esquemática de la relación entre cambios aguas abajo a lo largo de un río y las transiciones asociadas del proceso de sedimentación (traducido de De Rosa, et al., 2019).....	25
Figura 15: Factor R	26
Figura 16: Factor K.....	27
Figura 17: Mapa de pendientes.....	28
Figura 18: Factor LS (metodología 1)	29
Figura 19: Factor LS (metodología 2)	30
Figura 20: Factor C	31
Figura 21: USLE (Metodología 1).....	32
Figura 22: USLE (Metodología 2).....	32
Figura 23: USLE (red de drenaje)	33
Figura 24: Índice de Potencia de la Corriente	34
Figura 25: Riesgo Hídrico (metodología 1)	35
Figura 26: Riesgo Hídrico (metodología 2)	36
Figura 27: Sectores del área de estudio.....	37
Figura 28: Sector 5 (tomada de Informe Ambiental (Physis SAS, 2024)).....	38
Figura 29: Sector 2.....	38
Figura 30: Vista de cauce en sector 6 (tomada de Informe Ambiental (Physis SAS, 2023c)).	39
Figura 31: Pistas de ductos en área de estudio	39
Figura 32: Pistas de ductos – Acercamiento 1	40
Figura 33: Sector cercano a P1 y P2 (tomada de Informe de Monitoreo Ambiental Anual (Physis SAS, 2024b)).....	41
Figura 34: Pistas de ductos – Acercamiento 2	41
Figura 35: Sector de P8 y P9 (tomada de Informe Ambiental (Physis SAS, 2024)).	42
Figura 36: Pistas de ductos – Acercamiento 3	42
Figura 37: Sector de P12 (tomada de Informe Ambiental, (Physis SAS, 2023b)).	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores del Factor K	19
Tabla 2: Análisis de suelo	20
Tabla 3: Clasificación USLE (Gobierno Vasco, 2005)	24
Tabla 4: Clasificación SPI	34
Tabla 5: Clasificación Riesgo Hídrico	35
Tabla 6: Porcentajes de riesgo en el área	37
Tabla 7: Criterio propuesto tapada de ductos	46

1. INTRODUCCIÓN

En ambientes áridos o semiáridos, la pérdida de suelo por erosión constituye un problema de gravedad. En particular, en las áreas petroleras esta situación se ve agravada ya que la erosión hídrica puede causar la rotura de instalaciones que, en el caso de las líneas de conducción, puede ocasionar pérdidas de hidrocarburos y, por lo tanto, afectación al medio ambiente. Para evitar esto, se realizan Estudios de Riesgo Hídrico antes de modificar el entorno natural, en los que se analiza la posible erosión y se proponen las medidas de control necesarias para disminuir los riesgos potenciales.

El área de estudio se encuentra ubicada al sur del lago Mari Menuco, provincia del Neuquén. Por estar ubicada en una zona de clima árido, es un sector muy vulnerable a procesos de erosión hídrica. Además, en su topografía presenta numerosos cañadones que pueden facilitar el transporte de material durante las tormentas, por lo que su caracterización es de gran importancia (Dufilho, et al., 2001; Marizza, et al., 2010). Por este motivo, se propone aplicar una metodología indirecta utilizando los principales factores involucrados en los procesos erosivos, como lo son las precipitaciones, red de drenaje, topografía, tipos de suelo y vegetación, que permitan generar un mapa de riesgo del área hidrocarburífera ubicada en esta zona, comparable con los criterios de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Neuquén, a fin de identificar las zonas más críticas.

La ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978) desarrollada por la USDA (*United States Department of Agriculture*) es el modelo de estimación de erosión en parcelas más ampliamente utilizado en el mundo debido a su facilidad de cálculo, capacidad de aplicación a diferentes áreas y su eficacia para identificar regiones susceptibles a la erosión. A lo largo de los años, ha sufrido distintas modificaciones y adaptaciones para ser utilizada en distintos ambientes y calculada con métodos más apropiados para cada estudio en particular. Este es el caso de la ecuación RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) (Renard, et al., 1997), que tiene en cuenta la erosión en surcos y la influencia de la variabilidad de las pendientes. Para incorporar el impacto de la convergencia de flujo, se desarrollaron también modificaciones para ser aplicadas en entornos SIG (RUSLE3D) (Moore & Burch, 1986; Mitsova, et al., 1996).

Otra de las técnicas existentes para cuantificar los procesos de erosión sobre cuencas es el índice de erosión conocido como SPI (*Stream Power Index*) o Índice de Potencia de la Corriente (Moore, et al., 1991; Bagnold, 1996). Este calcula las tasas de erosión en unidades de potencia, y puede usarse para describir la erosión potencial del flujo en el punto dado de la superficie topográfica. A medida que aumentan las áreas de captación y el gradiente de pendiente, aumenta la cantidad de agua que es contribuida por las áreas ascendentes y la velocidad del flujo del agua, por lo que aumenta el riesgo de erosión y, por consecuencia, el índice de potencia de la corriente. Ha sido ampliamente utilizado para analizar el transporte de sedimentos y, en general, los patrones de evolución de un río (De Rosa, et al., 2019).

1.1. Objetivo

1.1.1. Objetivo General

Determinar una metodología a partir de cálculos de pérdida de suelo y erosión potencial en cauces que permita mapear el riesgo hídrico, donde se caractericen las diferentes zonas del área de estudio.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar mediante la ecuación USLE el potencial de erosión del suelo.
- Determinar mediante el índice SPI el potencial erosivo de los cauces principales que afectan el área de estudio.
- Elaborar un mapa de clasificación del riesgo hídrico.
- Proponer una metodología para evaluar el riesgo hídrico en instalaciones lineales y concentradas.

2. ANTECEDENTES

A nivel nacional, en el año 2013, la Estación Experimental Agropecuaria del Paraná del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) presentó el software INTA-USLE, que permite realizar el cálculo de la pérdida de suelo en un lote a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, siendo una de las pocas de su tipo en el mundo (Gvozdenovich, et al., 2013). En el año 2015, este software fue actualizado para incluir también las consideraciones de la ecuación RUSLE, contemplando nuevos factores de erosionabilidad del suelo e incorporando las ecuaciones LS provenientes de dicho modelo (Gvozdenovich, et al., 2015).

En cuanto al uso de Índices de Potencia de la Corriente, existen análisis morfométricos y morfotectónicos recientes de cuencas fluviales en la Precordillera de San Juan, donde se utilizó este índice para cuantificar los procesos de erosión (Vargas, et al., 2020); (Ginesta Torcivia, et al., 2022).

Dentro de la provincia de Neuquén, Dufilho, et al., (2007) realizaron un estudio de estimación de la erosión hídrica en el campo de Aguas Frías, estimando la erosión actual mediante el método de clasificación de *Bureau of Land Management* (MMA, 2014), así como también la erosión potencial mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Además, utilizando esta misma ecuación, Hernández & Dufilho, (2012) determinaron el riesgo de erosión hídrica en los departamentos de Minas y Chos Malal de la provincia de Neuquén, mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográficos, concluyendo que es un método adecuado para la zona.

En cuanto a la zona de estudio en particular, los trabajos específicos que se hallan en el área corresponden al estudio efectuado por Garrido, (2010) en el cual se definen observaciones geológicas en un perfil cercano, denominado Aguada Anacleto. Otros trabajos geológicos en el área corresponden a la Hoja Geológica Neuquén efectuada por el SEGEMAR (Rodríguez, et al., 2007) y el perfil en la Quebrada de las Chivas estudiado por Sánchez, et al., (2006). Fuera del área de estudio, los trabajos geológicos más relevantes se sitúan a 30 km al norte en el lago los Barreales referidos a la Fm. Portezuelo y Fm. Plottier (Sánchez, et al., 2005).

Por último, para el desarrollo de este Trabajo Final se consultó la bibliografía correspondiente al Estudio Ambiental de Base, Estudio de Impacto Ambiental General, Estudios de Riesgo Hídrico e Informes Ambientales correspondientes al área de concesión donde se ubica el área de estudio.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en el departamento Confluencia, al sur del lago Mari Menuco y a 30 km de la ciudad de Senillosa, provincia del Neuquén (Figura 1).

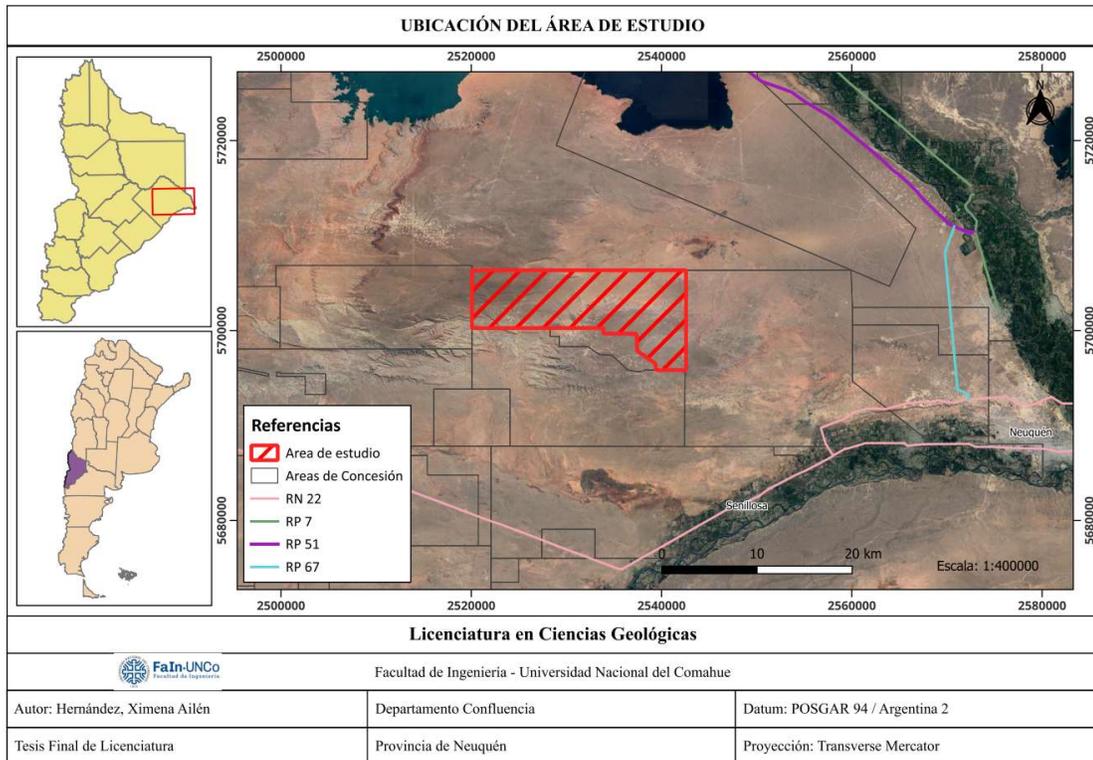


Figura 1: Ubicación del área de estudio

3.1. Clima

El área de estudio presenta un clima semiárido, y se caracteriza por ser seco y fresco. La temperatura media anual se encuentra aproximadamente entre los 13°C a 14°C.

La precipitación media anual para el período 2005-2020 fue de 151,77 mm medidos en la estación La Higuera (Paso del Indio), que se encuentra aproximadamente a 60 Km del área de estudio, ubicando a la región dentro de la franja seca.

Los promedios de precipitación se mantienen relativamente constantes a lo largo del año, con picos de precipitación para los meses de abril, mayo, junio y julio. Los meses de noviembre, diciembre, febrero y marzo corresponden a los meses con menor probabilidad de precipitaciones.

En cuanto a los vientos, estos son moderados a fuertes, lo que constituye un factor adicional de aridez. Son más intensos en las zonas altas y más expuestas. De acuerdo con los datos obtenidos de la Estación Cutral Co para el período 1990-2002, las direcciones predominantes de los vientos son oeste y suroeste, con velocidades medias de 10 a 15 km/h y, en menor medida, este y noreste, con una velocidad promedio de 5 a 7 km/h.

3.2. Suelo

Según el análisis del Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén (Ferrer, et al., 1990) la provincia se divide en dos grandes aéreas; una Andina (húmeda montañosa y/o subhúmeda montañosa) y una Extraandina (Subhúmeda de planicies, colinas y serranías, Árida serrana o Árida Mesetiforme). El área de estudio se encuentra en la región Extraandina, subregión Árida serrana o Árida Mesetiforme.

El suelo correspondiente a esta área está dominado por el orden entisol que ocupa el 70% de la superficie. Se trata de un tipo de suelo con escaso desarrollo pedogénico. Por otro lado, el segundo orden corresponde a un suelo aridisol.

Se observa un horizonte superficial claro, de poco espesor y pobre en materia orgánica. Los suelos muestran, en general, gran permeabilidad y síntomas de erosión hídrica y eólica intensa evidenciada por la presencia de sectores con deflación y acumulación, pavimentos, pedestales, surcos y cárcavas. Predominan los suelos moderadamente profundos a someros, de texturas franco-arenosas, arenosos y arcillosos, con una granulometría de tamaño fino a medio.

En las áreas relativamente bajas, planicies aluviales y cuencas endorreicas, dominan los suelos salinos y alcalinos (carbonato de calcio y pH moderadamente alcalino).

A partir del Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén (Ferrer, et al., 1990) y la digitalización de las Unidades Cartográficas (Irisarri, 2006), en el área se pudieron identificar las siguientes unidades:

- Unidad Cartográfica 50 (Planicie estructural arrasada)
- Unidad Cartográfica 59 (Valles interserranos y bajadas aluviales modernas)
- Unidad Cartográfica 62 (Cuencas endorreicas y tributarios temporarios o efímeros)
- Unidad Cartográfica 68 (Predominio de asomos rocosos con virtual ausencia de suelos)

Unidad Cartográfica 50

La roca base de esta unidad está constituida por areniscas, fangolitas y arcilitas del Grupo Neuquén. Se caracteriza por su geomorfología de sectores aislados de planicies arrasadas.

Está integrado por suelos Paleortides Típicos (con texturas gruesas y manto calcáreo cementado), y en menor medida Torriortentes Típicos y Calciortides típicos.

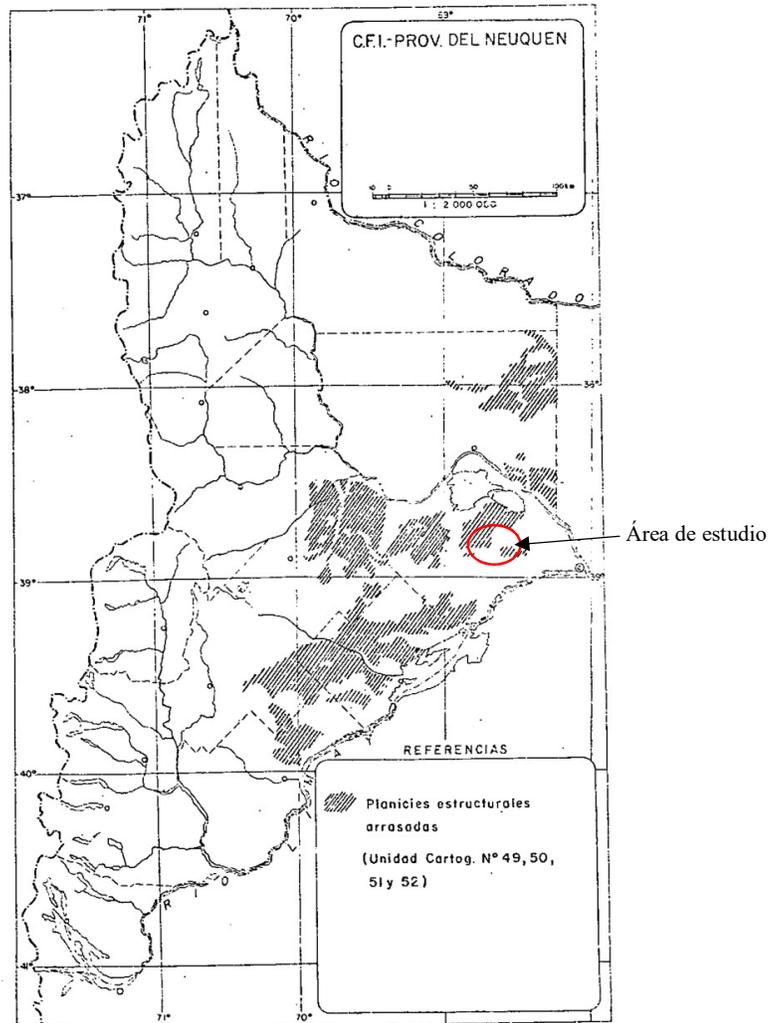


Figura 2: Planicies estructurales arrasadas

Unidad Cartográfica 59

La roca base de esta unidad está constituida por areniscas, arcilitas y fangolitas del Grupo Neuquén. Se caracteriza por su geomorfología de planicie aluvial pedemontana, o bajada, y conos aluviales. Está compuesta principalmente por depósitos aluviales holocénicos.

Está integrado por suelos Torriortentes Típicos, y en menor medida Torripsamentos Típicos y fases salinas de Torriortentes Típicos.

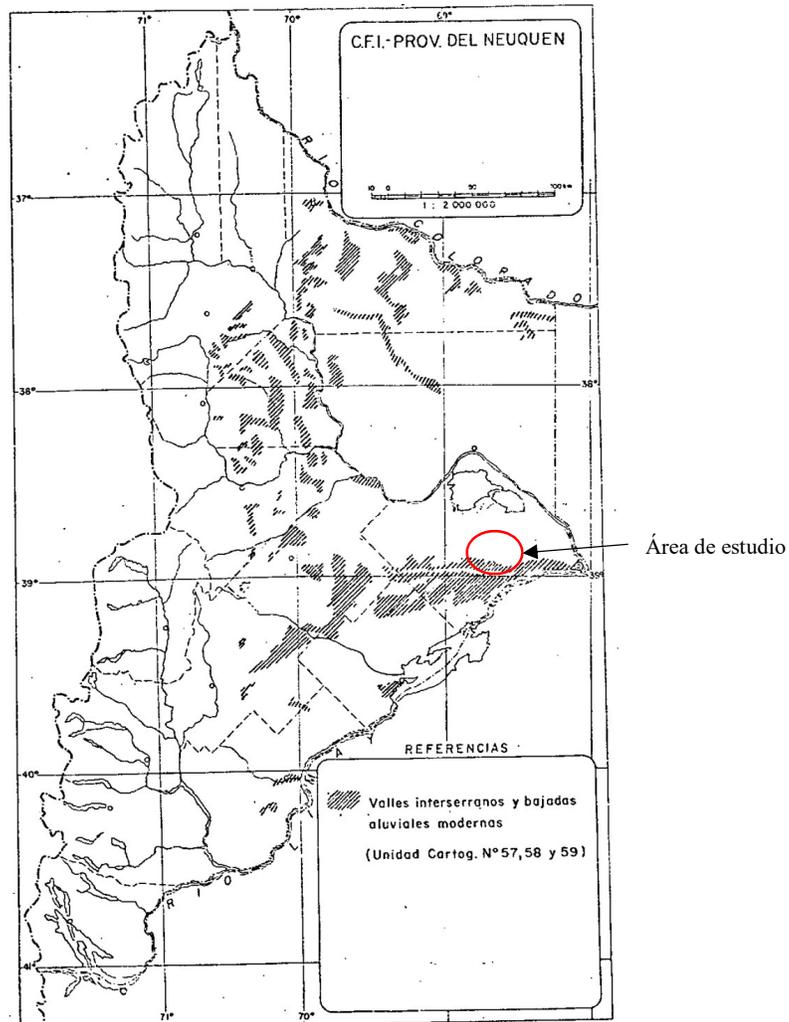


Figura 3: Valles interserranos y bajadas aluviales modernas

Unidad Cartográfica 62

La roca base de esta unidad está constituida por areniscas, fangolitas y arcillas del Grupo Neuquén. Se caracteriza por su geomorfología de cuencas endorreicas y valles estrechos de cursos temporarios y efímeros. Está compuesta principalmente por depósitos sedimentos modernos de grano fino, con ocasionales acumulaciones salinas.

Está integrado por suelos Torrifluventes Típicos, y en menor medida Salortides Típicos y Torriortentes Vérticos, los cuales evidencian texturas finas, poco drenaje y salinidad.

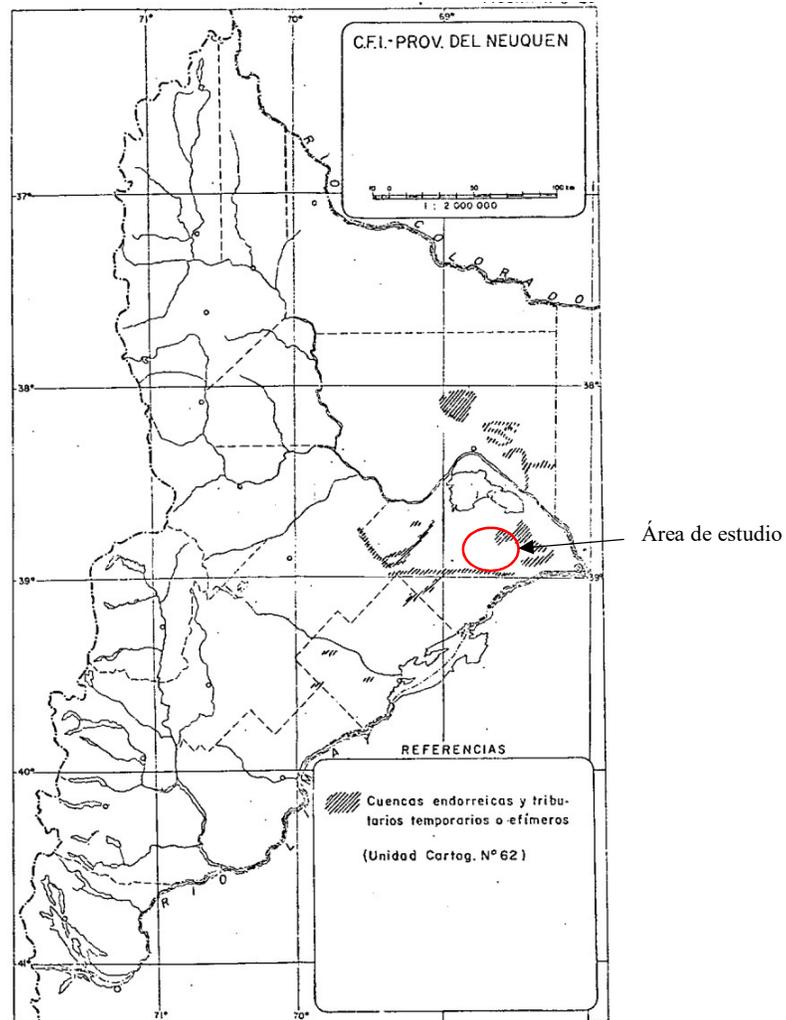


Figura 4: Cuencas endorreicas y tributarios temporarios a efimeros

Unidad Cartográfica 68

En el área de estudio, esta unidad presenta un predominio de exposiciones rocosas pertenecientes al Grupo Neuquén (fangolitas rojas y areniscas verde-amarillentas). Conforman taludes de planicies sedimentarias estructurales, con pendiente abrupta y escalonada.

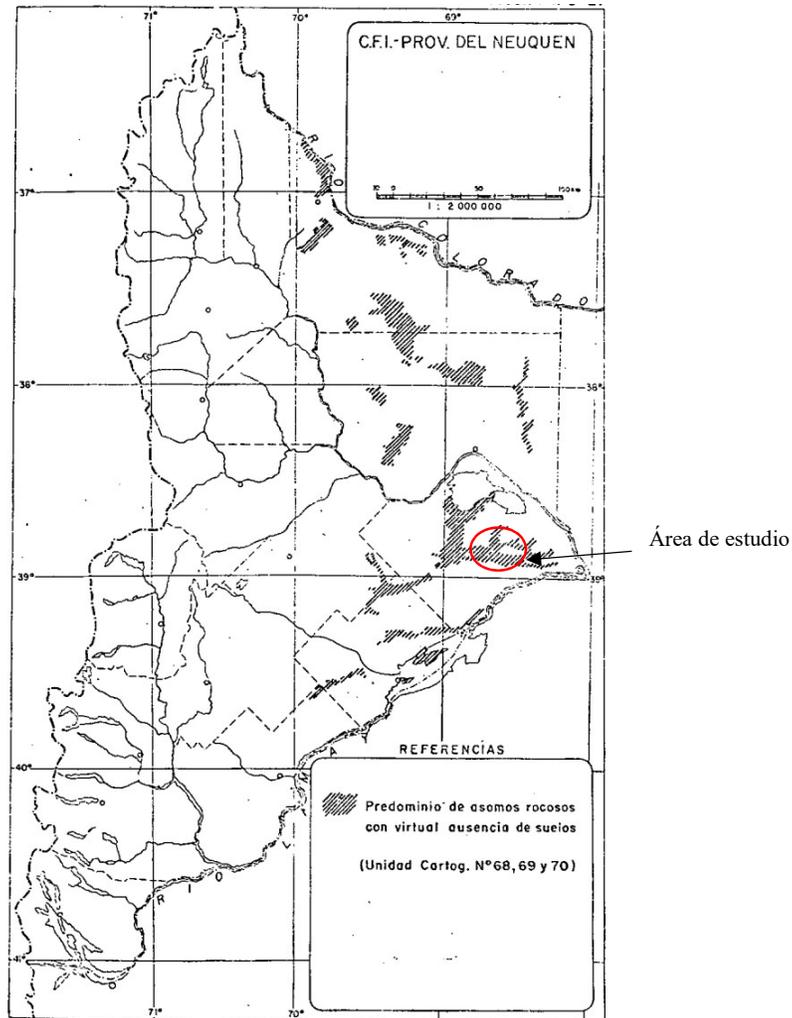


Figura 5: Asomos rocosos con virtual ausencia de suelos

3.3. Vegetación

El área de estudio se localiza dentro de la provincia del Monte, con vegetación predominante correspondiente a la estepa herbácea arbustiva (jarilla, mata-sebo, zampa, alpataco).

La cobertura vegetal en el área es relativamente baja, y puede variar desde 20% a 70%, aproximadamente. Estos extremos ocurren principalmente por la mayor o menor presencia de pequeñas hierbas que temporalmente cubren algunos sectores, y también por la presencia de ganado en ciertas zonas, que pisotean y ramonean las plantas. La fisonomía predominante corresponde a arbustales que forman parches donde se agrupan arbustos, dando protección a plantas de menor porte.

De acuerdo al Estudio de Impacto Ambiental General realizado en el área (Physis SAS, 2023), la especie de flora leñosa más frecuente es *Acantholippia seriphioides* “tomillo”, seguida por *Larrea divaricata* “jarilla hembra”, *Monttea aphylla* “matasebo”, *Atriplex lampa* “zampa”, *Baccharis darwinii*, *Bougainvillea spinosa*, *Gutierrezia solbrigii* y

Larrea cuneifolia. El resto de los arbustos o sub arbustos se presenta en menor proporción. De las hierbas perennes, *Panicum urvilleanum* se puede encontrar en varios sectores.



Figura 6: Vegetación del área de estudio

En un estudio de biodiversidad realizado en el área, se registraron 54 especies, 52 de ellas nativas. Las dos especies adventicias corresponden a pequeñas hierbas anuales. De estas se destaca una enredadera herbácea, *Magallana trialata*, tres leñosas, *Menodora robusta* “jazmin del campo” ó “matasebo hembra”, *Mulguraea ligustrina* y *Retanilla patagónica*, por no ser muy frecuentes, y las dos primeras además son objeto de ramoneo por la fauna doméstica. En cuanto a las cactáceas, las especies registradas fueron *Austrocactus patagonicus*, *Echinopsis leucantha* y *Maihuenia patagonica*.

3.4. Geomorfología

Desde el punto de vista morfológico regional, el área de estudio se encuentra ubicada en la Región de las Mesetas Patagónicas Neuquinas (Holmberg, 1976). Estas se encuentran atravesadas por los ríos Colorado, Neuquén y Limay, que desaguan la zona cordillerana.

A nivel general, el relieve es mesetiforme, formado por varios niveles de terrazas estructurales. El principal proceso que modeló el paisaje es el fluvial, bajo el control estructural de estratos horizontales. Con menor extensión, cabe mencionar los efectos de remoción en masa y la acción eólica. Se destaca también la presencia del cerro Senillosa, con una altura de 691 metros.

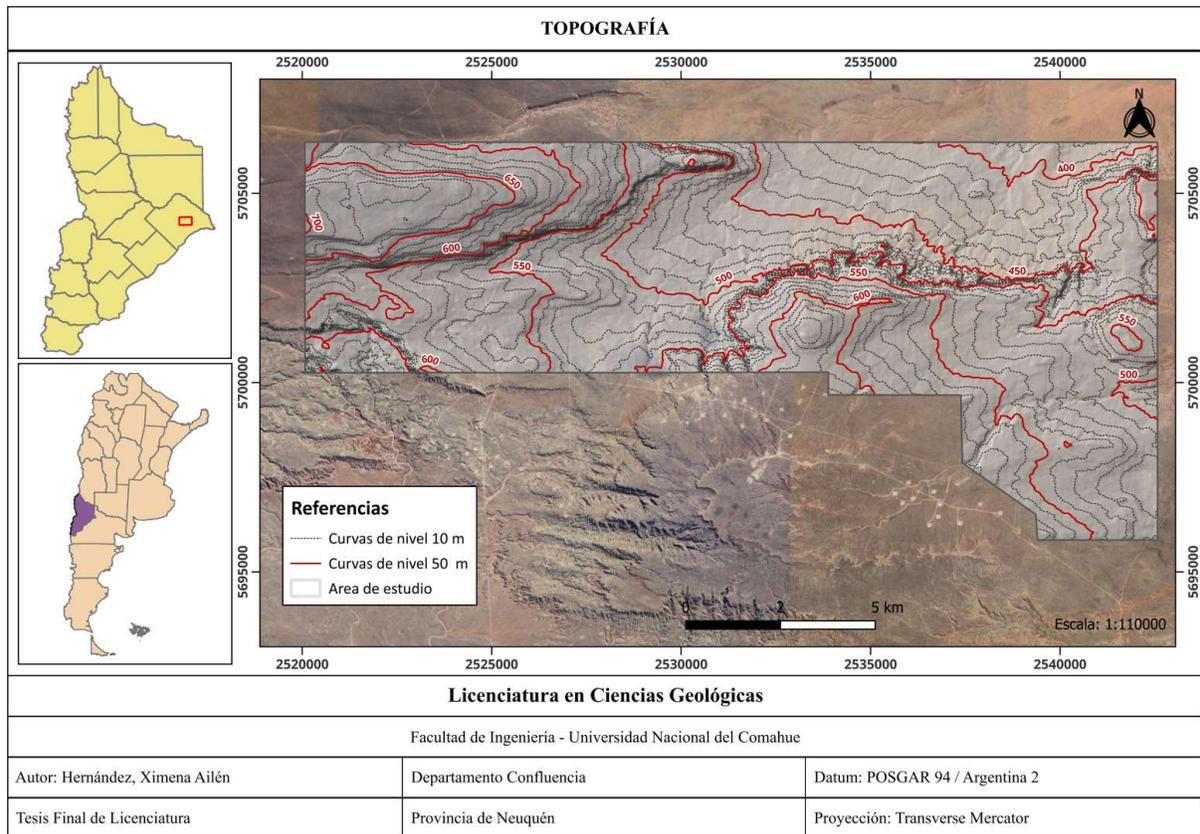


Figura 7: Topografía del área de estudio

Más específicamente, en el área de estudio se pueden observar las siguientes geoformas principales (González Díaz & Di Tommaso, 2011):

- Planicies estructurales sedimentarias
- Depresiones o bajos

Planicies estructurales sedimentarias

Se refiere al Cerro Senillosa, ubicado en la porción sureste del área, y a la Sierra Barrosa, que abarca el sector oeste. La geoforma corresponde a remanentes de planicies estructurales, conservadas debido a la presencia de bancos resistentes en la sucesión mesozoica. Estos pueden ser niveles bien consolidados o cementados, que previenen la degradación de estratos subyacentes, y están caracterizados por un escalonamiento.

En el área de estudio, estas geoformas están limitadas por escarpas de erosión y pedimentos. Otra geoforma típica del sector de la cuenca donde ubica el área de estudio son los paisajes de huayquerías o *bad lands*.

Depresiones o bajos

Incluye la porción central a noreste del área, correspondiéndose al tipo playa seca. Típicamente exhiben superficies limo-arcillosas, con grietas o polígonos de desecación, y pueden incluir costras salinas. En el área de estudio, se pueden observar cauces efímeros en este sector.

Geoformas de menor extensión

Escarpas

Las escarpas son un cambio de pendiente en la roca, que corta el terreno abruptamente. Se suelen distinguir debido a su alta pendiente, usualmente mayor a 35° . En el área de estudio, se encuentran claramente representadas en las laderas de la Sierra Barrosa.

Pedimentos

Los pedimentos observables en el área de estudio corresponden a pedimentos convergentes (González Díaz & Malagnino, 1984), siendo su nivel de base la playa de la depresión o bajo ubicado en el sector central. Son geoformas de erosión, aunque normalmente se encuentran cubiertas por material detrítico erosionado de niveles superiores. En estos casos, se definen también como pedimentos cubiertos.

Paisajes de huayquerías

Los paisajes de huayquerías o *badlands* (Polanski, 1962) se desarrollan en la cuenca típicamente en sedimentitas arcillosas del Grupo Neuquén, al pie de la pendiente en los frentes de las escarpas de erosión. Se describen como interfluvios y cárcavas profundas y estrechas, y son susceptibles a la erosión. Por la escala de trabajo, este tipo de geoformas no pudieron ser mapeadas, pero se destacan como características de la zona.

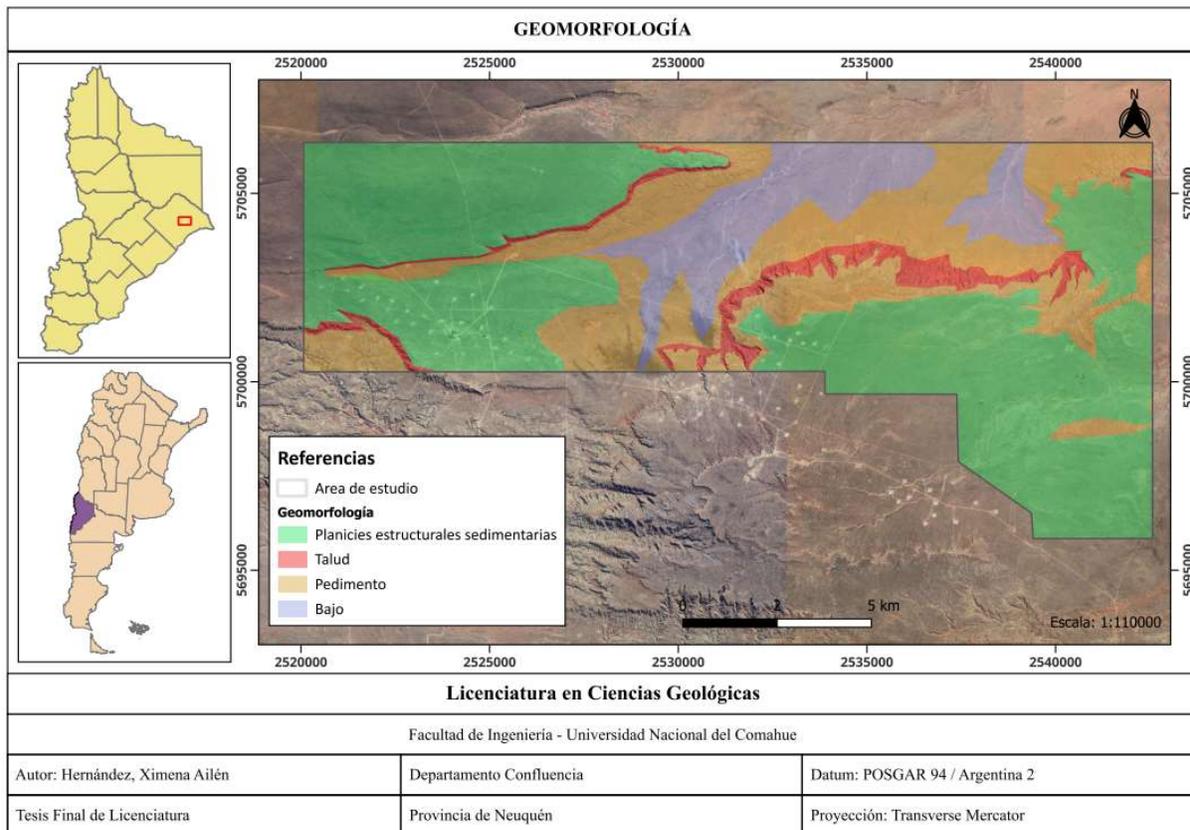


Figura 8: Geomorfología del área de estudio

3.5. Litología

Desde el punto de vista morfoestructural regional dentro del territorio neuquino, el área de estudio se encuentra en la Cuenca Neuquina en la porción Extraandina. Esta se caracteriza por presentar una estructuración suave, con plegamientos de gran longitud de onda, los cuales adoptan regionalmente un rumbo oeste que responden al control ejercido por la Dorsal de Huincul del subsuelo.

De acuerdo con la Hoja Geológica 3969-II (Rodríguez, et al., 2007), las unidades geológicas más antiguas presentes en el área son las rocas del Cretácico Superior del Grupo Neuquén, representadas por la Fm. Portezuelo, Fm. Plottier, Fm. Bajo de la Carpa y la Fm. Anacleto. Toda la secuencia buza al oriente con un rumbo prácticamente nortesur.

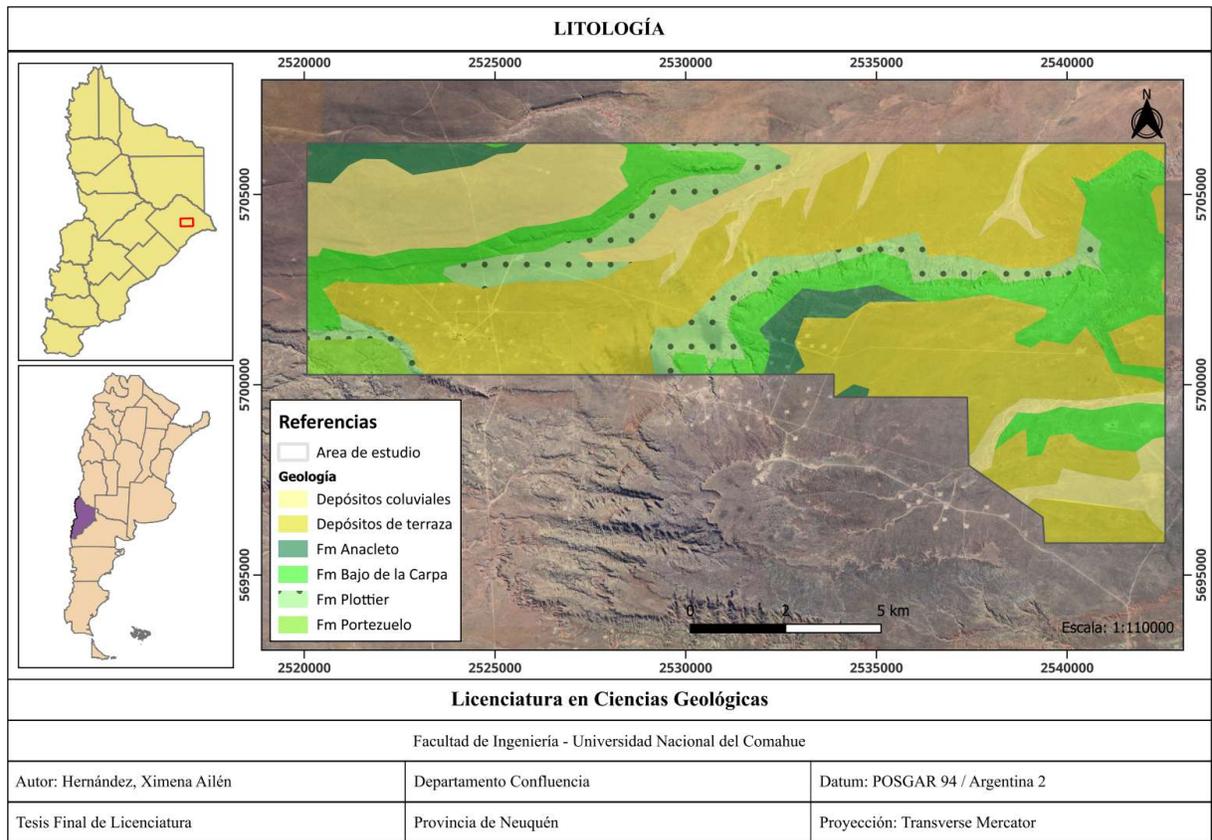


Figura 9: Geología del área de estudio. Fuente: Mapa Geológico de la Provincia del Neuquén (Leanza, et al., 2011)

3.6. Red de drenaje

En cuanto a la configuración de la red de drenaje, el escurrimiento se caracteriza por cursos efímeros con una principal dirección de escurrimiento hacia el noreste. Nace en las mesetas ubicadas en los extremos noroeste y sureste, y luego se dirige hacia la zona de bajo ubicada en el centro.

Se puede observar en el mapa a continuación que, en general, los cursos son más rectos en las cabeceras, y forman un patrón de drenaje más paralelo. Al perder pendiente hacia

zonas más distales, es decir, hacia el bajo central, algunos de ellos se comienzan a ver más sinuosos, y el patrón se vuelve dendrítico.

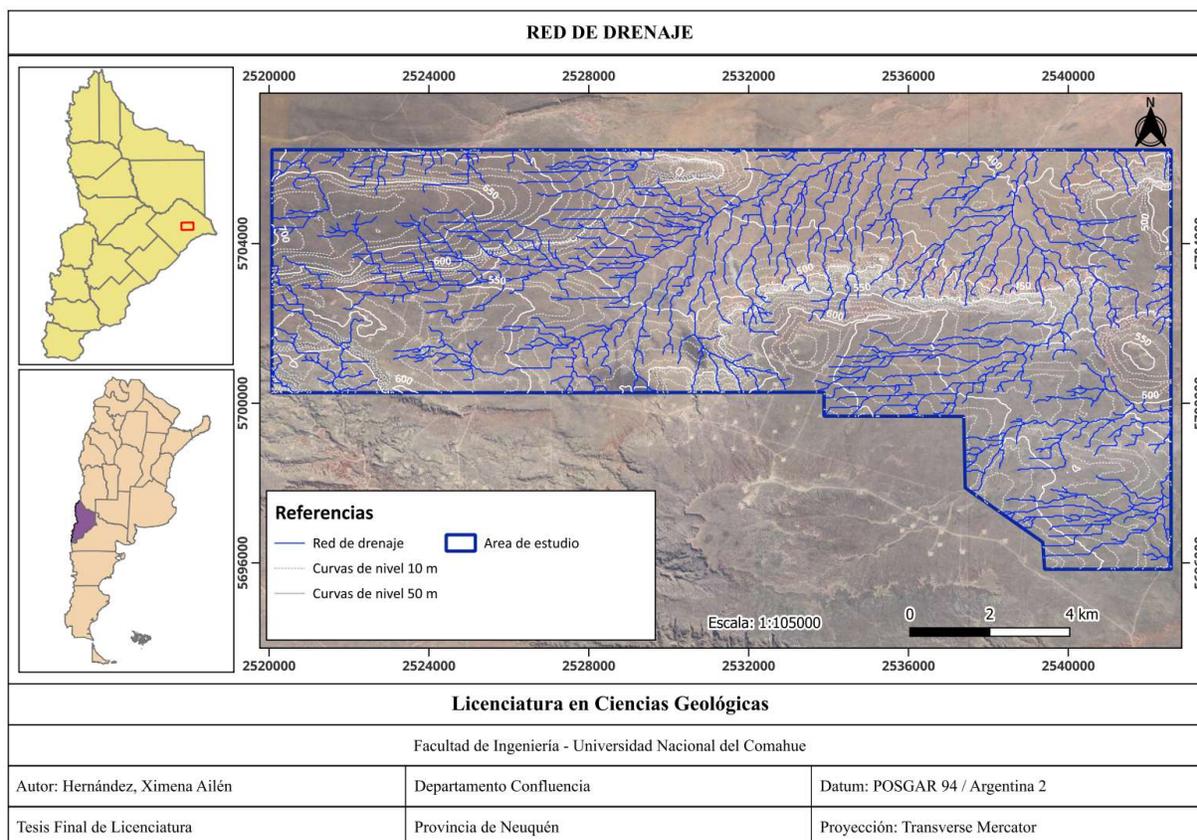


Figura 10: Red de drenaje del área de estudio

4. METODOLOGÍA

En una primera etapa, se realizó una recopilación y revisión de antecedentes sobre análisis de riesgo hídrico tanto de la zona como nacionales, revisando las distintas metodologías utilizadas. A su vez, se realizó una revisión de la información proporcionada por la empresa operadora del área de concesión, que incluye Informes Ambientales, Estudios de Riesgo Hídrico realizados puntualmente para instalaciones del área y el Estudio de Impacto Ambiental General realizado en el año 2023.

Se prosiguió con el análisis del Modelo Digital de Elevación (MDE) y el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel 2 mediante el uso de Sistemas de Información Geográficos (SIG), incorporando también información bibliográfica sobre precipitaciones y tipos de suelo, obteniendo un mapa de erosión o pérdida de suelos a partir de la ecuación USLE y sus modificaciones. Asimismo, se obtuvo el mapa del Índice de Potencia de la Corriente a partir del MDE. Por último, se integraron los resultados obtenidos para lograr un mapa representativo del riesgo de erosión hídrica en el área.

4.1. Riesgo hídrico

Dentro de los fenómenos naturales hídricos o de base hidrológica que pueden generar una amenaza, se pueden mencionar las crecidas, inundaciones, lluvias extremas o nevadas intensas. El riesgo hidrológico se define como el peligro emergente, para la vida humana, el territorio, las áreas urbanas, las zonas industriales y rurales y la infraestructura, de la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos (Fattorelli & Fernández, 2011).

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

El riesgo hídrico puede referirse a riesgos por exceso o falta de agua, por contaminación, entre otros. En el caso de las áreas hidrocarburíferas, el riesgo está asociado principalmente al deterioro de instalaciones por acción de cauces cercanos, lo cual puede ocasionar pérdidas de hidrocarburos con la consecuente afectación al medio ambiente.

4.2. Determinación de la erosión mediante USLE

La erosión es el desgaste o denudación de suelos y rocas que producen distintos procesos en la superficie de la Tierra. El origen y propagación de la erosión se genera por agentes naturales como agua y viento, y su magnitud y extensión están controladas por los factores, clima, topografía y vegetación (Wischmeier & Smith, 1978). El factor natural con más incidencia en la erosión del suelo es el agua, ya sea por efecto de lluvia o por el flujo hídrico (Thomas et al., 2018).

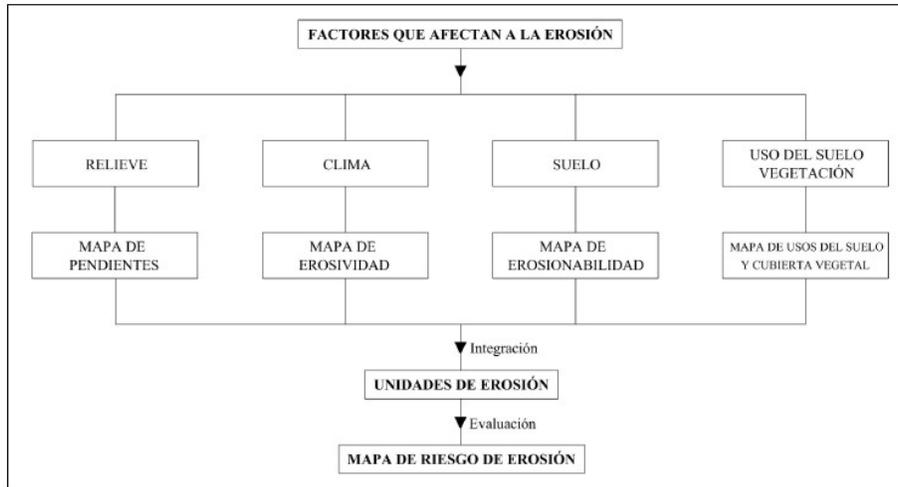


Figura 11: Metodología para cartografía de erosión. Tomado de Albaladejo Montoro, et al., (1988)

La erosión hídrica puede ser representada en forma simple, mediante la siguiente ecuación paramétrica y multiplicativa:

$$\text{Erosión hídrica} = f(\text{erosividad} \times \text{erosionabilidad})$$

Donde erosividad es el potencial erosivo de la lluvia y erosionabilidad es la susceptibilidad de un suelo para ser erosionado.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es el método más usado para evaluar la pérdida de suelo por erosión laminar en parcela. Este modelo ha sido avalado por otros estudios realizados en la provincia de Neuquén (Dufilho, et al., 2007; Hernández & Dufilho, 2012; Saad, 2008), reafirmando su capacidad de aplicación a diferentes áreas y su eficacia para identificar regiones susceptibles a la erosión.

Esta ecuación consiste en una regresión múltiple de los cinco factores más importantes que intervienen en el proceso erosivo: clima, suelo, pendiente, uso del suelo y prácticas de conservación. La multiplicación lineal de los factores arroja una tasa de pérdida de suelos anual en un área determinada, en Tn/Ha/año. Los valores de tolerancia de pérdida anual de suelos dependen del tipo de suelo, de su espesor y de sus propiedades físicas, aunque se suele admitir el rango de valores comprendidos entre 2 y 12,5 Tn/Ha/año (FAO, 1980). Para valores mayores no se garantiza la conservación de los suelos, ya que la tasa de destrucción de los mismos es más rápida que la de creación.

La ecuación USLE está dada por:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde:

A = Pérdida de suelo promedio anual en (t/ha/año).

R = Factor de erosividad de las lluvias en (MJ/ha*mm/hr).

K = Factor de erodabilidad del suelo en (t/ha MJ*ha/mm*hr).

L = Longitud de la pendiente (m)

S = Gradiente de la pendiente (%)

C = Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal), adimensional.

P = Factor de prácticas de conservación (conservación de la estructura del suelo), adimensional

4.2.1. Factor R

El Factor R mide el efecto de las precipitaciones sobre la erosión, y es igual a la energía cinética de las precipitaciones “ E ” multiplicada por la intensidad máxima de lluvia en 30 minutos (I_{30}). Es decir, cuantifica el potencial erosivo de la lluvia que afecta el proceso de erosión del suelo.

$$R = \frac{E I_{30}}{100} \text{ julios-cm/ m}^2\text{-hora}$$

Donde:

E = energía cinética del aguacero (J/m^2)

I_{30} = Máxima intensidad de lluvia en 30 minutos (cm/h)

Cuando no se cuenta con los registros continuos necesarios para utilizar esta ecuación, el Factor R es comúnmente estimado mediante la ecuación Índice de Fournier o de Agresividad Climática (Fournier, 1960; Almorox Alonso, et al., 1994), que muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IF = \frac{Pp^2max}{P}$$

Donde:

IF = Índice de Fournier

Pp^2max = Precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año (mm)

P = Precipitación media anual (mm)

Al aplicar el índice de Fournier para la estimación del factor R en otros lugares de nuestro país, se concluyó que el IMF (Índice Modificado de Founier por Arnoldus) (Arnoldus, 1978), presenta un mayor ajuste con el factor R (Dufilho, et al., 2007; Crettaz, et al., 2016). Este índice está dado por la siguiente ecuación:

$$A = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$$

Donde:

p_i = precipitación del mes i

P = precipitación anual

Los datos utilizados para la aplicación de esta última ecuación corresponden al análisis de la recarga de acuíferos de la Provincia del Neuquén realizado por Gatica (2017), en el cual se estimaron las precipitaciones mensuales de acuerdo a los datos correspondientes a los años 1961 – 1991.

4.2.2. Factor K

El factor K mide la erosionabilidad del suelo, es decir, la tendencia del suelo a ser arrancado por la lluvia y transportado por la escorrentía, y depende de las propiedades del suelo. Generalmente son menos erosionables los suelos profundos permeables de arenas gruesas, y más erosionables los suelos arenosos y poco profundos sobre suelo impermeable. Los valores más bajos representan una mayor resistencia a la erosión, siendo 0 el valor que corresponde a afloramientos rocosos, mientras que los valores más altos corresponden a los suelos más erosionables (MMA, 2014).

Este valor se determina empíricamente, y se expresa en T/Ha por unidad de pluviosidad EI_{30} en condiciones estándar de pendiente de 9%, longitud de 22,13m y en barbecho continuo. Puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación (Wischmeier, et al., 1971):

$$100K = [10^{-4} 2,71T^{1,14} 12 - MO + 4,2E - 2 + 3,2P - 3]$$

Donde:

T = Parámetro de textura de los 15 cm superficiales, calculado a partir de la siguiente fórmula:

$$T = [100 - A_c L + Armf]$$

$L + Armf$ = limo + arena fina (0,1 - 0,002 mm)

A_c = Arcilla (<0,002 mm)

MO = contenido en materia orgánica (%)

E = parámetro de estructura

P = Parámetro de permeabilidad

Por otra parte, también puede ser calculado mediante el nomograma de Wischmeier & Smith (1978).

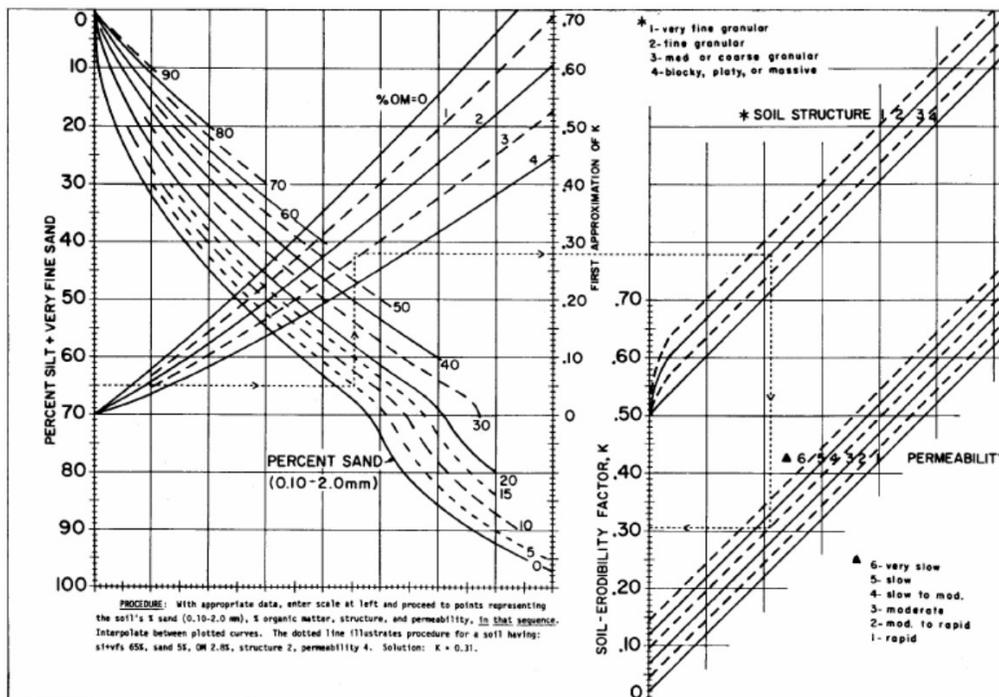


Figura 12: Nomograma de Erodabilidad del Suelo (tomado de Wischmeier & Smith, 1978)

A partir de este nomograma, Rapacioli, (2010) derivó una tabla para la estimación del factor K a partir de la textura, adaptado al Sistema Internacional de Unidades (en $(T_n \cdot H_s / N \cdot H_a)$). Esta tabla fue usada en el presente trabajo para la determinación del factor K en el área de estudio, ya que no se contaba con información de campo sobre estructura y permeabilidad.

Textura	Contenido de Materia Orgánica		
	0,5%	2%	4%
Arena	0,056585	0,033951	0,022634
Arena Fina	0,181072	0,158438	0,113170
Arena Muy Fina	0,475314	0,407412	0,316876
Franco Arenoso	0,135804	0,113170	0,090536
Franco Arenoso Fino	0,271608	0,226340	0,181072
Franco Arenoso Muy Fino	0,497948	0,430046	0,339510
Arenoso Franco	0,305559	0,271608	0,215023
Arenoso Franco Fino	0,396095	0,339510	0,271608
Arenoso Franco Muy Fino	0,531899	0,463997	0,393461
Franco	0,430046	0,384778	0,328193
Franco limoso	0,543216	0,475314	0,373461
Limo	0,679020	0,588484	0,475314
Franco Arcillo Arenoso	0,305559	0,282925	0,237657
Franco Arcilloso	0,316976	0,282925	0,237657
Franco Limo Arcilloso	0,418729	0,362144	0,294242
Arcillo Arenoso	0,169755	0,147121	0,135804
Arcillo Limoso	0,282925	0,260291	0,215023
Arcilla		0,147121 0,328193	

Tabla 1: Valores del Factor K (tomada de Rapacioli, 2010)

Para la determinación de este factor, se realizó en primer lugar un mapa de suelo del área tomando como base la digitalización del Mapa de Suelo de la Provincia del Neuquén (Irisarri, 2006), y ajustándolo al área de estudio de acuerdo al MDE 30x30 obtenido del IGN junto con las imágenes satelitales de Google. Luego, se obtuvieron las descripciones de los suelos para cada Unidad Cartográfica (UC) identificada a partir del Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén (Ferrer, et al., 1990), desde las cuales se obtuvieron los parámetros necesarios de textura.

Respecto a la materia orgánica, se consideró un valor de 0,5% debido a las características de aridez de la zona de estudio.

A continuación, se describen las características de las UC delimitadas, y se indica la valoración asignada para el factor K:

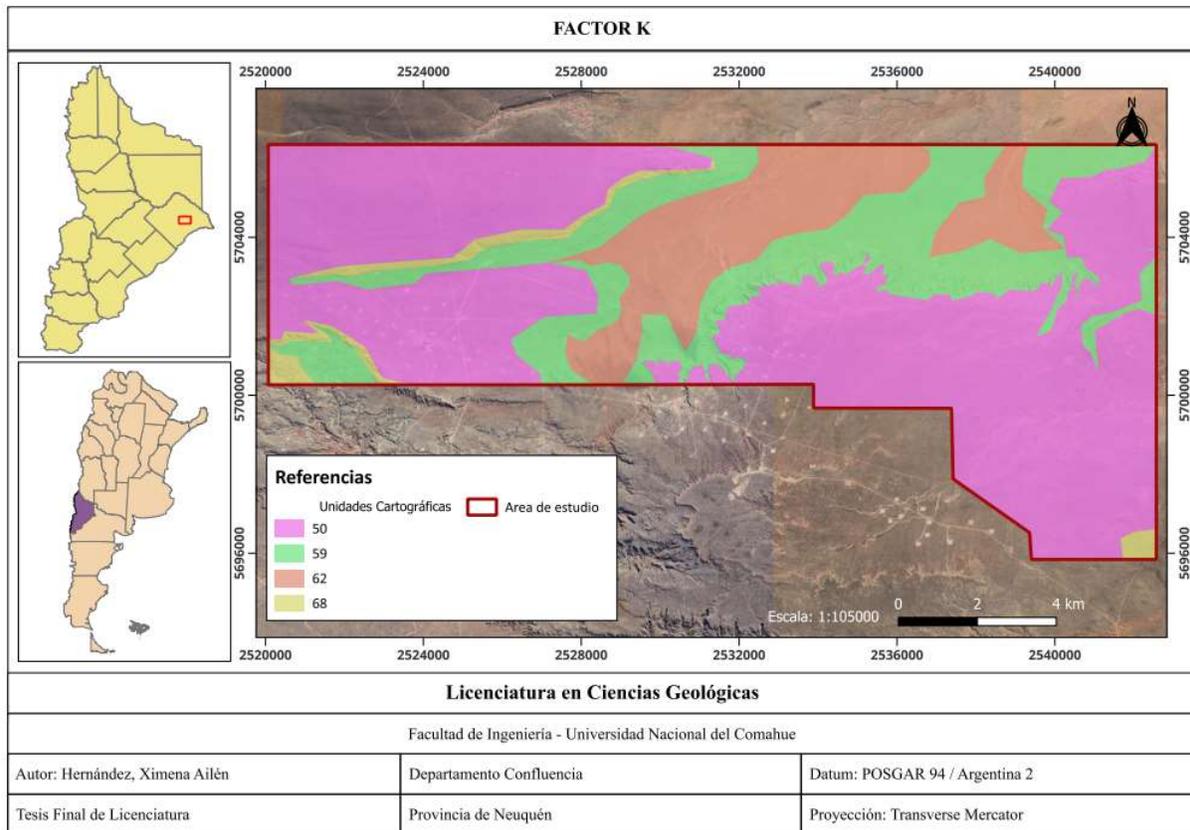


Figura 13: Unidades cartográficas identificadas

UC	Suelo dominante	Textura	Geomorfología	K
50	Paleortides típicos	Gruesa, someros por manto calcáreo cementado	Sectores aislados de planicies por arrasamiento, en parte disectados	0,056585
59	Torriortentes típicos, moderadamente gruesos	Gruesa (franco arenoso) y típicamente +20% fragmentos gruesos. Carecen de estructura o con débil agregación. Se asocian a sectores débilmente deprimidos.	Planicie aluvial pedemontana (bajada) y conos aluviales “convergentes”. En algunos casos, pedimento con cobertura	0,135804
62	Torrifluventes típicos	Estructura laminar fina y débil, levemente salinos. Arcillas.	Cuencas endorreicas y estrechos valles de cursos temporarios y efimeros	0,418729
68	-	Roca	Talud de planicies sedimentarias estructurales, pendiente abrupta y escalonada	0

Tabla 2: Análisis de suelo

4.2.3. Factor LS

Este factor se refiere al efecto combinado de la longitud y el gradiente de la pendiente. Se obtiene multiplicando el subfactor longitud (L) por el subfactor gradiente (S). Los resultados de este factor aumentan con una mayor pendiente y disminuyen en zonas más planas.

El factor L mide el efecto del largo de la pendiente en la erosión, tomando como base una longitud de las parcelas normalizadas en 22,13m. Se estima mediante la siguiente ecuación:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^m$$

Donde:

λ = longitud del declive en metros

m = exponente influenciado por la interacción entre la longitud del declive y la pendiente.

En la práctica varía entre 0,5 (pendiente >10%) a 0,6 (<10%).

Por otro lado, el factor S mide el efecto de la inclinación del terreno en la erosión, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{0,43 + 0,30s + 0,043s^2}{6,613}$$

Donde:

S = factor pendiente

s = inclinación en porcentaje.

Para incorporar el impacto de la convergencia del flujo (RUSLE), se debe reemplazar la longitud de la pendiente por el área contribuyente pendiente arriba por unidad de ancho de curva (Moore & Wilson, 1992; Desmet & Govers, 1996; Mitsova, et al., 1996). El factor LS en un punto de la pendiente $r(x,y)$ resultaría:

$$LS(r) = (m + 1) \left[\frac{A_e(r)}{22,13} \right]^m \left[\frac{\text{sen } b(r)}{\text{sen } 5,143^\circ} \right]^n$$

Donde:

A_e = área específica obtenida a partir de la relación entre el área de contribución aguas arriba, A , y la unidad de ancho de contorno o curva de nivel, que se asume es igual al ancho de una celda de la grilla

B = ángulo de la pendiente en grados

m y n = son parámetros variables para el tipo de flujo y condiciones de suelo.

Los valores típicos para el parámetro m contemplan un intervalo entre 0,4 a 0,6; mientras que para n entre 1,0 a 1,3. Valores bajos de estos parámetros deben utilizarse en zonas en que el flujo sea de tipo laminar, con buena cobertura vegetal, y con poca probabilidad de escorrentía concentrada en regueros o surcos. Los valores más altos se emplean en zonas con flujo turbulento, con facilidad de aparición de pequeñas cárcavas y regueros. Cuando no se tiene información sobre el tipo de flujo, usualmente se utilizan $m = 0,4$ y $n = 1,3$.

En Neteler & Mitsova (2004), se propone la siguiente ecuación para determinar el factor LS con GRASS-QGIS, teniendo en cuenta las anteriores consideraciones:

$$LS = 1,4 \left(\frac{\text{flujo acumulado} * \text{tamaño de celda}}{22,1} \right)^{0,4} * \left(\frac{\text{sen pendiente}}{0,09} \right)^{1,3}$$

Por otro lado, existe una metodología alternativa para el cálculo de este factor, cuyo objetivo es evitar la sobreestimación del potencial erosivo del cauce en todo su trayecto, debido a que la erosión tiende a ser mayor en el sector de la cabecera y los primeros tramos, perdiendo potencial erosivo hacia zonas más planas. Para el área de estudio, se consideró un límite superior de influencia de la pendiente de 200 metros, el cual se obtuvo a partir de la máxima diferencia de cotas en el área.

Se realizó el cálculo de este factor utilizando ambas metodologías, obteniendo así dos posibles resultados.

4.2.4. Factor C

El factor C expresa la relación entre las pérdidas de suelo en una parcela con una determinada cobertura vegetal, y las pérdidas que tienen lugar en una parcela con barbecho continuado, a igualdad de las demás condiciones. Valores bajos de este factor corresponden a mayor cobertura vegetal y terreno más consolidado, es decir, más resistente a la erosión, mientras que valores más altos representan una menor cobertura vegetal o vegetación de menor porte.

El factor C describe:

- 1- La protección aérea que la vegetación proporciona al suelo.
- 2- La protección que proporciona la vegetación en contacto con la superficie del suelo.
- 3- Los efectos que los residuos de la vegetación tienen en la protección del suelo, tanto por la cobertura como por la variación que pueden provocar de sus propiedades físicas.

Este factor puede ser estimado a partir de tablas proporcionadas por el *US Soil Conservation Service* para distintos tipos de cultivo, áreas forestales, pastizales y terrenos baldíos (MMA, 2014). También puede ser estimado mediante índices espectrales, normalmente a partir del cálculo del Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI).

El NDVI es calculado a partir de imágenes satelitales mediante la aplicación de la siguiente fórmula (Rouse, et al., 1974):

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

Donde:

NIR = Reflectancia espectral en la banda del infrarrojo cercano

RED = Reflectancia espectral en la banda del rojo visible

El NDVI se puede correlacionar directamente con el factor C mediante una regresión lineal (Durigon, et al., 2014; Lin, et al., 2002) o exponencial (van der Knijff, et al., 1999). En este trabajo se utilizó la regresión lineal de Durigon et al. (2014), cuya ecuación inicial es la siguiente:

$$Factor\ C = \frac{(1 - NDVI)}{2}$$

Esta ecuación fue adaptada por Colman (2018) para corregir sesgos, comparando el factor C obtenido mediante teledetección y los resultados obtenidos en trabajos de campo, proponiendo la siguiente fórmula ajustada:

$$C_{rA} = 0.1 \left(\frac{-NDVI + 1}{2} \right)$$

Para el desarrollo del presente trabajo, el cálculo de este factor se realizó a partir de las imágenes del satélite Sentinel 2 obtenidas desde el complemento *SentinelHub* de *QGIS* (Sinergise Ltd., 2023).

4.2.5. Factor P

El factor P mide el efecto de las prácticas de conservación, relacionando la cantidad de suelo perdido utilizando la práctica de conservación, a la cantidad perdida sin ella. Se determina mediante las tablas elaboradas por Wischmeier & Smith, (1978). A modo de ejemplo, el factor P puede referirse a:

- Cultivos en contorno
- Sistemas de fajas
- Buffer, filtro, intercultivo, barreras vegetadas
- Terrazas/Desviaciones (canal guarda)
- Embalses
- Drenaje subsuperficial

En caso de no existir prácticas, como es el caso del área de estudio del presente trabajo, su valor es 1.

4.2.6. Valorización de resultados

Una vez adquiridos los valores correspondientes a cada factor, se aplica la Ecuación Universal de Suelo y se obtiene el resultado en formato de archivo ráster. Con el objetivo de diferenciar los niveles de riesgo de forma visual, se definieron distintas clases, las cuales se basan en la siguiente clasificación por niveles erosivos establecida en el Mapa del grado de erosión hídrica de los suelos de la CAPV (Gobierno Vasco, 2005).

El uso de una clasificación establecida previamente permite tener un punto de comparación independiente del área de estudio y, además, permite observar fácilmente si los resultados obtenidos son acordes aquellos obtenidos en otros trabajos.

Pérdidas de suelo (t/ha año)	Interpretación	Riesgo de erosión
0	Zonas no susceptibles al proceso erosivo, como puedan ser espacios urbanos, carreteras, embalses, etc.	Bajo
0-5	Zonas con niveles de erosión muy bajos y pérdidas de suelo tolerables. No hay erosión neta.	Bajo
5-10	Zonas con niveles de erosión bajos y pérdidas de suelo que pueden ser tolerables. Probablemente no hay erosión neta.	Medio
10-25	Zonas con procesos erosivos leves. Existe erosión, aunque no es apreciable a simple vista.	Medio
25-50	Zonas con procesos erosivos moderados. Existe erosión aunque puede no ser apreciable a simple vista.	Alto

Pérdidas de suelo (t/ha año)	Interpretación	Riesgo de erosión
50-100	Zonas con procesos erosivos graves. Existe erosión y es apreciable a simple vista.	Alto
100-200	Zonas con procesos erosivos muy graves. Existe erosión y es manifiesta a simple vista.	Alto
>200	Zonas con procesos erosivos extremos. Existe erosión y es evidente a simple vista.	Alto

Tabla 3: Clasificación USLE (Gobierno Vasco, 2005)

4.3. Determinación de la erosión por SPI

Otra de las técnicas existentes para cuantificar los procesos de erosión sobre cuencas es mediante índices de erosión, como es el caso del SPI (*Stream Power Index*), que mide las tasas de erosión en unidades de potencia.

De acuerdo a Wilson & Lorang, (2000), el SPI es la medida del poder erosivo del flujo de agua, basado en la premisa de que el caudal es proporcional al área de captación específica (m²), y predice la erosión neta en áreas de perfil convexo y de convexidad tangencial (zonas de convergencia y de aceleración de flujo), así como la depositación de sedimentos en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo).

Se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S$$

Donde:

Ω = potencial de la corriente por unidad de longitud de de flujo (W/m)

ρg = densidad \times aceleración de la gravedad = peso específico del fluido (kg/m³)

Q = caudal (m³/s)

S = pendiente local (m/m)

Para este trabajo, el valor de ρg se considera de 1000 kg/m³, que es el peso específico del agua dulce a 4°C.

A partir de la definición, se puede observar que valores altos de este índice se pueden corresponder con zonas montañosas, empinadas o de alta pendiente, así como también con zonas con aumento de caudal. Valores bajos se asocian a zonas de baja pendiente como llanuras aluviales, llanuras de inundación o áreas de lenta subsidencia (Finnegan, et al., 2007).

El SPI representa la tasa de disipación de la energía debido a fricción y retrabajo en el lecho y bancos por unidad de longitud del cauce. Ha sido usado extensamente para medir el transporte de sedimento y, en general, la evolución del patrón del canal en un río (Bagnold, 1977; Ferguson, 2005).

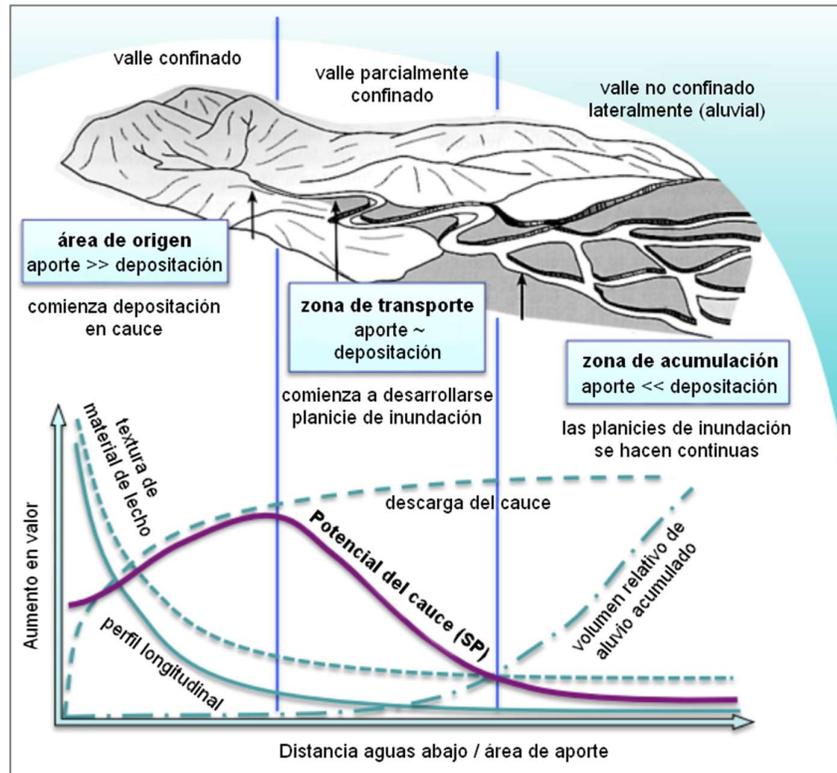


Figura 14: Representación esquemática de la relación entre cambios aguas abajo a lo largo de un río y las transiciones asociadas del proceso de sedimentación (traducido de De Rosa, et al., 2019).

El SPI puede ser considerado una medida de las principales fuerzas que actúan en un canal, influenciando la capacidad que tiene un cauce para transportar sedimentos. Los análisis a gran escala de la cuenca de un río pueden indicar, de forma preventiva, las áreas más “sensibles” a los cambios, siendo más propensas a fenómenos inestables causados por dinámicas fluviales (De Rosa, et al., 2019).

Para el cálculo de este índice, se hizo uso del módulo *r.stream.power* de *GRASS GIS* (De Rosa, et al., 2019).

4.4. Erosión hídrica

Para la determinación final de la erosión hídrica, se ponderaron los mapas resultados de los cálculos de USLE y SPI. Los factores de ponderación fueron diferenciados para las dos metodologías utilizadas en el cálculo de USLE, buscando asignar una igual importancia al efecto tanto de los cauces como de la pendiente.

Metodología 1 (LS base)

$$Riesgo = 0,3 * USLE + 0,7 * SPI$$

Metodología 2 (LS con pendiente reducida)

$$Riesgo = 0,5 * USLE + 0,5 * SPI$$

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Factor R

Para el cálculo de este factor se utilizó el Índice Modificado de Fournier, obteniendo resultados acordes a la bibliografía consultada. A continuación, se presenta el mapa obtenido:

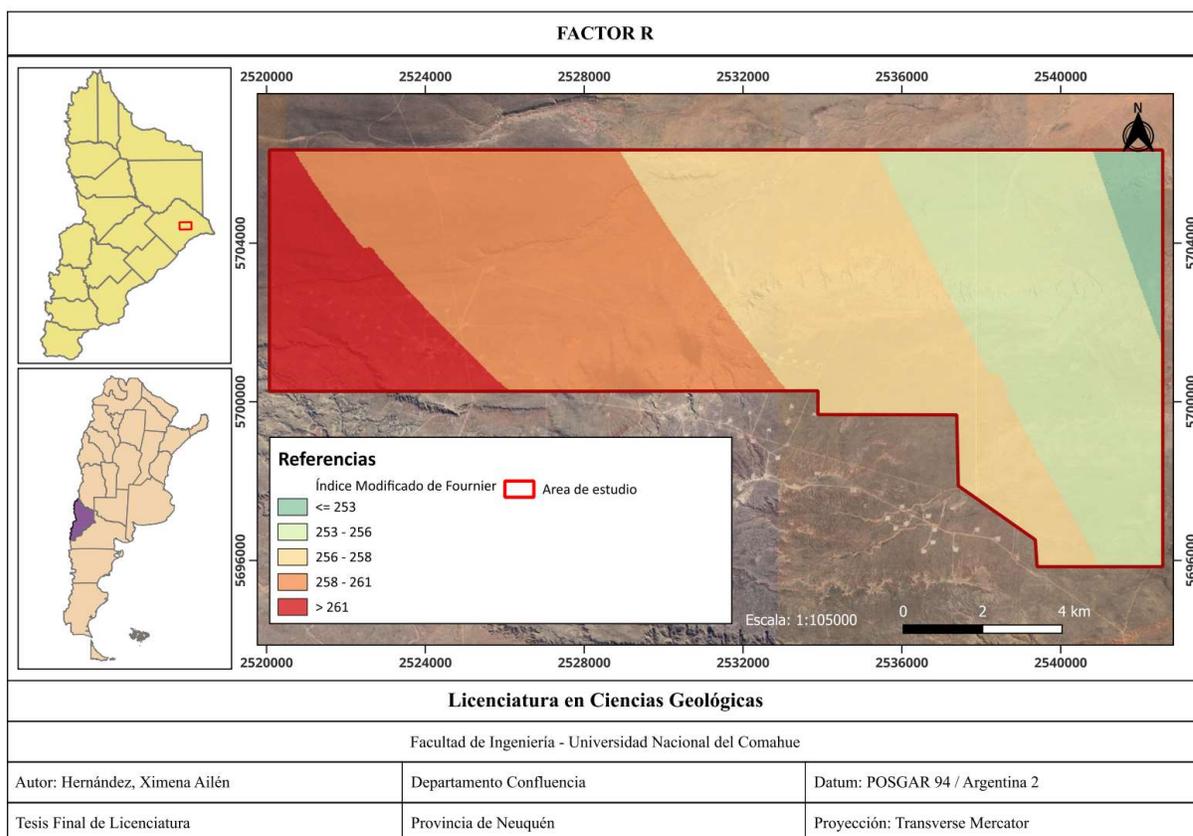


Figura 15: Factor R

Como puede observarse en el mapa, los valores de IMF disminuyen hacia el lateral este del área. Sin embargo, por ser un área de poca extensión y, por lo tanto, presentar muy poca variación en cuanto a precipitaciones, la leve variación observada en este factor no será de influencia en el resultado final.

5.2. Factor K

Para el cálculo de este factor, se elaboró en primer lugar un mapa de suelos, identificando las distintas UC y asignándoles su respectivo valor de K, como fue mencionado en el apartado Metodología. El mapa resultado se presenta en la siguiente figura.

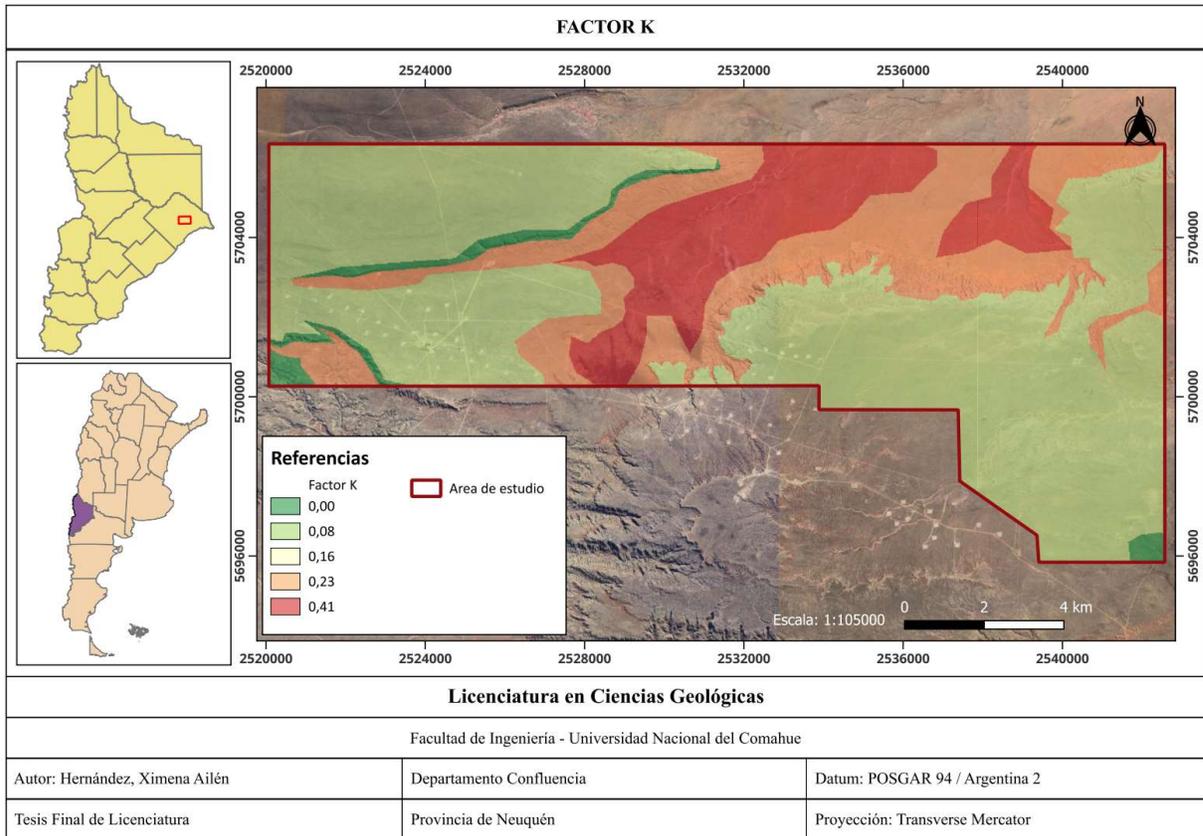


Figura 16: Factor K

Se puede observar que los menores valores de K corresponden a los taludes, por estar compuestos de roca, y luego a la zona de mesetas, por lo que se interpretan como sectores poco erosionables. Las zonas de pedimento presentan un valor mayor y, por último, la zona de bajo presenta los mayores valores de K en la zona de estudio, por lo que se considera el sector más erosionable.

5.3. Factor LS

Tal como fue mencionado previamente, el factor topográfico fue calculado mediante dos metodologías distintas: la Metodología 1, que considera la fórmula base propuesta por Mitasova, et al. (1996); y la Metodología 2, que considera una posible sobreestimación de la longitud de ladera.

Para facilitar la interpretación de los resultados, se expone el mapa de pendientes obtenido a partir del Modelo Digital de Elevación.

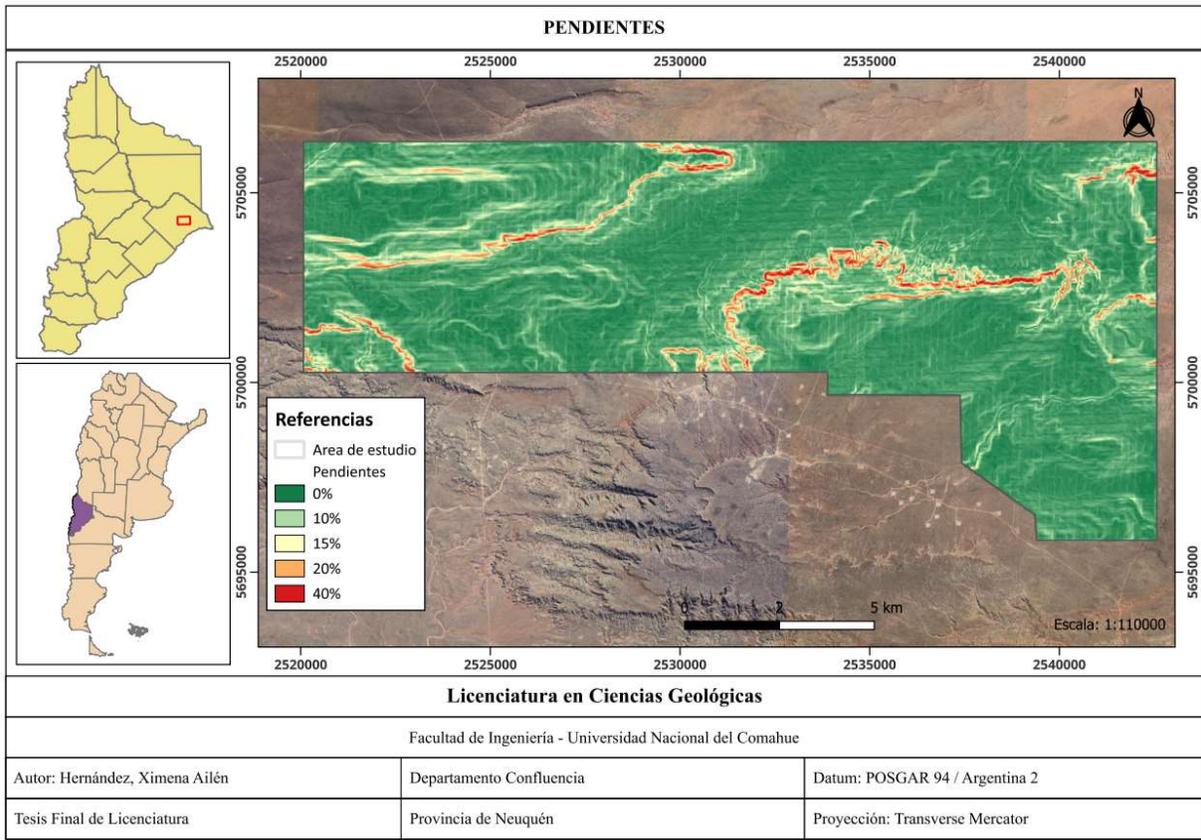


Figura 17: Mapa de pendientes

Al utilizar la Metodología 1, se obtuvo el siguiente mapa resultado:

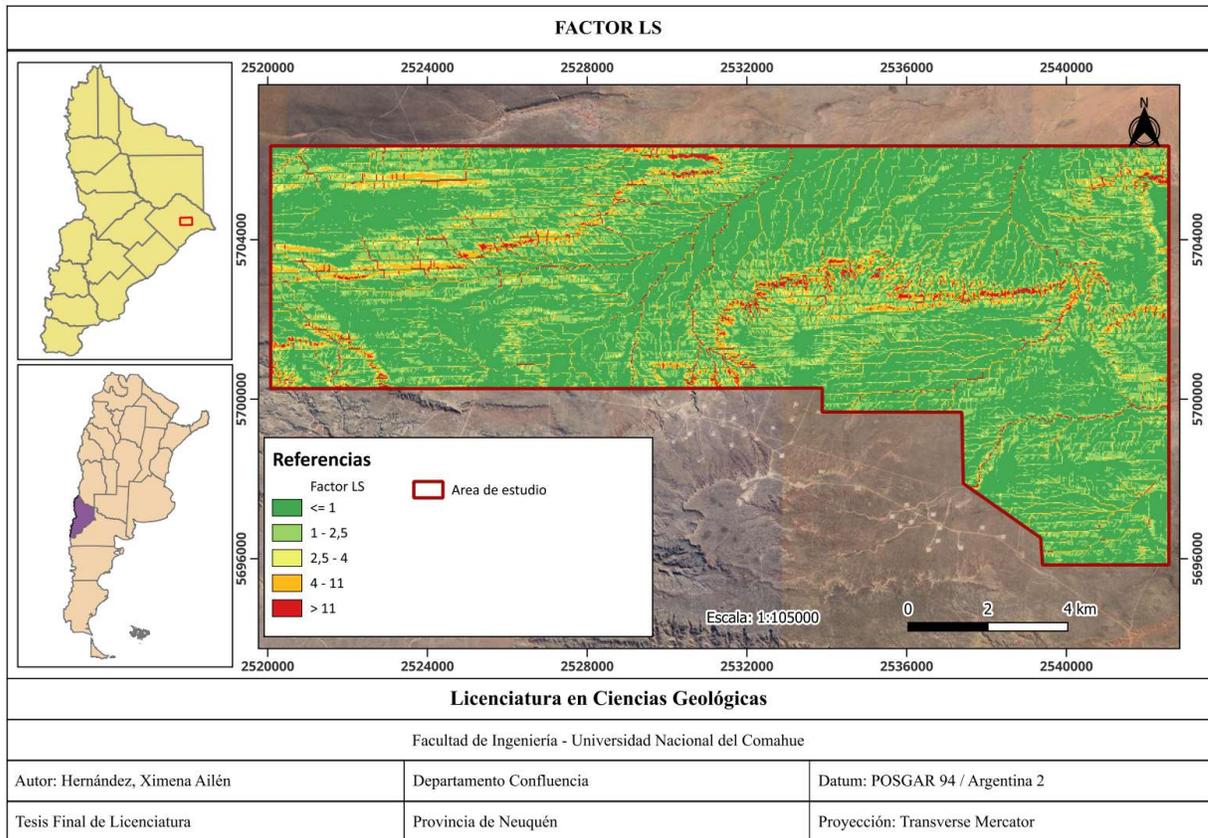


Figura 18: Factor LS (metodología 1)

Luego, considerando una posible sobreestimación de la pendiente, se reajustó el cálculo para considerar una pendiente máxima de 200 metros y se obtuvo el siguiente mapa resultado:

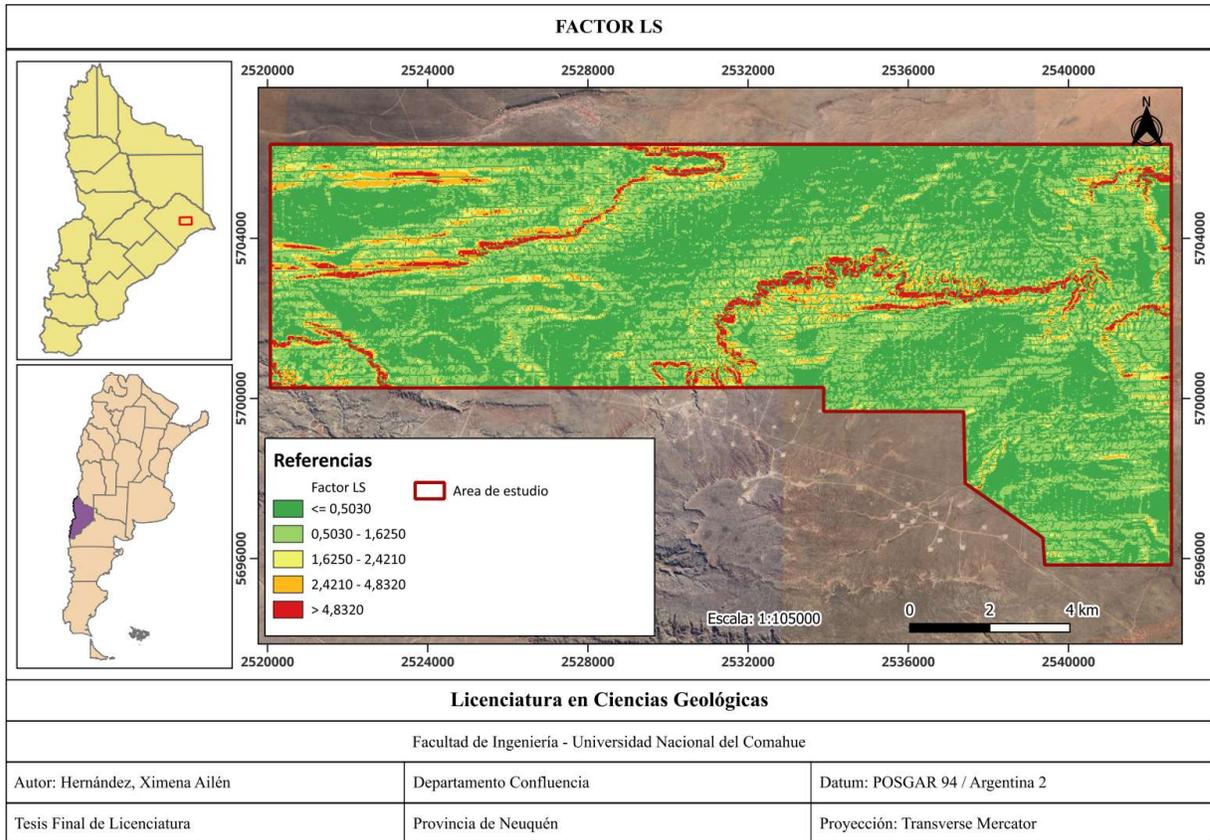


Figura 19: Factor LS (metodología 2)

Como se puede observar en estos mapas presentados, al utilizar la fórmula base se destaca una influencia tanto de los cauces temporales como de las pendientes, observándose mayores valores de este factor imitando tanto la forma de la red de drenaje como de los sectores de talud. Por otro lado, al considerar una posible sobreestimación de la longitud de ladera, se observa una mayor influencia de las pendientes, despreciando el efecto de los cauces.

5.4. Factor C

Se calculó el valor de este factor mediante la fórmula propuesta por Colman (2018), utilizando las imágenes del satélite Sentinel 2. Se obtuvo el siguiente mapa resultado:

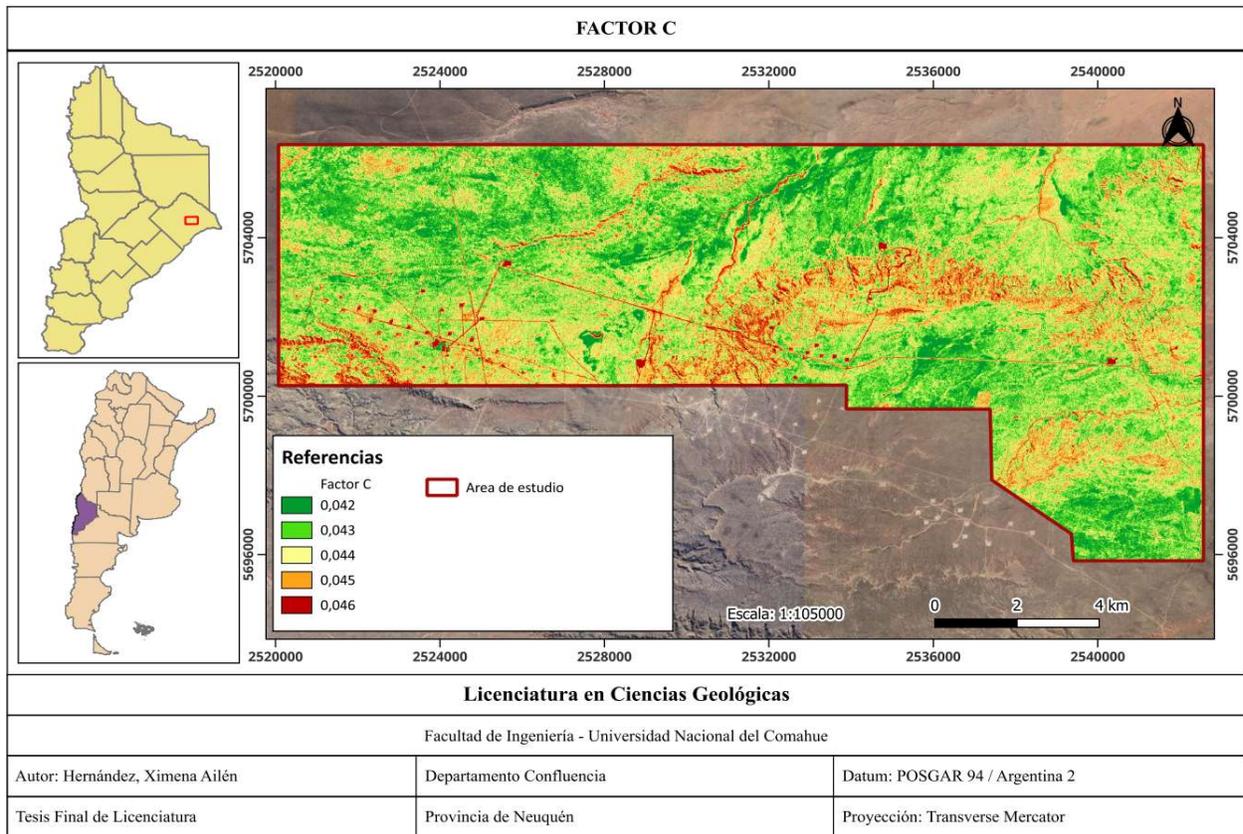


Figura 20: Factor C

De acuerdo a este mapa, se destaca la influencia de las áreas desmontadas tanto naturalmente debido a las altas pendientes y cauces temporales, como antrópicamente debido al desarrollo hidrocarburífero del área.

5.5. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con cada metodología, utilizando la simbología del Mapa del grado de erosión hídrica de los suelos de la CAPV (Gobierno Vasco, 2005).

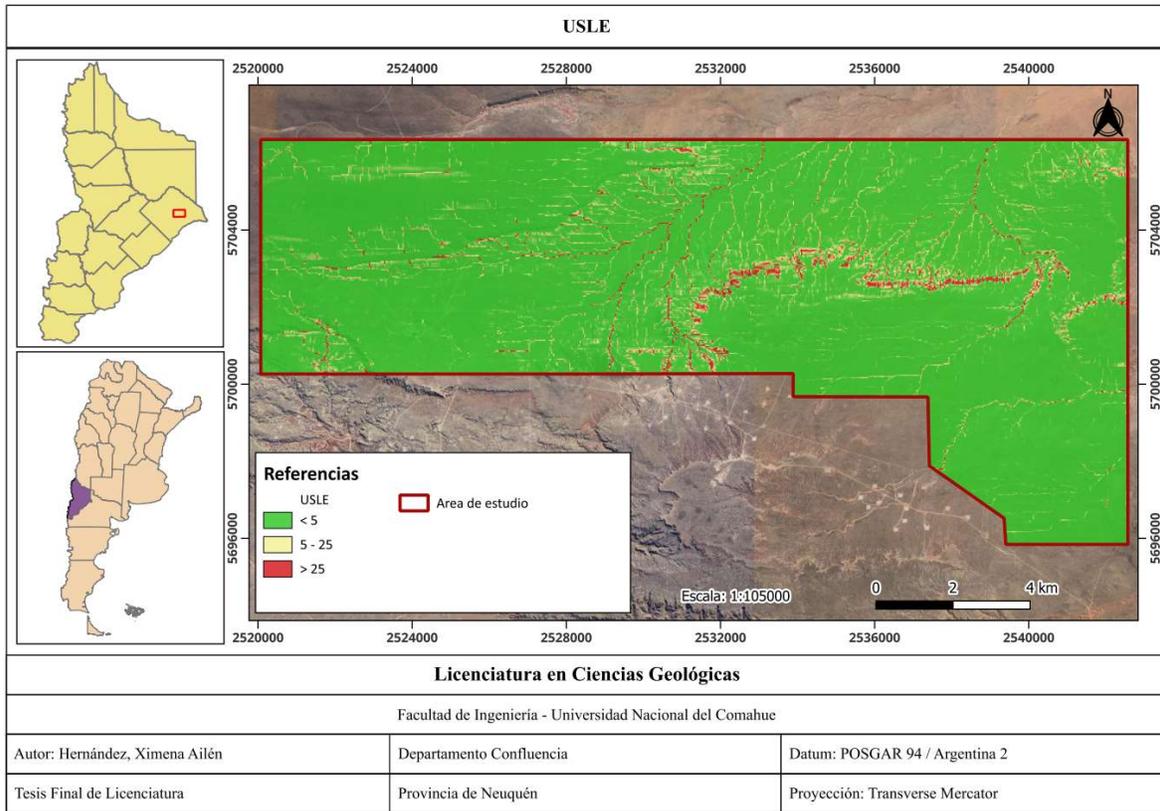


Figura 21: USLE (Metodología 1)

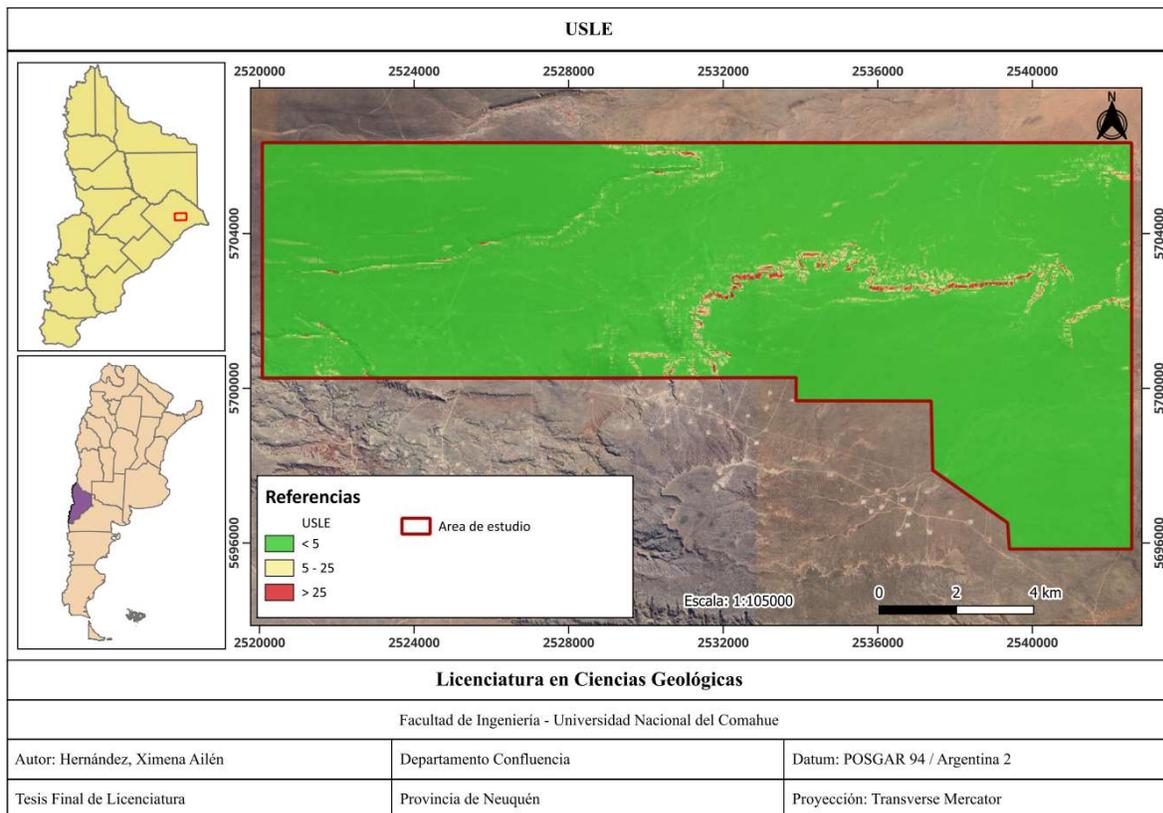


Figura 22: USLE (Metodología 2)

Para facilitar la interpretación, se incluye además el mapa obtenido al superponer la red de drenaje con el resultado de la Metodología 1.

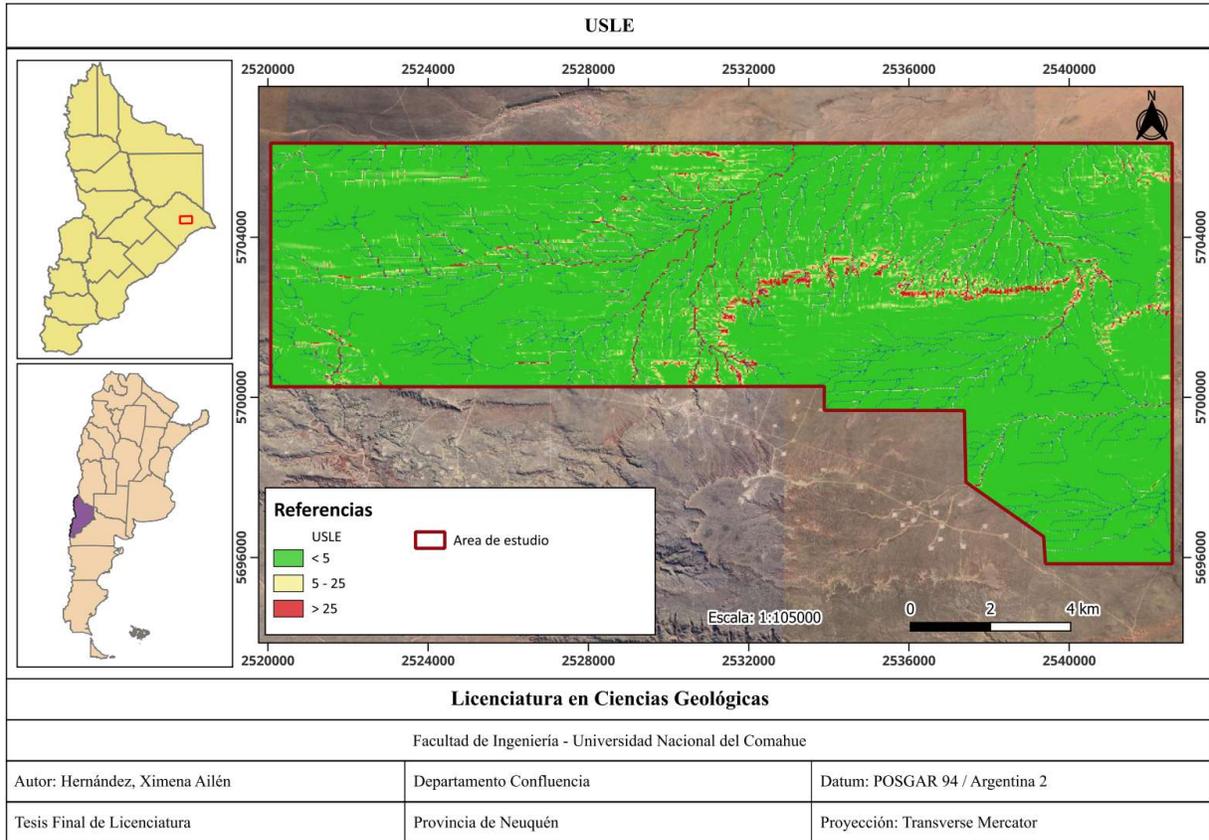


Figura 23: USLE (red de drenaje)

A partir de los mapas obtenidos, se puede observar que la pérdida de suelo está principalmente dada en los taludes, es decir, en los sitios de mayor pendiente, así como también en los principales cauces temporales. También se destaca que la mayor o menor influencia de estos cauces es consistente con la observable en los respectivos resultados del factor LS para cada metodología, lo cual demuestra que es uno de los factores más influyentes en la pérdida de suelo en el área de estudio.

Al comparar con el mapa de la Figura 23: **USLE (red de drenaje)** se puede notar que la red de drenaje presente en la zona de mesetas no se ve representada en el resultado con el mismo riesgo que aquella correspondiente a la zona de bajo. Esto se correspondería a la diferencia en el tipo de suelo entre ambos sectores, siendo el suelo de las planicies el menos erosionable.

Por este motivo, se identifica la zona de mesetas como el sector de menor riesgo, ya que presenta una pendiente baja y menor potencial erosivo de la red de drenaje debido a su suelo más resistente. Las zonas de pedimento y de bajo contienen un mayor porcentaje de su extensión con riesgo medio, debido a sectores con mayor pendiente (en el caso del pedimento) y al tipo de suelo más erosionable, lo cual predispone una mayor influencia de la red de drenaje. Por último, como fue mencionado en párrafos anteriores, los sectores de talud se destacan como los más riesgosos debido a su alta pendiente.

Por último, se observa que el rango de resultados obtenidos es acorde a la tabla de clasificación del Gobierno Vasco.

5.6. Índice de Potencia de la Corriente

Para el caso del Índice de Potencia de la Corriente, al no encontrar otros valores de referencia para su clasificación, se elaboró una clasificación propia a partir del desvío estándar de los resultados obtenidos, generándose las siguientes clases de riesgo:

Resultados SPI	Valoración
0 – 1119,7	Bajo
1119,7 – 3144,85	Medio
> 3144,85	Alto

Tabla 4: Clasificación SPI

El mapa resultado es el siguiente:

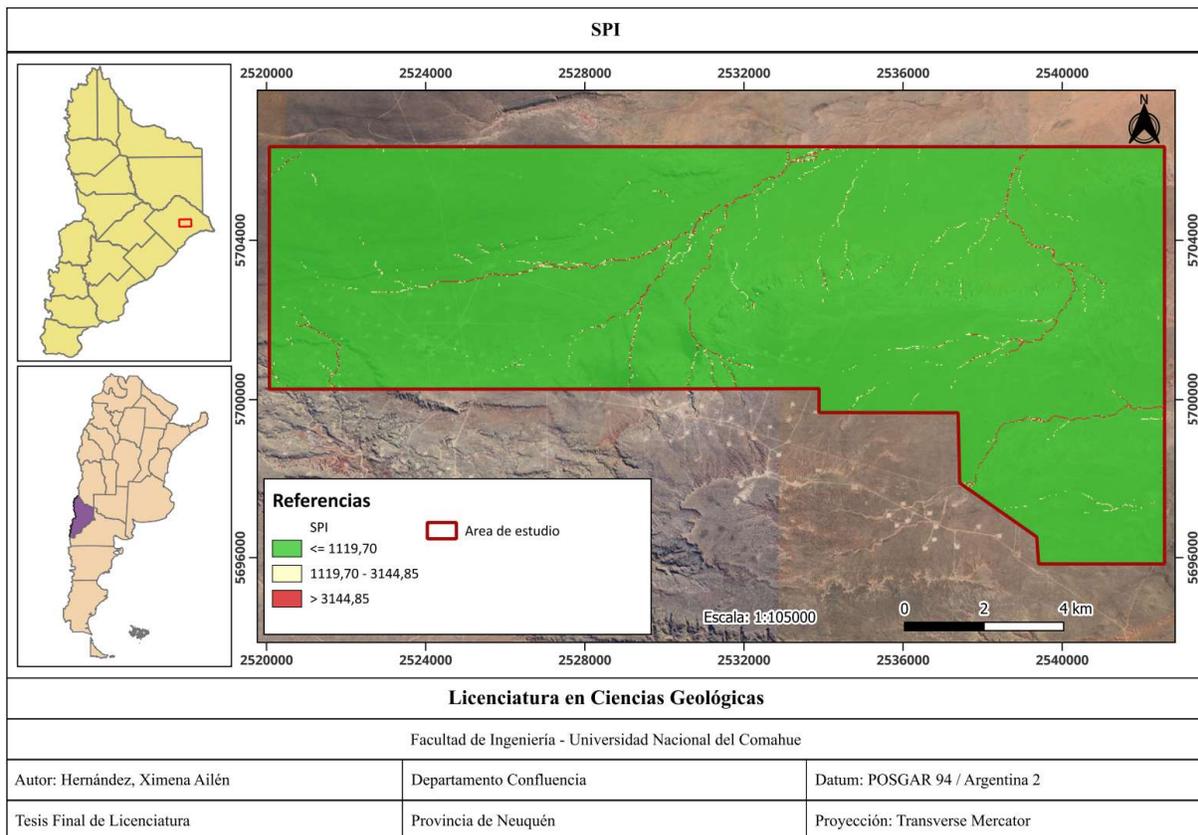


Figura 24: Índice de Potencia de la Corriente

Como se puede observar en la figura anterior, este índice destaca la influencia de los cauces más importantes del área de estudio en cuanto a su potencial erosivo.

5.7. Erosión Hídrica

Los mapas finales fueron elaborados a partir de una ponderación de los resultados de la ecuación USLE y el índice SPI. Se obtuvieron 5 valores resultado para cada uno de los mapas, y los mismos fueron clasificados a partir del Método de Optimización de Jenks de *Natural Breaks* (Jenks, 1967), obteniendo las siguientes clases:

Resultados ponderación	Clasificación
0,4	Bajo
0,6	Medio
0,7 (metodología 2) / 0,8 (metodología 1)	
1	Alto
1,2	

Tabla 5: Clasificación Riesgo Hídrico

A continuación, se exponen los mapas finales obtenidos.

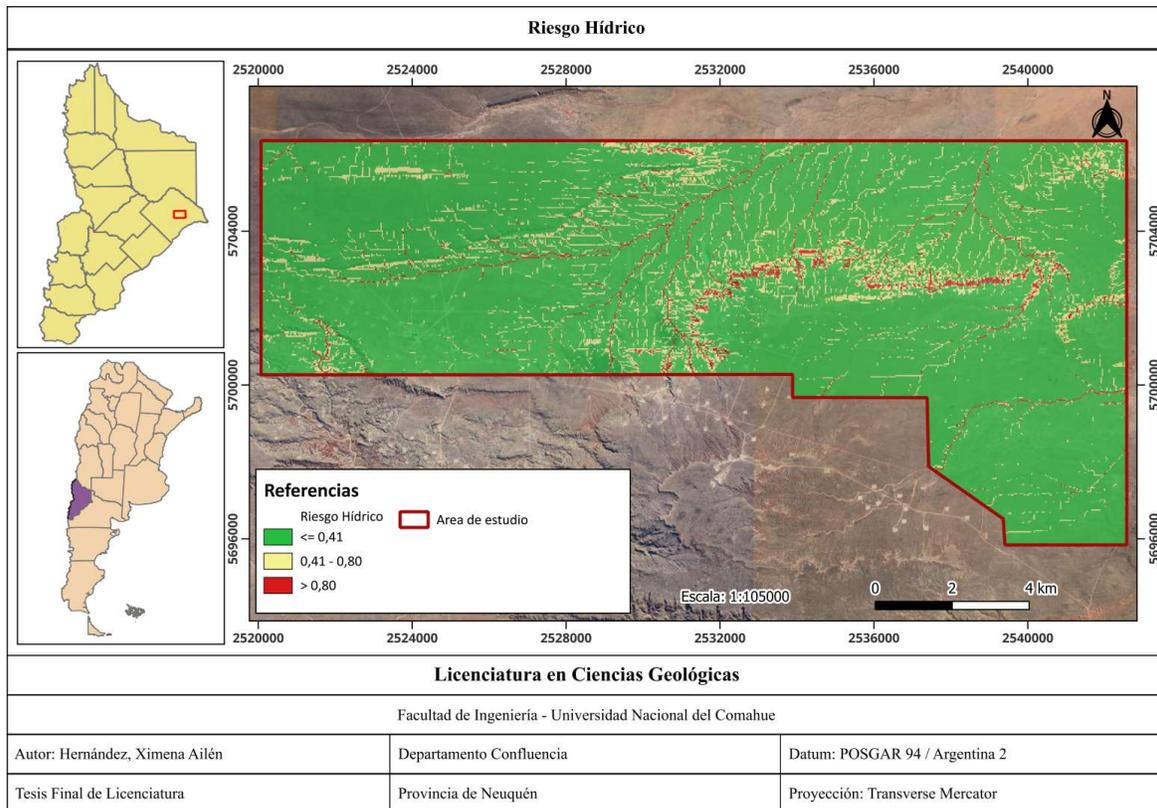


Figura 25: Riesgo Hídrico (metodología 1)

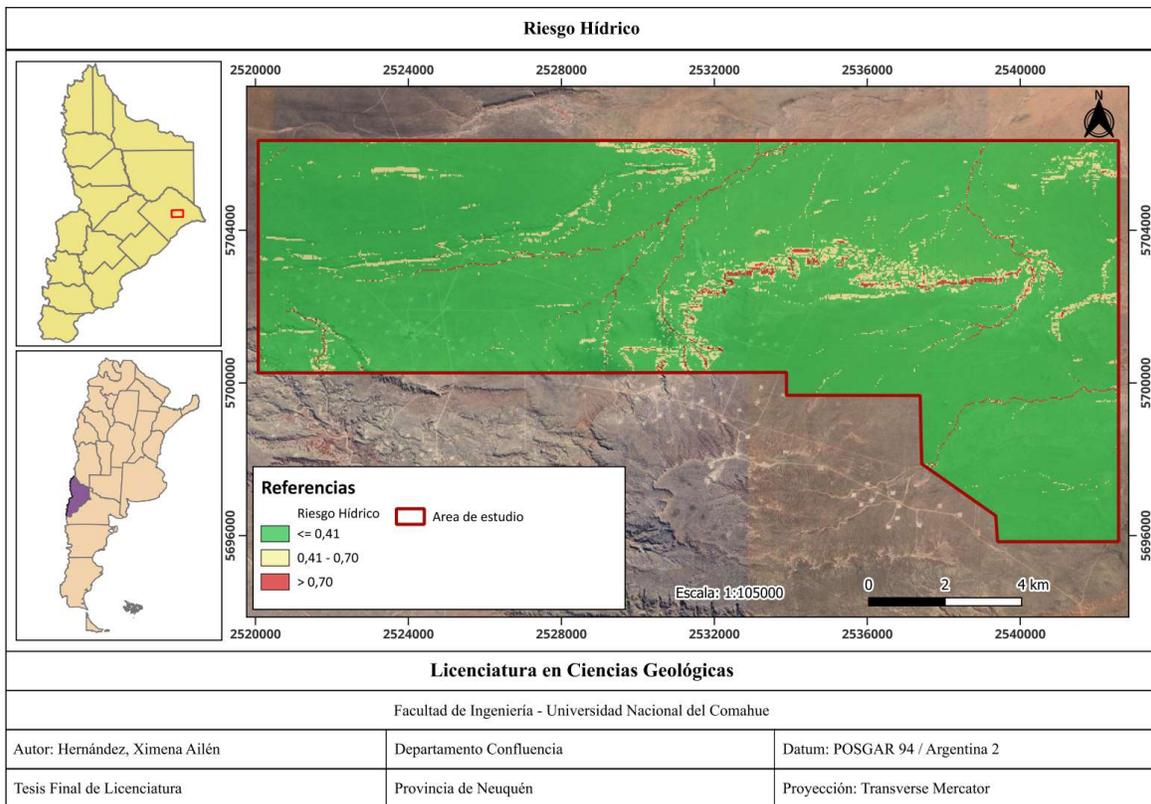


Figura 26: Riesgo Hídrico (metodología 2)

Al considerar ambos resultados, se observa que el mapa obtenido mediante la metodología 1 muestra una red hidrográfica clasificada en general como de riesgo medio en la parte central, con cauces principales destacados como de riesgo alto debido a la influencia del índice SPI. Además, se observan los sectores de mayor pendiente, correspondientes a los taludes y a partes de los pedimentos, con clasificaciones de riesgo medio y alto.

Por otro lado, el mapa obtenido mediante la metodología 2 mantiene en su mayor parte las mismas clasificaciones en las zonas de pendiente, así como también los cauces principales con riesgo alto, pero los cauces menores se ven drásticamente reducidos en cantidad.

Los cauces observables en el sector central en la Figura 25 sobreestiman en algunos sitios la red hidrográfica observada en las imágenes satelitales. Sin embargo, son un buen indicador del mayor nivel de riesgo de ese sector.

5.7.1. Análisis de riesgo general

A partir de los resultados expuestos en la Figura 25, se puede describir a nivel general que los sectores de menor riesgo abarcan aproximadamente un 88,04% del área, mientras que los sectores de riesgo medio abarcarían un 11,09% y los de mayor riesgo un 0,86%.

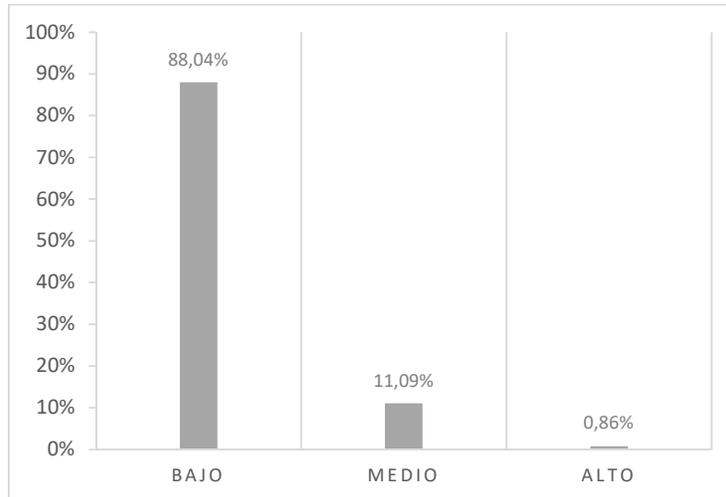


Tabla 6: Porcentajes de riesgo en el área

Para una descripción más detallada, el área fue dividida en 6 sectores principales de acuerdo a su topografía y red hidrográfica. A modo de aclaración, los mapas presentados en esta sección cuentan con transparencia para facilitar la visualización de la imagen satelital.

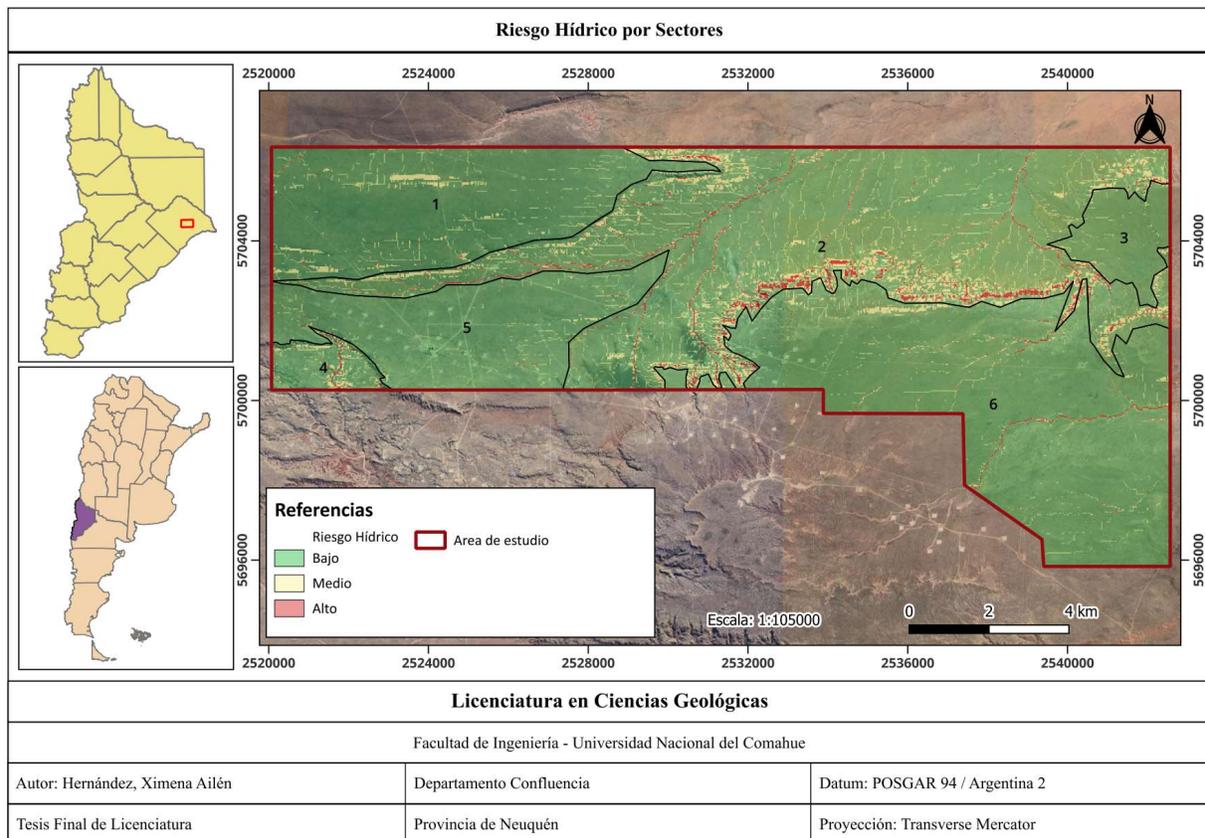


Figura 27: Sectores del área de estudio

Sectores 1, 3 y 5

Estos sectores presentan en general un riesgo bajo, y corresponden a los sectores de meseta. Presentan suelos de textura gruesa y cementados por manto calcáreo (Unidad

Cartográfica 50, Paleortides típicos), por lo que son de baja erosionabilidad. El sector 1 se ve afectado en baja medida por cauces temporales y pendientes altas en el extremo suroeste. En cuanto a los sectores 3 y 5, no presentan características de riesgo en ninguno de los factores analizados.



Figura 28: Sector 5 (tomada de Informe Ambiental (Physis SAS, 2024)).

Sectores 2 y 4

Los sectores 2 y 4 se ven muy afectados por cauces de distinto tamaño y orden. Se encuentran en sectores bajos topográficamente, rodeados por escarpas y pedimentos de altas pendientes, y sus suelos se corresponden con las Unidades Cartográficas 59 (Torriortentes típicos, sin estructura y agregación débil) y 62 (Torrifluventes típicos, con estructura débil y arcillosos), los cuales caracterizan planicies aluviales y sectores deprimidos con cursos temporarios, con material de grano fino y baja agregación. Estas características los vuelven sectores con mayor riesgo de erosión.



Sector de bajo (tomada de Estudio de Impacto Ambiental (Physis SAS, 2023)).



Sector de altas pendientes (tomada de Informe Ambiental, (Physis SAS, 2023b)).

Figura 29: Sector 2

Sector 6

El sector 6 corresponde a una terraza antigua, presenta una pendiente uniforme y un suelo cementado de tamaño más grueso. Es atravesado por algunos cauces temporales, uno de los cuales presenta un alto índice de potencia de la corriente y tiene un curso fácilmente observable en la imagen satelital. Por lo tanto, se podría considerar como un sector de

bajo riesgo, siempre y cuando se mantenga prudencial distancia de los cauces mencionados.



Figura 30: Vista de cauce en sector 6 (tomada de Informe Ambiental (Physis SAS, 2023c)).

5.7.2. Análisis de riesgo para ductos existentes

En el mapa a continuación, se muestran los principales ductos que atraviesan el área, superpuestos a la clasificación riesgo hídrico obtenida. Fueron indicadas en color azul aquellas pistas de ductos que atraviesan sectores con mayor riesgo hídrico, siendo enumeradas para su análisis.

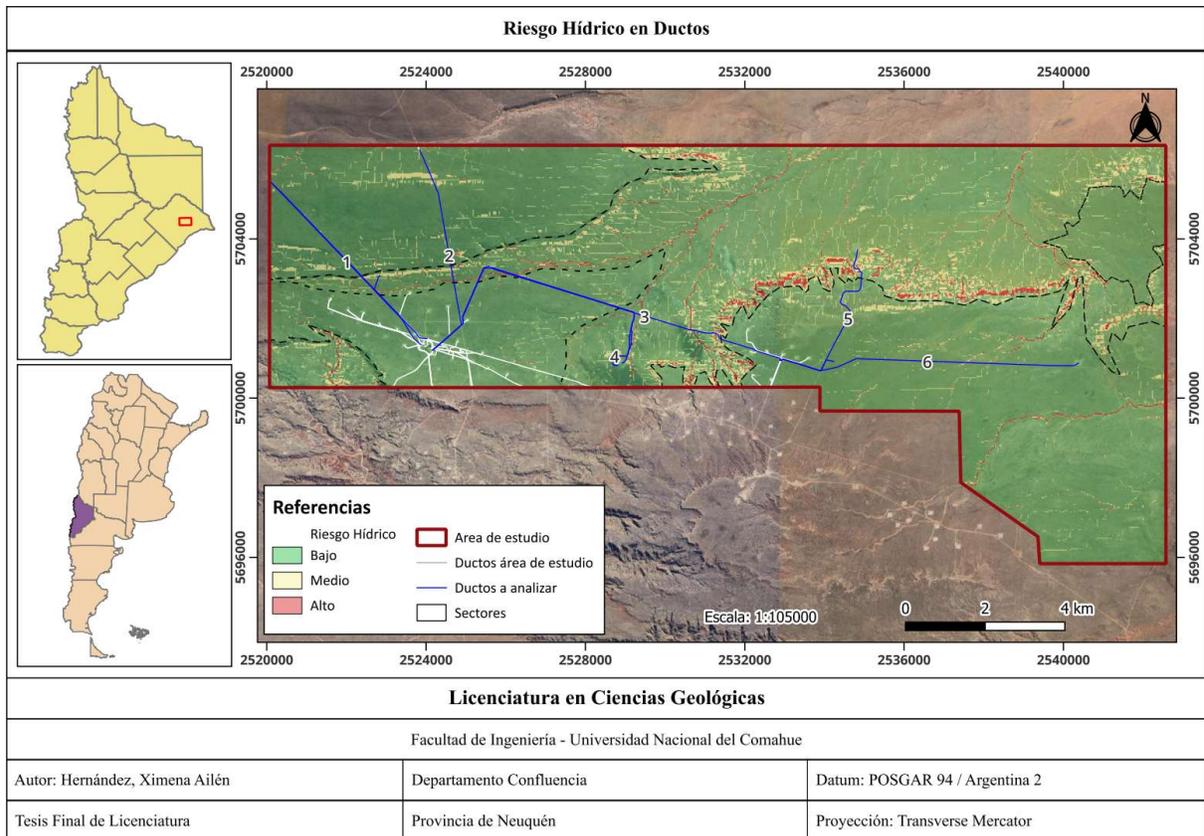


Figura 31: Pistas de ductos en área de estudio

Se realizarán acercamientos a los ductos destacados en el mapa anterior para analizar los distintos puntos donde estos atraviesan áreas indicadas como de riesgo medio o alto (Anexos – Puntos de Interés). Cabe destacar que este tipo de análisis no reemplaza los Estudios de Riesgo Hídrico a realizar previos a la construcción de obras en zonas de riesgo aluvional, sino que ayuda a identificar las distintas zonas de riesgo de forma preliminar, y a reconocer zonas que deberían ser monitoreadas.

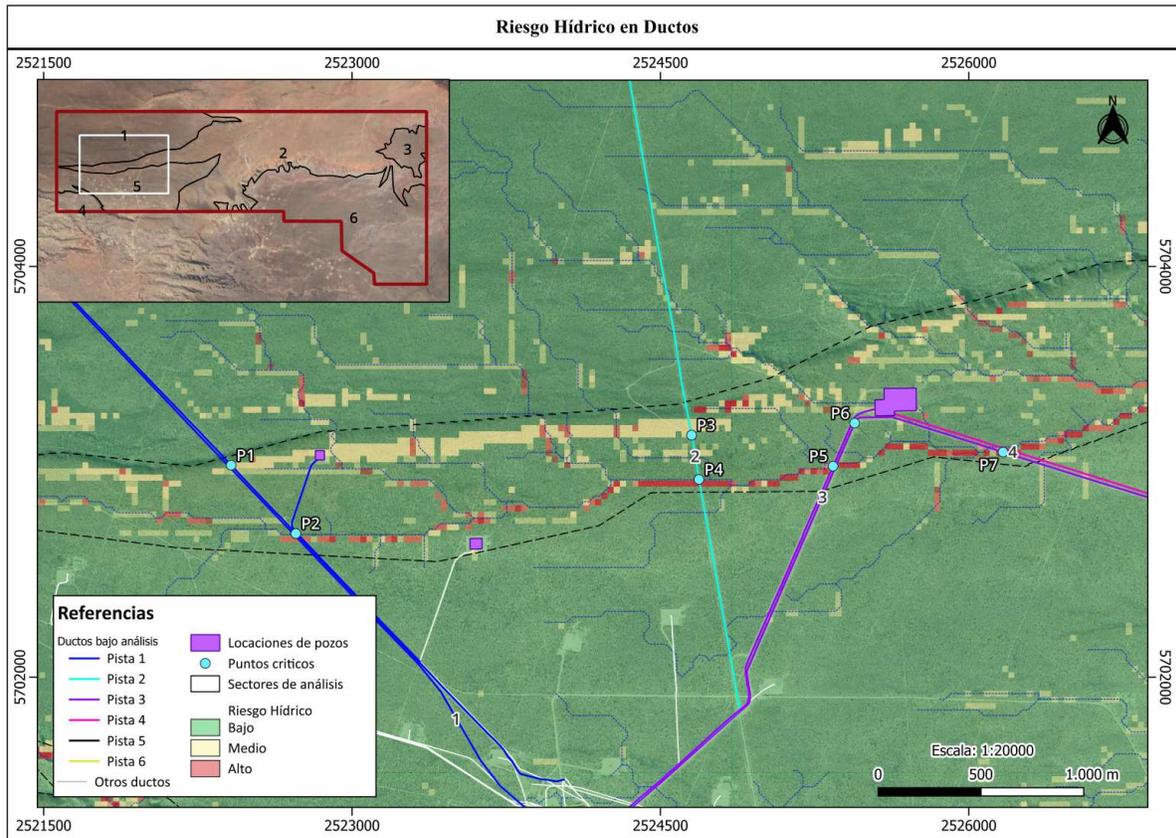


Figura 32: Pistas de ductos – Acercamiento 1

- La pista 1 atraviesa dos puntos de interés ubicados en el sector 2. El P1 se refiere principalmente a un marcado cambio de pendiente, y el P2 representa un cauce temporal. La locación ubicada hacia el este del P1 también se encuentra en una zona de riesgo medio por estar ubicada al pie de la pendiente, y se observan numerosos cauces temporales de menor tamaño en sus alrededores, así como también uno de mayor tamaño atravesando la antigua fosa de quema.
- La pista 2 también se ve afectada por dos puntos: P3, que se refiere a una zona de cambios de pendiente leves; y P4, correspondiente a un curso temporal.
- Las pistas 3 y 4 son interceptadas por los puntos P5 y P7, que corresponden al cauce mencionado en P4; y por el punto P6, que representa un cauce temporal con importante capacidad erosiva. El cauce observado en este punto atraviesa también el camino de acceso a la locación observada.



Figura 33: Sector cercano a P1 y P2 (tomada de Informe Ambiental (Physis SAS, 2024b)).

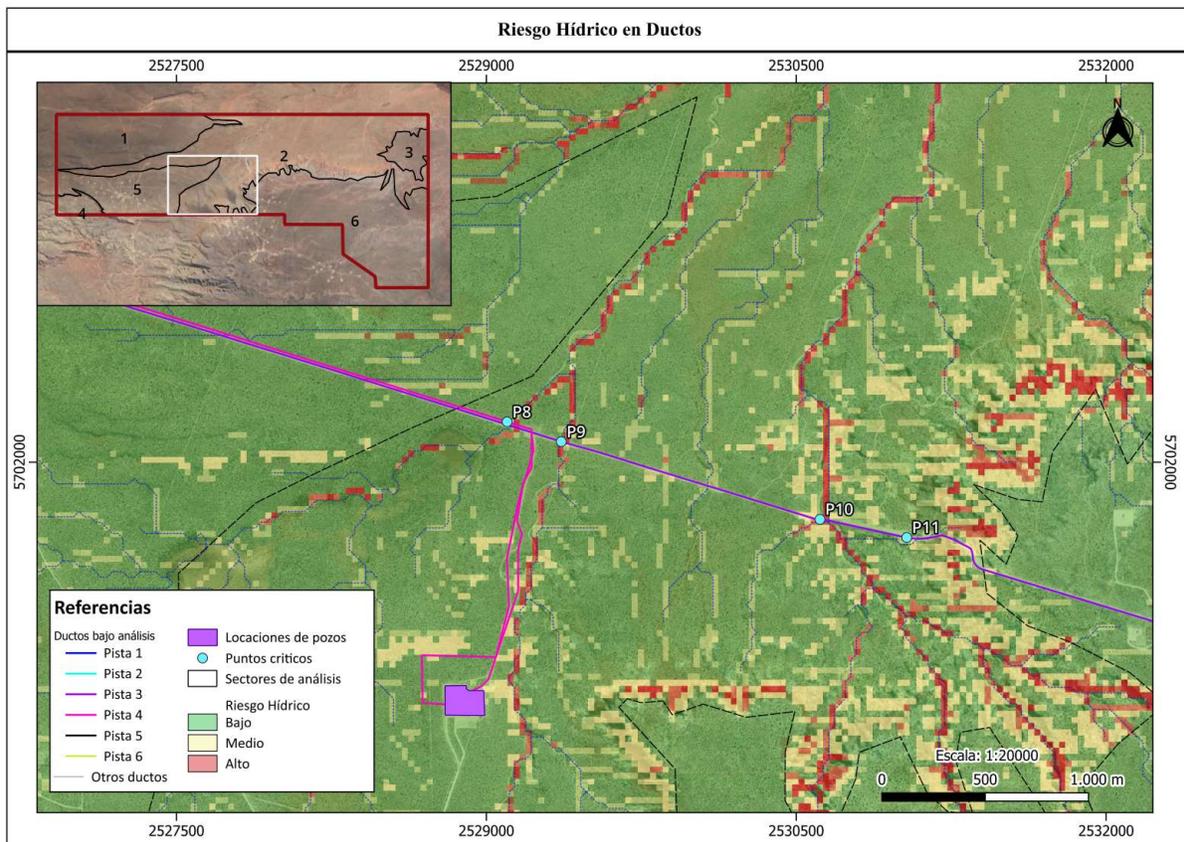


Figura 34: Pistas de ductos – Acercamiento 2

- El punto P8, referido a un cauce temporal, afecta a las pistas 3 y 4.
- La pista 4 avanza desde el sur, bordeando un cauce temporal muy definido. La menor distancia medida entre dicha pista y el cauce es de 20 metros.
- La pista 3 es atravesada en el P9 por este mismo cauce, y luego en P10 por otro de similar tamaño. En P11 se observa un cambio de pendientes, así como también la intersección de un cauce temporal. Las demás intersecciones observables en el

mapa que indican zonas de riesgo medio entre P9 y P10 se refieren a cursos temporales de menor tamaño.



Figura 35: Sector de P8 y P9 (tomada de Informe Ambiental (Physis SAS, 2024)).

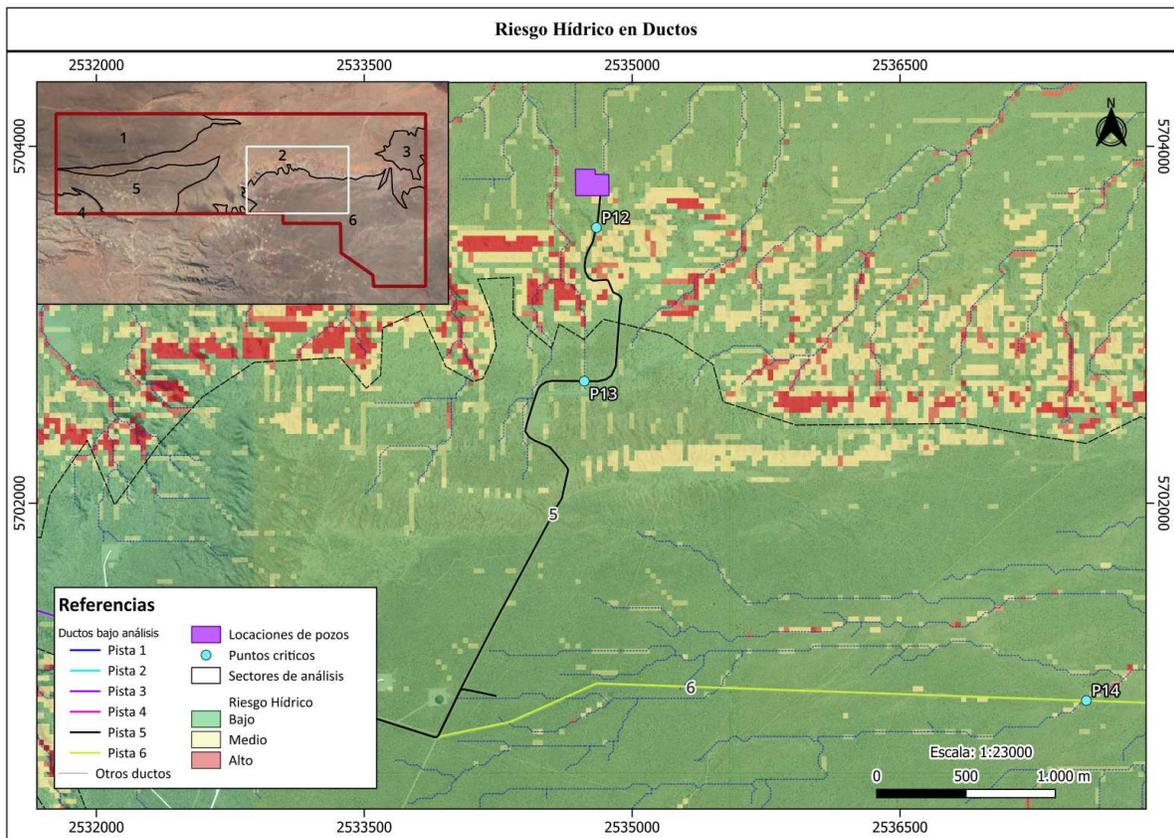


Figura 36: Pistas de ductos – Acercamiento 3

- La pista 5 se ve interceptada en el punto P12 por cauces temporales de menor tamaño, y se encuentra en una zona de fuerte cambio de pendiente y de tipo de suelo. La locación ubicada al pie de barda es atravesada por un cauce de menor tamaño, y además se encuentra aproximadamente a 70 metros al este de un cauce de riesgo alto. Por otro lado, en el P13 se observan dos cauces temporales de menor tamaño.

- En cuanto a la pista 6, se ve interceptada por un cauce temporal en P14.



Figura 37: Sector de P12 (tomada de Informe Ambiental, (Physis SAS, 2023b)).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La aplicación de las ecuaciones correspondientes a los factores erosivos de USLE, con las distintas consideraciones mencionadas para su adaptación a la información disponible en el área de estudio, dieron resultados congruentes con los observados en la bibliografía consultada.
- Al comparar los resultados obtenidos con la ecuación del factor LS respecto a la modificación para evitar la sobreestimación de la longitud de pendiente, se observó que el mapa obtenido utilizando la ecuación base representa en riesgo medio una red hidrográfica más detallada y, en algunos casos, sobreestimada. Sin embargo, este mayor nivel de detalle fue de utilidad para el análisis de riesgos.
- La metodología elaborada a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y el Índice SPI tiene sus resultados principalmente influenciados por el potencial erosivo de los cauces, así como también por el tipo de suelo y cambios de pendiente.
- Los datos utilizados para los cálculos se obtuvieron en su totalidad de fuentes digitales de fácil acceso, lo que hace a esta metodología de rápida aplicación cuando se ve dificultado el trabajo de campo.
- Se debe considerar que la precisión de los resultados obtenidos con la aplicación de esta metodología dependerá directamente de la calidad más baja de los datos de entrada utilizados. Es decir, al utilizar el MDE público con resolución de 30 metros, solo se podrá obtener un resultado con mejor resolución realizando interpolaciones.
- Una de las limitaciones del método, es que contempla solamente el potencial erosivo de cauces en profundidad, y no considera que, en las zonas distales de las cuencas, los cauces comienzan a tener erosión lateral, produciendo su migración.
- Otra de las limitaciones de esta metodología es que, al ser indirecta, no cuenta con una validación de los resultados con información de campo. Para realizar esta validación, se puede recomendar:
 - Instalar estaciones meteorológicas para realizar mediciones pluviométricas durante eventos de lluvia extremas. Esto es necesario ya que en la región no se realizan este tipo de mediciones, por lo que la información con la que se cuenta es estimada.
 - Luego de cada lluvia, relevar distintos cauces para medir la posible remoción de suelo. Esto puede realizarse a partir de la medición de la sección transversal de los cauces, por ejemplo, de acuerdo a las metodologías expuestas en el Boletín de Suelos de la FAO 68 (Hudson, 1997).
- Otras metodologías existentes para realizar estimaciones de erosión y escorrentía son la realización de parcelas de campo, mediciones de caudales de escorrentía, cálculo de transporte de sedimentos y simuladores de lluvia. En cuanto a las estimaciones a partir de modelos, se pueden mencionar los modelos para cálculo de la escorrentía, como el método racional, método de Cook o método de curvas de escorrentía; y los modelos para el cálculo de la pérdida de suelo, al que pertenece la metodología utilizada en este

trabajo, como pueden ser WEPP, KINEROS y USPED. Sin embargo, como se mencionó en el ítem anterior, los modelos son métodos indirectos, por lo que no cuentan en sí con un método para validar los resultados.

- Esta metodología es una herramienta que permite clasificar rápidamente el riesgo, lo cual es útil, ya sea para la reubicación de instalaciones lineales o concentradas, como así también para prever los tiempos de permisos que otorga la Autoridad de Aplicación para la autorización de la ejecución de un proyecto.
- Tal como fue mencionado previamente, esta metodología no reemplaza los Estudios de Riesgo Hídrico a realizar previo a la construcción de nuevas instalaciones, sino que ayuda a identificar las distintas zonas de riesgo de forma preliminar. Además, debe tenerse en cuenta que, para cada instalación particular, los parámetros deben ser ajustados según datos estimados en campo.
- Otra posible utilidad es la definición de puntos de monitoreo de ductos existentes para prevenir el socavamiento en las pistas, principalmente en zonas de cauces con altos potenciales de socavamiento o con suelos erosionables.
- En cuanto al área de estudio en particular, los sectores de menor riesgo obtenidos abarcan aproximadamente un 88,04% del área, mientras que los sectores de riesgo medio abarcarían un 11,09% y los de mayor riesgo un 0,86%.
- A partir del análisis del factor de suelo, se pudieron identificar suelos más erosionables en los sectores 2 y 4 (zona de bajo y algunos pedimentos) correspondientes a las Unidades Cartográficas 59 y 62, que presentan estructura débil y, en el caso de la UC 62, menor tamaño de grano y salinidad. Estos suelos más débiles predisponen mayor erosión potencial de la red de drenaje en comparación con los otros sectores definidos.
- En cuanto a la geomorfología, se identifica la zona de mesetas (sectores 1, 3, 5 y 6) como la de menor riesgo, por presentar una pendiente baja y red de drenaje menos erosiva. Las zonas de pedimento y de bajo (sectores 2 y 4) contienen un mayor porcentaje de su extensión con riesgo medio, debido a una mayor influencia de los cauces efímeros ocasionada por suelos más erosionables, así como también sectores con mayor pendiente en el caso del pedimento. Por último, los sectores de talud se destacan como los más riesgosos debido a su alta pendiente.
- Se recomienda monitorear los puntos enumerados como P5, P6, P7, P9, P10, P11 y P12, ya que son los sectores donde se observó mayor erosión potencial alrededor de ductos y locaciones, siendo clasificados como zonas de riesgo medio y alto. Estos puntos corresponderían a las zonas de pedimento y bajo, que poseen suelos más erosionables, mayor influencia de la red de drenaje y, en algunos casos, mayor pendiente.
- A este efecto, se recomienda realizar un estudio de campo para verificar la tapada de cada uno de los ductos ubicados en estos puntos, con el fin de realizar un análisis de erosión de los mismos. Se propone el siguiente criterio:

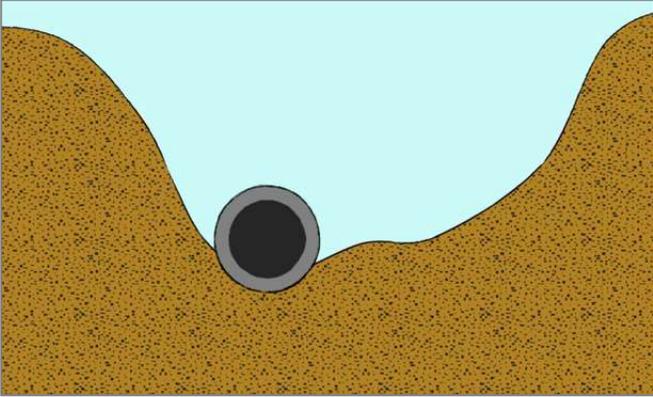
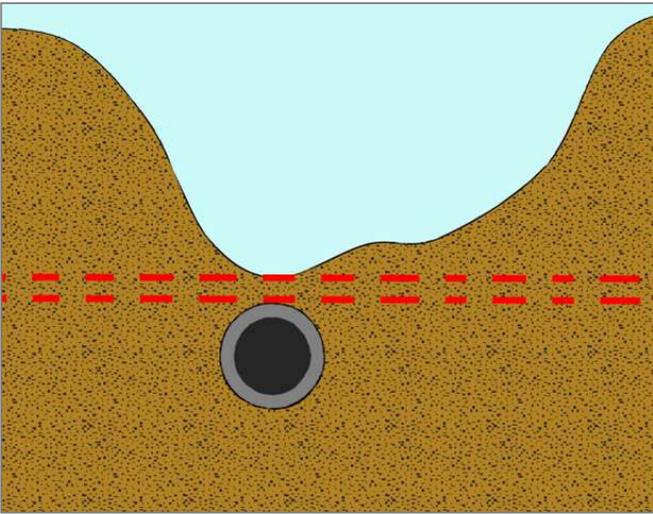
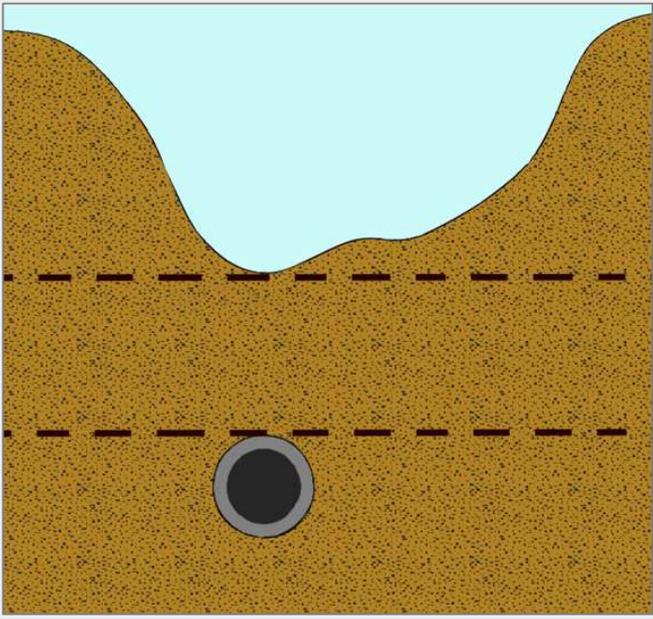
Esquema	Descripción	Recomendación
	<p>Ducto expuesto en cauce</p>	
	<p>Erosión para TR100 cercana a la tapada mínima</p>	<p>Profundizar el ducto o realizar obra de mitigación</p>
	<p>Erosión para TR100 mayor a la tapada mínima</p>	<p>Control y monitoreo</p>

Tabla 7: Criterio propuesto tapada de ductos

7. BIBLIOGRAFÍA

Albaladejo Montoro, J., Ortiz Silla, M. & Martínez-Mena García, M., 1988. Evaluation and mapping of erosion risks: An example from S.E. Spain. *Soil Technology (1):1*, pp. 77-87.

Almorox Alonso, J. y otros, 1994. *Métodos de estimación de la erosión hídrica*, Madrid, España: Editorial Agrícola España, S.A..

Arnoldus, H., 1978. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. En: M. de Boodt & D. Gabriels, edits. *Assesment of erosion*. New York: John Wiley & Son, pp. 127-132.

Bagnold, R., 1977. Bed Load Transport in Natural Rivers. *Water Resources Research*, Volumen 13, pp. 303-312.

Bagnold, R., 1996. *An Approach to the Sediment Transport Problem From General Physics*, Washington, DC, USA: US Government Printing Office.

Brierley, G. & Fryirs, K., 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. 1 ed. Hoboken, NJ, USA: Blackwell Publishing.

Colman, C., 2018. *Impacts of climate and land use changes on soil erosion in the Upper Paraguay Basin*, s.l.: Federal University of Mato Grosso do Sul.

Crettaz, E., Gvozdenovich, J. & Saluzzio, M., 2016. *Cálculo del Factor R de la USLE a través del Índice Modificado de Fournier*; s.l.: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

De Rosa, P., Fredduzzi, A. & Cencetti, C., 2019. Stream Power Determination in GIS: An Index to Evaluate the Most 'Sensitive' Points of a River. *Water*, 11(6), p. 1145.

De Rosa, P., Fredduzzi, A. & Cencetti, C., 2019. Stream Power Determination in GIS: An Index to Evaluate the Most 'Sensitive' Points of a River. *Water*, 11(6), p. 16.

Desmet, P. & Govers, G., 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil & Water Conservation*, Volumen 51, pp. 427-433.

Dufilho, A. C., Frugoni, M. C., Macchi, P. & Toth, A., 2007. Estimación de erosión hídrica de suelos para plan de manejo del Campo Forestal Aguas Frías, Patagonia Argentina. *Boletín geográfico. Año XXXII N°33. Departamento Geografía. Universidad Nacional del Comahue. Neuquén*, pp. 69-85.

Dufilho, A., Horne, F., Navedo, R. & Polla, G., 2001. Diseño de obras de control de aluviones basada en simulación de procesos hidrológicos torrenciales en cuencas de la Patagonia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 5(2), pp. 198-203.

Durigon, V. y otros, 2014. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*, Volumen 35, pp. 441-453.

- FAO, 1980. *Metodología provisional para la evolución de los suelos*, Roma: FAO.
- Fariás, H., 2009. Propuesta metodológica para la evaluación del riesgo aluvional en cursos efímeros atravesados por conductos subterráneos. Estudios de casos en Mendoza, Argentina. En: H. Fariás, J. Brea & C. García, eds. *Hidráulica FLuvial: Procesos de erosión y sedimentación, obras de control y gestión de ríos.*. Santiago del Estero, Argentina: Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.
- Fariás, H., 2009. Propuesta metodológica para la evaluación del riesgo aluvional en cursos efímeros atravesados por conductos subterráneos. Estudios de casos en Mendoza, Argentina.. *Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, pp. 39-40.
- Fattorelli, S. & Fernández, P., 2011. *Diseño Hidrológico*. s.l.:Water Assessment and Advisory Global Network.
- Ferguson, R., 2005. Estimating critical stream power for bedload transport calculations in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, Volumen 70, pp. 33-41.
- Fernández, P. y otros, 1980. *Estudio hidrológico de cuencas aluvionales en la Provincia de Neuquén y curvas generalizadas para el cálculo hidráulico de estructuras viales*, Neuquén: Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas - Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén.
- Ferrer, J. A., Irisarri, J. A. & Mendía, J. M., 1990. *Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén*. Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones.
- Finnegan, N. J., Sklar, L. S. & Fuller, T. K., 2007. Interplay of sediment supply, river incision and channel morphology revealed by the transient evolution of an experimental bedrock channel. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3), p. F03S11.
- Fournier, F., 1960. *Climat et erosion. PhD Thesis*, París: Presses Universitaires de France.
- Garrido, A., 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento estratigráfico. *Rev. Mus. Argentino de Ciencias Naturales*, 12(2), pp. 121-177.
- Garrido, A., 2011. El Grupo Neuquén (Cretácico tardío) en la Cuenca Neuquina. *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino*, p. 14.
- Gatica, J., 2017. *Trabajo Final de Licenciatura. Estimación de la recarga en los acuíferos de la provincia del Neuquén utilizando Sistema de Información Geográfica (SIG-GIS)*, Neuquén: Universidad Nacional del Comahue.
- Ginesta Torcivia, C., Rios, N. & Esper Angillieri, M., 2022. Caracterización morfotectónica de la Cuenca del Río Talacasto, Precordillera Central, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(1), p. 19.
- Gobierno Vasco, 2005. *Mapa de erosión de suelos de la Comunidad Autónoma de Euskadi*, s.l.: Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

- González Díaz, E. & Di Tommaso, I., 2011. *Geomorfología*, Neuquén: Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino.
- González Díaz, E. & Malagnino, E., 1984. *Geomorfología de la Provincia de Río Negro*, Buenos Aires: 9° Congreso Geológico Argentino.
- Gvozdenovich, J., Barbagelata, G., Lopez, G. & Papparotti, O., 2013. *Aplicación on-line para el cálculo de la pérdida de suelo en Entre Ríos, Argentina*, Buenos Aires: Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos.
- Gvozdenovich, J., Barbagelata, P. & Lopez, G., 2015. *Erosión Hídrica - USLE/RUSLE Argentina*, s.l.: INTA Estación Experimental Agropecuaria Paraná.
- Hernández, L. & Dufilho, A. C., 2012. Determinación del riesgo de erosión hídrica de suelos de los Departamentos Minas y Chos Malal (Neuquén) mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). *Boletín geográfico. Año XXXIII N°34. Departamento Geografía. Universidad Nacional del Comahue. Neuquén.*, pp. 11-31.
- Hill, G., Hales, T. & Aldrige, B., 1988. *Flood hydrology near Flagstaff, Arizona*, Arizona: WRI.
- Holmberg, E., 1976. *Descripción Geológica de la Hoja 32c, Buta Ranquil. Provincia del Neuquén.*, s.l.: Carta Geológico-Económica de la República Argentina.
- Hudson, N. W., 1997. *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Boletín de suelos de la FAO 68.*, Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Irisarri, J., 2006. *Versión Digital. Cartografía de los suelos. Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén*, s.l.: GEF Neuquén.
- Jenks, G. F., 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*, Volumen 7, pp. 186-190.
- Leanza, H., Zanettini, J. & Rodríguez, M., 2011. *Mapa Geológico de la Provincia del Neuquén*, Buenos Aires: Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Lin, C., Lin, W. & Chou, W., 2002. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: The Taiwan experience. *Soil & Tillage Research*, Volumen 68, pp. 143-152.
- Marizza, M., Rapacioli, R. & Vives, L., 2010. La problemática aluvional en el Alto Valle del Río Negro, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México I (1)*, pp. 21-34.
- Mitasova, H., Brown, W., Johnston, D. & Mitas, L., 1996. *GIS Tools for Erosion/Deposition Modeling and Multidimensional Visualization. Part II: Unit Stream Power-Based Erosion/Deposition Modeling and Enhanced Dynamic Visualization*, Illinois: University of Illinois, Urbana-Champaign.

- MMA, 2014. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. 4 ed. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Moore, I. & Burch, G., 1986. Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Trans. ASAE*, Volumen 29, pp. 1624-1630, 1640.
- Moore, I., Grayson, R. & Ladson, A., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), pp. 3-30.
- Moore, I. & Wilson, J., 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of soil and water conservation*, 47(5), pp. 423-428.
- Neteler, M. & Mitasova, H., 2004. *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. 2 ed. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Physis SAS, 2023b. *Informe Complementario. Línea eléctrica asociada al PAD PPar.a-3*, s.l.: Tecpetrol S.A..
- Physis SAS, 2023c. *Nota complementaria a Informe Ambiental PAD PPar.a-5*, s.l.: Tecpetrol.
- Physis SAS, 2023. *Estudio de Impacto Ambiental General - Desarrollo Puesto Parada*, s.l.: Tecpetrol.
- Physis SAS, 2024b. *Informe de Monitoreo Ambiental Anual. Área Puesto Parada.*, s.l.: Tecpetrol S.A..
- Physis SAS, 2024. *Memoria Técnica Descriptiva. PAD PPar-139(h). Área Puesto Parada.*, s.l.: Tecpetrol S.A..
- Polanski, J., 1962. Estratigrafía, Neotectónica y Geomorfología del Pleistoceno pedemontano entre los ríos Diamante y Mendoza (Mendoza). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 23(3-4), pp. 127-349.
- Rabassa, J., 1977. *Cuencas aluvionales de la Provincia del Neuquén, mapa de valores.*, s.l.: Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hídricas - Centro Regional Andino: 77 pp.
- Rapacioli, R., 2010. *Curso "Sistemas de Información Geográfica Aplicados a la Ingeniería y el Medio Ambiente"*, Neuquén: Universidad Nacional del Comahue.
- Rapacioli, R. & Marizza, M., 2017. *Determinación de un modelo de precipitaciones intensas para la región del Alto Valle del Río Negro y de curvas de caudal - área - frecuencia en zona de meseta al norte de la ciudad de Cipolletti*, s.l.: XVI Congreso Nacional del Agua.
- Renard, K. y otros, 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide To Conservation Planning With The Revised Universal Soil Loss Equation*, USA: US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, Agricultural Handbook 703.

- Rodríguez, M., Leanza, H. & Salvarredy Aranguren, M., 2007. Hoja Geológica 3969-II Neuquén, provincias del Neuquén, Río Negro y La Pampa. *Instituto de Geología y Recursos Naturales. SEGEMAR*, Volumen Boletín 370, pp. 1-165.
- Rodríguez, M., Leanza, H. & Salvarredy Aranguren, M., 2007. Hoja Geológica 3969-II, Neuquén. *Instituto de Geología y Recursos Naturales. Servicio Geológico Minero Argentino*, Volumen Boletín 370, p. 165.
- Rouse, J., Hass, R., Schell, J. & Deering, D., 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Washington D.C., NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1.
- Saad, A., 2008. *Aplicación del Modelo MUSLE para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica dentro del Yacimiento Aguada Baguales utilizando sistema de información geográfica. Tesis de Grado para la Licenciatura en Sanamiento y Protección Ambiental*, Neuquén: Universidad Nacional del Comahue.
- Sánchez, M., Calvo, J. & Heredia, S., 2005. Paleoambientes de sedimentación del tramo superior de la Fm Portezuelo, Grupo Neuquén (Cretácico Superior), Los Barreales, Provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(1), pp. 142-158.
- Sánchez, M., Heredia, S. & Calvo, J., 2006. Paleoambientes sedimentarios del Cretácico Superior de la Fm Plottier (Grupo Neuquén), Departamento Confluencia, Neuquén.. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(1), pp. 03-18.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincial de Neuquén, 2022. *Criterio de Clasificación de Riesgo Hídrico según IF-20202127429-NEU-FISCHID#SRH*, Neuquén: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincial de Neuquén.
- van der Knijff, J., Jones, R. & Montanarella, L., 1999. *Soil erosion risk assessment in Italy*, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Vargas, M. y otros, 2020. Análisis morfométrico y morfotectónico de dos cuencas fluviales intermontanas colineales y opuestas de la Precordillera, Andes Centrales de Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1).
- Wilson, J. & Lorang, M., 2000. Spatial models of Soil Erosion and GIS. En: A. Fotheringham & M. Wegener, edits. *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*. Philadelphia: Taylor and Francis, pp. 83-86.
- Wischmeier, W., Johnson, C. & Cross, B., 1971. A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, Volumen 26, pp. 189-193.
- Wischmeier, W. & Smith, D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture.

Recursos Web:

Modified Copernicus Sentinel data 2023, Sentinel Hub, <https://www.sentinel-hub.com>, Sinergise Ltd. Consultado el 08/12/2023.

8. ANEXOS

8.1. Puntos de interés hídrico

Las coordenadas presentadas se encuentran en el sistema de referencia Gauss-Krüger - Posgar 94'/Faja 2.

Identificación	X	Y
P1	5.703.032,45	2.522.412,00
P2	5.702.699,67	2.522.726,53
P3	5.703.178,79	2.524.651,31
P4	5.702.963,22	2.524.687,29
P5	5.703.028,13	2.525.339,31
P6	5.703.237,36	2.525.444,48
P7	5.703.096,29	2.526.166,31
P8	5.702.196,13	2.529.100,27
P9	5.702.099,89	2.529.362,40
P10	5.701.722,99	2.530.614,76
P11	5.701.634,82	2.531.034,79
P12	5.703.545,01	2.534.799,96
P13	5.702.684,90	2.534.732,08
P14	5.700.895,05	2.537.543,40