



Facultad de Ingeniería
Departamento de Geología y Petróleo
Licenciatura en Ciencias Geológicas

Trabajo Final de Licenciatura

**Caracterización de la problemática aluvional en el
sector comprendido entre el Barrio Los Olivos y
Colonia Nueva España**

Sanhueza Luciano

Director: Mg Raúl Rapacioli

Directora: Ing. Elena Storani

Neuquén, Argentina

2022

Universidad Nacional del Comahue – Facultad de Ingeniería
Lic. en Ciencias Geológicas – Dpto. de Geología y Petróleo

Caracterización de la problemática aluvional en el sector comprendido entre el Barrio Los Olivos y Colonia Nueva España

Trabajo Final de Licenciatura presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue como parte de los requisitos para obtener el título de: LICENCIADO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS.

Autor: Sanhueza, Luciano Eduardo. N° Legajo: ING. 2625.

Directores: Ingeniero Rapacioli Raúl e Ingeniera Storani Elena.

Jurado 1: Dra. Duffilho Cecilia.

Jurado 2: Dr. Pujol Lucas.

Jurado 3: Lic. Camps Ailen.

Neuquén Capital, Argentina.

Año 2022

Índice

1. Introducción	1
1. 1. Objetivos Generales.....	2
1. 2. Objetivos Específicos	2
1. 3. Marco Teórico	3
1. 3. 1. Cuenca Hidrográfica	3
1. 3. 2. Erosión del Suelo.....	3
1. 3. 2. 1. <i>Procesos de la Erosión del Suelo</i>	3
1. 3. 2. 2. <i>Mecánica de la Erosión del Suelo</i>	4
1. 3. 2. 3. <i>Factores que Influyen en la Erosión</i>	4
1. 3. 3. Erosión Hídrica	6
1. 3. 4. Principales Formas de Erosión Hídrica	6
1. 3. 4. 1. <i>Erosión Laminar</i>	6
1. 3. 4. 2. <i>Erosión en Surcos</i>	7
1. 3. 4. 3. <i>Erosión en Cárcavas</i>	7
1. 3. 4. 4. <i>Erosión por Salpicadura</i>	8
1. 3. 5. Efectos de la erosión hídrica.....	8
1. 3. 6. Control de la Erosión Hídrica	9
1. 3. 7. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	9
2. Antecedentes	11
2. 1. Neuquén.....	11
2. 2. Zona de estudio.....	12
3. Características del Área de Estudio.....	13
3. 1. Ubicación.....	13
3. 2. Estratigrafía	14
3. 3. Estructura.....	16
3. 4. Clima	16
3. 5. Suelos y uso de suelos	17
3. 6. Vegetación	18
3. 7. Hidrología.....	19
3. 8. Población, viviendas y acción antrópica de los barrios incluidos en la zona de estudio	19

4. Desarrollo del Estudio.....	20
4. 1. Estudio de Imágenes Satelitales y Fotografías Aéreas	20
4. 2. Preparación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE).....	21
4. 3. Delimitación de cuencas y definición de la red de drenaje	23
4. 4. Análisis Litológico	25
4. 4. 1. Elaboración de Perfil Geológico	29
4. 5. Mapa Geomorfológico y Perfil Geomorfológico	30
4. 6. Potencial de Escorrentía. Método del Número de Curva del SCS.	33
4. 6. 1. Clasificación de coberturas y usos del suelo	34
4. 6. 2. Mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos	37
4. 6. 3. Mapas de pendientes y de orientación de laderas del terreno	38
4. 6. 4. Álgebra de mapas.	39
4. 6. 5. Mapa de Potencial de escorrentía	40
4. 7. Caracterización de Cuencas Aluvionales y Parámetros Morfométricos	43
4. 7. 1. Parámetros Físicos de Forma.....	43
4. 7. 2. Parámetros Físicos de Relieve	45
4. 7. 3. Parámetros Relativos a la Red Hidrográfica.....	51
4. 8. Tormentas de Diseño Adoptadas.....	53
4. 9. Modelación Hidrológica.....	57
4. 9. 1. Modelo HEC-HMS.....	57
4. 9. 1. 1. Componentes.....	58
4. 9. 2. Método de Snyder.....	59
4. 10. Fragilidad Hidrológica.....	63
4. 11. Determinación de los Parámetros que Intervienen en el Cálculo de la Producción de Sedimentos– MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation).....	65
4. 11. 1. Factor K	66
4. 11. 2. Topografía, Factor LS.....	70
4. 11. 3. Cubierta Vegetal y Manejo, Factor C	73
4. 11. 4. Prácticas de Conservación, Factor P.....	75
4. 11. 5. Presentación de factores de estudio	75
4. 12. Producción Anual de Sedimentos.....	76
4. 13. Producción Anual de Escorrentía y Sedimentos	77

5. Discusión.....	78
6. Conclusiones y Recomendaciones	80
6. 1. Conclusiones.....	80
6. 2. Recomendaciones	81
7. Referencias	82

Índice de Figuras

Figura 1: Etapas de erosión.	4
Figura 2: Desprendimiento y arrastre de partícula.	5
Figura 3: Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión	5
Figura 4: Formas de Erosión Hídrica.	8
Figura 5: A. Mapa de la República Argentina. B. Mapa de provincia del Neuquén. C. Mapa de cuencas y red de drenaje del área de estudio	13
Figura 6: Zona en estudio.	14
Figura 7: Mapa litológico de la zona de estudio	15
Figura 8: Temperatura media anual (°C) y precipitación media anual (mm)	16
Figura 9: Suelos de la provincia del Neuquén.	17
Figura 10: Vegetación característica de la provincia del Neuquén	18
Figura 11: Imágenes históricas Google Earth Pro del área de estudio de los años 2003 (A); 2006 (B); 2010 (C); 2015 (D)	21
Figura 12: MDE de la zona de estudio modificado.	22
Figura 13: Mapa de altitudes de la zona de estudio	23
Figura 14: Mapa de cuencas y red de drenaje del área de estudio	24
Figura 15: Ubicación perfil geológico representativo de la zona de estudio. Perfil 1-1' con techo en el punto 38° 53' 46'' S – 68° 53' 47'' W y base en 38° 53' 47'' S – 68° 05' 18'' W	26
Figura 16: Muestras correspondientes al perfil 1-1'. 1A: Arenisca cuarzosa muy fina de color amarillenta. 2A: Pelita de color rojo. 3A: Pelita verdosa. 4A: Arenisca fina gris con tonalidades de color rosa. 1B: Arenisca media a gruesa gris. 1C: Conglomerado polimíctico clasto sostén. 2C: Conglomerado polimíctico matriz sostén con cemento calcáreo.	27
Figura 17: Perfil 1-1' con escala vertical exagerada. De base a techo: 1. 5 m de areniscas amarillentas (muestra 1A); 2. 15 m de pelitas rojizas (muestra 2A); 0. 3 m de pelitas verdosas (muestra 3A); 0. 3 m de areniscas grises con tonalidades rosas (muestra 4A); 3 m de areniscas amarillentas (muestra 1A); 0. 3 m de pelitas rojizas (muestra 2A); 0. 5 m de areniscas grisáceas que disminuye lateralmente hasta desaparecer (muestra 1B); 4. 4 m de conglomerados polimícticos clastos sostén con base erosiva (muestra 1C); 1. 2 m de conglomerados polimícticos matriz sostén con cemento calcáreo (muestra 2C).	29
Figura 18: Geomorfología de la zona de estudio	30
Figura 19: Ubicación del perfil geomorfológico representativo de la zona de estudio. Perfil 1-1' con techo en el punto 38° 53'30'' S - 68° 09'19'' W y base en 38° 53' 55'' S - 68° 03'24'' W	32
Figura 20: Perfil geomorfológico representativo de la zona de estudio.	32
Figura 21: Variables que intervienen en el método del SCS para el cálculo de las abstracciones	33

Figura 22: Mapa de Imagen Sentinel 2; bandas 8-4-3(infrarrojo)	35
Figura 23: Mapa de coberturas y usos del suelo de la zona de estudio.....	36
Figura 24: Mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos de la zona de estudio.....	38
Figura 25: Mapa de pendientes de la zona de estudio en grados.	38
Figura 26: Mapa de orientación o aspecto de la zona de estudio	39
Figura 27: Modelo cartografico aplicando álgebra de mapas y reclasificaciones en SIG. Cálculo del índice CN distribuido. Elaborado sobre la base del método propuesto por el USSCS (1975).....	40
Figura 28: Mapa del Índice del Curva Número.....	42
Figura 29:Curvas hipsográfica o hipsométricas	45
Figura 30: Curva Hipsométrica de Cuenca 1.	47
Figura 31: Curva Hipsométrica de Cuenca 2.	48
Figura 32: Curva Hipsométrica de Cuenca 3.	49
Figura 33: Curva Hipsométrica de Cuenca 4	50
Figura 34: Hietograma de bloque alterno porcentual para tormenta de 2 hora	55
Figura 35: Histograma de bloque alterno porcentual para tormenta de 1. 5 hora	56
Figura 36: Hietograma de bloque alterno porcentual para tormenta de 1 hora	56
Figura 37: Representación de la escorrentía en una cuenca hidrográfica según HEC-HMS.	59
Figura 38: a). Hidrograma Unitario de Snyder b). Hidrograma Unitario Requerido.....	59
Figura 39: Esquema tipológico en HEC-HMS para la simulación de la escorrentía en las cuencas.	61
Figura 40: Hidrograma de crecida Cuenca 1, 2, 3 y 4, TR: 100 Años.....	62
Figura 41: Mapa de distancia a cursos fluviales.	64
Figura 42: Mapa de Fragilidad Hidrológica.....	65
Figura 43: Nomograma de Erodabilidad del Suelo.....	68
Figura 44: Mapa del factor K.	70
Figura 45: Mapa del factor LS.	72
Figura 46: Mapa del índice NDVI distribuido.	74
Figura 47: Mapa del factor C distribuido.	75
Figura 48: Crecimiento de la ciudad de Neuquén desde 1966 hasta 2001.....	78

Índice de Tablas

Tabla 1: Coordenadas de cierre de cuencas aluvionales	24
Tabla 2: Descripción litológica de las muestras analizadas del perfil 1-1' en el sector de la colonia de Nueva España	28
Tabla 3: Cobertura y uso de suelo	35
Tabla 4: Grupos Hidrológicos de Suelos.....	37
Tabla 5: Valores del índice CN para diferentes tipos cobertura y usos del suelo	41
Tabla 6: Valores del índice CN para áreas aluvionales semiáridas.....	41
Tabla 7: Índice CN promedio cuencas aluvionales	43
Tabla 8: Parámetros morfométricos cuencas aluvionales	43
Tabla 9: Parámetros de físicos de forma	44
Tabla 10: Datos hipsométricos de la Cuenca 1	47
Tabla 11: Datos hipsométricos de la Cuenca 2	48
Tabla 12: Datos hipsométricos de la Cuenca 3	49
Tabla 13: Datos hipsométricos de la Cuenca 4	50
Tabla 14: Parámetros físicos de relieve.....	51
Tabla 15: Parámetros Relativos a la Red Hidrográfica	53
Tabla 16: Precipitaciones para tormentas de cierta recurrencia.....	53
Tabla 17: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 1 h para periodos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.....	54
Tabla 18: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 1.5 h para periodos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.....	54
Tabla 19: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 2 h para periodos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.....	54
Tabla 20: Tc y Tlag cuencas aluvionales	61
Tabla 21: Resultados modelación hidrológica con HEC-HMS	62
Tabla 22: Resultados modelación hidrológica con HEC-HMS	62
Tabla 23: Fragilidad Hidrológica	63
Tabla 24: Resultados de Fragilidad por Cuenca.....	63
Tabla 25: Porcentajes de arcilla, limo y arena por muestra de suelo en el triángulo textural, utilizando como dato de entrada la textura de la muestra de suelo	67
Tabla 26: Valores del parámetro de estructura.....	67
Tabla 27: Valores del parámetro de permeabilidad	67
Tabla 28: Valores del Factor de Erodabilidad de Suelos, K (Ton*Hora/Newton*Ha).....	69

Tabla 29: Factor de erodabilidad.....	69
Tabla 30: Valores de L y S. Y Factor Topográfico.....	72
Tabla 31: Factor C.....	74
Tabla 32: Resultados finales de los factores intervinientes.....	75
Tabla 33: Sedimentos producidos a la salida de las cuencas en toneladas (T)	76
Tabla 34: Sedimentos producidos a la salida de las cuencas en toneladas/hectarea (T/ha) .	76
Tabla 35: Producción anual de sedimento y producción anual promedio de esorrentía	77
Tabla 36: Degradación por erosión hídrica (FAO. 1980)	77

Agradecimientos

Detrás de este logro que anhele por varios años, hubo grandes personas que me ayudaron a alcanzarlo. Pero en especial quiero agradecerles:

A mi madre y padre, Parra Griselda y Sanhueza Walter, que me enseñaron a no darme por vencido nunca y que cada persona tiene que luchar su propia batalla.

A mi hermana, que estuvo al lado mío en momentos duros de mi vida.

A mis abuelos, Battaginni Mirtha, Parra Ricardo y Sanhueza Delicio, los cuales espero que estén orgullosos de mí, dónde quieran que estén. Si tuviera que volver a elegir a mis abuelos, los volvería a elegir mil veces.

A mis amigos y compañeros, de Universidad y Futbol, en especial a Canadá Barbara, Salazar Jon y Buessio Andres.

A la Universidad del Comahue por formarme y darme una educación gratuita y de excelente calidad. Y a los profesores que siempre me inculcaron pasión por la Geología.

Al jurado de este trabajo final, a los cuales les agradezco las observaciones y correcciones para generar una calificación satisfactoria.

A mis directores Storani Elena y Rapacioli Raul por su rápida respuesta siempre que los necesite; por sus sugerencias, correcciones y por todas las reuniones realizadas en contexto de pandemia.

A los vecinos del Asentamiento Nueva España que siempre me brindaron información, ayuda, comodidad en cada una de las visitas. Haciéndome sentir parte del asentamiento.

Resumen

La problemática de la erosión hídrica en la provincia de Neuquén, se ha convertido en escenario de riesgos como consecuencia de su rápido y desordenado crecimiento poblacional. En el centro - este de la provincia de Neuquén, donde se encuentra la ciudad de Neuquén, se suelen producir fenómenos aluvionales a causa de sus características climáticas. Principalmente por su condición de aridez y por la presencia de lluvias estivales de corta duración y de gran intensidad. Los escurrimientos o escorrentías superficiales, cuando se encauzan, presentan un gran potencial destructivo. El Sitio Piloto de estudio se encuentra enmarcado en cuatro cuencas ubicadas en la parte más austral del Río Neuquén abarcando en el análisis al Barrio Los Olivos, Barrio Santa Angela III y Colonia Nueva España de la ciudad de Neuquén.

El objetivo del presente Trabajo Final de Licenciatura de Ciencias Geológicas es presentar una metodología que integre la información de los procesos involucrados en el fenómeno torrencial que afecta la zona de estudio, en un Sistema de Información Geográfica (SIG), y de esta forma predecir la escorrentía y la degradación de los suelos de las cuencas aluvionales.

La metodología utilizada para determinar la producción de sedimentos del área de estudio consiste en integrar el modelo hidrológico HEC-HMS (USACE, 2015), para la determinación de la escorrentía y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) adoptado por Williams (1975) para la evaluación de la producción de sedimentos por erosión hídrica, en el entorno del SIG.

A partir de la aplicación de ambos modelos se genera una predicción de escorrentía a partir de la cual se determina las regiones de mayor efecto erosivo y se comprobó el proceso degradatorio por la pérdida de suelo que generan las crecidas aluvionales.

Palabras claves: Erosión hídrica; pérdida de suelos; SIG; Riesgo hídrico; Urbanismo.

Abstract

The problem of water erosion in the province of Neuquén has become a risk scenario as a result of its rapid and disorderly population growth. In the center-east of Neuquén, alluvial phenomena usually occur due to its climatic characteristics. Mainly due to its aridity and the presence of short-term and intense summer rains. The same, when prosecuted, present a great destructive potential. The Pilot Study Site is framed in four basins located in the southernmost part of the Neuquén River, including in the analysis Barrio Los Olivos, Barrio Santa Angela III and Colonia Nueva España.

The objective of this Final Project of Geological Sciences is to present a methodology that integrates the information of the processes involved in the torrential phenomenon that affects the study area, in a Geographic Information System (GIS), and in this way predict runoff and soil degradation in these alluvial basins.

The methodology used to determine the sediment production of the study area consists of integrating the HEC-HMS hydrological model (USACE, 2015), for the determination of runoff, and the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) adopted by Williams (1975) for the evaluation of the production of sediments by hydric erosion, in the environment of the GIS.

From the results of both models, the regions with the greatest erosive effect will be extended, and at the same time a runoff prediction will be produced and the degradation process due to soil loss generated by alluvial floods will be verified.

Keywords: Water erosion; loss of soils; GIS; Hydric risk; Town planning

1. Introducción

El progreso urbano, siempre ha sido referenciado como una señal del avance de la sociedad, donde un mercado inmobiliario en crecimiento siempre es visto como un indicador de mejora de las condiciones económicas y sociales de un país (Capdevielle, 2016). No obstante, la realidad suele mostrar una situación diferente a estas expectativas, puesto que en algunas ocasiones el desarrollo de infraestructura inmobiliaria urbana suele ser un problema para la sociedad, ya que se avanza sobre terreno poco o nada apto para sostener infraestructura urbana, perjudicando a los habitantes que finalmente habitan estos lugares.

Esta situación, genera una problemática que parece ser de larga data en la República Argentina y que no parece tener un final cercano, Torrens *et al.* (2019) afirman que “La expansión de las ciudades sobre tierras con escasa o nula aptitud para urbanizar es una problemática común en muchas ciudades del país” (p. 1). Así pues, a partir de distintas formas de urbanización, sectores geomorfológicamente no aptos para la infraestructura urbana son urbanizados sin prever las amenazas y consecuencias a las que están expuestos los habitantes de estas nuevas urbes (Ciminari, Jurio y Torrens, 2005).

En la Patagonia al sur de la República Argentina se encuentra la Provincia de Neuquén, cuya capital homónima en los últimos años se ha convertido en una importante urbe dinámica y de alto crecimiento demográfico. Donde se ha extendido los ejidos urbanos de manera fraccionada y con bajos estándares de calidad, tanto de niveles de vida urbana como ambiental (Capua y Jurio, 2011). Al respecto sobre el crecimiento de la ciudad de Neuquén, Torrens *et al.* (2019) comentan lo siguiente:

Históricamente, se ha comportado como un receptor de población en busca de oportunidades laborales, que han generado una gran demanda habitacional y de servicios a la que no siempre se ha podido dar una respuesta positiva en el tiempo. Con planes urbanos superados por la dinámica poblacional, decisiones políticas de gestión sin soluciones a las necesidades de vivienda y con dificultades para acceder al mercado laboral, los grupos sociales más vulnerables ocupan paulatinamente aquellos lugares que, por sus características naturales, no son adecuados para urbanizar producto de las amenazas a los que se encuentran sujetos. De esta manera se van construyendo diversas situaciones de riesgo a la vez que se gesta una ciudad de marcados contrastes. (p. 2).

En estos años de desarrollo urbanístico en la ciudad de Neuquén entonces, el proceso de urbanización se ha caracterizado por la desordenada expansión del ejido urbano, exponiendo a los habitantes involucrados a diferentes escenarios de riesgo. Donde es común notar el desarrollo de barrios que aun siendo planificados, están muy por debajo de las mínimas regulaciones que el código de urbanismo exige, además se nota la ocupación irregular de áreas de peligro natural por la población más vulnerable socioeconómicamente y falta de infraestructuras de contención que explican diversas situaciones de riesgo ambiental que se presentan en la ciudad (Jurio y Torrens, 2015).

Y es que, los problemas relacionados con el proceso urbanístico en la ciudad de Neuquén, son tan diversos que existe una amplia bibliografía al respecto:

El sector noroeste corresponde al área geomorfológicamente más inestable, ya que coincide con sectores de fuertes pendientes y numerosos cauces temporarios, y es a

la vez donde se asienta la población más vulnerable, por lo que constituye el área más crítica (Jurio y Torrens, 2015, p. 2)

En el centro-este de la provincia de Neuquén, donde se encuentra la ciudad de Neuquén, se suelen producir fenómenos aluvionales a causa de sus características climáticas. Principalmente por su condición de aridez y por la presencia de lluvias estivales de corta duración y de gran intensidad. Los mismos, cuando se encauzan, presentan un gran potencial destructivo (Capua y Jurio, 2011).

Si se considera la zona sur de la ciudad de Neuquén, estos fenómenos suelen tomar mayor relevancia a raíz de las elevadas pendientes y de la presencia de materiales sólidos los cuales son transportados por la corriente (Torrens *et al.*, 2019).

En función de lo descrito, este trabajo final de licenciatura presenta una evaluación de la dinámica hídrica de cuatro cuencas ubicadas en la parte más austral del Río Neuquén abarcando en el análisis al Barrio Los Olivos, Barrio Santa Angela III y Colonia Nueva España de la ciudad de Neuquén.

A partir de esta problemática, el presente trabajo de investigación tiene el propósito de evaluar el riesgo hídrico que presenta la zona de estudio, considerando las características del área de estudio y la vulnerabilidad de la población expuesta en riesgo, utilizando para esto la integración de herramientas de análisis espacial basadas en SIG y el modelo hidrológico HEC-HMS para la determinación de la escorrentía, y del modelo de erosión MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) para la evaluación de la producción de sedimentos.

La finalidad de la investigación es utilizar ambos modelos para identificar las regiones donde el fenómeno erosivo afecta de mayor manera y a la vez comprobar el proceso degradatorio por pérdida de suelo que generan las crecidas aluvionales, las cuales pueden provocar daños irreversibles en áreas urbanizadas aguas abajo.

En este contexto, el presente trabajo investigativo permite comprender las interrelaciones existentes entre los distintos factores que intervienen en la cuenca y explicar la construcción del riesgo en el ejido urbano seleccionado. En base a la comprensión de este fenómeno se pretende generar recomendaciones para la mitigación de los fenómenos destructivos y de perjuicio para las comunidades involucradas que provocan los fenómenos aluvionales.

1. 1. Objetivos Generales

Evaluar el riesgo espacial de erosión hídrica respecto al pronóstico de la escorrentía y la degradación de los suelos de las cuencas comprendidas en la zona de estudio, usando tecnología SIG.

1. 2. Objetivos Específicos

1. Elaborar mediante SIG, una base de datos georreferenciada, que permita caracterizar cuencas aluvionales, suelos, vegetación, red de drenaje.
2. Integrar el modelo de Precipitaciones Intensas, con un modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentía, para calcular las escorrentías que se originan en las cuencas aluvionales.

3. Estimar los factores intervinientes en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) para la estimación de la erosión hídrica.

4. Combinar la información generada, en un modelo empírico de predicción de producción de sedimentos, que permita obtener la degradación de los suelos de la cuenca aluvional.

5. Obtener el mapa con la tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica para la totalidad de la zona de análisis que permita identificar las áreas más susceptibles a presentar este tipo de problemas.

6. Proponer recomendaciones para mitigar o prevenir dichos procesos, con la finalidad de hacer una contribución al ordenamiento y manejo sustentable de los suelos.

1. 3. Marco Teórico

1. 3. 1. Cuenca Hidrográfica

El autor Aparicio F. (1997), define cuenca de la manera siguiente:

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre, en donde, si fuera completamente impermeable las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. (p. 19)

Sobre la definición el autor aclara que esta “se refiere a una cuenca superficial o hidrográfica; asociada a cada una de éstas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial”. De esto la aclaración de que la definición es solo válida si esta superficie es impermeable.

Vásquez A. (2000), indica que una cuenca hidrográfica es el área natural, delimitada por una divisoria topográfica, que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado cauce principal.

Moreno y Renner (2007), agregan que una cuenca hidrográfica es:

El área de aguas superficiales, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, las cuales confluyen en un curso mayor, que a su vez, puede desembocar a un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente al mar. (parr. 1)

1. 3. 2. Erosión del Suelo

Los autores Hill *et al.* (1998), comentan que la erosión del suelo es un fenómeno que se produce por la interacción entre las características climáticas y la intervención antrópica que tiene como resultado el desequilibrio ecológico que finalmente afecta al suelo. Los autores agregan sobre las causas que producen la erosión del suelo a las prácticas inadecuadas del uso del suelo, como la urbanización, deforestación, impermeabilización de suelos, entre otra.

1. 3. 2. 1. Procesos de la Erosión del Suelo

El autor Morgan R. (1997), explica que el proceso de erosión del suelo es un proceso de tres fases donde, la primera fase se da en el desprendimiento de partículas individuales

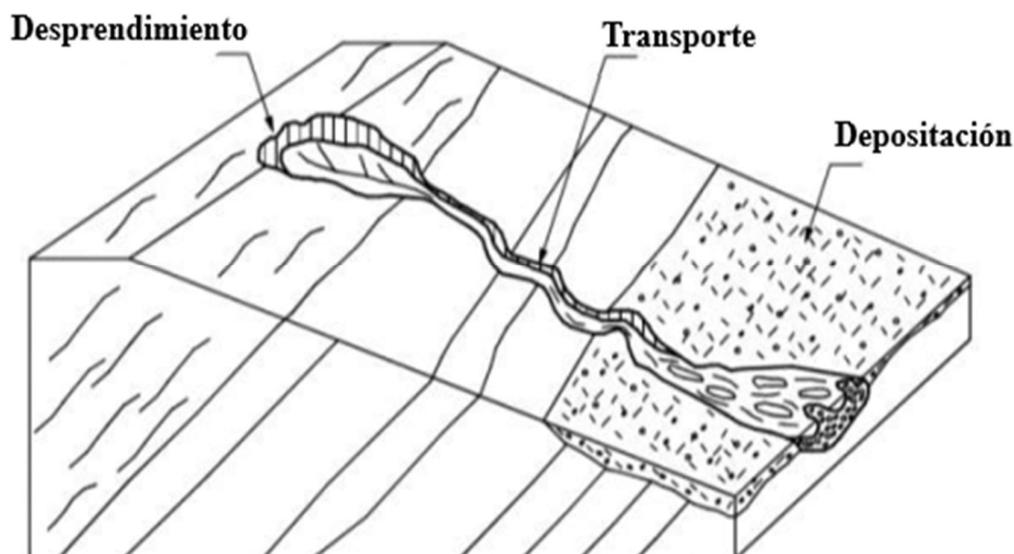
de la masa del suelo, el segundo es la fase de transporte por los agentes erosivos, como las corrientes de agua y el viento, finalmente cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce su deposición.

1. 3. 2. 2. Mecánica de la Erosión del Suelo

El autor Suarez J. (2001), menciona que la mecánica de la erosión incluye tres procesos básicos, los mismos se pueden apreciar en la figura 1 y estos son:

1. Desprendimiento de las partículas.
2. Transporte de las partículas desprendidas.
3. Depósito o sedimentación de materiales de suelo.

Figura 1: Etapas de erosión.



Fuente: Suarez (2001)

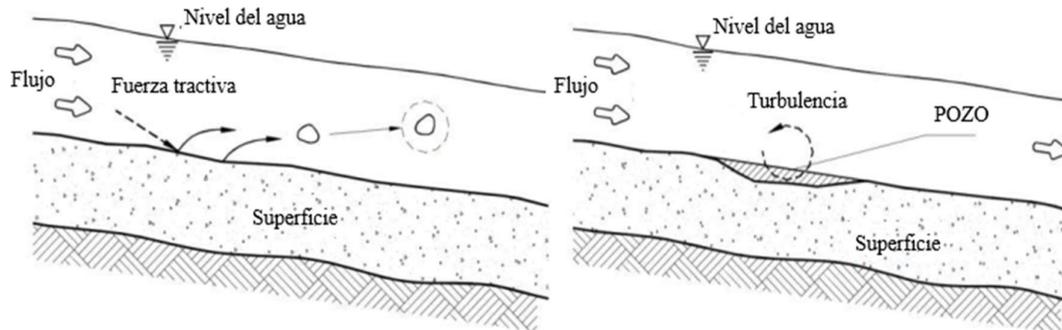
Las fuerzas tractivas, es decir que poseen capacidad de mover los sedimentos, que actúan en la cuenca dependen de la velocidad del agua, su caudal, la turbulencia de la corriente, la forma y rugosidad del canal, y la pérdida de energía por roce con el suelo y la interacción físico – químicas entre las partículas del suelo (figura 2). El control de erosión está dirigido a disminuir la fuerza tractiva y/o aumentar la resistencia del suelo a la erosión (Suarez, 2001).

1. 3. 2. 3. Factores que Influyen en la Erosión

Los autores Greenland y Lal (1975), indican que la erosión puede ser causada por una combinación de factores, como lo son el clima, la cobertura vegetal, la topografía propia de los terrenos, las características propias del suelo y la actividad antrópica. Suarez (2001), explica que la fuerza dinámica del agua y del viento en mientras fluye son las principales

fuerzas que generan erosión superficial, donde la fuerza de gravedad es el principal factor que produce la erosión en masa.

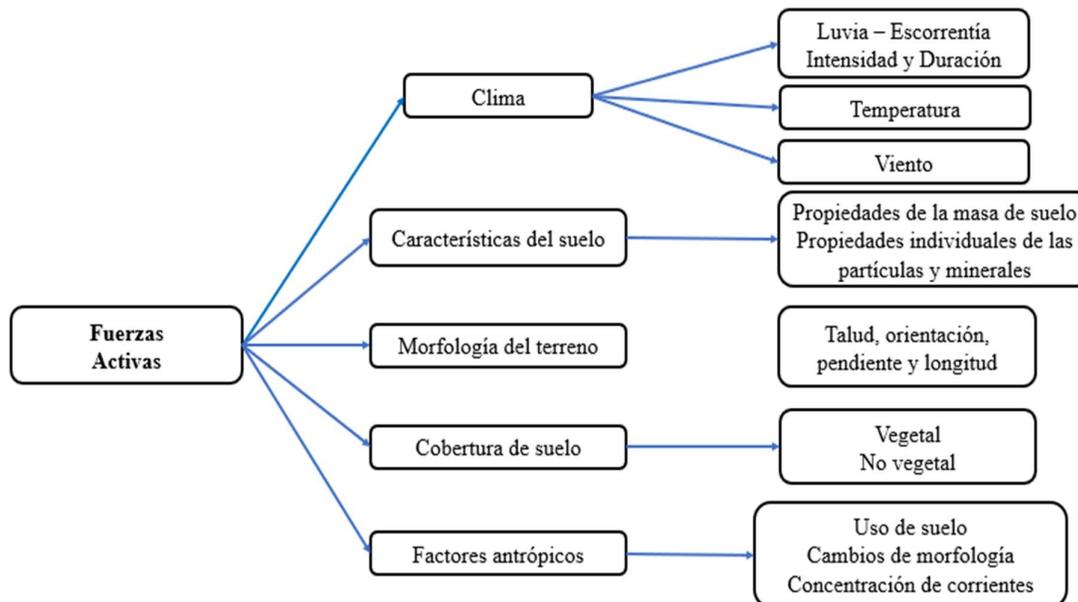
Figura 2: Desprendimiento y arrastre de partícula.



Fuente: Suarez (2001).

Existen cinco factores que intervienen en los procesos erosivos como se puede apreciar en la figura 3, el primero de ellos es el Clima, donde la precipitación, y su energía cinética es descrito como el principal factor que influye en la erosión hídrica.

Figura 3: Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión



Para caracterizar una determinada lluvia es necesario conocer por un lado la cantidad y distribución geográfica de esta, ya que estos dos parámetros indican los períodos críticos en las tormentas con potencial de erosión. Por otro lado, es necesario conocer la intensidad de las precipitaciones, la cual define la energía cinética que desencadena los procesos de desprendimiento y escurrimiento (Cisneros *et al.*, 2012).

El arranque de material suele producirse por el impacto y salpicadura de las gotas de lluvia que llevan energía cinética consigo, mientras que el transporte de partículas está dado por el flujo laminar de agua que se crea en superficie (Dumas Salazar, 2012).

El segundo de los factores que intervienen en los procesos erosivos, son los referentes al suelo, donde la erodabilidad del suelo es una medida de la susceptibilidad al desprendimiento y transporte por los agentes de la erosión, la misma está determinada por los tipos de sustratos que forman el suelo, su textura, permeabilidad y estructura (Cisneros *et al.*, 2012).

El tercero de los factores que intervienen en los procesos erosivos es la topografía, su inclinación y la longitud de la pendiente del terreno juegan un papel importante en el proceso de erosión hídrica, donde es un hecho aceptado que, por lo general, a mayor inclinación y longitud de pendiente suele existir una mayor erosión (Dumas Salazar, 2012).

La vegetación presente en el suelo es el cuarto de los factores que intervienen en los procesos erosivos, la misma si es abundante actúa disminuyendo la erosión, ya que protege y sujeta el suelo, y además atenúa la corriente favoreciendo la sedimentación de las partículas transportadas, donde las actividades de desmonte humanas, quema, sobrepastoreo disminuyen la capa vegetal y acentúan los procesos erosivos (Dumas Salazar, 2012).

Finalmente, un último factor que intervienen en los procesos erosivos es el uso que se le da al suelo, este es un factor primordial condicionante de la erosión ya que modifica las condiciones naturales del suelo, es un factor netamente antrópico y dependerá del tipo de cultivo que se proponga en el suelo (Dumas Salazar, 2012).

1. 3. 3. Erosión Hídrica

La erosión hídrica es un fenómeno natural y lento, sin embargo, debido al uso intensivo de las tierras para fines agrícolas y a su poco adecuado manejo, como consecuencia el proceso erosivo ha sido acelerado (FAO, 1990).

La disgregación, transporte y sedimentación de las partículas se produce como se ha mencionado, por acción de la energía cinética de la gota de lluvia, la escorrentía en movimiento y la Gravedad (Troeh *et al.*, 1991 en Cisneros *et al.*, 2012).

La erosión hídrica es un proceso complejo, multicausal, dinámico, de tipo episódico y sujeto a un conjunto de causas que ocurren en una cuenca hidrográfica (Hill *et al.*, 1998). El fenómeno puede ser estudiado a diferentes escalas de espaciales y temporales. El proceso se da con un grado de probabilidad, determinado por el comportamiento del factor climático y la ocurrencia de tormentas de alta energía, coincidentes con momentos de alta susceptibilidad del suelo y del relieve a la ocurrencia del fenómeno (Cisneros *et al.*, 2012).

1. 3. 4. Principales Formas de Erosión Hídrica

1. 3. 4. 1. Erosión Laminar

La autora D'Amario 2016 citando a Yapur (2010) comenta que la erosión laminar “Implica la remoción de una capa delgada y uniforme de la superficie del terreno que ha sido desprendida por el impacto de las gotas de lluvia y cobra importancia en suelos desnudos con pendientes largas y suaves” (p. 7). Este proceso da como resultado suelos de colores más claros en los sectores más elevados del terreno, dado a que “desaparece la capa superior oscura y rica en materia orgánica y aparece en subsuelo, por lo que quedan expuestas las

fracciones limosas y arcillosas más livianas que son arrastradas y en superficie se observan partículas arenosas y/o gravilla” (p. 7).

1. 3. 4. 2. Erosión en Surcos

El escurrimiento en este proceso comienza con la desagregación en la interfase suelo-agua y continúa con el transporte de las partículas erosionadas, generando pequeños canales de varios centímetros de profundidad (Valdez, 2014). Los autores Cisneros *et al.*, (2012) comentan que “Conforme se incrementan los caudales, la altura del agua y su velocidad, se pasa de un flujo de tipo laminar a uno turbulento, definido por la microtopografía del terreno” (p. 69)

Esta escorrentía en forma de surcos es de naturaleza mayormente turbulenta, tiene más capacidad de desprender y de transportar sedimento que el flujo laminar, con lo cual las tasas de erosión por este mecanismo se incrementan. “La velocidad de avance del surco depende de la cohesividad del material de suelo, la altura del salto de agua en la cabecera del surco, el caudal y velocidad del flujo” (Cisneros *et al.*, 2012, p. 69).

Cabe destacar que la erosión en surco es la predominante en la mayor parte de los suelos, donde su potencial erosivo está controlado por su velocidad, profundidad, turbulencia, el tipo y cantidad del material siendo transportado (Osinaga, 2008). Es más fácil identificar la erosión en surcos que a la erosión laminar, sin embargo, reviste menor gravedad, siendo más fácilmente subsanable mediante labranza (Yapur, 2010).

Todo este proceso erosivo, es acelerado por el hombre, cuando hace un mal manejo del suelo, el ejemplo más claro es el de generar cultivos en dirección de la pendiente, el cual es una práctica común en la zona de Neuquén (Valdez, 2014).

1. 3. 4. 3. Erosión en Cárcavas

Este fenómeno se produce cuando las irregularidades del terreno y el volumen del sedimento permiten la unión de varios surcos, formándose acequias de gran tamaño conocidas como cárcavas (Yapur, 2010). Las cárcavas son zanjas profundas en las laderas, formadas por el movimiento de las partículas en el suelo que penetran incluso hasta el estrato rocoso, cuando en las laderas hay una gran cantidad de cárcavas constituyen un paisaje que se denomina *badlands* o tierras yermas (Valdez, 2010).

Las cárcavas comienzan su evolución mediante un pequeño salto hidráulico, que puede generarse en un quiebre de pendiente, y que produce una cabecera de corte que avanza en forma retrocedente, es decir en dirección contraria al escurrimiento (Yapur, 2010).

Por otra parte, las cárcavas se van ramificando por toda la red de drenaje colectora, generando una red de cárcavas digitada que genera tantas cabeceras activas como vías de drenaje tenga la cuenca (Cisneros, 2010).

Según Fangmeier *et al.*, 2006, la forma y profundidad que adoptan las cárcavas está determinada por el tipo de material del suelo y su grado de cohesión. Para materiales poco cohesivos, la forma tiende a ser en “u”, mientras que para materiales más resistentes la forma típica es en “v”.

1. 3. 4. 4. Erosión por Salpicadura

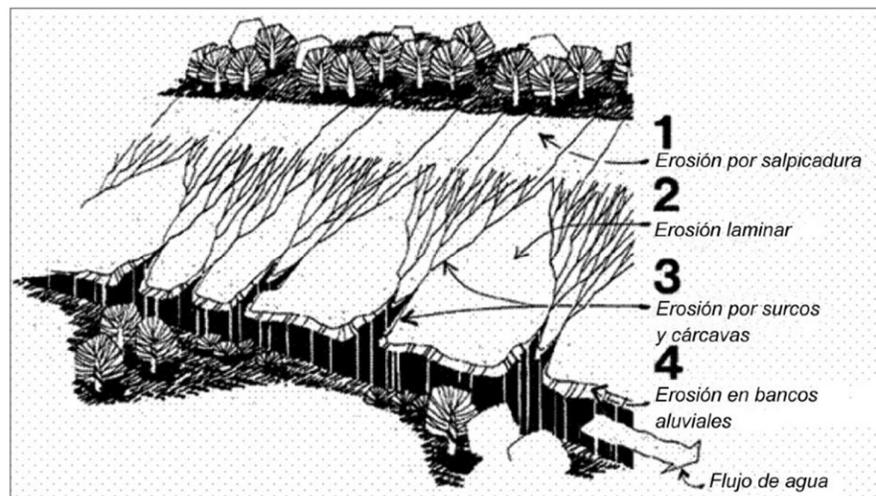
De acuerdo al autor Morgan, 1997, el impacto de las gotas de lluvia sobre los agregados inestables de un suelo sin vegetación u otros produce pequeños agujeros de impacto con liberación de partículas, donde las arenas finas son las más desplazadas. Por lo general este proceso, da origen a una costra superficial la cual disminuye la infiltración. Cisneros *et al.* (2012) mencionan que este proceso “se relaciona directamente con la intensidad y la energía cinética de la lluvia, e inversamente con la estabilidad de los agregados superficiales y la cobertura del suelo” (p. 68).

La presencia de vegetación arbórea puede incrementar este tipo de erosión en suelo descubierto por la formación de gotas más grandes a partir del flujo de hojas (Morgan y Rickson, 1995).

Algunos autores denominan *sheet erosion* a la combinación de erosión por salpicadura y erosión laminar (Troeh *et al.*, 1991), mientras que otros denominan a esta combinación como *interrill erosion* (Fangmeier *et al.* , 2006).

Los 4 tipos de erosiones descritas se pueden ver en la figura 4.

Figura 4: Formas de Erosión Hídrica.



Fuente: Cisneros *et al.* (2012)

1. 3. 5. Efectos de la erosión hídrica

Durante el intervalo de una tormenta de corta duración y gran intensidad, la erosión hídrica y la escorrentía tienen consecuencias en el lugar donde se produce como fuera de él (D'Amario, 2016). La pérdida del suelo por desprendimiento, la disminución de materia orgánica y la pérdida de la estructura del suelo son efectos de la erosión hídrica, lo que de manera indirecta produce una reducción de las condiciones de fertilidad del suelo y de la capacidad de retención del agua y en última instancia la reducción de la cobertura vegetal (Ocampo *et al.*, 1996).

1. 3. 6. Control de la Erosión Hídrica

Como ya se mencionó en los incisos anteriores, la erosión hídrica genera la pérdida del suelo que contiene la mayor parte de la fertilidad. Por lo tanto, es necesario controlarla mediante prácticas de cultivo y producción que preserven y mejoren el estado del suelo y que eviten el impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento. La erosión se controla disminuyendo la erosividad de los agentes erosivos y la susceptibilidad del suelo a la erosión. En la práctica, se observa que las principales formas de controlar la erosividad son protegiendo el suelo mediante cobertura vegetal, y disminuyendo el desmonte, reduciendo el volumen y pico del escurrimiento, reduciendo la longitud y magnitud de la pendiente, incrementando la rugosidad superficial (D'Amario, 2016).

La susceptibilidad a la erosión hídrica debido a la actividad humana puede reducirse mejorando el manejo del suelo, a través de la incorporación de rastrojo y produciendo rotaciones con pasturas, además el cultivo en desniveles, las terrazas, las represas de amortiguación y las labranzas conservacionistas son prácticas estructurales que pueden disminuir la susceptibilidad a la erosión hídrica. Estas prácticas estructurales son efectivas en el control y manejo del escurrimiento (Cisneros, 2010).

1. 3. 7. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica puede ser entendido como lo define el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, como:

un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Los SIG son una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial, y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato. (p. 108)

Es decir, estos sistemas fueron diseñados para trabajar con datos referenciados en coordenadas espaciales o geográficas. Un mapa, por ejemplo, es una colección de datos almacenados y analizados de forma geográfica, por lo que un mapa puede ser utilizado como una herramienta SIG, siempre y cuando esté georreferenciado.

Hay cinco elementos esenciales que debe contener un SIG: adquisición de datos, preprocesamiento, manejo, manipulación y análisis. A partir de estos 5 elementos tiene que ser capaz de generar un producto. Al contrario de lo que sucede con mapas tradicionales, los mapas SIG cambian dinámicamente en la medida que los datos alfanuméricos son actualizados. Finalmente, una ventaja importante de la utilización de una herramienta SIG, sería el ahorro considerable de tiempo, costo y mano de obra para realizar un estudio. (Núñez, 2012).

En un SIG se hace referencia a los datos espaciales como a un estrato de datos o mapa. Los estratos de datos pueden contener tres tipos básicos de entidades geométricas para codificar estos son puntos, líneas y polígonos (Núñez, 2012).

Las herramientas SIG se pueden utilizar para numerosas finalidades, tales como determinar la escorrentía y evaluar la producción de sedimentos por erosión hídrica, mediante la manipulación de las variables y estudiar una cuenca para distintas escalas y sus efectos en la exactitud de la predicción del modelo. Posibilita la integración de fuentes

diversas como elementos cartográficos, datos estadísticos, planillas de cálculo e imágenes satelitales (Zhou et al., 2008).

En resumen, los Sistemas de Información Geográficas son una herramienta de suma importancia para el análisis, el diseño, la modelización e implementación de planes de manejo. El carácter multidisciplinario de estas aplicaciones permite elaborar una gran variedad de modelos que representen tanto situaciones actuales como futuras, enriqueciendo así la gestión y toma de decisiones.

2. Antecedentes

2. 1. Neuquén

La ciudad de Neuquén Capital se encuentra ubicada en los 38°57' 10" de altitud sur y los 68°03' 10" de longitud oeste, sobre la confluencia de los valles de los ríos Limay y Neuquén. El Sitio Piloto de estudio se sitúa en el noreste de la ciudad de Neuquén, departamento Confluencia, abarcando los barrios Los Olivos, Santa Angela III y Colonia Nueva España.

Como se ha mencionado con anterioridad, la ciudad de Neuquén, capital de la provincia homónima, se ha caracterizado en las últimas décadas por un importante crecimiento poblacional, constituyendo en la actualidad la localidad más poblada de la Patagonia Argentina. Esta expansión, de acuerdo con Torrens *et al.* (2015), se ha concentrado principalmente hacia el oeste y el norte, sectores que hoy representan las zonas socioeconómicamente más vulnerables de la ciudad.

A esto se suma el hecho de que la ciudad de Neuquén ya ha sido escenario de importantes inundaciones que afectaron, en gran medida, a los pobladores de las áreas próximas a la meseta (Jurio y Torrens, 2015).

La preocupación ante los peligros naturales y sus consecuencias en la zona de bardas de la ciudad data ya de algunas décadas, quedando reflejada en el trabajo realizado por Capua *et al.* (1999), cuyo estudio sobre la problemática del barrio Bardas Soleadas surge por la preocupación de los habitantes del lugar por los continuos problemas que los afectan asociados a la dinámica del ambiente. En este trabajo también se pone de manifiesto el problema que tiene la ciudad de Neuquén con respecto a la escorrentía superficial cuando se generan lluvias torrenciales, lo que puede desencadenar en una amenaza hídrica.

Años posteriores, Rapacioli (2007), en su Tesis de Maestría en Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano, analiza la problemática aluvional en el desarrollo urbano de la región del alto valle del Río Negro con el objetivo de predecir la escorrentía y la degradación de los suelos de las cuencas aluvionales de la zona, generando insumos para la planificación de la corrección y manejo de las mismas.

En consecuencia, Jurio y Torrens (2015), llevan a cabo un trabajo en conjunto, donde se puede visualizar el crecimiento poblacional de la ciudad de Neuquén desde 1967 hasta 2014, concluyendo que los sectores de mayor afectación coinciden con los indicados en estudios previos como de riesgo ambiental producto de la construcción de viviendas en sitios de peligro natural. Las autoras pudieron afirmar que el crecimiento urbano desordenado, la falta de obras de mitigación y el rol de los gobiernos han llevado a la construcción de vulnerabilidades y a la generación de situaciones de riesgo ambiental que terminaron en un desastre con graves daños en viviendas, infraestructura de servicios, calles y un significativo número de personas evacuadas.

Torrens *et al.* (2015), en su trabajo "Problemáticas ambientales derivadas de la expansión urbana", recalcan que la ciudad de Neuquén se presenta como una de las más problemáticas de la región producto, en parte, de la intensidad del crecimiento poblacional registrado en las últimas décadas. Este crecimiento, según las autoras, se tradujo en una expansión desordenada, provocando irregularidades en la demanda de tierras y la ocupación de espacios no adecuados para urbanizar, generando situaciones de riesgo ambiental.

Además, hacen mención, que la aplicación de tecnología SIG constituye una valiosa herramienta para los estudios ambientales.

2. 2. Zona de estudio

En la zona de análisis la problemática asociada a la erosión hídrica se materializó con la tormenta ocurrida en el mes de abril de 2014. Sus efectos generaron una fuerte conmoción en las autoridades de planificación y gestión, que tuvieron que actuar de emergencia, así como también en la población afectada que tomó conciencia de su situación de vulnerabilidad. Con el transcurso de las horas esta lluvia torrencial provocó que la colonia Nueva España quedará completamente inundada. En octubre de 2016, una tormenta volvió a causar desastres en el asentamiento Nueva España, el agua acumulada en superficie bajó violentamente desde un cañadón en la calle Los Olmos y comenzó a socavar la calzada. Esto dejó al desnudo las deficientes, y en muchos casos inexistentes, obras de desagüe pluvioaluvionales y obras de mitigación

Tanto en Neuquén como en zonas aledañas a la zona de análisis, se han llevado a cabo numerosos trabajos técnicos y científicos realizados por docentes del Departamento de Geografía y Departamento de ingeniería de la Universidad del Comahue.

Sin embargo, en el área elegida para el presente trabajo final de licenciatura no se hallaron antecedentes de estudios previos. En función de lo expuesto y en vista de la urbanización que continúa desarrollándose sobre la meseta en este sector de la ciudad, se propone la realización de un estudio de riesgo de erosión hídrica.

3. Características del Área de Estudio

3.1. Ubicación

La ciudad de Neuquén Capital se encuentra ubicada en los $38^{\circ}57'10''$ de altitud sur y los $68^{\circ}03'10''$ de longitud oeste, sobre la confluencia de los valles de los Ríos Limay y Neuquén.

El Sitio Piloto de estudio se sitúa en el noreste de la ciudad de Neuquén, departamento Confluencia, abarcando los barrios Los Olivos, Santa Angela III y Colonia Nueva España (Figura 5).

Figura 5: Mapa de la República Argentina. B. Mapa de la provincia del Neuquén. C. Mapa de cuencas y red de drenaje del área de estudio

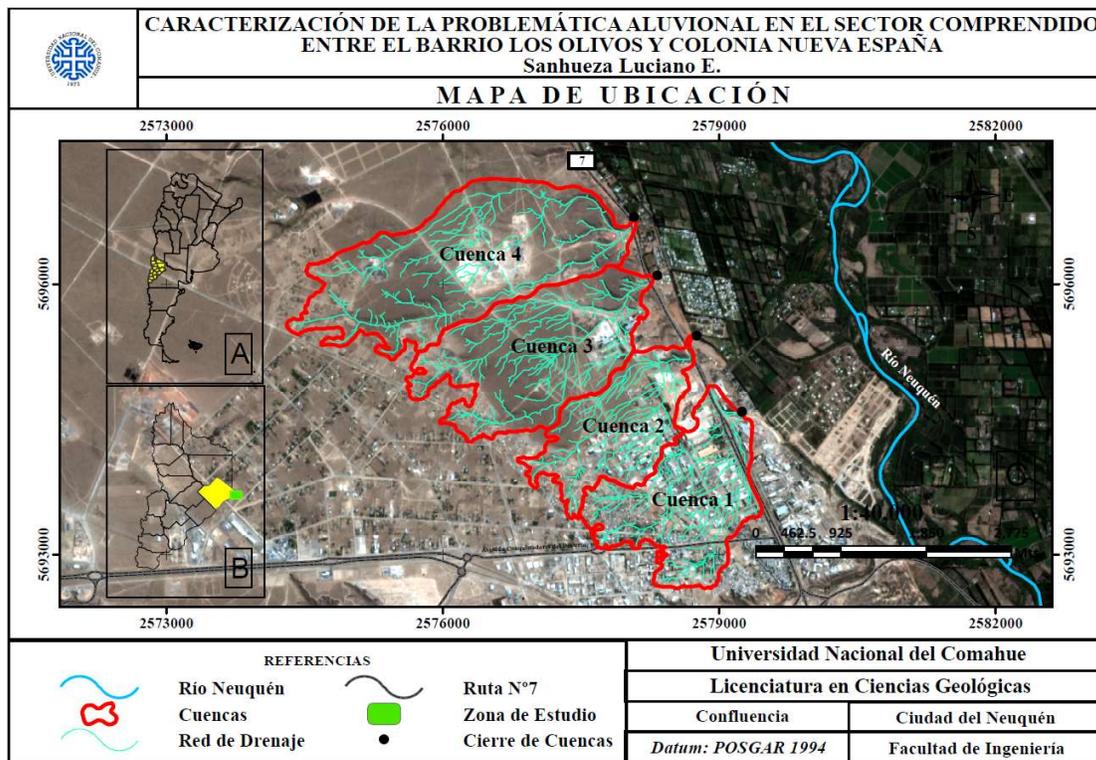


Figura 6: Zona en estudio.



3. 2. Estratigrafía

Los depósitos aflorantes en la zona de estudio pertenecen a la formación Bajo de la Carpa, la formación Anacleto, Depósitos Aterrazados del Pleistoceno y Depósitos aluviales holocenos.

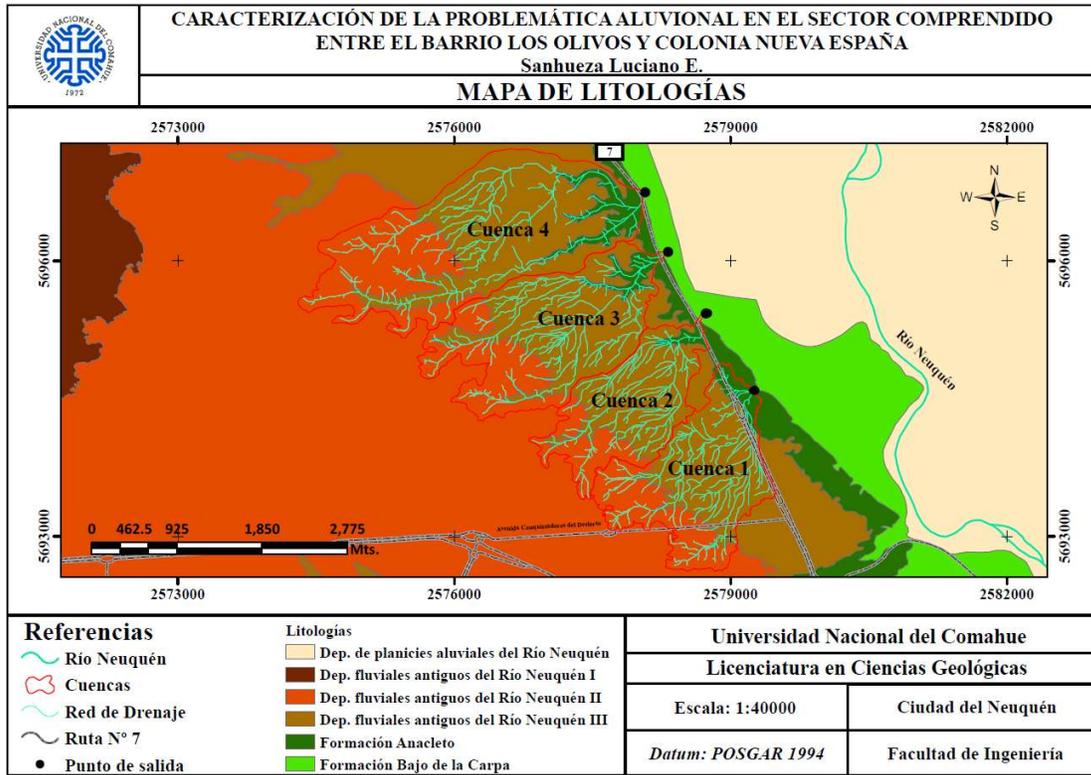
Según Cazua y Uliana (1973), durante el Cretácico Superior se desarrollaron en la cuenca un denso paquete de sedimentitas fluviales correspondientes al Ciclo Neuqueniano.

Estos depósitos de gran espesor incluyen a las Formaciones Candeleros, Huinca, Lisandro, Portezuelo, Plottier, Bajo de la Carpa y Anacleto (Garrido, 2005).

Dentro del área de estudio, las unidades litoestratigráficas de mayor relevancia se encuentran representadas por los depósitos continentales del Cretácico Superior e integrantes del Grupo Neuquén, mencionadas anteriormente, factor por el cual le daremos especial atención a las Formaciones Bajo de la Carpa y Anacleto, como se puede apreciar en la figura 7.

El grupo Neuquén denominado por Stipanovic *et al.* (1968), comprende una monótona sucesión compuesta por sedimentos clásticos de naturaleza continental de edad Cenomaniano (99, 6 Ma) a Campaniano Medio (76 Ma) (Cruz *et al.*, 1989). Constituyendo los afloramientos de mayor distribución areal dentro del área extra-andina (Cazau y Uliana, 1973).

Figura 7: Mapa litológico de la zona de estudio



Según Ramos (1981), el mencionado grupo se compone de siete formaciones integradas en orden ascendentes por las Formaciones Candeleros, Huincul agrupadas a su vez dentro del Subgrupo Río Limay; Formaciones Cerro Lisandro, Portezuelo, Plottier encasilladas dentro del Subgrupo Río Neuquén; y Formaciones Bajo de la Carpa y Anacleto formando parte del Subgrupo Río Colorado. Estos subgrupos representan tres grandes ciclos granodecrecientes (Garrido, 2000).

Los depósitos aflorantes en la zona de estudio pertenecen al Subgrupo Río Colorado. Según Garrido (2005), la Formación Bajo de la Carpa (Herrero Ducloux, 1938) de edad santoniana (Hugo y Leanza, 2001), indica un nuevo rejuvenecimiento de la red y el inicio del Subgrupo. Esta unidad ha sido depositada por ríos de alta a moderada sinuosidad y de abundante carga de lecho arenosa (Garrido, 2005). En el área analizada la unidad se compone de areniscas rojizas y castañas; el tamaño de grano es mediano a grueso. En algunos sectores también se pudo observar intercalaciones de fangolitas rojizas de escaso espesor.

La Formación Anacleto (Herrero Ducloux, 1938) de edad Campaniano Inferior (Leanza, 1999) se apoya de forma transicional sobre la Formación Bajo de la Carpa. La misma representa una variedad de ambientes depositacionales, que gradan desde sistemas fluviales de tipo entrelazado arenoso a meandroso de carga fangosa (Garrido, 2005). A esto se debe la diversidad de textura y composición en el área analizada. Los afloramientos más resaltantes en el sector son de tonalidades rojo ladrillo. La sucesión comienza con pelitas rojas, que gradan a pelitas de tonalidades verde grisáceas. Luego se observa un paquete arenoso donde la parte inferior se encuentra cementado, mientras que la superior esta sin cementar. La secuencia culmina con un nivel de pelitas rojas de escaso espesor.

Suprayaciendo la Formación Anacleto en contacto erosivo, se observa un denso paquete de ortoconglomerados polimícticos sin cemento calcáreo que según Heredia y Calvo (2002) lo adjudican como “Estratos Terciarios del Oligoceno - Mioceno”. Coronando estos

depósitos conglomerádicos, se puede distinguir otro paquete conglomerádico petrocálcico, el cual presenta tres ciclos granodecreciente que puede dar indicios de la energía del sistema en el momento de ser depositado, nuevamente Heredia y Calvo (2002) analizan esta unidad, describiéndolas como Formación Bayo Mesa (Uliana, 1979) de edad plio-pleistocena (Franchi *et al.* 1984; Ardolino *et al.* 1996).

Sin embargo, Garrido (2005) mediante observaciones y datos recogidos arriba a conclusiones distintas a la de estos autores, proponiendo distintas asignaciones, edades y correlaciones de las últimas dos unidades litoestratigráficas. Definiéndolos como Depósitos Aterrazados del Pleistoceno Medio. Basado en los datos de campo recolectados y antecedentes bibliográficos abordados, en este trabajo se va a referir a estos dos paquetes sedimentarios como Depósitos Aterrazados del Pleistoceno coincidiendo con la denominación asignada por Garrido (2005).

Completan el cuadro litoestratigráfico del área depósitos aluviales holocenos, vinculados al relleno del valle del Río Neuquén. Estos depósitos se componen mayormente por conglomerados polimícticos y areniscas gravosas a medianas. La localización del perfil geológico obtenido se ilustra en la figura 15.

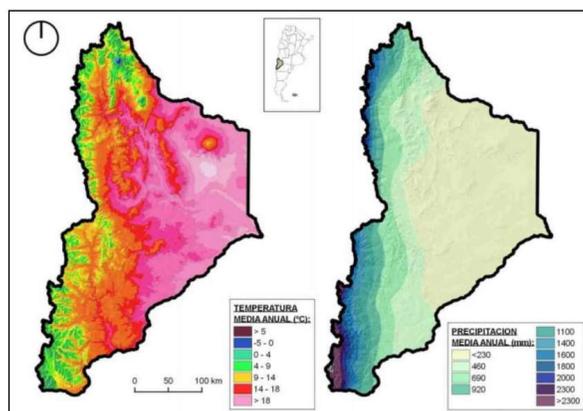
3. 3. Estructura

El principal lineamiento estructural de subsuelo que afecta el área a nivel regional corresponde a la denominada “Dorsal de Huincul” (Bracaccini, 1970) o “Falla de Huincul” (Orchuela *et al.*, 1981), la cual a nivel local no tiene ningún tipo de relevancia. Es por este motivo, que en la zona de análisis se observa escasa deformación de la cubierta sedimentaria (Garrido, 2005). En campo no se distinguió ningún rasgo superficial que indique la presencia de una falla.

3. 4. Clima

La zona de estudio (figura 5) se caracteriza por un clima continental, templado y árido, se clasifica como árido mesotermal según Thornthwaite (1948), con una precipitación media anual de 188 mm y heladas primaverales. Las precipitaciones son de origen convectivo, caracterizándose por su gran intensidad, corta duración y escasa cobertura areal, concentrándose entre los meses de octubre a marzo (Rapacioli, 2007; Marizza *et al.*, 2010).

Figura 8: Temperatura media anual (°C) y precipitación media anual (mm).



Fuente: Mugerza *et al.*, 2015; Acuña, 2021

También se suelen producir esporádicas lluvias estivales de carácter torrencial de corta duración, sumado a una elevada evapotranspiración (Dufilho *et al.*, 2001; Rapacioli, 2007). El proceso de evaporación es marcado durante el mes de enero con valores medios de 7 mm/día. El viento agudiza aún más la sequedad del ambiente, tanto por su intensidad como por su persistencia especialmente en primavera y en verano, con una dirección predominante oeste y suroeste. La pérdida de agua por evaporación al año alcanza un total de aproximadamente 1.350 mm. Por ende, el balance hídrico muestra déficit de agua durante casi todo el año (Apcarian *et al.*, 2011).

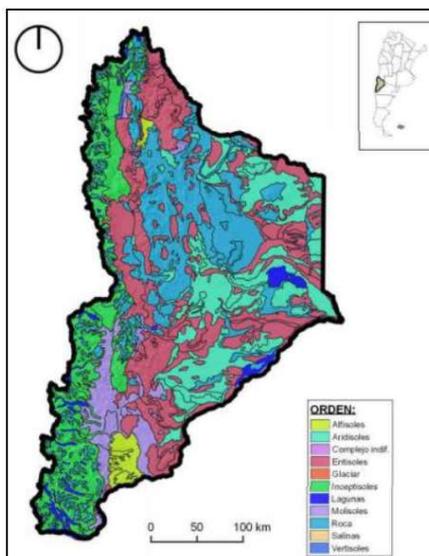
El mes más caluroso es enero con temperaturas medias de 23 °C y máximas medias de 32°C. Durante el mes de julio la temperatura media es de 6,4 °C con una máxima media de 13,4 °C, siendo este el mes más frío de la zona. El régimen hídrico del suelo, según Taxonomía de Suelos es arídico y el de temperatura es térmico. Las precipitaciones intensas y esporádicas de tipo convectivas en la estación estival, suelen en determinadas situaciones generar inundaciones por la baja capacidad de infiltración del suelo cuando son muy intensas y ocurren en poco tiempo.

Regionalmente uno de los fenómenos más trascendentes que genera el déficit hídrico de la zona, es el efecto orográfico que se produce cuando los vientos húmedos del oeste descargan la humedad como intensas precipitaciones en una zona comparativamente angosta, solo extendiéndose algo hacia el este (Pereyra *et al.*, 2011). Así, en la zona aledaña al límite internacional, las precipitaciones alcanzan los 2500-3500 mm anuales. Mientras que hacia el este las precipitaciones disminuyen hasta valores del orden de los 188 mm en sentido O-E.

3.5. Suelos y usos de Suelos

Los suelos de la zona de estudio (figura 9) son de baja meteorización, son de origen coluvional, las texturas presentes oscilan entre arenosas a franco limosas, escasos en materia orgánica (<1%), con velocidad de infiltración media a alta y con un perfil profundo, sin gran desarrollo edáfico (Rapacioli, 2007; Marizza *et al.*, 2010).

Figura 9: Suelos de la provincia del Neuquén.



Fuente: Ferrer *et al.*, 1990; Acuña, 2021

Los suelos dominantes en el sector son Petrocalcides, caracterizados por poseer un horizonte petrocálcico dentro de los 1, 20 m del tramo superior que disminuye su permeabilidad.

También en algunos sectores de la zona de estudio se pueden encontrar suelos del tipo Entisoles. Tanto los suelos del tipo Aridisoles como los Entisoles presentan un balance hídrico negativo.

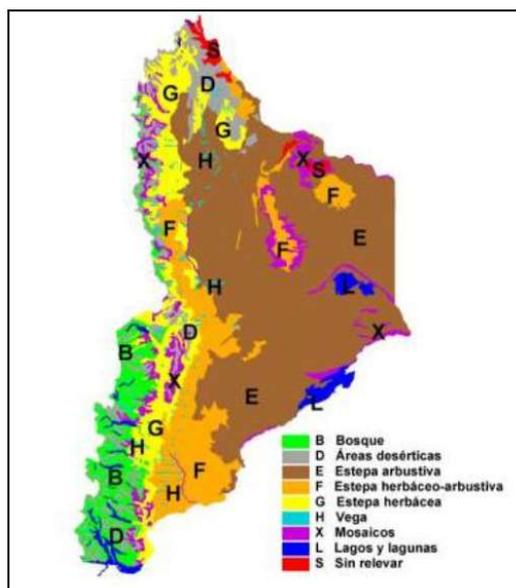
El uso del suelo en la Colonia Nueva España es de tipo residencial, mientras que en los barrios Los Olivos y Santa Angela III, el principal uso que se le daba a los suelos era con fines agrícolas, sin embargo, los espacios que se utilizaban para la industria frutícola, en el día de hoy se encuentran acondicionados para la venta, como consecuencia de los altos precios y la alta demanda de terrenos. Aumentando aún más la exposición a los riesgos hídricos.

3. 6. Vegetación

La vegetación natural en la zona de análisis, según la bibliografía regional pertenece a la Provincia Fitogeográfica del Monte (Cabrera, 1976).

El tipo de vegetación característico de la zona de análisis (figura 10), es la estepa arbustiva xerófila (Cabrera, 1951). Las distintas especies de arbustos y hierbas presentan variadas adaptaciones a las condiciones de déficit hídrico. Además de las tres especies de jarillas presentes (jarilla macho, *Larrea cuneifolia*; jarilla hembra, *L. divaricata*; jarilla de río, *L. nítida*), son características de la ecorregión del Monte la zampa (*Atriplex lampa*), el alpataco (*Prosopis alpataco*), molle (*Schinus sp*), matasebo (*Monttea aphylla*), coirón (*Festuca pallescens*), chañar brea (*Cercidium praecox*) y retamillo (*Neosparton aphyllum*), con raíces profundas, hojas reducidas y en algunos casos, espinas (Apcarian *et al.* , 2002; Ferrer *et al.* , 2006).

Figura 10: Vegetación característica de la provincia del Neuquén.



Fuente: Ayesa *et al.* 2002; Acuña 2021

3. 7. Hidrología

Como se mencionó anteriormente, el sector de meseta de la zona de estudio se caracteriza por lluvias estivales torrenciales. El régimen hidrológico natural, se caracteriza por poseer doble onda de crecida anual. La primera de ellas se da en época invernal (mayo-agosto), lapso en que se producen en la cuenca entre el 80 al 90% del total de las precipitaciones. La segunda onda de crecida, habitual hacia fines de la primavera (noviembre-diciembre), tiene origen fundamentalmente en la fusión de la nieve acumulada. Estas crecidas primaverales tardías se caracterizan por resultar moderadas que las invernales. Los estiajes (caudales mínimos) son habituales en el comienzo del otoño (marzo-abril).

La erosión hídrica, quizás la más sencilla de identificar y en la que en este trabajo se hace mucho hincapié, se denota en el terreno con la formación de cárcavas en el frente de barda, las que se activan aún más en períodos de lluvias torrenciales. En el sector de Nueva España, gran parte de sus habitantes se han asentado en estas cárcavas o en la parte inferior de las mismas, generando la mayor situación de riesgo frente a la amenaza de desmoronamiento y/o transporte de materiales que se activa por las lluvias esporádicas y de alta intensidad de la región.

3. 8. Población, viviendas y acción antrópica de los barrios incluidos en la zona de estudio.

Según la recopilación de viviendas que se hizo en la Colonia Nueva España y con la ayuda de un vecino de la Colonia, se contabilizaron 192 viviendas habitadas por 786 personas. Con respecto a los otros dos barrios de características privadas, se tiene el registro que el Barrio Santa Angela III tiene 438 viviendas habitadas por 1645 personas y el Barrio Los Olivos tiene 136 viviendas habitadas por 544 personas.

Siendo Santa Angela III el más poblado, sin embargo, el que presenta el mayor índice de hacinamiento por persona, es la Colonia Nueva España.

Con respecto a la condición de actividad de la población allí asentada, más de dos tercios de los habitantes de la Colonia Nueva España se encuentran desocupados o son económicamente inactivos, mientras que en los Barrios Santa Angela III y Los Olivos como mínimo una persona por hogar tiene ingresos permanentes procedentes de un empleo a tiempo completo.

En los “escalones” que se encuentran aguas arriba, existe parte de lo que hoy en día se conoce como “Parque Industrial”, en este sector las empresas eliminaron la cobertura vegetal original, con el fin de construir galpones y calles. Esta acción favorece tanto a la erosión hídrica, como a la erosión eólica, ya que facilita el arrastre de partículas sueltas. Si bien la erosión hídrica es un proceso que se genera naturalmente, la acción humana genera la aceleración en los tiempos de dicho proceso (Chaves, 2020).

En la Colonia Nueva España es habitual encontrar las cárcavas rellenas con material no consolidado y basura, arrojada allí por la sociedad. Esta acción, lejos de detener el retroceso de la cárcava no hace más que aportar más material para transportar y mayor capacidad de erosionar en los momentos de intensas lluvias.

4. Desarrollo del Estudio

Enfoque Metodológico

La metodología utilizada para determinar la producción de sedimentos del área de estudio consiste en integrar el modelo hidrológico HEC-HMS (USACE, 2015), para la determinación de la escorrentía y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) adoptado por Williams (1975) para la evaluación de la producción de sedimentos por erosión hídrica, en el entorno del SIG. Esta última permite estimar la pérdida de suelo generada a partir de un evento de precipitación de corta duración, pero de alta intensidad. La cual expresa la producción de sedimentos en función del máximo caudal instantáneo (QTR) y del volumen de escorrentía (VTR) que se produce en una tormenta.

Esta metodología se aplicó sobre el área de estudio, comprendida entre el Barrio Los Olmos y Colonia Nueva España, Departamento Confluencia de la Ciudad del Neuquén. Se dispuso del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Argentina tiene disponible (formatos grid 5 m de resolución, coordenadas geográficas con datum WGS84), se hizo la proyección al sistema oficial de proyección plana POSGAR 94-Faja 2; y los mapas georreferenciados de la región en estudio. Todo el procedimiento se realizó con el software ARCGIS 10. 5.

Clasificación Supervisada

Todas las clasificaciones realizadas en este trabajo tienen un previo conocimiento de la zona de estudio mediante trabajo de campo y recopilación de antecedentes. Esta clasificación se denomina clasificación supervisada (Rapacioli, 2007), la misma precisa de dos fases para obtener un resultado satisfactorio.

1. Fase de entrenamiento: consiste en mostrarle al clasificador (software) las áreas de cada una de las categorías (muestras) que se pretende discriminar una vez que ésta haya sido identificada. Luego se crean las firmas espectrales de esas muestras que serán utilizadas en la clasificación.

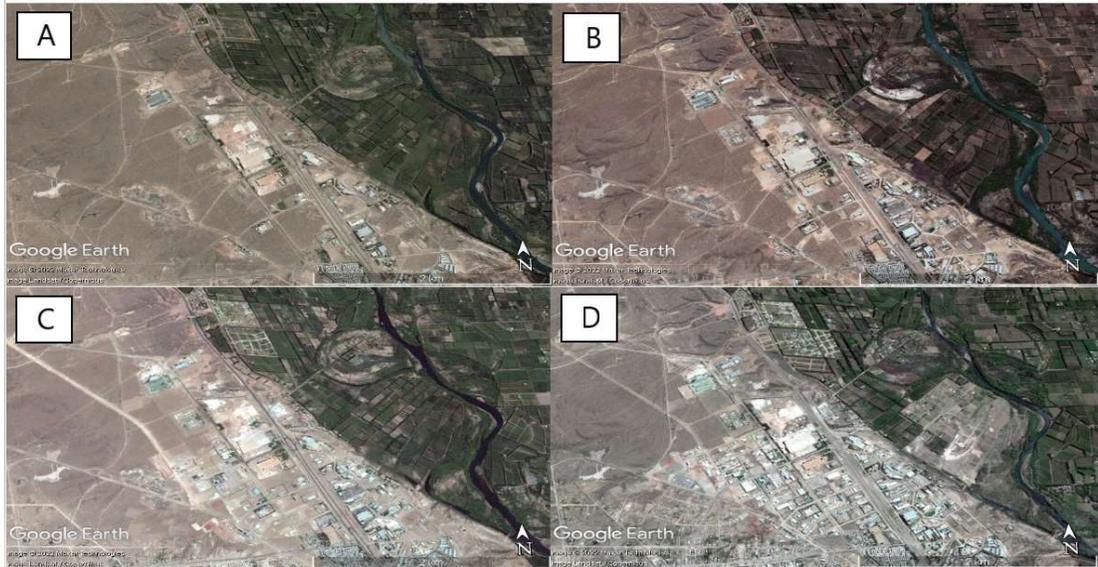
2. Fase de asignación: asigna a cada píxel de la imagen a una de las categorías definidas en la fase de entrenamiento.

4. 1. Estudio de Imágenes Satelitales y Fotografías Aéreas

Recopilación de imágenes satelitales Sentinel-2 con resolución espacial de 10 m para las bandas 2, 3, 4 y 8 (Servicio Geológico de los Estados Unidos [USGS]).

Imágenes satelitales históricas (figura 11) y actuales de Google Earth Pro. Imágenes satelitales ESRI Satellite actuales, disponibles a través de la herramienta Add Basemap de ArcGIS. Análisis del material y elaboración de mapas en ArcGIS versión 10. 5. Toda la información digital fue proyectada al sistema POSGAR 94 Zona 2.

Figura 11: Imágenes satelitales históricas Google Earth Pro del área de estudio de los años 2003 (A); 2006 (B); 2010 (C); 2015 (D)

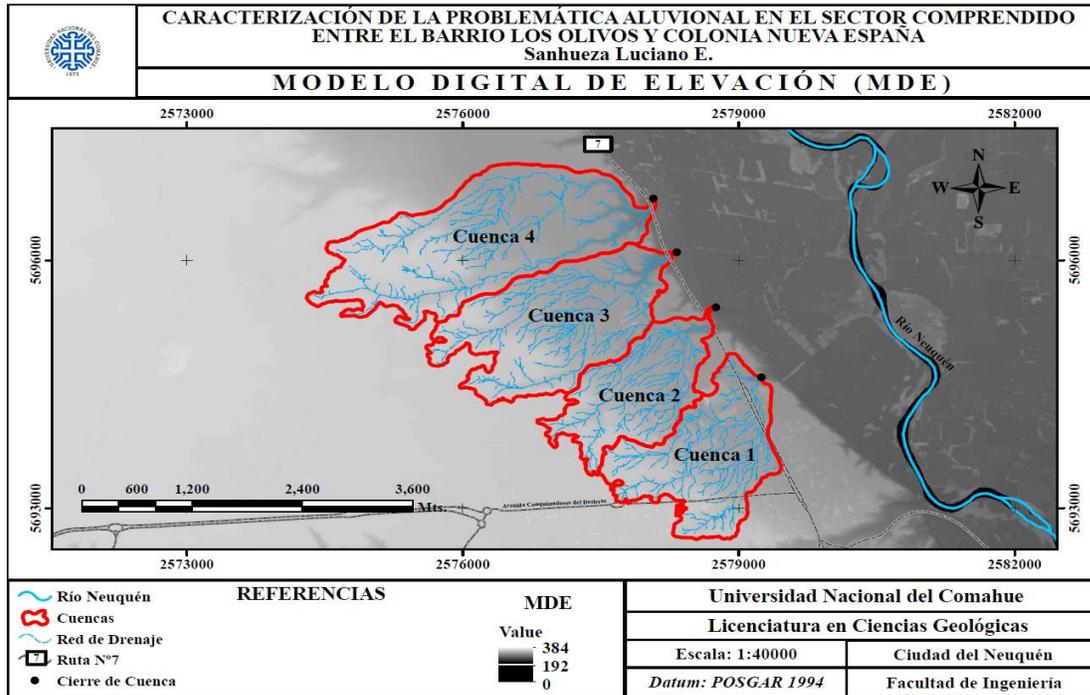


4. 2. Preparación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Para empezar con la elaboración de mapas temáticos a partir del MDE, primero se tienen que hacer una serie de correcciones. El MDE modificado se realizó a partir del Modelo Digital de Elevación con resolución espacial 5 m del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Por lo general, los MDE suelen presentar pequeñas imperfecciones en los datos, estas imperfecciones son conocidas como sumideros, un sumidero es una celda con una dirección de drenaje indefinida y las celdas que lo rodean son más bajas. Para corregirlo se utiliza la herramienta 'Fill' de ArcGIS 10. 5, el resultado se puede apreciar en la figura 12.

Figura 12: MDE de la zona de estudio modificado

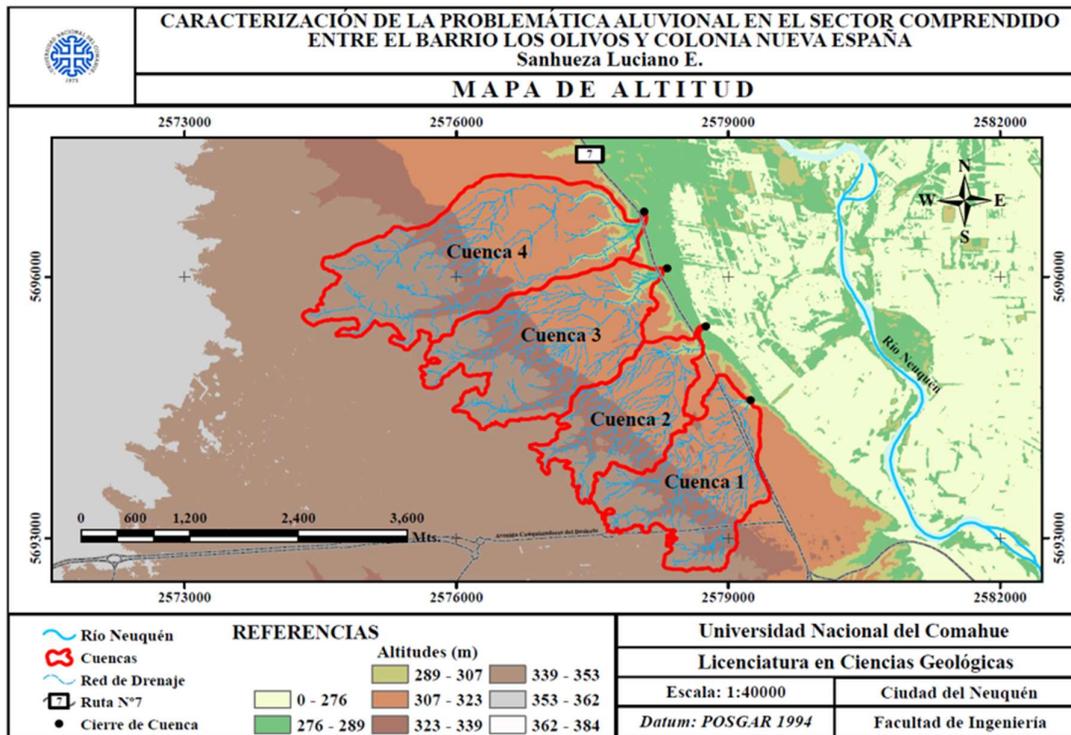


El límite z especifica la diferencia máxima permitida entre la profundidad de un sumidero y el punto de fluidez y determina qué sumideros se rellenarán y cuáles permanecerán intactos. Todos los sumideros que se encuentren por debajo del límite z y en una posición más baja que la del vecino adyacente más bajo, se rellenarán a la altura de los puntos de fluidez.

Luego se procede a la unión de los ráster involucrados en el área de estudio, lo cual se hace con la herramienta 'Mosaic To New Raster' de ArcGIS 10. 5, la misma permite tener un único ráster de salida a partir de varios ráster de entrada. En esta etapa es crucial tener en cuenta que los raster individuales de entradas deben tener el mismo número de bandas y la misma profundidad de bits.

Para finalizar la etapa de preparación se procede a definir un sistema de coordenadas al MDE mediante la herramienta 'Project Raster' de ArcGIS 10. 5, donde en el presente trabajo la información fue proyectada al sistema POSGAR 94 Zona 2, el resultado final se puede apreciar en la figura 13, donde se puede apreciar el mapa de altitud considerando la zona de estudio.

Figura 13: Mapa de altitudes de la zona de estudio



4.3. Delimitación de cuencas y definición de la red de drenaje

Con el objetivo de determinar las características aluvionales de las cuencas que afectan la zona de estudio y adoptando el MDE modificado se procede a la delimitación de cuencas y a definir la red de drenaje.

A partir de la aplicación de las herramientas de *ArcToolbox* (ArcGIS) y en particular la extensión *Spatial Analyst*, se delimitaron las cuencas aluvionales y sus respectivas redes de drenaje, desarrollando en este proceso las siguientes acciones:

- Mediante la herramienta '*Flow Direction*' se determina la Dirección de Flujo, identificando hacia donde fluye cada celda.
- Luego con '*Flow Accumulation*' se calcula la Acumulación del Flujo, en este paso el software identifica las celdas de corrientes, señalando aquellas celdas con un valor de acumulación de flujo superior a un cierto umbral definido.
- Posteriormente, se genera la identificación del punto de salida más representativo mediante la herramienta '*Snap Pour Point*'.
- Por último, se genera delimitación de las cuencas para cada punto de salida con la herramienta '*watershed*', esta herramienta brinda un *raster* de salida. Para poder obtener las cuencas en formato vectorial, debemos recurrir a la herramienta '*Raster to Polygon*'.

Realizada esta primera estimación de la red de drenaje y las subcuencas con el uso del software, se efectuó un reajuste manual basado en un análisis visual de imágenes satelitales de la zona de estudio. Se realizó un trazado de la red de drenaje más suave y detallado, debido a que el uso del software para la determinación de la misma puede resultar errónea a causa de la baja precisión del modelo digital de elevación utilizado. Esto permitió

un mayor ajuste del trazado de las subcuencas, como se puede apreciar en la figura 14. En la tabla 1 se dan las coordenadas planas del cierre de cada cuenca.

Figura 14: Mapa de cuencas y red de drenaje del área de estudio

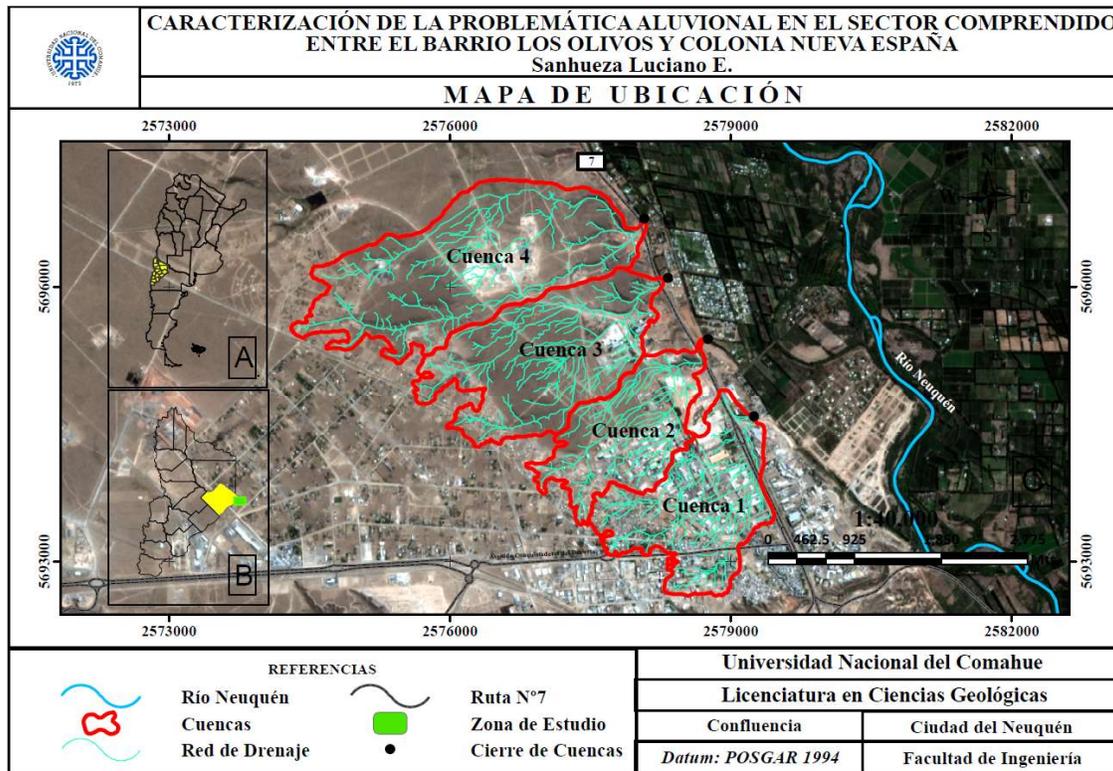


Tabla 1: Coordenadas de cierre de cuencas aluvionales

Cierre de cuenca	Latitud	Longitud	X	Y
Cuenca 1	38°53'47" S	68°05'10" W	5696782.37	2579248.31
Cuenca 2	38°53'19" S	68°05'32" W	5695428.87	2578755.55
Cuenca 3	38°52'58" S	68°05'51" W	5696096.26	2578329.08
Cuenca 4	38°52'36" S	68°06'00" W	5696744.85	2578074.72

4. 4. Análisis Litológico

El relevamiento geológico de campo se realizó en tres visitas sucesivas en las cuales se realizaron tareas de observación y descripción de los principales rasgos litológicos, distinción de las formaciones, levantamiento de un perfil estratigráfico (Escala tentativa 1:20000), en donde se destacan texturas y composición de las distintas litologías.

Del proceso de recolección, se pudieron obtener diversas variedades, las muestras correspondientes al perfil 1-1' (figura 15) se pueden apreciar en la figura 16.

El análisis litológico de las muestras recolectadas en campo se pueden apreciar en la tabla 1, se realizó macroscópicamente y con lupa de mano en el lugar de estudio.

El mapeo de las unidades litoestratigráficas aflorantes en la zona de estudio se llevó a cabo a través de la interpretación de imágenes satelitales como ESRI, Google satellite y Bing, observación directa de datos de campo y consultas de antecedentes realizados en la zona de análisis. En este mismo sentido, los principales puntos de interés en donde se realizaron perfiles y se extrajeron muestras fueron posicionados geográficamente mediante el uso de posicionadores satelitales GPS.

Las edades mencionadas en este trabajo, son extraídas de la nomenclatura expuesta en la Carta Estratigráfica Internacional (2004), conforme a lo aprobado por la International Comisión on Stratigraphy (ICS) y ratificada por la International Union of Geological Sciences (IUGS).

Figura 15: Ubicación perfil geológico representativo de la zona de estudio. Perfil 1-1' con techo en el punto 38° 53'46" S (5694665.62) - 68° 53'47" W (2578964.08) y base en 38° 53' 47" S (5694559.77) - 68° 05'18" W (2579212.83)

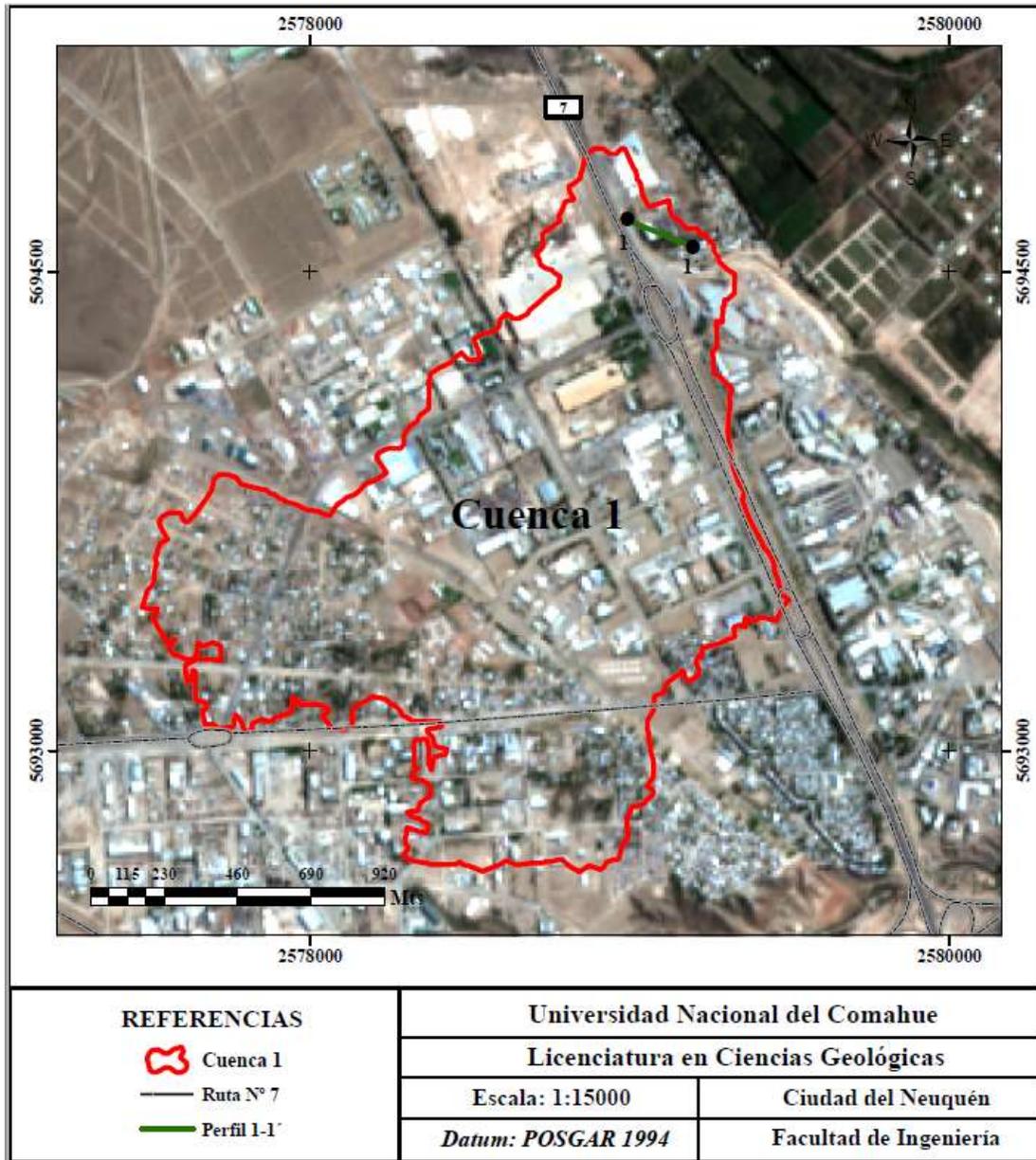


Figura 16: Muestras correspondientes al perfil 1-1'. 1A: Arenisca cuarrosa muy fina de color amarillenta. 2A: Pelita de color rojo. 3A: Pelita verdosa. 4A: Arenisca fina gris con tonalidades de color rosa. 1B: Arenisca media a gruesa gris. 1C: Conglomerado polimictico clasto sostén. 2C: Conglomerado polimictico matriz sostén con cemento calcáreo.

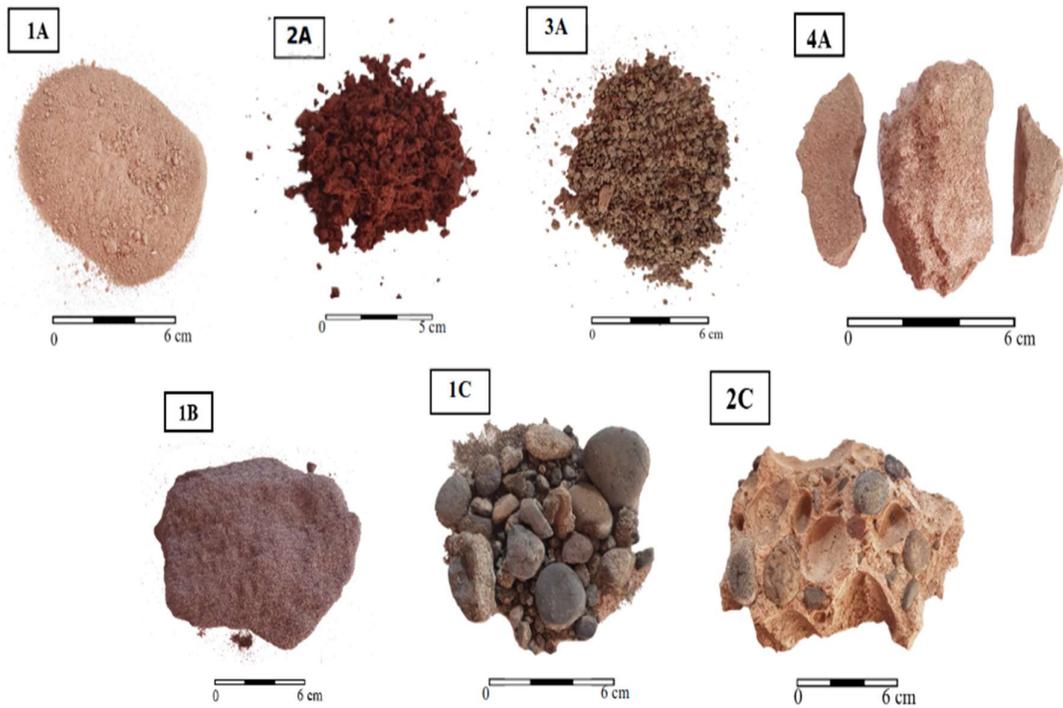


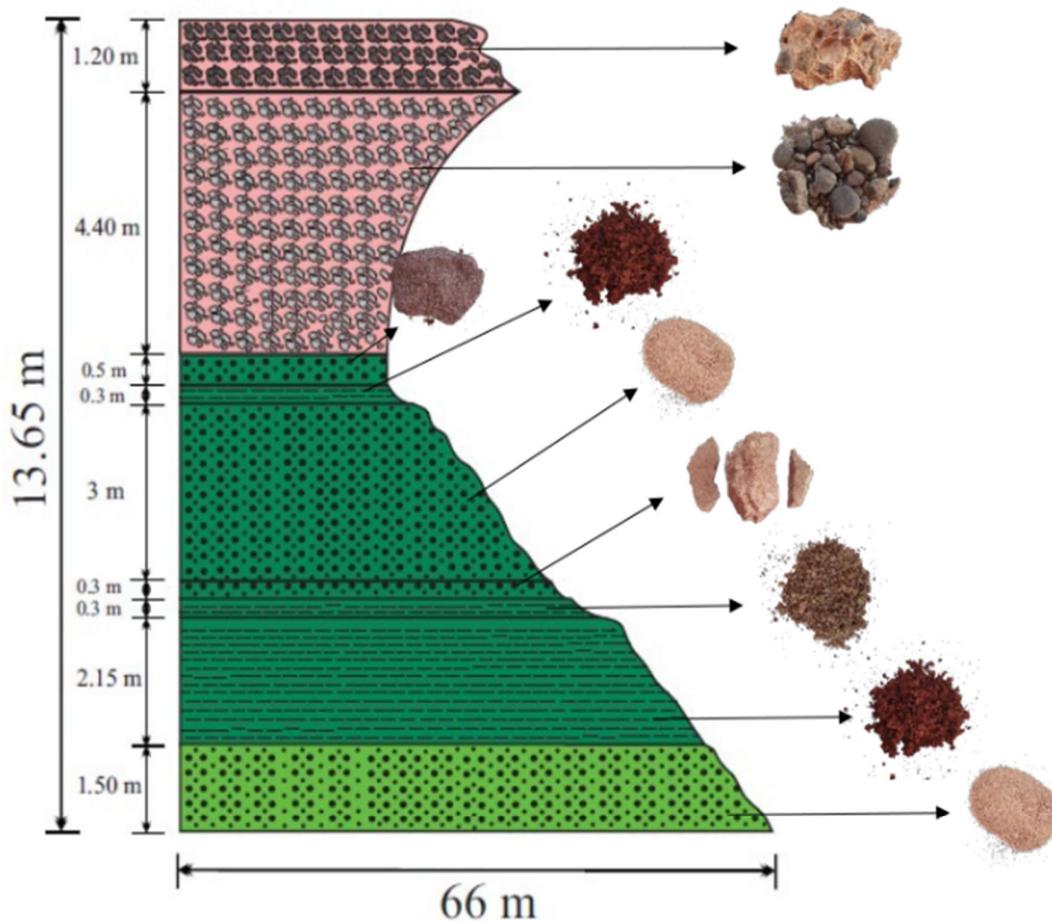
Tabla 2: Descripción litológica de las muestras analizadas del perfil 1-1' en el sector de la colonia de Nueva España.

Perfil	Muestra	Descripción
1-1'	1A	Arenisca cuarzosa muy fina de color amarillento muy friable. Clasto sostén. Granos de cuarzo incoloros y en menor medida, amarillos y marrones claros. Buena redondez, esfericidad alta. Muy buena selección. No se observa matriz ni cemento.
1-1'	2A	Pelita de color rojo consolidada. Mal seleccionada. Clastos de composición cuarzosa tamaño arena muy fina, incoloros y blancos mayoritariamente. Escasa presencia de clastos líticos. Granos subangulosos a subredondeados. Esfericidad media a baja. Matriz fangosa color rojo
1-1'	3A	Pelita verdosa con presencia de material piroclástico bien consolidada. Se individualizan clastos aislados de tamaño arena muy fina de composición cuarzosa y muy pocos líticos máficos. Macroscópicamente, se observan pequeñas trazas de color negro que en la lupa presentan pátinas verdeazuladas. Muy suave al tacto.
1-1'	4A	Arenisca fina gris con tonalidades de color rosa. Muy friable. Clasto sostén. Granos de composición cuarzosa, predominantemente de color blanco y grises, también se observan granos de color rosa e incoloros que se describen como feldepatos. Los clastos son sub-redondeados y poseen una esfericidad de media a alta. Muy bien seleccionados. Con presencia de cemento carbonatico.
1-1'	1B	Arenisca media a gruesa gris, clasto sostén. Muy friable. Gran predominancia de cuarzo incoloro, blanco y anaranjado. Clastos de feldepatos y biotita aislados. Escasa presencia de líticos félsicos. Clastos subangulosos, esfericidad media. Ausencia de matriz. Selección media a baja. Macroscópicamente, tiene una serie de trazas paralelas que simulan una estratificación.
1-1'	1C	Conglomerado polimíctico clasto sostén pobremente consolidado. Predominancia de clastos líticos de tipo máfico y en menor proporción, félsicos, de colores gris oscuro, verde oscuro, marrón oscuro y claro, blanco lechoso y naranja. Clastos con tamaños oscilantes entre 17 cm a 0.5 cm, con una relación aproximada de 70% de máficos y 30% de félsicos. Redondez buena, esfericidad media en general (se encuentran clastos con esfericidad baja y otros, principalmente los de tamaño más fino, con buena esfericidad). La matriz está conformada por arena fina muy friable con gran predominio de granos de cuarzo y líticos máficos, y en menor medida, líticos félsicos
1-1'	2C	Conglomerado polimíctico matriz sostén, altamente consolidado. Presenta clastos líticos máficos de color oscuro y clastos félsicos de color claro. Clastos redondeados y sub-redondeados, esfericidad media. Cemento calcáreo. Pobremente seleccionado, la muestra cuenta con cuatro tamaños de clastos diferentes, los clastos de mayor tamaño son de 6 cm y los de menor tamaño son de 0,5 cm.

4. 4. 1. Elaboración de Perfil Geológico

La información para el perfil geológico, se realizó a partir de la recopilación de muestras y haciendo uso de brújula Brunton, cinta métrica y GPS. La digitalización se realizó mediante el software Corel Draw x7 y se puede apreciar en la figura 17.

Figura 17: Perfil 1-1' con escala vertical exagerada. De base a techo: 1. 5 m de areniscas amarillentas (muestra 1A); 2. 15 m de pelitas rojizas (muestra 2A); 0. 3 m de pelitas verdosas (muestra 3A); 0. 3 m de areniscas grises con tonalidades rosas (muestra 4A); 3 m de areniscas amarillentas (muestra 1A); 0. 3 m de pelitas rojizas (muestra 2A); 0. 5 m de areniscas grisáceas que disminuye lateralmente hasta desaparecer (muestra 1B); 4. 4 m de conglomerados polimicticos clastos sostén con base erosiva (muestra 1C); 1. 2 m de conglomerados polimicticos matriz sostén con cemento calcáreo (muestra 2C).



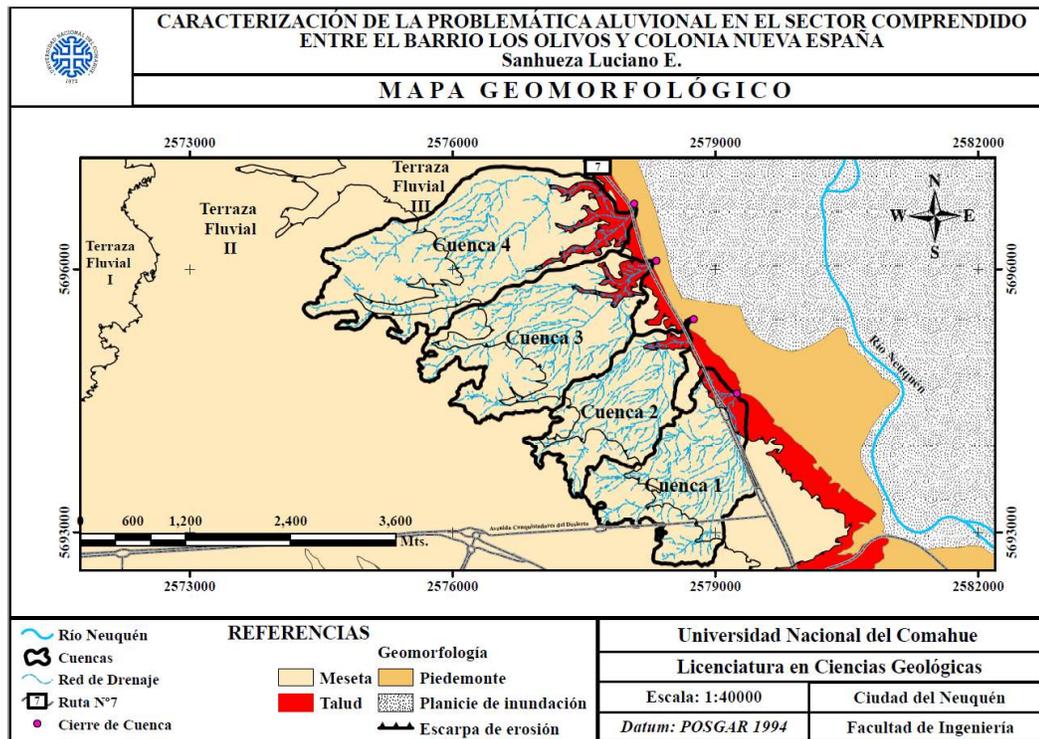
Escala vertical: 1:100
Escala Horizontal: 1:600

4. 5. Mapa Geomorfológico y Perfil Geomorfológico

El mapa geomorfológico (figura 18) se realizó a partir de fotografías aéreas de Google Earth Pro, imágenes satelitales ESRI Satellite actuales disponibles a través de la herramienta Add Basemap de ArcGIS, imágenes aéreas puestas a disposición por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) y curvas de nivel creadas a partir del MDE.

Por otra parte, el Perfil Geomorfológico se realizó a partir del software Arc GIS, el mismo mediante una trasecta genera un corte tangencial en el terreno, generando un perfil automáticamente. De esta forma se distingue de forma muy fácil los saltos y bajos de las distintas geoformas, para su posterior interpretación.

Figura 18: Geomorfología de la zona de estudio



El área de estudio está compuesta casi continuamente por una serie de superficies llanas ubicadas a cotas más elevadas respecto del valle del Río Neuquén. En general presentan una suave inclinación hacia el este. Estas extensas superficies planas, se las reconocen como niveles de terrazas aluviales modernas (González Díaz y Malagnino, 1984).

En la zona de análisis se destacan dos niveles de terrazas de edad pleistocena, los mismos se corresponden con dos ciclos de erosión bien diferenciados, resultantes principalmente del accionar del proceso fluvial sobre sedimentitas terciarias (Windhausen, 1922). A su vez estas terrazas presentan diferente grado de preservación. Presentan un potente nivel de rodados fluviales cementados por carbonato de calcio, el que actúa como nivel estructural. Por encima se encuentra una cobertura arenosa eólica de variable espesor. Las terrazas y planicies aluviales se encuentran encajadas en el relieve de Planicies estructurales (Pereyra *et al.*, 2011). Y exhiben un relieve mesetiforme, con superficies

topográficas escalonadas, donde en algunos tramos se pueden observar zonas alternadas por bajos, cerros y profundos cañadones, como se puede apreciar en la figura 18.

Garrido (2000) y Chaves (2020) afirman que los fenómenos de remoción en masa por deslizamiento, sumados a la acción hídrica y eólica previamente mencionados, completan la lista de los procesos geomórficos naturales de la región, que han contribuido en el modelado de las bardas.

Las geoformas principales reconocidas en la zona de estudio, están definidas por su origen, edad y procesos que han regido su formación. Desde la más elevada a la más cercana al río, se denominan:

1. Terraza Superior “más antigua”: pertenece al nivel de terrazas II del Río Neuquén. Según Apcarian *et al.*, (2011) se correspondería con una previa planicie aluvial. Su superficie plana, con una leve inclinación hacia el E, está afectada por procesos de erosión hídrica (por salpicadura) y eólica (deflación, abrasión y acumulación) (Capua y Jurio, 2011; Chaves, 2020).

2. Terraza inferior “más moderna”: pertenece al nivel de terrazas III del Río Neuquén. Al igual que la anterior, previamente mencionada, se corresponde con una previa planicie aluvial, pero más moderna respectivamente. También presenta una leve inclinación hacia el E y actúan continuamente los mismos procesos (Capua y Jurio, 2011).

Ambos niveles de terraza presentan extensas acumulaciones de gravas y arenas. Litológicamente, los describimos como conglomerados polimícticos compuestos por clastos subredondeados, de variados colores. En algunos tramos se observan intercalaciones arenosas y algunos niveles cementados por carbonatos de calcio. Lo cual disminuye la permeabilidad del paquete sedimentario y le otorga mayor resistencia.

Según Rodríguez *et al.* (2007) tanto el nivel de terraza superior como el inferior tienen una edad pleistocena superior.

3. Escarpa de erosión: Son los bordes erosionados de las mesetas y son los responsables de los fuertes y abruptos resaltos topográficos que dan origen a las denominadas bardas de la zona de estudio. Estos resaltos se suceden gradualmente de forma escalonada exhibiendo desniveles locales (Garrido, 2005). Los materiales sueltos producto de la meteorización continua suelen formar conos de detritos, los mismos cuando se saturan con agua dan origen a coladas de barro canalizadas en los cañadones.

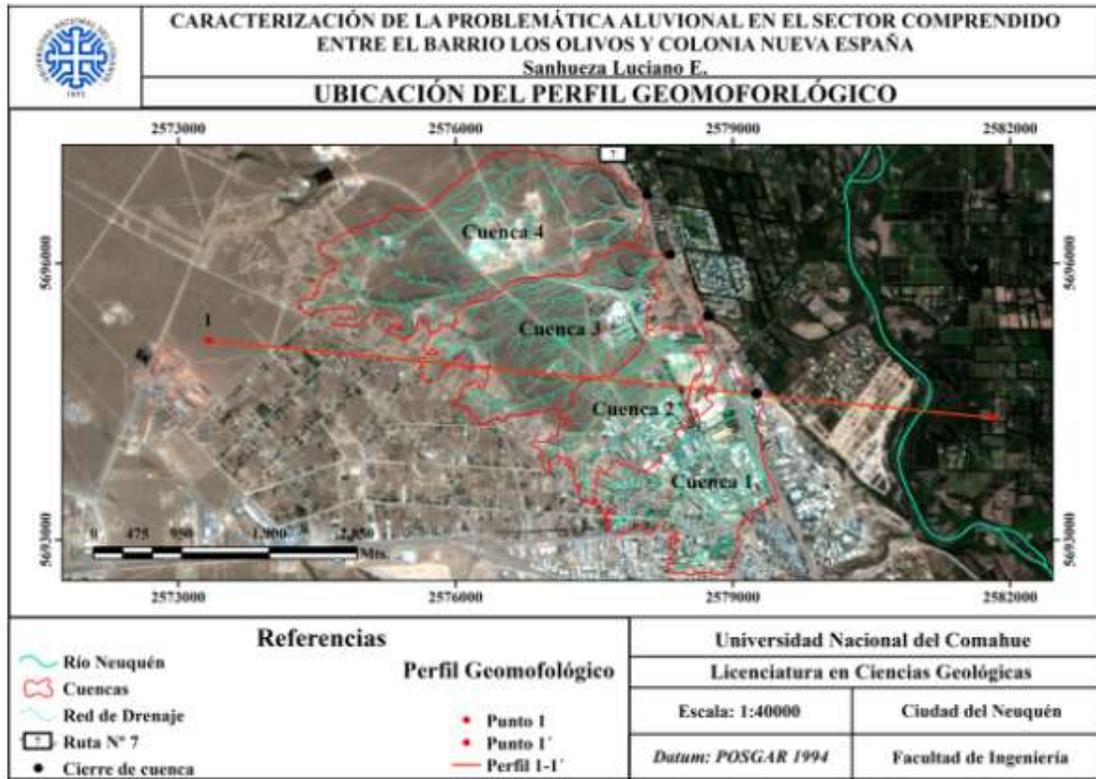
4. Talud: La coalescencia lateral de los conos de detritos con la escarpa de erosión conforman el talud (Capua y Jurio, 2011).

5. Piedemonte: Entre el talud y la planicie de inundación, se desarrolla el piedemonte. En la parte superior del mismo se suele formar una delgada cubierta de material ‘en tránsito’ hacia el nivel de base local (Capua y Jurio, 2011). Este material es el remanente proveniente del progresivo retroceso del frente de erosión.

6. Planicie de inundación actual del Río Neuquén: En el sector de estudio, la planicie de inundación está integrada por una delgada cubierta de naturaleza aluvial, de gran extensión areal que cubre sedimentos fluviales.

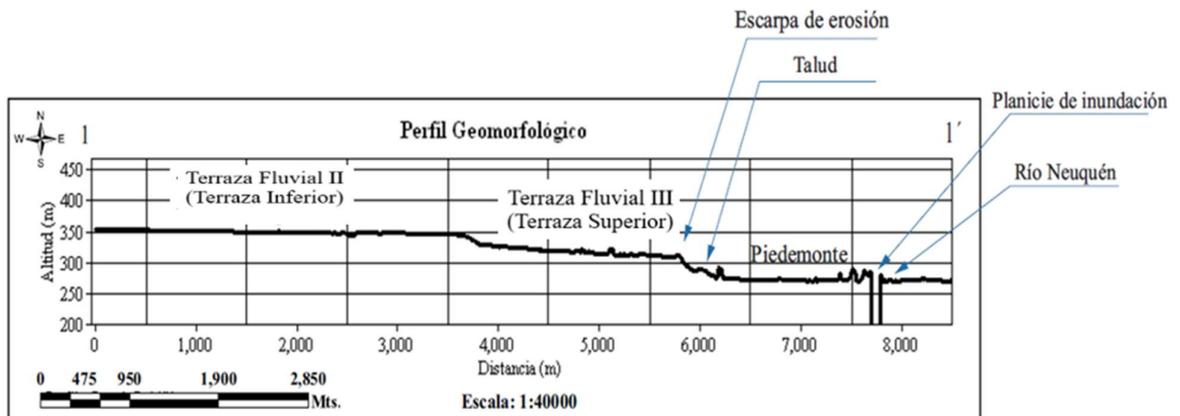
La ubicación del perfil geomorfológico se puede apreciar en la figura 19. El perfil geomorfológico representativo de la zona de estudio se puede apreciar en la figura 20.

Figura 19: Ubicación del perfil geomorfológico representativo de la zona de estudio. Perfil 1-1' con techo en el punto $38^{\circ} 53' 30'' S$ (5695158.99)- $68^{\circ} 09' 19'' W$ (2573337.83) y base en $38^{\circ} 53' 55'' S$ (5694325.76) - $68^{\circ} 03' 24'' W$ (2581822.80).



Cabe destacar, que debajo de cada cárcava observada en la zona de estudio, se configuran una serie de abanicos aluvionales integrados por acumulaciones clásticas, mientras más retrocede y se ensancha la cárcava, más crecen los abanicos aluvionales que se encuentran en la parte inferior.

Figura 20: Perfil geomorfológico representativo de la zona de estudio.



4. 6. Potencial de Escorrentía. Método del Número de Curva del SCS.

El U. S Soil Conservation Service (1972) desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta y, por lo tanto, la precipitación efectiva.

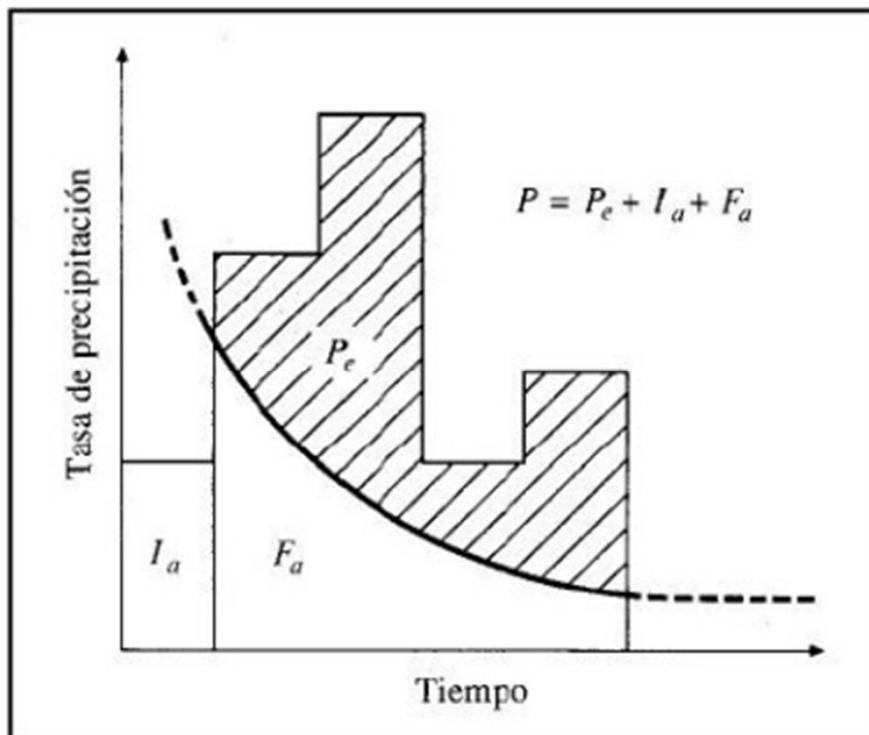
Es un modelo empírico que determina un umbral de escorrentía (P_0) a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca. El mismo consiste en considerar que la precipitación efectiva, P_e , es menor o igual que la precipitación total, P , que la retención acumulada, F_a , es siempre menor o igual que la retención potencial máxima, S , y que la escorrentía potencial, es decir, el máximo volumen de agua que puede convertirse en escorrentía es $P-I_a$, siendo esta la abstracción inicial, el volumen de agua que se infiltra antes de que comience la escorrentía directa.

La hipótesis fundamental del método es la validez de la siguiente relación entre los parámetros descritos:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (1)$$

Por el principio de continuidad se sabe que $P = P_e + I_a + F_a$, Como se observa en la figura 21.

Figura 21: Variables que intervienen en el método del SCS para el cálculo de las abstracciones



Fuente: Chow et al. , 1994

Para el cálculo de la precipitación efectiva o escurrimiento directo, se utiliza el Método del Curva Número (CN) del U. S Soil Conservation Service, que es un modelo semi empírico que combina la ecuación (1) con el principio de continuidad:

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (2)$$

Donde

S: retención potencial máxima (mm),

P: la precipitación total (mm),

I: infiltración (mm),

I_a: abstracción inicial (mm),

P_e: precipitación efectiva o escurrimiento (mm).

La misma es la ecuación básica para el cálculo de la escorrentía directa de una tormenta

La abstracción inicial incluye todas las pérdidas que se producen antes que se inicie el escurrimiento, retención en depresiones superficiales, intercepción por vegetación, evaporación e infiltración. La *I_a* es muy variable, pero es posible correlacionarla con parámetros del suelo y con la cobertura vegetal. Rapacioli (2007) asegura que estudios previos realizados en cuencas rurales ha permitido correlacionar *I_a* y *S* a través de la siguiente relación empírica:

$$I_a = S^{0,55} \quad (3)$$

El valor de *S* está relacionado con el suelo y la cobertura vegetal a través del índice CN (Curva Número) mediante la siguiente expresión en milímetros:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

El **índice CN expresa el potencial de escorrentía** de un terreno en función de la humedad antecedente del suelo, cobertura vegetal, grupo hidrológico de suelo y uso del mismo. El mismo toma un valor de 0 a 100 según sea su capacidad de generar escorrentía superficial. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad. Las Tablas 5 y 6 permiten obtener un valor estimativo del índice CN para distintas coberturas y usos del suelo, para una condición humedad antecedente media (AMCII).

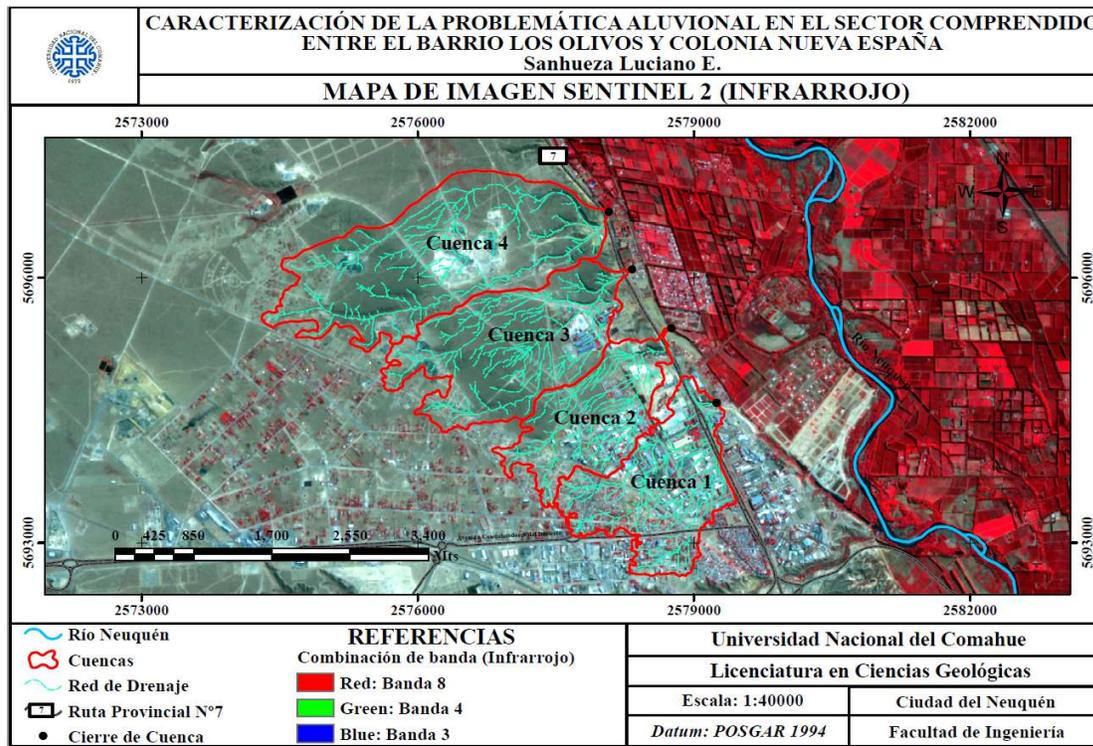
4. 6. 1. Clasificación de coberturas y usos del suelo

De una imagen Sentinel-2 obtenida del portal USGS Global Visualization Viewer, la misma fue capturada en febrero del 2020, previo procesamiento, retroproyectada a Posgar 94-Faja 2. Luego de los anteriores pasos mencionados, se efectuó la clasificación de cobertura y usos de suelo que se muestra en la figura 23.

Las plantas reflejan las ondas infrarrojas cercanas, por lo que el falso color a partir de la composición de bandas 8-4-3 de la imagen satelital Sentinel-2 de la zona de estudio, permite analizar la vitalidad de la vegetación. El color rojo, indica presencia de vegetación.

El color castaño indica una vegetación arbustiva escasa, y el blanco representa la ausencia de vegetación.

Figura 22: Mapa de Imagen Sentinel 2; bandas 8-4-3(infrarrojo)



Y en la tabla 3, se pueden observar los datos estadísticos de las firmas espectrales, superficie que ocupa cada cobertura.

Tabla 3: Cobertura y uso de suelo

Cobertura y uso del suelo	Código	Color
Vegetación	1	
Calles pavimentadas	2	
Calles sin pavimentar	3	
Cuerpos de agua	4	
Urbanización	5	
Estepa arbustiva	6	
Suelo desnudo	7	

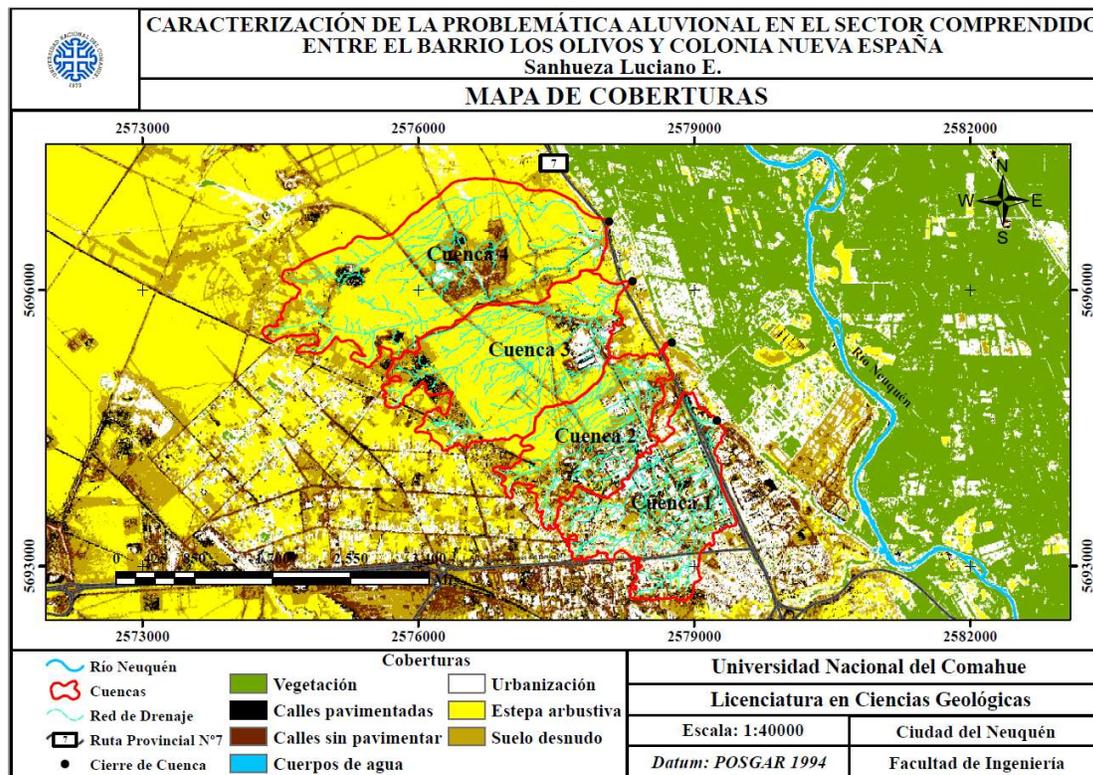
La elaboración de mapas de coberturas y usos de suelos se llevó a cabo mediante la clasificación digital de imágenes, este proceso se realiza con el fin de extraer información y distinguir zonas con usos homogéneos. Los métodos de clasificación son usados para cartografiar áreas que presentan un mismo significado en imágenes digitales. Para este procedimiento se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 obtenidas del portal USGS Global Visualization Viewer, con un previo procesamiento, como se puede apreciar en la figura 22, retroproyección a Posgar 94-Faja 2 y circunscripción al sistema de cuencas, se efectuó una clasificación supervisada con el software Arc Gis 10. 5.

Mediante esta clasificación se consiguió cartografiar la zona de estudio y distinguir superficies ocupadas con distintos tipos de coberturas de suelos (*p. e.*, vegetación, suelos desnudos, áreas urbanas, etc.).

En dicha clasificación es necesario un previo conocimiento de la zona de estudio mediante trabajo de campo u otro tipo de información.

A partir del previo conocimiento de la zona de estudio y el análisis digital, se seleccionaron áreas de identidad conocida de la cubierta terrestre de interés (cultivos, suelos, urbanización, etc.), delineándolas sobre la imagen digital punto a punto (muestras) cuyos datos numéricos quedan archivados en la computadora como puntos de control, constituyendo los “datos de entrenamiento”. Luego, se crearon las firmas espectrales de esas muestras, que son utilizadas en la clasificación. Realizadas estas firmas, se procedió a la fase de asignación en la cual a cada pixel de la imagen se le asigno una categoría, definidas en la fase de entrenamiento.

Figura 23: Mapa de coberturas y usos del suelo de la zona de estudio.



4. 6. 2. Mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos

El Mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos (MGHS) se hace a partir de la reclasificación del Mapa de Tipo de Suelos según Textura (MTST) con la tabla 4.

Tabla 4: Grupos Hidrológicos de Suelos

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración con una condición media de humedad	Tipo de suelo según textura
A	Rápida	Arenoso
		Arenoso-Limoso
B	Moderada	Franco - arenoso
		Franco
		Franco - arcilloso-arenoso
		Franco - limoso
C	Lenta	Franco - arcillosa
		Franco - arcillo - limosa
		Arcillo - limosa
D	Muy Lenta	Arcilloso

Fuente: SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000

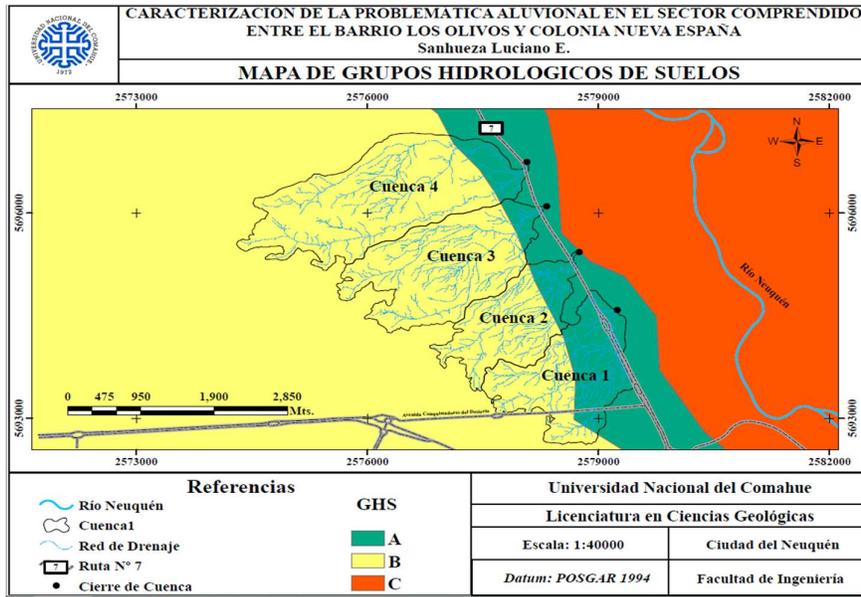
El complejo hidrológico suelo-cobertura es un factor muy importante en el cálculo de la precipitación efectiva o escorrentía superficial. Respecto al tipo de suelo hay que clasificarlo en uno de los cuatro grupos hidrológicos existentes. Estos grupos van desde A hasta D, representando el grupo A un potencial de escurrimiento mínimo y el D un potencial de escurrimiento alto. Para asignar a un suelo un grupo determinado hay que considerar su composición y textura. Según Bradbury et al. (2000), los grupos de suelos hidrológicos son:

- Suelos Grupo A: Tienen alta velocidad de infiltración, aun cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen alta velocidad de transmisión.
- Suelos Grupo B: Tienen moderadas velocidades de infiltración cuando están bien húmedos. Consisten principalmente en suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, con textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Con moderada velocidad de transmisión.
- Suelos Grupo C: Tienen infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos con una capa que impide el descenso del agua, o suelos con textura moderadamente fina a fina. Tienen lenta transmisión de agua.
- Suelos Grupo D: Tienen infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos de arcilla con alto potencial de expansión. Tienen lenta transmisión de agua.

Tomando como referencia los datos de la tabla 4 y las características de texturas de los suelos de las cuencas en análisis, se confeccionaron los mapas correspondientes de los Grupos Hidrológicos de Suelos (figura 24). Aquí se puede apreciar que el grupo hidrológico predominante es el B y en menor medida el C. Se puede decir que, en la mayor parte de las cuencas en estudio, los suelos tienen moderada velocidad de infiltración, considerando una condición de humedad media (AMCII).

En sectores menores, se tiene baja infiltración debido a que son suelos más compactados y con un contenido de arcillas mayor, por lo que la velocidad de transmisión decae.

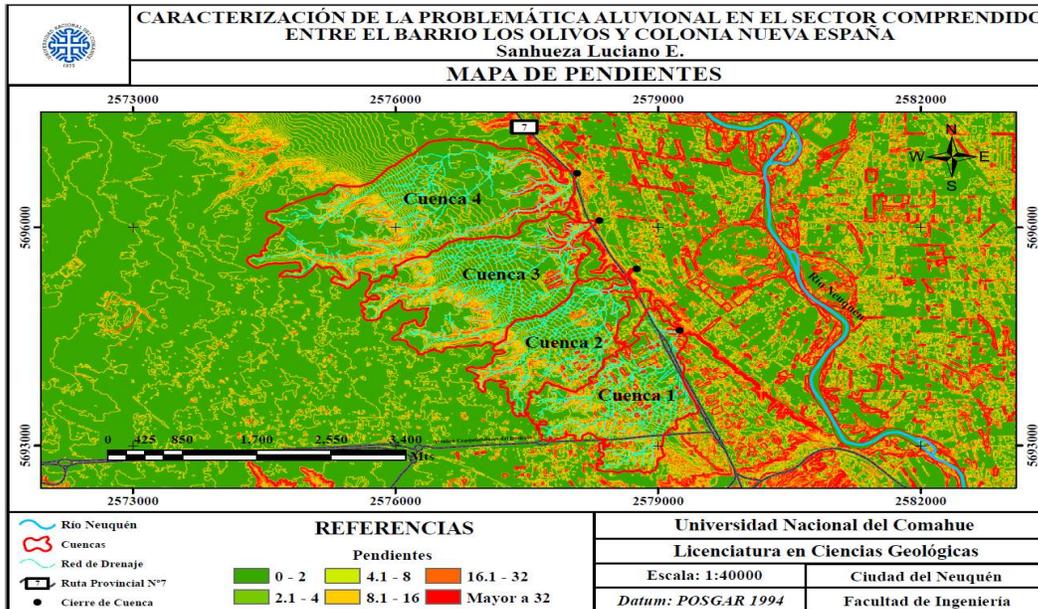
Figura 24: Mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos de la zona de estudio



4. 6. 3. Mapas de pendientes y de orientación de laderas del terreno

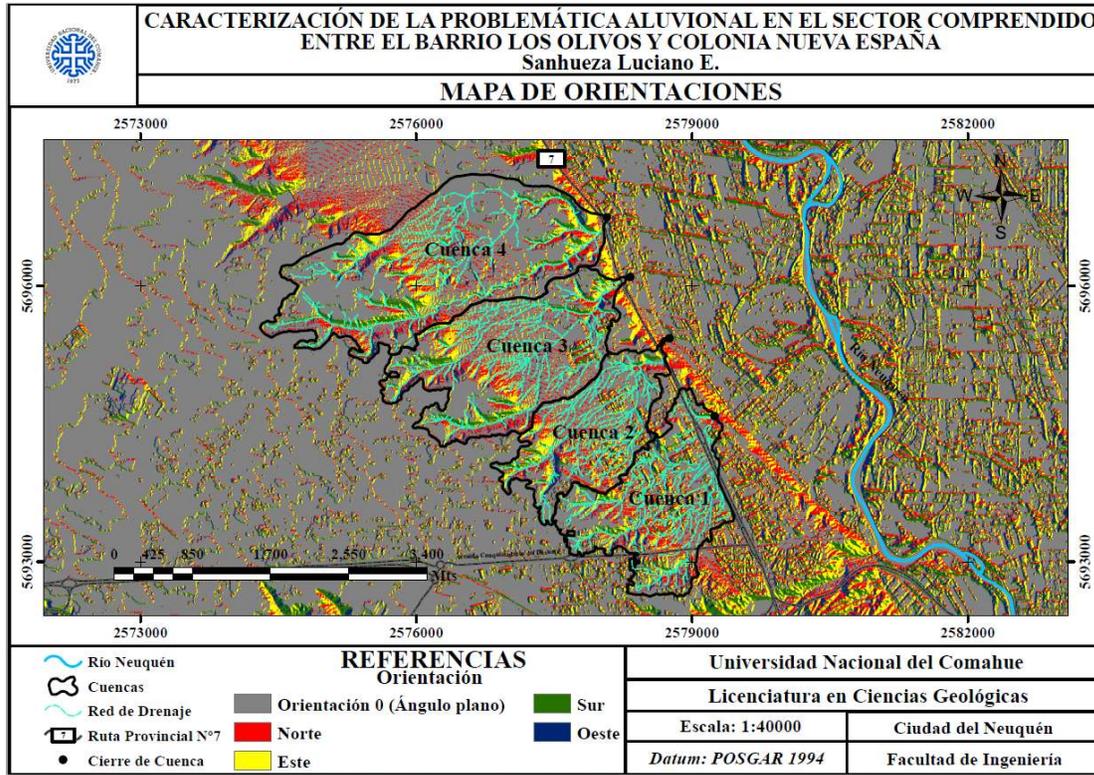
La elaboración de los mapas de pendientes (figura 25), se realizó a partir del Modelo Digital de Elevación con resolución espacial 5 m modificado, trazando un plano tangente a esta superficie en un determinado punto P, la pendiente en este punto corresponde a la inclinación de este plano en relación con el plano horizontal (Burrough, 1986; Bradbury et al., 2000). La clasificación utilizada para las pendientes corresponde a la propuesta por la FAO (Vargas Rojas, 2009; Chaves, 2020).

Figura 25: Mapa de pendientes de la zona de estudio en porcentaje



Otro factor importante en el proceso de escorrentía superficial es la orientación o aspecto. El aspecto de una ladera es la dirección que confronta a la misma (Rapacioli, 2007). En la Figura 26 se muestra el mapa de orientaciones de la zona en análisis.

Figura 26: Mapa de orientación o aspecto de la zona de estudio



4. 6. 4. Álgebra de mapas

Obtenidos los mapas de cobertura y uso de suelos, grupos hidrológicos de suelos, pendientes y aspectos se procede a la obtención del mapa de potencial de escorrentía, mediante álgebra de mapas, asumiendo la condición de humedad intermedia (AMCII).

La determinación del índice CN se realiza de manera distribuida mediante álgebra de mapas y reclasificaciones digitales de los mapas de Cobertura y Uso del Suelo (MCUS), Grupos Hidrológicos de Suelos (MGHS), pendientes (MP) y aspectos u orientaciones (MA).

Para la determinación del índice CN se llevaron a cabo las operaciones mostradas en la figura 27.

Figura 27: Modelo cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificaciones en SIG. Cálculo del índice CN. Elaborado sobre la base del método propuesto por el USSCS (1975)



4. 6. 5. Mapa de Potencial de escorrentía

El SCS define tres condiciones de humedad: *AMCI* (Seca; permite una capacidad de infiltración alta), *AMCII* (Media; permite una capacidad de infiltración normal) y *AMCIII* (Húmeda; permite una capacidad de infiltración baja).

Los valores del índice CN de las tablas que se utilizan en este trabajo, se refieren a la condición media de humedad en el suelo (*AMCII*), es decir, suelos que permiten una capacidad de infiltración normal, asociada con intensidades desde 635 a 1270 mm/año. Este valor es obtenido de las tablas 5 y 6.

Tabla 5: Valores del índice CN para diferentes tipos cobertura y usos del suelo

DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO Y CUBIERTA	TIPO HIDROLOGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
Tierra cultivada				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de rios: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas.	45	66	77	83
Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, parques, etc.; óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más condiciones aceptables: cubierta de pasto entre 50% al 75%	39	61	74	80
	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Districtos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial				
Tamaño de lote Porcentaje impermeable				
≤500 m ² 65	77	85	90	92
1000 m ² 38	61	75	83	87
1300 m ² 30	57	72	81	86
2000 m ² 25	54	70	80	85
4000 m ² 20	51	68	79	84
Estacionamientos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Ripio	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Fuente: SCS, 1975

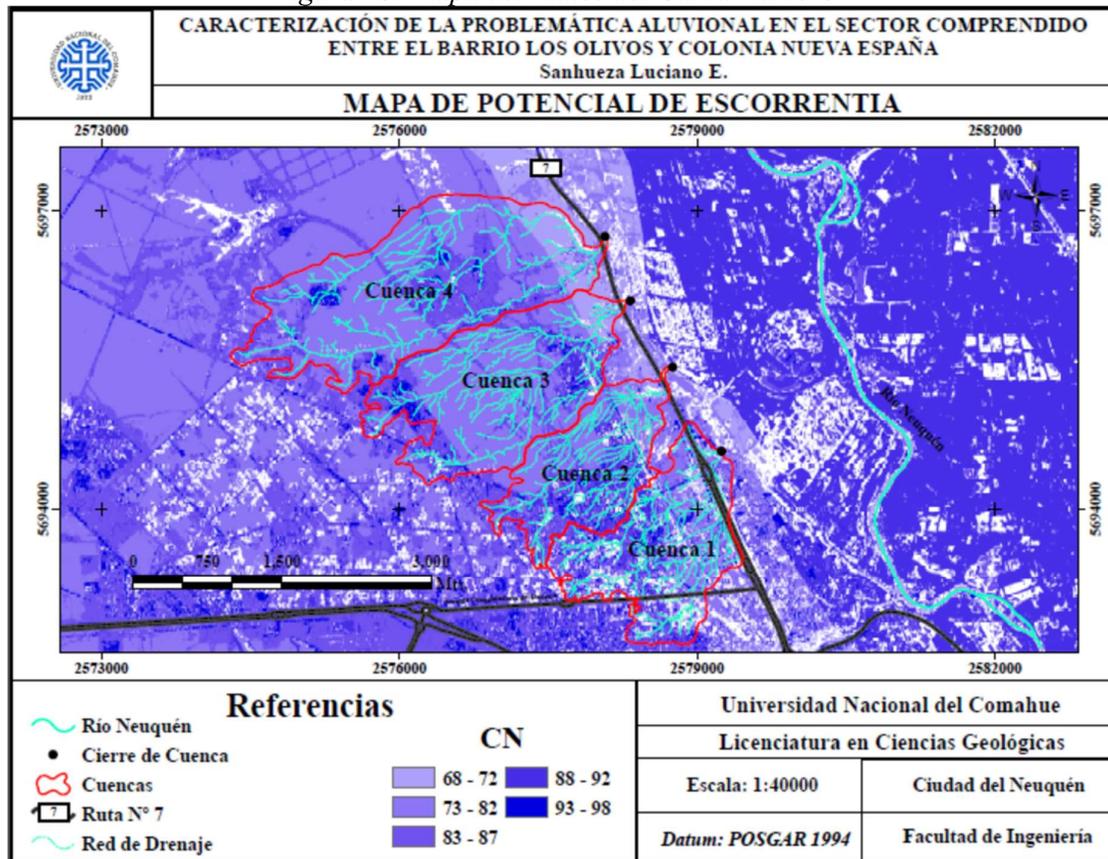
Tabla 6: Valores del índice CN para áreas aluvionales semiáridas

DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO Y CUBIERTA	TIPO HIDROLOGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
Suelo descubierto	77	86	91	94
Estepa Arbustiva:				
a) Con menos del 5% de cobertura herbácea				
Cobertura entre el 5 - 20%	72	81	88	91
Cobertura entre el 20 - 30%	70	80	87	90
Cobertura entre el 30 - 40%	68	79	86	89
Cobertura mayor del 40%	51	70	80	84
b) Con más del 5% de cobertura herbácea				
Cobertura entre el 5 - 20%	71	80	87	90
Cobertura entre el 20 - 30%	68	78	85	88
Cobertura entre el 30 - 40%	66	77	84	87
Cobertura mayor del 40%	49	68	78	82
Estepa halófito	70	80	87	89
Estepa halófito – higrófito	51	70	80	84

Fuente: INCYTH, 1980

El mapa del índice CN, se determina con el procedimiento detallado en la sección anterior y se puede ver en la figura 28.

Figura 28: Mapa del Índice del Curva Número



A partir de este mapa, se obtuvo para cada cuenca el índice CN medio ponderado, como se puede ver en la tabla 7.

Para la obtención del índice CN para las condiciones seca (AMCI) o húmeda (AMCII) se utilizan las ecuaciones

$$CN (AMCI) = \frac{4.2 CN(AMCII)}{10 - 0.058 CN (AMCII)} \quad (5)$$

$$CN (AMCIII) = \frac{23 CN(AMCII)}{10 + .13 CN (AMCII)} \quad (6)$$

Donde: CN (AMCII): valor de número de curva para la condición de humedad antecedente II o media, éste valor es el obtenido de tablas. CN(AMCI): valor de número de curva para la condición de humedad antecedente I o seca. CN(AMCIII): valor de número de curva para la condición de humedad antecedente III o húmeda.

Tabla 7: Índice CN promedio cuencas aluvionales

Cuenca	CN1	CN2	CN3
1	70	85	93
2	69	84	92
3	66	82	91
4	64	81	91

En la tabla 7 se observa que todas las cuencas poseen índices de CN elevados, esto evidencia un gran potencial de escorrentía. Sin embargo, la Cuenca 1 es la cuenca que mayor índice de CN tiene, debido al complejo hidrológico suelo – cobertura que posee. La Cuenca 1 por ende es la que presenta el caso más desfavorable respecto a la infiltración, como consecuencia es la que va a presentar mayor potencial de escorrentía.

4. 7. Caracterización de Cuencas Aluvionales y Parámetros Morfométricos

A partir del MDE (Modelo Digital de Elevaciones) y utilizando las aplicaciones de ArcGIS, *Flow Direction*, *Flow Accumulation*, *Snap Pour Point* y *Watershed* se efectuaron las delimitaciones e identificación de las cuencas.

Los parámetros morfométricos principales que se obtienen de cada cuenca son: Superficie (*S*), Perímetro (*P*), Altura Máxima (*Hmáx.*), Altura Mínima (*Hmín.*), Desnivel (ΔH), Pendiente Media (*Im*). Otras características que interesan obtener de las cuencas son las relativas a los Parámetros Físicos de Forma y de Relieve, y a los de la Red Hidrográfica. Estos se obtienen a partir del procesamiento del MDE y de la red de drenaje de cada cuenca y se pueden apreciar en la tabla 8.

Tabla 1: Parámetros morfométricos cuencas aluvionales.

Cuenca	Superficie S (Km ²)	Perímetro P (Km)	Cota Mín. Hmín. (msnm.)	Cota Máx. Hmáx. (msnm.)	Dif. de Cota ΔH (msnm.)
1	2. 27	8. 99	295	350	55
2	1. 76	8. 28	276	347	71
3	2. 90	9. 77	279	350	71
4	3. 97	11. 49	284	351	67

4. 7. 1. Parámetros Físicos de Forma

Forma de la cuenca (*R_f*): Este parámetro es muy importante. Las cuencas alargadas transmiten a mayores distancias el flujo fluvial. Las cuencas más equilibradas son las que sus divisorias se aproximan a un círculo. Horton (1932), estableció un factor adimensional de forma, como índice de la forma de una cuenca:

$$R_f = \frac{S}{L_b^2} \quad (7)$$

Donde:

S : superficie de la cuenca (km^2);

L : longitud de la cuenca medida desde la salida hasta el límite de la cuenca, cerca de la cabecera del cauce más largo siguiendo una línea recta (km).

La ecuación no implica una suposición especial de la forma de la cuenca. Un valor de R_f superior a la unidad indicará el grado de achatamiento del área o un curso principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando grandes crecidas. Una cuenca estrecha y larga, con R_f bajo, presenta menor posibilidad de que se generen grandes crecidas. De acuerdo con la magnitud del factor de forma, las cuencas se clasifican en tres grupos: baja, media y alta susceptibilidad a las inundaciones con factor de forma bajo, medio y alto respectivamente.

Coefficiente de Gravelius (C_g): Otro método que se usa para expresar la forma de la cuenca es el Coeficiente de Gravelius, el mismo refleja el grado que asemeja la cuenca a una circunferencia (López Cadenas de Llano, 1998). Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de otra teórica circular de la misma superficie.

$$C_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \quad (8)$$

Donde:

P : perímetro de la cuenca (km);

S : superficie de la cuenca (km^2).

En cualquier caso, el coeficiente será mayor que 1, tendiendo a la unidad cuando la cuenca se aproxima a la forma circular, y alcanzando valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas.

Este valor que crece con la irregularidad de la forma de la cuenca permite clasificar a una cuenca como:

$C_g = 1,00 - 1,25$ Redonda.

$C_g = 1,25 - 1,50$ Ovalada.

$C_g = 1,50 - 3,00$ Oblonga.

La tabla 9 muestra los resultados para los parámetros físicos de forma

Tabla 2: Parámetros de físicos de forma

Cuenca	R_f	Forma de la Cuenca	Susceptibilidad	C_g	Clase de forma
1	0.46	Ni alargada, ni ensanchada	Media	1.68	Oblonga
2	0.21	Alargada	Baja	1.76	Oblonga
3	0.26	Alargada	Baja	1.62	Oblonga
4	0.21	Alargada	Baja	1.63	Oblonga

Siendo R_f : índice de Forma de la Cuenca y C_g : Coeficiente de Gravelius. El factor R_f indica que las Cuencas 2, 3 y 4 presentan una baja susceptibilidad a inundaciones, por otro lado, la Cuenca 1 presenta una susceptibilidad a la inundación mayor respecto a las anteriores. El factor C_g muestra que las cuatro cuencas en análisis tienen una forma oblonga.

4. 7. 2. Parámetros Físicos de Relieve

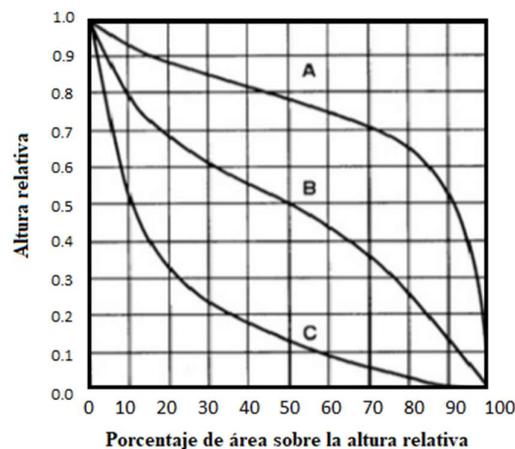
Son de gran importancia puesto que el relieve de una cuenca tiene más influencia sobre la respuesta hidrológica que su forma; con carácter general se puede decir que a mayor relieve o pendiente la generación de escorrentía se produce en lapsos de tiempo menores. Los parámetros de relieve principales son:

Curva hipsométrica o hipsográfica: representa gráficamente las cotas de terreno en función de las superficies que éstas encierran. Es decir, indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada.

La curva hipsográfica muestra el potencial erosivo debido a la forma de distribución de sus pendientes, que comparada con curvas patrones indica la presencia de una cuenca joven, madura o vieja.

En la figura 29, la curva superior (curva A) muestra una cuenca con un gran potencial erosivo y una fase de juventud; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio y madura; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria y vieja.

Figura 29: Curvas hipsográfica o hipsométricas



Fuente: <https://ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>

Altura media (Hm): es la elevación promedio referida al nivel de la estación de aforo de la boca de la cuenca. La variación altitudinal de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre su distribución térmica, y por lo tanto, en la existencia de microclimas y hábitats muy característicos de acuerdo a las condiciones locales reinantes. Se calcula como el cociente entre el volumen de la cuenca (superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados) y su superficie.

$$H_m = \frac{V_g}{S}; \dots \dots V_g = \sum h_i S_i \quad (9)$$

Donde:

V_g : volumen de relieve que da la superficie del gráfico (m^3);

S : superficie de la cuenca (m^2);

h_i : altitud media de cada área parcial comprendida entre dos curvas de nivel;

S_i : área parcial entre curvas de nivel.

Pendiente media de la cuenca (I_m): Se calcula como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca en las que la línea de máxima pendiente se mantiene constante; es un índice de la velocidad media de la escorrentía y, por lo tanto, de su poder de arrastre o poder erosivo.

$$I_m = \frac{h \left(\frac{l_0}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} l_i + \frac{l_n}{2} \right)}{S} \quad (10)$$

Donde:

h : diferencia de alturas entre curvas de nivel (m);

l_0 : longitud de la curva de nivel de menor cota (m);

$\sum l_i$: suma de las longitudes de las curvas de nivel intermedias (m);

l_n : longitud de la curva de nivel de mayor cota (m);

S : superficie de la cuenca (m^2).

Coefficiente de Torrencialidad (C_t): Este parámetro resulta de la relación entre el número de cauces de agua de orden uno y el área de la cuenca. A mayor número de cauces de orden uno y menor área, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Romero Díaz, A., 1987). Este resultado significa que el agua recorre muy poco para dirigirse a los cauces y la velocidad de descarga es mayor.

$$C_t = \frac{N_1}{S} \quad (11)$$

Donde:

C_t : Coeficiente de torrencialidad;

N_1 : Numero de cauces de orden uno;

S : Superficie de la cuenca (Km^2).

Coefficiente de masividad (C_m): Este parámetro resulta de la relación entre la altitud media de la cuenca, que se calcula por medio de la curva hipsométrica, y el área de la misma (Martonne, 1940). Su resultado es alto para cuencas de cumbres altas y bajo en cuencas donde predominan terrenos planos que presentan áreas similares.

$$C_m = \tan \alpha = \frac{H_m}{S} \quad (12)$$

Donde:

H_m : altura media de la cuenca (m);

S : superficie de la cuenca (km^2).

Rangos:

0-35: Muy montañosa

35-70: Montañosa

70-205: Relativamente plana

$C_m > 205$: Plana

Coefficiente Orográfico (CO): Este parámetro combina los dos parámetros del relieve actuantes en los procesos erosivos: la altura media, sobre la energía potencial del agua; y la inclinación característica de las laderas de la cuenca, sobre la energía cinética del flujo de la escorrentía superficial.

$$CO = H_m \tan \alpha \quad (13)$$

Donde:

H_m : altura media de la cuenca (m);

$Tg \alpha$: coeficiente de masividad;

$CO < 6$ Relieve poco acentuado;

$CO > 6$ Relieve acentuado.

Valores de $CO > 25$ indica cuencas de edad geológica reciente.

De manera siguiente, se puede ver todos los datos hipsométricos de las cuencas (tabla 10 a la 13). En las figuras 30 a la 33 se muestran las curvas hipsométricas de las cuatro cuencas, que afectan con su dinámica al área de estudio.

Tabla 3: Datos hipsométricos de la Cuenca 1.

Cuenca 1							
Nº	Cotas (m)			Área (Km ²)			
	Min	Max	Promedio	Área entre curvas (Km ²)	Acumulado (Km ²)	Acumulado (%)	Inter (%)
1	285	285	285	0.00002	2.27655	100	0.0009
2	286	295	290.5	0.00686	2.26969	99.70	0.3014
3	296	300	298	0.00315	2.26654	99.56	0.1385
4	301	305	303	0.00393	2.26260	99.39	0.1728
5	306	310	308	0.10714	2.15547	94.68	4.7062
6	311	315	313	0.46774	1.68773	74.14	20.545
7	316	320	318	0.28907	1.39866	61.44	12.697
8	321	325	323	0.28018	1.11848	49.13	12.307
9	326	330	328	0.18629	0.93220	40.95	8.1828
10	331	335	333	0.14017	0.79203	34.79	6.1569
11	336	340	338	0.16425	0.62778	27.58	7.2150
12	341	345	343	0.56861	0.05917	2.60	24.976
13	346	350	348	0.05598	0.00319	0.14	2.4588
14	351	355	353	0.00315	0.00004	0.0018	0.1385
15	356	356	356	0.00002	0.00002	0.0009	0.0009
TOTAL				2.277		100	

Figura 30: Curva Hipsométrica de Cuenca 1.

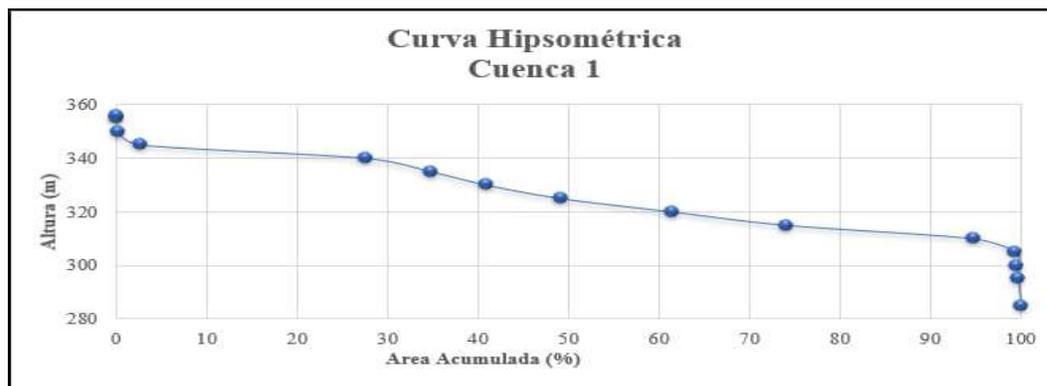


Tabla 4: Datos hipsométricos de la Cuenca 2.

Cuenca 2							
Cotas (m)				Área (Km ²)			
Nº	Min	Max	Promedio	Área entre curvas (Km ²)	Acumulado (Km ²)	Acumulado (%)	Inter (%)
1	276	276	276	0.00047	1.76187	100	0.0264
2	277	280	278.5	0.00241	1.75946	99.86	0.1370
3	281	285	283	0.00113	1.75833	99.80	0.0640
4	286	290	288	0.00094	1.75739	99.75	0.0535
5	291	295	293	0.02106	1.73632	98.55	1.1954
6	296	300	298	0.01131	1.72502	97.91	0.6416
7	301	305	303	0.00829	1.71673	97.44	0.4705
8	306	310	308	0.01447	1.70226	96.62	0.8212
9	311	315	313	0.39020	1.31206	74.47	22.1471
10	316	320	318	0.30676	1.00529	57.06	17.4113
11	321	325	323	0.22070	0.78459	44.53	12.5267
12	326	330	328	0.20847	0.57612	32.70	11.8324
13	331	335	333	0.09524	0.48088	27.29	5.4057
14	336	340	338	0.15979	0.32108	18.22	9.0695
15	341	347	344	0.32062	0.00046	0.026	18.1977
TOTAL				1.76187			100

Figura 31: Curva Hipsométrica de Cuenca 2.

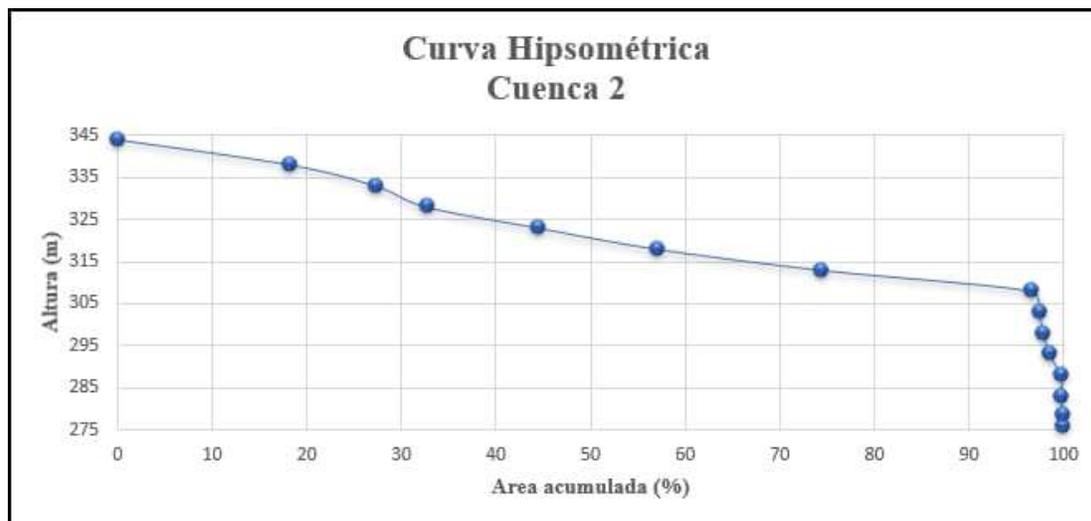


Tabla 5: Datos hipsométricos de la Cuenca 3.

Cuenca 3							
Cotas (m)				Área (Km ²)			
Nº	Min	Max	Promedio	Área entre curvas (Km ²)	Acumulado (Km ²)	Acumulado (%)	Inter (%)
1	279	284	281.5	0.01315	2.916	100	0.4510
2	285	289	287	0.01874	2.897	99.36	0.6428
3	290	294	292	0.02168	2.875	98.61	0.7434
4	295	299	297	0.02323	2.852	97.82	0.7968
5	300	304	302	0.02806	2.824	96.85	0.9623
6	305	309	307	0.03674	2.787	95.59	1.2602
7	310	314	312	0.56888	2.218	76.08	19.5116
8	315	319	317	0.39645	1.822	62.49	13.5974
9	320	324	322	0.36547	1.456	49.95	12.5349
10	325	329	327	0.24285	1.214	41.62	8.3294
11	330	334	332	0.16458	1.049	35.98	5.6446
12	335	339	337	0.16481	0.884	30.32	5.6526
13	340	344	342	0.25583	0.628	21.55	8.7746
14	345	349	347	0.61491	0.013	0.46	21.0905
15	350	350	350	0.00023	0.013	0.45	0.0080
TOTAL				2.916			100

Figura 32: Curva Hipsométrica de Cuenca 3.

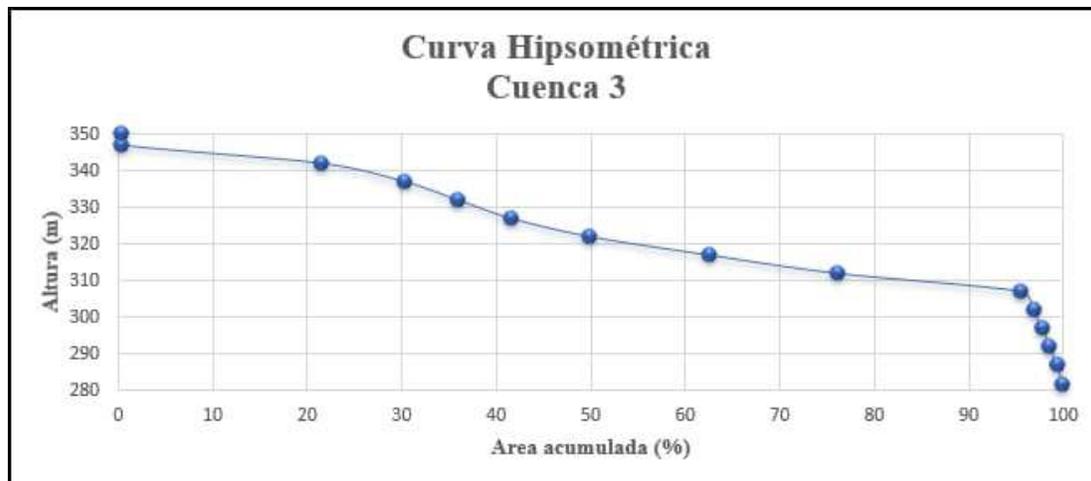
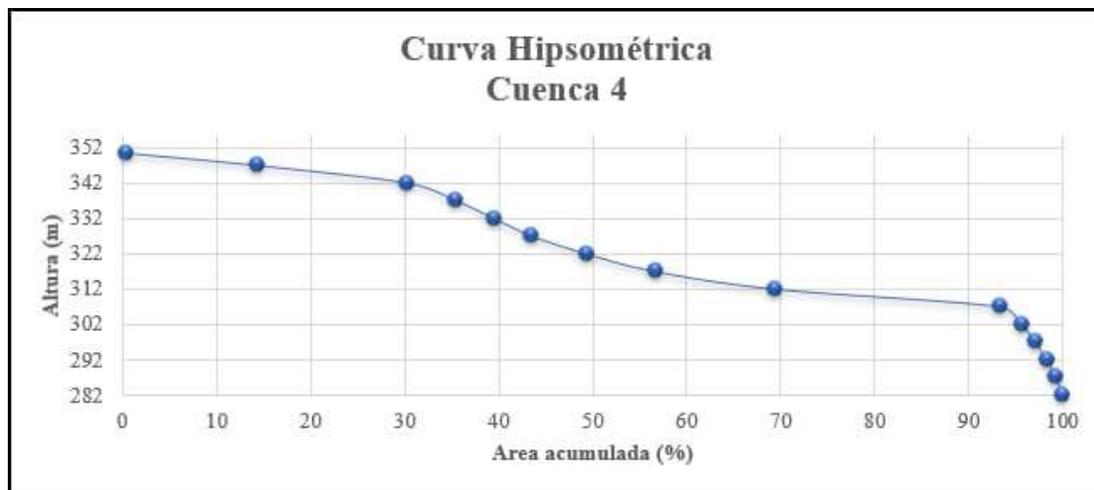


Tabla 6: Datos hipsométricos de la Cuenca 4.

Cuenca 4							
Cotas (m)				Área (Km ²)			
Nº	Min	Max	Promedio	Área entre curvas (Km ²)	Acumulado (Km ²)	Acumulado (%)	Inter (%)
1	280	284	282	0.01190	3.97499	100	0.2995
2	285	289	287	0.02900	3.94598	99.27	0.7296
3	290	294	292	0.03942	3.90656	98.28	0.9917
4	295	299	297	0.04656	3.86001	97.11	1.1712
5	300	304	302	0.05833	3.80168	95.64	1.4673
6	305	309	307	0.08989	3.71179	93.38	2.2615
7	310	314	312	0.95335	2.75844	69.39	23.9837
8	315	319	317	0.50712	2.25132	56.64	12.7577
9	320	324	322	0.29192	1.95941	49.29	7.3438
10	325	329	327	0.22824	1.73116	43.55	5.7420
11	330	334	332	0.16113	1.57003	39.50	4.0536
12	335	339	337	0.16018	1.40986	35.47	4.0296
13	340	344	342	0.20452	1.20534	30.32	5.1451
14	345	349	347	0.63638	0.56896	14.31	16.0096
15	350	351	350.5	0.55706	0.01190	0.30	14.0140
TOTAL				3.975			100

Figura 33: Curva Hipsométrica de Cuenca 4



Por el estudio realizado sobre las curvas hipsométricas elaboradas por cada cuenca, considerando los valores numéricos y el proceso de graficación, se puede observar en las gráficas que todas las curvas hipsométricas indican, que las cuencas en estudio tienen un gran potencial erosivo. En los gráficos también se puede concluir que las cuatro cuencas se encuentran en la fase de juventud.

En la tabla 14, se presentan los valores obtenidos de altura media (H_m), coeficiente de torrencialidad (C_t), pendiente media (I_m), coeficiente de masividad (C_m) y coeficiente orográfico (CO) de cada cuenca.

Tabla 7: Parámetros físicos de relieve

Cuenca	H_m (m)	I_m (%)	C_t	C_m	CO
1	327. 2	8. 89	52, 86	144. 1	0. 047
2	294. 7	7. 02	54, 54	167. 4	0. 06
3	327	6. 23	39, 31	112. 8	0. 036
4	327. 7	5. 42	31, 98	82. 5	0. 027

El Coeficiente de Torrencialidad, da indicios de que las dos primeras cuencas (Cuenca 1 y 2), tienen un mayor coeficiente, por ende, el agua que cae sobre ellas tiene un menor recorrido para llegar al cauce principal y de esta forma la velocidad de descarga es mayor respecto al de las otras dos (Cuenca 3 y 4). El Coeficiente de masividad C_m , muestra que todas las cuencas son relativamente planas. El Coeficiente Orográfico CO , indica que todas las cuencas tienen un relieve poco acentuado.

4. 7. 3. Parámetros Relativos a la Red Hidrográfica

Densidad de drenaje (D_d): Es la relación entre la longitud total de todos los cauces con su área.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} \quad (14)$$

Donde:

D_d : densidad de drenaje (km/km²);

$\sum L_i$: suma de las longitudes de los cursos que se integran en la cuenca (km);

S : superficie de la cuenca (km²).

Rangos

Gruesa: $D_d < 5$ km/km²

Media: $5 < D_d < 13. 7$ km/km²

Fina: $D_d > 13. 7$ km/km²

Este índice permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca.

Comúnmente se señala que si $Dd \geq 2,74$ se considera una cuenca bien drenada. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor potencial de erosión. Por otra parte, si sólo consideramos este índice, sin tener en cuenta otros factores del medio físico de la cuenca, se puede decir que cuanto mayor sea la densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo.

Pendiente media del cauce (J_c): Es la relación existente entre el desnivel altitudinal del cauce y su longitud. Se calcula mediante la expresión:

$$J_c = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{L_c} \quad (15)$$

Donde:

J_c : pendiente (m/m).

$H_{m\acute{a}x}$: altitud máxima del cauce (m).

$H_{m\acute{i}n}$: altitud mínima del cauce (m).

L_c : longitud del cauce (m).

Tiempo de concentración (T_c): El tiempo de concentración de una cuenca viene a representar el tiempo que demora una gota de lluvia en recorrer desde la parte más alta de la cuenca hacia la parte más baja. Es el parámetro más importante para el diseño y es característico de cada cuenca. El tiempo de concentración se relaciona directamente con el hidrograma de escorrentía directa. Diversos autores desarrollaron fórmulas para calcular el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas. Los métodos que se adoptaron en este trabajo son los siguientes:

SCS (1973)

$$T_c = \frac{L_c^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{441xJ_c^{0.5}} \quad (16)$$

Donde:

T_c : tiempo de concentración (hr);

L_c : longitud del cauce principal de la cuenca (km);

J_c : Pendiente del curso principal (% ó m/m).

La ecuación es desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) a partir de información de cuencas de uso agrícola. La misma ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanizadas con áreas máximas de 800 ha.

Temez (1978)

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L_c}{J_c^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (17)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (hr),

Lc: Longitud del mayor recorrdio del escurrimiento (km),

Jc: Pendiente del curso principal (m/m).

Los parámetros relativos a la red hidrográfica tales como Densidad de drenaje (Dd), Pendiente media del cauce (Jc) y Tiempo de concentración (Tc), se dan en la tabla 15. En función de los valores calculados se puede establecer que todas las cuencas poseen buen drenaje. Las cuencas 1 y 2 son las que presentan mayor densidad de escurrimientos, por ende, mayor potencial de erosión.

Tabla 8: Parámetros Relativos a la Red Hidrográfica

Cuenca	Dd	Jc (%)	Tc (Temez)	Tc (SCS)	Tc adoptado (h)	Tlag adoptado (h)
1	13.18	0.025	1.11	1.12	1.11	0.67
2	13.34	0.024	1.36	1.36	1.36	0.82
3	11.41	0.021	1.56	2.40	1.98	1.19
4	8.78	0.015	2.05	2.25	2.15	1.29

4.8. Tormentas de Diseño Adoptadas

Las tormentas de diseño o proyecto son patrones de precipitación definidos para utilizarse en el cálculo de la escorrentía y el diseño de obras hidráulicas. Se construyen a partir de información histórica considerando las características generales de la precipitación en la zona donde se aplicarán. Estas tormentas de diseño tienen una probabilidad de ocurrencia elegida. Se determinaron las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para la zona de estudio mediante el análisis de la información histórica de las precipitaciones máximas del área, esta información fue extraída de la estación meteorológica “Aero Neuquén”.

Según el modelo de precipitación adoptado para este trabajo, el cual corresponde a la estación meteorológica “Aero Neuquén”, considerando una duración de 1h, 1.5h y 2 h, se obtienen los siguientes valores de precipitación total para cada recurrencia (tabla 16).

En las tablas 17, 18 y 19 se observan los datos de precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para los periodos de recurrencia adoptados.

Tabla 9: Precipitaciones para tormentas de cierta recurrencia.

TR (Años)	2	5	10	25	50	100
P (mm)	35	57	74	100	122	146

Tabla 10: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 1 h para periodos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

TR (Años)	P24h (mm)	P1h (mm)	I24h (mm/h)	Id (mm/h) (MIC)	mm para cierto Tc
2	35	20.65	1.46	20.39	20.39
5	57	33.63	2.38	33.20	33.20
10	74	43.66	3.08	43.11	43.11
25	100	59.000	4.17	58.25	58.25
50	122	71.98	5.08	71.07	71.07
100	146	86.14	6.08	85.05	85.05

Tabla 11: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 1.5 h para periodos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

TR (Años)	P24h (mm)	P1h (mm)	I24h (mm/h)	Id (mm/h) (MIC)	mm para cierto Tc
2	35	20.65	1.46	14.56	21.84
5	57	33.63	2.38	23.71	35.57
10	74	43.66	3.08	30.79	46.18
25	100	59.000	4.17	41.60	62.41
50	122	71.98	5.08	50.76	76.14
100	146	86.14	6.08	60.74	91.11

Tabla 12: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 2 h para periodos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

TR (Años)	P24h (mm)	P1h (mm)	I24h (mm/h)	Id (mm/h) (MIC)	mm para cierto Tc
2	35	20.65	1.46	11.47	22.94
5	57	33.63	2.38	18.68	37.35
10	74	43.66	3.08	24.25	48.50
25	100	59.000	4.17	32.77	65.53
50	122	71.98	5.08	39.98	79.95
100	146	86.14	6.08	47.84	95.68

Rapacioli y D'Amico (2013), utilizan el Método de la Intensidad Continua (MIC) para obtener curvas generalizadas de intensidad de precipitación para la cuenca del Río Colorado y recomiendan la utilización de la siguiente ecuación para precipitaciones con duraciones (D) mayor a 1 hora:

$$ID \left(\frac{mm}{h} \right) = 13.98 \cdot I_{24} \cdot D^{-0.83} \quad (18)$$

Donde:

ID: Intensidad máxima para la duración D y recurrencia elegida,

D: Duración en horas (mayor a 1 hora),

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

Aplicando esta ecuación y teniendo en cuenta que:

$$P = I \cdot D \quad (19)$$

Donde:

P: Precipitación total (mm),

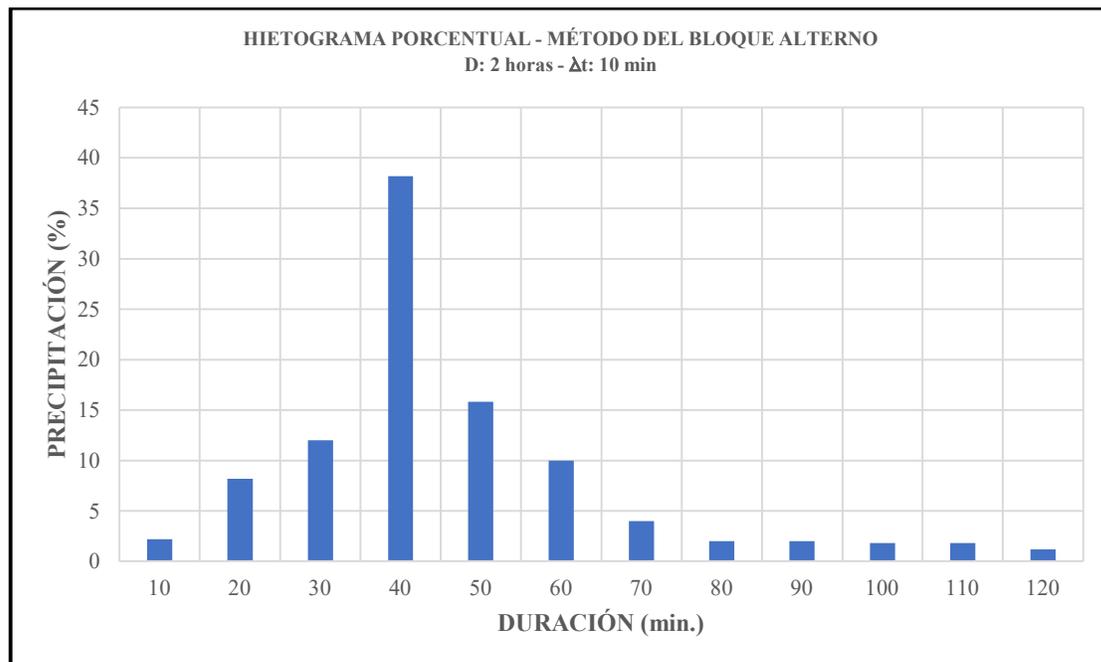
I: Intensidad Máxima para las duraciones adoptadas (mm/h),

D: Duración de tormenta adoptada para cada cuenca.

Con las ecuaciones anteriormente mencionadas es posible obtener las precipitaciones totales (mm) para las duraciones de tormenta adoptadas y los periodos de recurrencia establecidos.

Por otro lado, en los métodos de diseño hidrológicos actuales, en donde se calculan hidrogramas, es necesario contar con una distribución temporal de la precipitación. El más utilizado es el método del Bloque alterno. Este método especifica el volumen de precipitación que ocurre en un intervalo "n" de tiempo sucesivos de duración Δt , sobre una duración total especificada previamente, $T_d = n \cdot \Delta t$. En base a esto, se construyeron los hietogramas de bloque alterno porcentuales (figura 34, 35 y 36), según los requerimientos establecidos por la subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén.

Figura 34: Hietograma de bloque alterno porcentual para tormenta de 2 hora



La metodología a seguir fue la siguiente:

- Se define el periodo de retorno de diseño.
- Se calcula el volumen de precipitación multiplicando la intensidad por la duración ($P = I \cdot D$).
- Se calcula la cantidad de precipitación correspondiente a cada intervalo de tiempo tomando diferencias entre valores sucesivos de volumen de precipitación.

- Se reordenan los bloques con el fin que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el pluviograma de diseño.

Figura 35: Histograma de bloque alterno porcentual para tormenta de 1.5 hora

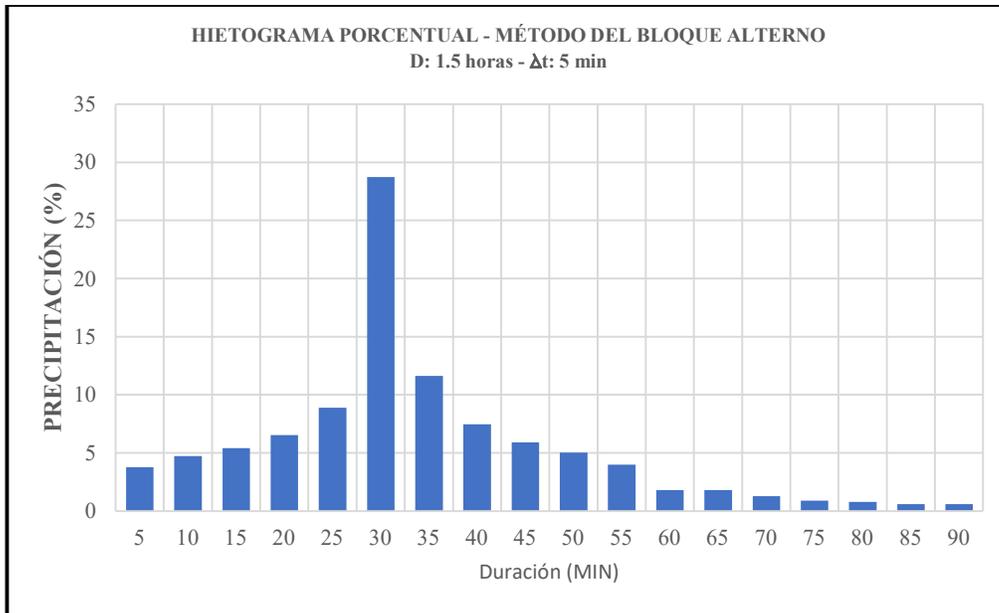
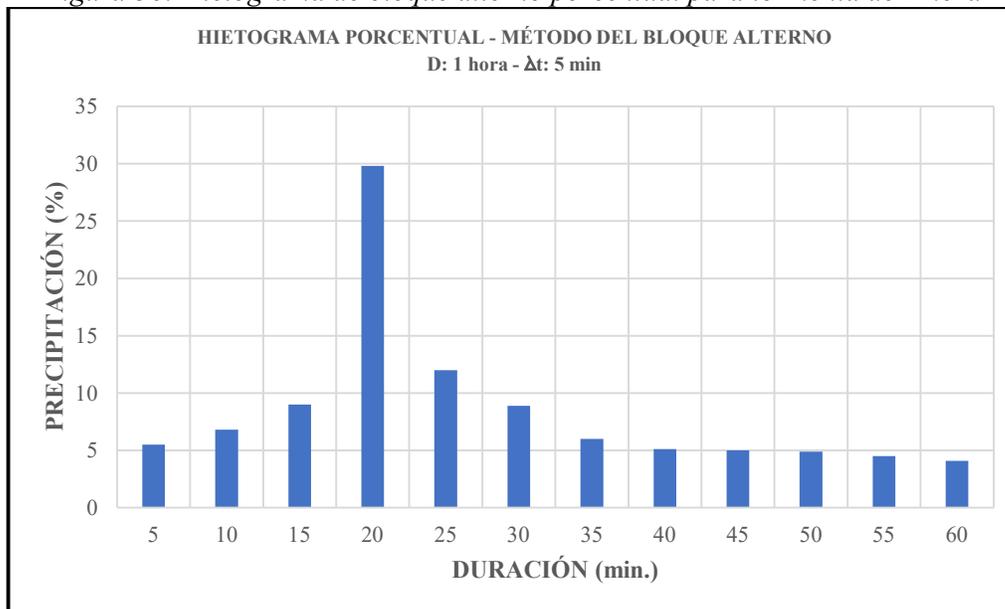


Figura 36: Hietograma de bloque alterno porcentual para tormenta de 1 hora



- Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén utiliza el método de Bloque Alterno con el pico del hietograma entre un 25 – 33% de la duración total. En este Trabajo Final de Licenciatura se sigue la misma normativa.

- En base a esto, se confeccionan los hietogramas de bloque alterno porcentuales para cada cuenca y considerando cada una de las duraciones adoptadas que

luego combinándolas con los valores de las precipitaciones totales de las tablas 17, 18 y 19, obtendremos los hietogramas porcentuales generados.

4. 9. Modelación Hidrológica

La escorrentía en el presente trabajo se obtiene aplicando el modelo *HEC-HMS* (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*), adoptando una tormenta de diseño del modelo de Intensidad de Precipitación puesta a disposición por la estación “Aero Neuquén”, el Método del Número de Curva, como método de abstracción y el Método de Snyder (1938) para la transformación de lluvia-escorrentía y no se consideró el flujo base o subterráneo, dado que interesa conocer la escorrentía superficial que es el que aporta volumen de agua en una crecida aluvional.

4. 9. 1. Modelo HEC-HMS

El Software HEC-HMS permite simular procesos de lluvia-escurrimiento de cuencas, a través de la integración de diferentes métodos hidrológicos ya sea concentrados o distribuidos para el tránsito de caudales.

Es un programa gratuito, de dominio público y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE. UU. El mismo puede conectarse a un sistema de información geográfica (ArcGIS).

El programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. Puede hacer corridas de precipitación o de la proporción de flujo.

El modelo se compone de cuatro módulos (*Basin Model, Meteorologic Model, Control Specifications and input data*) que caracterizan el comportamiento hidrológico del área de drenaje y la aplicación de un tipo específico de lluvia sobre dicha área.

El modelo contiene:

- a) Descripción física de la cuenca
- b) Descripción meteorológica
- c) Simulación hidrológica
- d) Estimación de parámetros
- e) Análisis de simulaciones
- f) Conexión con SIG

Las fases de trabajo del programa son:

- a) Separación de la lluvia neta, es decir, se calcula qué parte de la precipitación va a producir escurrimiento directo.
- b) Cálculo del escurrimiento directo producido por esa lluvia neta.
- c) Suma del escurrimiento directo y el base, si existía previamente. Cálculo de la evolución del escurrimiento base a lo largo del tiempo.
- d) Cálculo de la evolución del hidrograma a medida que discurre a lo largo del cauce.

4. 9. 1. 1. Componentes

- **Modelo de Cuenca (*Basin Model*):** Representa la cuenca física, el usuario lo desarrolla agregando y conectando elementos hidrológicos. El programa considera subcuencas, tramos de tránsito, uniones, fuentes, derivaciones, entre otros. En cada uno de ellos se asigna atributos y parámetros. Los parámetros que utiliza este modelo son: las pérdidas iniciales, la transformación de lluvia en escurrimiento y el método del flujo base.

- **Modelo meteorológico (*Meteorologic Model*):** En el que se define una precipitación hipotética o histórica para ser utilizada junto con el modelo de precipitación. En el presente trabajo se adoptan hietogramas acumulados para cada una de las recurrencias establecidas, generados a partir del Modelo de Intensidad de Precipitación para la región del Alto Valle del Río Negro, utilizando el Método de las Intensidades Instantáneas con coeficiente de avance tormentas $r = 0,25$; una duración de 4 horas y paso de 5 minutos

- **Control de especificaciones (*Control Specifications*):** En esta etapa del proceso se fija el lapso de tiempo de una corrida de simulación. Se establece la fecha y hora de inicio de la lluvia y el término de la misma con un intervalo de tiempo que puede variar según sea conveniente. En este trabajo se realizará en un período de 24 horas y un intervalo de tiempo de 5 minutos para el cálculo del hidrograma de escurrimiento.

- **Datos de entrada (*Input Data*):** Existen cinco grupos de información que deben suministrarse a HEC-HMS para efectuar las simulaciones:

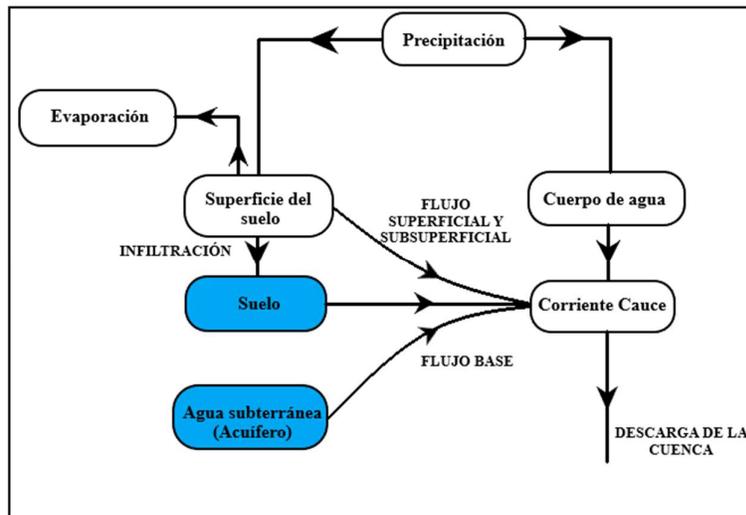
1. Precipitación histórica o de diseño.
2. Características del suelo.
3. Información morfométrica de las subcuencas.
4. Datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
5. Características hidráulicas de los tramos de canal y de la capacidad de los embalses (métodos de tránsito).

Para la validación y análisis, se necesitan:

1. Registros de precipitación y caudales de salida (hietogramas e hidrogramas).
2. Determinación de las condiciones iniciales de humedad en los suelos (difícil de lograr).

Finalmente, el diagrama de flujo se puede apreciar en la figura 37.

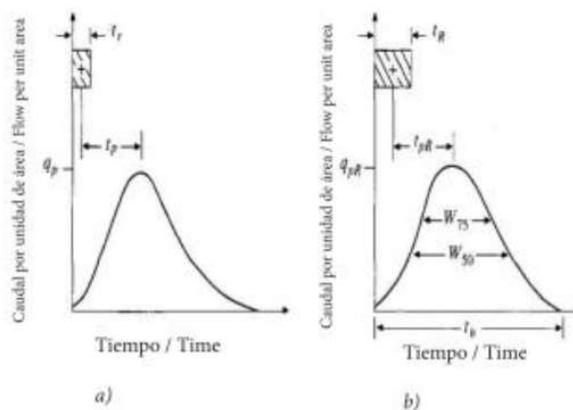
Figura 37: Representación de la escorrentía en una cuenca hidrográfica según HEC-HMS.



4.9.2. Método de Snyder

El hidrograma unitario sintético generado por Snyder (1938) relaciona las características del hidrograma unitario estándar, a partir de las cuales pueden calcularse las características de un hidrograma unitario requerido (figura 38) para una duración de lluvia dada: el caudal pico por unidad de área de la cuenca q_{pr} , el retardo de la cuenca t_{pr} (diferencia entre el centroide del hietograma de exceso de lluvia y el pico del hidrograma unitario), el tiempo de base t_b y los anchos W (en unidades de tiempo) del hidrograma unitario al 50% y 75% del caudal pico. Con estas características puede representarse el hidrograma unitario requerido.

Figura 38: a). Hidrograma Unitario de Snyder b). Hidrograma Unitario Requerido



Fuente: Snyder (1938)

Snyder, definió el hidrograma unitario estándar como aquel cuya duración de lluvia (T_r) se relaciona con el tiempo de retardo (T_L) de la siguiente forma:

$$T_L = 5.5 T_r \quad (20)$$

Para el hidrograma unitario estándar encontró que:

La relación para obtener el tiempo de retardo:

$$T_L = C C_t (L L_C)^{0.3} \quad (21)$$

Donde

T_L : Tiempo de retardo (h);

C_t : Coeficiente de cuenca, varía entre 1.35 (pendientes altas) y 1.65 (pendientes bajas);

L : Longitud del cauce principal desde la divisoria a la salida de la cuenca (km);

L_C : Longitud del cauce principal desde el punto más cercano al centroide de la cuenca hasta la salida de la cuenca (km);

C : una constante conversión de unidades (0.75 para SI).

Si la duración de los hidrogramas unitarios buscados para la cuenca hidrográfica de interés es diferente de la especificada por la ecuación (19), se puede utilizar la siguiente relación

$$T_{LR} = T_L - \frac{T_r - T_R}{4} \quad (22)$$

T_R : duración establecida,

T_{LR} : tiempo de retardo modificado

Además, Snyder descubrió que el tiempo de retardo (T_L) y el pico por unidad de exceso de precipitación por unidad de área de la cuenca se relacionan a través de:

$$\frac{U_p}{A} = C \frac{C_p}{T_L} \quad (23)$$

Donde:

U_p : pico del HU;

A : área de drenaje de las cuencas hidrográficas;

C_p : coeficiente pico del HU;

C : constante de conversión (2.75 en SI)

El SCS (1972) a partir de un estudio de hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales de distintos tamaños indica que el tiempo de retardo T_L se puede obtener en función del tiempo de concentración de la cuenca T_C :

$$T_L = 0.6 T_C \quad (24)$$

Donde:

T_L : Tiempo de retardo (h);

T_C : Tiempo de concentración (h).

Este último criterio es el que se utiliza para obtener los tiempos de retardo. En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos de los mismos.

El control de Especificaciones (Control Specifications) define el periodo de tiempo en que se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar para graficar el hidrograma. Se utilizará un periodo de 24 horas y un intervalo de tiempo de 1 minuto para graficar cada punto del hidrograma de escurrimiento.

Tabla 13: Tc y Tlag cuencas aluvionales

Cuenca	Tc (hr)	Tc (min)	Tlag (hr)	TL (hr)
1	1.11	66.6	0.67	0.67
2	1.36	81.6	0.82	0.82
3	1.98	118.8	1.19	1.19
4	2.15	129	1.29	1.29

En la figura 39 se muestra la tipología empleada para la determinación de la escorrentía de las cuencas aluvionales. En la figura 40 los Hidrogramas de crecida para cada una de las cuencas a un TR de 100 Años, resultado de las simulaciones.

Cabe destacar nuevamente, que se consideró para el análisis de evaluación de escorrentía de las cuencas el estado de humedad intermedia (AMCII).

Figura 39: Esquema tipológico en HEC-HMS para la simulación de la escorrentía en las cuencas.

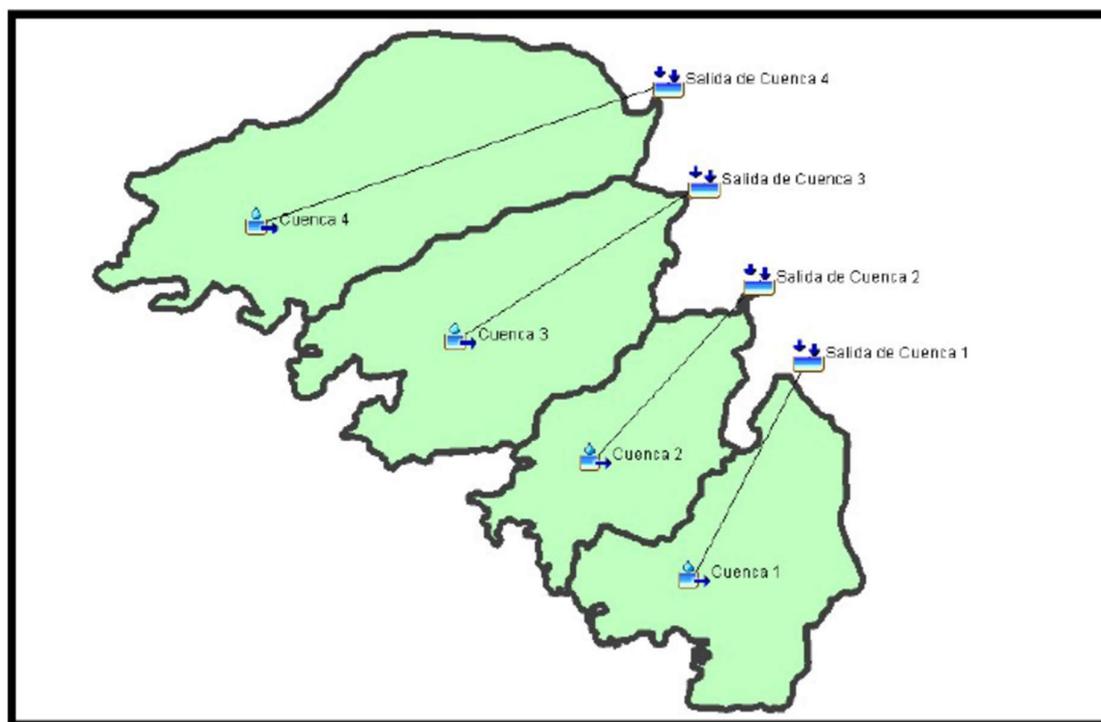
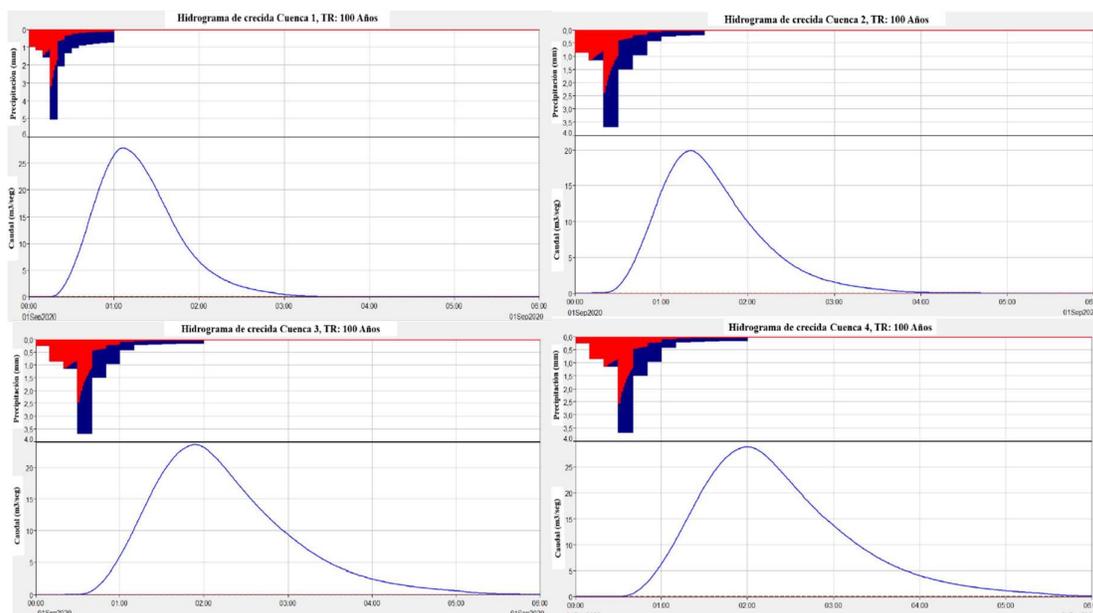


Figura 40: Hidrograma de crecida Cuenca 1, 2, 3 y 4, TR: 100 Años.



En las tablas 21 y 22 se puede ver el resultado del modelado HEC-HMS.

Tabla 14: Resultados modelación hidrológica con HEC-HMS.

	TR2			TR5			TR10		
Cuenca	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Pe (mm)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Pe (mm)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Pe (mm)
1	1.4	0.005	20.39	5	0.020	33.20	8.6	0.034	43.11
2	0.9	0.004	21.84	3.4	0.016	35.57	6	0.028	46.18
3	0.9	0.006	22.94	3.8	0.024	37.35	6.8	0.044	48.50
4	1	0.007	22.94	4.4	0.030	37.35	8.1	0.055	48.50

Tabla 15: Resultados modelación hidrológica con HEC-HMS.

	TR25			TR50			TR100		
Cuenca	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Pe (mm)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Pe (mm)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Pe (mm)
1	15	0.058	58.25	21	0.08	71.07	27.9	0.109	85.05
2	10.7	0.048	62.41	14.9	0.07	76.14	19.9	0.09	91.11
3	12.3	0.078	65.53	17.5	0.110	79.95	23.6	0.148	95.68
4	14.9	0.1	65.53	21.4	0.144	79.95	28.9	0.194	95.68

4. 10. Fragilidad Hidrológica

La fragilidad hidrológica se define como la susceptibilidad que tiene un terreno de cambiar la capacidad de generar escorrentías, ante cambios de pendientes, cobertura vegetal, manejo de suelo, índice CN, etc.

La fragilidad hidrológica de la zona a estudiar se determina generando un mapa distribuido mediante un índice que combina los efectos que pueden producir los cambios en variables como el índice CN, la pendiente del terreno y la cercanía a cauces naturales. El mismo queda definido por la ecuación (Cazorzi, 2002):

$$FH = \frac{(100-CN) + (100) + P}{3} \quad (25)$$

Siendo:

FH: índice de fragilidad hídrica (de 0 a 100).

CN: índice curva número.

DC: distancia a cursos de la red hidrográfica (m).

P: pendiente del terreno (%).

El mapa de pendientes en porcentajes (MP), se deriva del MDE. La obtención del mapa de distancia a cursos resulta de la herramienta *multibuffering* a partir de la rasterización de la red de drenaje (figura 41). Por otro lado, se estableció la siguiente clasificación de fragilidad hidrológica, FH (tabla 23).

Tabla 16: Fragilidad Hidrológica (FH)

Valores	Fragilidad Hidrológica
0-20	Muy Baja
20-35	Baja
35-70	Media
70-100	Alta

Realizando álgebras de mapas, se obtiene el mapa de fragilidad hidrológica (FH) (figura 42).

De las figuras, se observa que prácticamente toda el área presenta fragilidad media a baja, siendo escasa la fragilidad Alta (tabla 24).

Tabla 17: Resultados de Fragilidad por Cuenca.

Fragilidad Hidrológica	Porcentaje de ocupación			
	Cuenca 1	Cuenca 2	Cuenca 3	Cuenca 4
Muy Baja	39.90%	29%	32.27%	40.92%
Baja	35.70%	45%	38.54%	35.22%
Media	21.90%	24.45%	27.29%	22.27%
Alta	2.50%	1.55%	1.89%	1.59%

Figura 41: Mapa de distancia a cursos fluviales.

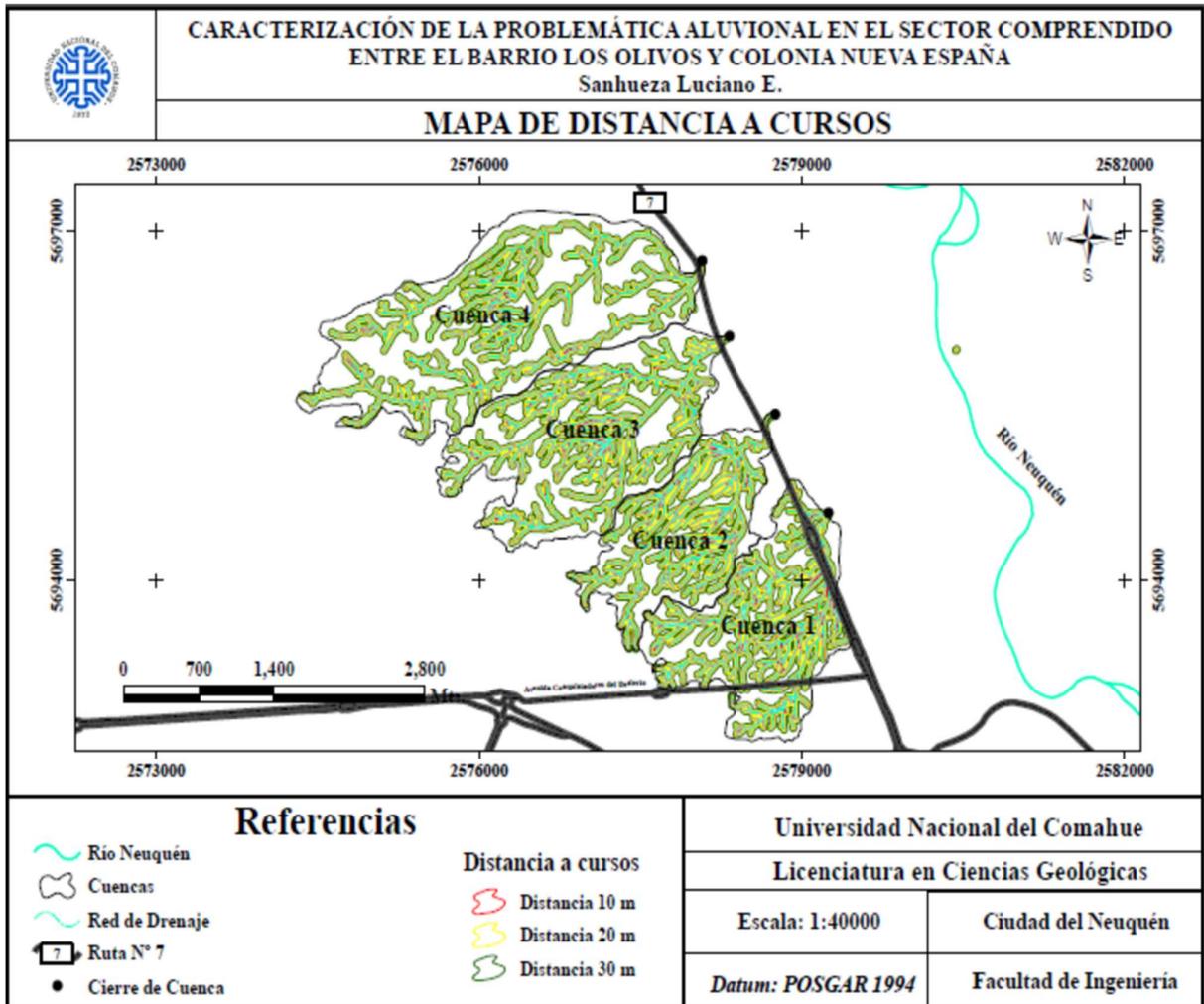
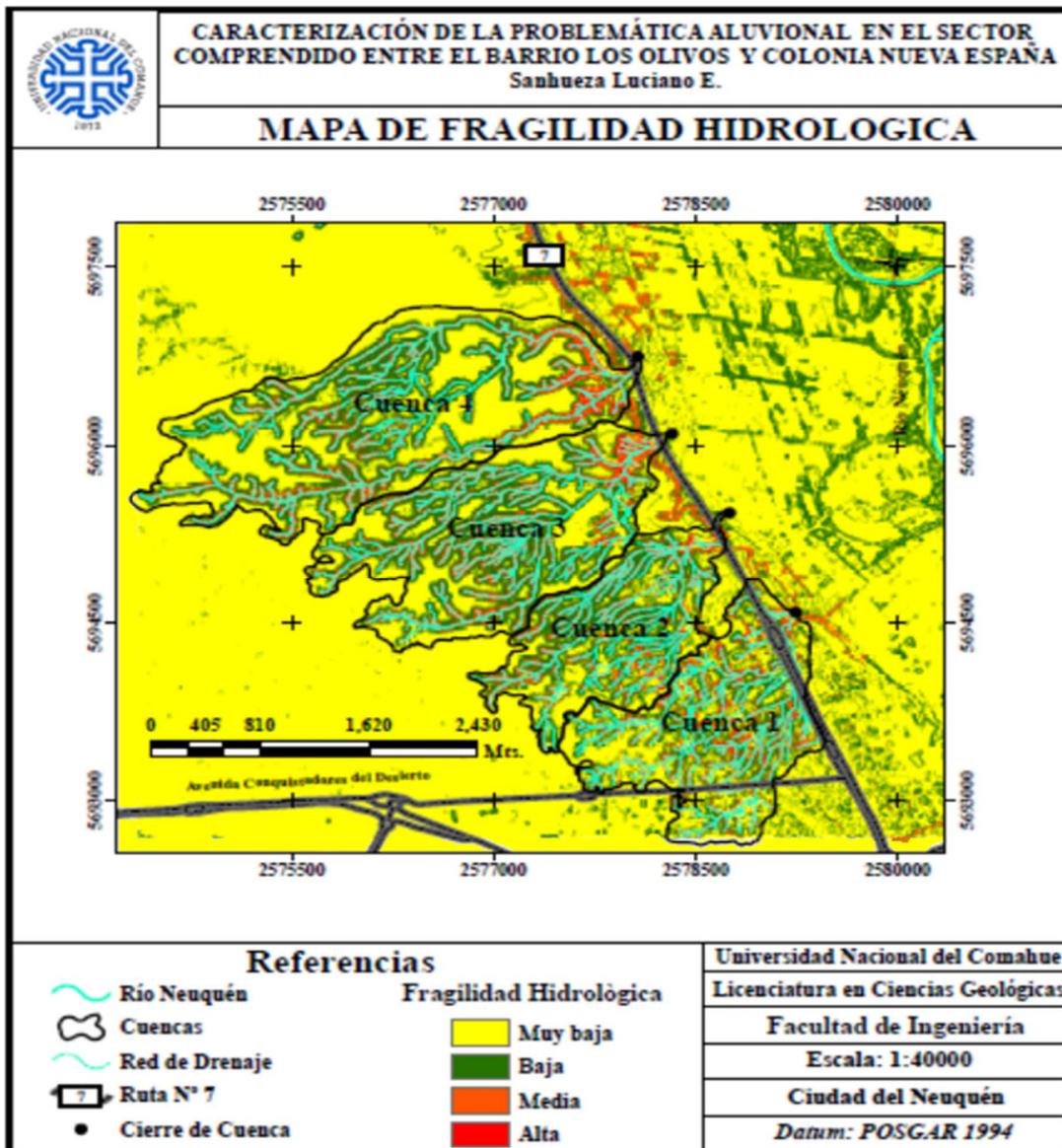


Figura 42: Mapa de Fragilidad Hidrológica.



4. 11. Determinación de los Parámetros que Intervienen en el Cálculo de la Producción de Sedimentos– MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)

Para la cuantificación de los sedimentos producidos a la salida de la cuenca hidrográfica, se hace uso del modelo empírico de producción de sedimentos “MUSLE”, utilizado por Williams y Berndt (1977), el cual se basa en una modificación a la ecuación universal de pérdida de suelo, “USLE” desarrollada por Williams (1975).

La versión de “MUSLE” se define por la siguiente ecuación:

$$Y = 11,8(V_{TR}Q_{TR})^{0,56}KLSCP \quad (26)$$

Siendo:

Y : Producción de sedimentos por un evento individual, en toneladas métricas (T);

V_{TR} : Volumen de escorrentía del evento (m³);

Q_{TR} : Caudal máximo (m³/s);

K : Factor de erodabilidad del suelo (T*Hora/Newton*Ha);

LS : Factor topográfico;

C : Factor cobertura y manejo;

P : Factor prácticas de conservación.

Tanto V_{TR} como Q_{TR} , se obtienen con la modelación hidrológica.

4. 11. 1. Factor K

El factor K expresa la erosionabilidad del suelo, en comparación con la medida en una parcela patrón de 22,13 m de largo, 9 % de pendiente, en barbecho y labranza continua (Hernández y Dufilho, 2012). Representa la susceptibilidad del suelo a la acción de agentes erosivos y reconoce que sus propiedades físicas, químicas y biológicas están estrechamente relacionadas a las tasas de erosión. En simples palabras, la erosionabilidad se define como la facilidad con la cual las partículas de suelo son desprendidas por las gotas de lluvia o por flujo superficial mientras dure y depende de la materia orgánica, la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la capacidad de infiltración y la estructura del perfil.

Como el factor K está relacionado con las propiedades del suelo, su estimación se realizó mediante el análisis de 7 muestras de suelos recolectadas en el área en estudio (Figura 16).

Los Valores de K son asignados a partir del Nomograma propuesto por Wischmeier *et al.* (1971), de erosionabilidad, que combina el efecto del tamaño de las partículas y porcentaje de materia orgánica para obtener una primera aproximación de erosionabilidad y luego con el código de la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil se ajusta el valor definitivo (Rapacioli, 2007; Hernández y Dufilho, 2012). Además, Wischmeier *et al.* (1971), determina la erodabilidad por medio de un simulador de lluvia, un valor medio que incluye una variabilidad apreciable de tormentas y antecedente de humedad del suelo.

$$100K = [10^{-4}2.71T^{1.14}12 - MO + 4.2E - 2 + 3.2P - 3] \quad (25)$$

Donde:

T : Parámetro de textura de los 15 cm superficiales;

$$T = [100 - A_cL + A_{rmf}] \quad (27)$$

$T = [100 - AC L + Armf]$;

$L + Armf$: limo más arena fina (0, 1 – 0, 002 mm);

AC : arcilla (< 0, 002 mm);

MO : contenido en materia orgánica (%);

E : parámetro de estructura;

P : parámetro de permeabilidad.

Para determinar el valor del factor K, se utilizó el método propuesto por Hernández y Dufilho (2012), donde se tomó la descripción del tipo de textura que presenta el horizonte superficial. Luego utilizando el triángulo de texturas de la clasificación del USDA, se ubicó el punto en la zona central de la clase textural a la que pertenece la muestra y se obtuvieron los porcentajes de los componentes mencionados en los lados del triángulo (tabla 25).

Tabla 18: Porcentajes de arcilla, limo y arena por muestra de suelo en el triángulo textural, utilizando como dato de entrada la textura de la muestra de suelo.

Textura Muestra de Suelo	Datos generados en el triángulo textural		
	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)
Franco arenoso	15	20	65
Franco arcilloso	30	30	40
Franco	20	40	40
Areno franco	5	15	80
Franco limoso	20	60	20

Los valores del parámetro físico de estructura y de permeabilidad se dan en las Tablas 26 y 27 respectivamente.

Tabla 19: Valores del parámetro de estructura.

Parámetro de estructura para los 15 – 18 cm superficiales	
1	Granular muy fina (< 1 mm)
2	Granular fina (1 - 2 mm)
3	Granular media (2 - 5 mm) a gruesa (5 – 10 mm)
4	Laminar, maciza y cúbica (> 10 mm)

Tabla 20: Valores del parámetro de permeabilidad.

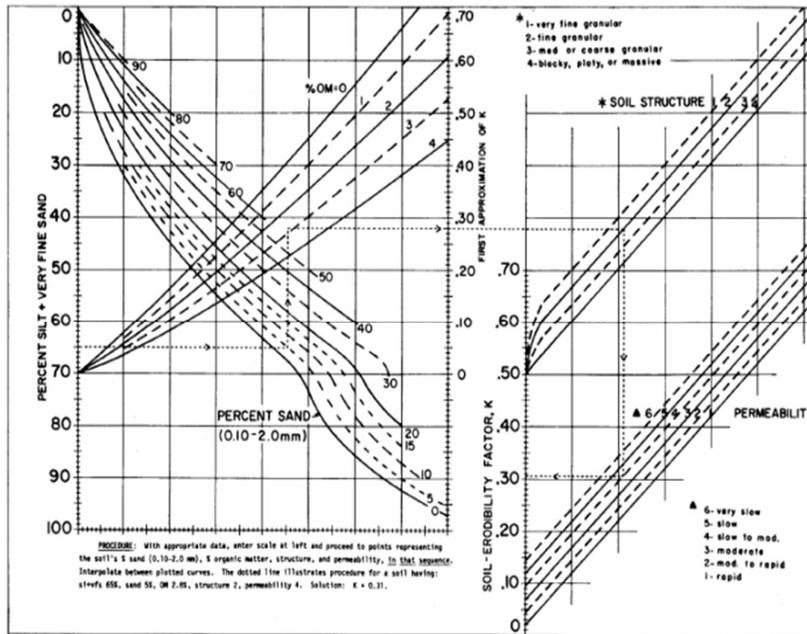
Parámetro de permeabilidad referido a todo el perfil	
1	Rápida a muy rápida (12, 5 a 25 cm/hr)
2	Moderadamente rápida (6, 2 a 12 cm/hr)
3	Moderada (2 a 6, 2 cm/hr)
4	Moderadamente lenta (0, 5 a 2 cm/hr)
5	Lenta (0, 12 a 0, 5 cm/hr)
6	Muy lenta (< 0, 12 cm/hr)

A partir de la ecuación:

$$T = [100 - A_c L + A_{rmf}] \quad (28)$$

Se construye el nomograma, figura 43, que permite determinar de manera rápida y sencilla del factor K (Wischmeier y Smith, 1978).

Figura 43: Nomograma de Erodabilidad del Suelo.



Fuente: Rapacioli, 2007

A partir del método aplicado, se ha confeccionado la Tabla 28, que da los distintos valores de K en función de la textura del suelo y el contenido de materia orgánica. En este trabajo final de licenciatura, se consideró un contenido de materia orgánica del 0,5% para la zona de estudio.

Tabla 21: Valores del Factor de Erodabilidad de Suelos, K (Ton*Hora/Newton*Ha)

Textura	Contenido de Materia Orgánica
	0.5% K
Arena	0.056585
Arena Fina	0.181072
Arena Muy Fina	0.475314
Franco Arenoso	0.135804
Franco Arenoso Fino	0.271608
Franco Arenoso Muy Fino	0.497948
Arenoso Franco	0.305559
Arenoso Franco Fino	0.396095
Arenoso Franco Muy Fino	0.531899
Franco	0.430046
Franco limoso	0.543216
Limo	0.67902
Franco Arcillo Arenoso	0.305559
Franco Arcilloso	0.316876
Franco Limo Arcilloso	0.418729
Arcillo Arenoso	0.169755
Arcillo Limoso	0.282925
Arcilla	0.207835

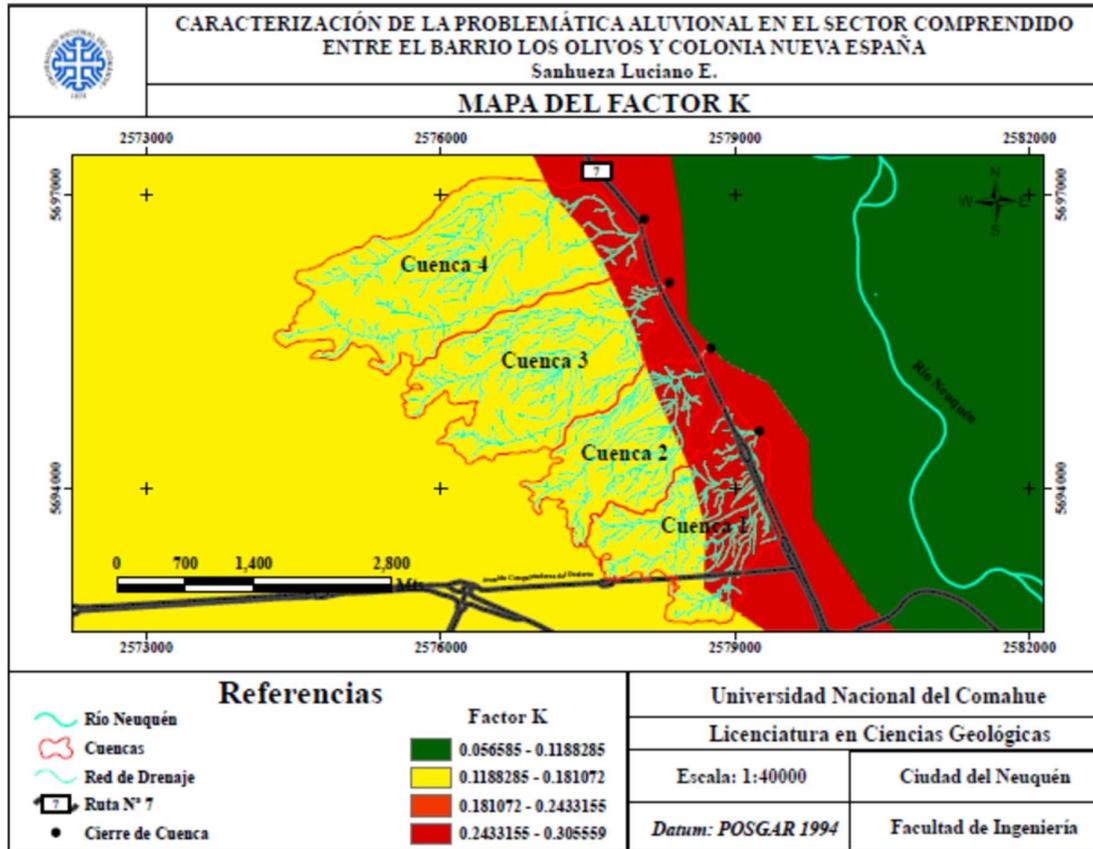
En una cuenca hidrográfica existen varios tipos de suelos y cada uno de ellos tendrá su respectivo factor K (Figura 44).

Un resumen del factor K por cuenca se puede apreciar en la tabla 29.

Tabla 22: Factor de erodabilidad

Cuenca	$K(T*Hora/Newton*Ha)$
1	0.2389
2	0.1958
3	0.1791
4	0.1838

Figura 44: Mapa del factor K.



El valor del factor K a usar en la “MUSLE” para cada cuenca, se pondera de acuerdo a la superficie de la cuenca con la ecuación:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i S_i}{S} \quad (30)$$

Siendo:

K: Factor de erodabilidad promedio para la cuenca considerada;

K_i : Factor de erodabilidad que ocupa la superficie;

S_i dentro de la cuenca;

S: Superficie de la cuenca.

4. 11. 2. Topografía, Factor LS

El factor LS es el producto entre la longitud de la ladera (L) y el gradiente de la pendiente (S). El mismo hace referencia al efecto combinado de la longitud y el gradiente de la pendiente.

Subfactor Longitud de la Pendiente, L . Se define como:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad (31)$$

Donde: λ : longitud estimada de la pendiente uniforme (m).

m : exponente influenciado por la interrelación entre longitud y el grado o inclinación de la pendiente. Sus valores son:

- 0, 5 para inclinaciones del 5% o superiores;
- 0, 4 para valores entre 3 y 5%;
- 0, 3 entre el 1 y 3%;
- 0, 2 para pendientes uniformes de menos del 1%.

El subfactor longitud de pendiente L está definido como la distancia horizontal desde el origen de un flujo hasta el punto donde el gradiente de la pendiente se reduce lo suficiente que provoca el depósito del agua o llega a un cauce definido. La erosión se incrementa con el incremento de la longitud de la pendiente. Este factor se puede obtener del modelo digital de elevaciones (MDE), el mapa resultante del factor LS para la región de estudio se puede apreciar en la figura 45.

Subfactor Gradiente o Inclinación del terreno, S . El subfactor gradiente de la pendiente se obtiene del MDE y se define como:

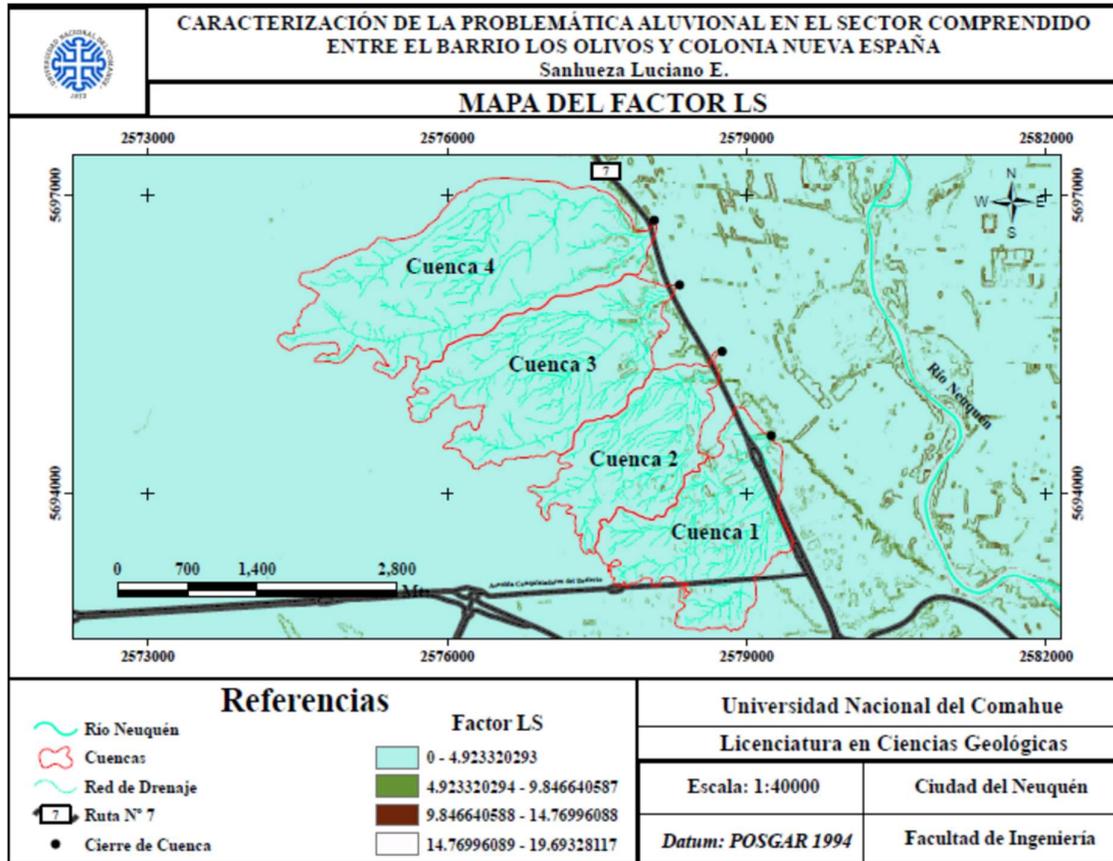
$$S = \frac{0.43+0.30s+0.043s^2}{6.613} \quad (32)$$

Donde:

S : factor pendiente;

s : es la pendiente del terreno en (%).

Figura 45: Mapa del factor LS.



Se puede calcular el factor topográfico LS , como el gradiente y la longitud de la pendiente. El primero contribuye al arrastre ladera abajo de las partículas lanzadas al aire por el impacto de las gotas de lluvia, mientras que ambos inciden en la velocidad del flujo de agua y por lo tanto, en su poder erosivo (Hernández y Dufilho, 2012).

$$\text{Para pendiente} < 9\%: L.S = \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^{0.3} \left[\frac{0.43 + 0.30s + 0.043s^2}{6.613} \right] \quad (33)$$

$$\text{Para pendiente} > 9\%: L.S = \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^{0.3} \left[\frac{s}{9} \right]^{1.3} \quad (34)$$

Cuanto mayor sea la pendiente, mayor será la escorrentía que se acumula y la velocidad de la corriente, originando su propia energía de funcionamiento, causando erosión en surcos y luego cárcavamiento (Hernandez y Dufilho, 2012). En la tabla 30 se puede ver estos resultados para las cuencas de estudio.

Tabla 23: Valores de L y S . Y Factor Topográfico.

Cuenca	LS
1	0. 8170
2	0. 6459
3	0. 5846
4	0. 5095

4. 11. 3. Cubierta Vegetal y Manejo, Factor C

El factor C de cobertura vegetal indica la protección que la cobertura vegetal presta al suelo al interceptar las gotas de lluvia y amortiguar su energía de impacto disminuyendo el efecto erosivo. La cobertura vegetal es eficaz para prevenir la erosión en la medida que absorbe la energía cinética de las gotas de lluvia. Sin embargo, este factor ha sido uno de los coeficientes más difíciles de estimar, ya que es difícil evaluar la acción protectora de la cubierta sin tener las características de la misma. Las características de la vegetación y la época del año producen una notable variabilidad en el efecto erosivo de la lluvia en el suelo.

Las pérdidas de tierra se ven reducidas cuando el suelo está cubierto por una vegetación permanente, bosques o prados, y por el contrario, son mayores cuando el suelo está desnudo, particularmente, si ha sido labrado para cultivos (Rapacioli, 2007).

El valor del factor C a usar en la “MUSLE” para cada cuenca, se pondera de acuerdo con la superficie de la cuenca con la ecuación:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i S_i}{S} \quad (35)$$

Siendo:

C : Factor de cubierta vegetal y manejo promedio para la cuenca considerada.

C_i : Factor de cubierta vegetal y manejo que ocupa la superficie S_i dentro de la cuenca.

S : Superficie de la cuenca.

Otra forma de determinar el Factor C es mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) (Chao-Yuan Lin *et al.*, 2002). Es uno de los métodos más utilizados en la actualidad para estimar y realizar mapas el factor C. El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) relaciona la cantidad la biomasa presente sobre el terreno y varía ente -1 y 1, permitiendo un análisis cuantitativo de la presencia de vegetación sobre la meseta y sus laderas (Rapacioli, 2007).

El mapa de NDVI (figura 46) se obtuvo operando las bandas 8 (infrarrojo cercano visible), 4 (rojo) y 3 (verde) de las imágenes satelitales Sentinel-2 de la Zona de Análisis y con la ecuación que se observa a continuación:

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (36)$$

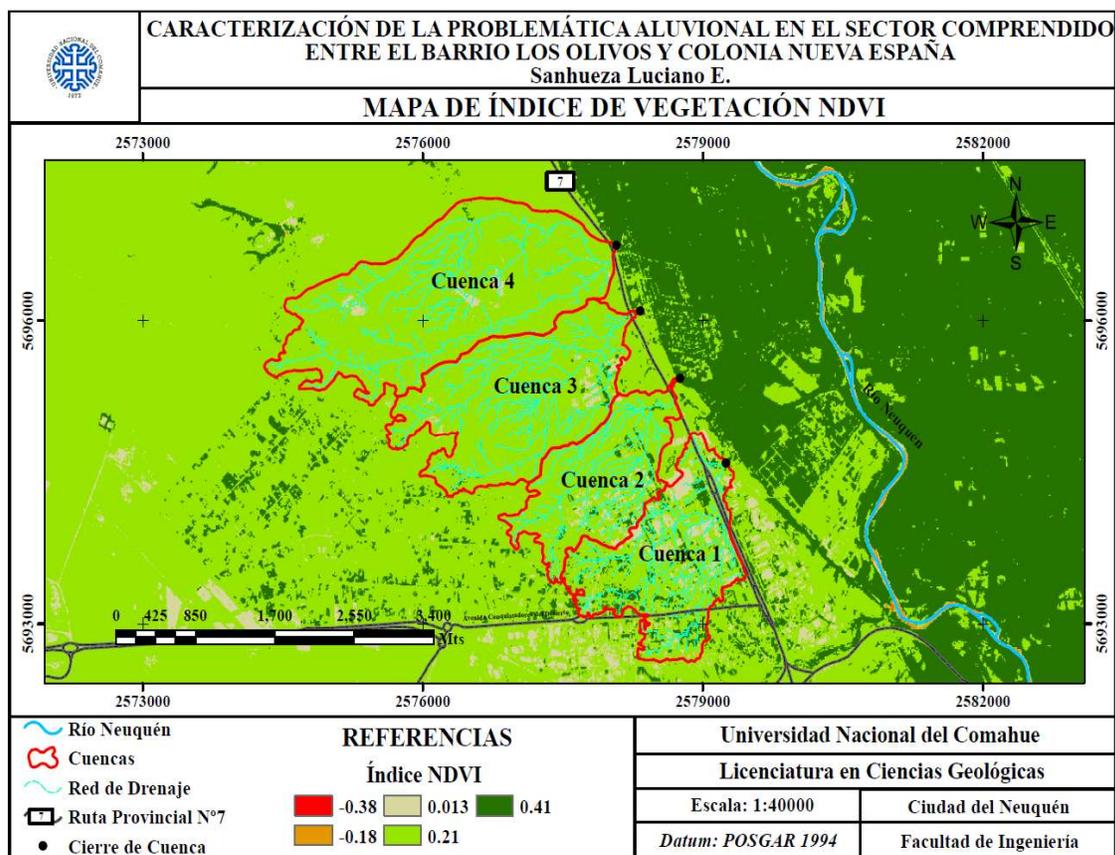
Siendo NIR la banda correspondiente al infrarrojo cercano (Banda 4), y R, al rojo (Banda 3).

Muñoz Aguayo (2013), afirma que los valores muy bajos de NDVI, del orden de 0. 1, corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas. Valores de 0. 2 a 0. 3 pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales. Valores mayores a 0. 3 tendremos praderas, cultivos, forestaciones etc. dependiendo el valor alcanzado.

La ecuación vinculante entre el Factor C y el NDVI es la siguiente:

$$FactorC = \frac{(1-NDV)}{2} \quad (37)$$

Figura 46: Mapa del índice NDVI distribuido.

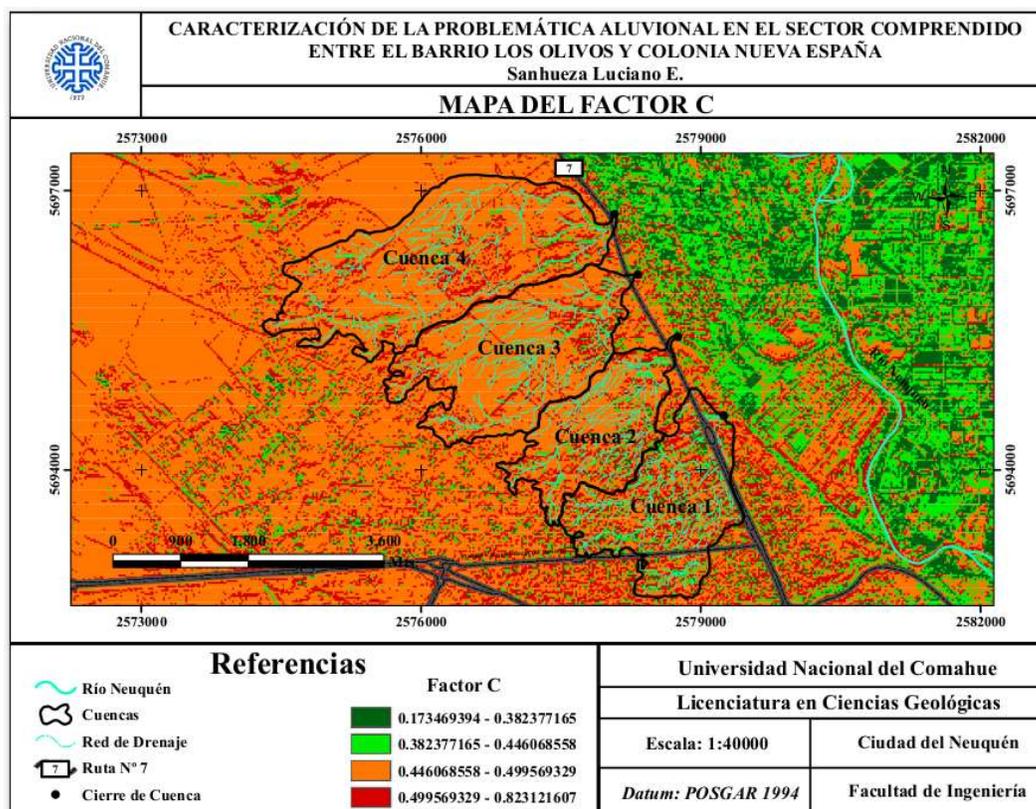


La tabla 31 se construyó a partir del valor medio ponderado de acuerdo con la superficie de cada cuenca, y un mapa del factor C distribuido puede verse en la figura 47.

Tabla 24: Factor C.

Cuenca	C
1	0.4825
2	0.4846
3	0.4860
4	0.4858

Figura 47: Mapa del factor C distribuido.



4. 11. 4. Prácticas de Conservación, Factor P

Debido a que en la zona de estudio no se realizan prácticas de conservación de suelos en extensiones considerables el factor P, para el presente trabajo de licenciatura se ha considerado un valor de $P = 1$; lo que no representa ninguna influencia en el uso de la tierra.

4. 11. 5. Presentación de factores de estudio

En la tabla 32, se presenta los resultados finales de todos los factores intervinientes.

Tabla 25: Resultados finales de los factores intervinientes

Cuenca	K	LS	C	P	$K*LS*C*P$
1	0.2389	0.8170	0.4825	1	0.0972
2	0.1958	0.6459	0.4846	1	0.0633
3	0.1791	0.5846	0.4860	1	0.0556
4	0.1838	0.5095	0.4858	1	0.0513

4. 12. Producción Anual de Sedimentos

Para obtener la producción de sedimentos anual de cada cuenca se utiliza la siguiente ecuación (Simons *et al.*, 1992; Rapacioli, 2007).

$$A_S = \frac{Va(0.01Y_{100}+0.01Y_{50}+0.02Y_{25}+0.06Y_{10} + 0.4Y_2)}{(0.01V_{100}+0.01V_{50}+0.02V_{25}+0.06V_{10}+0.4V_2)} \quad (38)$$

Siendo

As: producción de sedimentos anual (T)

Va: producción anual promedio de escorrentía (m³)

Y₁₀₀, Y₅₀, Y₂₅, Y₁₀, Y₂: producción de sedimentos (T), para las recurrencias de 100, 50, 25, 10 y 2 años, respectivamente

V₁₀₀, V₅₀, V₂₅, V₁₀, V₂: escorrentía en (m³), para las recurrencias de 100, 50, 25, 10 y 2 años, respectivamente.

La producción anual promedio de escorrentía de cada cuenca, Va; se obtiene mediante el Método del Curva Numero, considerando una lluvia promedio anual de Pa = 200 mm. En este trabajo se calcula para las recurrencias de 100, 50, 25, 10 y 2 para tener una comparación entre los distintos rangos de recurrencias.

Aplicando los valores de los distintos factores que involucra la ecuación 38, se obtienen los valores de producción de sedimentos para cada una de las cuencas en estudio y para cada recurrencia considerada. La tabla 33, muestra la cantidad de sedimento producido en unidad de toneladas. Mientras que la tabla 34, exhibe la cantidad de sedimento producido en toneladas respecto al área de cada cuenca.

Tabla 26: Sedimentos producidos a la salida de las cuencas en toneladas (T).

Cuenca	Y2 (Tn)	Y5 (Tn)	Y10 (Tn)	Y25 (Tn)	Y50 (Tn)	Y100 (Tn)
1	168. 64	711. 44	1311. 04	2449. 12	3567. 00	4900. 10
2	76. 28	333. 96	671. 86	1185. 10	1720. 10	2371. 50
3	80. 74	396. 80	761. 78	1471. 67	2177. 71	3033. 57
4	84. 76	447. 85	884. 46	1742. 46	2605. 45	3646. 67

Tabla 27: Cantidad de sedimentos producidos en toneladas/hectárea (T/ha)

Cuenca	y2 (T/ha)	y5 (T/ha)	y10 (T/ha)	y25 (T/ha)	y50 (T/ha)	y100 (T/ha)
1	0. 74	3. 13	5. 77	10. 79	15. 71	21. 58
2	0. 43	1. 90	3. 82	6. 73	9. 77	13. 47
3	0. 28	1. 37	2. 63	5. 07	7. 51	10. 46
4	0. 21	1. 13	2. 23	4. 39	6. 56	9. 18

4. 13. Producción Anual de Escorrentía y Sedimentos

En la tabla 35, se presentan los montos de producción anual de escorrentía y de sedimentos de cada cuenca.

Tabla 28: Producción anual de sedimento y producción anual promedio de escorrentía.

Cuenca	Va (m3/año)	As (Tn/Año)	as (T/ha/Año)
1	349580	13536. 69	59. 63
2	265760	6069. 97	34. 48
3	420500	7644. 65	26. 36
4	563740	9082. 43	22. 87

En la tabla 36 se observa la clasificación del grado de degradación por erosión hídrica establecido por la FAO (1980). Adoptando dicha clasificación, se observa que, de las 4 cuencas analizadas, la Cuenca 2, 3 y 4 presentan degradación moderada, mientras que la Cuenca 1 degradación alta.

Tabla 29: Degradación por erosión hídrica (FAO, 1980)

Grado de degradación	Pérdidas de Suelo	
	T/ha/año	mm/año
Ninguna a ligera	<10	<0, 6
Moderada	10 - 50	0, 6-3, 3
Alta	50 - 200	3, 3 - 13, 3
Muy alta	>200	>13, 3

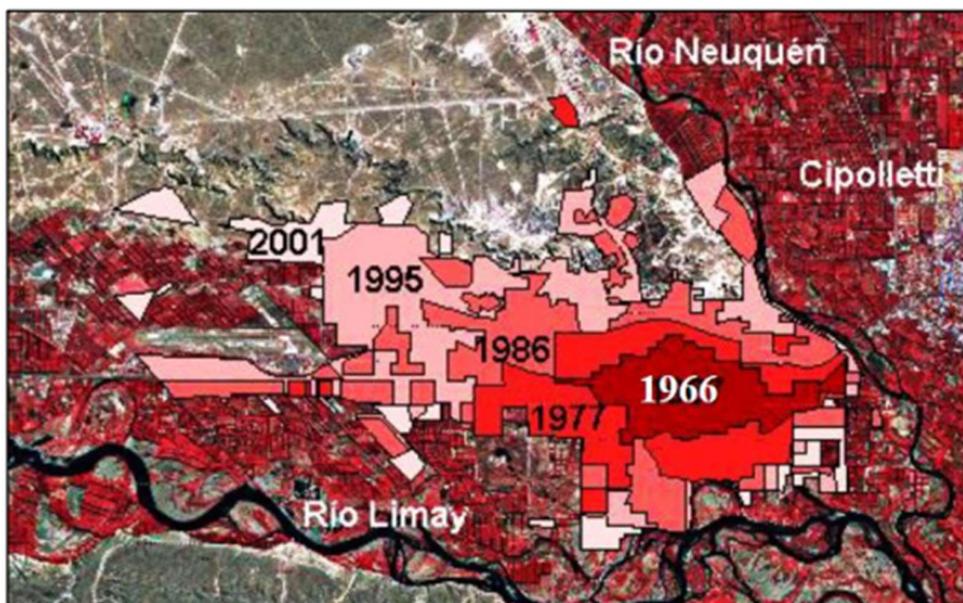
Fuente: FAO, 1980

5. Discusión

Del trabajo de investigación realizado, donde se elaboró una recopilación de información sobre las cuencas hidrográficas asociadas a las comunidades de la Colonia Nueva España y barrio Los Olivos de la ciudad de Neuquén, se pudo constatar cómo el proceso de urbanismo desordenado y poco planificado puede poner en riesgo la integridad de las personas, que por lo general son procedentes de las clases sociales más vulnerables.

La ciudad de Neuquén ha experimentado una expansión irregular, rápida y desordenada. Previo a la década del 70', la mancha urbana se encontraba rodeada de áreas agrícolas, acotada por los límites naturales definidos por los cursos fluviales y la meseta, como se muestra en la figura 48, eso ha cambiado en la actualidad y se ha convertido en una urbe densamente poblada (Cupua y Jurio, 2011). No solamente fueron los asentamientos espontáneos de las clases sociales más marginadas como los de la Colonia Nueva España sino también barrios planificados como el barrio Los Olivos, los que se desarrollaron en estos sectores no adecuados para la urbanización por su alta inestabilidad.

Figura 48: Crecimiento de la ciudad de Neuquén desde 1966 hasta 2001.



Fuente: Torrens (2015)

La disminución de las áreas de infiltración por impermeabilización del suelo a partir de la construcción de viviendas y la pavimentación de calles, sumado a la eliminación de la vegetación, genera un incremento de la escorrentía superficial en la cuenca 1. Se reducen, además, los tiempos de concentración provocando consecuentemente el aumento de los caudales máximos ante iguales precipitaciones, lo que agrava la problemática aluvional que afecta principalmente a los pobladores de los barrios ubicados al pie de la meseta, en la zona de pedimento (Capua et al., 1999; Fatorelli y Fernandez, 2011).

La eliminación de la vegetación no solo se da sobre la superficie de la meseta en proceso de urbanización sino también sobre las laderas, al desarrollarse caminos peatonales utilizados como vías de comunicación alternativas entre los barrios vecinos, los que favorecen el escurrimiento superficial del agua de lluvia (Capua y Jurio, 2011).

Toda esta situación, genera un estado de experiencia de las personas que hacen vida en las comunidades del barrio los Olivos y sobre todo la Colonia Nueva España de exposición constante a riesgo, donde todos estos factores sumados en cualquier momento pueden generar un evento peligroso de inundaciones, poniendo a miles de vidas en peligro. Ninguna persona debería tener que vivir en este estado de zozobra permanente.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

La tarea de proteger y estabilizar los diferentes sectores que presenten vulnerabilidad hidrográfica debe partir de estudios integrales, tratados en forma interdisciplinaria con la necesaria participación de organismos responsables, donde estos últimos con la mejor información de campo recopilada deben trabajar al unisonó para intentar evitar hacinamientos como los de la Colonia Nueva España, o que se diseñen y construyan barrios como Los Olivos.

En el área de estudio confluyen factores naturales, que son inherente a la misma, potenciados con factores humanos, no obstante, es un hecho inamovible que, si no hubiera hacinamientos y urbanización en la zona, no habría personas expuestas al peligro, por lo que la prevención debe partir de este principio básico, se debe evitar la urbanización en estas zonas para evitar el peligro.

Lamentablemente, la realidad es diferente; intereses económicos, problemas sociales e indiferencia en los agentes responsables, escapan a la capacidad de gestión de la gente afectada, que la mayoría de las veces es ignorante del peligro al que se exponen.

Las soluciones a estos problemas ambientales, así como otros como basurales, canteras, peligro aluvional, requieren de medidas correctivas integrales y de aportes económicos que los organismos pertinentes deben afrontar, para mitigar en medida de lo posible la exposición al peligro de las personas, salvaguardar la vida y cumplir su rol protector, de manera que estos casos en un futuro puedan evitarse.

Para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo fueron necesarios observaciones de campo complementadas con estudios de suelo. Según parámetros relativos al suelo y con la ayuda de tablas, fue posible calibrar los índices de curva número, los cuales evidencian suelos con medio umbral de escorrentía. Mediante la simulación realizada con el modelo hidrológico HEC-HMS, se pudo verificar que la Cuenca 1 es la que presenta mayor caudal y volumen de escorrentía para todos los años de recurrencia adoptados. Y mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) adoptado por Williams (1975), para la evaluación de la producción de sedimentos por erosión hídrica, se logro demostrar que la Cuenca 1 también es la que presenta mayor producción de sedimento para todos los años de recurrencia adoptados.

Por ende, en el caso de la Colonia Nueva España, localizado al pie de la meseta, se pudo evidenciar que esta colonia presenta una alta vulnerabilidad hidrográfica, y es que, este asentamiento se encuentra en la Cuenca 1 estudiada, que presenta una susceptibilidad a la inundación mayor respecto a las anteriores. Para referenciar resultados obtenidos durante la investigación el Coeficiente de Torrencialidad de esta cuenca, presenta el coeficiente más alto de todas las cuencas estudiadas, en consecuencia el agua que cae sobre ellas tiene un menor recorrido para llegar al cauce principal y de esta forma la velocidad de descarga es mayor respecto al de las otras tres cuencas. También tiene una densidad de drenaje muy alta, por lo que tiene el potencial de generar cauces de agua, las cuales alcanzan altas velocidades, el CN de la cuenca presenta valores elevados y un factor K también elevado. La Cuenca 1 por ende es la que presenta el caso más desfavorable respecto a la infiltración, como consecuencia es la que va a presentar mayor potencial de escorrentía y mayor producción de sedimento.

6. 2. Recomendaciones

Se recomienda para el caso en estudio, una intervención integral de autoridades competentes y responsables de la situación, donde se mitiguen lo mejor posible los riesgos hídricos de las dos comunidades estudiadas, en una instancia futura se debería desalojar y reubicar a los habitantes de la Colonia Nueva España, además se debería hacer responsable legalmente a los contratistas privados que diseñaron el barrio Los Olivos, y estudiar la irregularidad de haber construido en una locación con tanto riesgo hídrico.

Para futuros investigadores, que quieran emular la investigación realizada en este trabajo de grado, se les recomienda que tengan en cuenta las capacidades en procesamiento de información espacial y del tiempo y recursos necesarios que son requeridos para llevar a cabo una investigación como la presentada, deben tener en cuenta y en consideración todos estos factores, pues un descuido en estos comprometería fuertemente el trabajo investigativo, se debe tener la capacidad los recursos y el tipo para poder analizar y procesar la información espacial requerida.

7. Referencias

- Acuña, E. R., 2021. Evaluación de riesgo aluvional sobre la obre de Ciclovía entre el Casco Histórico y el Barrio Llequén – Localidad de Villa El Chocón, Provincia de Neuquén. Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas. Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Departamento de Geología petróleo. Neuquén, 108 p.
- Aparicio, F. J., 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa, 303 p.
- Apcarian, A., Aruani, C., Schmid, P., Broquen, P. y Imbellone, P. A. , 2002. Prácticas de rehabilitación de Aridisoles y Entisoles del norte de la Patagonia afectados por la apertura de líneas sísmicas. Revista Ciencia del Suelo 20 (2). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, pp. 88-97.
- Bracaccini, I. O., 1970. Rasgos tectónicos de las acumulaciones mesozoicas en las provincias de Mendoza y Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 25 (2):275-282. Buenos Aires.
- Bradbury, K. R., Dripps W., Hankley Cm Anderson M., Potter K. 2000. Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates.
- Burrough P. A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment (Monograph on soil and Resources Survey N° 12). Oxford Science Publications. 50 p.
- Cabrera A. L., 1951. Territorios fitogeográficos de la República Argentina. Boletín Sociedad de la Sociedad Argentina de Botánica Vol. 4, Buenos Aires, pp. 21–65.
- Cabrera, A. L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. 2° Ed. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Ganadería. II (1) 85 pp.
- Capua, O., Giordano, A. y Jurio, E. , 1999. Problemática del barrio Bardas Soleadas, Ciudad de Neuquén. Departamento de Geografía, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén.
- Capua, O. y Jurio, E., 2011. Componentes y dinámica natural del ambiente de la Ciudad de Neuquén. Boletín Geográfico año XXXII N°33. Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, pp. 55-68.
- Cazorzi F., 2002. Woditem HyGrid2k2 – Guida de referimento. Università degli studi di Udine.
- Cazua, L. B. y Uliana, M. A., 1973. El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 3:131-163. Villa Carlos Paz.
- Cruz, C. E., Condat E. ; Kozłowski E. y Manceda R. , 1989. Análisis estratigráfico secuencial del Grupo Neuquén (Cretácico Superior) en el Valle del Río Grande, Provincia de Mendoza. 1° Congreso Nacional de Exploración de Hidrocarburos. Actas 2: 689-714. Mar del Plata.
- Chao-Yuan Lin, Wen-Tzu Lin y Wen-Chieh Chou, 2002. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. Soil y Tillage Research, 68, pp. 143- 152.
- Chaves, M. G, 2020. Estudio de riesgo geomorfológico en un sector de meseta y piedemonte del norte de la ciudad de Neuquén. Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias

Geológicas. Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Departamento de Geología y petróleo. Neuquén, 92 p.

Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W., 1994. Hidrología Aplicada. Bogotá: McGraw-Hill.

Ciminari, M., Jurio, E., Torrens, C., 2005 “Los sistemas de Información Geográfica aplicados a la evaluación de conflictos ambientales”. En boletín Geográfico N° 27. Departamento de Geografía Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Comahue. Neuquén. Argentina. ISSN 0326-1735.

Cisneros, J. M., 2010. Bases para el ordenamiento territorial del sur de Córdoba (Argentina). El caso de la Cuenca de los Arroyos Menores. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid. Inedita.

Cisneros, J. M. et al., 2012. Erosión hídrica, principios y técnicas de manejo. Ed. UniRío. Córdoba, Argentina. 290 p.

Cisneros, J. M., Cholaky, C. G., Gutierrez, A., Gonazalez, J. G., Reynero, M. A., Diez, A., & Bergesio, L. 2012. El proceso de la erosión hídrica. En Erosión Hídrica: principios y técnicas de manejo. 61-102 p.

D' Amario Fernández, M. J., 2016. Evaluación del riesgo de erosión hídrica, su distribución espacial y el efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo, en la cuenca hidrográfica del Río Tunuyán Superior (Mendoza). Tesis de grado. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, 65 p.

Dufilho, A. C., Horne, F. , Navedo, R. y Polla, G. , 2001. Diseño de obras de control de aluviones basada en simulación de procesos hidrológicos torrenciales en cuencas de la Patagonia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 5 (2), Universida de Federal de Paraíba, Campina Grande, pp. 198-203.

Dumas Salazar, A., 2012. Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Mundo. Trabajo de fin de Máster. Máster en Tecnologías de la Información Geográfica. España.

Fangmeier, D. D. ; Elliot, W. J. ; Workman, S. R. ; Huffman, R. L. y Schwab, G. O. , 2006. Soil and Water Conservation Engineering. 5ª Edición. Thomson Delmar Learning. 502 p.

Fatorelli, S., Fernandez, P. C., 2011. Diseño Hidrológico. Segunda edición en español.

FAO, PNUMA, UNESCO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. 86 p.

FAO, 1990. Guidelines for soil description. Rome, Italy. 109 p.

Ferrer Polo F. J., 1993. Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, 76 p. , Madrid.

Ferrer J. A. , Irisarri J. A. y Mendia J. M. 1990. Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Secretaría de Estado del COPADE, CFI, (v1 - ii y iii), (viii1). Bs. As.

- Ferrer, J. A.** , Irisarri, J. A. y 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 p.
- Franchi, M.** ; **Nulló F.** ; **Sepúlveda E.** y **Uliana, M. A.** , 1984. Las sedimentitas terciarias. 9º Congreso Geológico Argentino. Relatorio 1 (9):215-266. Buenos Aires.
- Garrido, A. C.**, 2000. Estudio estratigráfico y reconstrucción paleoambiental de las secuencias fosilíferas continentales del Cretácico Superior en las inmediaciones de Plaza Huinca, provincia del Neuquén. Escuela de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Trabajo Final para el Título de Grado. 78 pp. Inédita.
- Garrido, A. C., 2005. Importancia Científica y Turística de los Recursos Paleontológicos y geológicos del Neuquén. Identificación y Relevamiento de los Recursos Geológicos. Consejo Federal de Inversiones. Neuquén. 102 p.
- González Díaz, E. F. y Malagnino E. C.** , 1984. Geomorfología de la provincia de Río Negro. 9º Congreso Geológico Argentino, Relatorio 1-159. Buenos Aires.
- Greenland, D. J; Lal, R.** , 1975. Soil conservation and management in the humid tropics. New York, US. Bresboni, 283 p.
- Heredia, S. y Calvo J. O.** , 2002. Estratigrafía de las bardas de la ciudad de Neuquén, Argentina. En: Cabaleri N. , Linares, F. , López de Luchi, M. G. , Osters, H. A. y Panarello, H. O. (Eds.). Actas del 15º Congreso Geológico Argentino CD-ROM. Artículo N° 196. 7 pp. El Calafate.
- Hernandez, L. y Dufilho, C.** , 2012. Determinación del riesgo de erosión hídrica de los suelos de los departamentos Minas y Chos Malal (Neuquén) mediante la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). Boletín Geográfico, [S. l.], n. 34, p. 11-31.
- Herrero Ducloux, A.** , 1938. Reconocimiento geológico de la zona situada entre la vía férrea, el río Neuquén y el meridiano de Plaza Huinca. Informe inédito. Yacimientos Petrolíferos Fiscales. Gerencia de Exploración. Buenos Aires.
- Hill, J; Hostert, P; Tsiourlis, G; Kasapidis, P; Udelhoven, T. H. y Diemer, C.** , 1998. Monitoring 20 years of increased grazing impact on the greek island of crete with earth observation satellites. Journal of Arid Environments. N. ° 39: 165 - 178.
- Horton R. E.**, 1932. Drainage Basin Characteristics. Trans. Am. Geophys. Union, vol. 13, pp. 350-361.
- Hugo, C. A. y Leanza, H. A.**, 2001. Hoja Geológica 3069- IV General Roca (escala 1:250.000). Provincias de Río Negro y Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. Boletín 308: 1-65. Buenos Aires.
- Jurio, E. M. y Torrens, C. V.**, 2015. Lo que la lluvia nos dejó: impacto de las inundaciones en la Ciudad de Neuquén. Seminario Internacional sobre Ciencias Sociales y Riesgo de Desastre: un encuentro inconcluso, Buenos Aires, 16 p.
- Leanza, H. A.**, 1999. The Jurassic and Cretaceous terrestrial beds from Southern Neuquen Basin, Argentina. Field Guide. Instituto Superior de Correlación Geológica. INSUGEO. Serie Miscelánea 4:1-30. San Miguel de Tucumán.

- López Cadenas de Llano, 1998.** Restauración Hidrológica Forestal de Cuencas y Control de Erosión. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España. Editorial Mundi Prensa. 945 p.
- Marizza, M. S. , Rapacioli, R. y Vives, L. , 2010.** La problemática aluvional en el Alto Valle del Río Negro, Argentina. Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. I (1), México, pp. 21-34.
- Martonne, E., 1940.** Traité de Geographie Physique. Armand Colin, París.
- Moreno, D. A. y Renner, I., 2007.** Gestión integral de cuencas; la experiencia del proyecto regional cuencas andinas. I ed. Lima, PE. s. e. , 234 p.
- Morgan. R. P. C., 1994. Soil erosion and conservation. Addison Wesley Longman Limited, London.
- Morgan, R. P. C., 1997.** Erosión y conservación del suelo. Madrid, ES. 355p.
- Morgan R. P. C. y Rickson R. J., 1995.** Slope Stabilization and Erosion Control- A Bioengineering Approach. E y FN SPON. Inglaterra. 274 p.
- Muñoz Aguayo, P., 2013.** Apuntes de teledetección: índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Información para el Desarrollo y la Innovación, Ministerio de Agricultura, Santiago, 15 p.
- Muguerza, D. , Kiwitt, P. , Tomasevich, I. 2015.** Aspectos físicos: Suelo, Clima y Agua de la Provincia del Neuquén. Proyecto FAO UTF ARG 017. Desarrollo Institucional para la Inversión. Neuquén, Argentina.
- Ocampo, R. , Medina, C. y Lovatón, G. 1996.** Programa de conservación de suelos y forestación. Manual de conservación de suelos. Asociación Arariwa. Cuzco – Perú. 30 pp.
- Orchuela, I. A. ; V. Ploszkiewicz, V. y Viñes, R. , 1981.** Reinterpretación estructural de la denominada “Dorsal Neuquina”. 8º Congreso Geológico Argentino, 3:281-293. Buenos Aires.
- Osinaga R. G, 2008. “Guía de Trabajos Prácticos Cátedra de Manejo de suelos”. Facultad de Ciencias Naturales. UNSa.
- Pereyra, F. X.; Irisarri, J. A. y Ferrer, J. A. , 2011.** Suelos: factores de formación, procesos pedogenéticos y distribución. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, pp. 871-880.
- Ramos, V. A., 1981.** Descripción geológica de la hoja 33 c Los Chihuidos Norte, provincia del Neuquén. Servicio Geológico Nacional. Boletín N° 182, 103 pp. Buenos Aires.
- Rapacioli, R., 2007.** La problemática aluvional en el desarrollo urbano de la región del Alto Valle del Río Negro. Maestría en Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano (GADU), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, 136 p.
- Rapacioli R.A., D’Amico V. 2013. Determinación de Curvas IDF en la Cuenca Superior del Río Colorado. Universidad Nacional del Comahue.
- Rapacioli R. y Marizza M. , 1996. Determinación de un modelo de precipitaciones intensas para la región del Alto Valle del Río Negro y de curvas caudal – área – frecuencia en zona de meseta al Norte de la ciudad de Cipolletti. Facultad de Ingeniería, UNCo.

- Rodríguez, M. F., Leanza, H. A. y 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, pp. 1- 165.
- Romero Díaz, A., 1987. Morfometría de Redes Fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. Papeles de Geografía Núm. 12, 47-62.
- Simons D. B. y Fuat Sentürk, 1992. Sediment Transport Technology. Water and Sediment Dynamics. Water Resources Publications, P. O. Box 2841, Littleton, Colorado, USA.
- Snyder, F. F. 1938. Synthetic Unit Graphs. Transactions American Geophysics Union, Vol. 19, 447-454 p.
- Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, U. S. Dept. of Agriculture, disponible en U. S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Stipanovic, P.; Rodrigo, F.; Baulies O. L. y Martínez, C. G., 1968. Las formaciones presenonianas en el denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. Revista de la Asociación Geológica Argentina XXIII(2): 367-388.
- Suarez, J., 2001. Control de erosión en zonas tropicales. División Editorial Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, CO. 545 p.
- Thorntwaite, C. 1948. An approach toward a rational clasification of the climate. The Geographical Review. 38 (1): 55-94.
- Torrens, C., 2015. El mapa social de Neuquén. Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG), Año 7, Número 7, Sección I: Artículos. Programa de Docencia e Investigación en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG), Universidad Nacional de Luján, Luján, pp. 76-89.
- Torrens, C., Ciminari, M. y Jurio, E., 2015. Problemáticas ambientales derivadas de la expansión urbana. Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, 9 p.
- Torrens C., Jurio E., Cappelletti V., Leyes P., Milanese L y Cuevas G., 2019. La construcción del riesgo en una cuenca aluvional del sector noroeste de la ciudad de Neuquén. Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Comahue. VII Congreso Nacional de Geografía de Universidades Publicas y XXI Jornadas de Geografía de la UNLP. 22 p.
- Troeh, F. R., Hobbs, J. A. y Donahue R. L., 1991. Soil and Water Conservation. Second Edition. Prentice Hall, Inc. 530 p.
- USACE, 2015. HEC-HMS Hydrologic Modeling System, versión 4. 1. User's Manual. U. S. Army Corps of Engineers Civils. Hydrologic Engineering Center. Davis. California.
- U. S. Conservation Service (USSCS). 1975. "Urban hydrology for small watersheds", Technical Release 55. Washington D. C. Departamento de Agricultura de EEUUA.
- Valdez, E. 2014. Analisis de Perdida de suelos por erosión hídrica en la subcuenca Condurri mediante la metodología RUSLE. Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de ingeniería agrícola, Puno, Pe. 152 p.

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 p.

Vásquez, A., 2000. Manejo de cuencas alto andinas. Tomo 1. Escuela superior de administración de aguas "Charles Sutton", Lima, PE. 516 p.

Williams, J. R., 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour Bull* 11:965–974.

Williams, J. R., 1975. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. En: *Present and Perspective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. Proceedings of Sediment – Yield Workshop. Agricultural Research Service Report ARS-S-40, USDA, Washington, pp. 244-252.*

Williams, J. R. y Berndt, H. D., 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Tran ASAE* 20:1100–1104.

Windhausen, A., 1922. Estudios geológicos en el valle superior del Río Negro. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología, Boletín 29 (Serie B):1-89. Buenos Aires.

Wischmeier, W. H., Johnson, C. B. y Cross, B. V., 1971. A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26, 189-193.

Wischmeier, W. H. y Smith D. D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA. Handbook N° 537.

Yapur, S. et al. 2010. Determinación de la Erosión Hídrica Potencial de los Suelos de la Cuenca Inferior del Río Bermejo, Salta- Jujuy. Tesis de grado en Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 224 p.

Zhou P. et al., 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena* 75:319-325.