



FaIn·UNCo
Facultad de Ingeniería

TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA

EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Análisis de la erosión costera y riesgo geológico de la costa norte y este del embalse Mari Menuco, Departamento Confluencia, Provincia del Neuquén

Estudiante: Mustto María Eugenia

Leg: ING 2340

DNI: 37758261

Director: Dr. Germán Bértola

Co-Directores: Lic. Santiago Bassani e Ing. Ignacio Tomasevich



RESUMEN

Se analizó la erosión costera y se evaluaron los riesgos asociados en la costa norte y este del embalse Mari Menuco, observándose procesos erosivos activos. Con el fin de comprender la dinámica de los mismos se caracterizó el área de estudio y se analizaron diversos factores influyentes como el viento, oleaje, clima, nivel del embalse, geología y geomorfología costera entre otros. Para la evaluación del riesgo se construyeron índices de peligrosidad y vulnerabilidad mediante la selección y consideración de variables específicas que incluyen la morfología y orientación de la costa, tasa de erosión, resistencia de los materiales, grado de fracturación, geomorfología costera, infraestructuras y uso turístico recreativo del área. Este análisis permitió calificar distintos sectores costeros en función de su riesgo de erosión. Los resultados se observan en el mapa de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo mostrando distintos sectores con niveles de riesgo que varían desde bajo hasta muy alto, evidenciándose un aumento del mismo hacia el sureste del área. El objetivo es aportar una herramienta que contribuya para la planificación, el ordenamiento del territorio y el diseño de estrategias de uso y manejo sustentable de esta área costera.

Palabras claves: Embalse Mari Menuco, Erosión costera, Riesgo, Peligrosidad, Vulnerabilidad.

ABSTRACT

Coastal erosion was analyzed, and associated risks were evaluated along the north and east coasts of the Mari Menuco reservoir, where active erosive processes were observed. In order to comprehend their dynamics, the study area was characterized, and various influencing factors such as wind, waves, climate, reservoir level, geology, and coastal geomorphology were examined. For risk assessment, hazard and vulnerability indices were developed by selecting and considering specific variables including coast morphology and orientation, erosion rate, material resistance, degree of fracturing, coastal geomorphology, infrastructure and recreational tourism use of the area. This analysis enabled the classification of different coastal sectors based on their erosion risk. The results are illustrated in the hazard, vulnerability, and risk map, depicting various sectors with risk levels ranging from low to very high, with an escalation towards the southeast of the area. The aim is to provide a tool that contributes to planning, land management, and the formulation of sustainable management strategies for this coastal area.

Keywords: Mari Menuco Reservoir, Coastal erosion, Risk, Hazard, Vulnerability.

RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A mi país que me permitió formarme en una universidad pública y gratuita.

A la Universidad Nacional del Comahue y a todos los profesores de mi carrera que me enseñaron y brindaron los conocimientos esenciales para mi formación académica.

A mi director Dr. Germán Bértola y co-directores Lic. Santiago Bassani e Ing. Ignacio Tomasevich quienes estuvieron presentes en todo momento, por su apoyo, guía y aportes, y al Lic. Juan Catinari por su colaboración y predisposición.

A los jurados Lic. Diego Decurgez, Ing. Gian Mavo, Dra. Adriana Niz por sus correcciones y sugerencias.

A Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén por proporcionar el relevamiento fotográfico del año 2021.

A mi mamá y mi hermana que fueron mis pilares, confiaron en mí, me acompañaron y apoyaron durante estos años para que pueda estudiar y formarme profesionalmente.

A mis amigos de la vida y de la Facultad que estuvieron presentes y me alentaron en este camino.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	1
RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS	2
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivo general	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
3 METODOLOGÍA	11
3.1 Recopilación de información	11
3.1.1 Imágenes.....	11
3.1.2 Información meteorológica y nivel del embalse.....	11
3.2 Mapas temáticos	11
3.2.1 Mapa geológico y geomorfológico	12
3.2.2 Mapa de cuencas hidrográficas y pendientes	12
3.2.3 Mapa de uso del suelo	12
3.2.4 Mapa de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo.....	13
3.3 Retracción costera y tasa de erosión.....	13
3.4 Caracterización de afloramientos rocosos	14
3.5 Riesgo a la erosión.....	16
4 MARCO TEÓRICO.....	17
4.1 Dinámica y erosión costera.....	17
4.2 Riesgo y sus componentes	25
5 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	26
5.1 Ubicación	26
5.2 Características generales del embalse Mari Menuco.....	27
5.3 Geología.....	29

5.4 Geomorfología	32
5.5 Clima y vientos.....	47
5.6 Oleaje.....	48
5.7 Hidrología	49
5.8 Vegetación	53
5.9 Uso del suelo.....	53
6 RESULTADOS	55
6.1 Retracción costera y tasa de erosión a partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas.....	55
6.2 Observaciones en campo, perfiles litológicos, grado de fracturación y resistencia a la compresión simple de los afloramientos rocosos.....	60
6.3 Definición de las variables para el análisis de la susceptibilidad de la costa frente al riesgo de erosión	70
6.4 Descripción de las variables de los Índices de Peligrosidad y Vulnerabilidad.....	72
6.4.1 Morfología y orientación de la costa.....	72
6.4.2 Tasa de erosión	72
6.4.3 Resistencia a la Compresión Simple y Rock Quality Designation	72
6.4.4 Geomorfología.....	73
6.4.5 Infraestructura y uso turístico recreativo.....	73
6.5 Análisis y calificación de las variables de los componentes de riesgo.....	74
6.5.1 Peligrosidad	74
6.5.2 Vulnerabilidad	76
6.6 Riesgo	79
7 CONCLUSIONES	81
8. RECOMENDACIONES	82
9 ANEXO.....	84
9 BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estimación y clasificación de la resistencia a la compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo (extraído de IypGonzales de Vallejo et al., 2002).	15
Tabla 2 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el índice RQD (extraído de Gonzales de Vallejo et al., 2002).	16
Tabla 3. Variación de los Niveles de Embalse (porcentaje de tiempo) para la serie analizada (1/10/1998 - 30/07/2021).	28
Tabla 4. Valores de variabilidad de la línea de cresta y EPR calculados en los distintos tramos.	56
Tabla 5. Estimación de la dureza relativa (ISRM, 1981) y resistencia a la compresión simple a partir de índices de campo.	65
Tabla 6. Variables que componen los índices de Peligrosidad y de Vulnerabilidad.	71
Tabla 7. Valores del Índice de Peligrosidad y sus variables: A. Morfología y orientación costera, B. Tasa de erosión, C. Resistencia a la compresión simple, D. Rock Quality Designation, E. Geomorfología costera.	75
Tabla 8. Valores de la vulnerabilidad de erosión costera y su variable infraestructura y uso turístico recreativo (F).	79
Tabla 9. Valores del riesgo de erosión costera.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema mostrando la deriva de playa (extraída de Strahler, 1981).	18
Figura 2. Esquema mostrando las corrientes litorales (extraída de Strahler, 1981).	18
Figura 3. La refracción de las olas motiva que la energía se concentre en los salientes costeros (modificada de Strahler, 1981).	19
Figura 4. Refracción en línea de costa recta (extraída de Strahler, 1981).	19
Figura 5. Morfología de un acantilado (modificado de Davidson-Arnott, 2010).	20
Figura 6. Tipos de movimientos de remoción en masa más significativos en el área de estudio (modificado de Gonzales de Vallejo et al., 2002).	22
Figura 7. Ilustración del proceso erosivo del oleaje en un acantilado (extraído de Castedo, 2012).	23

Figura 8. Esquema descriptivo. Vista lateral de liberación del oleaje en el frente rocoso del acantilado. (modificado de Castedo, 2012).....	24
Figura 9. Ubicación del área de estudio.....	26
Figura 10. Esquema de la distribución de diques y embalses del Complejo Cerros Colorados (Pons y Rojas Reyes, 2020).	28
Figura 11. Unidades aflorantes en el área de estudio.....	30
Figura 12. Esquema litoestratigráfico del Grupo Neuquén donde se resaltan las unidades aflorantes en laderas y acantilados del área de estudio (modificado de Garrido, 2011).	31
Figura 13. Pavimento del desierto. Diciembre 2022.	33
Figura 14. Acumulación de arena “nebka”. Diciembre 2022.....	33
Figura 15. Cono de detritos. Febrero 2023.....	33
Figura 16. Cañadón (38°33'5,02"S; 68°32'5,41"O). Febrero 2023.....	33
Figura 17. Sectores costeros afectados por el oleaje (38°34'40,30"S; 68°29'40,60"O). Octubre 2023.	34
Figura 18. Acantilado (38°36'52,80"S, 68°27'56,80"O). Diciembre 2023.	35
Figura 19. Alero. Fotografía tomada por Subsecretaría de Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén (38°34'38,16"S; 68°29'44,02"O). Enero 2021.	35
Figura 20. Grieta de liberación de tensión (38°33'34,81"S; 68°31'22,21"O). Julio 2023.	36
Figura 21. Bloque a punto de caer (38°36'1,82"S; 68°28'28,40"O). Diciembre 2022.....	36
Figura 22. Remanente de erosión costera en forma de pilar. Febrero 2023.....	37
Figura 23. Oquedades sobre la plataforma de abrasión. Diciembre 2022.	37
Figura 24. Plataforma de abrasión con bloques caídos sobre su superficie en el Club Hidronor. Noviembre 2023.	37
Figura 25. a. Playa de grava (38°37'23,88"S; 68°27'39,84"O). b. Detalle de la misma donde se observan “bermas”. Diciembre 2022.	38
Figura 26. Playa de arena y grava Club Hidronor. Noviembre 2023.	38

Figura 27. Laguna costera Tenis Club. Diciembre 2023.	39
Figura 28. Secciones de representación del mapa geomorfológico.....	40
Figura 29. Mapa geomorfológico sección a.	41
Figura 30. a. Rosa de los vientos donde se indican con puntos los valores de las frecuencias porcentuales (modificada de Palese y Lässig, 1997). b. Rosa de los vientos donde se indican con puntos los valores de las intensidades expresadas en m/s (modificada de Palese y Lässig, 1997).	48
Figura 31. a. Cuencas que desaguan hacia el embalse Mari Menuco.....	50
Figura 32. Pendientes del área de estudio.	52
Figura 33. Mapa de usos del suelo.....	54
Figura 34. Imagen satelital 2022 de ESRI Satellite con ubicación de los tramos en los que se realizó el análisis y valores de tasa de erosión promedio en cada uno.	57
Figura 35. Variabilidad en la tasa de erosión.	58
Figura 36. Variabilidad de la línea de cresta entre diciembre de 1993 y diciembre de 2022.	59
Figura 37. Líneas de cresta de los años 1993, 2003, 2014, 2022, digitalizadas en imagen ESRI Satellite 2022, donde se aprecia claramente el retroceso de la línea de cresta, generando la progresiva eliminación de una saliente costera.	60
Figura 38. Ubicación de los perfiles realizados.....	61
Figura 39. Perfil realizado en el Club Hidronor (38°34'17"S; 68°30'11,2"O). En el frente del acantilado de base a techo se desarrollan 1,2 m de fangolitas rojizas y por encima 3 m de areniscas.	61
Figura 40. Perfil realizado en Tenis Club (38°35'12,10"S; 68°29'1,14"O). En el frente del acantilado de base a techo se desarrollan 0,35 m de fangolitas rojizas que muestran “slikendside”(detalle b) y “costras” (detalle c), con un nivel intercalado de 0,45 m de areniscas con laminación paralela (detalle d.), continúan 1,20 m de conglomerados poco consolidados y 0,6 m de conglomerados cementados (detalle a).....	62
Figura 41. Perfil realizado en un sector próximo a Bahía Bonita (38°38'32,15"S; 68°27'18,32"O). En el frente del acantilado de base a techo se desarrollan 0,2 m de conglomerados, por encima 0,4 m de areniscas y finalmente 0,8 m de conglomerados poco cementados y 0,6 m de conglomerados bien cementados.	63

Figura 42. Línea de levantamiento en frente acantilado del Club Hidronor. Noviembre 2023.	66
Figura 43. Discontinuidades por estratificación (38°33'55,91"S; 68°30'39,10"O). Julio 2023.....	67
Figura 44. Plano de discontinuidad perpendicular a la cara del acantilado (38°37'3,63"S; 68°27'51,35"O). Julio 2023.	67
Figura 45. Discontinuidades verticales y subparalelas a la cara del acantilado. Fotografía tomada por Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén (38°36'25,50"S; 68°28'14,04"O). Enero 2021...	67
Figura 46. Caída de rocas (38°33'58,95"S; 68°30'35,64"O). Fotografía tomada por Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén. Enero 2021.	68
Figura 47. Vuelcos en el sector de Villa Tennis Club. Fotografía tomada por Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén. Enero 2021.....	69
Figura 48. Posible deslizamiento rotacional en Villa Tennis Club. Diciembre 2023.....	70
Figura 49. Fotografía del sector costero 2 mostrando dificultad para el acceso a la costa (tomada del diario La Mañana del Neuquén (29-1-24).....	77
Figura 50. Construcciones del Club Hidronor. Noviembre 2023.....	77
Figura 51. Construcciones en Villa Tennis Club. Diciembre 2023.....	77
Figura 52. Defensa de hormigón construida en Villa Tennis Club, obsérvese en el sector medio de la misma inicio de volcamiento producto de la presión ejercida por el material caído del frente del acantilado. Diciembre 2023.....	78
Figura 53. Fotografía del sector 5 mostrando uso espontaneo. Diciembre 2023.	78
Figura 54. Fotografía del sector 6 mostrando el uso recreativo. Noviembre 2023.	79
Figura 55. Peligrosidad (P), Vulnerabilidad (V) y Riesgo (R) de erosión costera en el área de estudio.	80

1 INTRODUCCIÓN

La erosión costera es uno de los problemas ambientales más importantes y de relevancia global que afecta a diversas costas del mundo (Bird, 2008) y también a las áreas costeras de lagos y embalses de nuestro país (Navarro, 1999) como es el caso del embalse Mari Menuco, perteneciente al complejo hidroeléctrico Cerros Colorados en la provincia del Neuquén, objeto del presente trabajo. Se trata de un proceso dinámico e irreversible que causa pérdida de tierras, degradación del hábitat natural, y afecta a personas, actividades y recursos económicos (Merlotto y Bértola, 2007; Merlotto *et al.*, 2017). Su análisis y el estudio del riesgo en la costa norte y este del embalse Mari Menuco reviste importancia, ya que esta área constituye un atractivo turístico recreativo para la población de los centros urbanos del alto valle y su uso ha experimentado un notable incremento en las últimas décadas, impulsado principalmente por una creciente demanda de espacios recreativos. La numerosa concurrencia de visitantes a sus playas y acantilados es notoria, y la amenaza de desmoronamiento de rocas, producto de la erosión, agrega un componente de riesgo latente, especialmente en zonas propensas a la inestabilidad. En los últimos años se han reportado varios accidentes al respecto que han causado lesiones severas a personas e incluso una víctima fatal, situación reflejada en medios de comunicación regionales ¹. Ante la problemática descrita este trabajo constituye una herramienta para las tareas de ordenamiento del territorio.

1

• Tomaba sol a la orilla del lago y se le cayó una piedra de 500 kilos sobre las piernas (4 de enero de 2020). La Mañana de Neuquén. Recuperado de <https://www.lmneuquen.com/tomaba-sol-la-orilla-del-lago-y-se-le-cayo-una-piedra-500-kilos-las-piernas-n675517>

• Por el Derrumbe en el Mari Menuco, ponen el ojo en los acantilados (9 de enero de 2020). La Mañana de Neuquén. Recuperado de <https://www.lmneuquen.com/por-el-derrumbe-el-mari-menuco-ponen-el-ojo-los-acantilados-n676420>

• Video: impresionante derrumbe en las orillas del Mari Menuco.(15 de enero de 2021). La Mañana de Cipolletti. Recuperado de <https://www.lmneuquen.com/video-impresionante-derrumbe-las-orillas-del-mari-menuco-n764178>

• Neuquén: un hombre murió aplastado en el derrumbe de un acantilado en el lago Mari Menuco (10 de febrero de 2022). La Nación. Recuperado de <https://www.lanacion.com.ar/seguridad/neuquen-un-hombre-murio-aplastado-en-el-derrumbe-de-un-acantilado-en-el-lago-mari-menuco-nid10022022/>

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

El objetivo de este Trabajo Final de Licenciatura es analizar la erosión costera y el riesgo geológico en la costa norte y este del embalse Mari Menuco, Neuquén. Los resultados obtenidos permitirán zonificar el área de acuerdo a su susceptibilidad al proceso en sí y a la generación de riesgo, obteniendo una herramienta importante que contribuirá a una adecuada planificación y ordenamiento territorial para diseñar estrategias de uso y manejo sustentable.

2.2 Objetivos específicos

- Generar un mapa geológico y geomorfológico de la zona costera y sectores aledaños.
- Analizar la litología del área y zonificar sectores costeros de acuerdo a ello.
- Elaborar un mapa de las principales cuencas hidrográficas que escurren hacia la zona en estudio.
- Confeccionar un mapa de uso de suelo del área en estudio.
- Analizar los vientos predominantes y sus características.
- Analizar niveles históricos del embalse.
- Determinar y mapear la retracción costera y la tasa de erosión en la zona en análisis.
- Establecer el índice de vulnerabilidad y peligrosidad para calcular el índice de riesgo y zonificar el área de análisis de acuerdo a ello.
- Confeccionar mapa de peligrosidad, vulnerabilidad y de riesgo de erosión costera.
- Crear una base georreferenciada de datos fotográficos de las áreas más impactadas por erosión costera y por las actividades antrópicas.

3 METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuestos se trabajó en gabinete y se realizaron salidas de campo. Se buscaron antecedentes, bibliografía específica, imágenes satelitales y fotografías aéreas, se elaboraron mapas temáticos, se mapeó la retracción costera, se calculó la tasa de erosión, y se definieron los índices para el análisis del riesgo. Las salidas de campo permitieron chequear la información generada en gabinete, reconocer la geología, características topográficas, geomorfológicas, litológicas, levantar perfiles litológicos, reconocer rasgos físicos de erosión como plataformas de abrasión entre otros, observar los sitios donde se han registrado caídas de rocas y tomar fotografías georreferenciadas de las áreas más impactadas.

3.1 Recopilación de información

3.1.1 Imágenes

Se reunieron imágenes satelitales pancromáticas del 2018 y 2023 del satélite SPOT 6 y 7 con resolución espacial 1,5 m facilitadas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), imágenes históricas y actuales (1985 a 2022) de *Google Earth Pro* versión 7.3.6.9345, imágenes ESRI *Satellite* disponibles a través de la herramienta *QuickMapServices* de QGIS. Fotografías aéreas tomadas en el año 1993 con escala 1:20000 provistas por la Dirección Provincial de Catastro e Información Territorial de Neuquén (DPCeIT), otras de 1986 con escala 1:20000 facilitadas por el Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), y del 2014 con tamaño de pixel 50 cm disponibles en la Base de Datos Geoespacial a través del servicio WMS Y WFS del Instituto Geográfico Nacional (IGN), también fotografías del relevamiento realizado por Defensa Civil y Protección Ciudadana del Neuquén en enero del año 2021.

3.1.2 Información meteorológica y nivel del embalse

Provista por la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC), Orazul Energy (concesionario hidroeléctrico), el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales de la Facultad de Ingeniería, UNCo (LADIFA).

3.2 Mapas temáticos

Los mapas se elaboraron en QGIS versión 3.16, la información digital fue proyectada al sistema POSGAR 1994 Zona 2.

3.2.1 Mapa geológico y geomorfológico

El mapa geológico se elaboró con información de base y la hoja geológica 3969-II Neuquén (Rodríguez *et al.*, 2007), el geomorfológico se digitalizó partir de la observación de imágenes satelitales (Figura 11; Figura 29)

3.2.2 Mapa de cuencas hidrográficas y pendientes

Se llevaron a cabo a través del procesamiento de la información del DEM (Modelo Digital de Elevación) de la base de datos del IGN con una resolución espacial de 5 m de tamaño de pixel. El análisis de las pendientes se realizó siguiendo la clasificación de la FAO (Vargas Rojas, 2009) (Figura 31; Figura 32).

Se delimitaron las cuencas hidrográficas y se definió la red de drenaje con las herramientas del programa QGIS, siguiendo la metodología de *Catchment Delineation* del manual "QGIS and Open Data for Hydrological Applications" (Van der Kwast, 2018).

Primero, se preparó el Modelo Digital del Terreno (DEM) eliminando las depresiones y picos utilizando la herramienta *Fill sinks*. Se ajustó el parámetro umbral de pendiente mínima para rellenar las depresiones según las recomendaciones del manual, se utilizó 0,010000.

Luego, se determinó el umbral del orden de corriente que se utilizó para definir la red de drenaje y las cuencas hidrográficas. Se calcularon los órdenes de Strahler con la herramienta Strahler Order, obteniendo una capa ráster discreta de valores del 1 al 9. Posteriormente, utilizando la calculadora de campos, se definió un valor umbral de 5 como medida mínima de descarte para los drenajes menos significativos.

A continuación, se utilizó la herramienta *Channel network and drainage basins* para calcular la dirección de flujo y la red de canales, teniendo en cuenta el umbral definido anteriormente. Se definió un punto de salida utilizando la herramienta *Coordinate Capture*.

Finalmente, se delimitaron las cuencas hidrográficas utilizando la herramienta Upslope Area. Esta herramienta permitió calcular las áreas de esorrentía aguas arriba con base en la red de canales y el punto de salida previamente definido.

3.2.3 Mapa de uso del suelo

Se digitalizó a partir de la observación de imágenes satelitales. Se utilizaron capas de información geoespacial e información digital disponible a través del Servicio de Vectores en Web (WFS) de la

base de datos del IGN, Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina IDERA y de la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén (Figura 33).

3.2.4 Mapa de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo

Se construyó a partir de los resultados del análisis de las variables de los Índices de Peligrosidad (IP) y Vulnerabilidad (IV) (Figura 55).

3.3 Retracción costera y tasa de erosión

El análisis de la retracción costera y el cálculo de la tasa de erosión (*End Point Rate*) se realizó a partir de la comparación de líneas de cresta de los acantilados, digitalizadas a partir de fotografías aéreas de los años 1993 y 2014, e imágenes satelitales de los años 2003 y 2022.

Se decidió trabajar en tramos en áreas urbanizadas, sectores adyacentes a las mismas y otras áreas donde el proceso erosivo se vio más notorio debido a limitantes en la georreferenciación de las imágenes y en la fotointerpretación, especialmente al marcar la línea de cresta de los acantilados (Figura 34). Estas limitaciones incluyeron la baja resolución espacial y calidad de las imágenes, la deformación en planta causada por variaciones en la oblicuidad del terreno, cambios en el paisaje debido a la intensa urbanización del área. y el grado de subjetividad en la fotointerpretación por efectos de las sombras.

Se georreferenciaron las imágenes a partir de puntos de control homólogos que se determinaron utilizando el complemento georreferenciador GDAL del programa QGIS, tomando como base la imagen 2022, cotejados y localizados en el campo. Se seleccionaron puntos distribuidos en un rango de hasta 150 m de ancho tomados desde el frente costero. Se aplicaron distintas transformaciones (Helmert, Polinomial) hasta obtener el resultado que mejor se ajustara. Se utilizaron como mínimo 10 puntos de control y como método de remuestreo se asignó el de vecino más cercano. Se controló que el error residual y medio estén por debajo de un píxel para asegurar que la georreferenciación fuera aceptable y lo más precisa posible. Como se tomó de referencia una capa proyectada en WGS84 se adoptó dicho sistema de referencia de coordenadas para las imágenes georreferenciadas.

Posteriormente se generó un archivo vectorial (*Shapefile*) de la línea de cresta de los acantilados de cada año, según la imagen empleada. La línea de cresta correspondiente al año 2022 fue la referencia de base, y con respecto a esta se cotejaron las de los años anteriores permitiendo identificar los cambios en la línea de cresta de los acantilados en todos los tramos.

En varios trabajos se ha calculado el *End Point Rate* (EPR) como la relación de la distancia entre la línea de costa más antigua y la más reciente, y el lapso de años entre ambas líneas, como medida principal (Thieler *et al.*, 2009; Rangel-Buitrago y Posada-Posada, 2013; Fernández de la Torre, 2019). En este estudio se determinó la tasa de variación anual de las líneas de cresta de los acantilados mediante QGIS (Cespedes y Soto, 2023) en un lapso de 29 años, a partir del año 1993, 15 años después del llenado del embalse en 1978. Se utilizaron las líneas de cresta de las fechas 8 de diciembre de 1993 y 11 de diciembre de 2022; se digitalizó también un eje de referencia paralelo a las líneas de cresta y transectos (líneas transversales que cortan las líneas de cresta y el eje de referencia).

La EPR se calculó a partir de la siguiente formula:

$$EPR = \frac{\Delta D}{T} \times 365$$

Donde:

EPR es el *End Point Rate* (medida en metros por año).

ΔD es el desplazamiento en metros entre las fechas de fin e inicio.

T es el tiempo transcurrido en días entre dichas fechas.

ΔD es $D_{fin} - D_{inicio}$ por lo que es una variable con signo. En concreto, D_{fin} es la distancia entre la línea de cresta en la fecha de término del periodo analizado y el eje de referencia y D_{inicio} es la distancia entre la línea de cresta en la fecha de inicio del periodo analizado y el eje referencia.

Los datos necesarios para calcular ΔD y T se obtuvieron con las herramientas intersección de líneas y distancia al eje más próximo. Al final del procesamiento se obtuvo una capa de líneas con atributos de distancias de cada línea respecto al eje de referencia y las fechas correspondientes que permitió el cálculo de la EPR.

3.4 Caracterización de afloramientos rocosos

Para caracterizar los afloramientos rocosos se realizaron perfiles litológicos, se evaluó la resistencia a la compresión simple (RCS) de la matriz rocosa y el grado de fracturación con el índice *Rock Quality Designation* (RQD) en distintos sitios de la costa acantilada, definidos en base al análisis de imágenes satelitales, resultados de la retracción costera, tasa de erosión y reconocimiento durante las salidas de campo.

La RCS es el parámetro más apropiado para expresar la fuerza de resistencia de los materiales respecto a la erosión (Sunamura, 1992). González de Vallejo y colaboradores (2002) presentan valores medios de la RCS de las rocas destacándose la utilización de índices de campo de la clasificación propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981) que permiten obtener una aproximación de este parámetro en un afloramiento. El análisis de RCS de la matriz rocosa en campo se obtuvo estimando la resistencia a partir de la dureza superficial de las rocas, para ello se empleó el método del martillo geológico, que consiste en golpear una sección de matriz rocosa y evaluar su comportamiento frente al impacto. Los criterios para su estimación están descritos en la Tabla 1 así como el valor de resistencia que se corresponde con cada uno de ellos.

Clase ISRM, 1981	Descripción	Identificación en campo	Aproximación al rango de RCS (Mpa)
S ₁	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	<0,025
S ₂	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025 – 0,05
S ₃	Arcilla Firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo	0,05 – 0,1
S ₄	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo	0,1 – 0,25
S ₅	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25 – 0,5
S ₆	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña	>0,5
R ₀	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 – 1,0
R ₁	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1,0 – 5,0
R ₂	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0 - 25
R ₃	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25 - 50
R ₄	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla.	50 - 100
R ₅	Roca Muy dura	Se requieren muchos golpes de martillo para fracturarla.	100 - 250
R ₆	Roca extremadamente dura	Al golpearla con el martillo saltan esquirlas.	>250

Tabla 1 Estimación y clasificación de la resistencia a la compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo (extraído de Gonzales de Vallejo *et al.*, 2002).

El grado de fracturación de un macizo rocoso se expresa con el índice RQD y nos proporciona una noción del número de fracturas que afectan a los materiales, permitiendo su clasificación en diferentes grados de calidad que se muestran en la Tabla 2 (González de Vallejo *et al.*, 2002). El RQD se obtuvo en función del número de discontinuidades por metro, lo cual se determinó en el campo mediante una línea de levantamiento (cinta métrica o sogas) colocada en caras expuestas del afloramiento y se utilizó la siguiente ecuación propuesta por Priest y Hudson (1976):

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda} \times (1 + 0,1\lambda)$$

Donde $\lambda = N^\circ$ de discontinuidades / largo estudiado

Cuanto menor sea la frecuencia de discontinuidades por metro, mayor será el RQD, lo que indica una mejor calidad de la roca en términos de su integridad y continuidad.

RQD %	Calidad
< 25	Muy Mala
25-50	Mala
50-75	media
75-90	Buena
90-100	Muy Buena

Tabla 2 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el índice RQD (extraído de Gonzales de Vallejo *et al.*, 2002).

3.5 Riesgo a la erosión

Para analizar el riesgo se tuvieron en cuenta sus dos componentes: peligrosidad y vulnerabilidad (Cardona, 1993). Su evaluación se realizó a partir de la elaboración de los índices de Peligrosidad (IP) y Vulnerabilidad (IV) para los cuales se definieron las variables correspondientes a factores que condicionan o determinan la erosionabilidad del sector costero teniendo en cuenta procesos, características y usos presentes, siendo entonces índices relativos aplicables solo en esta área (Del Rio y Gracia, 2007; Lasta *et al.*, 2010; Merlotto *et al.*, 2011; Rangel-Buitrago y Posada-Posada, 2013; Fernández *et al.*, 2017; Merlotto *et al.*, 2017). Las variables fueron evaluadas y calificadas a partir de información de la literatura existente y de datos obtenidos y corroborados en el campo. Cabe aclarar que la variación en el nivel del agua no fue considerada una variable de importancia para la erosión costera ya que al tratarse de un embalse con una particular regulación el nivel no presenta variaciones significativas en el tiempo, sino en escalas menores.

Siguiendo el enfoque de Merlotto *et al.*, 2011, cada variable fue clasificada en cinco clases en función del grado creciente de peligrosidad o vulnerabilidad, asignándoles una puntuación de 1 (menor rango) a 5 (mayor rango) que se estableció cuantitativamente para la tasa de erosión, resistencia a la

compresión simple y *Rock Quality Designation* y para el resto se realizó una descripción cualitativa (Tabla 6).

En continuación con el análisis, IP y IV fueron obtenidos a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Indice} = \frac{i_1 + i_2 + i_3 + i_n}{n}$$

Donde: i corresponde a la variable y n al número de variables analizadas.

El valor del Riesgo deriva de la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = \frac{IP + IV}{2}$$

Finalmente, los resultados de los índices obtenidos y del riesgo fueron cartografiados (Figura 55). La distribución espacial del riesgo de erosión costera fue obtenida de la superposición de IP y IV, y su resultado fue clasificado en las cinco categorías establecidas desde muy bajo a muy alto riesgo.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Dinámica y erosión costera

La zona costera, tanto marina como lacustre, es un ambiente dinámico donde interactúan la tierra, la atmosfera y el agua, y está sujeta a una variedad de procesos. Aquellos que ocurren en las aguas costeras, incluyen vientos que producen oleaje y corrientes que en conjunto, proveen la energía que da forma y modifica la costa mediante la erosión, el transporte y la deposición de sedimentos (Bird, 2008).

El viento además de generar oleaje e impulsar corrientes, desplaza los sedimentos más finos reduciendo sus superficies y provocando el movimiento de partículas de roca hacia la tierra, a lo largo de la costa o bien aguas adentro. La meteorización en costas rocosas produce sedimentos lo suficientemente finos como para ser arrastrados por este agente, contribuyendo así a la erosión de las mismas. La acción del viento también favorece la evaporación, secando las áreas rocosas húmedas en las caras de los acantilados y las plataformas costeras (Bird, 2008).

Las olas también modifican las zonas costeras. Estas pueden romper en sentido oblicuo a la línea litoral, suben en diagonal por la playa y durante la resaca descienden por la gravedad en forma recta por la pendiente de la playa. A este movimiento en “zig-zag” de las partículas, se lo denomina deriva

litoral o de playa (Figura 1). Las corrientes litorales también se forman por olas que rompen oblicuamente, tienen lugar en la zona de arrastre y se mueven casi en paralelo a la costa (Figura 2). Estos procesos nombrados poseen la capacidad de transportar grandes cantidades de material a lo largo de la playa y por la zona de arrastre (Strahler, 1981, Tarbuck *et al.*, 2013).

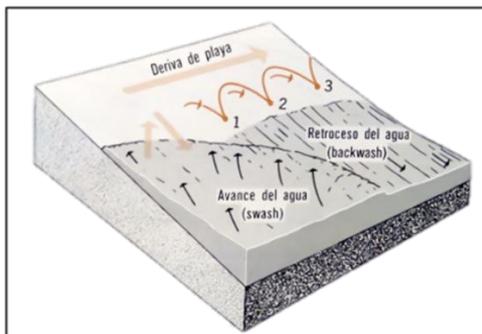


Figura 1. Esquema mostrando la deriva de playa (extraída de Strahler, 1981).

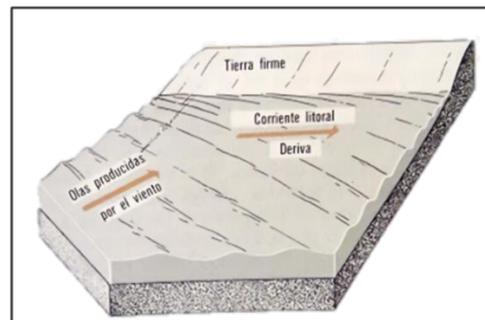


Figura 2. Esquema mostrando las corrientes litorales (extraída de Strahler, 1981).

A medida que las olas se desplazan hacia aguas someras, la topografía del fondo influye en el patrón del oleaje que se mueve hacia la costa. De este modo, se produce un fenómeno denominado “refracción de olas”, que es un cambio de dirección de los frentes de las olas al aproximarse a la costa. Este fenómeno afecta la distribución de la energía del oleaje a lo largo de la costa, e influye sobre el lugar y la intensidad de la erosión, el transporte de sedimentos y su eventual acumulación (Codignotto, 1997).

La dinámica sedimentaria que ocurre de manera natural en las costas da como resultado cambios continuos por erosión y sedimentación, lo que aunado a la topografía local genera diferentes formas litorales y paisajes costeros. Las geoformas de este ambiente se pueden clasificar en función del mecanismo de acumulación o erosión. Entre las formas erosivas se encuentran acantilados, puntas rocosas (salientes, promontorios), plataformas de abrasión etc., las relacionadas con acumulación son playas, barreras, bahías entre otras (Silva *et al.*, 2017).

En una costa con promontorios y bahías, la rotura de las olas tiene un poder erosivo muy grande en los primeros, mientras que en las bahías impera la acumulación. La respuesta natural a estos fenómenos, es que salientes y promontorios se erosionan y retroceden, tendiendo a formarse a lo largo del tiempo, una línea de costa recta (Figura 3). Cuando las olas llegan oblicuas a una costa con morfología recta, ocurre la refracción, en este caso las olas se tuercen y rompen casi paralelas a la playa (Figura 4) (Strahler, 1981).

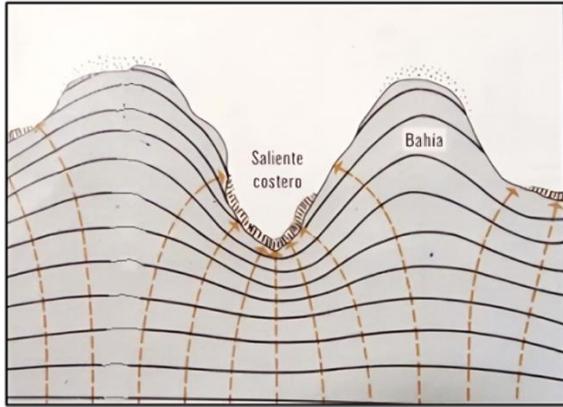


Figura 3. La refracción de las olas motiva que la energía se concentre en los salientes costeros (modificada de Strahler, 1981).

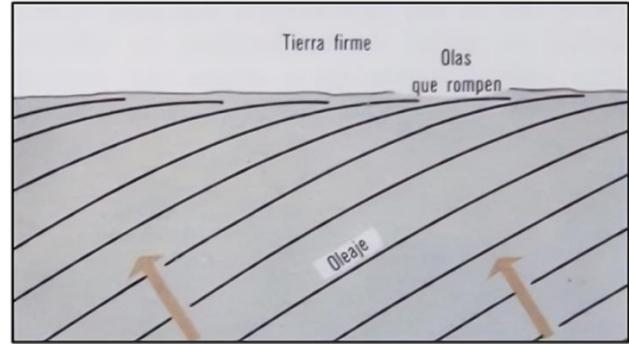


Figura 4. Refracción en línea de costa recta (extraída de Strahler, 1981).

Las playas pueden definirse como una acumulación de sedimentos de arena, grava o una mezcla de ambas en el margen continental del océano, lago o río, en cuya dinámica intervienen entre otros, el oleaje (Flor, 2004). Varían de tamaño y forma, pueden ser de grandes extensiones o formar un conjunto de playas de bolsillo separadas por promontorios en costas de bahías limitadas por cabos rocosos. El origen de los sedimentos que las constituyen puede ser variado y provenir de la erosión de acantilados, sedimentos del fondo marino, de lago, sedimentos fluviales, eólicos etc. (Gutiérrez Elorza, 2008).

Bird (2008) define a los acantilados como pendientes costeras empinadas (generalmente con una inclinación de más de 40 grados, pero a menudo verticales y a veces sobresalientes) talladas en formaciones rocosas. Su morfología (Figura 5) comprende: una meseta o área tierra adentro desde la cima del acantilado; la cima que marca el cambio de pendiente desde la meseta hasta la cara o frente del acantilado; el frente que se extiende desde la cima hasta la intersección de la pendiente con la playa o plataforma de abrasión y la base del acantilado que es el área de transición entre el frente o acantilado subaéreo y la plataforma. El límite superior de la base del acantilado está marcado por la altura a la que puede llegar la acción de las olas (sin incluir la pulverización) y el límite inferior por la unión con la plataforma de abrasión de pendiente más suave. (Davidson-Arnott, 2010).

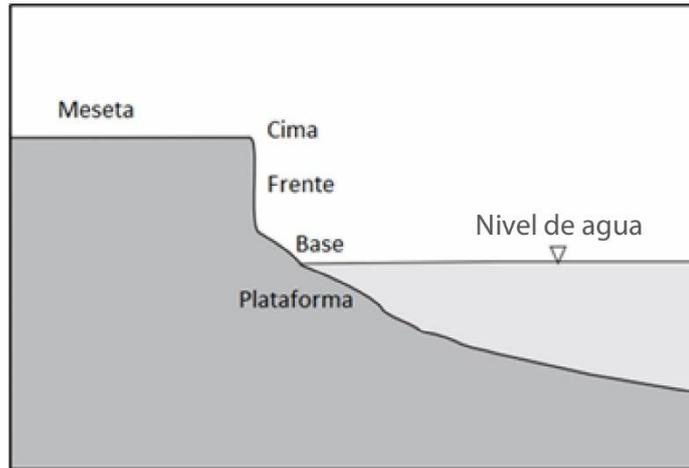


Figura 5. Morfología de un acantilado (modificado de Davidson-Arnott, 2010).

Muchos acantilados están bordeados por plataformas rocosas o de abrasión que pueden definirse como la superficie erosiva de una roca que se extiende desde el pie del acantilado hacia el agua hasta el límite de la erosión provocada por las olas. Se considera que se forman mediante el retroceso del pie del acantilado costero y posteriormente se va modificando por la acción de las olas. A diferencia de la empinada cara del acantilado subaéreo, la pendiente de la plataforma es relativamente suave y algunas partes pueden ser casi horizontales (Davidson-Arnott, 2010).

En los acantilados actúan mecanismos de erosión en su base, sobre y por debajo de la lámina de agua, y en su frente asociados a procesos subaéreos.

Los procesos que actúan en la base tienen la función de erosionar y transportar material e incluyen la abrasión, atrición, corrosión, disolución y bioerosión que son producto de la acción del oleaje a menudo acoplada con otros fenómenos físicos, químicos y biológicos (Castedo, 2012).

La abrasión es la acción mecánica por rozamiento que produce desgaste u erosión del material rocoso causada por la acción del agua cargada con sedimentos que provienen de derrubios del frente rocoso que está siendo erosionado. Tiende a producir superficies suaves, aunque en los casos en que se presentan inhomogeneidades litológicas o debilidades estructurales puede producir desgaste local o ranuras del lecho de roca; sus efectos pueden apreciarse en las plataformas donde los materiales rocosos más resistentes persisten en forma de pilares que quedan por encima de una superficie rocosa suavemente desgastada; también pueden formarse “marmitas”, donde guijarros tallan depresiones circulares. En el pie de los acantilados puede desarrollarse un hueco socavado, muesca o zapata en

forma de U o V denominado “mediacaña” cuya anchura suele ser mayor que su profundidad y su techo es casi horizontal (Castedo, 2012).

La atrición se refiere al pulimento y disminución del tamaño de partículas rocosas transportadas por las olas y las corrientes por frotación, trituración, choque, raspado y golpeo mutuo de las partículas (Hubp, 2011).

La corrosión implica la disolución del material rocoso debido a la acción de agentes químicos, como el agua y el dióxido de carbono, el término se utiliza para describir el proceso de desgaste y eliminación de rocas debido a la disolución química (Goudie, 2004).

Los procesos que actúan en el frente del acantilado están asociados a la acción de la gravedad, al debilitamiento progresivo de los materiales por meteorización física y química, flujos de aguas subterránea, precipitaciones, bioerosión y batidas del oleaje que pueden generar movimientos de remoción en masa (Castedo, 2012).

Los afloramientos de acantilados pueden desintegrarse como resultado de la meteorización por humedad y sequedad de las superficies sujetas a rocío, salpicaduras y lavado por lluvia especialmente en costas áridas (Goudie, 2004).

El proceso de desgaste de los materiales rocosos por la actividad de organismos vivos denominado bioerosión (Fox, 2005) está vinculado principalmente a la penetración y ensanchamiento de las fisuras por las raíces de las plantas y a la actividad de pequeños mamíferos.

Los movimientos de remoción en masa son movimientos de suelo, roca y materiales orgánicos ladera abajo por efecto de la gravedad, y también las geoformas que resultan de los mismos (Highland y Bobrowsky, 2008). Se producen al romperse el equilibrio entre las fuerzas gravitatorias que tienden a movilizar los materiales, y la resistencia que éstos ofrecen a tal movimiento (Chacón *et al.*, 2007). La inestabilidad se genera cuando un aumento en el esfuerzo cortante (por ejemplo, debido a una mayor carga) o una disminución en la resistencia al corte (es decir, debilitamiento de la formación rocosa) alcanza un nivel umbral y se alivia mediante el movimiento cuesta abajo (Bird, 2008).

Una de las clasificaciones más aceptadas y utilizadas actualmente de los movimientos de remoción en masa es la de Varnes (1978) que reconoce seis tipos: caídas y desprendimientos de rocas, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos. Dentro de la amplia variedad de movimientos de remoción en masa, las caídas o desprendimientos y vuelcos o desplomes han merecido especial atención, ya que son los que se dan mayormente en la zona de estudio (

Figura 6). Además, el movimiento del material puede ser por degradación o remoción simple generándose pequeñas crestas de acumulación inconsolidadas en la base de los acantilados que son atacadas y redistribuidas por la acción de las olas (Schillizzi *et al.*, 2004).

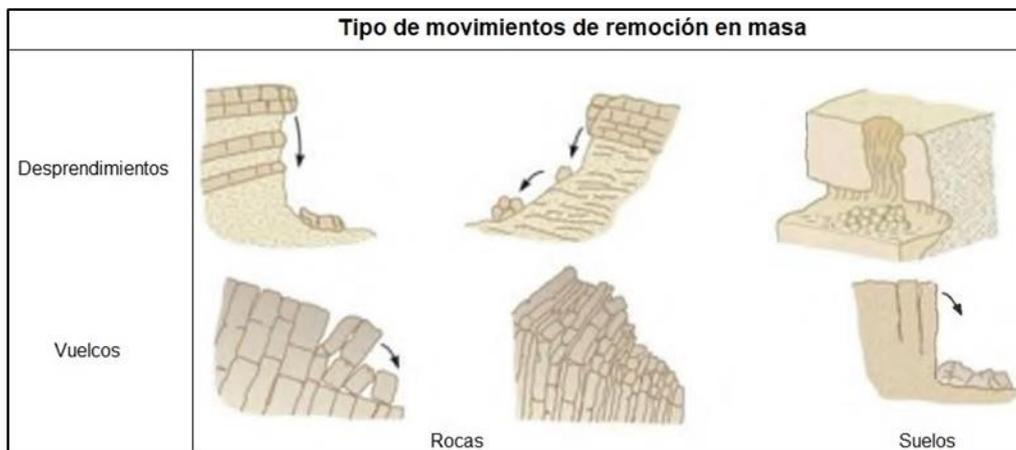


Figura 6. Tipos de movimientos de remoción en masa más significativos en el área de estudio (modificado de Gonzales de Vallejo *et al.*, 2002).

Los desprendimientos son caídas libres muy rápidas de bloques o masas rocosas independizadas por planos de discontinuidad preexistentes. Son frecuentes en laderas escarpadas y acantilados y producen roturas en forma de cuña y en bloques formados por varias familias de discontinuidades. Los factores que los provocan son la erosión y pérdida de apoyo o descalce de los bloques previamente independizados o sueltos, el agua en las discontinuidades y grietas, las sacudidas sísmicas, etc. (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Un vuelco implica un movimiento de rotación de los bloques hacia adelante respecto a un eje por debajo de su centro de gravedad (González de Vallejo *et al.*, 2002). Los vuelcos son roturas que se desarrollan sobre materiales con estructuras verticales, formadas por planos de discontinuidad de la roca. El despegue de las columnas puede realizarse sobre una o varias superficies y la descompresión suele ser un requisito esencial (Gutiérrez Elorza, 2008). Los vuelcos pueden producirse cuando los estratos buzcan en sentido contrario a la ladera, por estar fracturados en bloques o por rotura al pie de las mismas. En general, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Los procesos erosivos que actúan en los acantilados generan su retroceso, produciendo una pérdida de terreno tierra adentro de la línea que demarca su borde superior o cresta. Estos procesos están asociados a diferentes etapas que incluyen el desprendimiento de pequeños fragmentos a grandes

bloques de material rocoso, transporte del material desprendido, depósito del mismo en el frente del acantilado, en la plataforma o playa y la redistribución del material movilizado por el oleaje que deja nuevamente expuesto el acantilado a la erosión (Castedo, 2012). En este sentido, la acción mecánica de las olas cuando el agua golpea contra el frente del acantilado genera extracción de material por las altas presiones de choque que comprimen el aire presente dentro de las discontinuidades de las rocas y genera la apertura de las mismas. Las olas más altas y efectivas ocurren durante las tormentas cuando la superficie del agua se eleva por encima de su nivel y su impacto alcanza los puntos más altos del acantilado. En la base de los mismos, producto de la acción del oleaje, se va formando una oquedad de abrasión que, a medida que crece en profundidad, incrementa la inestabilidad en el frente del acantilado, la masa rocosa que al mojarse incrementa su peso queda colgada sin sustento y fortuitamente puede colapsar, generando desprendimientos. Después de una tormenta la plataforma puede estar recargada de derrubios y grandes fragmentos que han caído del acantilado. Estos materiales pueden verse agitados por la acción de las olas y producir atrición, quedar retenidos al pie protegiéndolo de la erosión o ser transportados a lo largo de la costa (Figura 7). Esta sucesión de fenómenos puede verse potenciada si junto a ellos, aparecen procesos de erosión subaéreos (Caselli *et al.*, 2019).

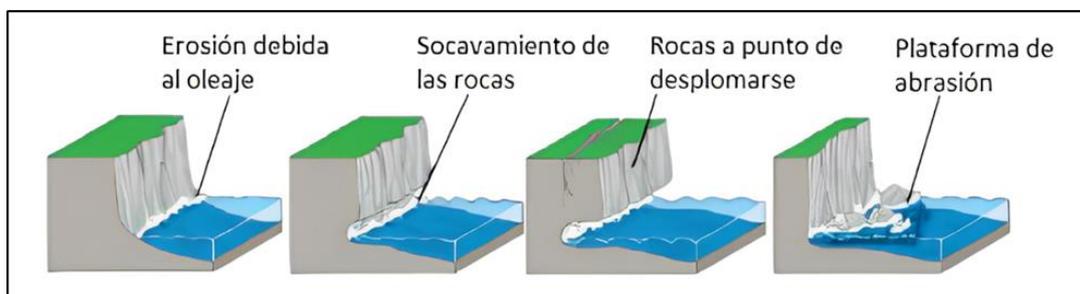


Figura 7. Ilustración del proceso erosivo del oleaje en un acantilado (extraído de Castedo, 2012).

La capacidad erosiva del oleaje va a depender de la dureza o erodabilidad de las rocas expuestas en el acantilado, de la tasa de barrido del detrito desprendido del mismo, de la presencia o ausencia de playas y /o plataformas debido a que estas disipan la energía de las olas de diferentes maneras (Castedo, 2012). Ya sea por acción mecánica, química o biológica la erosión está regulada por las características litológicas y el grado de fracturación y diaclasado de los materiales afectados (Figura 8).

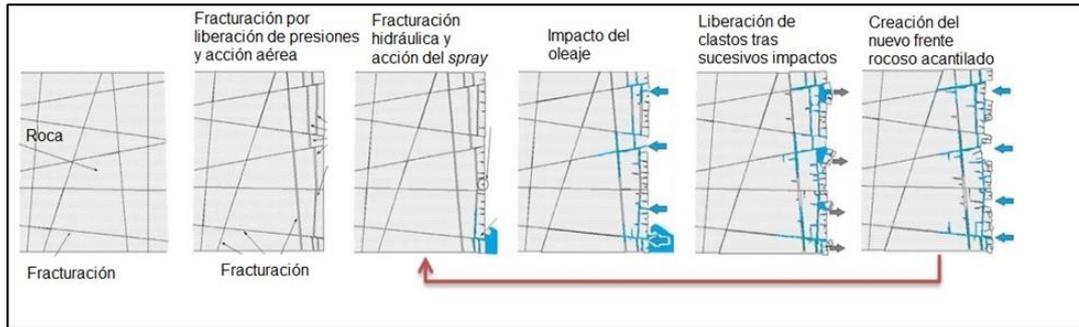


Figura 8. Esquema descriptivo. Vista lateral de liberación del oleaje en el frente rocoso del acantilado. (modificado de Castedo, 2012).

En el retroceso de los acantilados intervienen factores condicionantes como la litología (composición y grado de consolidación) y la estructura (presencia de zonas de debilidad: diaclasamientos, fracturas, planos de estratificación), y desencadenantes que incluyen la dinámica del oleaje, hidráulica continental (expresada por el movimiento de aguas por escurrimiento superficial e infiltración), hidráulica combinada, acción antrópica (Schillizzi *et al.*, 2004).

La litología de las rocas expuestas en los acantilados o plataformas son un factor importante para determinar su tasa de erosión, también lo son las estructuras internas, que ejercen un control en la morfología, determinando el tamaño y la geometría de los bloques que caen de los acantilados. Las áreas con materiales más resistentes forman cabos, promontorios y las zonas más débiles se desgastan fácilmente dando lugar a bahías, oquedades, entrantes etc. Las rocas masivas son más resistentes a la erosión que las formaciones rocosas atravesadas por fracturas, diaclasas, estratificación, que facilitan el trabajo de los procesos erosivos formando grietas, hendiduras, oquedades, surcos (Castedo, 2012).

En la retracción de los acantilados interviene también la acción erosiva provocada por la infiltración y el escurrimiento superficial producido durante grandes precipitaciones que generan cárcavas hacia el borde del acantilado, debilitando los bloques subyacentes habilitando su posterior caída (Schillizzi *et al.*, 2004). Finalmente, otro factor, no menos importante de los procesos erosivos, es la intervención antrópica que provoca desequilibrios en la evolución natural morfológica de la costa (Marcomini y Lopez, 2014).

4.2 Riesgo y sus componentes

En las últimas décadas se han masificado los estudios de riesgo y el interés que se genera en torno a ellos (Calvo, 2000). El concepto de riesgo se ha incorporado en varias disciplinas lo que revela el amplio alcance del mismo. La Organización de Mitigación de Desastres de las Naciones Unidas (*United Nations Disaster Relief Organization*) UNDRO, en conjunto con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) determinan un marco para el riesgo y establecen los conceptos de peligrosidad, vulnerabilidad, riesgo y afines. Entendiendo el Riesgo como “el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la probabilidad de ocurrencia de un desastre”. Amenaza, peligro o peligrosidad “es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado”. Vulnerabilidad “es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso” (UNDRO, 1979).

Cardona (1993) define el riesgo como el daño o pérdida esperado a partir de la probabilidad de ocurrencia de eventos de origen natural o humano peligrosos (amenaza o peligro) y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos en un determinado sitio y en un período de tiempo dado.

Existen en la literatura numerosos trabajos, generalmente realizados para costas marinas, donde se evalúa la susceptibilidad de las mismas ante diferentes procesos, entre ellos la erosión. Uno de los métodos desarrollados para evaluar el comportamiento de la costa ante los mismos es el diseño de índices de vulnerabilidad y peligrosidad. Estos índices, compuestos por indicadores o variables que incluyen distintos factores implicados en los procesos naturales, han sido aplicados por diversos autores con el fin de categorizar las zonas costeras según su respuesta ante ellos (Del Rio y Gracia, 2007; Lasta *et al.*, 2010; Merlotto *et al.*, 2011; Rangel-Buitrago y Posada-Posada, 2013; Fernández *et al.*, 2017; Merlotto *et al.*, 2017).

La evaluación del riesgo frente a fenómenos naturales constituye una herramienta que permite identificar zonas de mayor o menor riesgo frente a diferentes peligros proporcionando el conocimiento apropiado para la elaboración de medidas de prevención y/o mitigación frente a una amenaza (Cutter, 2000). Los mapas de riesgo son representaciones cartográficas que permiten visualizar la distribución del riesgo identificando dichas zonas. La ley provincial 2713 sancionada en el 2010 tiene entre sus objetivos incorporar el enfoque de riesgo en las políticas de planificación y desarrollo territorial de la Provincia del Neuquén. En ella se definen los conceptos básicos del enfoque de riesgo y se refiere a los mapas de riesgo como “representaciones cartográficas que permiten visualizar la distribución de

determinados riesgos de desastre en un territorio específico, a partir de la combinación de mapas de amenazas y vulnerabilidades”.

5 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Ubicación

El área en estudio abarca la costa norte y este del embalse Mari Menuco, ubicada aproximadamente entre los 5734714 S, 2537954 W y los 5721917 S, 2547448 W, en el departamento Confluencia, provincia del Neuquén (Figura 9). Se accede a la misma por la ruta provincial N°7, desde la ciudad de Neuquén hacia el norte y en el km 25 se empalma con la ruta provincial N°51 desde donde se llega a la costa desde diversos accesos secundarios.

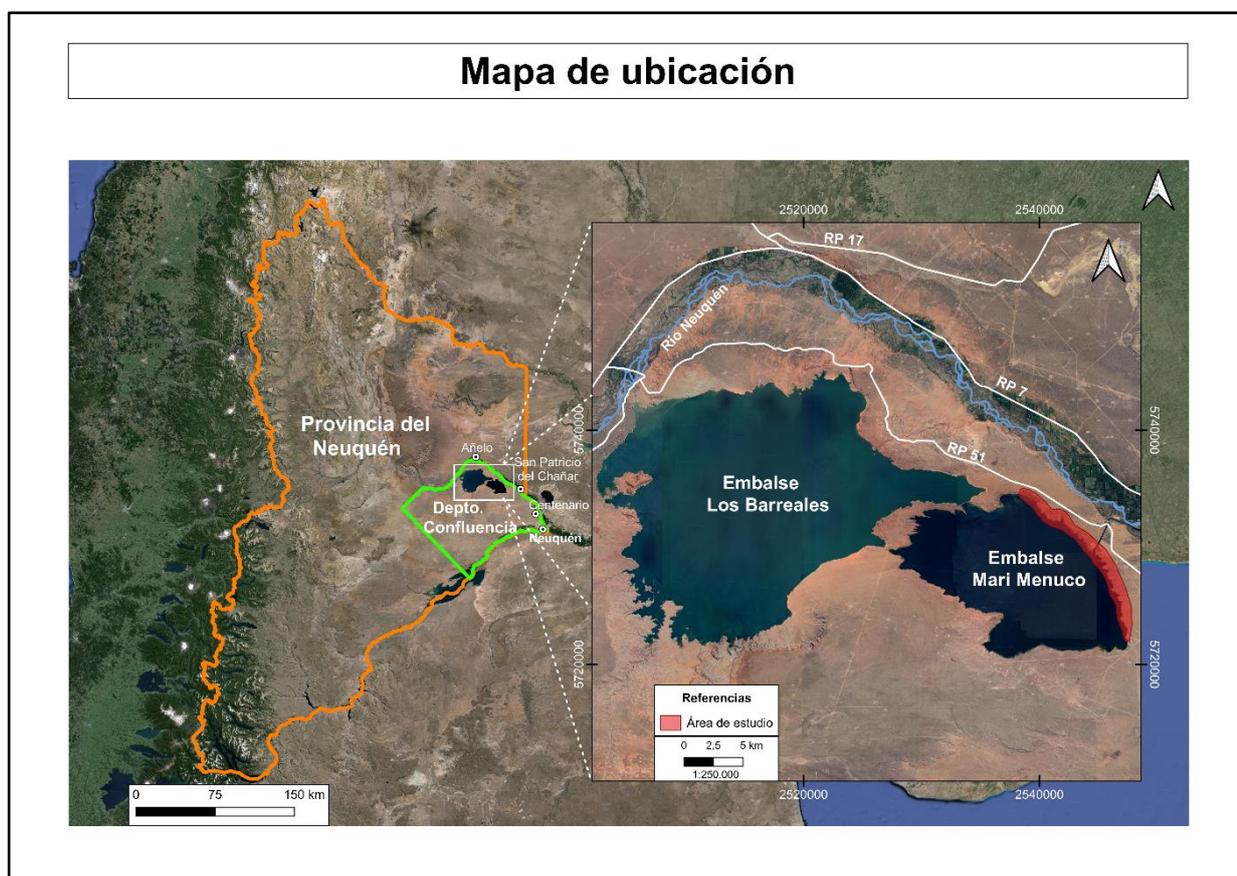


Figura 9. Ubicación del área de estudio.

5.2 Características generales del embalse Mari Menuco

Los embalses Los Barreales y Mari Menuco, junto con el Chañar forman parte del Complejo Hidroeléctrico Cerros Colorados, ubicado aguas arriba del valle inferior del Río Neuquén, que se desarrolló a partir de 1969, finalizó 10 años después y fue construido para asegurar la provisión de agua para consumo humano, irrigación, control de crecidas y generación hidroeléctrica (Ortega y Blasco, 1998). Estos embalses eran antiguas depresiones (bajos) de importancia por su extensión que fueron llenadas para la construcción de esta mega obra. La presencia de bajos es una característica frecuente en el paisaje de la Patagonia extraandina donde se ubica el área en estudio. En cuanto al origen de estas depresiones se han propuesto diversas causas sugiriendo un origen tectónico, por deflación, o mediando una actividad de carácter múltiple. Independiente del origen, los procesos subaéreos de meteorización, remoción en masa, acción hídrica y deflación son los que determinaron la exhondación de las mismas (Rodríguez *et al.*, 2007; Gonzales Diaz y Di Tommaso, 2011). En estos paisajes áridos, integrados por depresiones de deflación, circundadas por laderas abruptas, taludes y abanicos aluviales que se forman por meteorización e inundaciones repentinas, el viento retira polvo y arena (Bloom, 1974). Estos y otros procesos formadores del relieve, previo al llenado del embalse Mari Menuco, definieron el aspecto original de sus costas, que ahora 45 años después de su llenado, muestran geoformas en evolución que sufren progresivas variaciones en su fisonomía.

Como se ilustra en la Figura 10, a partir de la presa Portezuelo Grande se eroga por el cauce del Río Neuquén un caudal mínimo para uso humano agrícola y ecológico. Mientras que por el Canal Derivador Portezuelo Grande se ingresa al embalse Los Barreales el caudal restante. Desde el dique Loma de la Lata se regula el caudal que se deriva al embalse Mari Menuco. Por último, el agua ingresa al Dique y Central Planicie Banderita donde, mediante turbinas, se genera hidroelectricidad y se represa nuevamente aguas abajo en el compensador Dique El Chañar, evitando que los caudales instantáneos de generación produzcan daños aguas abajo, erogando caudales en función del caudal ecológico y los usos consuntivos (riego, industrias, consumo humano) (Pons y Rojas Reyes, 2020).

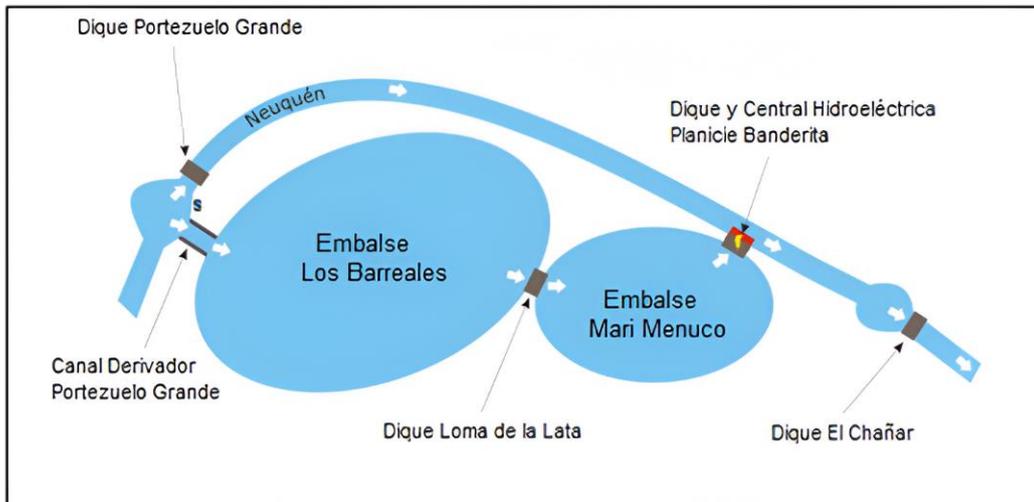


Figura 10. Esquema de la distribución de diques y embalses del Complejo Cerros Colorados (Pons y Rojas Reyes, 2020).

El embalse Mari Menuco tiene una superficie de 173,9 km², un volumen activo de operación de 346 Hm³ y una profundidad media de 79,3 m (Ortega y Blasco, 1998). Su nivel máximo normal es 413,5 m.s.n.m. y el nivel mínimo extraordinario es de 410,5 m s n m. Bajo condiciones hídricas normales opera entre las cotas 412 m y 413 m.s.n.m, correspondientes al nivel mínimo normal durante todo el año (Fuente: información proporcionada vía correo electrónico por la AIC), manteniéndose con un nivel de operación casi constante lo que permite aumentar la eficiencia de la central hidroeléctrica.

Del análisis de la serie de datos de los niveles del embalse Mari Menuco (correspondiente a 23 años), proporcionados por la AIC, se observa que la mayor parte del tiempo (95,3 %) los niveles varían entre las cotas 413,5 m.s.n.m. y 412 m.s.n.m. correspondientes a su nivel máximo y mínimo normal respectivamente, con una variación de 1,5 m (Tabla 3).

Nivel de operación	Cantidad de días registrados	% de tiempo
NIVEL <410,5 m s n m.	27	0,3
412 m.s.n.m. > NIVEL ≥ 410,5 m.s.n.m.	356	4,3
413,5 m.s.n.m. ≥ NIVEL ≥ 412 m.s.n.m.	7943	95,3
NIVEL > 413,5 m s n m	13	0,2

Tabla 3. Variación de los Niveles de Embalse (porcentaje de tiempo) para la serie analizada (1/10/1998 - 30/07/2021).

Si bien la fluctuación de las aguas es importante para la erosión costera, las variaciones del nivel de agua en el embalse para el periodo analizado son de 1,5 m entendiéndose que son poco significativas y concluyendo que la acción del oleaje actúa mayoritariamente sobre la misma franja costera.

La capacidad erosiva del oleaje en el embalse Mari Menuco se ve potenciada debido a que gran parte de la carga sedimentaria del río Neuquén queda en el embalse Los Barreales, pasando agua a través del dique Loma de la Lata con escasa carga sedimentaria. Esto se ve reflejado en los valores de transparencia y profundidad media del disco de Secchi que son de 8,2 m y ≥ 6 m para Mari Menuco y de 2,9 m y entre 6-3 m para el embalse Los Barreales (AIC, Secretaría de Gestión Ambiental, 2016) y también al observar la superficie de los embalses en imágenes satelitales. La profundidad del disco de Secchi es una medida de la claridad del agua, la cual se ve afectada por las algas, partículas de sedimentos y otros materiales suspendidos. Lecturas más altas de la profundidad Secchi indican agua clara, mientras que lecturas más bajas indican agua turbia o coloreada (Chin, 2006).

5.3 Geología

En el área en estudio afloran depósitos del Grupo Neuquén pertenecientes al subgrupo Río Colorado, conglomerados correspondientes a depósitos fluviales antiguos del Río Neuquén y Río Negro (nivel de terraza III) y depósitos coluviales (Rodríguez *et al.*, 2007; Garrido, 2010; Garrido, 2011) (Figura 11).

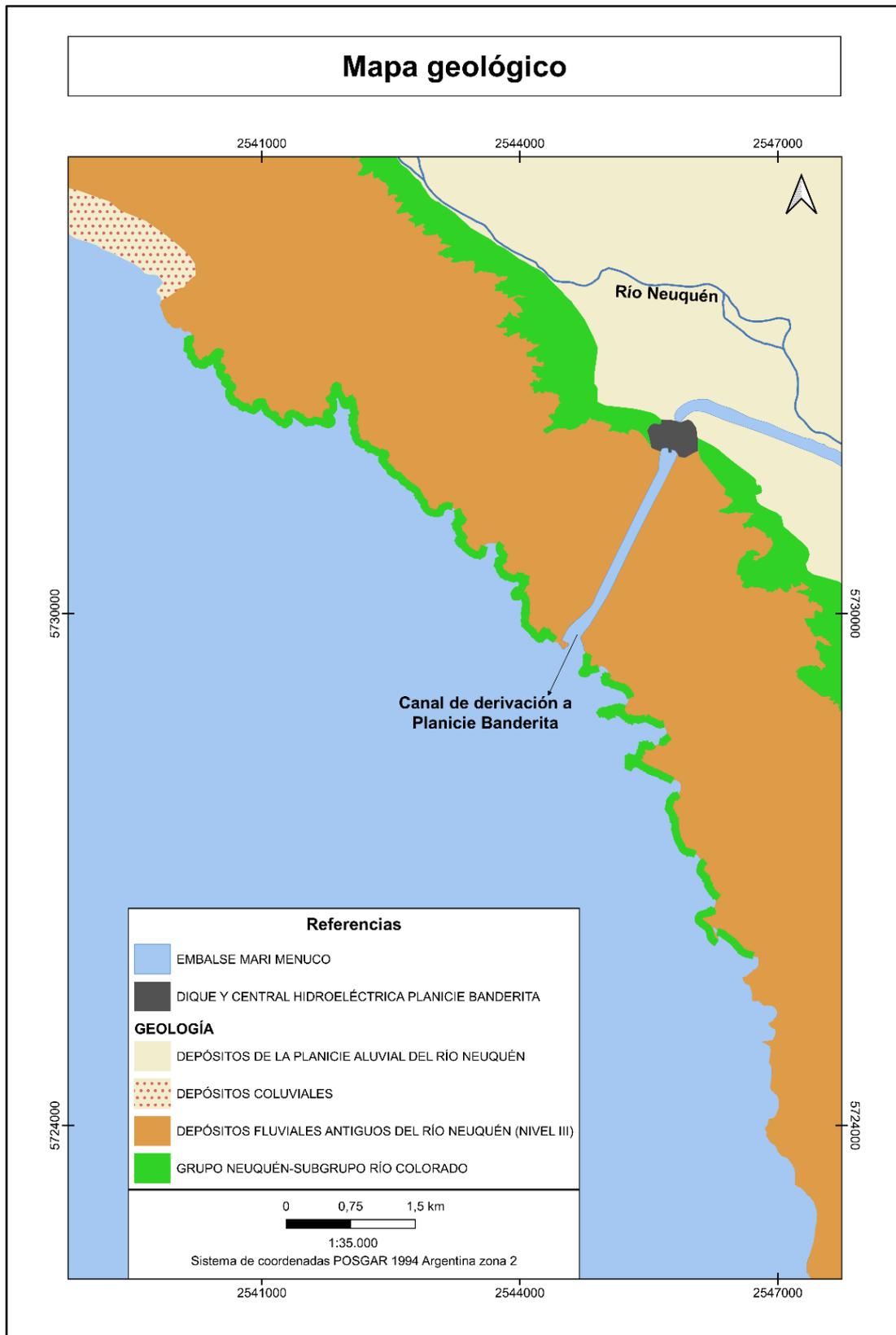


Figura 11. Unidades aflorantes en el área de estudio.

El Grupo Neuquén, cuyos depósitos se vinculan al inicio de la fase de antepaís de la Cuenca Neuquina producto de la tectónica compresional sobre el margen andino que ocurrió a fines del Cretácico Inferior, constituye una sucesión de depósitos continentales de origen fluvial, eólico y lacustre somero desarrollada entre el Cenomaniano Temprano y el Campaniano Medio (Cretácico Superior). La base de este grupo está limitada por la discordancia Patagonídica que refleja la deformación producida por la fase compresional, y el techo por la discordancia Huantráiquica relacionada al desarrollo de un arco magmático occidental asociado a una fuerte subsidencia regional que posibilitó el ingreso del océano Atlántico a la cuenca (Garrido, 2011).

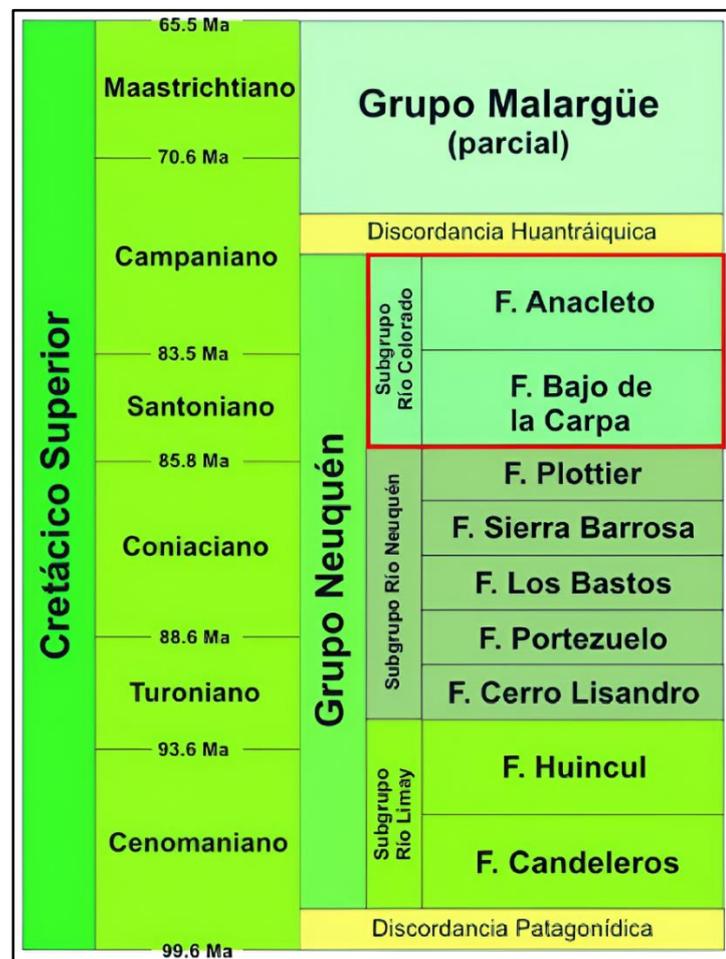


Figura 12. Esquema litoestratigráfico del Grupo Neuquén donde se resaltan las unidades aflorantes en laderas y acantilados del área de estudio (modificado de Garrido, 2011).

Según Garrido (2011) el subgrupo Río Colorado está integrado por las Fms. Bajo de la Carpa y Anacleto, aflorantes en el área de estudio, cuyos depósitos se conforman por la alternancia de fangolitas, areniscas cuarzolíticas y conglomerados polimícticos (Figura 12). La Fm. Bajo de la Carpa está compuesta por una sucesión de depósitos continentales predominantemente psamíticos, con

interestratificación de horizontes pelíticos. Los términos psamíticos se refieren principalmente a areniscas cuarzolíticas, con escasa a nula matriz y débil cemento carbonático. La presencia de pigmento férrico imprime a estos depósitos su típica coloración amarillenta a rojiza. Los términos pelíticos se encuentran integrados por fangolitas rojizas poco consolidadas, seguidas por depósitos limo-arenosos gris-verdosos y verde-amarillentos. La Fm. Anacleto se compone por una sucesión de depósitos continentales predominantemente pelíticos a psamítico finos. Los términos psamíticos se componen principalmente de areniscas cuarzolíticas y cuarzomicáceas, con porcentaje variable matriz fangosa y débil cemento carbonático. Su color predominantemente rojizo está dado por la presencia de pigmento férrico, pudiendo no obstante exhibir algunos horizontes de areniscas amarillentas. Los términos pelíticos se encuentran integrados por una marcada alternancia de fangolitas y limolitas arenosas poco consolidadas.

Las unidades del Grupo Neuquén son cubiertas por los depósitos fluviales pleistocenos que comprenden ortoconglomerados polimícticos, compuestos por clastos subredondeados de colores gris, castaño oscuro y negro con diámetros que pueden llegar a 25 cm. Presentan estratificación grosera, con algunas intercalaciones arenosas. En la parte superior hay niveles que poseen cementación por carbonato de calcio resultando impermeables y más resistentes. Las laderas muestran depósitos coluviales de sedimento de procedencia local, que son removidos y depositados por acción fluvial efímera o por gravedad compuestos por gravas, arenas, limos de afloramientos próximos (Rodríguez *et al.*, 2007).

5.4 Geomorfología

La zona de estudio se enmarca en un ambiente de mesetas y litoral. El relieve mesetiforme está conformado por una superficie llana de la meseta Cerros Colorados, correspondiente a las terrazas altas del Río Neuquén (nivel III), remanentes de viejas planicies aluviales (Rodríguez *et al.*, 2007). Gonzales Diaz y Di Tommaso (2011) se refieren a las mismas como “planicies estructurales sedimentarias”, controladas por una cubierta conglomerádica de “rodados patagónicos” que conforman un nivel protector de los estratos subyacentes. La meseta es afectada por erosión hídrica y eólica, está cubierta por pavimento del desierto (Figura 13) y muestra acumulaciones de arena que se forman alrededor de los arbustos definidas como nebkas (Figura 14).



Figura 13. Pavimento del desierto. Diciembre 2022.



Figura 14. Acumulación de arena "nebka". Diciembre 2022.

En el frente de la meseta se desarrollan laderas con inclinaciones en algunos casos mayores al 60%, formadas por material duro en su parte superior y rocas más fácilmente erosionables por debajo, clasificadas como laderas compuestas (Gutierrez Elorza, 2008). En ellas se observa remoción simple del material que forma bancos inclinados de detritos con pequeños conos (Figura 15), desprendimientos por procesos de remoción en masa y erosión hídrica con desarrollo de cárcavas y cañadones (Figura 16). Las cárcavas y cañadones muestran mayores dimensiones y pendientes en el sector noroeste del área en estudio donde penetran directamente en el lago, a diferencia de las que se encuentran en el noreste que tienen menores pendientes y culminan en playas.



Figura 15. Cono de detritos. Febrero 2023.



Figura 16. Cañadón (38°33'5,02"S; 68°32'5,41"O). Febrero 2023.

La costa en estudio es irregular, conformada por acantilados, plataformas de abrasión, bahías, cabos y playas. Su orientación general es en sentido NNO-ESE, expuesta al oleaje producido por los vientos predominantes provienen del oeste y suroeste (Pelese y Lassig, 1997) (Figura 17). A pequeña escala el oleaje determina un patrón de deriva litoral predominante hacia el sureste que transporta material a lo largo de las playas y en la zona de rompiente.



Figura 17. Sectores costeros afectados por el oleaje ($38^{\circ}34'40,30''S$; $68^{\circ}29'40,60''O$). Octubre 2023.

El paisaje inicial, previo al llenado del embalse, influyó en las geoformas costeras que se desarrollaron. La evolución de éstas y el desarrollo de nuevas fue variando según las características litológicas, estructurales y de orientación del frente costero.

Los acantilados son geoformas activas cuyas alturas alcanzan entre 1,5 y 8 m aproximadamente (Figura 18). Además de ser afectados en su frente por procesos erosivos subaéreos son atacados por el oleaje en su base mostrando morfologías erosivas con presencia de “mediacaña” bien desarrollada que indica el límite de la erosión producto del oleaje. Algunos tienen en su parte superior un reparo rocoso, con morfología en visera o alero, con un techo y un frente abierto mucho más ancho que su fondo (Figura 19).



Figura 18. Acantilado ($38^{\circ}36'52,80''S$, $68^{\circ}27'56,80''O$). Diciembre 2023.



Figura 19. Alero. Fotografía tomada por Subsecretaría de Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén ($38^{\circ}34'38,16''S$; $68^{\circ}29'44,02''O$). Enero 2021.

El frente de los acantilados presenta diaclasas y planos de estratificación que configuran condiciones de debilidad ante la erosión. Detrás y paralelas a algunos de ellos se desarrollan grietas de liberación de tensión que dejan “bloques” expuestos como preludio del desprendimiento o derrumbe (Figura 20; Figura 21).



Figura 20. Grieta de liberación de tensión (38°33'34,81"S; 68°31'22,21"O). Julio 2023.



Figura 21. Bloque a punto de caer (38°36'1,82"S; 68°28'28,40"O). Diciembre 2022.

Los acantilados son geformas de génesis compuesta, acción del oleaje más remoción en masa, que encuentran condiciones favorables a partir de las mencionadas características litológicas y estructurales.

Al pie de los acantilados se encuentra la plataforma de abrasión, desarrollada en areniscas, con erosión diferencial, en algunos casos con pequeñas oquedades producto de la acción del agua sobre su superficie (Figura 22; Figura 23). Tiene distintos anchos y está en parte expuesta y en parte sumergida. Sobre ella se halla material de detritos y bloques de variado tamaño, producto de la remoción en masa asociada con los procesos erosivos (Figura 24). Hacia el sector noreste del área de estudio la plataforma tiene suave pendiente mientras que en el noroeste presenta una marcada caída hacia el lago.



Figura 22. Remanente de erosión costera en forma de pilar.
Febrero 2023.



Figura 23. Oquedades sobre la plataforma de abrasión. Diciembre 2022.



Figura 24. Plataforma de abrasión con bloques caídos sobre su superficie en el Club Hidronor. Noviembre 2023.

Las playas, de distinto tamaño, tienen perfiles cóncavos y rectos. En los márgenes y al final de las bahías se encuentran playas de bolsillo separadas por promontorios, constituidas por grava (principalmente las ubicadas hacia el noreste) (Figura 25 a y b), y por arena y mixtas (las del sector noroeste) (Figura 26), en cuya dinámica interviene el oleaje y las corrientes. Tienen aporte de sedimentos de variado origen proveniente de la erosión de acantilados cercanos, de la erosión hídrica de cañadones y cárcavas que ante eventos torrenciales drenan sectores próximos, y de arena que aporta el viento que sopla desde el interior. En algunas se observan cordones de progradación de gravas generados por las olas llamados “crestas de berma” (Figura 25 b).



a



b

Figura 25. a. Playa de grava ($38^{\circ}37'23,88''S$; $68^{\circ}27'39,84''O$). b. Detalle de la misma donde se observan “bermas”. Diciembre 2022.



Figura 26. Playa de arena y grava Club Hidronor. Noviembre 2023.

Cercanas a la costa, principalmente en el sector sureste, se desarrollan lagunas costeras que son depresiones someras separadas del embalse por una barrera de grava generada por acreción lateral proveniente del material erosionado de los frentes acantilados. Estos pequeños cuerpos de agua están conectados al embalse en función de su nivel y también reciben aportes de escorrentía superficial de esporádicas lluvias (Figura 27).



Figura 27. Laguna costera Tenis Club. Diciembre 2023.

Las principales geformas reconocidas se representaron en el mapa geomorfológico que por razones de escala y de distribución gráfica se muestra por secciones de noroeste a sureste (Figura 28; Figura 29).

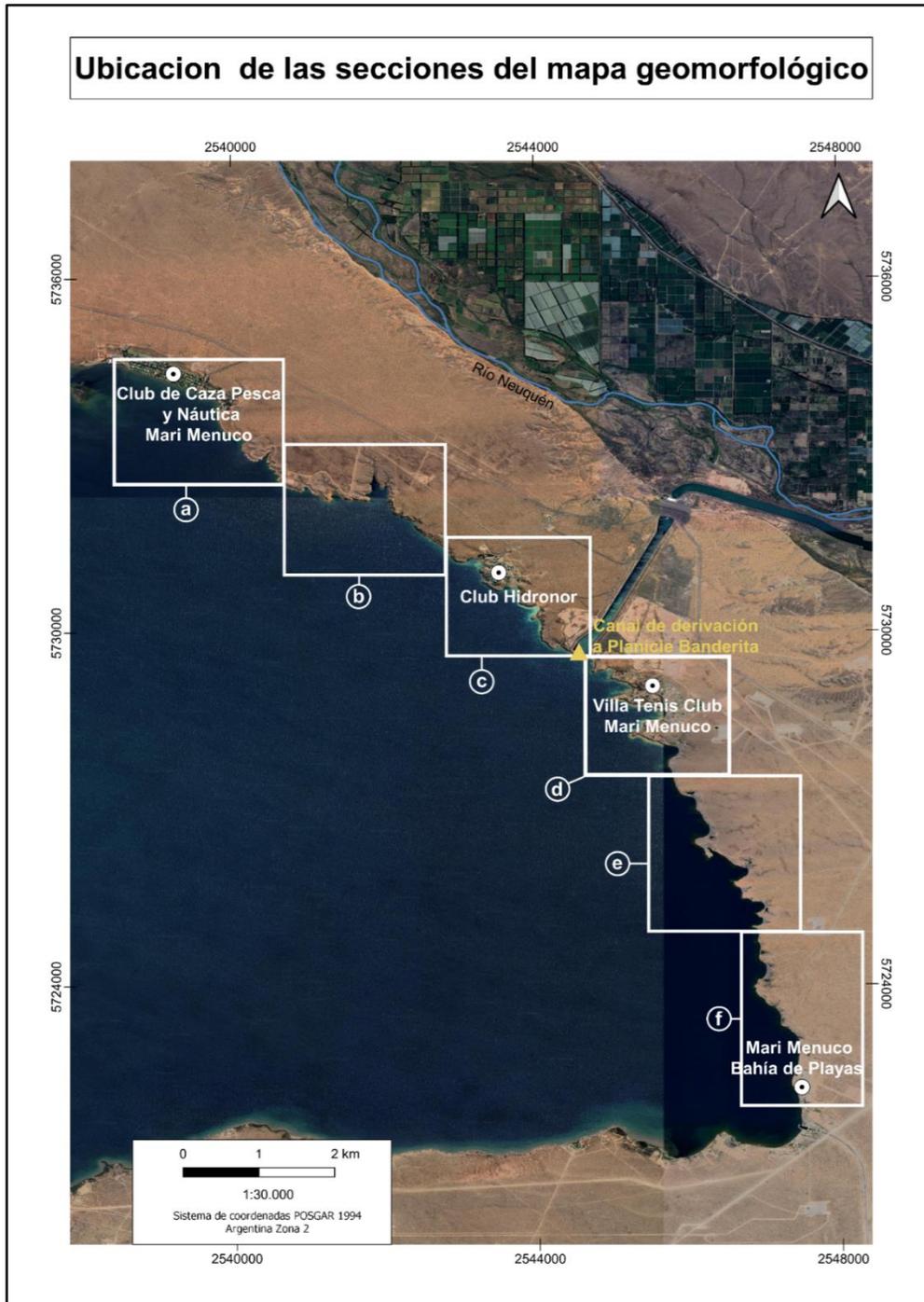


Figura 28. Secciones de representación del mapa geomorfológico.

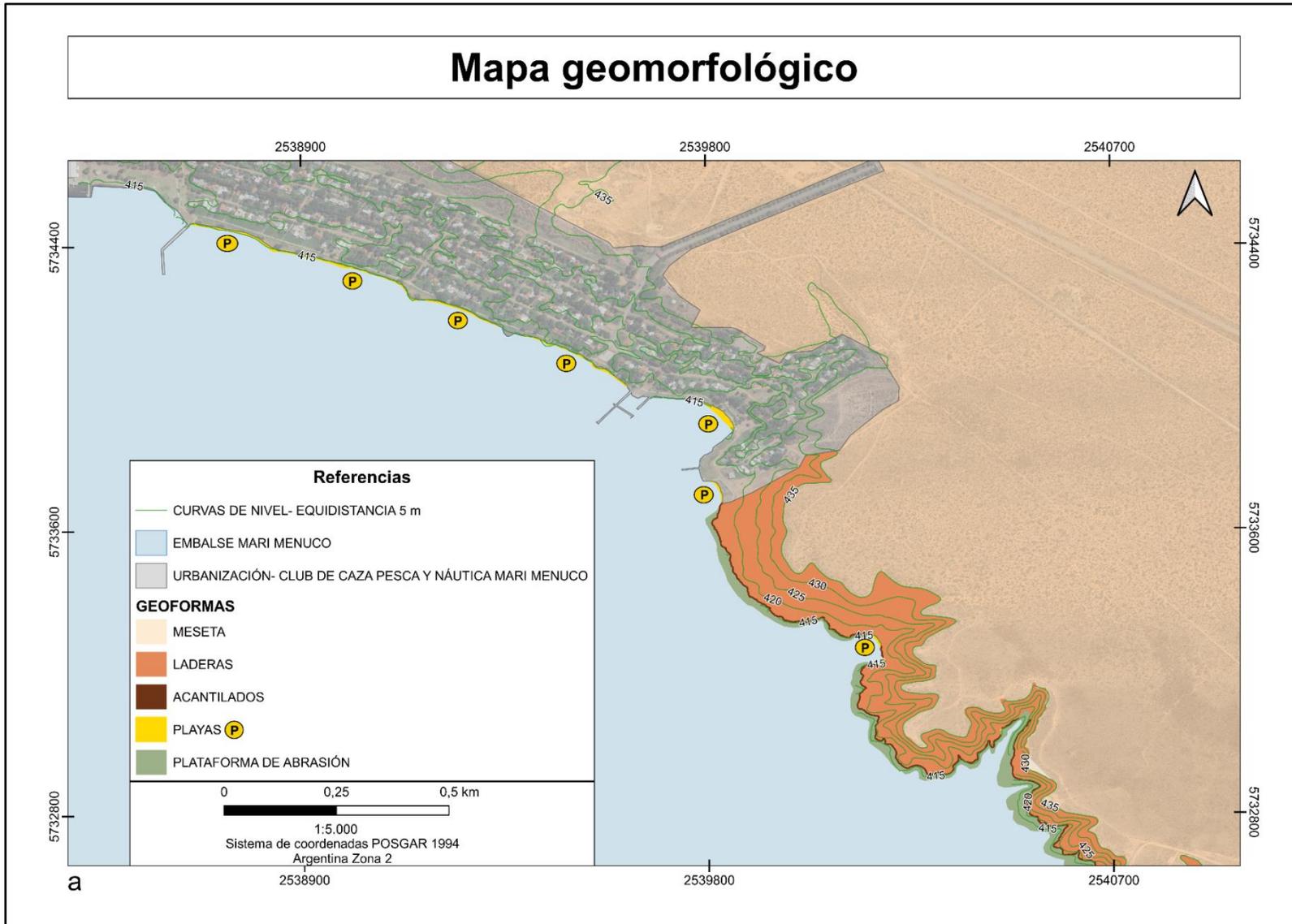


Figura 29. Mapa geomorfológico sección a.

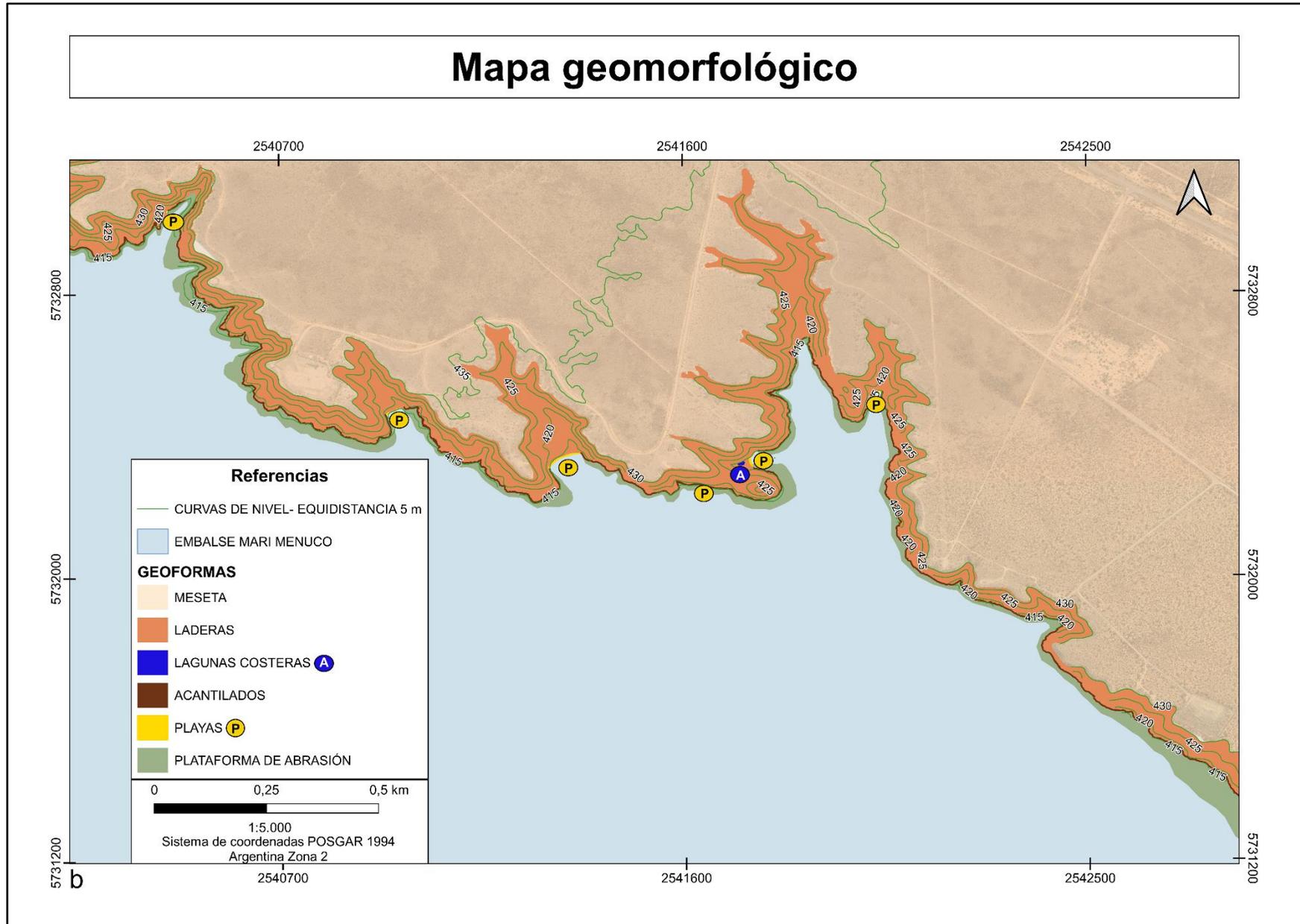


Figura 29. Mapa geomorfológico sección b.

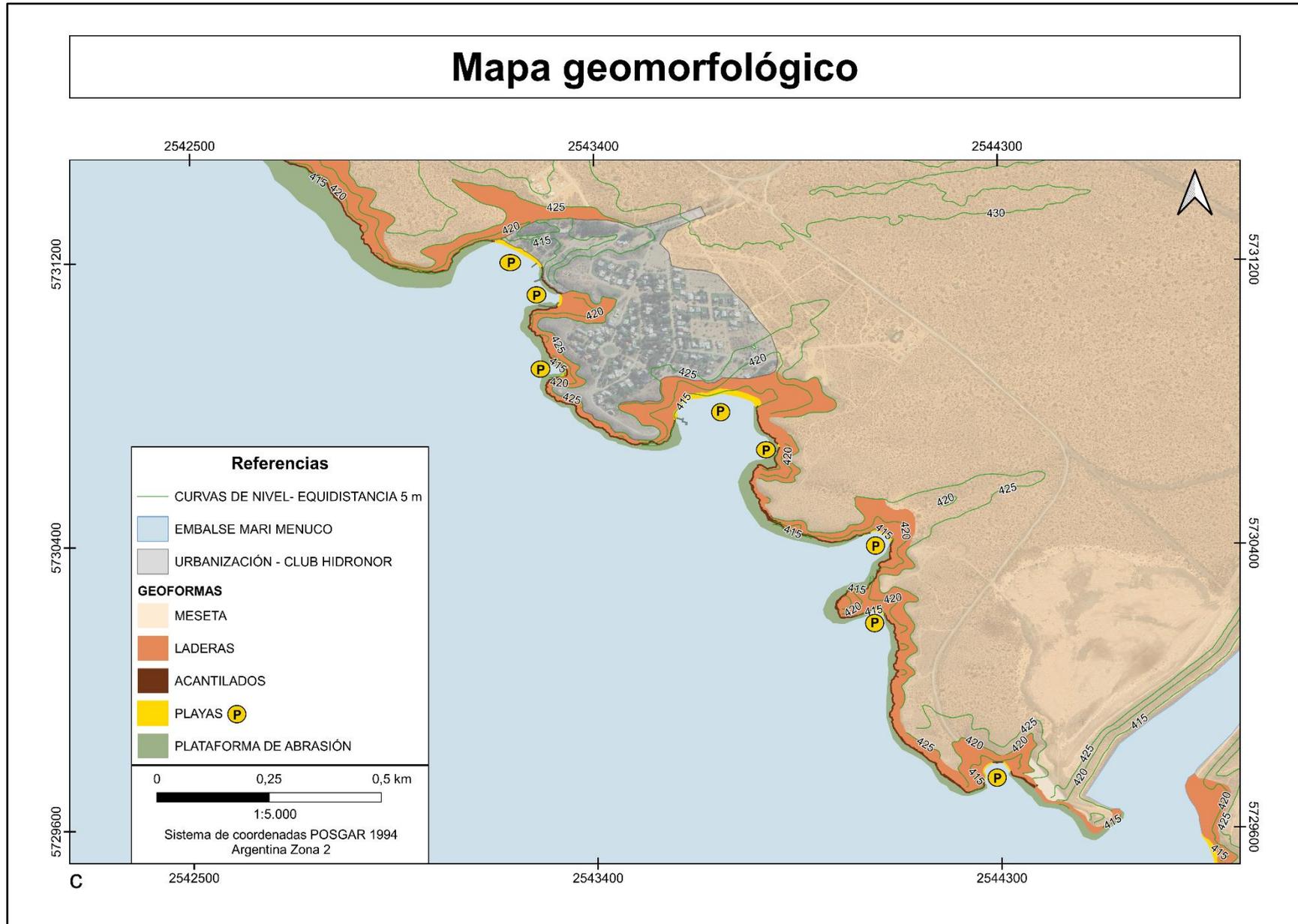


Figura 29. Mapa geomorfológico sección c.

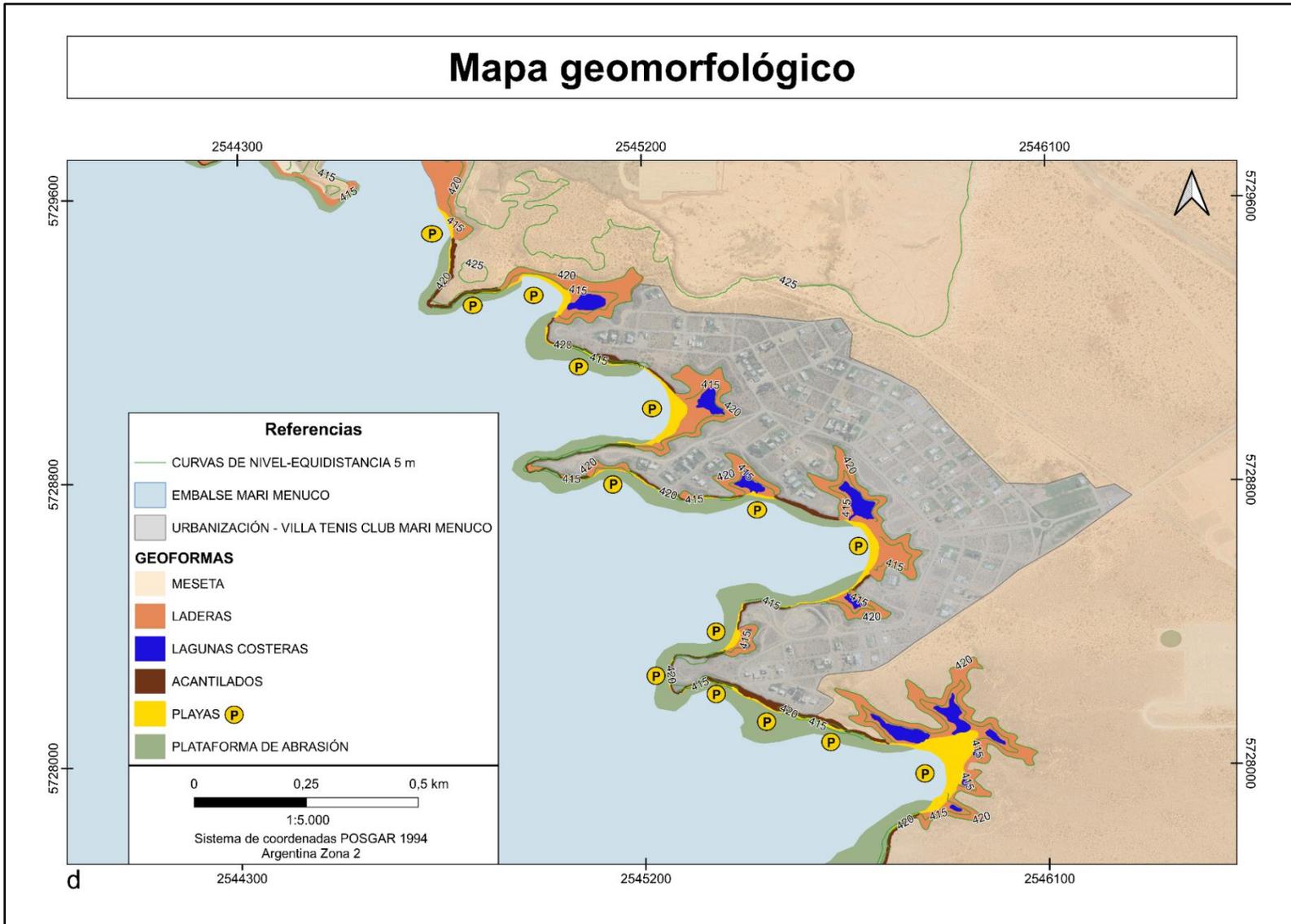


Figura 29. Mapa geomorfológico sección d.

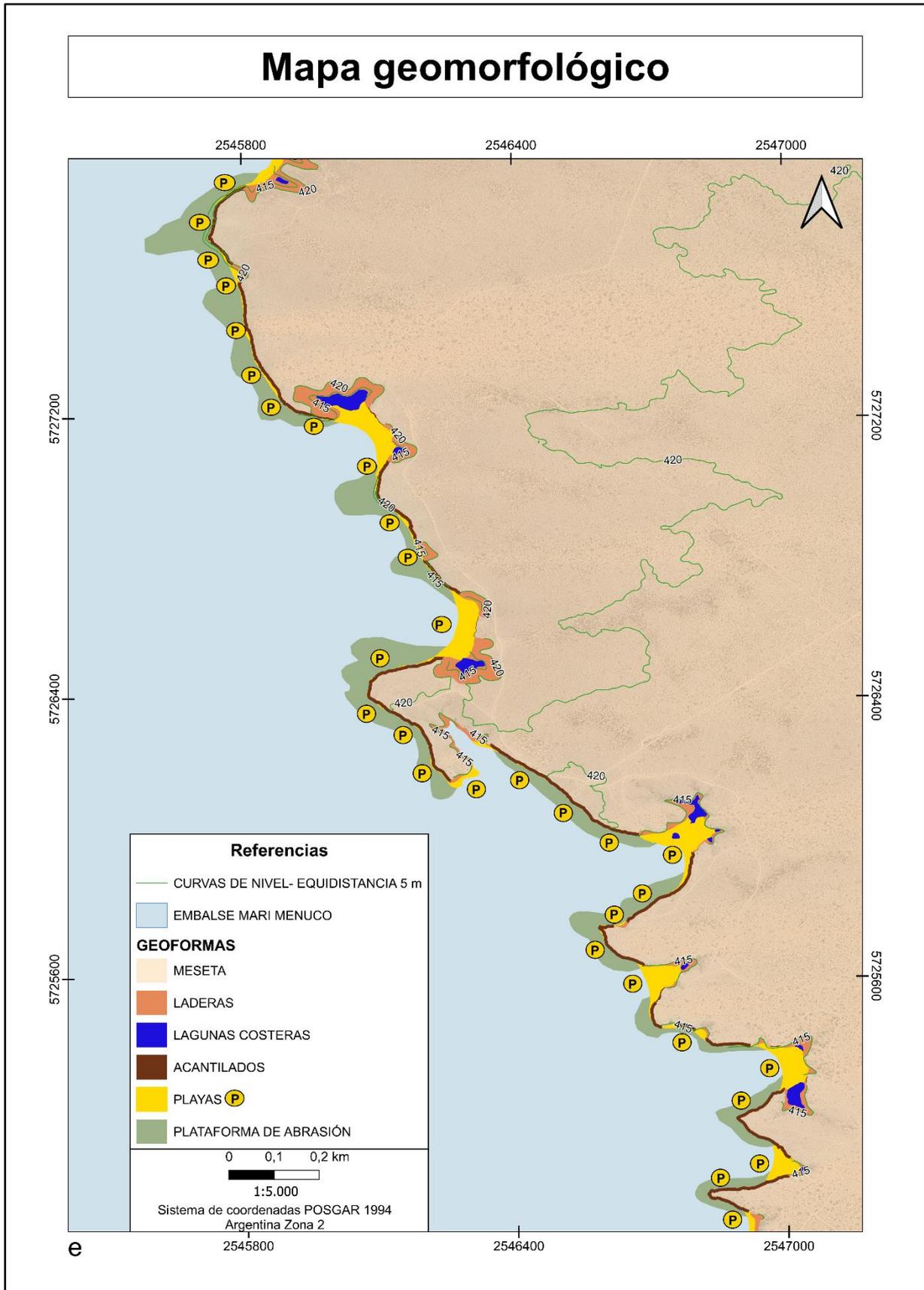


Figura 29. Mapa geomorfológico sección e.

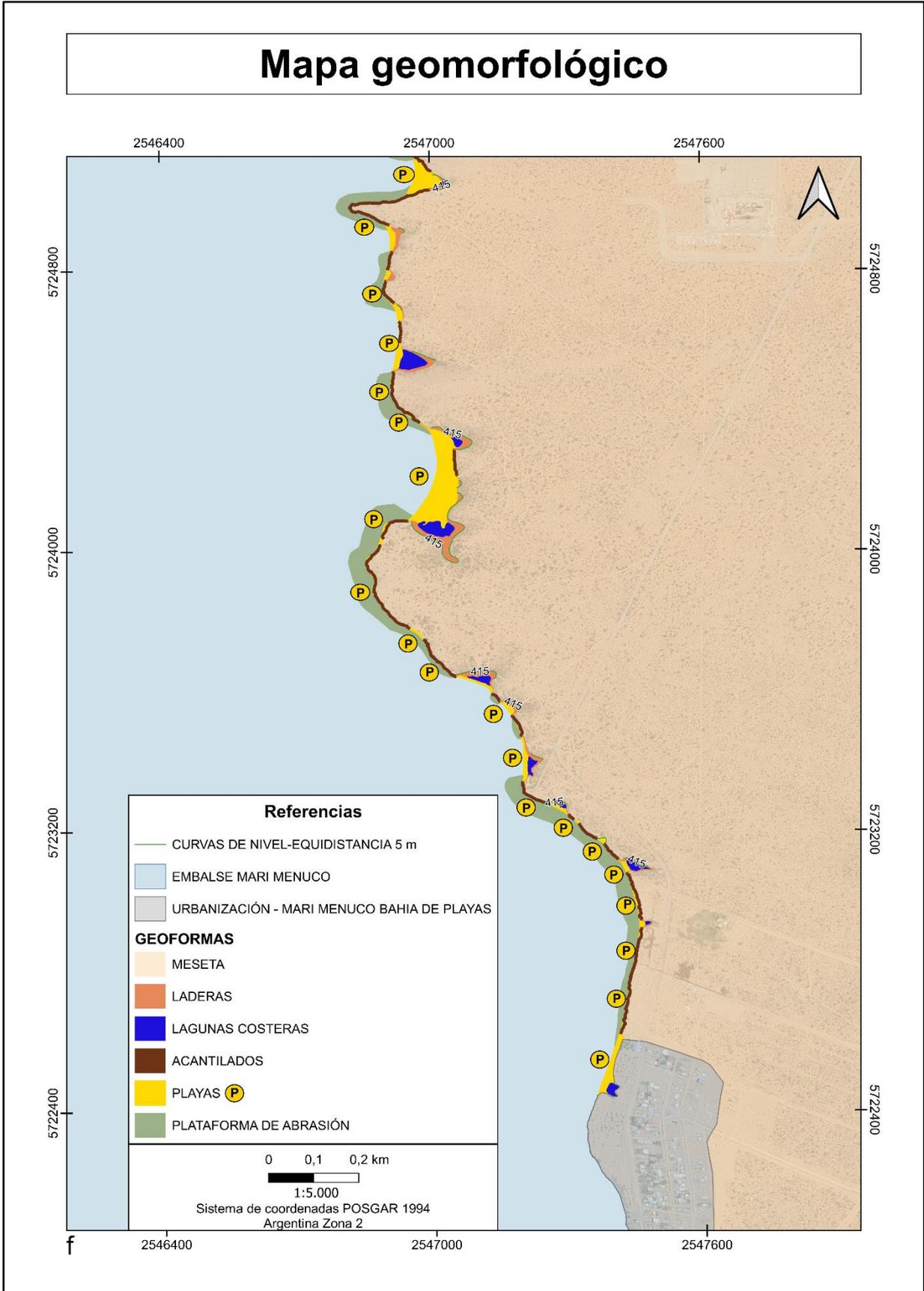


Figura 29 Mapa geomorfológico sección f.

5.5 Clima y vientos

Los factores climáticos influyen en los regímenes de viento y oleaje que dan forma a las características costeras y a los procesos de meteorización que descomponen y desintegran los afloramientos rocosos costeros (Bird, 2008).

El embalse Mari Menuco se encuentra en la región extra-andina árida mesetiforme con déficit hídrico acentuado (árido) con valores de lluvia por debajo de los 200 mm anuales. La mayor parte de las precipitaciones se producen en invierno existiendo también en época estival esporádicas lluvias torrenciales de corta duración. El clima es predominante templado-frío y semiárido donde las temperaturas medias anuales están comprendidas entre 14° y 12° C (Ferrer *et al.*, 2006; Pereyra *et al.*, 2011).

Especial atención hay que darle al viento, que es el factor más importante en relación a la erosión costera como generador de oleaje y agente erosivo. Su velocidad y dirección influyen de manera significativa en la acción modeladora sobre la morfología de las costas del embalse desde su llenado y entrada en operación en el año 1978 (Ortega y Blasco, 1998). Los vientos de la región han sido estudiados en numerosos trabajos (Palese y Lässig, 1997; Lässig *et al.*, 1999; Palese *et al.*, 2001; Palese *et al.*, 2009). Palese y Lässig (1997) caracterizaron el régimen de los vientos en el embalse Mari Menuco para un periodo de un año (1996-1997), tomaron mediciones de velocidad y dirección a un sólo nivel (4 m de altura) para lo cual instalaron una estación meteorológica automática 100 m aguas adentro, emplazada en uno de los muelles del Club de Caza Pesca y Náutica Mari Menuco. Determinaron que la velocidad media anual fue de 3,4 m/s, las direcciones más frecuentes fueron del oeste (Figura 30 a). Las direcciones entre el oeste y suroeste resultaron las más intensas en promedio, con un valor máximo de 6 m/s para el oeste (Figura 30 b). Las estaciones más ventosas son el verano y primavera, las frecuencias del oeste-noroeste y del noroeste presentan sus máximos durante el otoño e invierno, mientras que las del sudoeste y oeste-sudoeste se incrementan durante primavera y verano, patrón de comportamiento observado para la región patagónica. Respecto a las tormentas de viento, en el mismo trabajo, se definen como viento constante que sopla más de una hora a velocidades mayores de 5 m/s. Las mediciones arrojaron que estas tormentas, muy comunes en la Patagonia, tienen un valor medio de 6,8 m/s (con una velocidad máxima de 13 m/s), con dirección del cuadrante oeste y duración media de 7 hs.

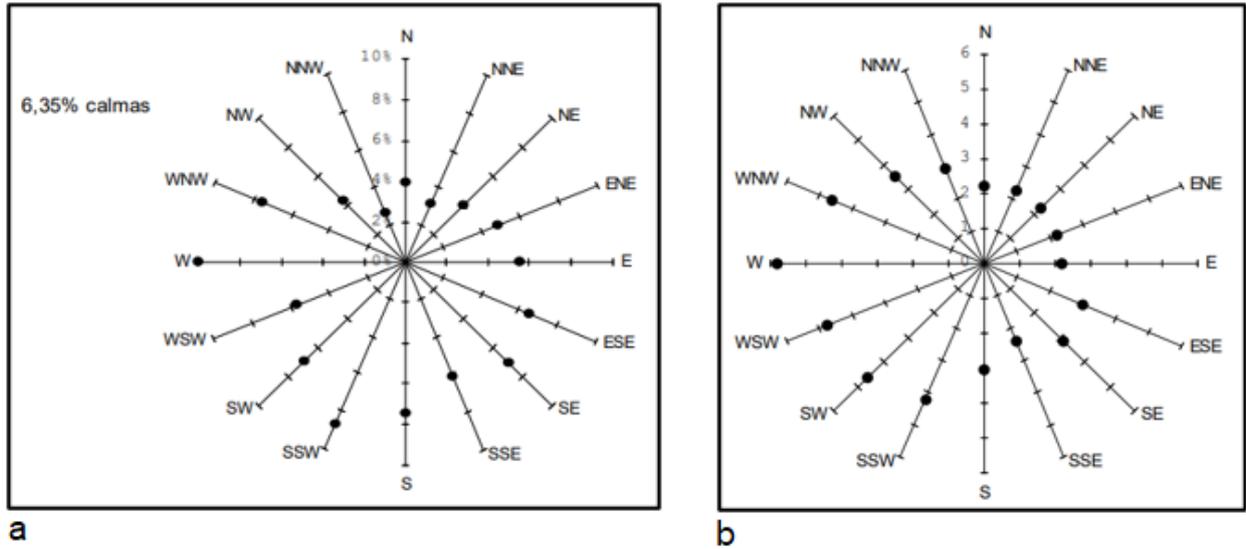


Figura 30. a. Rosa de los vientos donde se indican con puntos los valores de las frecuencias porcentuales (modificada de Palese y Lässig, 1997). b. Rosa de los vientos donde se indican con puntos los valores de las intensidades expresadas en m/s (modificada de Palese y Lässig, 1997).

5.6 Oleaje

Conocer las características del oleaje en el embalse es necesario para comprender como influye en la erosión sobre sus costas. Palese y Lässig (1997) relacionaron las mediciones de viento del periodo 1996-1997 con el oleaje formado en el embalse. La velocidad del viento crítica a partir de la cual este comienza a formar ondas sobre su superficie del lago es de 2,7 m/s, condición se alcanzó en el 80 % de las horas del año registrado. Las ondas adquieren un tamaño adecuado para una intensa erosión, cuando en el interior del lago se observan olas con “crestas blancas”, que corresponden a una altura de onda de 0,8 m que se manifiestan a partir de una velocidad de 5 m/s, lo que ocurrió un 30% de veces en el año. Cuando hubo tormentas de viento, el valor de máxima velocidad media fue de 12.0 m/s, predominante del oeste, y con una duración media de 7 horas. Las observaciones de Palese y Lässig (1997) en las aguas del embalse, dieron longitudes de onda entre 7 y 15 metros, con oleaje entre 0,8 y 1,2 m de alto. Las velocidades de propagación estuvieron entre 3,3 y 4,8 m/s. Dukaric y Ciminari (1981) también calcularon la máxima intensidad de olas para el embalse en 1,5 metros de altura, con períodos de 5 segundos, para un viento medio de 16,67 m/s.

Las olas son el factor más importante en la erosión de las costas, su análisis como modificadoras del contorno costero requiere prestar atención a su competencia tanto como fuerza de ataque sobre los afloramientos como por su capacidad para remover sedimentos. La generación de oleaje es causada principalmente por el viento, con falta de este o valores muy bajos no se genera oleaje situación

conocida como “espejo”. Para evaluar como inciden las olas sobre el área en estudio, y teniendo en cuenta que la mayor altura de las mismas es alcanzada durante las tormentas de viento, se adopta la altura de olas de 0,8 y 1,2 m, que ocurre cuando el viento tiene una máxima velocidad media de 12 m/s (Palese y Lässig 1997).

5.7 Hidrología

En el área en estudio, el embalse Mari Menuco constituye el nivel de base local para pequeñas cuencas ubicadas en las terrazas altas del río Neuquén nivel III (Rodríguez *et al.*, 2007), que muestran un relieve esencialmente plano con suave inclinación hacia el este, y les aporta agua y gran cantidad de sedimentos que se movilizan durante eventos torrenciales hacia el frente costero. Las cuencas de mayor superficie se desarrollan en el sector noroeste del área en estudio.

La esorrentía esta alterada por el alto grado de antropización de toda el área, la red de drenaje es indefinida produciéndose en las ondulaciones del terreno acumulaciones de agua que luego escurren de manera difusa. En las laderas con pendiente de alto grado se desarrollan cursos efímeros, erosión en surco y cárcavamiento en las zonas próximas a las cabeceras de las cuencas.

En la Figura 31 a y b se presentan las cuencas que desaguan hacia el embalse, para su mejor representación se muestra en dos partes.

Mapa de cuencas

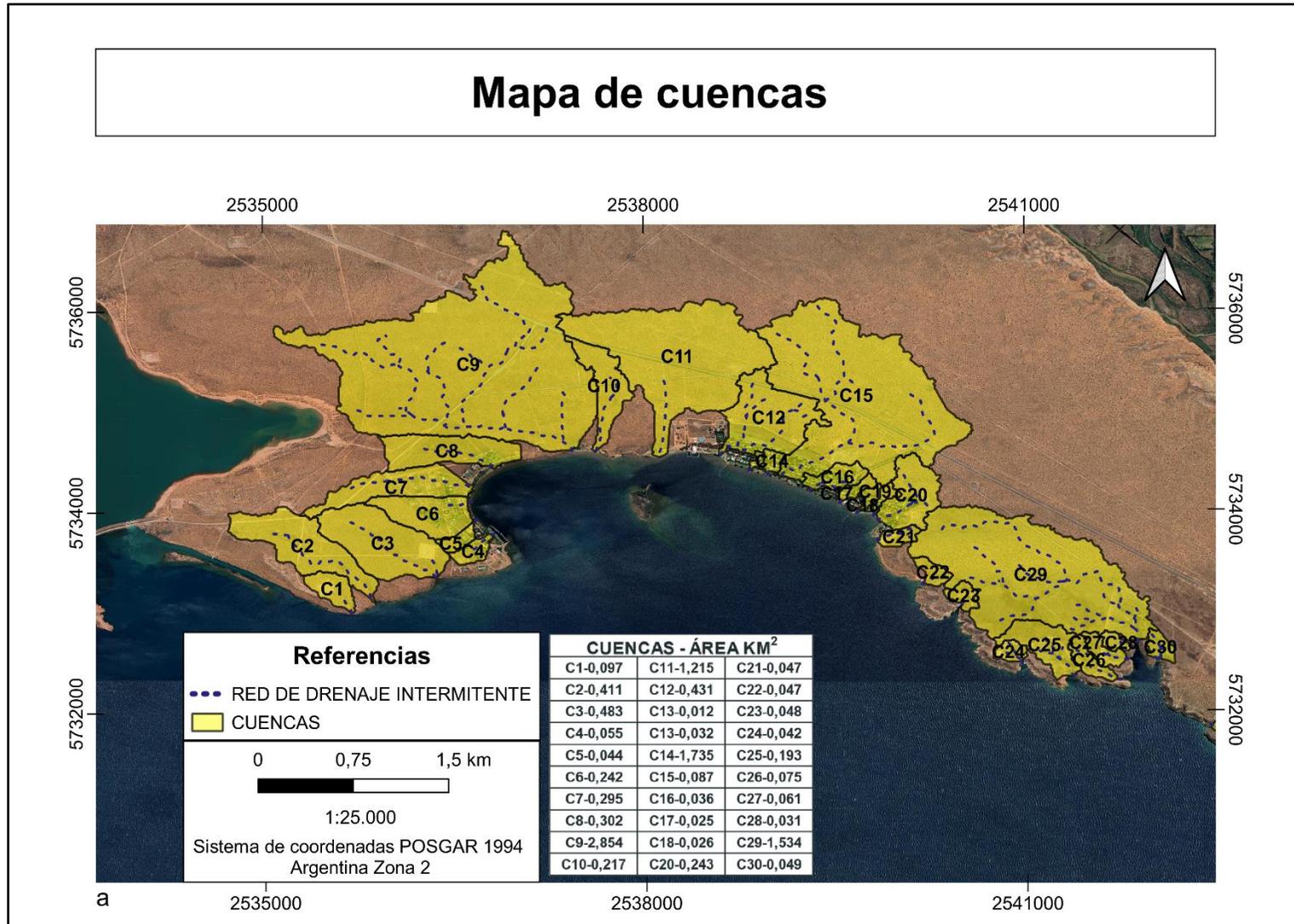


Figura 31. a. Cuencas que desaguan hacia el embalse Mari Menuco.

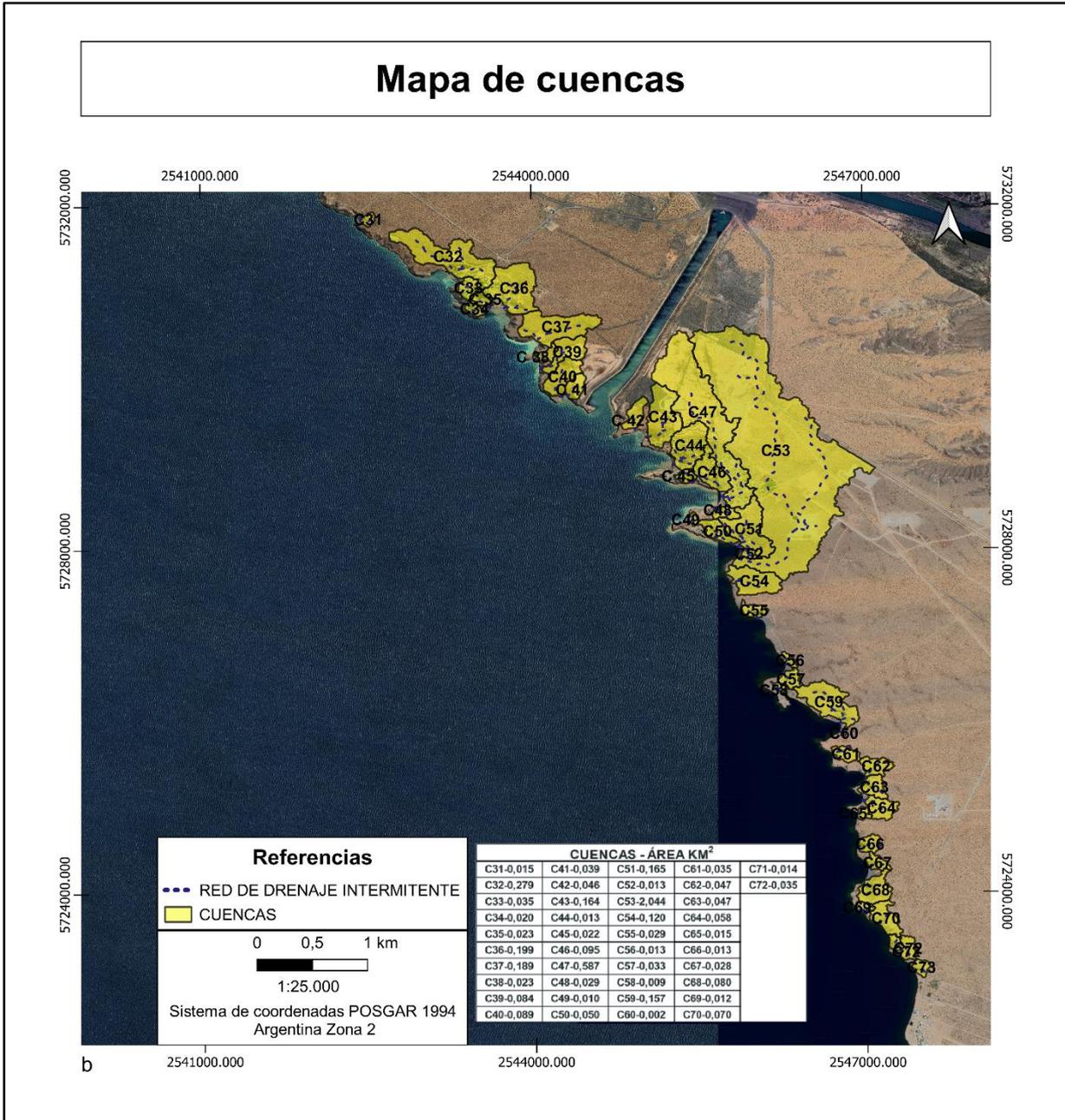


Figura 31. b. Cuencas que desaguan hacia el embalse Mari Menuco.

En la Figura 32 se muestran las pendientes desde la margen sur del río Neuquén hacia la costa en estudio del embalse Mari Menuco, observándose que el nivel de la terraza tiene muy escasa pendiente (entre 0,2 y 1%), en tanto que en las laderas hay un relieve escarpado a muy escarpado, con un desnivel desde 15% hasta más de 60 % en algunos lugares, que se corresponde con acantilados cañadones y cárcavas del sector costero (Figura 16; Figura 18).

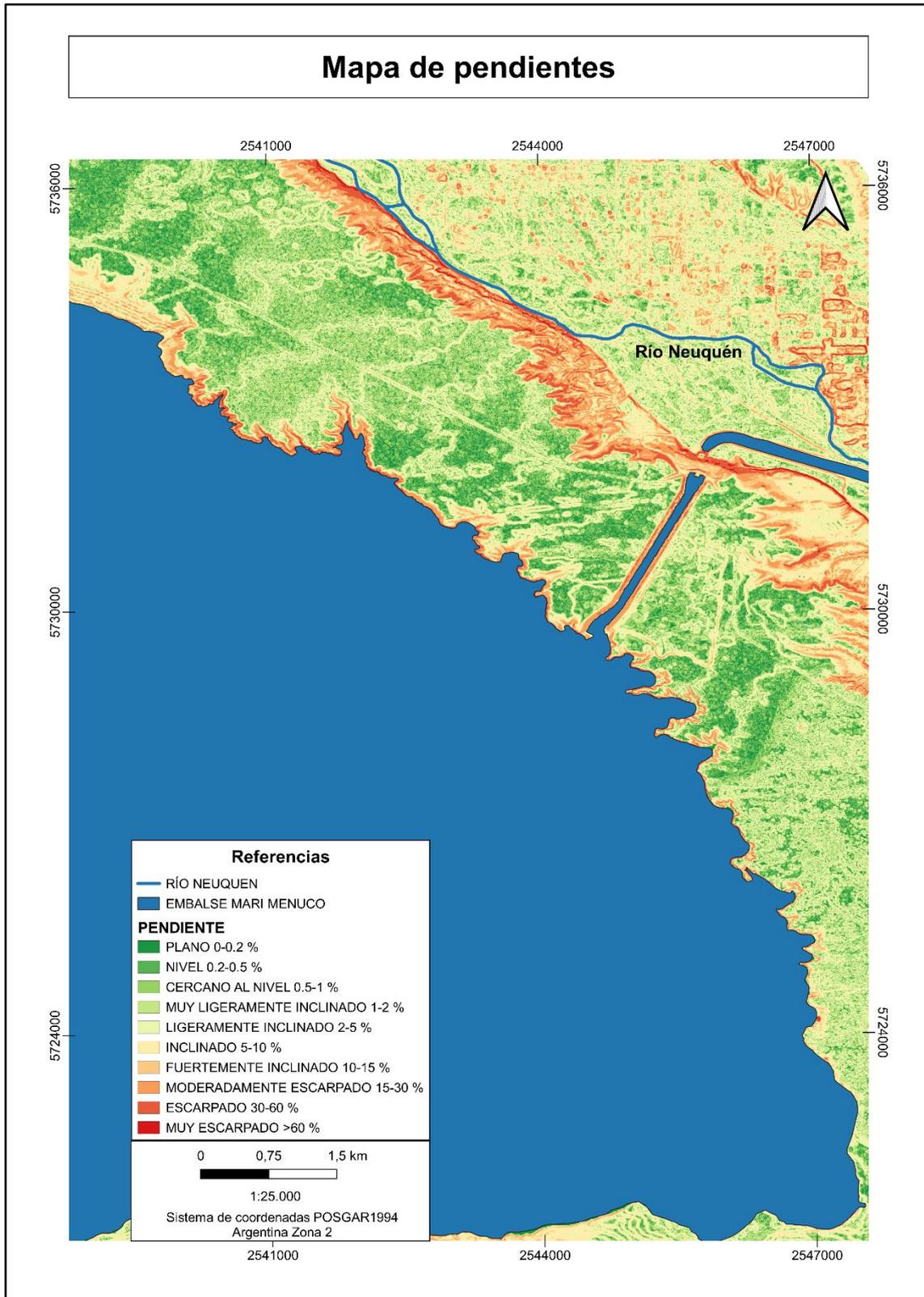


Figura 32. Pendientes del área de estudio.

5.8 Vegetación

La vegetación pertenece a la Provincia Biogeográfica del Monte, donde predomina la del tipo estepa arbustiva xerófila con varios estratos, uno superior muy disperso con arbustos que alcanza los 2 m de altura, y los estratos medios y bajos que muestran mayor cobertura y alturas entre 50 y 150 cm, este último formado por arbustos bajos, gramíneas y otras hierbas.

Entre las especies más frecuentes se destacan las “Jarillas” (*Larrea divaricata*, *Larrea cuneifolia* y *Larrea nítida*) que van de pocos cm a los 2 metros, crecen esparcidas, dejando claros donde se desarrollan hierbas en las épocas propicias. Están asociadas con otros arbustos como el “Alpataco” (*Prosopis alpataco*, *Prosopis denudans*, *Prosopis flexuosa*), la “Mata sebo” *Monttea aphylla*, el “Monte negro” *Bougainvillea spinosa*, la “Pichana” *Senna aphylla* y la “chirriadora” *Chuquiraga erinaceae*, entre otros con los que se combina en forma diversa (Forcone, 2014).

5.9 Uso del suelo

Los diversos usos del suelo que conviven en el área le otorgan un gran dinamismo. Se desarrollan distintas actividades como la explotación hidroeléctrica, hidrocarburífera, turismo y recreación que implican la presencia de infraestructura específica (Figura 33).

Principalmente en la meseta, asociada a la actividad hidrocarburífera, existen oleoductos, gasoductos, locaciones de pozos, plantas de tratamiento, tanques de almacenamiento, redes de alimentación eléctrica y una intrincada trama de caminos de enlace (caminos secundarios y picadas) que acompañan las redes de infraestructura. Para la actividad hídrica e hidroeléctrica las construcciones más importantes son el acueducto Mari Menuco, canal de aducción a Planicie Banderita, redes eléctricas de alta tensión.

Sobre el sector de la costa del embalse en análisis, para el turismo y la recreación se han desarrollado distintos tipos de asentamientos, urbanizaciones cerradas (privadas) y abiertas (de acceso público) de segunda residencia como el Club de Caza, Pesca y Náutica Mari Menuco, Yacht Club Neuquén, Club del personal de Hidronor, Villa Tennis Club Lago Mari Menuco, Bahía de Playas. Se encuentran también campings privados que ofrecen diversos tipos de servicios y áreas recreativas de uso espontáneo de libre acceso al público, en zonas de playas que están desprovistas de servicios a las que se accede a través de picadas y huellas principalmente en la temporada de verano. Los asentamientos tienen infraestructura urbanística, parcelamiento, espacios de uso común, calles, redes de agua y tendidos de líneas eléctricas de baja y media tensión, muelles, bajadas de embarcaciones, etc. Los

clubes no cuentan con sistema de tratamiento de efluentes cloacales, se utilizan pozos ciegos o sépticos o lechos filtrantes.

En los últimos años se ha observado una notable expansión de la actividad hidrocarburífera y un crecimiento de las urbanizaciones de segunda residencia, campings y uso de áreas de libre acceso en la costa, asociado al aumento en la demanda de actividades turístico recreativas en el embalse, provenientes de la ciudad de Neuquén y localidades del Alto Valle.

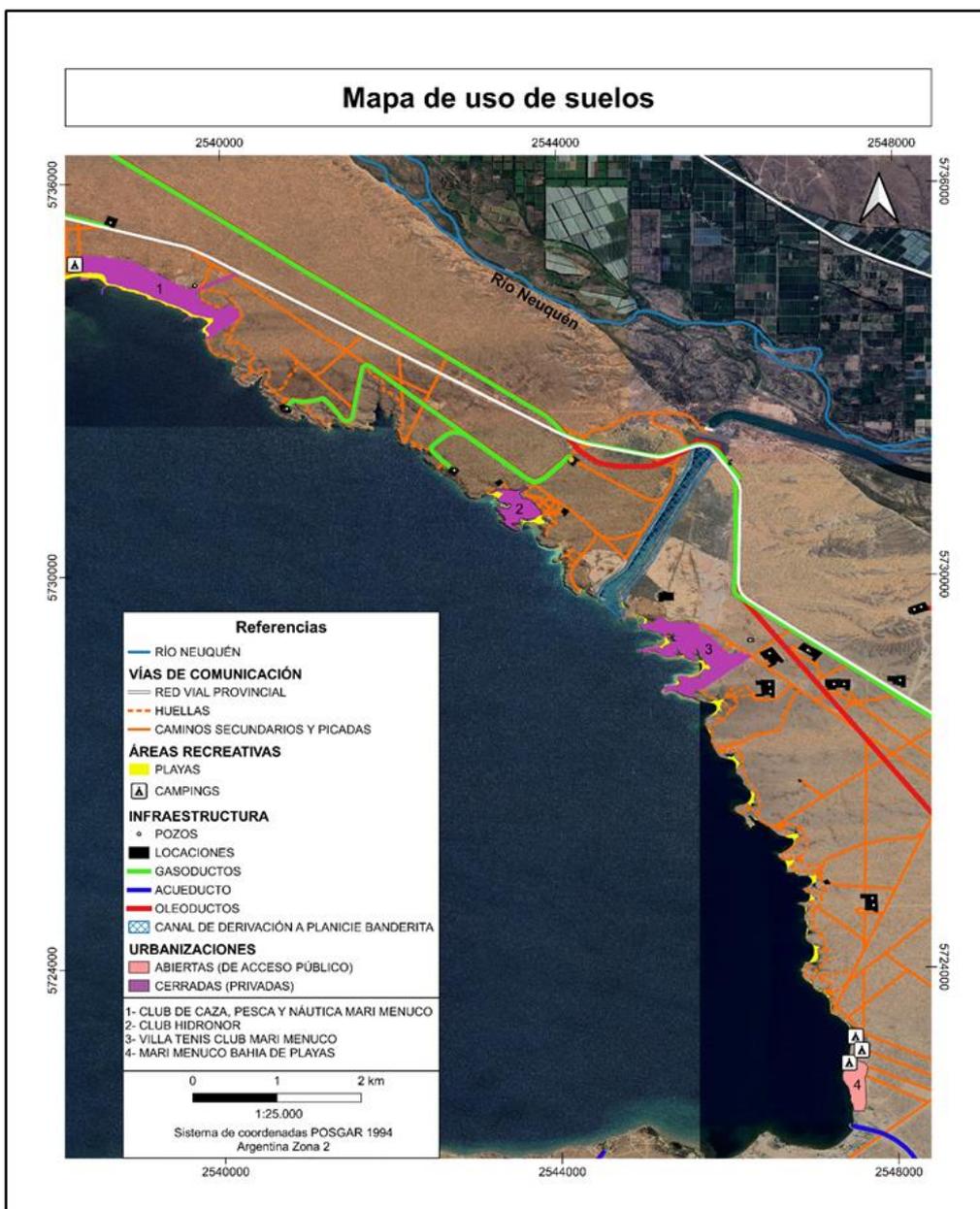


Figura 33. Mapa de usos del suelo.

6 RESULTADOS

6.1 Retracción costera y tasa de erosión a partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas

El análisis de las fotografías aéreas e imágenes satelitales ha permitido establecer los cambios costeros en un periodo de 29 años (1993-2022) cuyos resultados se muestran en la Tabla 4. En la Figura 34 se ubican los tramos en los que se realizó el análisis junto con el valor promedio de *EPR (End Point Rate)* obtenido para cada uno de ellos.

Tramos	Transectos	Distancia entre líneas de cresta 1993-2022 (m)	EPR (m/año)	Promedio EPR/AÑO
A	1	-6,86	-0,24	-0,3
	2	-10,74	-0,37	
	3	-7,31	-0,25	
	4	-6,77	-0,23	
	5	-6,92	-0,24	
	6	-15,68	-0,54	
	7	-13,25	-0,46	
	8	-12,44	-0,43	
B	9	-20,02	-0,69	-0,4
	10	-19,3	-0,66	
	11	-2,58	-0,09	
	12	-11,92	-0,41	
	13	-6,68	-0,23	
	14	-5,86	-0,2	
	15	-8,8	-0,3	
	16	-14,72	-0,51	
C	17	-4,43	-0,15	-0,5
	18	-3,03	-0,1	
	19	-13,95	-0,48	
	20	-30,25	-1,04	
	21	-12,23	-0,42	
	22	-10,9	-0,38	
	23	-10,1	-0,35	
	24	-7,79	-0,27	
	25	-7,9	-0,27	
	26	-16,57	-0,57	
	27	-14,75	-0,51	
	28	-34,93	-1,2	
	29	-4,86	-0,17	

Tramos	Transectos	Distancia entre líneas de cresta 1993-2022 (m)	EPR (m/año)	Promedio EPR/AÑO
D	30	-7,94	-0,27	-0,9
	31	-12,76	-0,44	
	32	-23,92	-0,82	
	33	-7,64	-0,26	
	34	-7,88	-0,27	
	35	-13,16	-0,45	
	36	-88,35	-3,04	
	37	-18,51	-0,64	
E	38	-11,12	-0,38	-0,4
	39	-9,62	-0,33	
	40	-6,79	-0,23	
	41	-16,24	-0,56	
	42	-11,07	-0,38	
	43	-6,54	-0,23	
	44	-6,22	-0,21	
	45	-7,19	-0,25	
	46	-12,4	-0,43	
	47	-19,68	-0,68	
F	48	-12,22	-0,42	-0,3
	49	-6,92	-0,24	
	50	-11,95	-0,41	
	51	-13	-0,45	
	52	-8,55	-0,29	
	53	-7,2	-0,25	
	54	-5,44	-0,19	
	55	-5,94	-0,2	
	56	-8,3	-0,29	
	57	-3,82	-0,13	
	58	-4,31	-0,15	
	59	-2,54	-0,09	
G	60	-4,46	-0,15	-0,2
	61	-12,65	-0,44	
	62	-3,47	-0,12	
H	63	-2,25	-0,08	-0,2
	64	-6,55	-0,23	
	65	-2,84	-0,1	
	66	-9,9	-0,34	
	67	-10,68	-0,37	
I	68	-1,94	-0,07	-0,1
	69	-1,46	-0,05	
	70	-1,04	-0,04	

Tabla 4. Valores de variabilidad de la línea de cresta y EPR calculados en los distintos tramos.

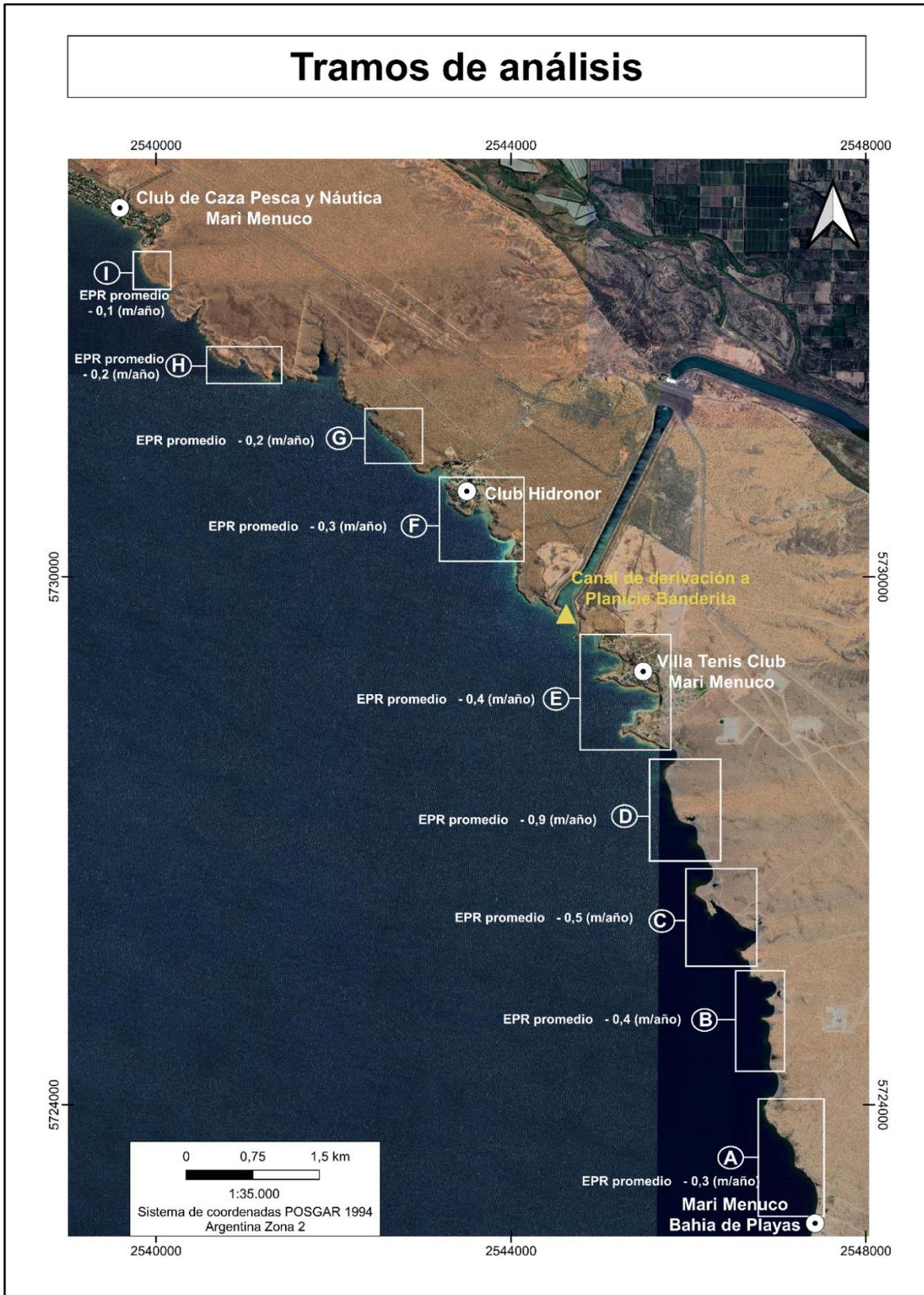


Figura 34. Imagen satelital 2022 de ESRI Satellite con ubicación de los tramos en los que se realizó el análisis y valores de tasa de erosión promedio en cada uno.

La tasa de erosión costera (EPR) se refiere a la velocidad a la que la costa pierde terreno y representa cuánto se reduce en un período determinado. En el área de estudio los mayores valores se registraron hacia el SE, la mayoría varían entre 0,25 y 0,5 m por año mostrando retrocesos de hasta 3 m, al NO del área de estudio estos no superan los 0,5 m (Figura 35).

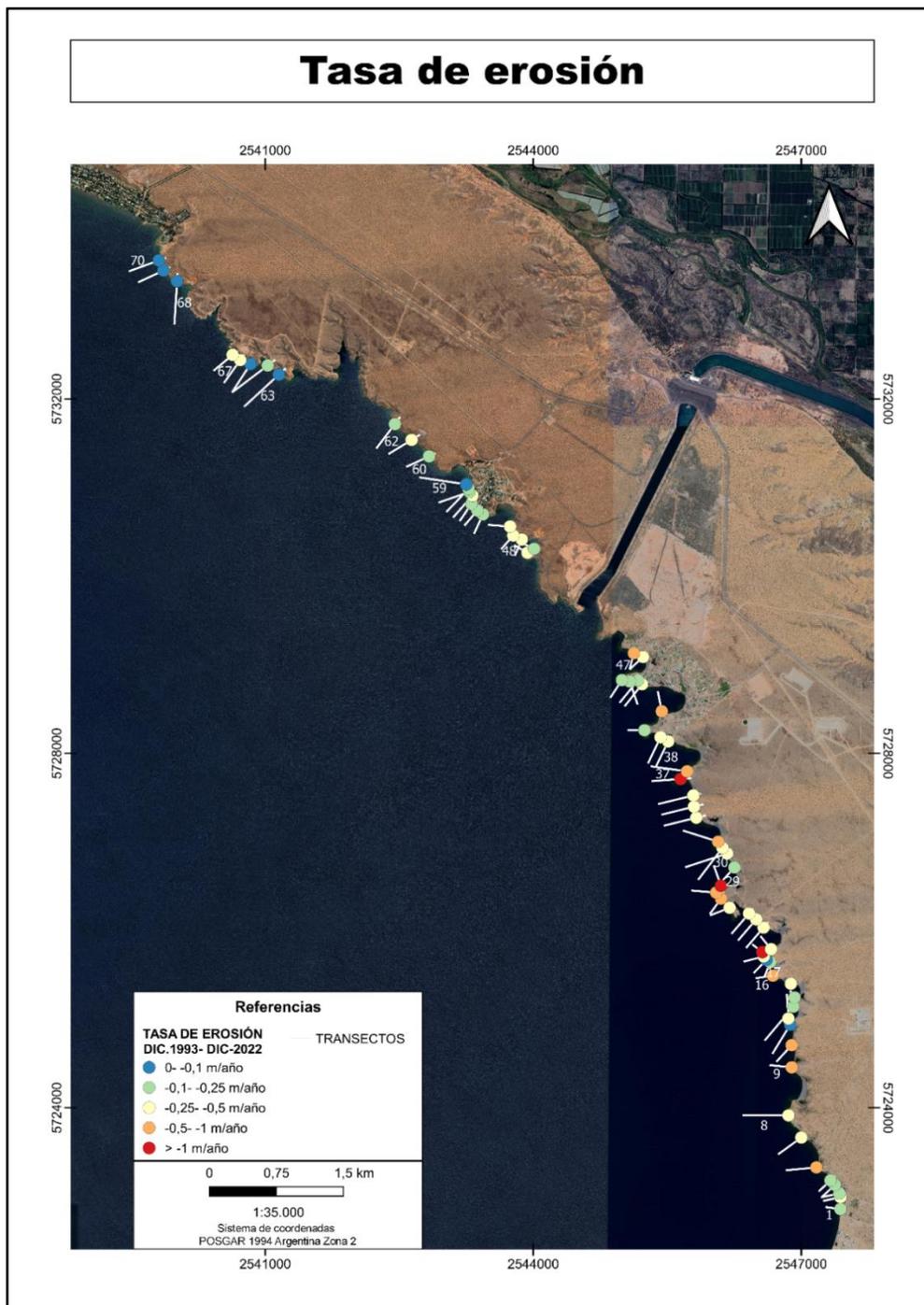


Figura 35. Variabilidad en la tasa de erosión.

En general desde el canal de aducción hacia el NO se registran menores valores promedio de EPR que hacia el SE. Próximo al Club de Caza Pesca y Náutica Mari Menuco, tramo I, se registraron los menores valores ($< -0,1$ m/año), mientras que los mayores ($> -0,5$ m/año) se observan en los tramos C y D (Figura 34).

La variación espacial del proceso de erosión muestra una tendencia de retroceso generalizado (Tabla 4). En la Figura 36 se muestra la variabilidad de la línea de cresta de los acantilados, proceso muy notorio en el tramo D donde se midieron retrocesos de hasta 88 m (Figura 37).

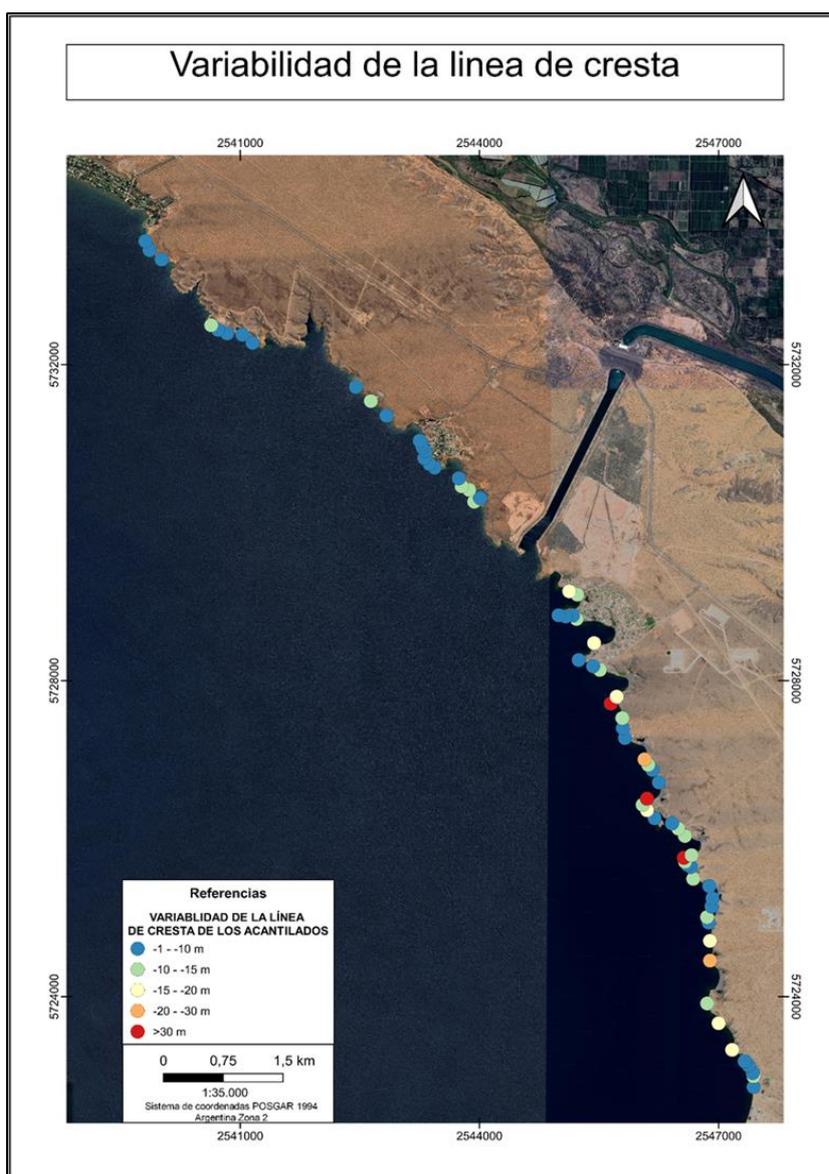


Figura 36. Variabilidad de la línea de cresta entre diciembre de 1993 y diciembre de 2022.

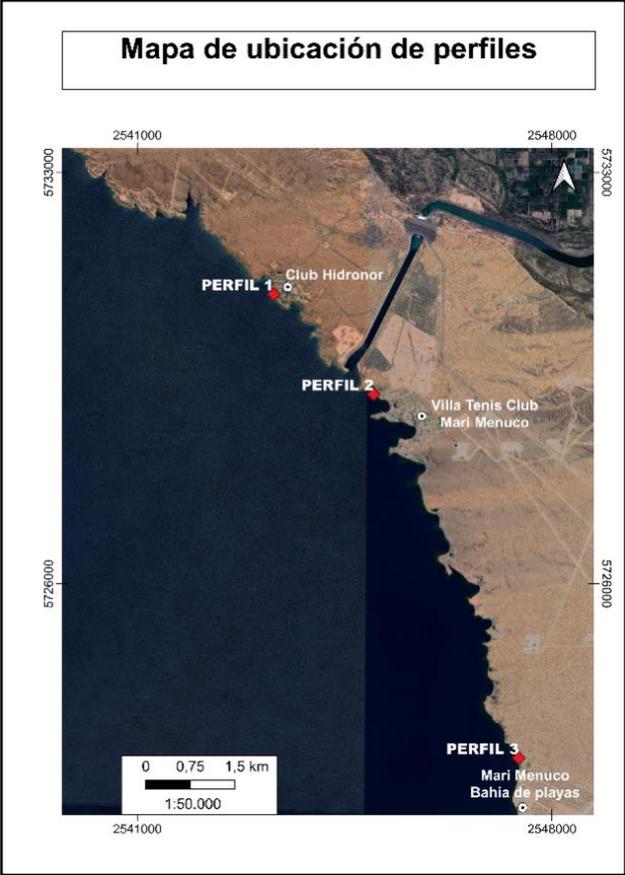


Figura 38. Ubicación de los perfiles realizados.

PERFIL 1



Figura 39. Perfil realizado en el Club Hidronor (38°34'17"S; 68°30'11,2"O). En el frente del acantilado de base a techo se desarrollan 1,2 m de fangolitas rojizas y por encima 3 m de areniscas.

Descripción:

Plataforma de abrasión: Conformada por areniscas medias a gruesas marrón amarillento, consolidadas, moderadamente seleccionadas, con clastos subangulosos compuestos principalmente por cuarzo, feldespato, mica y fragmentos líticos. Presenta cemento carbonático.

A:Fangolitas rojizas poco consolidadas.

B:Arenisca media de color amarillenta a rojiza, consolidada, bien seleccionada con clastos sub-redondeados compuestos principalmente por cuarzo, feldespato, micas y fragmentos líticos. Presenta poca matriz y débil cemento carbonático.

PERFIL 2

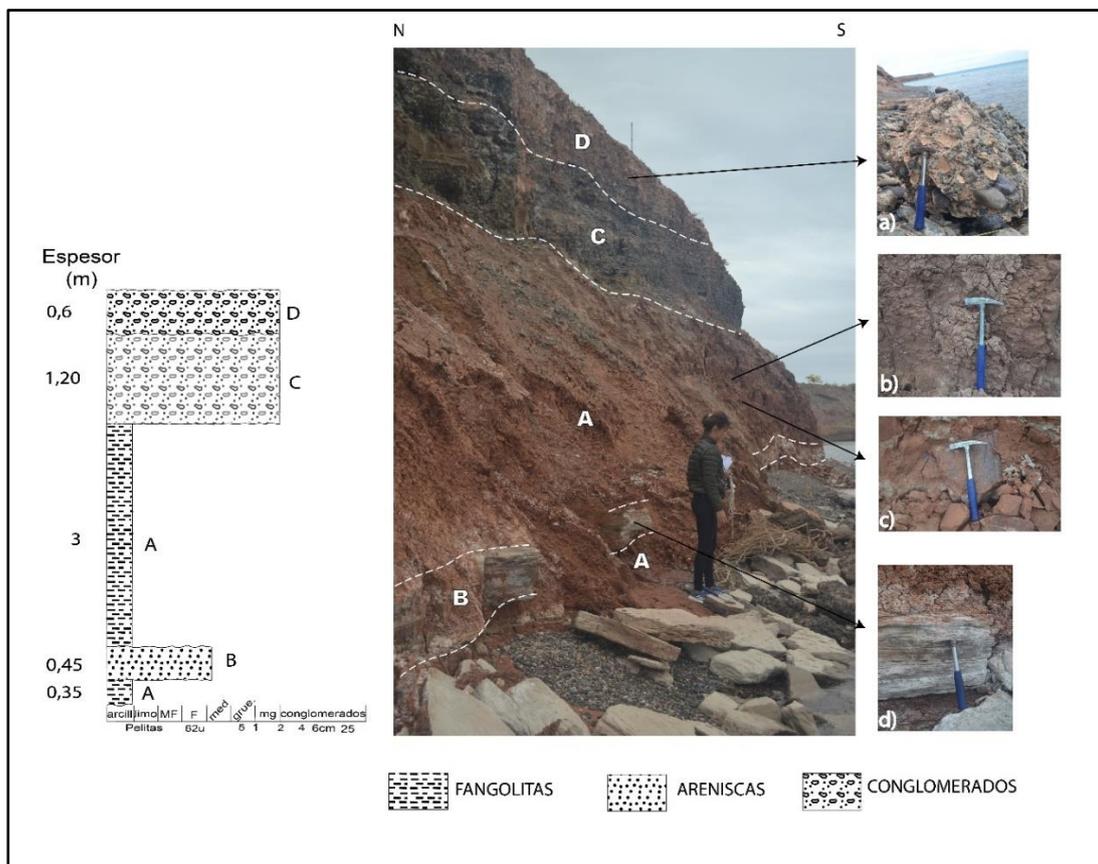


Figura 40. Perfil realizado en Tenis Club (38°35'12,10"S; 68°29'1,14"O).En el frente del acantilado de base a techo se desarrollan 0,35 m de fangolitas rojizas que muestran "slikenside"(detalle b) y "costras" (detalle c), con un nivel intercalado de 0,45 m de areniscas con laminación paralela (detalle d.),continúan 1,20 m de conglomerados poco consolidados y 0,6 m de conglomerados cementados (detalle a).

Descripción:

A:Fangolitas rojizas poco consolidadas.

B:Areniscas cuarzíticas de grano medio, color castaño amarillento a grisáceo, consolidada, bien seleccionada. Débil cemento carbonático.

D:Conglomerado polimíctico grueso, clasto sostén, poco consolidado, friable, con mala selección, de color gris. Clastos sub-redondeados que abarcan tamaños desde guija hasta guijón. Cemento carbonático.

E:Conglomerado polimíctico, matriz sostén, muy consolidado con mala selección de color pardo amarillento, con predominancia de clastos redondeados a subredondeados compuestos por fragmentos líticos, máficos y en menor medida félsicos de color gris, marrón, violacio y verde, cuyos tamaños abarcan desde 3mm hasta más de 10 cm los más grandes (sábulo, guija, guijarro, guijón). Cemento carbonático.

PERFIL 3

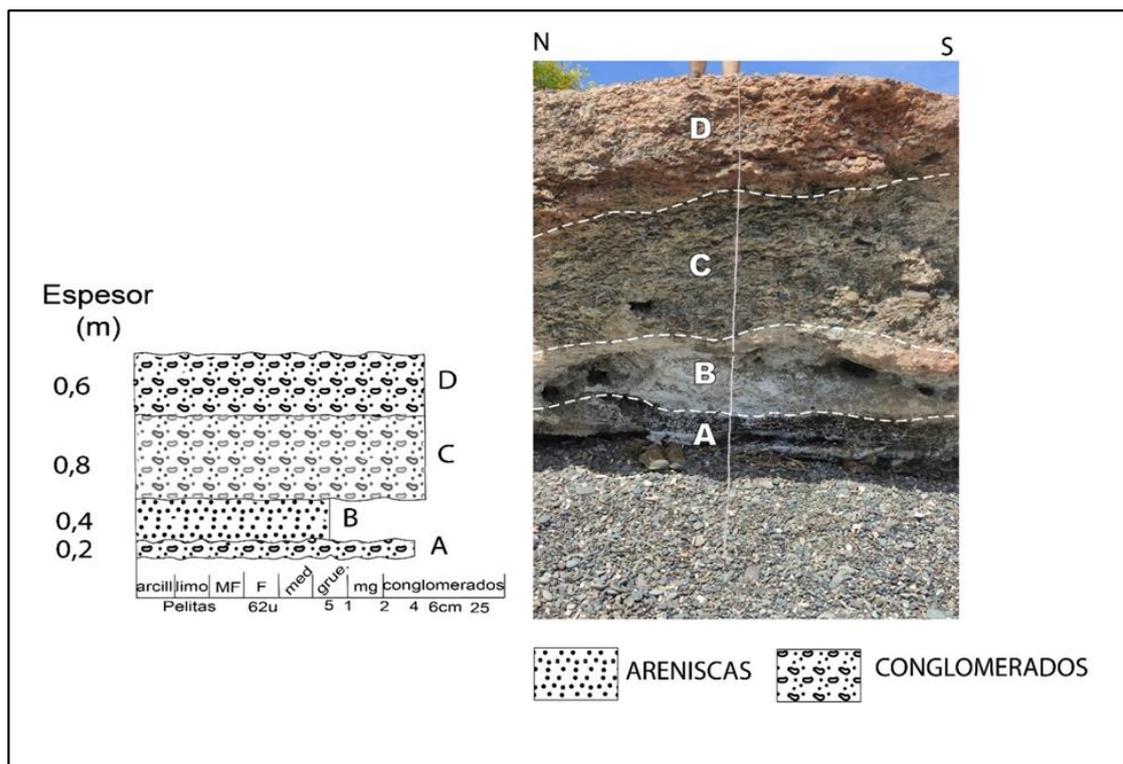


Figura 41. Perfil realizado en un sector próximo a Bahía Bonita (38°38'32,15"S; 68°27'18,32"O).En el frente del acantilado de base a techo se desarrollan 0,2 m de conglomerados, por encima 0,4 m de areniscas y finalmente 0,8 m de conglomerados poco cementados y 0,6 m de conglomerados bien cementados.

Descripción:

A: Conglomerados polimícticos medio, matriz sostén, consolidado, clastos subredondeados mal seleccionados de color gris, castaño oscuro que abarca predominantemente tamaños de guija a guijarro. Matriz arenosa y cemento carbonático.

B: Arenisca gruesa de color castaño amarillento a grisácea bien seleccionada, consolidada, con clastos subangulosos compuestos principalmente por cuarzo, máficos, feldespatos, y fragmentos líticos. Cemento carbonático.

C: Conglomerado polimíctico grueso, matriz sostén (localmente clasto sostén), poco consolidado (se desmorona con rasgado mediante la punta del martillo), con mala selección, de color gris parduzco. Clastos sub-redondeados que abarcan tamaños desde guija hasta guijón. Cemento carbonático.

D: Conglomerado polimíctico, matriz sostén, muy consolidado con mala selección de color pardo amarillento a rojizo, con predominancia de clastos redondeados a subredondeados compuestos por fragmentos líticos, máficos y en menor medida félsicos de color gris, marrón, violacio y verde, cuyos tamaños abarcan desde 3 mm hasta más de 10 cm los más grandes (sábulo, guija, guijarro, guijón). Cemento carbonático.

En los sitios donde se levantaron los perfiles, se estimó la RCS cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.

Ubicación	Nivel	Clase ISRM (1981)	Descripción	Identificación en campo	Aprox. al rango de RCS (mpa)
Hidronor	PLATAFORMA DE ABRASIÓN	R ₅	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes de martillo para fracturarla	100-250
	A	S ₅	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0,25-0,5
	B	R ₄	Roca dura	Se requiere más de un golpe de martillo para fracturarla	50-100

Ubicación	Nivel	Clase ISRM (1981)	Descripción	Identificación en campo	Aprox. al rango de RCS (mpa)
Tenis Club	A	S ₅	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0.25-0,5
	B	R ₅	Roca dura	Se requiere más de un golpe de martillo para fracturarla	50-100
	C	R ₁	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo	1-5
	D	R ₅	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes de martillo para fracturarla	100-250
Prox. Bahía Bonita	A y B	R ₃	Roca moderadamente dura	Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
	C	R ₁	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo	1-5
	D	R ₅	Roca Muy dura	Se requieren muchos golpes de martillo para fracturarla	100-250

Tabla 5. Estimación de la dureza relativa (ISRM, 1981) y resistencia a la compresión simple a partir de índices de campo.

En los mismos sitios, donde se pudo establecer la línea de levantamiento, se evaluó el grado de fracturación mediante el índice RQD (Figura 42). Para los niveles de areniscas se obtuvo un valor de RQD de 93% de calidad muy buena. En los niveles de conglomerados se registró un valor de RQD de 84% de calidad buena. No se calculó el RQD en los niveles de fangolitas ($RCS < 1$) que se encontraban muy meteorizados hasta el punto de desmenuzarse con las manos asignándole entonces un $RQD = 0$



Figura 42. Línea de levantamiento en frente acantilado del Club Hidronor. Noviembre 2023.

En las observaciones de campo se distinguieron discontinuidades subhorizontales por estratificación de los distintos bancos de rocas que conforman el acantilado (Figura 43), discontinuidades verticales y perpendiculares a la cara del acantilado (Figura 44) y discontinuidades verticales y subparalelas a la cara del acantilado, formadas por liberación de presión hacia la cara libre del mismo (Figura 45)



Figura 43. Discontinuidades por estratificación ($38^{\circ}33'55,91''S$; $68^{\circ}30'39,10''O$). Julio 2023.



Figura 44. Plano de discontinuidad perpendicular a la cara del acantilado ($38^{\circ}37'3,63''S$; $68^{\circ}27'51,35''O$). Julio 2023.



Figura 45. Discontinuidades verticales y subparalelas a la cara del acantilado. Fotografía tomada por Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén ($38^{\circ}36'25,50''S$; $68^{\circ}28'14,04''O$). Enero 2021.

Las discontinuidades paralelas al borde de la pared o verticales a la cara del acantilado expresan un alivio o relajación de la presión de confinamiento en dirección a la cara libre del mismo. Con el tiempo estas se amplían por una combinación de factores como infiltración de agua o humedad, introducción de material detrítico, vibraciones etc. Este proceso logra finalmente que los bloques se desprendan muy rápidamente del acantilado por caídas y vuelcos, siendo los más comunes en el área de estudio.

En la Fig. 46 pueden observarse movimientos de remoción en masa en forma de caída de rocas. La fractura visible en la imagen muestra una separación en los estratos, en la base acumulación de bloques de roca desprendidos.



Figura 46. Caída de rocas (38°33'58,95"S; 68°30'35,64"O). Fotografía tomada por Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén. Enero 2021.

En la Fig. 47 también se observan movimientos de remoción en masa que se manifestarían en forma de vuelcos. Las columnas superiores de conglomerados parecen rotar hacia adelante (pivotean) sobre las capas arcillosas situadas por debajo que actuarían como una superficie de debilidad, facilitando el movimiento y rotación de estos estratos más rígidos.



Figura 47. Vuelcos en el sector de Villa Tennis Club. Fotografía tomada por Defensa Civil y Protección Ciudadana de Neuquén. Enero 2021.

En Villa Tennis Club, se observó lo que podría ser un deslizamiento rotacional. En este tipo de movimiento, la rotura tiene lugar a través de superficies curvas. Una vez iniciada la inestabilidad, la masa empieza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre sí y dan lugar a “escalones” con la superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estriadas (Gonzales de Vallejo *et al.*, 2002). En la Fig. 48 puede observarse una contrapendiente de la parte superior del bloque que se desliza hacia el escarpe principal que es característica de la morfología de estos movimientos. Además, puede verse que los niveles de conglomerados están desplazados.



Figura 48. Posible deslizamiento rotacional en Villa Tennis Club. Diciembre 2023.

6.3 Definición de las variables para el análisis de la susceptibilidad de la costa frente al riesgo de erosión

El área costera constituye un ambiente dinámico y frágil debido a la multiplicidad de procesos naturales y antrópicos que en ella se producen. Bajo este escenario y teniendo en cuenta lo definido en el apartado 4.2, en este trabajo se considera vulnerabilidad como la susceptibilidad intrínseca de un elemento -zona costera- a sufrir daños causados por erosión, y peligro como el acontecimiento potencial de un suceso natural que puede causar pérdida de vidas, lesiones a las personas, daños y pérdidas en infraestructuras.

Para analizar la susceptibilidad del sector costero ante el riesgo de erosión se definieron las variables del IP: morfología y orientación de la costa, tasa de erosión, resistencia a la compresión simple, *Rock Quality Designation* y geomorfología costera; y del IV: infraestructura y uso turístico recreativo, que serán consideradas en toda la zona estudiada (Tabla 6).

Variables	Rangos de las variables				
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
	1	2	3	4	5
Morfología y orientación costera	Cóncava Protegidas de los vientos predominantes.	Cóncava Expuesta a los vientos predominantes.	Convexa Protegidas de los vientos predominantes.	Recta Expuesta a vientos predominantes	Convexa Expuesta a vientos predominantes.
Tasa de erosión	0 a -0,1 m/año	-0,1 a -0,2 m/año	-0,2 a -0,3 m/año	-0,3 a -0,5 m/año	-0,5 a -1 m/año
Resistencia a la compresión simple	>100 (rocas duras)	50-100 Mpa	25-50 Mpa	1-5 Mpa	0,25-0,5 Mpa
Rock Quality Designation	90-100	90-100	75-90	75-90	75-90
Geomorfología costera	Playa de arena	Playa arena/grava	Playa de grava	Acantilados activos, protegidos	Acantilados activos, expuestos
Infraestructura y uso turístico-recreativo	Sin infraestructuras Nulo uso recreativo-turístico	Sin infraestructuras Escaso uso recreativo-turístico	Con infraestructuras alejadas de acantilados Moderado uso recreativo-turístico	Con infraestructuras cercanas a acantilados Intenso uso recreativo-turística	Con infraestructuras muy cercanas a acantilados Muy intenso uso recreativo-turístico

Tabla 6. Variables que componen los índices de Peligrosidad y de Vulnerabilidad.

6.4 Descripción de las variables de los Índices de Peligrosidad y Vulnerabilidad

6.4.1 Morfología y orientación de la costa

La orientación y forma de la costa determinan su exposición frente al oleaje en función de los vientos predominantes condicionando el grado de erosión. A mayor perpendicularidad de la misma frente a estos vientos mayor será la energía del oleaje que ataca el frente costero. Su morfología también influye en el grado de erosión. En una costa cóncava, como una bahía o entrante, las olas que llegan experimentan refracción y se disipan, disminuyendo su capacidad erosiva. En cambio, aquellas con morfología convexa como promontorios o cabos están más propensas al oleaje por lo que están más expuestas a la erosión, el impacto de las olas se concentra contra los laterales y los extremos de estos frentes de tierra que se proyectan en el agua.

6.4.2 Tasa de erosión

En la retracción de los acantilados se produce una pérdida gradual de terreno producto de los procesos erosivos. La retracción costera es un proceso a largo plazo y tiene un impacto significativo en la morfología de la costa. Es una medida importante para comprender el ritmo al que se produce la pérdida de terreno costero.

6.4.3 Resistencia a la Compresión Simple y Rock Quality Designation

La erosión costera involucra la fuerza de ataque originada principalmente por la acción del oleaje y la fuerza de resistencia, que depende de las características del material que está en función de su litología (tipo de roca, dureza, grado de compactación) y de la presencia de discontinuidades (estratificación, diaclasas, fracturas, grietas, hendiduras, etc.). La intensidad relativa de estas fuerzas determina la dinámica del proceso erosivo.

La fuerza de ataque del oleaje depende de su frecuencia que está en relación directa con la velocidad del viento ya que cuando no hay viento o es muy bajo no se genera oleaje. La litología de los materiales que forman un acantilado representa en parte su resistencia mecánica, la cual determina la fuerza de resistencia de los materiales respecto a la incidencia del oleaje. La fuerza de resistencia es expresada en función de la resistencia a la compresión simple (RCS medida en Mpa). La presencia de discontinuidades en las rocas disminuye la resistencia del material, por lo tanto, conocer el grado de fracturación (RQD) de las mismas es importante respecto a la erosión.

6.4.4 Geomorfología

La costa en estudio tiene playas y acantilados, unidades geomorfológicas, que se comportan según sus características de manera diferente ante la erosión. Los acantilados activos que presentan signos de erosión como plataformas de abrasión, muescas en su base y movimientos de remoción en masa, están expuestos directamente a la erosión. La plataforma de abrasión muestra tamaños variables y en muchos casos está cubierta por derrubios y grandes fragmentos de roca que han caído de los acantilados. Donde se encuentra más desarrollada actúa como barrera al disipar la energía de las olas, reduciendo la dinámica de la erosión al pie de los acantilados, además se absorbe parte de la energía del oleaje y se reduce aún más su impacto si sobre ella hay gran cantidad de material competente, en este caso los acantilados están más protegidos frente a la erosión.

Las playas presentan menor peligrosidad que los acantilados ante los procesos erosivos. El ancho y la pendiente de las mismas están en función de los materiales disponibles, de su granulometría y de la energía de las olas y las corrientes que los movilizan. En la costa en análisis están constituidas por sedimentos que van desde arenas a rodados. El flujo y reflujo o resaca del oleaje moviliza los sedimentos en las playas, en aquellas constituidas por grava o arena gruesa la mayor permeabilidad de los materiales disminuye el efecto de la resaca construyendo pendientes de mayor gradiente, mientras que en las que tienen materiales de menor granulometría la acción de la resaca es mayor y muestran pendientes más suaves.

6.4.5 Infraestructura y uso turístico recreativo

Las personas, las actividades turísticas recreativas que realizan y las infraestructuras cercanas a la costa se ven expuestas y por lo tanto son vulnerables frente a la erosión costera. Durante la temporada estival, el sector costero experimenta un incremento significativo en la actividad turística-recreativa, con un importante flujo de personas y vehículos tanto en los clubes urbanizados como en lugares de uso espontáneo. El paisaje de acantilados y pequeñas playas de bolsillo atrae a los turistas que buscan disfrutar de actividades, como tomar sol, nadar, practicar deportes acuáticos y pasear, muchas personas no son completamente conscientes de los peligros a los que están expuestos.

6.5 Análisis y calificación de las variables de los componentes de riesgo

Se evaluaron y calificaron las variables definidas en distintos sectores costeros cuyos resultados se reflejan en el mapa de Figura 55.

6.5.1 Peligrosidad

La **morfología y orientación del sector costero** frente a los vientos predominantes es una de las variables que se reflejan en la peligrosidad. La costa tiene una orientación general NNO-ESE con morfología irregular. El **sector 1** corresponde a una gran bahía protegida de los vientos ocupada en su mayoría por el club Mari Menuco. En el **2** se observan bahías con distinta orientación y tamaño intercaladas con promontorios que en su mayoría están protegidas de los vientos predominantes, hacia el SE de este sector la costa es recta expuesta a los mismos. En el **sector 3 y 5** también hay intercalación de promontorios y bahías, el **3** está más expuesto a los vientos que provienen del SO mientras que el **5** lo está a los vientos del O y SO. En el **sector 4** estas geoformas y el segmento de costa recta están bien expuestos a los vientos, con promontorios más pronunciados. En el **sector 6** la costa es recta estando también expuesta.

La variable **tasa de erosión**, se calificó teniendo en cuenta los valores de EPR promedios obtenidos (ver apartado 6.1). En general se observa que estos valores aumentan desde el NO hacia el SE (Tabla 4). Se registraron los menores valores en el **sector 1** correspondiente a la zona aledaña al club Mari Menuco (-0,1 m /año), en el **sector 2** los registros fueron también bajos, mientras que en el **sector 4 y 5** los valores fueron mayores, mostrando un intenso retroceso costero en Villa tenis Club (-3,04 m / año). En el sector 3 y 6 los valores son medios (-0,3 m / año).

Para analizar la incidencia de la **resistencia** de las rocas frente al proceso erosivo se utilizaron los valores de RCS obtenidos en el campo (Tabla 5). Teniendo en cuenta las rocas aflorantes en el área de estudio, se generalizaron estos valores para todos los paquetes sedimentarios en los frentes acantilados del sector costero y también se contempló la acción del oleaje en función de la altura que pueden alcanzar las olas en periodos de tormenta sobre los mismos (Apartado 5.6). Con estas premisas y en base a la observación en campo y registro fotográfico se puede decir que en el **sector 1** afloran areniscas bien consolidadas en las proximidades del club Mari Menuco. En el **sector 2 y 3** el oleaje actúa sobre niveles de areniscas intercalados con niveles fangolíticos, hacia el SE del sector 3, cerca del canal de aducción, se observan espesos paquetes de fangolitas. En el **sector 4** afloran potentes paquetes de fangolitas intercalados con niveles de areniscas de menor espesor expuestos a la acción del oleaje, por encima conglomerados sueltos y cementados. En el **sector 5** el oleaje actúa sobre espesos bancos de conglomerados poco cementados, se encuentran también niveles fangolíticos de

poco espesor; mientras que en el **sector 6** los conglomerados poco cementados son de menor espesor con intercalación de niveles de areniscas.

La variable *Rock Quality Designation* se analizó y calificó en función de los valores aproximados obtenidos del índice RQD (Apartado 6.2). De acuerdo a esto, la calidad estimada del macizo rocoso en los frentes acantilados conformados por conglomerados fue menor que en aquellos donde se presentaban areniscas. Los acantilados que se desarrollan hacia el SE (**sector 4, 5 y 6**) muestran en su frente conglomerados con pequeños niveles intercalados de areniscas a diferencia de los del NO (**sector 1, 2 y 3**) que tienen niveles potentes de areniscas. En función del espesor de los niveles de conglomerados y su posición relativa en el frente de los acantilados, en el **sector 4** se observó que los mismos están por encima de potentes niveles de fangolitas, en el **sector 5** son muy potentes y ocupan casi todo el frente y hacia el sector 6 disminuyen su espesor. Los niveles de areniscas de los frentes acantilados en el **sector 1** se muestran masivos y hacia el **sector 2 y 3** aparecen areniscas más estratificadas.

En cuanto a la **geomorfología**, en la costa predominan los acantilados activos con plataformas de abrasión, las playas en su mayoría son de grava proveniente de la erosión de los depósitos fluviales holocenos que rematan los frentes de los acantilados. En el Club Mari Menuco correspondiente al **sector 1** se desarrolla una franja angosta de playa mixta. Hacia el NO del **sector 2** predominan los acantilados con plataformas de abrasión expuestas, hacia el SE comienzan a observarse caídas de rocas de los aleros que hacen de protección. En el **sector 3**, el club Hidronor tiene playas de gravas y mixtas, se registran caídas de rocas que protegen los acantilados. En el **sector 4 y 5** se muestran playas de grava y acantilados sin protección o poco protegidos con caídas de rocas. El **sector 6** tiene playas de grava y acantilados protegidos.

La distribución espacial del IP refleja áreas con diferentes valores a lo largo de la costa. Se observa un aumento de la misma hacia el SE, siendo los sectores 4 y 5 los de peligrosidad muy alta, en los cuales la mayoría de las variables obtuvieron puntaje alto y muy alto mientras que en el sector 1 con peligrosidad baja, todas las variables obtuvieron puntaje bajo y muy bajo (Tabla 7).

Sector	Variables					Índice de peligrosidad
	A	B	C	D	E	
1	1	1	2	1	2	2
2	3	2	3	2	4	3
3	3	3	4	2	3	3
4	5	5	5	3	5	5
5	4	4	4	5	5	5
6	4	3	3	4	3	3

Tabla 7. Valores del Índice de Peligrosidad y sus variables: A. Morfología y orientación costera, B. Tasa de erosión, C. Resistencia a la compresión simple, D. *Rock Quality Designation*, E. Geomorfología costera.

La peligrosidad de la erosión costera en la zona de estudio varía entre baja, media y muy alta (Figura 55)

6.5.2 Vulnerabilidad

Las infraestructuras presentes en la costa y las actividades que en ella se desarrollan, se analizaron en base a la observación in situ, el registro fotográfico y las imágenes satelitales.

Se evaluó si el sector costero presenta infraestructuras, en caso de que existan se tuvieron en cuenta en cualquier escala, tipo y función, considerando además su posición relativa con respecto a acantilados, entendiéndose alejadas aquellas que se encuentren a más de 100 m, cercanas las que están entre 50 y 100 m y muy cercanas aquellas ubicadas a menos de 50 m. La situación de mayor vulnerabilidad es aquella en la que existen infraestructuras muy cercanas a los sectores acantilados, en oposición a sectores costeros sin infraestructuras.

El área de estudio es utilizada en su totalidad para actividades turístico recreativas, sobre todo en época estival, con mayor o menor intensidad. En los clubes privados el uso es restringido y puntual mientras que en el resto de la costa es espontáneo y disperso. La determinación del uso moderado, intenso o muy intenso es relativa. Para establecer este rango lo ideal sería conocer la cantidad de personas que utilizan la costa, sin embargo, al no contar con esta información se asume que la existencia de caminos, picadas y huellas trae aparejado una mayor intensidad en el uso. En función de esto, los sectores más vulnerables son aquellos más accesibles y por lo tanto con un flujo muy intenso.

De acuerdo a lo dicho, el **sector 1** es ocupado por la urbanización del Club Mari Menuco desarrollado en una bahía sin acantilados. Aledaño al mismo hay un camping organizado. Si bien se considera que tiene un uso recreativo moderado, el hecho de que no haya acantilados cercanos a las infraestructuras hace que la vulnerabilidad sea menor.

En el **sector 2** no se desarrollan urbanizaciones, existe infraestructura hidrocarburífera, sobre la meseta, cercana a la costa acantilada. Los caminos secundarios rodean cañadones que en su mayoría no llegan directamente a la costa lo cual torna dificultosa la accesibilidad hacia la misma (Figura 49). Se determinó un uso recreativo moderado.



Figura 49. Fotografía del sector costero 2 mostrando dificultad para el acceso a la costa (tomada del diario La Mañana del Neuquén (29-1-24).

En el **sector 3 y 4** se ubican los clubes Hidronor y Villa Tennis Club, con infraestructura cercana y muy cercana al sector acantilado respectivamente (Figura 50; Figura 51). En Villa Tennis Club y en la zona del canal de aducción se han construido defensas (Figura 52) . Se determino un uso recreativo moderado para ambos sectores.



Figura 50. Construcciones del Club Hidronor. Noviembre 2023.



Figura 51. Construcciones en Villa Tennis Club. Diciembre 2023.



Figura 52. Defensa de hormigón construida en Villa Tenis Club, obsérvese en el sector medio de la misma inicio de volcamiento producto de la presión ejercida por el material caído del frente del acantilado. Diciembre 2023.

En el **sector 5** no hay urbanizaciones, la infraestructura hidrocarburífera está muy alejada de la costa como para tenerlo en cuenta en el análisis, sin embargo, el uso es espontaneo e intenso, la accesibilidad se ve favorecida por gran cantidad de caminos secundarios, picadas y huellas que llegan directamente a las playas (Figura 53).



Figura 53. Fotografía del sector 5 mostrando uso espontaneo. Diciembre 2023.

En el **sector 6** se desarrolla Bahía Bonita, en esta urbanización abierta hay infraestructura cercana a las playas, pero alejadas del sector acantilado. En las proximidades hay campings organizados y se encuentra la toma de agua lo que implica una mayor accesibilidad e intensidad en el uso recreativo de este sector (Figura 54).



Figura 54. Fotografía del sector 6 mostrando el uso recreativo. Noviembre 2023.

La mayoría de los sectores evidencian vulnerabilidad alta. Solo se registra vulnerabilidad baja en el sector 1 del Club Mari Menuco y muy alta en el sector 4 Villa Tennis Club (Tabla 8). El índice de vulnerabilidad muestra valores que van de bajos a muy altos (Figura 55).

Sector	Variable F	Índice de Vulnerabilidad
1	2	2
2	3	3
3	4	4
4	5	5
5	4	4
6	4	4

Tabla 8. Valores de la vulnerabilidad de erosión costera y su variable infraestructura y uso turístico recreativo (F).

6.6 Riesgo

La evaluación de la peligrosidad y la vulnerabilidad dan como resultado que la costa en estudio presenta riesgo frente a la erosión en un rango de bajo a muy alto (Figura 55). En el sector 1 se observa que el riesgo es bajo, en el 2 moderado y en el resto alto (sector 3 y 6) y muy alto (sector 4 y 5) (Tabla 9).

Sector	Peligrosidad	Vulnerabilidad	Riesgo
1	2	2	2 (bajo)
2	3	3	3 (medio)
3	3	4	4 (alto)
4	5	5	5 (muy alto)
5	5	4	5 (muy alto)
6	3	4	4 (alto)

Tabla 9. Valores del riesgo de erosión costera.

Mapa de Peligrosidad / Vulnerabilidad / Riesgo

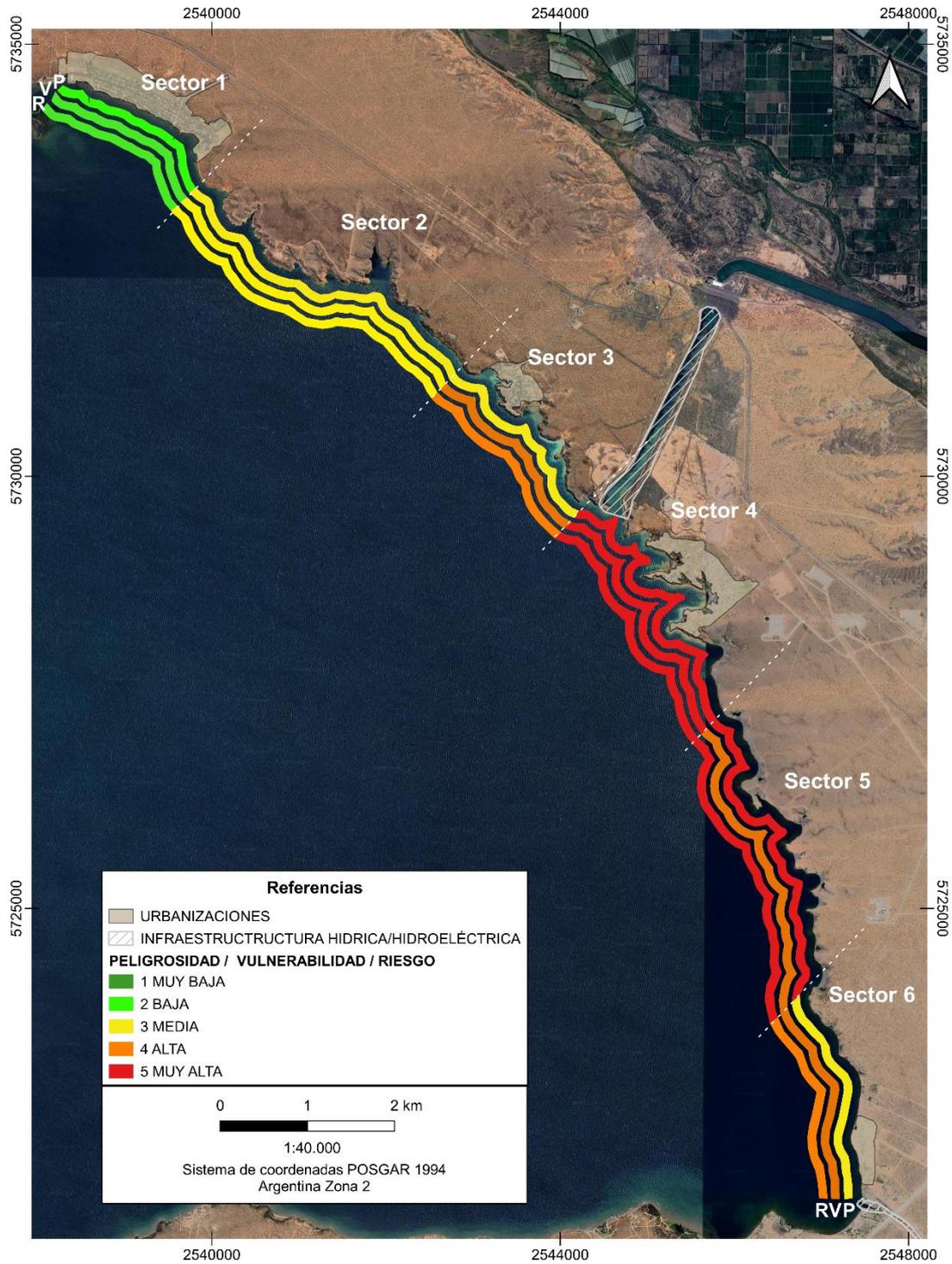


Figura 55. Peligrosidad (P), Vulnerabilidad (V) y Riesgo (R) de erosión costera en el área de estudio.

7 CONCLUSIONES

El análisis de la erosión costera ha permitido una comprensión integral de la dinámica de este proceso en base a las características distintivas del área de estudio y su análisis temporal. Para la caracterización de la misma se realizaron distintos mapas temáticos, entre ellos el geomorfológico, que permitió ver los rasgos más importantes del área costera, como acantilados, como son los acantilados, plataforma de abrasión, playas, lagunas costeras etc. Se evidenció un claro proceso de erosión de los acantilados, reflejado principalmente por la presencia de plataforma de abrasión, “mediacañas”, aleros, caídas de bloques y vuelcos.

Se evaluó la peligrosidad y vulnerabilidad mediante la consideración de variables relevantes para el proceso erosivo en el área de estudio. La evaluación del riesgo a la erosión costera permitió la elaboración de un mapa identificando sectores con niveles variables de riesgo. En función de estos resultados se considera lo siguiente:

Hacia el sureste, el área de estudio presenta mayoritariamente riesgo alto y muy alto frente a la erosión, mientras que en el noroeste es bajo y medio. El riesgo muy alto se corresponde con la presencia de infraestructura muy cercanas al sector de acantilados, uso turístico recreativo moderado a intenso, sectores costeros muy expuestos a los vientos, existencia de promontorios pronunciados, espesos paquetes fangolíticos y conglomerados poco cementados afectados por el oleaje, acantilados que muestran signos de erosión, importantes caídas de rocas y valores promedio EPR entre -0,4 y -0,9 m/año mostrando un intenso retroceso costero en Villa Tennis Club de -3,04 m/año.

El riesgo más bajo se registró en la bahía del club Mari Menuco protegida de los vientos, sector donde afloran areniscas bien consolidadas y donde la EPR promedio fue de -0,1 m/año. De todos los clubes del área de estudio, el Villa Tennis Club es el que presenta el riesgo más alto de erosión costera.

De los resultados obtenidos en este trabajo también se desprende que:

El retroceso de los acantilados está influenciado por la resistencia a la compresión simple de los afloramientos, en correspondencia directa con la litología. En el área de estudio los menores valores de RCS se corresponden a fangolitas y conglomerados poco cementados.

La variabilidad de la línea de cresta de los acantilados, en los 29 años analizados, muestra una tendencia de retracción costera generalizada. La mayor retracción registrada ocurrió en áreas cercanas a Villa Tennis Club, alcanzando 88 metros.

Dada la naturaleza dinámica, la intensa y creciente actividad humana y considerando la alta demanda estacional que enfrenta este espacio, la evaluación del riesgo es importante para la gestión efectiva del territorio. Esta herramienta no solo permite prever posibles situaciones de riesgo, sino también posibilita la adaptación de intervenciones en las áreas con distintos niveles de riesgo identificadas.

8. RECOMENDACIONES

Para el abordaje de la problemática planteada y la toma de decisiones se requiere de un plan de ordenamiento costero, hoy inexistente, en el marco de una planificación integral del territorio. Para ello se requiere la acción e intervención conjunta de diversos actores, como organismos provinciales, nacionales, entidades de investigación y autoridades locales de los clubes de la zona.

La gestión del área costera demanda un enfoque diferenciado, considerando la variabilidad en los niveles de peligrosidad de los distintos sectores y sus características. Las actividades que se desarrollan en el área se podrían optimizar, desde el punto de vista del espacio turístico recreativo, de la seguridad y el cuidado del ambiente, estableciendo un adecuado manejo de los espacios costeros en función del grado de riesgo definido para cada sector. Las estrategias de intervención deben ser adaptadas de manera específica, especialmente en aquellos sectores de mayor riesgo que cuentan con clubes y los que son zonas de uso espontáneo. De acuerdo a lo indicado precedentemente se recomienda:

- Implementar programas de concientización e información dirigidos a la población y al turista, sobre el riesgo de caídas repentinas de rocas vinculadas a los procesos erosivos con el objetivo de prevenir accidentes.
- Al presente existe una mínima cartelería o señalización de peligro de derrumbes, es recomendable aumentar su número, y ubicarla estratégicamente en lugares de mayor riesgo, especialmente en áreas con acantilados o aleros. Además, es importante la presencia de la misma en distintas ubicaciones a lo largo de la costa como en los caminos de acceso, la cima de los acantilados, acceso a acantilados desde playas contiguas, playas, etc. Inclusive para concientizar a eventuales turistas y usuarios, se podría adoptar un sistema de panfletos o plantillas informativas.
- Diversificar el contenido de dichas señalizaciones para abordar diferentes aspectos relacionados con la seguridad y la conciencia ambiental principalmente en relación a la autogestión de los residuos.

- En las áreas de uso turístico recreativo espontáneo, es importante identificar y demarcar zonas seguras de estacionamiento, ubicadas lejos del borde de los acantilados y grietas, asimismo establecer senderos de acceso a las playas en lugares de bajo riesgo.
- Realizar futuros monitoreos periódicos y de evaluación del proceso erosivo a lo largo del tiempo.
- Si bien el aporte de este trabajo es específicamente relacionado al riesgo costero, dentro del ordenamiento del territorio debería también considerarse el uso deportivo del embalse (actividad de lanchas, motos de agua, etc.).

No existen trabajos previos en la zona sobre este tema, los resultados obtenidos en este trabajo pueden considerarse como un punto de partida para avanzar en una apropiada gestión del riesgo asociada a la erosión costera. Se entiende también que este estudio podría enriquecerse al considerar otras variables para el análisis del riesgo o profundizar en las ya evaluadas, así como realizar análisis sectoriales más detallados para registrar con mayor precisión la variabilidad espacial de éstas en el área de estudio.

9 ANEXO

Base de datos fotográficos áreas impactadas por erosión costera y por las actividades antrópicas.

Figura	Ubicación	Fecha de toma	Página
19	38°34'38,16"S; 68°29'44,02"O	01/2021	35
45	38°36'25,50"S; 68°28'14,04"O	01/2021	67
46	38°33'58,95"S; 68°30'35,64"O	01/2021	68
47	38°35'36,22"S; 68°32'42,28"O	01/2021	69
21	38°36'1,82"S; 68°28'28,40"O	12/2022	36
23	38°37'22,03"S; 68°27'41,32"O	12/2022	37
25	38°37'23,88"S; 68°27'39,84"O	12/2022	38
22	38°33'10,26"S; 68°32'20,26"O	02/2023	37
20	38°33'34,81"S; 68°31'22,21"O	07/2023	36
43	38°33'55,91"S; 68°30'39,10"O	07/2023	67
44	38°37'3,63"S; 68°27'51,35"O	07/2023	67
17	38°34'40,30"S; 68°29'40,60"O	10/2023	34
24	38°34'18,69"S; 68°30'10,81"O	11/2023	37
42	38°34'17"S; 68°30'11,2"O	11/2023	66
50	38°34'22,74"S; 68°30'0,62"O	11/2023	77
54	38°38'36,18"S; 68°27'17,35"O	11/2023	79
18	38°36'52,80"S, 68°27'56,80"O	12/2023	35
27	38°35'26,25"S, 68°28'43,61"O	12/2023	39
48	38°35'36,87"S, 68°28'42,44"O	12/2023	70
51	38°35'23,89"S, 68°28'55,22"O	12/2023	77
52	38°35'26,95"S, 68°28'41,33"O	12/2023	78
53	38°37'25,24"S, 68°27'38,06"O	12/2023	78

9 BIBLIOGRAFÍA

Acha Navarro, J. A. (1999). Erosión costera en el embalse de Itaipu-MD. En Grupo de Estudios de Impactos Ambientales (GIA), Grupo XI, GIA / 13. Foz de Iguazú – Paraná – Brasil, 1-6 pp.

Bird, E. (2008). Coastal geomorphology: an introduction. John Wiley and Sons. Segunda edición. New York, 441 pp.

Bloom, A. L. (1974). La superficie de la Tierra. Fundamentos de la Ciencia de la Tierra. Edición Omega, Barcelona, 151 pp.

Calvo, F. (2000). Panorama de los estudios sobre riesgos naturales en la geografía española. Boletín de la A.G.E., N.º 30, 21-35 pp.

Cardona, O.D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. En: A. Maskrey (Comp.) Los desastres no son naturales 45-65. Ciudad de Panamá: Red de estudios sociales en Prevención de desastres en América Latina.

Caselli, A. T., Barion, G. E., Minutella, M., Soplanes, J., y Migueles, N. (2019). Estudio de la dinámica costera y retroceso del acantilado en la zona que ocupa actualmente el Centro de Interpretación de la Reserva Faunística Punta Bermeja. Informe final. Consejo Federal de Inversiones, 66 pp.

Castedo, R. (2012). Modelización de costas rocosas acantiladas. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 253 pp.

Céspedes Plasencia, J. J., y Soto Oblea, C. R. (2023). Análisis de imágenes de satélite por teledetección para determinación de erosión y sedimentación de manera natural y antropogénica de la bahía del Callao.

Chacón, J., Irigaray, C., Fernández Del Castillo, T. (2007). Los movimientos de ladera de la Provincia de Granada. Movimientos de Ladera. Atlas de Riesgos Naturales en la Provincia de Granada. Diputación de Granada e Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Granada, 45-82 pp.

Chin, D. A. (2012). Water-quality engineering in natural systems: fate and transport processes in the water environment. John Wiley and Sons. New Jersey, 610 pp.

Codignotto, J. (1997). Geomorfología y dinámica costera. El Mar Argentino y sus recursos pesqueros, 1:89-105

Cutter, S. L., Mitchell, J. T. and Scott, M. S. (2000). Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers* 90(4), 713-737 pp.

Davidson-Arnott, R.G.D. (2010). *An introduction to coastal processes and geomorphology* Cambridge. University Press. New York, 442 pp.

Del Río, L., Gracia, F. J. (2007). Análisis de la vulnerabilidad de los acantilados atlánticos de la provincia de Cádiz ante la erosión costera. *Cuaternario y Geomorfología*,21(1), 87-101 pp.

Dukaric, Z., Criminari de Cervera, M. (1981). Morfogénesis de playas en el lago artificial Mari-Menuco, provincia del Neuquén. *Boletín geográfico del Departamento de geografía de la Universidad nacional del Comahue Neuquén*, (9), 29-57 pp.

Fernández de la Torre, J. (2017). Análisis y propuesta metodológica para el cálculo de tasas de erosión y otros indicadores costeros en un sector de la costa andaluza.

Fernández, J. M., Bértola, G. R., y Campo, A. M. (2017). Aplicación del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) a los barrios costeros del partido de Mar Chiquita, Buenos Aires, Argentina. *Geoacta*,42(1), 13-23 pp.

Ferrer, J. A., Irisarri, J. A., Mendia, J. M. (2006). *Suelos de la Provincia del Neuquén*. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Consejo Federal de Inversiones (CFI), Buenos Aires, 224 pp.

Flor, G. (2004). *Geología Marina*. Librería SERVITEC. Oviedo, 644 pp.

Forcone, A. (2014). *Plantas del monte patagónico*. EdiUNS. Bahía Blanca, 98 pp.

Fox, W. (2005). Bioerosion. *Encyclopedia of coastal science*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 191-192 pp.

Garrido, A. C. (2010). Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): Nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie* 12 (2), Buenos Aires, 121- 177 pp.

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

González de Vallejo L. Ferrer M., Ortuño L., Oteo C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación SA. Madrid, 715 pp.

González Díaz, E. F., Di Tommaso, I. (2011). Geomorfología. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, 421-438 pp.

Goudie, A. (Ed.). (2004). Encyclopedia of geomorphology (Vol. 1). Psychology Press.

Gutiérrez Elorza, M. (2008). Geomorfología. Pearson Prentice Hall. Madrid, 920 pp.

Hubp, J. L. (2011). Diccionario geomorfológico. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 481pp

Kokot, R. R., Codignotto, J. O., Elissondo, M. (2004). Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59 (3), 477-487 pp.

Kokot, R. R., Salminci, J. G., Luna, F. S., Tunstall, C. (2013). Retroceso costero y su relación con parámetros geotécnicos: Las Grutas, Río Negro. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente N.º 30 - 53 – 66 pp.

Lässig, J. L., Cogliati, M. G., Bastanski, M. A., Palese, C. (1999). Wind characteristics in Neuquén, North Patagonia, Argentina. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 79 (1 - 2), 183-199 pp.

Lasta, C., González, E., Verón, E., Mutti, A., Marchi, V., Ezpeleta, L., Alonso, D. (2010). Evaluación de la vulnerabilidad a la erosión del cordón costero en el partido de la costa. Manual de manejo de barreras medanosas de la provincia de Buenos Aires.

Marcomini, S. y López, R. (2014). Geología y manejo costero. Colección Ciencia Joven, Ed. EUDEBA. 92 pp.

Martínez, J. (2001). Vulnerabilidad y adaptabilidad de la zona costera colombiana al ascenso acelerado del nivel del mar. Documento Inédito Ministerio de Medio Ambiente de Colombia. Bogotá.

Merlotto, A., Bértola, G. R., e Isla, F. I. (2017). Riesgo de erosión costera de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista Universitaria de geografía, 26 (2), 37-72 pp.

Merlotto, A., Bértola, G. R., y Piccolo, M. C. (2011). Riesgo a la erosión costera en las ciudades de Necochea y Quequén, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Contribuciones científicas GAEA, 23 (13), 151-158 pp.

Merlotto, A., y Bértola, G. R. (2007). Consecuencias socio-económicas asociadas a la erosión costera en el balneario Parque Mar Chiquita, Argentina.

Ortega, E., y Blasco, E. (1998). Aprendiendo a convivir con las presas. En Aprendiendo a convivir con las presas. ORSEP Comahue, 76 pp.

Palese, C., Gardiol, J. M., Lässig, J. L. (2009). Mapas de velocidad media del viento en el centro-este de la Provincia del Neuquén. Meteorológica, 34(1), 17-27 pp.

Palese, C., Lässig, J. L., Cogliati, M. G., Bastanski, M. A. (2001). Régimen de viento y de potencia eólica en la región norpatagónica. IX Encuentro Latinoamericano y del Caribe Sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos (ELPAH)(Patagonia Argentina, 2001).

Palese, C., y Lässig, J.L. (1997). Lago Mari Menuco. Parte I: caracterización del recurso eólico. Avances en energías renovables y ambiente, N.º 1: 177 – 180 pp.

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

Pons, J. F., y Rojas Reyes, N. V. (2020). Río Neuquén, estudio de reaprovechamiento del Complejo Hidroeléctrico Cerros Colorados. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería.

Priest, S. D., Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. Pergamon. (Vol. 13, No. 5, 135-148 pp).

Rangel-Buitrago, N. G., Posada-Posada, B. O. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio en la línea de costa. Intropica, 29-42 pp.

Rodríguez, M. F., Leanza, H. A., Salvarredy Aranguren, M. (2007). Hoja Geológica 3969- II Neuquén, provincias del Neuquén, Río Negro y La Pampa. Instituto de Geología y Recursos Naturales. SEGEMAR. Boletín 370, Buenos Aires, 1- 165 pp.

Schillizzi, R., Gelos, E. M., Spagnuolo, J. (2004). Procesos de retracción de los acantilados patagónicos entre la desembocadura de los ríos Negro y Chubut. Argentina. Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología, 11(1), 17-26.

Silva, R., Martínez, M.L., Moreno-Casasola, P., Mendoza, E., López-Portillo, J., Lithgow, D., Vázquez, G., Martínez-Martínez, R.E., Monroy-Ibarra, R., Cáceres-Puig, J.I., Ramírez-Hernández, A., BoyTamborell, M. (2017). Aspectos generales de la zona costera. UNAM; INECOL. 54pp

- Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of Rocky Coasts* John Wiley and Sons. Chichester, 302 pp.
- Tarbutk, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D. (2013). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física*. 10 a Edición. Pearson Prentice Hall, Madrid, 852 pp.
- Thieler E., Himmelstoss E., Zichichi J., and Ergul A. (2009) “The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 an ArcGIS extension for calculating shoreline change”, U.S. Geological Survey.
- United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO). (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Expert Group Meeting*. Geneva, 48 pp.
- Van der Kwast, H. (2018). *QGIS and Open Data for Hydrological Applications – Exercise Manual (versión 3.4.1b)*. OpenCourseWare.120pp.
- Vargas Rojas, R. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Cuarta edición. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, 99 pp.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In Schuster, R. L., Krizek, R. J. (Eds.), *Landslides: Analysis and Control*. Transportation and Road Research Board, Special Report 176, National Academy of Science, Washington D. C., pp. 11-33.