

Universidad Nacional del Comahue  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Geología y Petróleo



**Evaluación de riesgo aluvional sobre la obra de Ciclovía  
entre el Casco Histórico y el Barrio Llequén - Localidad de  
Villa El Chocón, Provincia de Neuquén**

*Trabajo Final de Licenciatura*

Alumno:

Acuña, Ezequiel Rodolfo – N° Legajo: ING – 4074

**LICENCIATURA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Dirección del trabajo:

Lic. José Ricardo Gatica

Co Dirección del trabajo:

Ing. Patricio Ormazabal

Neuquén

## CONTENIDO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b> .....  | <b>3</b>  |
| 2.1      | <b>Objetivo General</b> .....   | 3         |
| 2.2      | <b>Objetivos específicos</b> .....  | 3         |
| <b>3</b> | <b>ANTECEDENTES</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>4</b> | <b>ÁREA DE ESTUDIO</b> .....  | <b>6</b>  |
| 4.1      | <b>Características climáticas</b> .....   | 6         |
| 4.2      | <b>Suelos</b> .....   | 8         |
| 4.3      | <b>Vegetación</b> .....   | 9         |
| 4.4      | <b>Geomorfología</b> .....  | 10        |
| 4.5      | <b>Geología y litología</b> .....   | 12        |
| <b>5</b> | <b>MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO</b> .....   | <b>15</b> |
| 5.1      | <b>Esquema metodológico</b> .....   | 15        |
| 5.2      | <b>Caracterización de subcuencas</b> .....  | 17        |
| 5.2.1    | <i>Parámetros de forma</i> .....  | 18        |
| 5.2.2    | <i>Parámetros de Relieve</i> .....  | 18        |
| 5.2.3    | <i>Parámetros relativos a la red de drenaje</i> .....                                   | 19        |
| 5.3      | <b>Método de Horton</b> .....   | 19        |
| 5.4      | <b>Determinación del potencial de escorrentía. Método de Curva Número del SCS</b> ..... | 20        |
| 5.5      | <b>Hidrogramas</b> .....  | 22        |
| 5.5.1    | <i>Hidrograma Unitario</i> .....  | 23        |
| 5.5.2    | <i>Tránsito de hidrogramas</i> .....  | 23        |
| 5.6      | <b>Hidráulica de Canales naturales</b> .....  | 23        |
| 5.6.1    | <i>Tipos de Flujo</i> .....   | 23        |
| 5.6.2    | <i>Propiedades de los canales naturales</i> .....                                       | 25        |
| 5.6.3    | <i>Geometría del Canal</i> .....  | 25        |
| 5.6.4    | <i>Elementos geométricos de una sección de canal</i> .....                              | 26        |
| 5.6.5    | <i>Distribución de velocidades en una sección de canal</i> .....                        | 26        |
| 5.7      | <b>Erosión y sedimentación en cauce</b> .....   | 27        |
| 5.7.1    | <i>Clima</i> .....  | 27        |
| 5.7.2    | <i>Vegetación</i> .....   | 27        |
| 5.7.3    | <i>Tipo de suelo</i> .....  | 27        |
| 5.7.4    | <i>Topografía</i> .....   | 28        |
| 5.7.5    | <i>Velocidad de flujo</i> .....   | 29        |

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| 5.7.6       | <i>Uso de la tierra</i> .....   | 29        |
| <b>5.8</b>  | <b>Erodabilidad de canales en roca</b> .....  | <b>29</b> |
| 5.8.1       | <i>Coefficiente de resistencia de masa (Ms)</i> .....   | 30        |
| 5.8.2       | <i>Coefficiente de tamaño de bloques (Kb)</i> .....   | 31        |
| 5.8.3       | <i>Coefficiente de resistencia al corte de las discontinuidades (Kd)</i> .....                              | 32        |
| 5.8.4       | <i>Coefficiente de la estructura del material (Js)</i> .....  | 33        |
| <b>5.9</b>  | <b>Análisis de imágenes satelitales</b> .....   | <b>36</b> |
| <b>5.10</b> | <b>Relevamiento de Campo</b> .....  | <b>36</b> |
| 5.10.1      | <i>Ensayo de Infiltración</i> .....   | 42        |
| <b>5.11</b> | <b>Estudio Hidrológico</b> .....  | <b>42</b> |
| 5.11.1      | <i>Delimitación y caracterización de cuencas</i> .....  | 42        |
| 5.11.2      | <i>Índice de Curva Número (CN) – Condición de Humedad II</i> .....  | 42        |
| 5.11.3      | <i>Tormentas de proyecto para períodos de retorno de 25 y 100 años</i> .....                                | 44        |
| <b>5.12</b> | <b>Modelación Hidrológica – Modelo HEC-HMS</b> .....  | <b>46</b> |
| <b>5.13</b> | <b>Modelación Hidráulica HEC-RAS</b> .....  | <b>47</b> |
| <b>5.14</b> | <b>Determinación de variables hidráulicas de interés: altura de lámina de escorrentía y velocidad</b> ..... | <b>50</b> |
| <b>5.15</b> | <b>Ensayo de compresión simple (UCS)</b> .....  | <b>50</b> |
| <b>5.16</b> | <b>Método del índice de erodabilidad de Annandale</b> .....   | <b>52</b> |
| <b>6</b>    | <b>RESULTADOS</b> .....   | <b>53</b> |
| <b>6.1</b>  | <b>Relevamiento de campo</b> .....  | <b>53</b> |
| <b>6.2</b>  | <b>Delimitación y caracterización de cuencas</b> .....  | <b>54</b> |
| <b>6.3</b>  | <b>Modelación hidrológica HEC-HMS</b> .....   | <b>59</b> |
| <b>6.4</b>  | <b>Modelación Hidráulica Bidimensional</b> .....  | <b>62</b> |
| 6.4.1       | <i>Variables hidráulicas de interés: altura de lámina de escorrentía y velocidad</i> .....                  | 67        |
| <b>6.5</b>  | <b>Método del Índice de Erodabilidad de Annandale</b> .....   | <b>70</b> |
| 6.5.1       | <i>Tasa de disipación de Energía (P)</i> .....  | 70        |
| 6.5.2       | <i>Índice de Erodabilidad de Annandale (K)</i> .....  | 71        |
| <b>7</b>    | <b>DISCUSIÓN</b> .....  | <b>72</b> |
| <b>7.1</b>  | <b>Relevamiento de campo</b> .....  | <b>72</b> |
| <b>7.2</b>  | <b>Delimitación y caracterización de cuencas</b> .....  | <b>72</b> |
| <b>7.3</b>  | <b>Modelación Hidrológica</b> .....   | <b>73</b> |
| <b>7.4</b>  | <b>Modelación Hidráulica</b> .....  | <b>76</b> |
| <b>7.5</b>  | <b>Método de Erodabilidad de Annandale</b> .....  | <b>79</b> |
| <b>8</b>    | <b>CONCLUSIONES</b> .....   | <b>81</b> |

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>9</b>    | <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....                                       | <b>83</b> |
| <b>10</b>   | <b>ANEXOS</b> .....   | <b>87</b> |
| <b>10.1</b> | <b>Mapas: Velocidad y altura de lámina de escorrentía</b> ..... | <b>87</b> |
| <b>10.2</b> | <b>Hidrogramas</b> .....  | <b>93</b> |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1: Área de estudio, localidad de Villa el Chocón</i> .....   | 2  |
| <i>Figura 2: Conformación urbana de Villa el Chocón (Fuente: Plan Nacional del Hábitat, 2017)</i> .....  | 2  |
| <i>Figura 3: Proyecto de ciclovía presentado por la Municipalidad de Villa el Chocón (Fuente: Plan Nacional del Hábitat, 2017)</i> .....   | 3  |
| <i>Figura 4: Temperatura media anual (°C) y precipitación media anual (mm) (Muguerza et al., 2015)</i> .....   | 7  |
| <i>Figura 5: Balance hídrico estival, manifestándose un déficit de agua (Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial de Villa el Chocón)</i> .....  | 7  |
| <i>Figura 6: Suelos de la provincia del Neuquén (Ferrer et al., 1990)</i> .....  | 8  |
| <i>Figura 7: Vegetación de la Provincia del Neuquén (Ayesa et al. 2002)</i> .....  | 9  |
| <i>Figura 8: Elementos geomorfológicos del área de estudio: escarpa, pedimiento, planicie, talud y áreas costera. Es evidente que la red de drenaje tiene un control estructural</i> .....                           | 11 |
| <i>Figura 9: Esquema litoestratigráfico del Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (modificado de Garrido, 2014)</i> .....   | 12 |
| <i>Figura 10: Mapa litológico de la zona de estudio. Se distinguen areniscas, fangolitas, intercalación de areniscas y fangolitas de la Fm. Candeleros</i> .....   | 14 |
| <i>Figura 11: Esquema metodológico para la realización del Trabajo Final de Licenciatura</i> .....   | 16 |
| <i>Figura 12: Curvas hipsométricas guías (Ibañez, 2011)</i> .....  | 18 |
| <i>Figura 13: Hidrograma de crecida de referencia y sus principales parámetros (Sánchez San Román, 2017)</i> .....   | 22 |
| <i>Figura 14: Efecto del tránsito de hidrogramas (Sánchez San Román, 2017)</i> .....   | 23 |
| <i>Figura 15: Tipos de flujo en canales abiertos (Chow, 2005)</i> .....  | 25 |
| <i>Figura 16: Geometría trapezoidal de un canal (Fuente: Elaboración propia)</i> .....   | 26 |
| <i>Figura 17: Isolíneas de velocidad en diferentes secciones de un canal trapezoidal (Chow, 2005)</i> .....  | 26 |
| <i>Figura 18: Curvas de Hjulstrom (1935) que describe umbrales de arranque, transporte o sedimentación, en función de los cambios de velocidad de una corriente, para cada tamaño de partícula involucrada</i> ..... | 28 |
| <i>Figura 19: Variaciones en la tasa de erosión (E) y depositación (D), según cambios topográficos (Terrance et al., 2002)</i> .....   | 28 |
| <i>Figura 20: Esquema de referencia que explica la determinación del umbral de erosión a través del Método del Índice de Erodabilidad de Annandale (Caminati Briceño, 2003)</i> .....                                | 30 |
| <i>Figura 21: Representación gráfica del parámetro según el buzamiento de las rocas con respecto a la dirección del flujo (Caminati Briceño, 2003)</i> .....   | 34 |
| <i>Figura 22: Determinación de la relación del espaciamiento entre juntas (Caminati Briceño, 2003)</i> .....   | 35 |
| <i>Figura 23: Influencia de la forma de los bloques de material en la resistencia a la erosión (Caminati Briceño, 2003)</i> .....  | 35 |
| <i>Figura 24: Imágenes satelitales donde se visualizan los cauces de un sector del área de estudio de los años 2007 (A), 2016 (B), 2019 (C), 2021 (D)</i> .....  | 36 |
| <i>Figura 25: Imágenes satelitales donde se visualizan los cauces de un sector del área de estudio de los años 2007 (A), 2016 (B), 2019 (C), 2021 (D)</i> .....  | 36 |
| <i>Figura 26: Sitios donde se realizaron los ensayos de infiltración y los relevamientos</i> .....   | 37 |
| <i>Figura 27: Imagen que detalla el orden de las paradas realizadas para el relevamiento de campo</i> .....  | 38 |
| <i>Figura 28: Ensayos de infiltración con anillo doble realizados en los puntos 1 (A) y 4 (B)</i> .....  | 38 |
| <i>Figura 29: Cauces relevados. A: Punto 2; B: Punto 3; C: Punto 5; D: Punto 6</i> .....   | 39 |
| <i>Figura 30: Cauces relevados. A: Punto 7; B y C: Punto 8; D: Punto 9</i> .....   | 40 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 31: Cauces relevados. A: Punto 10; B: Punto 11. ....  | 40 |
| Figura 32: Cauce relevado (Punto 11) que exhibe un lecho predominantemente rocoso. ....  | 41 |
| Figura 33: Cauces relevados correspondientes a los puntos 13 (A) y 14 (B). ....  | 41 |
| Figura 34: Cauces relevados correspondientes a los puntos 15 (A) y 16 (B). ....  | 41 |
| Figura 35: Hietogramas de bloque alterno porcentuales para tormentas de 1, 1.5 y 2 h. ....   | 46 |
| Figura 36: Parámetros de ruteo, según Muskingum, para cada uno de los tramos. ....   | 47 |
| Figura 37: Coeficientes de n de Manning (Ven te Chow, 2000). ....  | 48 |
| Figura 38: Valores de n de Manning. Se incluyen secciones aumentadas de posibles puntos problemáticos donde los cauces interceptan el Barrio Llequén (A) y la ciclovía (B). ....                 | 49 |
| Figura 39: Corrida del modelo mediante según el Unsteady Flow Analysis. ....   | 50 |
| Figura 40: Muestras de roca utilizadas para el ensayo de compresión simple. ....   | 51 |
| Figura 41: Ensayo de compresión simple para las muestras de roca extraídas. ....   | 51 |
| Figura 42: Perfiles longitudinales de los sitios donde se realizaron los ensayos de infiltración. La pendiente en promedio es de 3 % al 5%, respectivamente. ....                                | 53 |
| Figura 43: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos. ....   | 54 |
| Figura 44: Delimitación de las subcuencas de estudio. ....   | 55 |
| Figura 45: Determinación del grupo Hidrológico de Suelos (GHS) para el área de estudio. .... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>  |    |
| Figura 46: Índices de curva número asignados al área de estudio. ....  | 57 |
| Figura 47: Esquema de las subcuencas consideradas y conexión entre ellas. ....   | 59 |
| Figura 48: Hidrogramas de salida de las subcuencas propuestas (25TR). ....   | 60 |
| Figura 49: Hidrogramas de salida de las subcuencas propuestas (100 TR). ....   | 61 |
| Figura 50: Sectores donde se generaron los modelos hidráulicos según su exposición a los cauces más importantes. En rojo se resaltan los cauces de mayor relevancia. ....                        | 62 |
| Figura 51: Ubicación de los modelos hidráulicos propuestos. Se observan secciones aumentadas del modelo I (A) y del modelo II (B). ....  | 63 |
| Figura 52: Geometría de los mallados generados a partir del modelo digital del terreno para modelo I (A) y modelo II (B). ....   | 64 |
| Figura 53: Vista de las condiciones de contorno y las breaklines para el mallado del modelo II. La numeración de los distintos braklines corresponde a los hidrogramas de las subcuencas. ....   | 65 |
| Figura 54: Modelo hidráulico alternativo. Se muestran secciones aumentadas de las zonas influenciadas por posibles saltos hidráulicos. ....  | 66 |
| Figura 55: Altura de la escorrentía (en metros) generada en el modelo I para 25TR (izq.) y 100TR (der.). En ambos casos el Barrio Llequén no es afectado por posibles desbordes del cauce. ....  | 67 |
| Figura 56: Altura de la escorrentía (en metros) generada en el modelo II para 25TR (izq.) y 100TR (der.). En ambos casos la ciclovía es interceptada por el caudal de escorrentía estimado. .... | 67 |
| Figura 57: Perfiles A, B y C propuestos para el análisis de altura de lámina de escorrentía y velocidad para el modelo I. ....   | 68 |
| Figura 58: Perfiles A y B propuestos para el análisis de altura de lámina de escorrentía y velocidad para el modelo II. ....   | 68 |
| Figura 59: Perfiles A (arriba izq.), B (arriba der.) y C (abajo) que describen la sección del cauce del modelo I. ....   | 69 |
| Figura 60: Perfiles A (izq.) y B (der.) que describen la sección de los cauces del modelo II. ....   | 69 |
| Figura 61: Hidrogramas de diseño de las subcuencas, obtenidos para tiempos de recurrencia de 25 y 100 años. ....   | 73 |
| Figura 62: Representación gráfica de las cuatro uniones propuestas. Se observa cómo la altura topográfica de las subcuencas influye en la respuesta hidrológica de cada una. ....                | 75 |
| Figura 63: Representación de las variables estimadas de velocidad (m/s) y altura de lámina de escorrentía (m) para los perfiles A y B, modelo I. ....  | 76 |
| Figura 64: Representación de las variables estimadas de velocidad (m/s) y altura de lámina de escorrentía (m) para el perfil C, modelo I. ....   | 77 |
| Figura 65: Representación de las variables estimadas de velocidad (m/s) y altura de lámina de escorrentía (m) para los perfiles A y B, el modelo II. ....  | 77 |
| Figura 66: Representación del parámetro hidráulico de velocidad (m/s) para el perfil B, modelo II alternativo. ....  | 78 |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 67: Representación gráfica de los índices de erodabilidad obtenidos según el Método de Annandale. ....</i>   | <i>80</i> |
| <i>Figura 68: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondiente al modelo I para tormentas de 25TR.....</i>                 | <i>87</i> |
| <i>Figura 69: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondientes al modelo I para tormentas de 100TR.....</i>               | <i>88</i> |
| <i>Figura 70: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondiente al modelo I (alternativo) para tormentas de 25 TR.....</i>  | <i>89</i> |
| <i>Figura 71: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondiente al modelo I (alternativo) para tormentas de 100 TR.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Figura 72: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondientes al modelo II para tormentas de 25TR.....</i>               | <i>91</i> |
| <i>Figura 73: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondiente al modelo II para tormentas de 100 TR.....</i>              | <i>92</i> |
| <i>Figura 74: Hidrogramas para subcuencas C01-C04 para tiempos de recurrencia de 25 años con su respectivo hietograma.....</i>                                     | <i>93</i> |
| <i>Figura 75: Hidrogramas para subcuencas C05-C08 para tiempos de recurrencia de 25 años con su respectivo hietograma.....</i>                                     | <i>94</i> |
| <i>Figura 76: Hidrograma para subcuena C09 para tiempos de recurrencia de 25 años con su respectivo hietograma.....</i>  | <i>95</i> |
| <i>Figura 77: Hidrogramas para subcuencas C01-C04 para tiempos de recurrencia de 100 años con su respectivo hietograma.....</i>                                    | <i>96</i> |
| <i>Figura 78: Hidrogramas para subcuencas C05-C08 para tiempos de recurrencia de 100 años con su respectivo hietograma.....</i>                                    | <i>97</i> |
| <i>Figura 79: Hidrogramas para subcuena C09 para tiempos de recurrencia de 100 años con su respectivo hietograma.....</i>  | <i>98</i> |

## **INDICE DE TABLAS**

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1: Especies representativas de la localidad de Villa el Chocón (Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial de Villa el Chocón). ....</i>                                      | <i>10</i> |
| <i>Tabla 2: Valores de Curva Número (CN) para zonas de montañas áridas y semiáridas en condiciones medias de humedad (Chow, et al., 2000). ....</i>                                  | <i>21</i> |
| <i>Tabla 3: Velocidad de flujo admisible en canales no revestidos (Fieschenich, 2001). ....</i>  | <i>29</i> |
| <i>Tabla 4: Número de familia de juntas (Jn). ....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Tabla 5: Coeficientes de rugosidad de junta (Jr), según la separación y condición de las juntas. ....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Tabla 6: Coeficiente de alteración de las juntas (Ja), según separación y condición de las juntas. ....</i>   | <i>33</i> |
| <i>Tabla 7: Valores que puede tomar el Coeficiente de estructura de material (Js). ....</i>  | <i>34</i> |
| <i>Tabla 8: Índices de curva número para zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos para condición de humedad media según USDA 210-VI-TR-55, 1986 (Martínez Azagra, 2003). ....</i> | <i>43</i> |
| <i>Tabla 9: Grupos de suelos (Martínez Azagra, 2003). ....</i>   | <i>43</i> |
| <i>Tabla 10: Equivalencia entre las clases texturales del USDA y el Grupo Hidrológico (Fuente: Ferrer Julia 2003). ....</i>  | <i>44</i> |
| <i>Tabla 11: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 1 h para períodos de recurrencia de 25 y 100 años. ....</i>   | <i>45</i> |
| <i>Tabla 12: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 1.5 h para períodos de recurrencia de 25 y 100 años. ....</i>   | <i>45</i> |
| <i>Tabla 13: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 2 h para períodos de recurrencia de 25 y 100 años. ....</i>   | <i>45</i> |
| <i>Tabla 14: Resumen de los coeficientes necesarios para el cálculo del índice Kh junto con sus respectivas fórmulas y parámetros. ....</i>  | <i>52</i> |
| <i>Tabla 15: Información detallada de los cauces relevados. ....</i>   | <i>53</i> |
| <i>Tabla 16: Ecuación de Horton ajustada para cada ensayo de infiltración. ....</i>  | <i>54</i> |

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabla 17: Parámetros morfométricos principales para cada subcuenca.</i>  | 58 |
| <i>Tabla 18: Índices de Gravelius y determinación de la forma para cada subcuenca, según dicho índice.</i>  | 58 |
| <i>Tabla 19: Parámetros con respecto a la red de drenaje más relevantes para cada subcuenca. Se destacan las pendientes del cauce principal y el tiempo de concentración según diversos autores. N/A: No aplica.</i>              | 58 |
| <i>Tabla 20: Valores medios de los índices de curva número para cada subcuenca de estudio, obtenidos mediante una estadística zonal por tabla.</i>  | 59 |
| <i>Tabla 21: Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para las subcuencas propuestas para una tormenta de diseño de 25TR.</i>  | 60 |
| <i>Tabla 22: Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para las subcuencas propuestas para una tormenta de diseño de 100TR.</i>   | 61 |
| <i>Tabla 23: Valores de variables hidráulicas de velocidad y altura de lámina de escorrentía para modelos I, II y modelo II alternativo.</i>  | 70 |
| <i>Tabla 24: Valores de <math>q</math>, <math>\Delta E</math> y <math>P</math> para los modelos I, II y modelo II alternativo.</i>  | 71 |
| <i>Tabla 25: Tabla que resume los valores adoptados para calcular el Índice de Erodabilidad de Annandale (<math>K</math>) junto con los posibles valores de <math>K</math>.</i>   | 71 |
| <i>Tabla 26: Valor de las variables hidráulicas estimadas para el modelo I, junto con el porcentaje de incremento de cada parámetro para períodos de recurrencia de 100 años.</i>   | 78 |
| <i>Tabla 27: Valor de las variables hidráulicas estimadas para el modelo II, junto con el porcentaje de incremento de cada parámetro para períodos de recurrencia de 100 años.</i>  | 78 |
| <i>Tabla 28: Valor de las variables hidráulicas estimadas para el modelo II alternativo, junto con el porcentaje de incremento de cada parámetro para períodos de recurrencia de 100 años.</i>                                    | 78 |
| <i>Tabla 29: Ancho de escurrimiento para cada perfil propuesto según tiempos de recurrencia de 25 y 100 años. No se incluye el modelo II alternativo ya que se observaron anchos de escurrimiento muy similares al modelo II.</i> | 79 |

## AGRADECIMIENTOS

Este es un gran logro personal que soñé y me propuse alcanzar hace varios años y que, sin la ayuda de grandes personas no hubiese sido posible alcanzar. Quiero dar gracias a Dios por las personas que me apoyaron y estuvieron desde el inicio de este camino y por aquellas que pude conocer en el transitar de esta hermosa carrera.

A mi familia, sean abuelos, tíos, primos, hermanos y sobrinos. A mis viejos, Hugo y Ruth, grandes veladores por mi bienestar, siempre un incondicional apoyo para mí.

A mis abuelos, Juan y Julia, los primeros y mejores educadores de vida que pude tener.

A mis amigos y compañeros que me hicieron sentir acompañado en este camino.

A la Universidad Nacional del Comahue por formarme y a los grandes profesores que tuve el privilegio de tener como educadores y que, con una contagiosa pasión por esta carrera, siempre serán grandes ejemplos para mí.

Al jurado de este trabajo final, gracias por sus observaciones y sugerencias para el enriquecimiento general del presente trabajo.

A Miriam Minutella por la colaboración para la elección de este Trabajo Final de Licenciatura.

A mis directores de tesis, José Gatica y Patricio Ormazabal por su gran ayuda a lo largo de todo este trabajo; por las salidas de campo realizadas, sugerencias, correcciones, y por todas las reuniones y videollamadas llevadas a cabo en un contexto tan único y complicado como lo fue el confinamiento.

A la Municipalidad de Villa el Chocón; a su Intendente, Nicolás Di Fonzo, y colaboradores por estar a disposición y aportar los recursos necesarios para la realización de este trabajo.

A Consulval S.R.L por brindarme su tiempo, herramientas e instalaciones para realizar los ensayos de laboratorio necesarios.

No me queda más que agradecer a todas las personas que aportaron su grano de arena para que hoy pueda culminar esta gran etapa que me tocó vivir. A todos, ¡gracias!



## RESUMEN

El desenvolvimiento de las actividades socioeconómicas de los últimos años es uno de los factores desencadenantes de eventos pluvioaluvionales que han afectado la dinámica de los asentamientos urbanos de la región. La ocupación caótica del territorio, sumado a los fenómenos climáticos propios del área pueden llevar a consecuencias catastróficas. La Patagonia Argentina, frecuentemente es afectada por crecidas causadas por lluvias de corta duración y alta intensidad, propio de zonas áridas y semiáridas, que incentivan el desprendimiento, transporte y deposición de sedimentos. El Alto Valle de la provincia del Neuquén, es una zona que ha experimentado una importante expansión urbana en muy poco tiempo, con lo cual la ocupación caótica de suelos no aptos se volvió un fenómeno usual.

Con el fin de brindar a la Municipalidad de Villa el Chocón un estudio de información base para el futuro diseño de obra, se realizó la evaluación del riesgo hídrico asociado al comportamiento de cuencas aluvionales que afectan la dinámica urbana de los sectores más representativos del área: el Casco Histórico y el Barrio Llequén. En este trabajo, se llevan a cabo metodologías sencillas para la simulación hidrológica e hidráulica de crecidas, para la posterior aplicación del método semiempírico de Erodabilidad de Annandale para la evaluación de la erosión en cauces de lecho rocoso.

Se estudian nueve subcuencas relacionadas a los cruces de interferencia entre la red de drenaje y la obra de ciclovía proyectada. Son utilizados criterios geológicos y geomorfológicos para la delimitación de subcuencas y la posterior generación de los modelos hidrológicos utilizando el método de laminación de crecidas de Muskingum. Los resultados estiman caudales de  $9.8 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $43.6 \text{ m}^3/\text{s}$  generados por tormentas con un periodo de retorno de 25 años y caudales de  $19.3 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $83.1 \text{ m}^3/\text{s}$  correspondientes a tormentas de un periodo de retorno de 100 años.

En cada cruce se estiman variables hidráulicas referidas a la altura de lámina de escorrentía (m) y velocidad (m/s) mediante la modelación bidimensional utilizando el software HEC-RAS, determinándose que no existen eventos de desborde de cauces, asumiéndose que los caudales de diseño son contenidos por los mismos. Se obtienen umbrales de velocidades erosivas para un lecho granular, situación que fue verificada en las visitas de campo observándose un lecho rocoso compuesto de bancos de areniscas.

Se utiliza el método semiempírico de Erodabilidad de Annandale para la evaluación de la erosión en cauces de lecho rocoso, obteniendo índices de erodabilidad ( $K_h$ ) variables de 80.85 a 822.60, evaluados en función de la tasa de disipación de energía del flujo ( $P$ ) con valores variables de  $0.62$  a  $1.66 \text{ kW}/\text{m}^2$ , con lo cual el lecho de roca de las secciones analizadas no se vería afectado por procesos erosivos. Los resultados obtenidos se deben emplear como información base para el futuro diseño y justificación de obras. En una etapa de ingeniería de detalle se sugiere realizar una reevaluación según tipología de obra.

**Palabras clave:** lecho rocoso, arenisca, erosión, modelación hidrológica, modelación hidráulica, método de erodabilidad de Annandale.

## ABSTRACT

The development of socioeconomic activities in recent years has been one of the triggering factors for rainfall events that affect the dynamic of urban settlements. The chaotic occupation of soils, in addition to the climatic phenomena of areas can lead to catastrophic consequences. The Argentine Patagonia is frequently affected by floods caused by short duration and high intensity rains, typical of arid and semi-arid zones which encourage the detachment, transport, and deposition of sediments. The Upper Valley of Neuquén Province is an area that has experienced significant urban expansion in very short time, wherewith the chaotic occupation of unsuitable land has become a common phenomenon.

In order to provide a study of basic information for the future design of roadworks, it is proposed to evaluate the water risk associated with the behavior of alluvial basins that affect the urban dynamics of the most representative sections of the area: the Historical Center and the Llequén neighborhood. In this study, simple methodologies are carried out for the hydrological and hydraulic simulation of floods for the subsequent application of the semi-empirical method of Annandale for the evaluation of erosion in bedrock channels.

Nine sub-basins are studied. A hydrological modeling is carried out using the Muskingum flood method by geological and geomorphological criteria for the delimitation of sub-basins. There were estimated flows from 9.8 m<sup>3</sup>/s to 43.6 m<sup>3</sup>/s for a return period of 25 years and from 19.3 m<sup>3</sup>/s to 83.1 m<sup>3</sup>/s for the sections analyzed at the interference crossings for 100 years return period.

For each crossing, hydraulic parameters are estimated by bidimensional modeling using HEC-RAS software, determining the nonexistence of the channel overflow, assuming that the design flows are contained by the channels. Erosive velocities umbral are obtained for granular bedrock, which was verified in field visits, observing bedrock composed by sandstones.

Through the semi-empiric Annandale Erodibility Index Method, it is possible to make an evaluation of the erosion in bedrock channels. Erodibility indexes are between 80.85 to 822.60 which are related to energy dissipation rates variables from 0.62 to 1.66 kW/m<sup>2</sup>. As a result, bedrocks in analyzed sections would not be affected by erosive processes. These results should be used as base information for the future work design and justification. In a detailed engineering stage, it is suggested to make a reevaluation considering a work typology.

**Keywords: bedrock, sandstone, erosion, hydrological modeling, hydraulic modeling, Annandale erodibility method.**

# 1 INTRODUCCIÓN

La urbanización en espacios sin planificación previa es una problemática común a lo largo de todo el territorio Nacional y Provincial. En la zona del Alto Valle de Río Negro y Valle Inferior del Neuquén, la expansión urbana ha sido tal, que la ocupación caótica de suelos no aptos para el establecimiento de asentamientos urbanos se ha convertido en un grave problema. En estas zonas, áridas y semiáridas, son frecuentes las crecidas por lluvias intensas y esporádicas, las cuales originan desprendimiento y transporte de material aluvional y numerosas veces acarrear consecuencias graves en aquellos sectores en donde están establecidos asentamientos urbanos. En el extremo norte de la Patagonia Argentina, con frecuencia ocurren precipitaciones intensas que aportan el 50% o más del total de lluvia anual (Marizza *et al.*, 2010). Estos eventos producen crecidas que resultan una constante amenaza para la dinámica urbana y social de la comunidad que se ve potenciada por una deficiente planificación urbana. De esta manera, los análisis de riesgos pluvioaluvionales se vuelven necesarios para la determinación de áreas vulnerables a la erosión, a fin de dar con un plan de medidas de mitigación y control.

Históricamente, la radicación poblacional en la provincia del Neuquén está basada en el aprovechamiento de las riquezas naturales, cuyo interés ha aumentado a lo largo de los años (Torrens *et al.*, 2019). El avance del tendido de las vías férreas, la construcción de obras de riego, el descubrimiento de petróleo y gas, y la puesta en funcionamiento de represas hidroeléctricas constituyen actividades que favorecieron grandemente el desarrollo económico y significaron contundentes factores de atracción poblacional (Constanzo Caso y Tomasevich, 2015). Este desenvolvimiento económico regional, se ve fuertemente representado en la concreción del complejo Chocón-Cerros Colorados, el cual trae aparejado un conjunto de actividades productivas, comerciales y administrativas que atrae a sectores populares como fuerza de trabajo y a profesionales y técnicos, provocando a principios de los años setenta, una explosión demográfica que se ve representada en el surgimiento de la localidad de Villa el Chocón que trae aparejada la formación del lago artificial Ezequiel Ramos Mexía, producto de la construcción de la presa sobre el río Limay.

Así, en el año 1975 se crea el Municipio de tercera categoría en Villa El Chocón (Ley 769-Decreto N° 3.194), carente de jurisdicción pues el territorio, en esos tiempos, se mantenía de carácter federal, no pudiendo ejercer funciones propias, dado que la empresa Hidronor S.A. tenía a su cargo la mantención de las viviendas, de la infraestructura y la prestación de los servicios básicos. El poder de decisión y acción del Municipio estuvo siempre limitado por la empresa hasta 1993, año en el que se privatiza el Complejo (CFI, 2017).

Actualmente, la localidad de Villa El Chocón cuenta con 1.174 habitantes y está conformada por dos sectores urbanos claramente identificados y bien definidos separados por una distancia de 4 kilómetros: el Casco Histórico y Barrio Llequén (*Figs. 1-2*). Por una parte, el Casco Histórico cuenta con 157 viviendas divididas en tres barrios, mientras que el Barrio Llequén cuenta con 37 viviendas divididas en dos sectores separados por un cañadón aluvional que atraviesa el barrio de norte a sur. Algunos de los inconvenientes más notorios son el déficit de conectividad entre ambos sectores urbanos, tratándose de 4 kilómetros de camino interno en malas condiciones de transitabilidad, sin asfalto ni sendero peatonal e iluminación sumado al déficit de infraestructura pluvioaluvional. Barreras naturales como cañadones no cuentan con puentes ni sendas peatonales, por lo que las lluvias esporádicas torrenciales arrastran material y lodo por los cañadones y dificultan los accesos a los barrios provocando cortes.

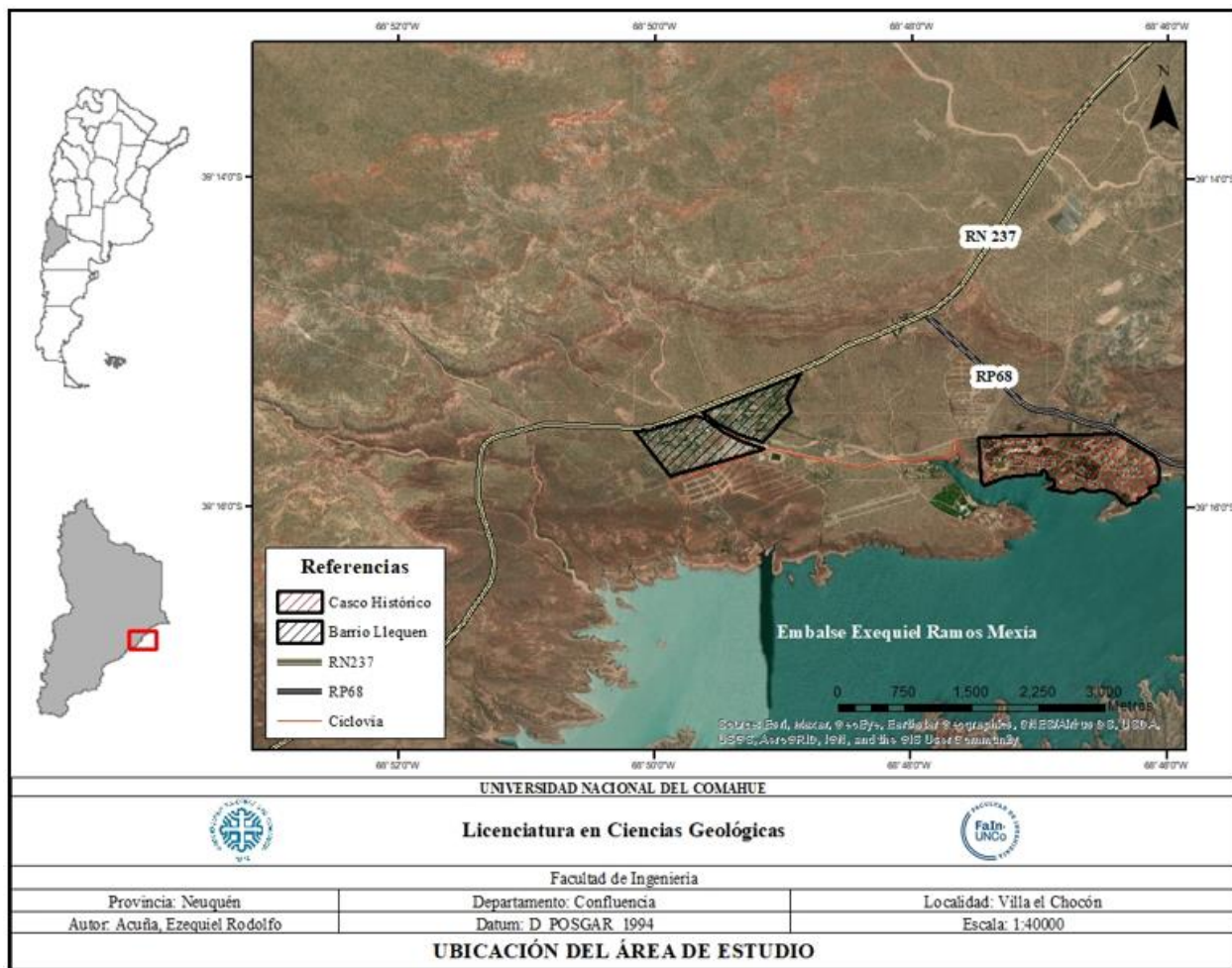


Figura 1: Área de estudio, localidad de Villa el Chocón.

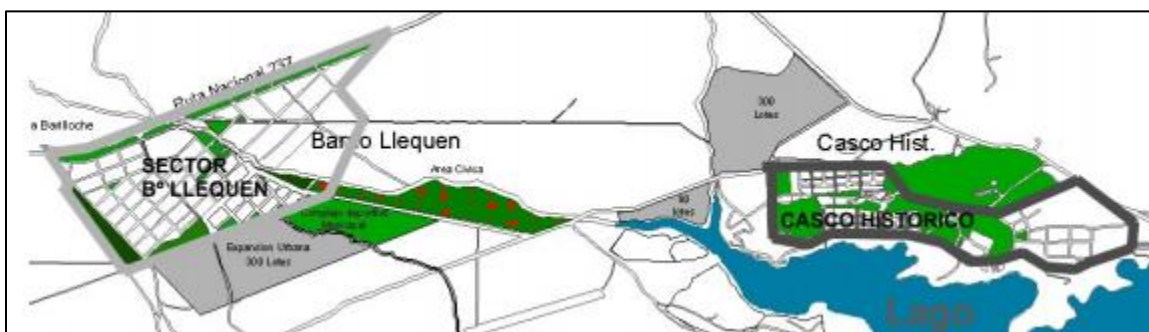


Figura 2: Conformación urbana de Villa el Chocón (Fuente: Plan Nacional del Hábitat, 2017).

Con el objetivo de resolver esta problemática y lograr la integración de ambos sectores urbanos, la Municipalidad de Villa El Chocón propone la construcción de obras civiles que cubran la extensión total de 4358 metros lineales y crucen dos cañones en el sector Boca del Sapo (*Fig. 3*).

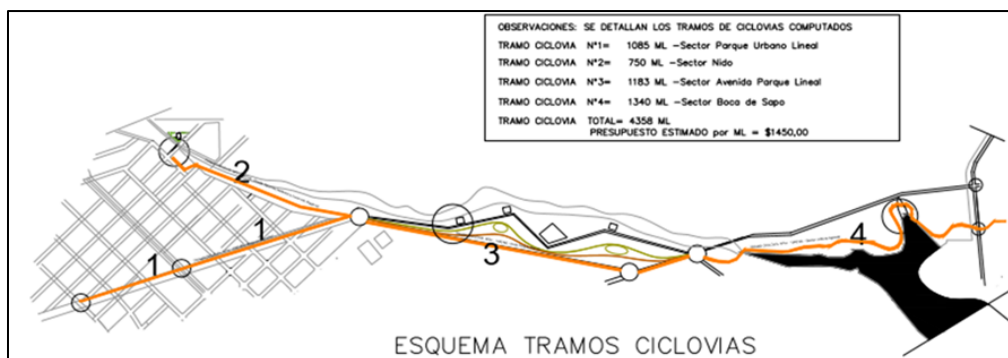


Figura 3: Proyecto de ciclovía presentado por la Municipalidad de Villa el Chocón (Fuente: Plan Nacional del Hábitat, 2017).

En función de lo expuesto, para este Trabajo Final de Licenciatura, se propone evaluar el riesgo hídrico asociado al comportamiento de las cuencas aluvionales que afectan la conectividad entre el Casco Histórico y el Barrio Llequén, que sirvan como información geológica base para el diseño de la ingeniería de obra. Se analizan en condiciones actuales naturales las secciones de cruce y se evalúa el comportamiento hidrológico e hidráulico, utilizando modelos calibrados con parámetros relacionados con la geología, geomorfología, suelos y geotecnia. En este trabajo no se tiene en cuenta una tipología estructural de resolución de cruce, ya que el proyecto no presenta una ingeniería básica.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

- Evaluar el riesgo hídrico generado por cuencas aluvionales que afectan a la Ciclovía propuesta para la conectividad entre el casco Histórico y Barrio Llequén.
- Determinar las variables hidráulicas y parámetros geotécnicos que deberán ser utilizados en el proyecto de las estructuras viales.

### 2.2 Objetivos específicos

- Realizar una caracterización hidrológica de las cuencas aluvionales, con el fin de determinar los caudales de diseño.
- Calibrar los modelos hidrológicos con parámetros referidos a la geología, geomorfología y suelos.
- Elaborar una simulación hidráulica del escurrimiento que afecta la traza de la ciclovía con el fin de obtener variables referentes a la altura, velocidad y extensión de la lámina de escorrentía.
- Efectuar una caracterización geotécnica con el fin de evaluar la erosión en suelo, y en particular la erosión hidrodinámica sobre el lecho rocoso conformado por las areniscas del Grupo Neuquén.
- Generar una información de base hidrológica e hidráulica que permita la justificación y diseño de la ingeniería de obra.

### 3 ANTECEDENTES

Es posible encontrar trabajos de Hill *et al.* (1988) y Wiitala *et al.* (1961) publicados por la USGS - Servicio Geológico de los Estados Unidos – sobre los aspectos hidráulicos e hidrológicos a tener en cuenta para la planificación del manejo de inundaciones.

En el municipio colombiano de San José del Guaviare, Naranjo (2011) realizó un estudio multidisciplinario para la evaluación de obras de protección en uno de los meandros del río Guaviare, donde los procesos de erosión y sedimentación generan variaciones morfológicas de gran importancia que amenazan la estabilidad urbana. En este trabajo, Naranjo realizó un análisis geomorfológico, hidráulico, de geotecnia y suelos, morfología y dinámica fluvial. Castillo y Carrillo (2016), evaluaron la estabilidad y seguridad de la presa Paute-Cardenillo, ubicada en el río Paute (Ecuador), basándose en el método semi-empírico, elegido para este Trabajo Final de Licenciatura. Los autores aplicaron el Método del Índice de Erodabilidad de Annandale para depósitos aluviales y material rocoso erosionado e intacto, obteniendo valores de  $K$  que van desde 1,69 para los depósitos aluviales; de 40 a 50 para roca erosionada, hasta valores de 3.200 para material de roca intacta.

A nivel nacional, Farías (2009) realizó una propuesta metodológica para la evaluación del riesgo aluvional en cursos efímeros que son atravesados por conductos subterráneos en la provincia de Mendoza. Se estudiaron una serie de cañadones que atraviesan la traza de un oleoducto y que pueden llegar a afectar la integridad estructural del mismo a través de procesos de erosión generalizada del lecho durante eventos hidrológicos severos. Dichos procesos de erosión generalizada fueron calculados mediante la fórmula de Lischtvan & Lebediev. Asimismo, el autor propuso una clasificación de cauces según el grado de peligrosidad.

En el Alto Valle regional, como resultado de los aluviones que afectaron a la provincia del Neuquén los días 11 y 12 de marzo de 1975, se han realizado una gran cantidad de estudios hidrológicos en toda el área provincial. Fernández *et al.* (1980), a través del Centro Regional Andino del Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas, presentaron un estudio regional de control aluvional con el objetivo de identificar cuencas aluvionales, determinar áreas de riesgo y calcular los parámetros físicos e hidrológicos que permitan ejecutar obras de corrección aluvional en áreas urbanas, rurales o industriales. El trabajo, considerado en ese tiempo como el estudio más complejo y extenso realizado en el país, se trató del estudio detallado de 1.800km<sup>2</sup>, desde Cutral C6 hasta Barreales Colorados, donde se aplicó un modelo matemático de simulación de precipitación y escorrentía (Hymo 10). Adicionalmente, se realizó un estudio generalizado de 29.937 km<sup>2</sup> al sudeste de Neuquén, donde se identificaron 234 cuencas aluvionales, las cuales se clasificaron según su peligrosidad, detallándose los parámetros físicos más importantes, así como los caudales y volúmenes de diseño para diferentes tiempos de retorno y áreas afectadas en caso de crecientes.

En su trabajo enfocado en el Alto Valle de Río Negro, Dufilho *et al.* (2001), aplicaron una metodología de estudio de cuencas áridas que permitan el diseño de obras de control de aluviones. En este trabajo, los autores obtuvieron valores de Curva Número (CN) entre 72 y 85 que se corresponden con el valor de CN de 80 sugerido por Fernández *et al.* (1980) para el área oriental de la Provincia de Neuquén.

Marizza *et al.* (2010), establecieron valores de CN superiores a 85 para sectores del Alto Valle rionegrino. Estos autores, realizaron una evaluación de la dinámica hídrica de cuencas aluvionales en un área de 2.900km<sup>2</sup> que abarcó las localidades de Cinco Saltos, Cipolletti, Fernández Oro, General Roca y Stefenelli. La escorrentía se obtuvo aplicando el modelo HEC-HMS, adoptando una tormenta de diseño del modelo de Intensidad de Precipitación para el Alto Valle del Río Negro; el método del Número de Curva como método de abstracción y el método del Hidrograma Unitario Sintético de Clark para la transformación lluvia-caudal.

Los autores basaron su trabajo en la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) para la evaluación de sedimentos. Se estudiaron un total de 21 cuencas aluvionales y se obtuvieron hidrogramas de crecida para tiempos de recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Si bien hay una gran cantidad de estudios de riesgo hídrico en lechos rocosos en la región, no es común asumir que este tipo de lechos pueden ser erosionables. El trabajo de Spalletti y Brea (2011) describe una metodología para la estimación de la erodabilidad de materiales rocosos en canales en la zona de Portezuelo Grande. Los procesos que pueden contribuir en forma significativa a la erosión de canales en roca son el descalce y arrancamiento o “*plucking*”; la abrasión debida al transporte de fondo y suspensión; la disolución, y la cavitación, además de procesos físicos y químicos de meteorización que pueden contribuir al debilitamiento del material. Spalletti y Brea, se basaron en la metodología semi-empírica desarrollada por Annandale (1995), también conocida como “Método del Índice de Erodabilidad” (*Erodibility Index Method*). Este método cuantifica la magnitud relativa de los efectos dinámicos de las corrientes que actúan sobre el material tratando de tener en cuenta la turbulencia del flujo, y empíricamente considera las propiedades del material que determinan su capacidad de resistir la erosión. Este método de análisis correlaciona la magnitud relativa del poder erosivo del agua a través de la potencia del escurrimiento por unidad de superficie “P”, con la resistencia del material representado a través del índice de erodabilidad “Kh”. Para la determinación del índice Kh se utilizaron parámetros geotécnicos tales como el coeficiente de resistencia de masa (Ms), coeficiente de tamaño de bloques (Kb), coeficiente de resistencia al corte en las discontinuidades (Kd), y el coeficiente de estructura del material (Js).

## 4 ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio está ubicada en el departamento Confluencia, en la localidad de Villa El Chocón, establecida en el margen norte del embalse artificial Exequiel Ramos Mexía, parte del aprovechamiento hidroeléctrico El Chocón. La localidad ( $39^{\circ}16'S$   $68^{\circ}47'O$ ), está situada en el centro-este de la provincia del Neuquén, en el extremo septentrional de la Patagonia Argentina.

### 4.1 Características climáticas

Según Pereyra *et al.* (2011), la provincia de Neuquén se puede dividir en dos sectores bien definidos. Por una parte, el sector occidental asociado al efecto orogénico de la Cordillera de los Andes en el que la humedad de los vientos provenientes del oeste es descargada como intensas precipitaciones. En zonas cercanas al límite internacional, las precipitaciones se acercan a los 2.500 mm anuales, disminuyendo hacia el este hasta el orden de los 500 mm. Hacia el sector oriental, al este del meridiano  $70^{\circ} 30' O$ , las lluvias disminuyen considerablemente con precipitaciones de 200 mm, llegando incluso por debajo de los 150 mm.

Respecto a la temperatura, los autores atribuyen a la mayor parte del territorio provincial, particularmente a la zona oriental, temperaturas medias anuales entre los  $12$  y  $14^{\circ}C$ ; mientras que la zona occidental, caracterizada por mayor altura y exposición a vientos del oeste, posee temperaturas medias anuales de entre  $8$  y  $12^{\circ}C$ , con valores de temperatura incluso menores para las zonas de mayor altura. La *Fig. 4*, muestra mapas provinciales de temperatura media anual y precipitación media anual.

Los agentes físicos exógenos más relevantes en la localidad de Villa El Chocón son las precipitaciones, los vientos y las heladas tardías que, en definitiva, son factores decisivos en el manejo y uso de los suelos. Es importante destacar que las precipitaciones alcanzan un promedio anual de 150 mm, son de alta intensidad y corta duración, provocando que el agua disponible en la superficie sea superior a la capacidad de infiltración de los suelos y que, por lo tanto, escurran superficialmente. La época de mayores precipitaciones corresponde a los meses de mayo a septiembre, época en que se produce una cierta recarga en el suelo. En tanto, en el periodo estival la evapotranspiración potencial es de 140 mm; mientras que las precipitaciones no superan los 20 mm, manifestándose un elevado déficit de agua (*Fig. 5*).



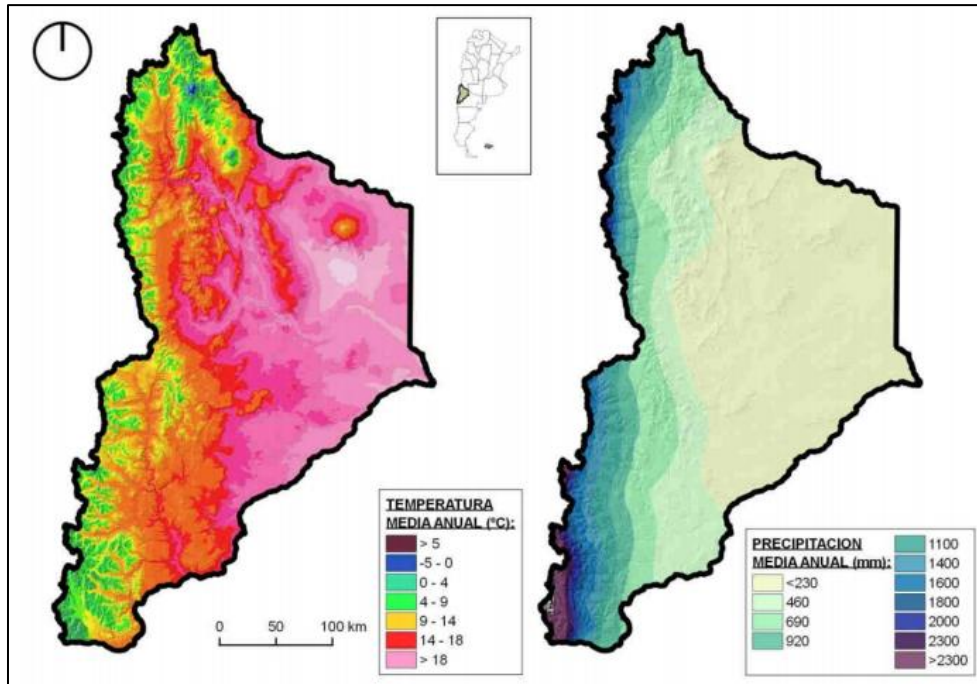


Figura 4: Temperatura media anual (°C) y precipitación media anual (mm) (Muguerza et al., 2015).

La dirección predominante de los vientos es oeste y suroeste, y superan los 100 km/h de velocidad. Estos vientos se manifiestan principalmente en las zonas elevadas, ya que el relieve plano de la meseta y la escasa altura de la vegetación natural, no constituyen obstáculos para los mismos. La humedad relativa del aire es muy baja, acusando un mínimo en verano con valores menores al 40% y el máximo en invierno con el 70 a 80%.

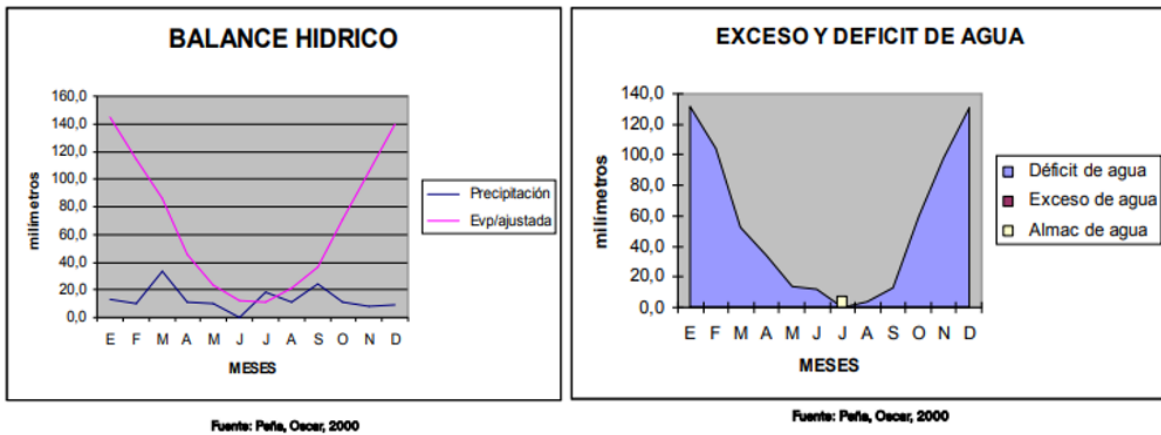


Figura 5: Balance hídrico estival, manifestándose un déficit de agua (Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial de Villa el Chocón).

## 4.2 Suelos

Los suelos a nivel provincial fueron estudiados por Ferrer *et al.* (1990). Se definieron cuatro órdenes de suelo: Entisol, Aridisol, Molisol, Andisol, y cuatro órdenes subordinados: Inceptisol, Alfisol, Histosol y Vertisol. Los Entisoles ocupan un 35% de la superficie total de la provincia, asociados a la región árida. La **Fig. 6** muestra un mapa de suelos de la provincia del Neuquén, elaborado en el marco del convenio entre el Programa de Servicios Agrícolas Provinciales (PROSAP) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). En la zona de estudio predominan dos órdenes: Entisoles y Aridisoles, los cuales se caracterizan por no desarrollar horizontes diagnósticos debido a la deficiencia de agua; son de color claro y presentan escaso contenido de materia orgánica. Los suelos del orden Aridisol están asociados a climas áridos y semiáridos. Dado que se encuentran bajo condiciones de déficit hídrico la mayor parte o la totalidad del año, es frecuente que presenten acumulaciones salinas, calcáreas o bien yesosas cerca de la superficie.

El área de estudio se caracteriza por la ausencia de suelo, dominando los asomos rocosos, esencialmente areniscas y fangolitas del Grupo Neuquén sobre relieve abrupto. En el sector planiforme se desarrollan los Torriortentes Típicos de fase somera. Son suelos de textura franco-arenosa limitados por la presencia de un manto rocoso entre los 50 cm y 90 cm.

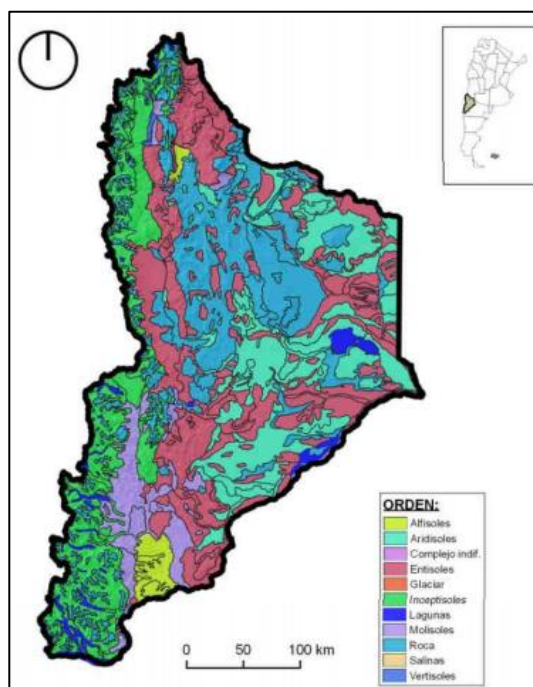


Figura 6: Suelos de la provincia del Neuquén (Ferrer *et al.*, 1990).

### 4.3 Vegetación

En la provincia del Neuquén, se distinguen diferentes tipos de formaciones vegetales: bosques, estepa arbustiva herbácea y estepa arbustiva (Movia *et al.*, 2007).

El alto grado de evapotranspiración que registra la localidad de Villa el Chocón y las características de los suelos brindan un panorama fisonómicamente homogéneo del tipo de estepa arbustiva constituida por especies xerófilas. Fitogeográficamente, la región corresponde a la provincia de Monte, constituida por una estepa arbustiva (**Fig. 7**). Este tipo de formación vegetal se encuentra en áreas con suelos pocos desarrollados y con precipitaciones por debajo de los 200 mm anuales, dominando los arbustos bajos de 1.5 a 2 m de altura, de hojas pequeñas y permanentes, distribuyéndose espaciadamente dejando una gran porción del suelo desnudo. Las especies predominantes son jarilla *Larrea divaricata*, *Larrea cuneifolia*, matasebo (*Monttea aphylla*), alpataco (*Prosopis alpataco*), zampa (*Atriplex lampa*), molle (*Schinus polvgamus*), tomillo (*Acantholippia seriphioides*), etc (**Tabla 1**). Acompañando a estas especies dominantes aparece un estrato de arbustos pequeños y gramíneas, y un tapiz formado por efímeras y musgos asociados a los montículos arenosos en los que conviven especies de los distintos estratos (Movia *et al.*, 1982). Las mismas están desarrolladas en equilibrio con el clima y proporcionan muy poca materia orgánica al perfil del suelo.

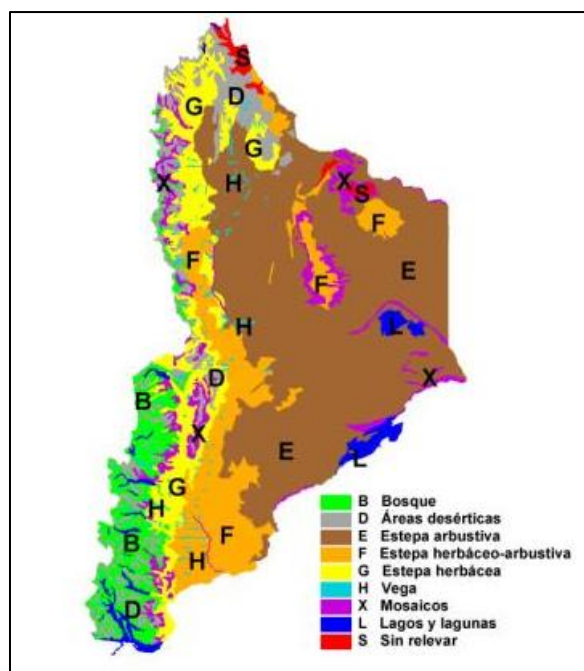


Figura 7: Vegetación de la Provincia del Neuquén (Ayesa *et al.* 2002).

El tipo de vegetación natural, arbustiva y baja no ofrece resistencia a los vientos produciendo la voladura de los sedimentos más finos. Sin embargo, especies vegetales tales como la *Atriplex lampa* (zampa) y el *Prosopis alpataco* (alpataco), por su forma globular y baja, interceptan los sedimentos y hacen que éstos se depositen a sotavento.

Los árboles se encuentran en los bordes de los ríos formando bosques en galería en donde sus raíces pueden obtener agua subterránea. Son característicos los sauzales que es un tipo de bosque donde predomina una única especie arbórea, el “sauce colorado” (*Salix humboldtiana*).

En los cauces de ríos permanentes, temporarios y surcos de avenamiento se desarrollan matorrales ribereños (vegetación no arbórea). Esta vegetación de cauce de inundación e islas incluye *Suaeda divaricata*

(vidriera), *Larrea nítida* (jarilla de río), pajonales de *Phragmites comunis*, solo o acompañado de *Cortadiera sp.*, juncuales de *Juncus acutus* y chilcales de *Baccharis salicifolia* (chilca). Se observa *Panicum urvillanum* (tupá o ajo macho) en suelos arenosos y *Sporobolus rigens* (unquillo) en suelos arenosos y salinos.

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Provincia Fitogeográfica | Monte                                      |
| Fisonomía característica | Estepa arbustiva                           |
| Estratos predominantes   | . Arbustivo<br>. Suarbustivo<br>. Herbáceo |
| Especies representativas |  |
| Nombre vulgar            | Nombre científico                          |
| Jarilla                  | <i>Larrea sp</i>                           |
| Zampa                    | <i>Atriplex lampa</i>                      |
| Alpataco                 | <i>Prosopis alpataco</i>                   |
| Vidriera                 | <i>Saudea divaricata</i>                   |
| Matasebo                 | <i>Montea Aphylla</i>                      |
| Tomillo                  | <i>Alcantholippia seriphoides</i>          |
| Brea                     | <i>Cercidium australe</i>                  |
| Pasto Hilo               | <i>Poa lanuginosa</i>                      |
| Olivillo                 | <i>Hyalis argentea</i>                     |

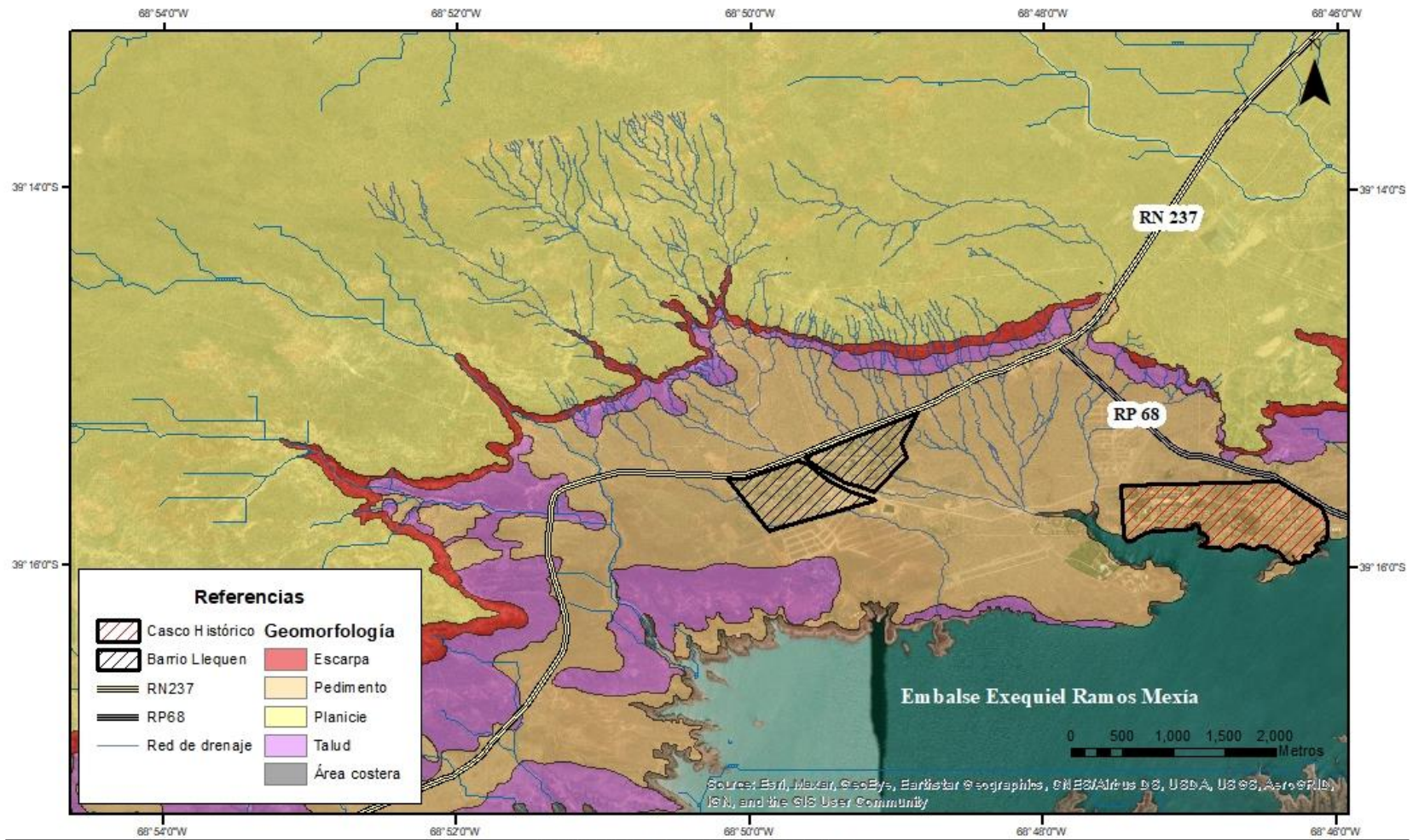
Tabla 1: Especies representativas de la localidad de Villa el Chocón (Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial de Villa el Chocón).

#### 4.4 Geomorfología

La geomorfología de la provincia del Neuquén es considerada un aspecto por demás complejo debido a que existe una gran variedad de procesos geomorfológicos actuantes en el territorio, aunque por extensión y por variedad geomórfica, el proceso dominante es el fluvial. González Díaz y Ferrer (1986) sugieren describir la geomorfología de la provincia de acuerdo a los procesos formadores endógenos y exógenos. De esta manera, la zona de la localidad de Villa el Chocón se corresponde con un paisaje generado por procesos exógenos con una distinción morfogenética fluvial. A su vez, los autores mencionados llevan a consideración la influencia del control estructural en el paisaje. En la terminología geomórfica, el concepto de estructura incluye las propiedades intrínsecas de las rocas (litología y carácter estructural) y otros aspectos como grado de consolidación, cementación, espesor y distribución de unidades de diferentes características, granulometría, tamaño, tipo y distribución de estructuras internas tales como fallas, diaclasas, clivaje, foliación, estratificación, etc.

En la zona de estudio se identificaron zonas con nulo o escaso control estructural como zonas pedimentadas, así como también zonas con evidente control estructural como planicies estructurales por arrasamiento (González Díaz y Ferrer, 1986). En trabajos más recientes, González Díaz y Di Tommaso (2011), replantearon el alcance de la caracterización. Así, lo que se catalogaba como “planicies estructurales por arrasamiento”, se reclasificó a “remanentes de planicies estructurales sedimentarias controladas por una cubierta conglomerádica”, las cuales se caracterizan por estar compuestas por gruesas acumulaciones de rodados cementados por carbonato de calcio, con espesores que varían entre los 2 y 4 metros, característico de la zona de Villa el Chocón.

La **Fig. 8**, muestra elementos geomorfológicos presentes en la zona de estudio como escarpa, pedimiento, planicie, talud, y zona costera.





|  |                           |                            |
|--|---------------------------|----------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE   |                           |                            |
|  <span style="float: right;"></span> |                           |                            |
| <b>Licenciatura en Ciencias Geológicas</b>   |                           |                            |
| Facultad de Ingeniería   |                           |                            |
| Provincia: Neuquén   | Departamento: Confluencia | Localidad: Villa el Chocón |
| Autor: Acuña, Ezequiel Rodolfo   | Datum: D POSGAR 1994      | Escala: 1:50000            |
| <b>ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS</b>   |                           |                            |

Figura 8: Elementos geomorfológicos del área de estudio: escarpa, pedimento, planicie, talud y áreas costera. Es evidente que la red de drenaje tiene un control estructural.

#### 4.5 Geología y litología

La zona de Villa El Chocón se caracteriza por presentar afloramientos cretácicos de la Formación Candeleros<sup>1</sup> y, en menor medida, de la Formación Huincul, Subgrupo Río Limay correspondiente al Grupo Neuquén (Leanza *et al.*, 2011).

El Grupo Neuquén constituye una secuencia litológica de la Cuenca Neuquina de aproximadamente 1.200 metros de espesor máximo que está integrada por una sucesión de depósitos rojos continentales del Cretácico Superior, compuesta principalmente de areniscas, fangolitas y grauvacas con una reducida participación de horizontes conglomerádicos (Garrido, 2014). Hacia la base, esta sucesión se encuentra limitada por la discordancia Patagónica (Leanza, 2009) y por la discordancia Huantráiquica hacia el techo (Méndez *et al.*, 1987) (*Fig. 9*).

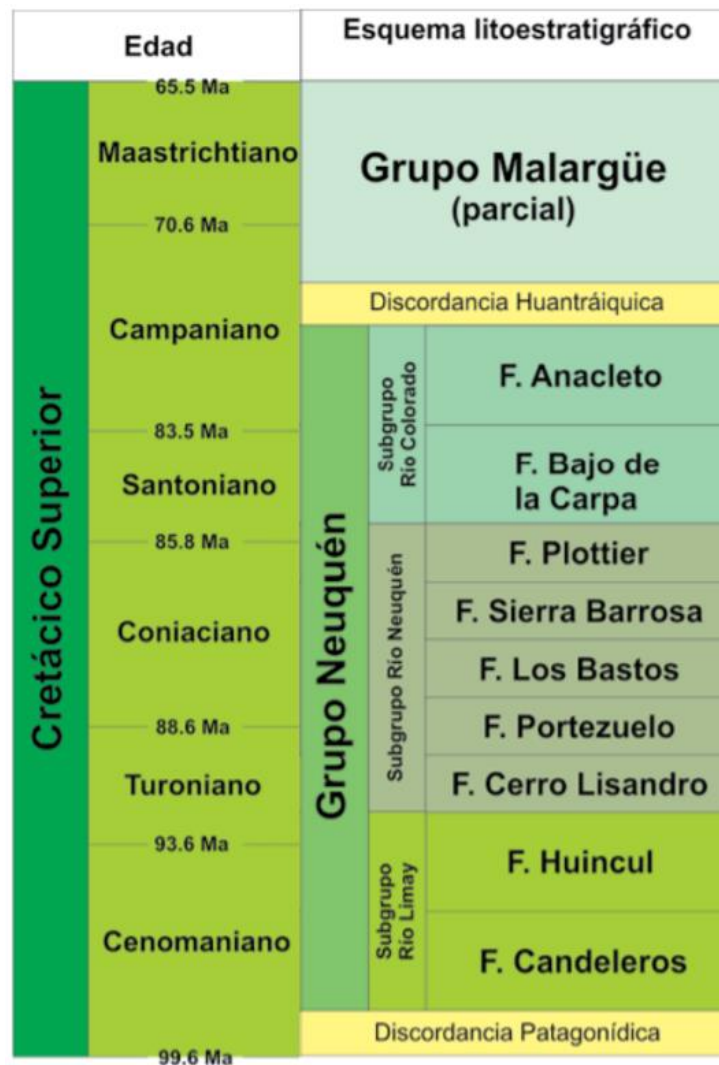


Figura 9: Esquema litoestratigráfico del Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (modificado de Garrido, 2014)

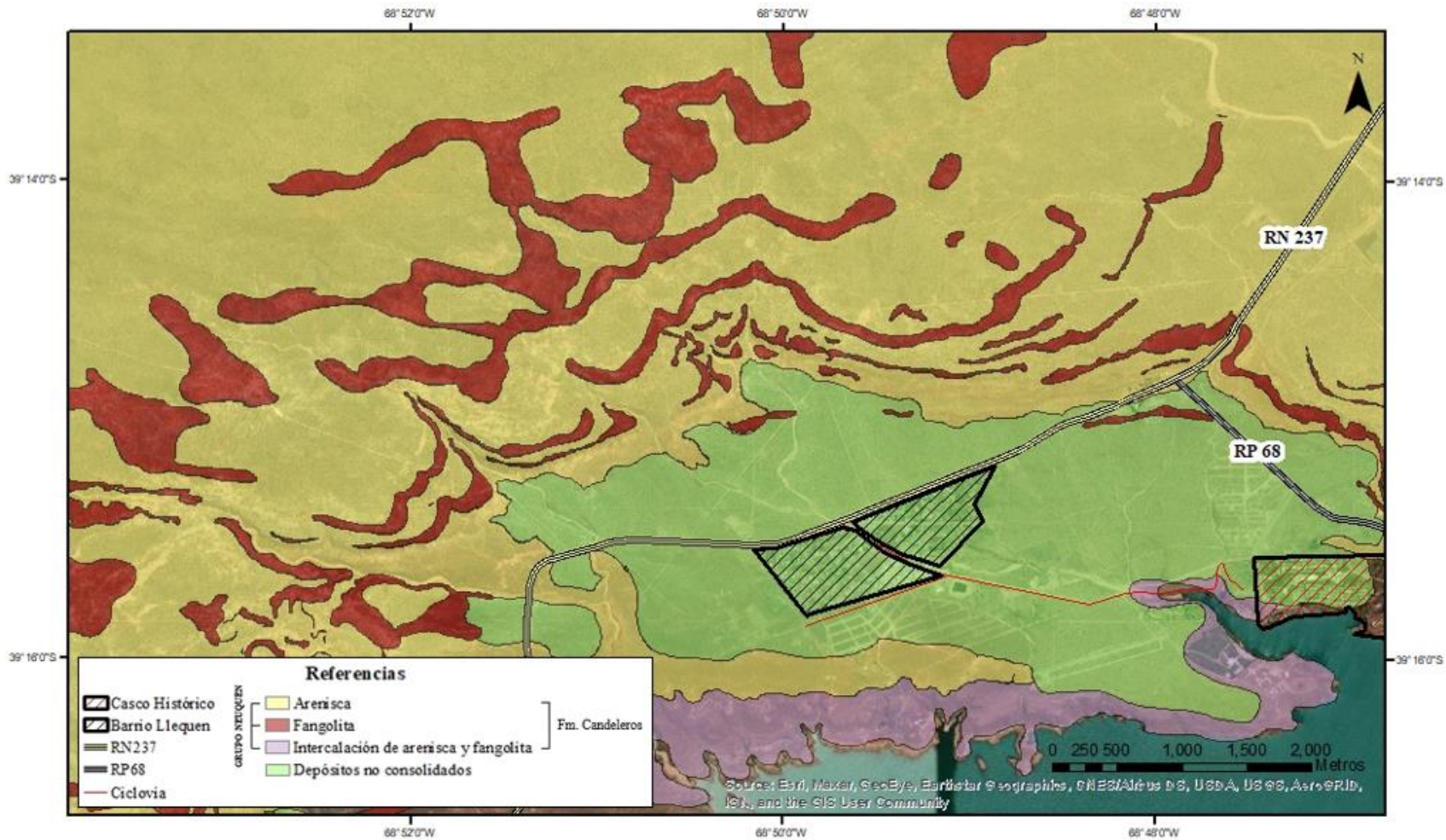
<sup>1</sup> Conocida históricamente como “Areniscas con Dinosaurios” (Groeber, 1929, 1931), “Estratos con Dinosaurios” (Keidel, 1917, 1925; Windhausen, 1922), “Formación Neuquén” (Di Paola 1973), entre otros.

El Grupo Neuquén, según la reorganización propuesta por Garrido (2014) se encuentra subdividido en tres subgrupos y nueve formaciones. Cada subgrupo, representaría una secuencia granodecreciente continua que se corresponde con un mismo conjunto de sedimentos depositados bajo condiciones uniformemente alternantes (Cazau y Uliana, 1973).

El Subgrupo Río Limay está representado por los depósitos basales del Grupo Neuquén y se encuentra conformado por las Fms. Candeleros y Huincul. La Fm. Candeleros, al igual que todas las unidades que conforman al Grupo Neuquén, se compone por una sucesión de areniscas cuarzolíticas, finas a gruesas, con granos subangulosos a subredondeados. La presencia en estos depósitos de una matriz fangosa constituye un rasgo característico que los distingue del resto de las unidades del Grupo Neuquén, ya que, esta matriz es la responsable de la típica coloración morada a rojiza que caracteriza a los depósitos de esta zona (Garrido, 2014).

La Fm. Candeleros, de edad albiense-cenomaniense (Calvo, 1991), es por demás reconocida por su valor paleontológico. Se han reportado una gran variedad de faunas de reptiles fósiles, tales como dinosaurios saurópodos como *Limaysaurus tessonei* (Calvo y Salgado, 1995), y dinosaurios terópodos como el *Giganotosaurus carolinii* (Coria y Salgado, 1995). Los depósitos correspondientes a la Fm. Candeleros en el área de Villa el Chocón, también son ricos en icnitas de vertebrados, como dinosaurios saurópodos (*Sauropodichnus giganteus*; Calvo, 1991), dinosaurios terópodos (*Abelichnus astigarrae*, *Bressanichnus patagonicus*, *Deferrariischnium mapuchensis* y *Picunichnus benedettoi*; Calvo, 1991), dinosaurios ornitópodos (*Sousaichnium momettae* y *Limayichnus major*; Calvo, 1991) y pterosaurios (*Pteraichnus sp.*, Calvo y Lockley, 2001). Asimismo, estos depósitos presentan una variada asociación de trazas de invertebrados correspondientes a la icnofacies de Scoyenia (Aramayo y Bocanegra, 2001) y *Termitichnus* (Garrido, 2000).

La **Fig. 10** muestra la litología del área de estudio donde se observa una intercalación de areniscas y fangolitas en las zonas definidas geomorfológicamente como planicie, escarpa y talud.





|   |  |   |
|---|--|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE  |  |   |
|  | <b>Licenciatura en Ciencias Geológicas</b> |  |
| Facultad de Ingeniería  |  |   |
| Provincia: Neuquén  | Departamento: Confluencia                  | Localidad: Villa el Chocón  |
| Autor: Acuña, Ezequiel Rodolfo  | Datum: D POSGAR 1994                       | Escala: 1:40000   |
| <b>LITOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO</b>  |  |   |

Figura 10: Mapa litológico de la zona de estudio. Se distinguen areniscas, fangolitas, intercalación de areniscas y fangolitas de la Fm. Candeleros.



## 5 MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO

### 5.1 Esquema metodológico

Se realizaron reuniones con las autoridades de la Municipalidad de Villa El Chocón con el fin de recopilar información necesaria con respecto al proyecto de ciclovía para la integración de los barrios Llequén y Casco Histórico. Se prosiguió con el procesamiento de imágenes mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la delimitación de cuencas a partir de un modelo digital del terreno, haciendo uso del software de computadora ArcGIS<sup>2</sup>. Se realizaron visitas de campo para conocer y relevar los puntos críticos para el estudio, incluyendo la realización de ensayos de infiltración para el análisis de la tasa de infiltración del suelo. Una vez procesada la información obtenida en campo, se utilizó el software HEC-HMS (USACE, 2018) para la generación del modelo hidrológico y la determinación de la escorrentía. Se propuso trabajar con tiempos de recurrencia de 25 y 100 años según las disposiciones de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Neuquén. Una vez obtenidas las tormentas de diseño para los tiempos de recurrencia propuestos, se prosiguió a la generación del modelo hidráulico utilizando el software HEC-RAS (USACE, 2016), mediante el cual se pudieron extraer los parámetros hidráulicos necesarios para la aplicación del Método del Índice de Erodabilidad de Annandale.

Síntesis metodológica del estudio (Fig. II):

- Recopilación de información base, cartográfica, imágenes satelitales.
- Visitas de campo. Relevamiento de cauces y ensayo de infiltración con anillo doble con el fin de ajustar el CN mediante ecuación de Horton. Toma de muestra para ensayos de laboratorio.
- Geoprocesamiento mediante ArcGIS utilizando el Modelo Digital de Elevación del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Evaluación del potencial de escorrentía mediante el Método del Curva Número (CN).
- Modelación hidrológica mediante HEC-HMS.
- Simulación de crecidas a través del software HEC-RAS, haciendo uso de un modelo digital de elevación generado por relevamiento aerofotogramétrico (Drone). Se propusieron dos modelos hidráulicos.
- Obtención de variables hidráulicas de interés a partir de la modelación en HEC-RAS.
- Estudio de Laboratorio: Ensayo de compresión simple
- Aplicación del método de Índice de Erodabilidad de Annandale.

---

<sup>2</sup> Copyright © 1999-2008 ESRI

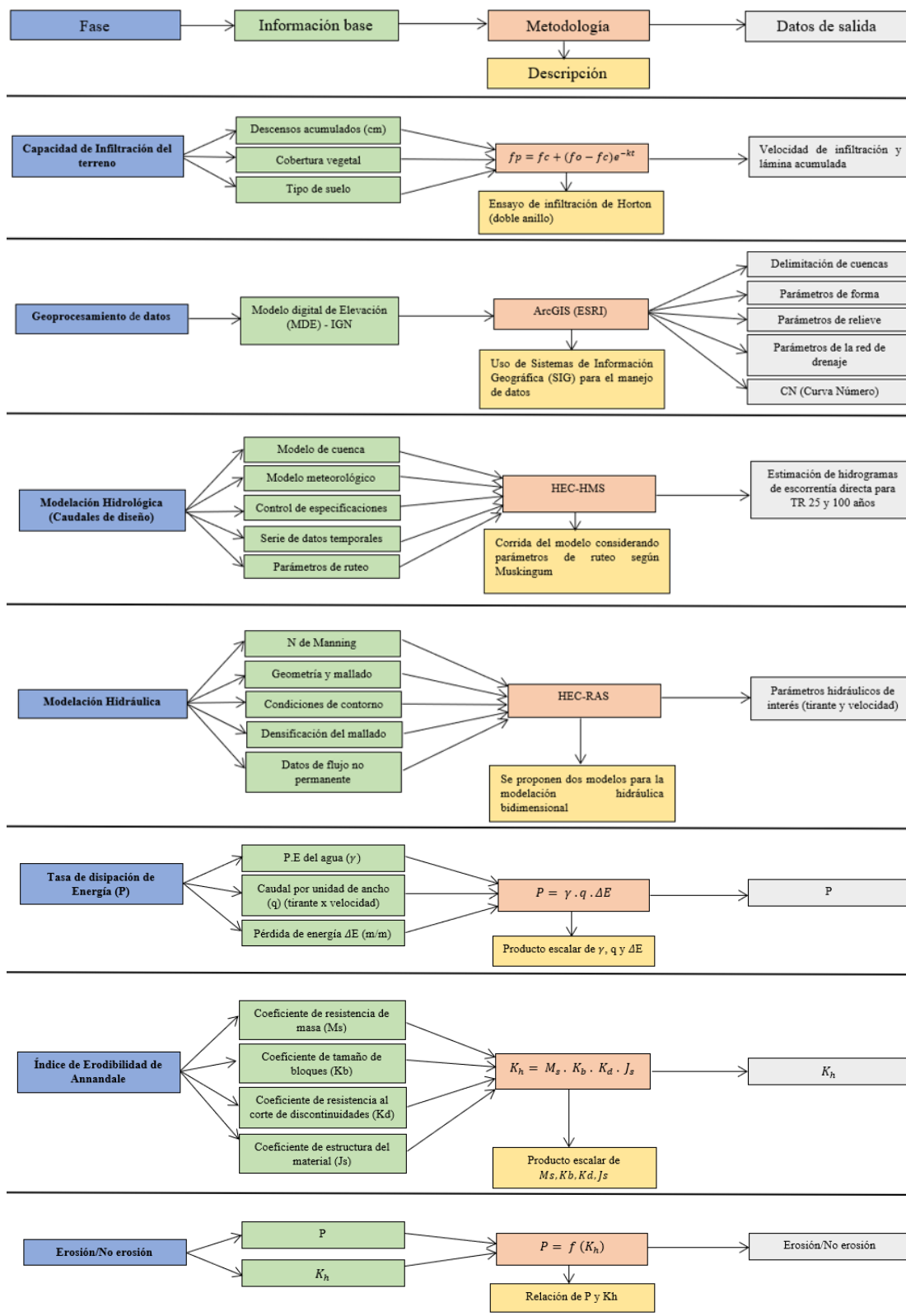


Figura 11: Esquema metodológico para la realización del Trabajo Final de Licenciatura.

Las precipitaciones pueden ser definidas como cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre, ya sea en forma de lluvia, nieve o granizo, y son consideradas eventos o fases vitales para el funcionamiento y entendimiento del ciclo hidrológico en un determinado tiempo y lugar. El ciclo hidrológico, a su vez, puede ser considerado como el movimiento general del agua que puede ser ascendente por evaporación y descendente por precipitaciones. A partir de las precipitaciones, el agua puede seguir su camino en forma de escorrentía superficial o subterránea.

- Evaporación: Una parte se evapora desde la superficie del suelo o por el fenómeno de interceptación, referida al agua retenida sobre las hojas de los árboles.
- Infiltración: Infiltración del agua en el suelo que, a su vez, puede seguir distintos caminos:
  - a. Evaporación: Se evapora desde el suelo húmedo.
  - b. Transpiración: Las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada del suelo. Así, una parte del agua es retenida para su crecimiento y la otra parte es transpirada.

Estos conceptos combinados se definen como *evapotranspiración*.

- c. Fracción de agua infiltrada que escapa de la rizosfera, participando en la recarga de acuíferos. El agua puede viajar largas distancias, o permanecer por largos períodos como agua subterránea antes de retornar a la superficie, o filtrarse hacia otros cuerpos de agua, como arroyos o océanos.
- Escorrentía superficial: El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, escurre superficialmente.

Las precipitaciones pueden clasificarse en tres grupos principales: convectivas, ciclónicas y orográficas. Las precipitaciones convectivas son aquellas relacionadas a un fuerte calentamiento de la tierra en verano, dando origen a células convectivas, especialmente cuando la baja temperatura de la estratosfera superior facilita la liberación de inestabilidad convectiva o condicional. Las precipitaciones ciclónicas son generadas por el ascenso del aire por la convergencia horizontal de corrientes en una zona de bajas presiones, generando precipitaciones moderadas y generalmente continuas sobre áreas muy extensas. Por último, las precipitaciones orográficas resultan del choque entre las corrientes oceánicas de aire que cruzan sobre la tierra y las barreras montañosas, generando la elevación mecánica del aire, el cual se enfría bajo la temperatura de saturación y vierte humedad sobre las pendientes a barlovento.

Las precipitaciones, cualquiera sea su tipo, caen sobre un espacio geográfico conocido como cuenca. Se trata del espacio del territorio en el cual naturalmente discurren todas las aguas hacia un único lugar o punto de descarga (río, lago u océano), y es un espacio territorial natural independiente de las fronteras político-administrativas internas de un país o de fronteras internacionales (Ordoñez Gálvez, 2011). Según Gaspari (2013), una cuenca hidrográfica es una unidad morfológica integral que se define en un territorio donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural delimitada por la existencia de divisoria de las aguas.

## 5.2 Caracterización de subcuencas

Según Brieva (2018), el primer paso para la comprensión y el análisis de los procesos hidrológicos que se producen en una cuenca es el de conocer las características físicas y morfométricas de las cuencas, las cuales son la base cuantitativa para predecir la respuesta de una cuenca. Se tienen parámetros asociados a la forma de la cuenca; parámetros relativos al relieve; y parámetros relativos al drenaje.

### 5.2.1 Parámetros de forma

Brieva (2018) establece que la forma de una cuenca condiciona tanto la velocidad de escurrimiento superficial, así como las características del hidrograma de descarga de una determinada corriente, por lo que son parámetros particularmente importantes en los eventos de crecidas máximas.

- Área de la cuenca (A):** Proyección horizontal de la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido a un mismo cauce natural. Habitualmente se expresa en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) o hectáreas (ha).
- Perímetro de la cuenca (P):** Longitud del contorno del área de la cuenca. Es un parámetro importante, pues junto con el área pueden dar información útil respecto a la forma de la cuenca. Generalmente se expresa en kilómetros (km).
- Índice de Gravelius (Cg):** Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de la misma superficie. En base a este valor se pueden clasificar a las cuencas según su forma en redonda (Cg=1,00-1,25); ovalada (Cg=1,25-1,50); alargada (Cg=1,50-3,00).

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde: Cg: Coeficiente de Gravelius; P: Perímetro de la cuenca en km; A: Área de la cuenca en km<sup>2</sup>.

### 5.2.2 Parámetros de Relieve

- Curva Hipsométrica:** Representa gráficamente las cotas del terreno en función de las superficies que éstas encierran. La curva hipsométrica muestra la potencialidad erosiva debido a la forma de distribución de sus pendientes que comparada con curvas patrones indica la presencia de una cuenca joven, madura o vieja (**Fig. 12**).

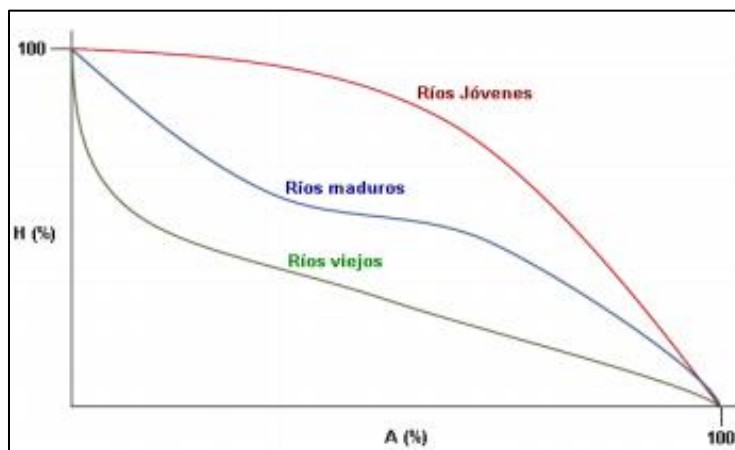


Figura 12: Curvas hipsométricas guías (Ibañez, 2011).

- Pendiente media de la cuenca (S):** Se calcula como 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.
- Pendiente media del cauce principal (Jc):** Se calcula directamente por la media aritmética considerando las elevaciones extremas del cauce principal y la longitud del cauce principal (Lc).

### 5.2.3 Parámetros relativos a la red de drenaje

- Longitud del cauce principal (Lc):** La longitud del cauce de una cuenca está definida por la longitud de su río principal, siendo la distancia en kilómetros.
- Tiempo de concentración (tc):** Tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca. Es el tiempo de equilibrio de la cuenca y es el parámetro hidrológico más importante para el diseño. El tiempo de concentración es característico de cada cuenca y tiene relación con sus propiedades físicas. Varios autores desarrollaron fórmulas para calcular el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas. Algunos de los métodos más utilizados para la determinación del tiempo de concentración son:

#### Témez (1978)

$$Tc = 0,3 \left( \frac{Lc}{Jc^{0,25}} \right)^{0,76}$$

donde tc: Tiempo de concentración, Lc: longitud del mayor recorrido del escurrimiento (km), Jc: Pendiente del curso principal (m/m).

#### Kirpich (1940)

El tiempo de concentración (tc) según Kirpich es válido para cuencas entre 0,5 y 45 ha y su fórmula es:

$$Tc = 0,066 \left( \frac{Lc}{\sqrt{Js}} \right)^{0,77}$$

donde tc: Tiempo de concentración, Lc: longitud del mayor recorrido del escurrimiento (km), Js: Pendiente del curso principal (m/m).

#### SCS (1973)

$$Tc = \left( \frac{Lc^{0,8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{441 * Jc^{0,5}} \right)^{0,76}$$

donde tc: Tiempo de concentración, Lc: longitud del mayor recorrido del escurrimiento (m), Jc: Pendiente de la cuenca en (%).

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 urbanas con área inferiores a 800 ha.

### 5.3 Método de Horton

Este método establece que el cambio en la capacidad de infiltración puede ser considerada proporcional a la diferencia entre la capacidad de infiltración actual y la capacidad de infiltración final, introduciendo un factor de proporcionalidad “k”.

$$fp = fc + (fo - fc)e^{-kt}$$

fp: Capacidad de infiltración (mm/h).

k: Factor de proporcionalidad.

fc: Capacidad de infiltración final (mm/h).

fo: Capacidad de infiltración inicial (t=0) (mm/h).

t: Tiempo transcurrido desde el inicio de la infiltración (minutos).

Transformando la ecuación de Horton en una forma logarítmica se obtiene:

$$\text{Log}(fp - fc) = \log(fo - c) - k \log e.t$$

Con esta fórmula, es posible graficar la infiltración (mm/h) y la infiltración acumulada (mm/h) en base a un tiempo (hs).

#### 5.4 Determinación del potencial de escorrentía. Método de Curva Número del SCS

El Curva Número (CN) es un método semiempírico, desarrollado por el SCS (*Soil Conservation Service*, 1972) que correlaciona la precipitación total y la precipitación efectiva. Este parámetro adimensional (0-100) depende de una serie de factores como el uso de la tierra, pendiente, tipo de suelo y humedad antecedente.

Un factor importante a tener en cuenta en estas curvas son las condiciones antecedentes de humedad (*Antecedent Moisture Conditions*), las cuales se agrupan en tres condiciones básicas:

- AMC (I): Condiciones secas
- AMC (II): Condiciones normales
- AMC (III): Condiciones húmedas

De esta manera, el Método del Curva Número (CN) del *U.S. Soil Conservation Service*, plantea la siguiente relación:

$$\frac{P - Es - Po}{S} = \frac{Es}{P - Po}$$

Siendo:

P-Es-Po: Pérdidas reales;

P-Po: Escurrimiento superficial.

$$Es = 0 \quad \text{para} \quad \sum P \leq Po$$

$$Es = \frac{(P-Po)^2}{P-Po+S} \quad \text{para} \quad \sum P > Po$$

Donde:

Es:  $(P-0,2S)^2/P+0,8S$  (mm)

Es: Precipitación efectiva o lluvia neta (mm)

P: Precipitación total (mm)

S: Retención máxima (mm)

$$S = (1000/CN - 10) * 25,4 \text{ (mm)}$$

Po: Umbral de escorrentía (mm)

$$Po = 0,2.S \text{ (mm)} \quad \text{ó} \quad Po = S \cdot 0,55$$

Según la propuesta del SCS (1961), se establece una clasificación en cuatro Grupos Hidrológicos (A, B, C, D) con respecto al tipo de suelo. El grupo A corresponde a un potencial de escurrimiento mínimo y el D a un potencial de escurrimiento alto. La determinación del tipo de suelo hidrológico se establece en términos de dos variables principales:

- El tipo de suelo, mediante el cual se fijan las condiciones de infiltración subsuperficial incidente en la escorrentía superficial en forma directa y por tanto la condición hidrológica del suelo se ajusta a los conceptos de tipo agrológico.
- La cobertura vegetal, según la cual las plantas también ejercen una fuerte influencia en la escorrentía directa, no solamente en la interpretación hipotética del coeficiente de escorrentía sino también en la capacidad de la planta para absorber agua en los periodos húmedos.

En función del tipo de suelo se definen cuatro grupos:

- Grupo A: Suelos arenosos profundos depositados por el viento y limos agregados.
- Grupo B: Suelos franco arenoso poco profundos depositados por el viento.
- Grupo C: Limos arcillosos, limos arenosos poco profundos, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
- Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salino.

Esta interacción permite determinar en forma empírica una primera aproximación al valor del CN para las condiciones hidrológicas promedio a nivel local.

Los índices de CN altos implican una alta tasa de escorrentía y baja tasa de infiltración. En cambio, los valores de CN bajos aseguran altas tasas de infiltración, baja escorrentía superficial y, por lo tanto, se infiere una baja erosión hídrica (*Tabla 2*).

| Descripción de la cubierta   | Estado hidrológico <sup>(2)</sup> | Número de curva para cada grupo hidrológico de suelo |    |    |    |
|--|-----------------------------------|--|----|----|----|
|  |                                   | A <sup>(3)</sup>                                     | B  | C  | D  |
| Herbácea: Mezcla de hierba, maleza matorral de bajo crecimiento, siendo el matorral el elemento de menor importancia | Malo                              |  | 80 | 87 | 93 |
|  | Medio                             |  | 71 | 81 | 89 |
|  | Bueno                             |  | 62 | 74 | 85 |
| Roble/álamo: Mezcla de álamo caoba de montaña, "bitter brush", arce y otros arbustos                                 | Malo                              |  | 66 | 74 | 79 |
|  | Medio                             |  | 48 | 57 | 63 |
|  | Bueno                             |  | 30 | 41 | 48 |
| Pináceas/Juniperus: Pináceas, Juniperus o ambas con hierba bajo cubierta   | Malo                              |  | 75 | 85 | 89 |
|  | Medio                             |  | 58 | 73 | 80 |
|  | Bueno                             |  | 41 | 61 | 71 |
| Labiadas con hierba bajo cubierta  | Malo                              |  | 67 | 80 | 85 |
|  | Medio                             |  | 51 | 63 | 70 |
|  | Bueno                             |  | 35 | 47 | 55 |
| Mata desértica: La mayoría de las plantas incluyen plantas halófilas, plantas crasas, plantas con aceites esenciales | Malo                              | 63   | 77 | 85 | 88 |
|  | Medio                             | 55   | 72 | 81 | 86 |
|  | Bueno                             | 49   | 68 | 79 | 84 |

Tabla 2: Valores de Curva Número (CN) para zonas de montañas áridas y semiáridas en condiciones medias de humedad (Chow, et al., 2000).

## 5.5 Hidrogramas

Un hidrograma es la expresión gráfica del caudal en función del tiempo. El área que se obtiene por la gráfica de un hidrograma se refiere al volumen de agua que pasa por el punto de aforo en un intervalo de tiempo considerado.

La **Fig. 13** muestra un hidrograma de crecida de referencia con su respectivo hietograma junto con los parámetros de análisis más relevantes. Alguno de estos parámetros son el tiempo base ( $t_{base}$ ), tiempo de precipitación ( $t_p$ ) y tiempo de concentración ( $t_c$ ). El tiempo base se refiere al tiempo base del hidrograma desde el momento que comienza la escorrentía superficial. Por otro lado, el tiempo de precipitación es el tiempo en el que la precipitación produce escorrentía; y el tiempo de concentración es el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca. A su vez, se aprecian parámetros como tiempo de crecida ( $t_{crecida}$ ) y tiempo de retardo (*lag*). El tiempo de crecida se trata del tiempo desde el comienzo de la precipitación neta hasta la punta del hidrograma. El tiempo de retardo o “*lag*” es el tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hietograma hasta la punta del Hidrograma.

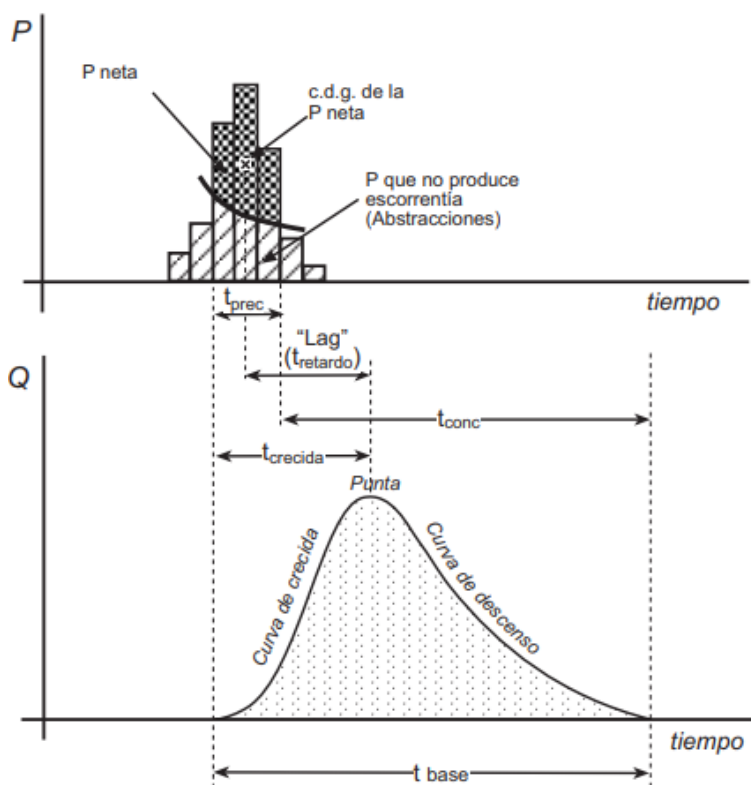


Figura 13: Hidrograma de crecida de referencia y sus principales parámetros (Sánchez San Román, 2017).

Existen diferentes métodos para el cálculo del hidrograma generado por la precipitación de interés. Estos métodos son el método racional, hidrograma sintético e hidrograma unitario. En este estudio, se respetaron las especificaciones de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén, que establece que la estimación de hidrogramas de crecida en cuencas mayores a las 120 Ha se debe realizar con el método del hidrograma unitario. Mientras que, para cuencas de superficie menor a las 120 Ha, se debe emplear el método racional.



### 5.5.1 Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario de una cuenca es el hidrograma de volumen unidad producido por una lluvia directa unitaria distribuida uniformemente sobre el área de la cuenca en un período determinado de tiempo (Sherman, 1932). Este método se encuentra fundado en una serie de principios como el de constancia del tiempo de base, de afinidad o proporcionalidad, y el de superposición.

Principio de constancia del tiempo de base: Para una cuenca receptora dada, la duración de la escorrentía superficial correspondiente a lluvias de la misma duración es constante e independiente de la precipitación.

Principio de proporcionalidad o afinidad: Para una cuenca receptora dada, dos chaparrones de intensidad uniforme y de misma duración, pero volúmenes distintos, producen caudales proporcionales a dichos volúmenes.

Principio de superposición o de independencia: La distribución temporal de la escorrentía superficial correspondiente a un aguacero tipo es independiente de las precipitaciones de períodos anteriores.

### 5.5.2 Tránsito de hidrogramas

Los hidrogramas están asociados a procesos de pérdidas de energía a lo largo de un cauce, canal o río. La energía se consume progresivamente a medida que el proceso va avanzando. Esto en una onda de avenida influye en el pico del caudal y en el tiempo base. De esta manera, el caudal punta disminuye con el paso del tiempo, es decir que el hidrograma sufre procesos de retardo y atenuación (*Fig. 14*). En hidráulica, este proceso se denomina laminación de una onda de avenida.

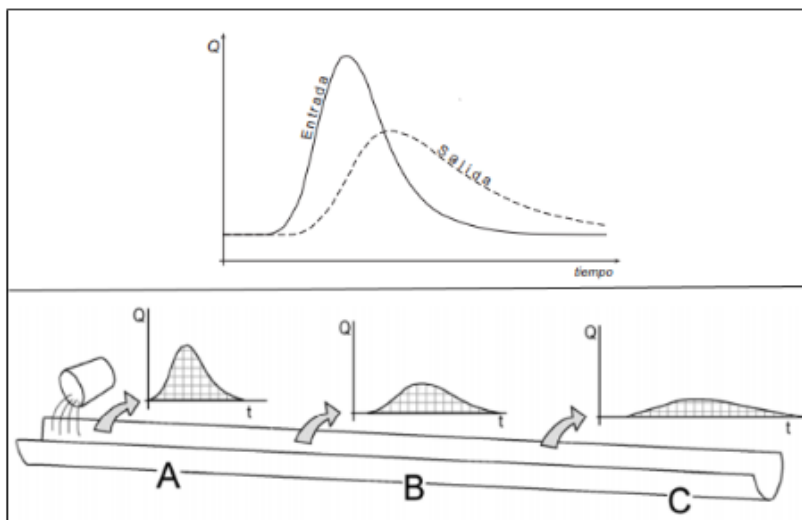


Figura 14: Efecto del tránsito de hidrogramas (Sánchez San Román, 2017).

## 5.6 Hidráulica de Canales naturales

### 5.6.1 Tipos de Flujo

El flujo en canales abiertos puede clasificarse según diferentes aspectos. Una de las maneras de clasificar el flujo es considerando el cambio en la profundidad de flujo con respecto al tiempo y al espacio.

El flujo en un canal abierto puede considerarse permanente si la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante un intervalo de tiempo considerado. Por otra parte, el flujo es considerado no permanente si la profundidad cambia con el tiempo. Tanto para flujos permanentes como no permanentes, se pueden tener flujos uniformes o variados. Se dice que el flujo en canales abiertos es uniforme si la

profundidad de flujo es la misma en cada sección del canal; mientras que, en el flujo variado, la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal.

Además, el tipo de flujo variado puede clasificarse como rápidamente variado o gradualmente variado. El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas; de lo contrario se lo considera gradualmente variado.

Entonces, la clasificación del flujo en canales abiertos puede resumirse de la siguiente manera (*Fig. 15*):

1. Flujo Permanente
  - a. Flujo Uniforme
  - b. Flujo Variado
    - i. Flujo gradualmente variado
    - ii. Flujo rápidamente variado

2. Flujo no permanente
  - a. Flujo uniforme no permanente
  - b. Flujo variado no permanente
    - i. Flujo gradualmente variado no permanente
    - ii. Flujo rápidamente variado no permanente

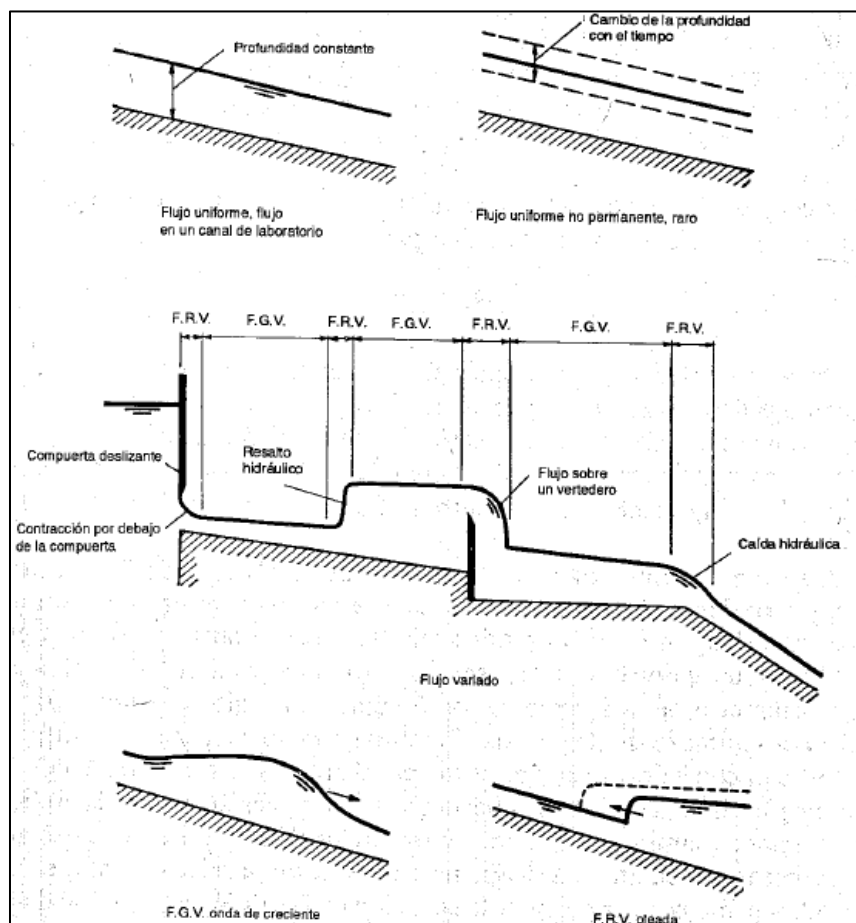


Figura 15: Tipos de flujo en canales abiertos (Chow, 2005).

### 5.6.2 Propiedades de los canales naturales

Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la Tierra. Las propiedades hidráulicas de un canal natural son muy irregulares. La hidráulica fluvial es la que se encarga de estudiar el comportamiento de flujo en canales naturales, requiriendo de conocimientos de otros campos como la hidrología, geomorfología, etc.

### 5.6.3 Geometría del Canal

Para los canales naturales, las secciones de los cursos son por lo general muy irregulares. A menudo se los suele considerar de geometría más bien trapezoidal (*Fig. 16*).

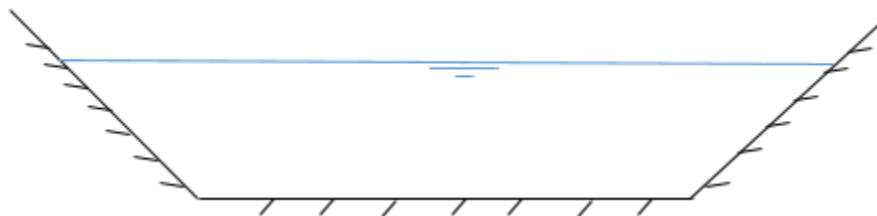


Figura 16: Geometría trapezoidal de un canal (Fuente: Elaboración propia).

#### 5.6.4 Elementos geométricos de una sección de canal

Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por la geometría de la sección y la profundidad de flujo.

- **Profundidad de flujo:** Distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.
- **Ancho superficial (T):** Ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- **Área mojada (A):** Área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.
- **Perímetro mojado (P):** Longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.
- **Radio Hidráulico (R):** Relación del área mojada con respecto al perímetro mojado.
- **Profundidad Hidráulica (D):** Relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

#### 5.6.5 Distribución de velocidades en una sección de canal

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades no están uniformemente distribuidas en la sección de un canal. La máxima velocidad medida en canales ocurre por debajo de la superficie libre (**Fig. 17**).

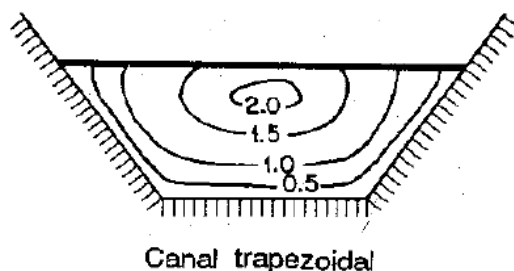


Figura 17: Isolíneas de velocidad en diferentes secciones de un canal trapezoidal (Chow, 2005).

Se puede decir que la capacidad de erosión y transporte de una corriente está determinada en su mayor parte por la velocidad, la cual se define a partir de la pendiente y puede calcularse mediante la ecuación de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{I}$$

Donde  $n$  es el índice de rugosidad del lecho;  $R$  es el radio hidráulico; e  $I$  es la pendiente hidráulica.

La variable de rugosidad del lecho o también conocido como  $n$  de Manning, se determina mediante tablas tabuladas. Sin embargo, es importante tener en cuenta los factores que pueden afectar a este parámetro como tipo de material en el fondo del cauce, irregularidad del fondo del cauce, variación de las secciones transversales, obstrucciones, vegetación, meandros y trenzas.

## 5.7 Erosión y sedimentación en cauce

El movimiento del agua que circula por el cauce de una corriente de agua produce el desprendimiento y transporte de los materiales que conforman su perímetro mojado. En los cauces, la erosión puede provocar una ampliación lateral del ancho (erosión lateral) o una profundización del cauce. El proceso de erosión es complejo y se pueden desarrollar modelos que permitan predecir los procesos de erosión, incorporando una variedad de factores geológicos e hidráulicos. Según García-Chevesich (2010), las variables más influyentes en la tasa de erosión son:

- Clima
- Vegetación y Hojarasca
- Tipo de suelo
- Topografía
- Velocidad de flujo
- Uso de la tierra

### 5.7.1 Clima

La variable climática más importante es la lluvia, debido a su fuerte influencia en ciertos procesos de erosión hídrica. Variables como cantidad de agua caída (mm) e intensidad de tormenta (mm/h), son las que determinan la erodabilidad de un evento. Una tormenta intensa, no sólo presenta un alto potencial de erosión por salpicadura, sino que también genera escorrentía superficial dando lugar a procesos erosivos. Contrariamente, en una tormenta de intensidad relativamente baja, las tasas de infiltración no serán superadas, por lo que no se producirá escurrimiento superficial.

La duración de la tormenta, así como la distribución temporal de su intensidad también son factores preponderantes en las tasas de erosión producidas. Tormentas cuya intensidad máxima ocurre en su etapa final, cuando los suelos se encuentran saturados, también producirán una mayor cantidad de escurrimiento superficial.

### 5.7.2 Vegetación

La vegetación actúa como cubierta protectora estableciéndose como un *buffer* entre el suelo y la atmósfera (Morgan, 2005). La efectividad de la vegetación para reducir la erosión de impacto depende directamente de la altura y continuidad de la copa de los árboles, o en su defecto, de la densidad de la cobertura superficial (pastos, hierbas y arbustos). La presencia de cobertura vegetal no solo protege el suelo contra la erosión por salpicadura, sino que también brinda rugosidad al terreno. De esta manera, mientras más densa y homogénea sea la cubierta vegetal, mayor es su efectividad en la disminución de la erosión laminar

### 5.7.3 Tipo de suelo

No todos los suelos son iguales en términos de su resistencia a la erosión. La erodabilidad de un suelo en particular está directamente relacionada a variables como textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

La textura de un suelo es importante para definir su nivel de erodabilidad, pues no todas las clases texturales se erosionan con la misma facilidad (**Fig. 18**). Las partículas medianas son las que más fácilmente se erosionan (0,1 a 1 mm), dado que no poseen cohesividad ni peso relevantes.

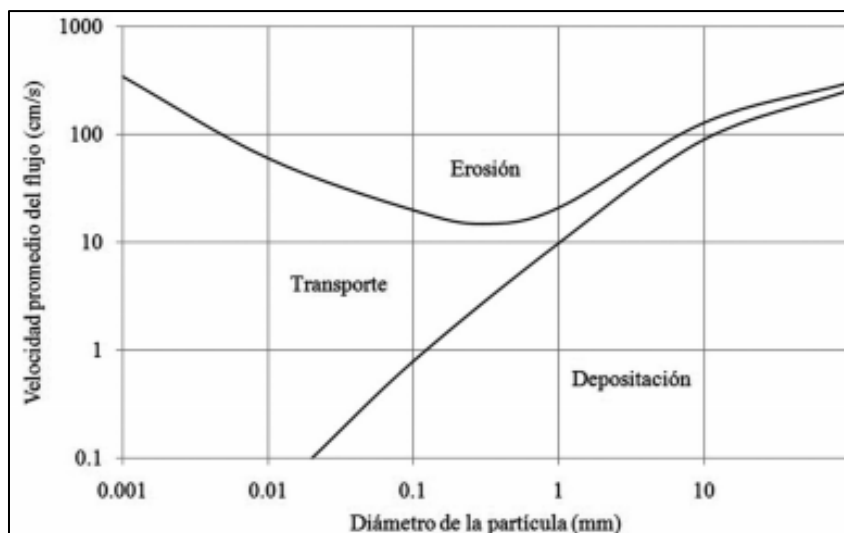


Figura 18: Curvas de Hjulstrom (1935) que describe umbrales de arranque, transporte o sedimentación, en función de los cambios de velocidad de una corriente, para cada tamaño de partícula involucrada.

La materia orgánica puede mejorar casi todas las propiedades del suelo, pues la presencia de ésta aumenta la aireación e infiltración, así como la cohesividad interparticular. Además, la materia orgánica facilita el crecimiento de la vegetación mediante la adición de nutrientes en el suelo.

La estructura y permeabilidad de un suelo también juegan un rol importante en la determinación de la erodabilidad, debido a su influencia en la cohesividad de las partículas y la infiltración del agua. Los suelos sin estructura definida, así como los suelos de estructura granular, por lo general poseen una alta capacidad de infiltración, es decir que son menos susceptibles a la erosión laminar. Por otro lado, los suelos de estructura masiva son más fáciles de erosionar, pues poseen tasas de infiltración menores.

#### 5.7.4 Topografía

Factores como inclinación y largo de la pendiente determinan la cantidad y velocidad del escurrimiento superficial que se generarán producto de una tormenta dada. La forma de la pendiente también influye en las tasas de erosión, ya que éstas cambian a medida que varía la inclinación del terreno (**Fig. 19**).

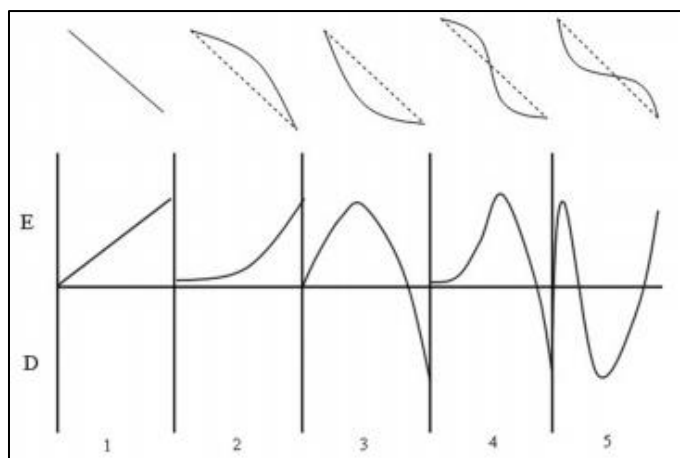


Figura 19: Variaciones en la tasa de erosión (E) y deposición (D), según cambios topográficos (Terrance et al., 2002).

### 5.7.5 Velocidad de flujo

La velocidad del caudal influye fuertemente en la erosión hídrica. Se sabe que la velocidad mínima para desprender y transportar una partícula de suelo se establece en función del diámetro de ésta. Fieschenich (2001), propuso valores umbrales de velocidades erosivas en lecho de arenas y gravas. Este autor dispuso que velocidades de flujo mayores a los 0,45 m/s favorecen la existencia de procesos erosivos en arenas y gravas (*Tabla 3*).

| Boundary Category  | Bank Material Type           | Permissible Velocity (m/s) |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|
| Soils              | Fine colloidal sand          | 0.45                       |
|                    | Sandy loam (noncolloidal)    | 0.53                       |
|                    | Alluvial silt (noncolloidal) | 0.6                        |
|                    | Silty loam (noncolloidal)    | 0.53-0.68                  |
|                    | Firm loam                    | 0.76                       |
|                    | Fine gravels                 | 0.76                       |
|                    | Stiff clay                   | 0.9-1.37                   |
|                    | Alluvial silt (colloidal)    | 1.15                       |
|                    | Graded loam to cobbles       | 1.15                       |
|                    | Graded silts to cobbles      | 1.21                       |
| Shales and hardpan | 1.83                         |                            |

Tabla 3: Velocidad de flujo admisible en canales no revestidos (Fieschenich, 2001).

### 5.7.6 Uso de la tierra

Más allá de los factores geológicos que puedan ser de utilidad para el entendimiento de los procesos de erosión, transporte y sedimentación en cauces, las actividades humanas se han convertido en factores de vital importancia para este tipo de procesos. Los sectores urbanizados representan una actividad peligrosa en términos erosivos, debido a la agresividad espacial y temporal asociada a estos. Actividades forestales como la tala, raleos y construcción de caminos, entre otras, representan una enorme alteración en el ciclo hidrológico, lo que se traduce en una disminución de la intercepción y la capacidad de infiltración de los suelos, debido al uso de maquinaria pesada.

## 5.8 Erodabilidad de canales en roca

Para el análisis de la erosión en lecho rocoso hay una gran variedad de métodos e índices geomecánicos que cuantifican la habilidad relativa de los materiales a resistir la erosión. En su trabajo, Spalletti y Brea (2011), utilizan un método semiempírico, desarrollado por George Annandale, conocido como método del Índice de Erodabilidad (*Erodibility Index Method*) (Annandale, 1995). Este índice, desarrollado a partir de observaciones de campo, define un umbral de erosión para cualquier material, sea suelo o roca. Además, en este índice se ven comprendidos los efectos dinámicos de las corrientes que actúan sobre el material, considerando en conjunto la turbulencia del flujo y, de manera empírica, las propiedades del material que determinan la capacidad de resistir la erosión.

De esta manera, Annandale relaciona el poder erosivo del agua a través de la potencia del escurrimiento por unidad de superficie o tasa de disipación de energía ( $P$ ) con la resistencia del material de interés, representado por un índice de erodabilidad ( $K_h$ ), definiendo la erodabilidad crítica (**Fig. 20**). Es esperable que ocurra erosión si el punto en el gráfico se ubica por encima de la línea umbral de erosión.

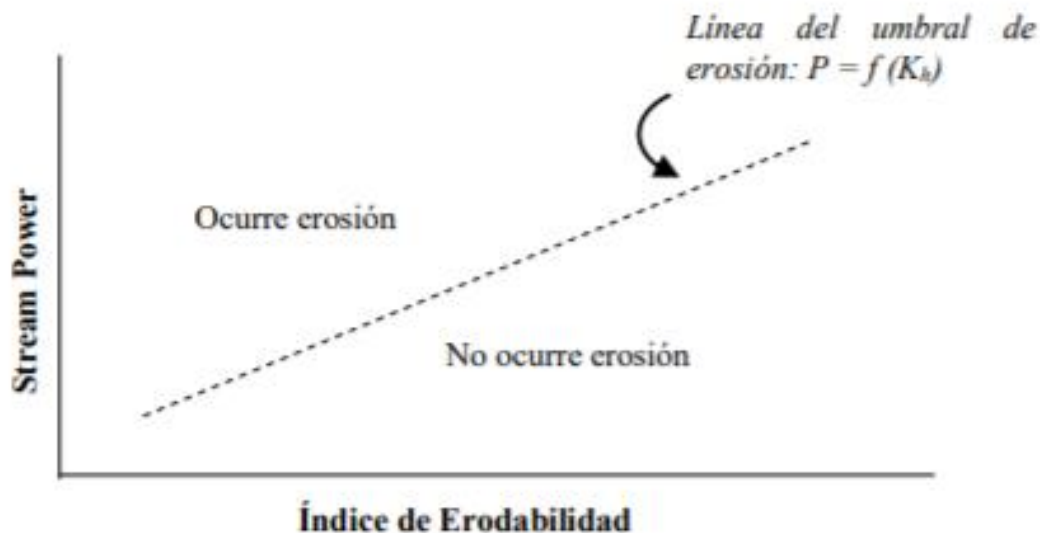


Figura 20: Esquema de referencia que explica la determinación del umbral de erosión a través del Método del Índice de Erodabilidad de Annandale (Caminati Briceño, 2003).

Las principales propiedades geotécnicas que determinan la resistencia a la erosión de los materiales son: resistencia del material, tamaño de bloques, resistencia al corte, y estructura relativa del suelo. El índice de erodabilidad ( $K$ ) es el producto escalar de dichos parámetros:

$$K_h = M_s \cdot K_b \cdot K_d \cdot J_s$$

Donde:

$K_h$  : Índice de erodabilidad de Annandale;

$M_s$  : coeficiente de resistencia de masa;

$K_b$  : coeficiente de tamaño de bloques;

$K_d$  : coeficiente de resistencia al corte en las discontinuidades;

$J_s$  : coeficiente de la estructura del material

### 5.8.1 Coeficiente de resistencia de masa ( $M_s$ )

Este parámetro representa la resistencia del material obtenida de una muestra representativa o determinada directamente en el campo. Para rocas, este coeficiente puede calcularse según el valor del ensayo de compresión simple (UCS) sea mayor o menor a los 10 MPa. Para ambos casos, se requiere del cálculo de un índice de densidad relativa ( $Cr$ ), definido por la siguiente expresión:

$$Cr = \frac{g \cdot Pr}{27 \cdot 10^3}$$



Donde:

Cr : Índice de densidad relativa

g: Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

Pr: Densidad de roca ( $kg/m^3$ )

Entonces, el coeficiente de resistencia de masa (Ms):

$$Ms = Cr \cdot (0,87) \cdot (qu)^{1,05} \quad \text{Si } qu \leq 10 \text{MPa}$$

$$Ms = Cr \cdot (qu) \quad \text{Si } qu > 10 \text{MPa}$$

Donde:

Ms: Coeficiente de resistencia de masa

Cr: Índice de densidad relativa

qu: Valor de ensayo de compresión simple (MPa)

### 5.8.2 Coeficiente de tamaño de bloques ( $K_b$ )

Este parámetro representa la importancia que tiene el tamaño del bloque de roca para la determinación de la resistencia a la erosión. Grandes bloques de roca ofrecen un aumento en la resistencia a la erosión. La determinación de dicho coeficiente está basada en el espaciamiento entre juntas o discontinuidades y del número de familias de juntas. El espaciamiento entre juntas está representado por la calidad de la roca, dado por el índice de calidad de rocas RQD (*Rock Quality Designation*), y el número de familias de juntas está representado por el parámetro  $J_n$ . El RQD es un parámetro estándar, utilizado para determinar la calidad de una roca masiva in situ, siendo una medida de todos los núcleos mayores a 10 cm de longitud, expresados como porcentaje de la longitud total del cuerpo.

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de fragmentos} > 10 \text{cm}}{\text{Longitud total de la muestra}} \times 100\%$$

Los valores de RQD varían entre 5 y 100 %. Un RQD de 5% representa una roca de calidad muy pobre y un RQD de 100% representa una roca de muy buena calidad.

Por otra parte, el número de familia de juntas ( $J_n$ ) puede encontrarse en la **Tabla 4**.

| Jointing Description                | Modified Joint Set Number ( $J_n$ ) |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Intact, no or few joints            | 1.00                                |
| One joint set                       | 1.22                                |
| One joint set plus random joints    | 1.50                                |
| Two joint sets                      | 1.83                                |
| Two joint sets plus random joints   | 2.24                                |
| Three joint sets                    | 2.73                                |
| Three joint sets plus random joints | 3.34                                |
| Four joint sets                     | 4.09                                |
| More than four joint sets           | 5.00                                |

Tabla 4: Número de familia de juntas ( $J_n$ ).

Una vez determinados los valores de RQD y de  $J_n$ , se calcula  $K_b$ :

$$K_b = \frac{RQD}{J_n}$$

En materiales rocosos, este coeficiente puede variar entre 1 y 100.

### 5.8.3 Coeficiente de resistencia al corte de las discontinuidades ( $K_d$ )

Este coeficiente representa la resistencia relativa de las discontinuidades en materiales de roca. Se determina a través de la relación entre dos variables: coeficiente de rugosidad de junta ( $J_r$ ) y coeficiente de alteración de las juntas ( $J_a$ ).

$$K_d = \frac{J_r}{J_a}$$

El coeficiente de rugosidad de junta ( $J_r$ ), representa el grado de rugosidad de las caras opuestas en una discontinuidad; mientras que el coeficiente de alteración de las juntas ( $J_a$ ), representa el grado de alteración de los materiales que forman las caras de la discontinuidad. Ambos parámetros pueden ser obtenidos por tabla (Tablas 5 y 6).

Table D-1-3.—Joint Roughness Number (adapted from Barton 1977)

| Joint Separation  | Joint Condition                | Joint Roughness Number ( $J_r$ ) |
|---|--------------------------------|----------------------------------|
| Tight – rock wall contact<br>(or rock wall contact before<br>10 cm shear) | Discontinuous                  | 4                                |
|   | Rough or irregular, undulating | 3                                |
|   | Smooth, undulating             | 2                                |
|   | Slickensided, undulating       | 1.5                              |
|   | Rough or irregular, planar     | 1.5                              |
|   | Smooth, planar                 | 1.0                              |
|   | Slickensided, planar           | 0.5                              |
| Open – no rock wall contact<br>(even when sheared)                        | Clay mineral filling           | 1.0                              |
|   | Sand, gravel, or crushed zone  | 1.0                              |

Note: cm = centimeter

Tabla 5: Coeficientes de rugosidad de junta ( $J_r$ ), según la separación y condición de las juntas.

## D-1 Erosion of Rock and Soil

**Table D-1-4.—Joint Alteration Number (adapted from Barton 1977)**

| Joint Separation                         | Joint Condition   | Joint Alteration Number ( $J_a$ ) |
|--|---|-----------------------------------|
| Tight, rock wall contact                 | Tightly healed, hard, non-softening filling (quartz or epidote)   | 0.75                              |
|  | Unaltered joint walls, surface staining only  | 1.0                               |
|  | Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings (sandy particles)  | 2.0                               |
|  | Silty or sandy-clay coatings (non-softening)  | 3.0                               |
|  | Softening or low friction clay mineral coatings (< 1-2 mm thick)  | 4.0                               |
| Rock wall contact before 10 cm shear     | Sandy particles (clay-free disintegrated rock)  | 4.0                               |
|  | Strongly over-consolidated non-softening clay mineral fillings (< 5 mm thick)   | 6.0                               |
|  | Clay mineral fillings, not strongly over-consolidated (<5 mm thick)   | 8.0                               |
|  | Swelling clay fillings (< 5 mm thick, $J_a$ increases with increasing percent of swelling clay)                       | 8.0 – 12.0                        |
| No rock wall contact (even when sheared) | Zones or bands of silty or sandy clay (non- softening)  | 5.0                               |
|  | Zones or bands of crushed rock and strongly over-consolidated clay  | 6.0                               |
|  | Zones or bands of crushed rock and clay, not strongly over-consolidated   | 8.0                               |
|  | Zones or bands of crushed rock and swelling clay fillings ( $J_a$ increases with increasing percent of swelling clay) | 8.0 – 12.0                        |
|  | Thick continuous zones or bands of strongly over-consolidated clay  | 10.0                              |
|  | Thick continuous zones or bands of clay, not strongly over-consolidated   | 13.0                              |
|  | Thick continuous zones or bands of swelling clay ( $J_a$ increases with increasing percent of swelling clay)          | 13.0 – 20.0                       |

Note: mm = millimeter.

Tabla 6: Coeficiente de alteración de las juntas ( $J_a$ ), según separación y condición de las juntas.

### 5.8.4 Coeficiente de la estructura del material ( $J_s$ )

Este parámetro, representa el rol de la estructura del material con respecto a la dirección del flujo (**Fig. 21**). Resume cómo la orientación y la forma de los materiales influyen en procesos de erosión hídrica. Si la roca

tiene un buzamiento opuesto a la dirección del flujo, será más difícil erosionarla que cuando esté a favor de este. La *tabla 7*, resume los distintos valores que puede tomar este parámetro.

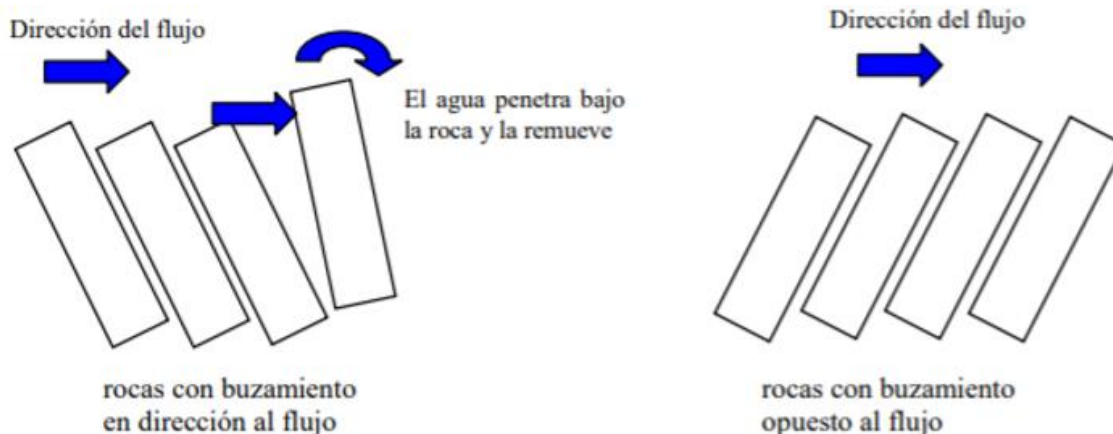


Figura 21: Representación gráfica del parámetro según el buzamiento de las rocas con respecto a la dirección del flujo (Caminati Briceño, 2003).

Table D-1-5.—Determination of  $J_s$  (adapted from Annandale 2006)

| Joint Dip Angle in Flow Direction | Dips Down in Flow Direction Block Length/Thickness |      |      |      | Dips Up in Flow Direction Block Length/Thickness |      |      |      |
|-----------------------------------|--|------|------|------|--|------|------|------|
|                                   | 1:1  | 1:2  | 1:4  | 1:8  | 1:1  | 1:2  | 1:4  | 1:8  |
| 0                                 | 1.14   | 1.09 | 1.05 | 1.02 | 1.14   | 1.09 | 1.05 | 1.02 |
| 1                                 | 1.50   | 1.33 | 1.19 | 1.10 | 0.78   | 0.85 | 0.90 | 0.94 |
| 5                                 | 1.39   | 1.23 | 1.09 | 1.01 | 0.73   | 0.79 | 0.84 | 0.88 |
| 10                                | 1.25   | 1.10 | 0.98 | 0.90 | 0.67   | 0.72 | 0.78 | 0.81 |
| 20                                | 0.84   | 0.77 | 0.71 | 0.67 | 0.56   | 0.62 | 0.66 | 0.69 |
| 30                                | 0.63   | 0.59 | 0.55 | 0.53 | 0.50   | 0.55 | 0.58 | 0.60 |
| 40                                | 0.53   | 0.49 | 0.46 | 0.45 | 0.49   | 0.52 | 0.55 | 0.57 |
| 50                                | 0.49   | 0.46 | 0.43 | 0.41 | 0.53   | 0.56 | 0.59 | 0.61 |
| 60                                | 0.50   | 0.46 | 0.42 | 0.40 | 0.63   | 0.68 | 0.71 | 0.73 |
| 70                                | 0.56   | 0.50 | 0.46 | 0.43 | 0.84   | 0.91 | 0.97 | 1.01 |
| 80                                | 0.67   | 0.60 | 0.55 | 0.52 | 1.26   | 1.41 | 1.53 | 1.61 |
| 85                                | 0.73   | 0.66 | 0.61 | 0.57 | 1.39   | 1.55 | 1.69 | 1.77 |
| 89                                | 0.78   | 0.71 | 0.65 | 0.61 | 1.50   | 1.68 | 1.82 | 1.91 |
| 90                                | 1.14   | 1.20 | 1.24 | 1.26 | 1.14   | 1.20 | 1.24 | 1.26 |

Tabla 7: Valores que puede tomar el Coeficiente de estructura de material ( $J_s$ ).

En cuanto a la forma de los materiales, esta se cuantifica determinando la relación del espaciamiento entre juntas ( $r$ ) (**Fig. 22**). Puede decirse que una roca alargada será más difícil de remover que aquellos bloques de lados iguales (**Fig. 23**).

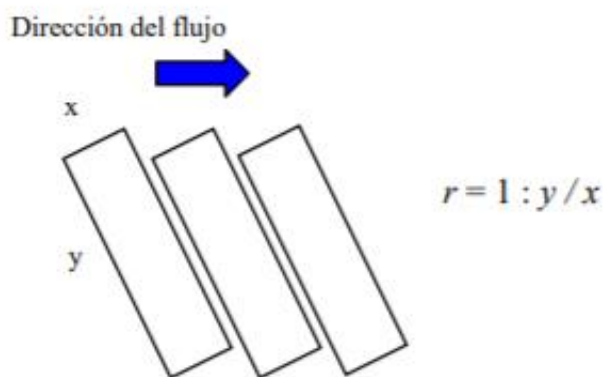


Figura 22: Determinación de la relación del espaciamiento entre juntas (Caminati Briceño, 2003).

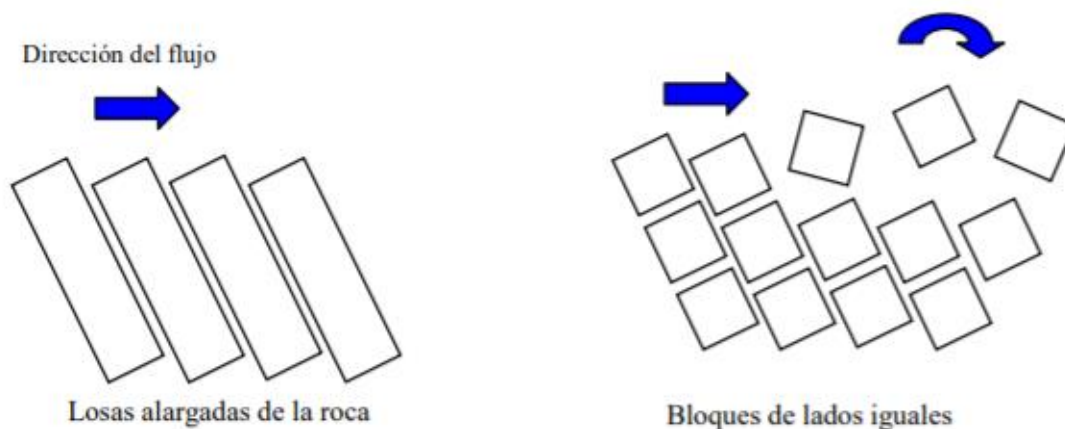


Figura 23: Influencia de la forma de los bloques de material en la resistencia a la erosión (Caminati Briceño, 2003).

Una vez establecidos los parámetros que definen el índice de erodabilidad  $K_h$ , se relaciona este índice con el poder erosivo del agua, representado por la tasa de disipación de energía ( $P$ ). La expresión general para la determinación de esta tasa de disipación es:

$$P = \gamma \cdot q \cdot \Delta E$$

Donde:

$P$  : potencia del escurrimiento ( $\text{kW}/\text{m}^2$ );

$\gamma$  : peso específico del agua ( $9.82 \text{ kN}/\text{m}^3$ );

$q$  : caudal por unidad de ancho en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

$\Delta E$  : pérdida de energía expresada por unidad de longitud ( $\text{m}/\text{m}$ ).

## 5.9 Análisis de imágenes satelitales

En primer lugar, se recopilaron las imágenes satelitales disponibles con el objetivo de analizar los cauces más relevantes del área y su variación morfológica a lo largo del tiempo. Las **Figs. 24-25** muestran que las secciones de los cauces presentes se mantuvieron de manera uniforme los últimos catorce años.

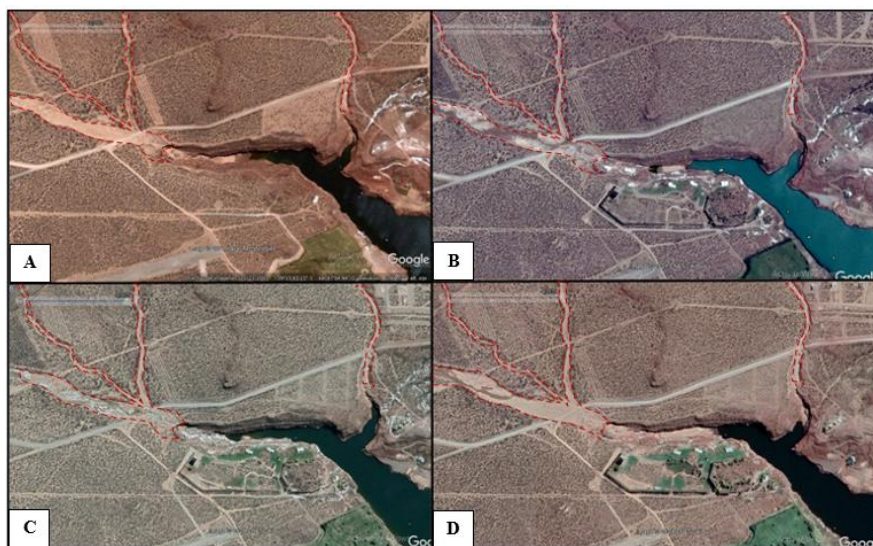


Figura 24: Imágenes satelitales donde se visualizan los cauces de un sector del área de estudio de los años 2007 (A), 2016 (B), 2019 (C), 2021 (D).

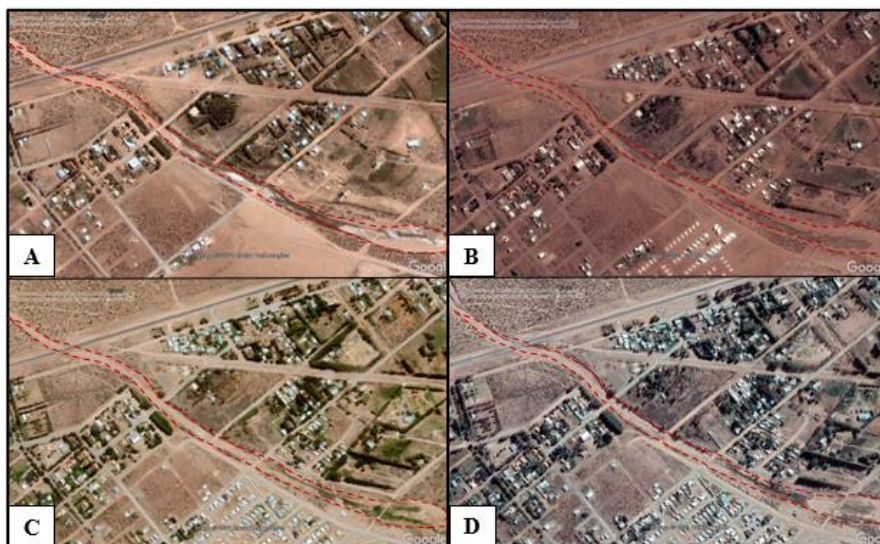
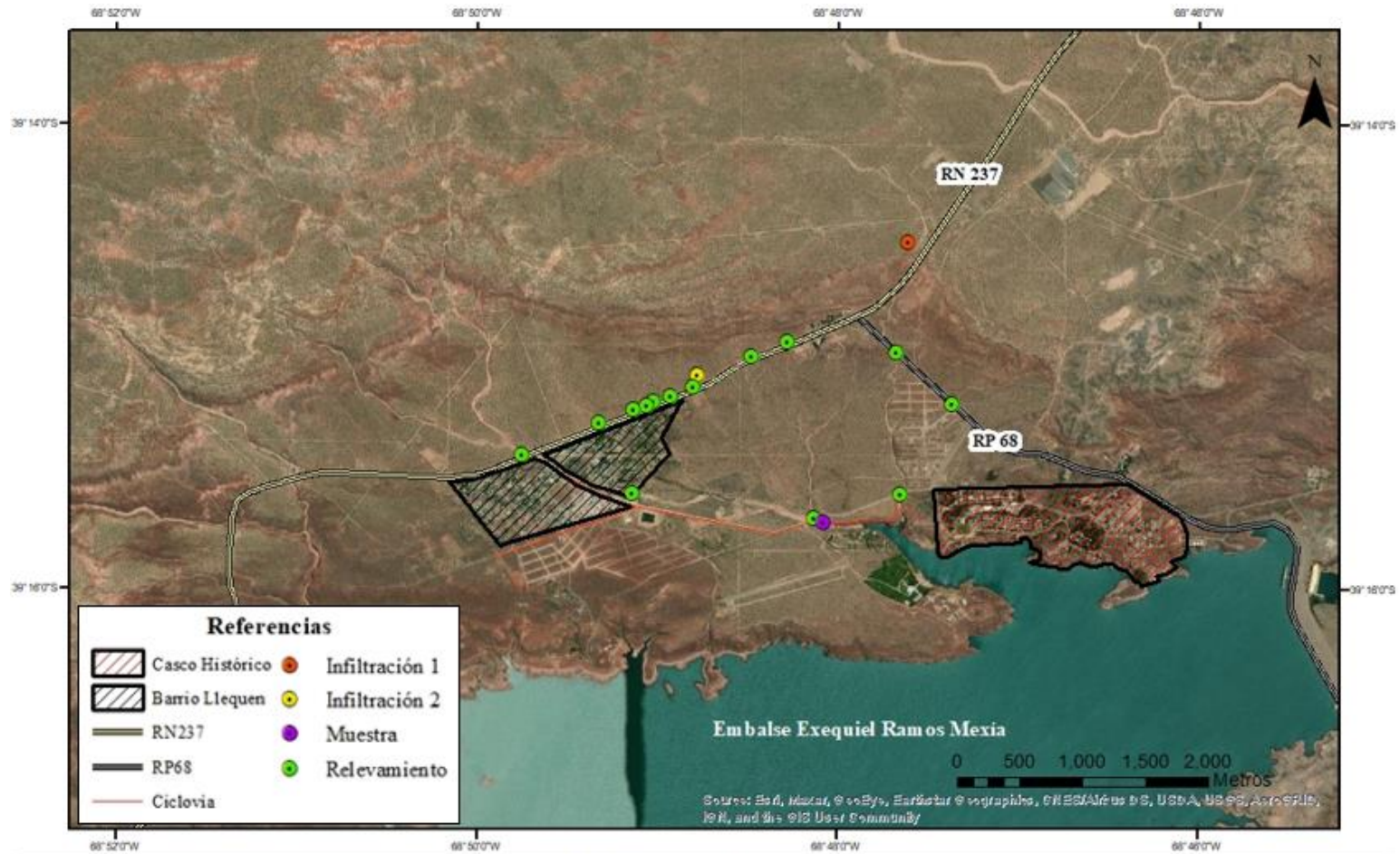


Figura 25: Imágenes satelitales donde se visualizan los cauces de un sector del área de estudio de los años 2007 (A), 2016 (B), 2019 (C), 2021 (D).

## 5.10 Relevamiento de Campo

Se relevaron 4 kilómetros de camino y se identificaron los cauces y puntos críticos más relevantes para la evaluación del riesgo hídrico. En esta etapa del estudio, se llevaron a cabo ensayos de infiltración y se efectuó la toma de muestras de una arenisca, representativa de la zona de estudio para ser sometida a estudios de laboratorio. Se relevaron un total de catorce cauces: nueve de ellos interceptan la Ruta Nacional 237; uno atraviesa al Barrio Llequén; dos cauces cruzan la traza de la futura obra de ciclovía; y los dos restantes interceptan la Ruta Provincial 68 (**Fig. 26-34**).





|   |                           |                            |
|---|---------------------------|----------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE  |                           |                            |
|   |                           |                            |
| <b>Licenciatura en Ciencias Geológicas</b>  |                           |                            |
| Facultad de Ingeniería  |                           |                            |
| Provincia: Neuquén  | Departamento: Confluencia | Localidad: Villa el Chocón |
| Autor: Acuña, Ezequiel Rodolfo  | Datum: D POSGAR 1994      | Escala: 1:40000            |
| <b>VISITA DE CAMPO</b>  |                           |                            |

Figura 26: Sitios donde se realizaron los ensayos de infiltración y los relevamientos.

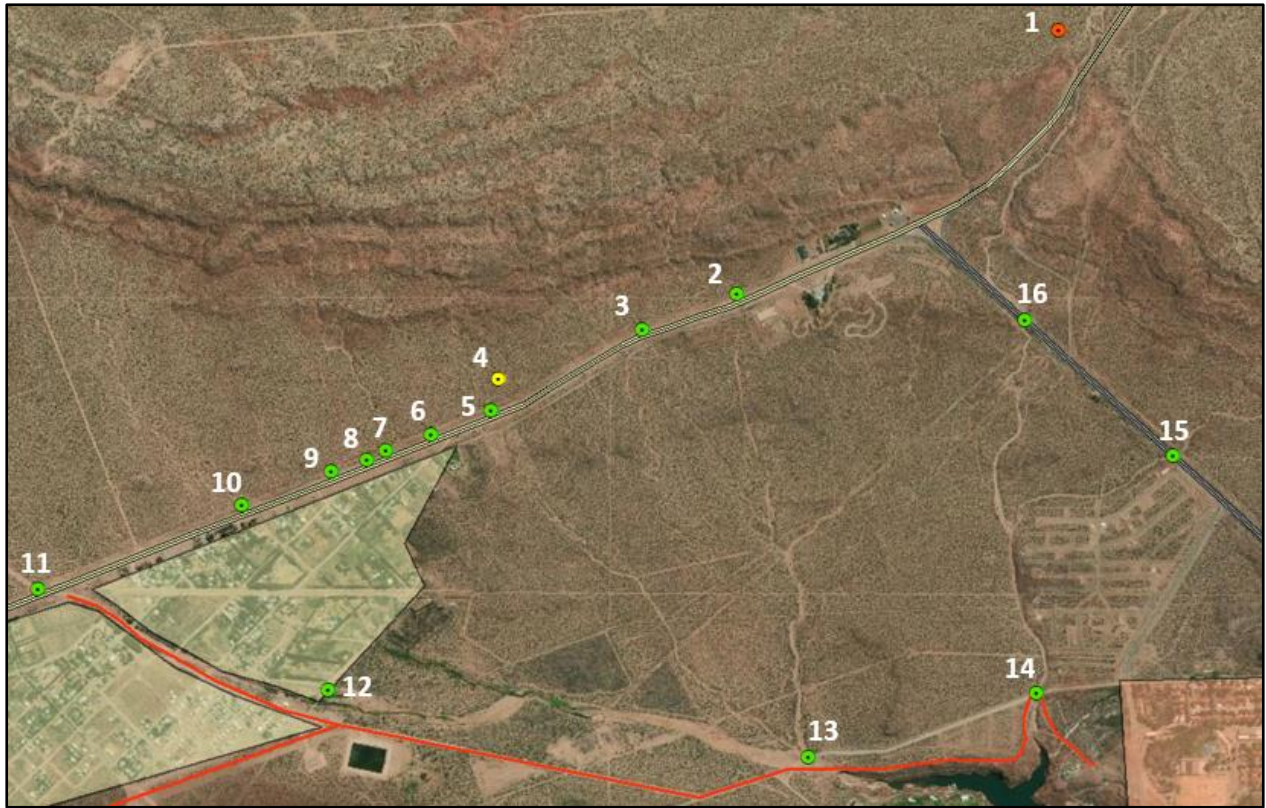


Figura 27: Imagen que detalla el orden de las paradas realizadas para el relevamiento de campo.



Figura 28: Ensayos de infiltración con anillo doble realizados en los puntos 1 (A) y 4 (B).



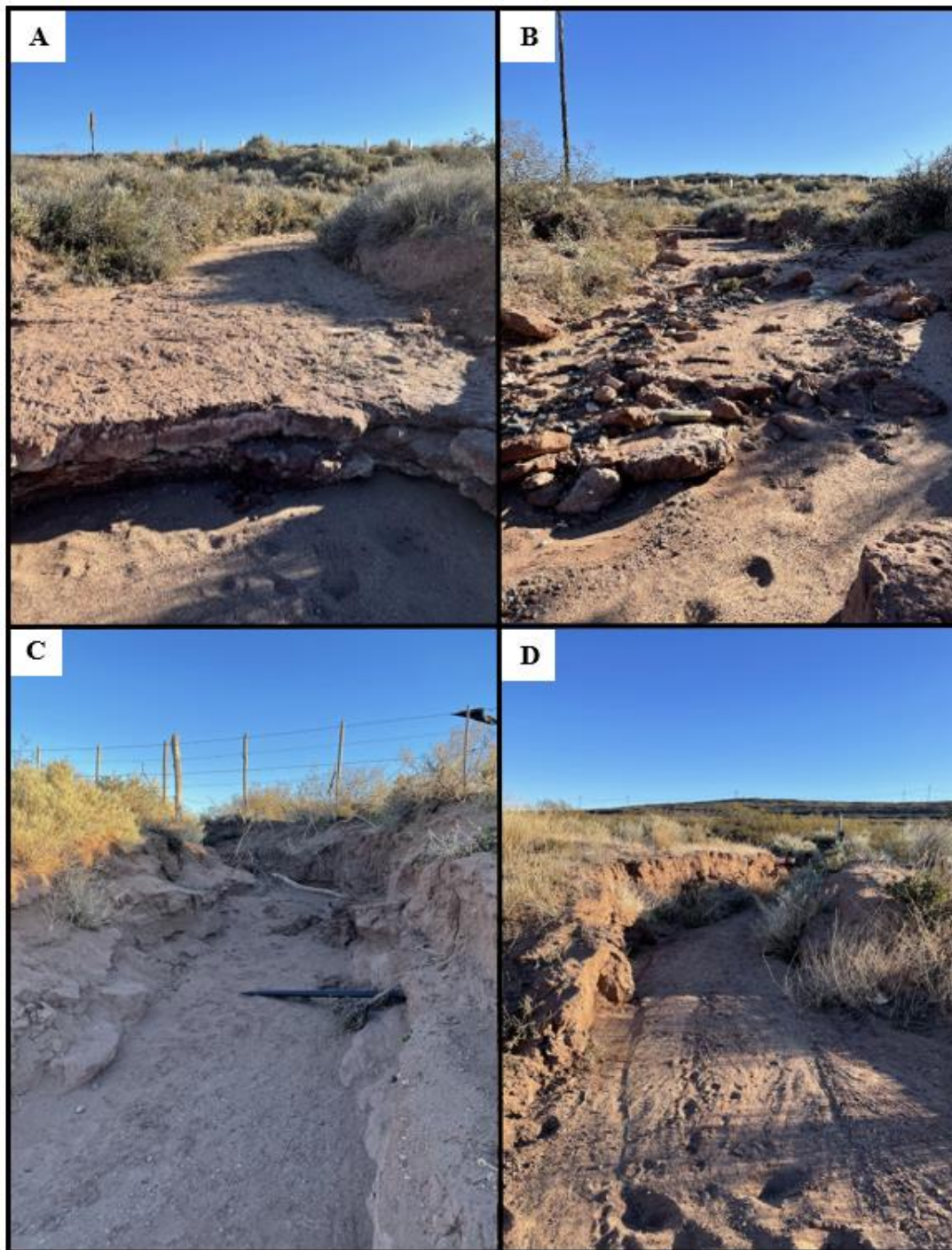


Figura 29: Cauces relevados. A: Punto 2; B: Punto 3; C: Punto 5; D: Punto 6.

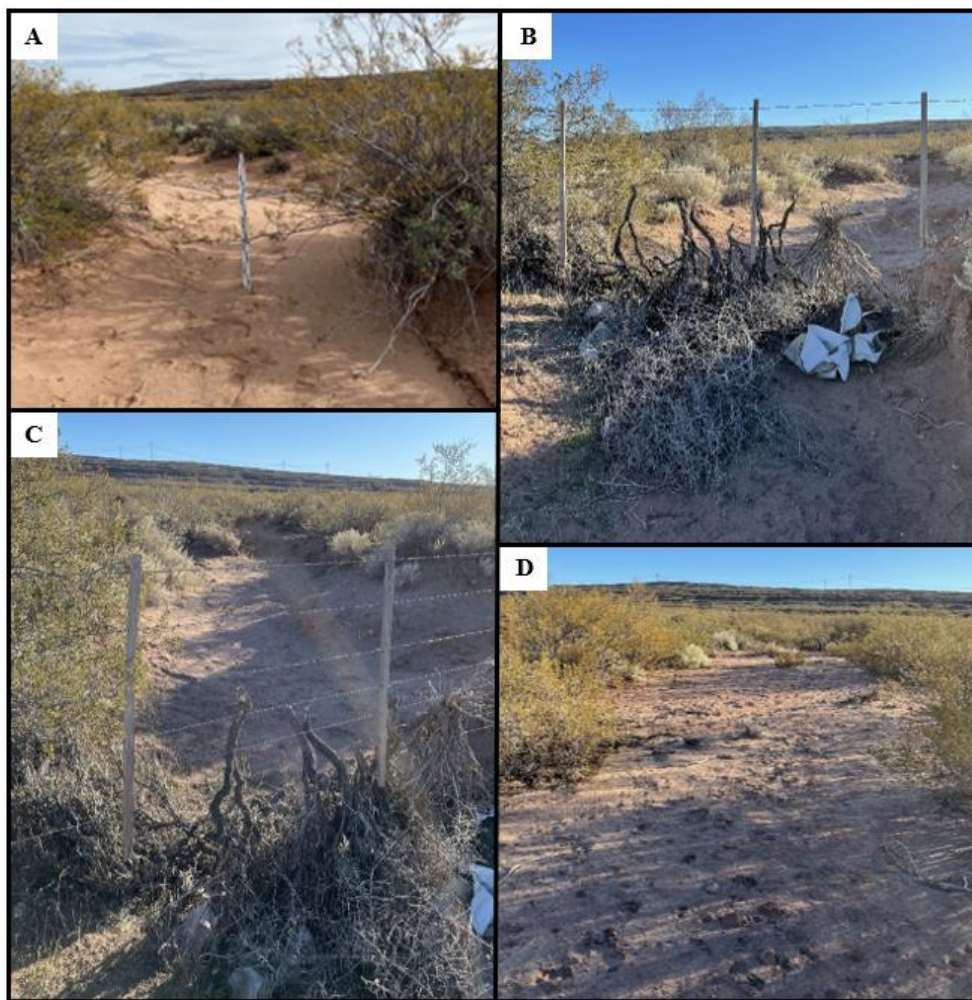


Figura 30: Cauces relevados. A: Punto 7; B y C: Punto 8; D: Punto 9.

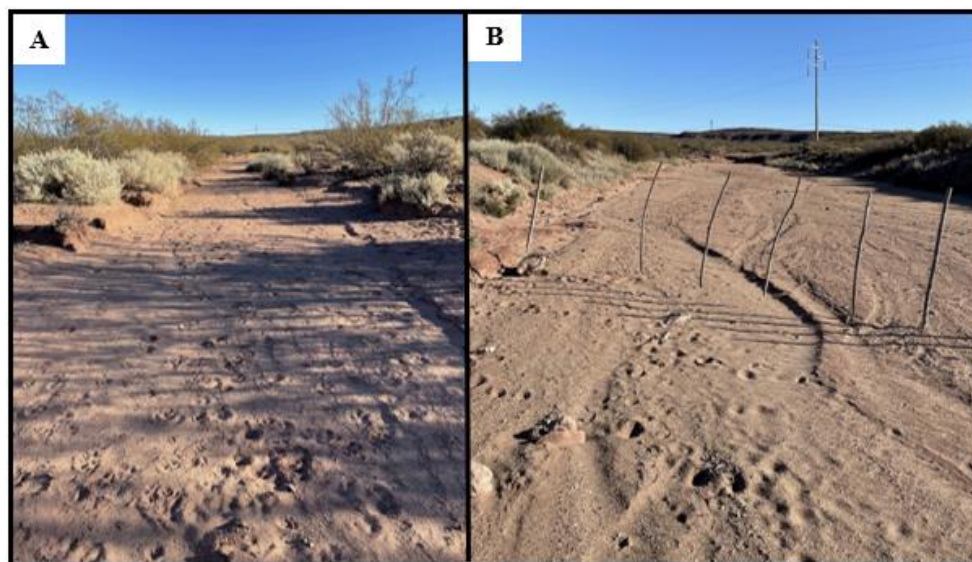


Figura 31: Cauces relevados. A: Punto 10; B: Punto 11.

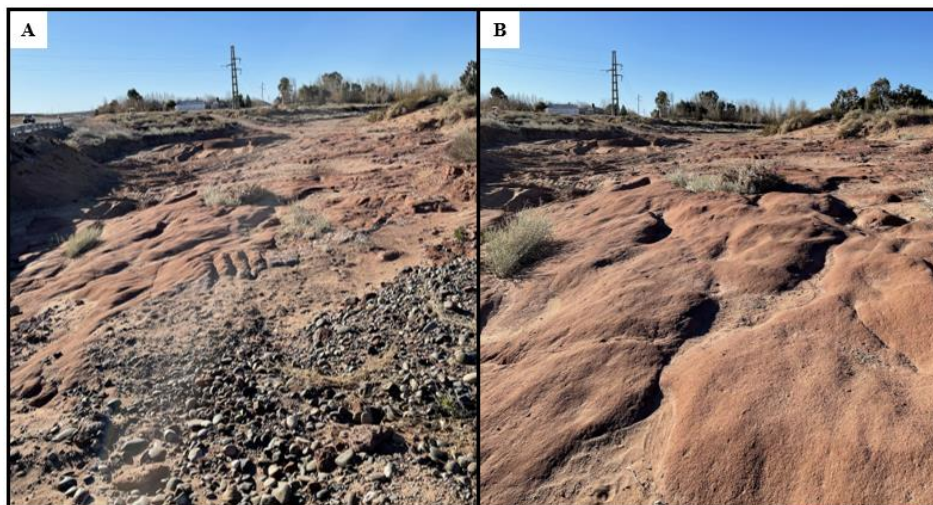


Figura 32: Cauce relevado (Punto 11) que exhibe un lecho predominantemente rocoso.

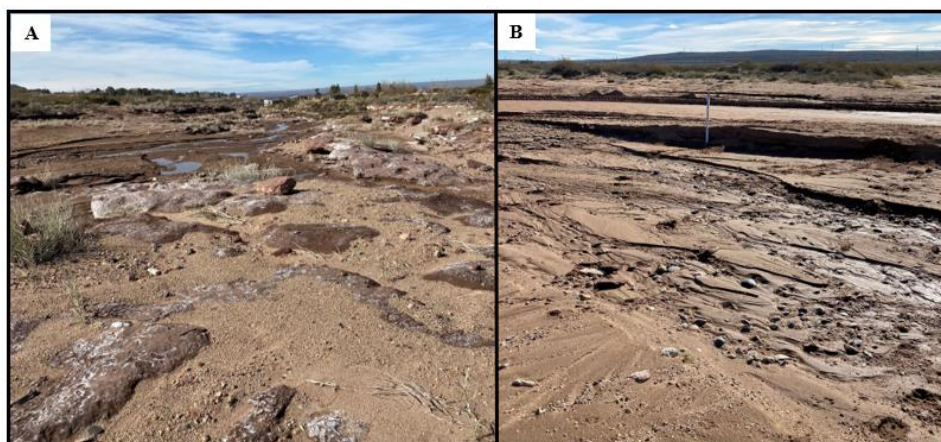


Figura 33: Cauces relevados correspondientes a los puntos 13 (A) y 14 (B).

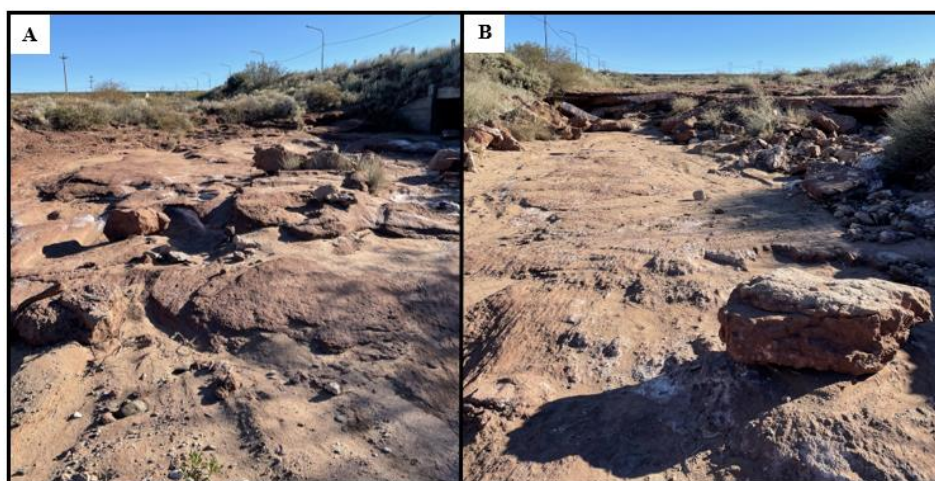


Figura 34: Cauces relevados correspondientes a los puntos 15 (A) y 16 (B).

### 5.10.1 Ensayo de Infiltración

Se realizaron dos ensayos de infiltración con el fin de obtener la tasa de infiltración del suelo. Se utilizó una herramienta de doble anillo para medir los tiempos (min.) y descensos (cm) en el anillo interno y así poder calcular en gabinete la velocidad de infiltración y la lámina acumulada por medio de la ecuación de Horton.

## 5.11 Estudio Hidrológico

### 5.11.1 Delimitación y caracterización de cuencas

Para la delimitación de las cuencas y la determinación de sus principales parámetros de caracterización se utilizó el software ArcGIS. Se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) extraído del Instituto Geográfico Nacional (IGN) que cubre la totalidad del territorio continental nacional, con una resolución espacial de 30 m y una precisión vertical de aproximadamente 2 a 3 m.

Mediante las herramientas que brinda el software de información geográfica utilizado se pudo dar con la delimitación de cuencas. Los principales parámetros de caracterización obtenidos a partir de la delimitación de las cuencas fueron los referidos a la forma, relieve y red de drenaje.

Se prosiguió con la modelación hidrológica considerando la información de intensidad y lámina acumulada de la precipitación de diseño para períodos de retorno de 25 y 100 años. De acuerdo con los requerimientos establecidos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén, la estimación del hidrograma de crecida en cuencas mayores a 120 Ha se debe realizar con el método del hidrograma unitario; mientras que, para las cuencas menores a 120 Ha, se debe de utilizar el método racional. A su vez, para la estimación de la escorrentía directa o lluvia neta, se utilizó el método de Curva Número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EEUU.

### 5.11.2 Índice de Curva Número (CN) – Condición de Humedad II

El índice de curva número CN (II), vinculado al SCS permitió estimar el porcentaje de precipitación efectiva que produce escorrentía. El área analizada se caracterizó por la presencia de vegetación esteparia, arbustiva y xerófila, además de plantas anuales, suculentas y perennes. En términos generales, la vegetación se caracterizó por ser pobre y dispersa, adaptada al ambiente desértico característico del área. Los suelos se encontraron influenciados tanto por la geomorfología como por la roca formadora (geología), factores principales para la formación de suelos. Para la determinación del número de curva se utilizó la **tabla 8** donde se adopta una clasificación de la zona según tipo de suelo, vegetación y condición hidrológica.

| TIPO DE VEGETACIÓN  | CONDICIÓN HIDROLÓGICA | TIPO DE SUELO |    |    |    |
|---|-----------------------|---------------|----|----|----|
|   |                       | A             | B  | C  | D  |
| 1. Herbazal con algo de matorral  | Pobre                 | 70            | 80 | 87 | 93 |
|   | Media                 | 60            | 71 | 81 | 89 |
|   | Buena                 | 50            | 62 | 74 | 85 |
| 2. "Oak brush", "aspen", "mountain mahogany", "bitter brush", "maple"             | Pobre                 | 55            | 66 | 74 | 79 |
|   | Media                 | 37            | 48 | 57 | 63 |
|   | Buena                 | 25            | 30 | 41 | 48 |
| 3. "Pinyon", "juniper", o ambos, con cubierta herbácea                            | Pobre                 | 60            | 75 | 85 | 89 |
|   | Media                 | 45            | 58 | 73 | 80 |
|   | Buena                 | 25            | 41 | 61 | 71 |
| 4. "Sagebrush" con cubierta herbácea  | Pobre                 | 55            | 67 | 80 | 85 |
|   | Media                 | 40            | 51 | 63 | 70 |
|   | Buena                 | 25            | 35 | 47 | 55 |
| 5. Matorral desértico: palo verde, mesquite, cactus, "bursage", "saltbrush", etc. | Pobre                 | 63            | 77 | 85 | 88 |
|   | Media                 | 55            | 72 | 81 | 86 |
|   | Buena                 | 49            | 68 | 79 | 84 |

|   |  |
|---|--|
| Especies mencionadas en la descripción del tipo de vegetación:  |  |
| <p><b>Tipo 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Oak brush" = <i>Quercus gambelii</i></li> <li>- "Aspen" = <i>Populus tremuloidea</i> y <i>P. fremontii</i></li> <li>- "Mountain mahogany" = <i>Cercocarpus ledifolius</i></li> <li>- "Bitter brush" = <i>Purshia tridentata</i></li> <li>- "Maple" = <i>Acer grandidentatum</i></li> </ul> <p><b>Tipo 3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Pinyon" = <i>Pinus edulis</i> y <i>Pinus monophylla</i></li> <li>- "Juniper" = <i>Juniperus osteosperma</i></li> </ul> | <p><b>Tipo 4</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Sagebrush" = <i>Artemisia tridentata</i></li> </ul> <p><b>Tipo 5</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Saltbrush" = <i>Atriplex repens</i></li> <li>- "Greasewood" = <i>Ambrosia dumosa</i></li> <li>- "Creosotebrush" = <i>Larrea tridentata</i></li> <li>- "Blackbrush" = <i>Coleogyne ramosissima</i></li> <li>- "Bursage" = <i>Bursera californica</i></li> <li>- Palo verde = <i>Cercidium americanum</i></li> <li>- Mesquite = <i>Prosopis glandulosa</i></li> <li>- Cactus = <i>Carnegiea gigantea</i>; <i>Opuntia</i> spp.</li> </ul> |
| <p>El significado de los adjetivos de la condición hidrológica es:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pobre.- Si menos del 30 % del suelo está cubierto por hojarasca, hierba o matorral.</li> <li>- Media.- Si la cobertura está comprendida entre el 30 y el 70 %.</li> <li>- Buena.- Si la protección vegetal del suelo es superior al 70 %.</li> </ul> <p>* Valores añadidos por Smith &amp; Maidment (1995)</p>  |  |

Tabla 8: Índices de curva número para zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos para condición de humedad media según USDA 210-VI-TR-55, 1986 (Martínez Azagra, 2003).

Se tuvieron en cuenta los grupos hidrológicos de suelo, los cuales dan una idea de la impermeabilidad de este. El potencial de escorrentía más bajo corresponde al grupo A y aumenta hacia el grupo D (Tabla 9).

| SUELO | CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN CON HUMEDAD ELEVADA | TASA DE INFILTRACIÓN (mm·h <sup>-1</sup> ) | PROFUNDIDAD   |
|-------|---|--|---|
| A     | Alta  | 7,62-11,43                                 | Elevada   |
| B     | Moderada                                      | 3,81-7,62                                  | Mediana a elevada   |
| C     | Escasa  | 1,27-3,81                                  | Mediana a pequeña   |
| D     | Muy escasa                                    | 0-1,27                                     | Con horizontes arcillosos. Litosuelos. Suelos con nivel freático permanentemente alto |

Tabla 9: Grupos de suelos (Martínez Azagra, 2003).

Para la determinación del tipo de suelo se empleó una equivalencia entre las clases texturales del suelo determinadas por el USDA (United States Department of Agriculture) y la clasificación del Grupo Hidrológico de Suelos realizada por Ferrer Julia (2003) (Tabla 10).

| Clase Textural<br>(USDA)  | Grupo Hidrológico<br>(Ferrer - Julia 2003) |
|---|--|
| Arenosa<br>Arenosa-Franca   | A  |
| Franco-Arenosa  | B  |
| Arcillosa-Arenosa<br>Franca<br>Franco-Arcillosa<br>Franco-Arcillosa-Arenosa<br>Franco-Arcillosa-Limosa<br>Franco-Limosa | C  |
| Arcillosa<br>Arcillosa-Limosa<br>Limosa   | D  |

Tabla 10: Equivalencia entre las clases texturales del USDA y el Grupo Hidrológico (Fuente: Ferrer Julia 2003).

Se construyó un mapa de CN, para lo cual, se tomó como base la digitalización del *shapefile* de suelos, que tiene, para cada entidad de suelo, información geomorfológica, profundidad total y textura del suelo. Estos 3 parámetros son prioritarios al momento de clasificar el Grupo Hidrológico de Suelos (GHS). Este parámetro permitió determinar en forma empírica una aproximación al valor del CN.

Una vez asignado a cada entidad de suelo su respectivo CN, se rasterizan los datos vectoriales con el fin de realizar una estadística zonal del CN para cada subcuenca. Los valores de salida corresponden a: mínimo, máximo, media, mediana y desvío estándar del CN para cada subcuenca. Los CN asignados siguieron un criterio basado en observaciones geológicas, edafológicas y geomorfológicas realizadas en campo. Asimismo, se correlacionaron los valores de CN asignados con los índices de referencia presentados por Fernández *et al.* (1980) y Dufilho *et al.* (2001).

### 5.11.3 Tormentas de proyecto para períodos de retorno de 25 y 100 años

Las tormentas de diseño representan patrones de precipitación que tienen una probabilidad de ocurrencia elegida para el cálculo de la escorrentía y el diseño de obras de protección, conducción o embalse. Se determinaron las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para la región a partir del análisis de la información histórica de las precipitaciones máximas del área considerando las características generales de las precipitaciones (volumen, intensidad, duración, coeficiente de avance).

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

$$ID \text{ (mm/h)} = 13,98 \cdot I_{24} \cdot D^{-0,83}$$

Donde:

$I_D$ : Intensidad máxima media 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 estipulada.

Aplicando esta ecuación y teniendo en cuenta que:

$$P = I \cdot D$$

Donde:

P: Precipitación Total (mm).

I: Intensidad Máxima obtenida (obtenida de la fórmula de MIC) para las duraciones adoptadas (mm/h).

D: Duración de tormenta adoptada para cada cuenca (h);

Es posible obtener las precipitaciones totales (mm) para las duraciones de tormenta adoptadas y los períodos de recurrencia de interés. Se escogieron las precipitaciones de la estación meteorológica Aero Neuquén por ser la más próxima al área de estudio. Las **Tablas 11-13** detallan los datos de precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para los períodos de recurrencia de interés.

| <b>Estación Aero Neuquén</b> |                  |                 |                    |                        |
|------------------------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------------|
| <b>Recurrencia (años)</b>    | <b>P24h (mm)</b> | <b>P1h (mm)</b> | <b>I24h (mm/h)</b> | <b>Id (mm/h) (MIC)</b> |
| <b>25</b>                    | 100              | 59,00           | 4,16               | 58,25                  |
| <b>100</b>                   | 146              | 86,14           | 6,08               | 85,05                  |

*Tabla 11: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 1 h para períodos de recurrencia de 25 y 100 años.*

| <b>Estación Aero Neuquén</b> |                  |                 |                    |                        |
|------------------------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------------|
| <b>Recurrencia (años)</b>    | <b>P24h (mm)</b> | <b>P1h (mm)</b> | <b>I24h (mm/h)</b> | <b>Id (mm/h) (MIC)</b> |
| <b>25</b>                    | 100              | 59,00           | 4,16               | 41,60                  |
| <b>100</b>                   | 146              | 86,14           | 6,08               | 60,74                  |

*Tabla 12: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 1.5 h para períodos de recurrencia de 25 y 100 años.*

| <b>Estación Aero Neuquén</b> |                  |                 |                    |                        |
|------------------------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------------|
| <b>Recurrencia (años)</b>    | <b>P24h (mm)</b> | <b>P1h (mm)</b> | <b>I24h (mm/h)</b> | <b>Id (mm/h) (MIC)</b> |
| <b>25</b>                    | 100              | 59,00           | 4,16               | 32,77                  |
| <b>100</b>                   | 146              | 86,14           | 6,08               | 47,84                  |

*Tabla 13: Precipitación (mm) e intensidad (mm/h) para duraciones de 2 h para períodos de recurrencia de 25 y 100 años.*

En los métodos de diseño hidrológicos actuales, es necesario contar con una distribución temporal de la precipitación. El más utilizado es el método del Bloque Alterno, el cual especifica el volumen de precipitación que ocurre en  $n$  intervalos de tiempo sucesivos de duración  $\Delta t$ . En base a esto, se construyeron los hietogramas de bloque alternativo porcentuales (**Fig. 35**), según los requerimientos establecidos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén.

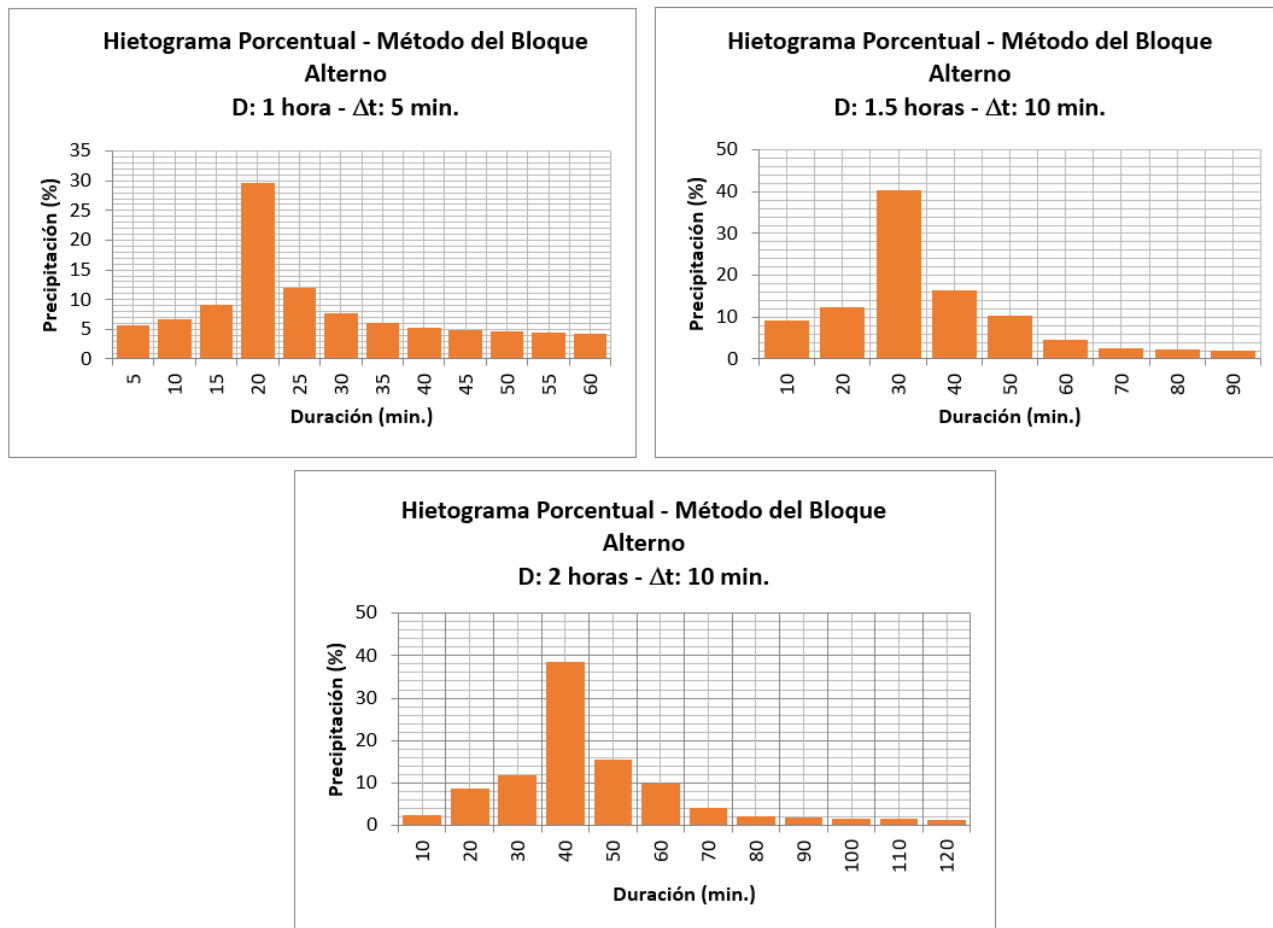


Figura 35: Hietogramas de bloque alterno porcentuales para tormentas de 1, 1.5 y 2 h

### 5.12 Modelación Hidrológica – Modelo HEC-HMS

Para la estimación de la escorrentía o precipitación neta, se utilizó el método Curva Número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EE UU. El modelo HEC-HMS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), utiliza métodos de precipitación-escorrentía para estimar hidrogramas de escorrentía directa generados por las precipitaciones durante un período específico y en un área determinada.

La aplicación del modelo HEC-HMS se fundamenta en la interacción de cuatro secciones:

- **Modelo de cuenca:** Esta sección se compuso del esquema de la red de drenaje de interés, además de las conexiones existentes entre las distintas subcuencas. A cada una de las subcuencas se les asignó el Área (Km<sup>2</sup>), el método de infiltración (método de curva número de la SCS), método de generación y transformación de lluvia-hidrograma (Hidrograma Unitario de *Snyder*). No se estimó flujo de base para el cálculo, dado a que el interés radica en conocer el flujo que aporta mayor volumen de agua en una crecida aluvional, es decir, el flujo superficial.
- **Modelo meteorológico:** Se seleccionaron los distintos modelos meteorológicos necesarios para estimar e interpolar la precipitación que cae sobre cada una de las subcuencas a partir de los datos de las estaciones pluviométricas. Se pudo escoger entre lluvias de diseño estándar (SCS), modelos de lluvia espacialmente distribuida (*gridded precipitation*) o hietogramas introducidos por el usuario (*Specified*



*Hyetograph*). En este caso, se utilizaron datos de la estación pluviométrica AeroNeuquén (*Specified Hyetograph*).

- **Control de especificaciones:** En esta sección, se debió generar el control de la simulación. Se introdujeron las propiedades temporales de la simulación tales como fecha y hora de inicio y final de la simulación. En este caso, una simulación de 14 horas fue suficiente. Es importante establecer el intervalo de tiempo para el cálculo. Se optó por un intervalo de tiempo de 10 minutos.
- **Datos de series temporales:** En este último apartado, se crearon y se especificaron las series temporales de lluvia correspondientes a las distintas estaciones pluviométricas existentes. Una vez creada una estación pluviométrica (*gage*), se pudieron introducir los datos de precipitación manualmente.

Es importante considerar que el agua que fluye en un cauce está asociada a procesos irreversibles cuantificados como pérdidas de energía, por lo que se establecieron parámetros de ruteo para el cálculo de los efectos de transmisión y laminación de hidrogramas, de acuerdo con el Método de Muskingum (McCarthy, 1938). Se consideraron dos parámetros (**Fig. 36**):

- **X:** Factor adimensional de ponderación del volumen de acumulación en el tramo. Este tiene valores entre 0 y 0,5. En este caso, se tomó un valor de  $X=0,4$ .
- **K (h):** Es el tiempo que necesita la onda de avenida para recorrer el tramo seleccionado. Depende de la longitud del tramo (km), la inclinación del tramo (%) y del parámetro X.

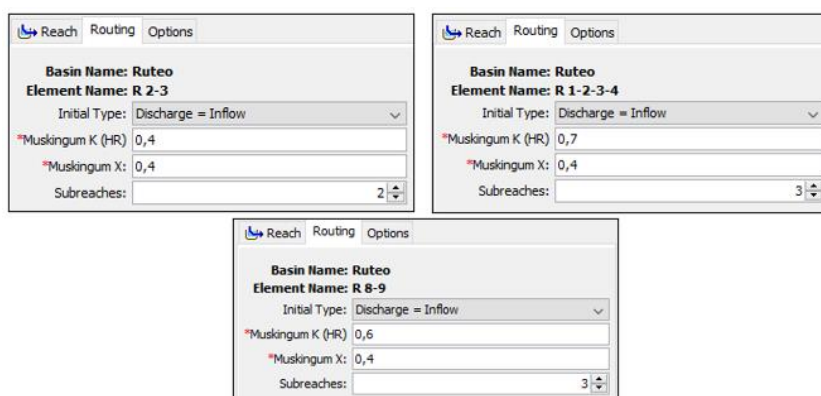


Figura 36: Parámetros de ruteo, según Muskingum, para cada uno de los tramos.

### 5.13 Modelación Hidráulica HEC-RAS

Para determinar el manto de escorrentía generado por el comportamiento de las subcuencas se utilizó el Software HEC-RAS (USACE, 2016) versión 5.0.7. Este software libre, desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* y dependiente del *U.S Army Corp Of Engineers*, permite simular el flujo de agua combinando modelos 1D/2D, así como totalmente 2D. La modelación hidráulica bidimensional permite un mayor acercamiento y ajuste a la realidad en la determinación de planos de inundación, debido a que el análisis unidimensional es solo aplicable para un estado de flujo laminar que se da en canales trapezoidales.

Para la modelación bidimensional, se requirió un Modelo Digital de Terreno (MDT) con una resolución espacial de 0,5 m provisto por la Municipalidad de Villa El Chocón, generado mediante el relevamiento aerofotogramétrico sobre el ejido de Villa El Chocón, con el fin de obtener imágenes de alta resolución y topografía del terreno. Para abarcar la totalidad del área fueron necesarios realizar 6 vuelos Drone y se relevaron 36.528.492 de puntos en 1932.82 Ha. Mediante los vuelos mencionados se obtuvo para toda la zona involucrada, un Modelo Digital de Terreno (MDT) un Modelo Digital de Superficie (MDS), Imágenes RAW y RGB, ortomosaico en formato GeoTiff y Kml. La generación del modelo brindará variables

hidráulicas de interés para el análisis de flujo, tales como la altura, velocidad y extensión de la lámina de escorrentía.

Para la modelación bidimensional se requirió:

1. Mapa de  $n$  de Manning: Se construyó y se utilizó un mapa discretizando los parámetros de rugosidad de Manning, en función de la clase textural y la geomorfología. Se tuvieron en cuenta diferentes valores de rugosidad de Manning según diferentes sectores del área: antrópico (0,045), suelo (0,045), cauce (0,035), roca (0,04) (Figs. 37 y 38).

| Tipo y descripción del canal  | Mínimo | Normal | Máximo |
|---|--------|--------|--------|
| <b>A. Arroyos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas &lt; 30 m):</b>  |        |        |        |
| <b>a) Corrientes en planicie:</b>   |        |        |        |
| 1. Limpios, rectos, sin deslaves ni estancamientos profundos, tirante alto.   | 0.025  | 0.030  | 0.033  |
| 2. Igual al anterior, pero más rocoso y con hierba.   | 0.030  | 0.035  | 0.040  |
| 3. Limpios, sinuosos, algunas irregularidades del fondo.  | 0.033  | 0.040  | 0.045  |
| 4. Igual al anterior, algo de hierba y rocas.   | 0.035  | 0.045  | 0.050  |
| 5. Igual al anterior, pero menor profundidad y secciones poco eficaces.   | 0.040  | 0.048  | 0.055  |
| 6. Igual que el 4, pero con más piedras.  | 0.045  | 0.050  | 0.060  |
| 7. Tramos irregulares con hierba y estancamientos profundos.  | 0.050  | 0.070  | 0.080  |
| 8. Tramos con mucha hierba, estancamientos profundos, cauces de inundación con raíces y plantas subacuáticas.   | 0.075  | 0.100  | 0.150  |
| <b>b) Corrientes de montaña, sin vegetación en el cauce, bordos muy inclinados, árboles y arbustos a lo largo de las márgenes, que quedan sumergidos durante las inundaciones:</b>                          |        |        |        |
| 1. Fondo de grava, boleó y algunos cantos rodados.  | 0.030  | 0.040  | 0.050  |
| 2. Fondo de boleó y grandes rocas.  | 0.040  | 0.050  | 0.070  |
| <b>B. Planicies de inundación:</b>  |        |        |        |
| <b>a) Pastura sin arbustos:</b>   |        |        |        |
| 1. Pasto bajo.  | 0.025  | 0.030  | 0.035  |
| 2. Pasto alto.  | 0.030  | 0.035  | 0.050  |
| <b>b) Areas de cultivo:</b>   |        |        |        |
| 1. Sin cultivo.   | 0.020  | 0.030  | 0.040  |
| 2. Cultivo maduro en surcos.  | 0.025  | 0.035  | 0.045  |
| 3. Cultivo maduro en campo.   | 0.030  | 0.040  | 0.050  |
| <b>c) Arbustos:</b>   |        |        |        |
| 1. Arbustos escasos y mucha hierba.   | 0.035  | 0.050  | 0.070  |
| 2. Pocos arbustos y árboles, en invierno.   | 0.035  | 0.050  | 0.060  |
| 3. Pocos arbustos y árboles, en verano.   | 0.040  | 0.060  | 0.080  |
| 4. Mediana a densa población de arbustos, en invierno.  | 0.045  | 0.070  | 0.110  |
| 5. Mediana a densa población de arbustos, en verano.  | 0.070  | 0.100  | 0.160  |
| <b>d) Árboles:</b>  |        |        |        |
| 1. Población densa de sauces en verano, rectos.   | 0.110  | 0.150  | 0.200  |
| 2. Terrenos talados con troncos muertos.  | 0.030  | 0.040  | 0.050  |
| 3. Igual al anterior, pero con troncos retoñados.   | 0.050  | 0.060  | 0.080  |
| 4. Gran concentración de madera, algunos árboles caídos, pocos de escaso crecimiento, nivel de inundación abajo de las ramas.   | 0.080  | 0.100  | 0.120  |
| 5. Igual al anterior, pero el nivel de inundación alcanza a las ramas.  | 0.100  | 0.120  | 0.160  |
| <b>C. Ríos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas &gt; 30 m). El valor de <math>n</math> es menor que en los arroyos de igual descripción, pero donde los bordos ofrecen menor resistencia:</b> |        |        |        |
| a) Secciones regulares sin cantos rodados ni arbustos.  | 0.025  |        | 0.060  |
| b) Secciones rugosas e irregulares.   | 0.035  |        | 0.100  |

Figura 37: Coeficientes de  $n$  de Manning (Ven te Chow, 2000).

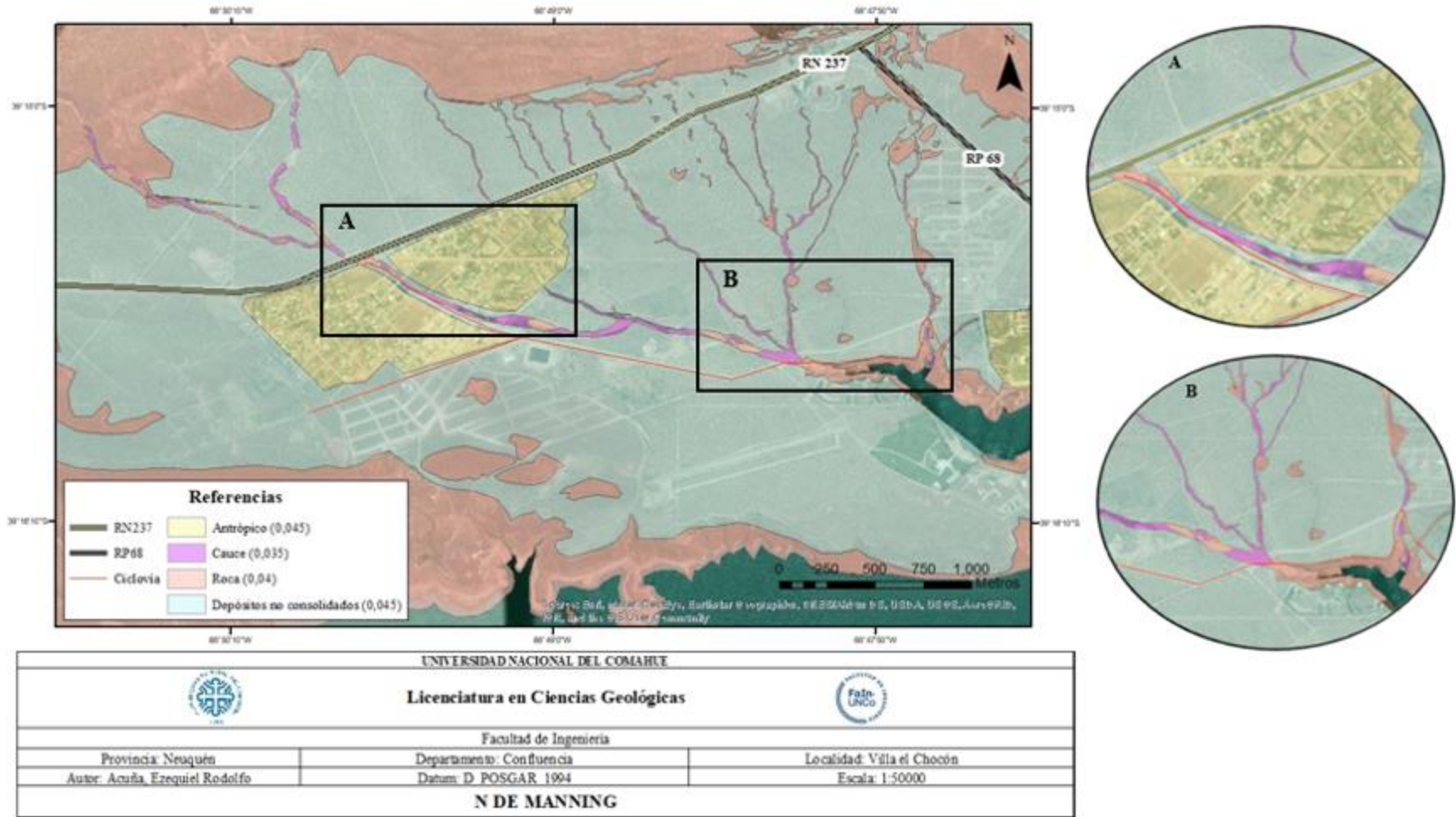


Figura 38: Valores de  $n$  de Manning. Se incluyen secciones aumentadas de posibles puntos problemáticos donde los cauces interceptan el Barrio Llequén (A) y la ciclovia (B).

2. Geometría y generación de mallado: La mencionada modelación bidimensional se calculó en base a un mallado generado a partir del modelo digital del terreno.  
La precisión y fidelidad de la información obtenida dependen mucho del mallado, además de la cantidad de celdas que se utilicen para la corrida del modelo. En este caso, se adoptó un mallado de 2,00 x 2.00 m.
3. Determinación de datos para la modelación en condición de flujo no permanente (*Unsteady Flow Data*): Se completaron los datos requeridos por la herramienta *Flow Hydrograph*, empleada para modelar el flujo que ingresa al área 2D previamente delimitada. Para cada condición de borde, se introdujeron los hidrogramas obtenidos en la modelación con HEC-HMS, para la tormenta de diseño para TR 25 años y 100 años, considerando también las pendientes. Como condición de borde hacia la salida, se utilizó la herramienta *Normal Depth*, en donde se estableció una pendiente de 0,01.
4. Corrida del modelo (*Unsteady Flow Analysis*) (**Fig. 39**): Para la ejecución del modelo, se definieron los parámetros de análisis como la geometría y datos de flujo no permanente. Se definieron los intervalos de simulación, adoptando un tiempo de aproximadamente 14 horas. En la sección de *Computation Settings*, se configuraron los tiempos de iteración. En este caso, se pensó que un tiempo de cálculo de 1 segundo y de 1 minuto de salida fue lo adecuado para un mallado de 2,00 x 2,00 m., y así obtener una buena precisión numérica.

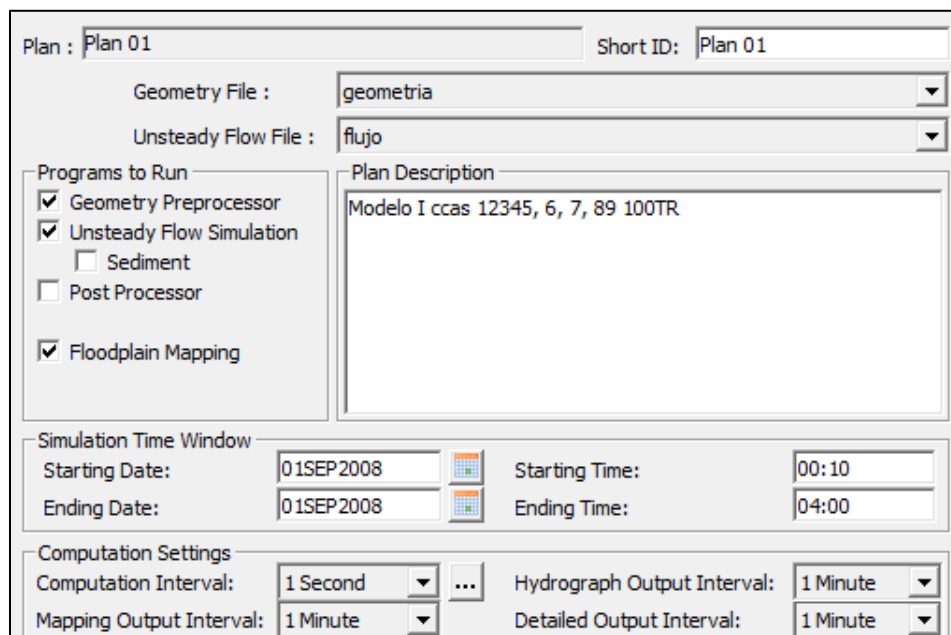


Figura 39: Corrida del modelo mediante según el *Unsteady Flow Analysis*.

#### 5.14 Determinación de variables hidráulicas de interés: altura de lámina de escorrentía y velocidad

De acuerdo con la lámina de escorrentía generada por el software para cada modelo se propusieron líneas perfiles transversales a los cauces en donde se calcularon los valores de altura de lámina de escorrentía (m) y velocidad (m/s), parámetros fundamentales para la aplicación del método de Erodabilidad de Annandale.

#### 5.15 Ensayo de compresión simple (UCS)

Con el objetivo de obtener información más precisa sobre la mecánica de rocas y para la correcta aplicación del método de erodabilidad elegido, se realizaron ensayos de compresión simple en dos muestras de roca

extraídas del área de estudio (*Figs. 40 y 41*). Las muestras, denominadas “Geo 1” y “Geo 2”, arrojaron valores de 12,17 MPa (124,20 kg/cm<sup>2</sup>) y 14,85 MPa (151,43 kg/cm<sup>2</sup>), respectivamente.



*Figura 40: Muestras de roca utilizadas para el ensayo de compresión simple.*



*Figura 41: Ensayo de compresión simple para las muestras de roca extraídas.*

### 5.16 Método del índice de erodabilidad de Annandale

El método utilizado para el análisis de la erosión en lecho rocoso fue el denominado método del Índice de erodabilidad de Annandale ( $K_h$ ), para lo cual se contó con la información geológica de muestras de roca correspondientes a la Fm. Candeleros, unidad predominante y representativa del área de estudio. Cabe destacar que, ante la imposibilidad de cuantificar algunos de los parámetros geotécnicos necesarios para el cálculo de  $K_h$ , se procedió a asignar a dichos parámetros rangos de variación razonables, obteniéndose índices de erodabilidad máximos, intermedios y mínimos, lo cual prevé cierto nivel de incertidumbre. Una vez calculados los índices de erodabilidad  $K_h$ , se relacionaron con el poder erosivo del agua, representado por la tasa de disipación de energía ( $P$ ). La **tabla 14**, describe a modo de resumen los coeficientes que conforman el índice de erodabilidad  $K_h$  conforme el método de Erodabilidad de Annandale.

| Coeficiente  | Fórmula  | Parámetros   |
|--|--|--|
| <b>Coeficiente de resistencia de masa (<math>M_s</math>)</b>           | $M_s = 0.78 \cdot Cr \cdot UCS^{1.05}$ cuando $UCS \leq 10$ MPa<br>$M_s = Cr \cdot UCS$ cuando $UCS > 10$ MPa<br>$Cr = \delta \cdot \rho_r / \gamma_r$ | UCS: Resistencia a la compresión simple (MPa)<br>Cr: Coeficiente de densidad relativa<br>$\rho_r$ : Densidad de roca<br>$\delta$ : Aceleración de la gravedad<br>$\gamma_r$ : Unidad de referencia ( $27 \cdot 10^3$ N/m <sup>3</sup> )    |
| <b>Coeficiente de tamaño de bloques (<math>K_b</math>)</b>             | $K_b = RQD / J_n$  | RQD: Calidad de roca<br>$J_n$ : Número de familia de juntas  |
| <b>Coeficiente de resistencia al corte de disc. (<math>K_d</math>)</b> | $K_d = J_r / J_a$  | $J_r$ : Índice de rugosidad de discontinuidades<br>$J_a$ : Índice de alteración de juntas  |
| <b>Coeficiente de estructura de material (<math>J_s</math>)</b>        | $J_s =$ Tablas   |  |
| <b>Tasa de disipación de energía (<math>P</math>)</b>                  | $P = \gamma \cdot q \cdot \Delta E$  | P: Potencia del escurrimiento (kW/m <sup>2</sup> )<br>$\gamma$ : Peso específico del agua (9.82 kN/m <sup>3</sup> )<br>q: Caudal por unidad de ancho (m <sup>3</sup> /s/m)<br>$\Delta E$ : Pérdida de energía por unidad de longitud (m/m) |

Tabla 14: Resumen de los coeficientes necesarios para el cálculo del índice  $K_h$  junto con sus respectivas fórmulas y parámetros.

## 6 RESULTADOS

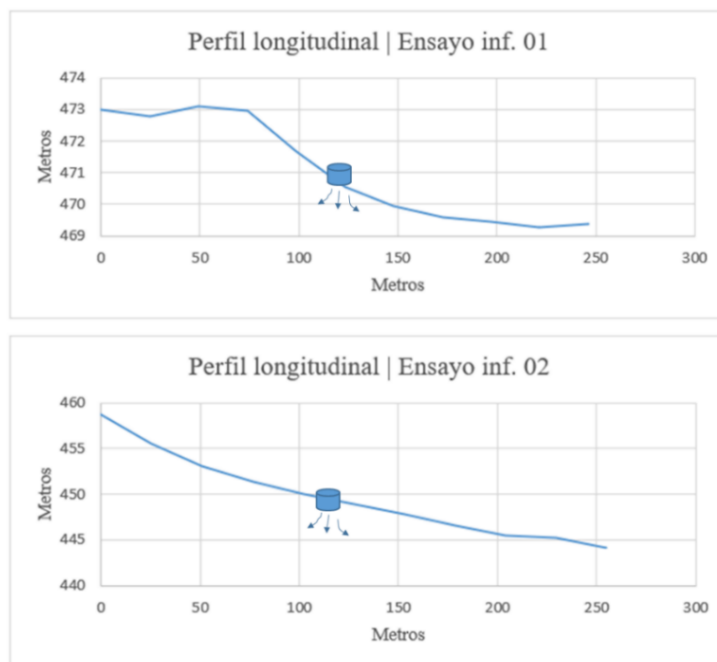
### 6.1 Relevamiento de campo

La *tabla 15* muestra información acerca de los puntos relevados en la visita de campo.

| Punto N° | Coordenadas geográficas         | Ancho de cauce |
|----------|---------------------------------|----------------|
| 2        | 39° 14' 56'' S / 68° 48' 16'' O | 2 m            |
| 3        | 39° 14' 59'' S / 68° 48' 28'' O | 6 m            |
| 5        | 39° 15' 09'' S / 68° 48' 47'' O | 1.85 m         |
| 6        | 39° 15' 10'' S / 68° 48' 54'' O | 7 m            |
| 7        | 39° 15' 11'' S / 68° 48' 58'' O | 2 m            |
| 8        | 39° 15' 14'' S / 68° 49' 08'' O | 3 m            |
| 9        | 39° 15' 15'' S / 68° 49' 13'' O | 2.5 m          |
| 10       | 39° 15' 18'' S / 68° 49' 18'' O | 5 m            |
| 11       | 39° 15' 25'' S / 68° 49' 44'' O | 20 m           |
| 12       | 39° 15' 36'' S / 68° 49' 09'' O | 63 m           |
| 13       | 39° 15' 42'' S / 68° 48' 08'' O | 90 m           |
| 14       | 39° 15' 36'' S / 68° 47' 39'' O | 24 m           |
| 15       | 39° 15' 12'' S / 68° 47' 20'' O | 8 m            |
| 16       | 39° 14' 59'' S / 68° 47' 40'' O | 9 m            |

*Tabla 15: Información detallada de los cauces relevados.*

En la *Fig. 42* se detalla un perfil longitudinal de Norte a Sur sobre el sitio en el cual se realizó el ensayo de infiltración, donde las pendientes medidas con el MDE se encuentran entre el 3 y 5 % respectivamente, sobre un suelo de textura gruesa y limitado por un asomo rocoso a 0,60 metros de profundidad. La *Fig. 43* muestra los datos obtenidos en los ensayos de infiltración, mientras que en la *tabla 16* se resumen los parámetros ajustados y la ecuación de Horton correspondiente para cada ensayo elaborado.



*Figura 42: Perfiles longitudinales de los sitios donde se realizaron los ensayos de infiltración. La pendiente en promedio es de 3 % al 5%, respectivamente.*

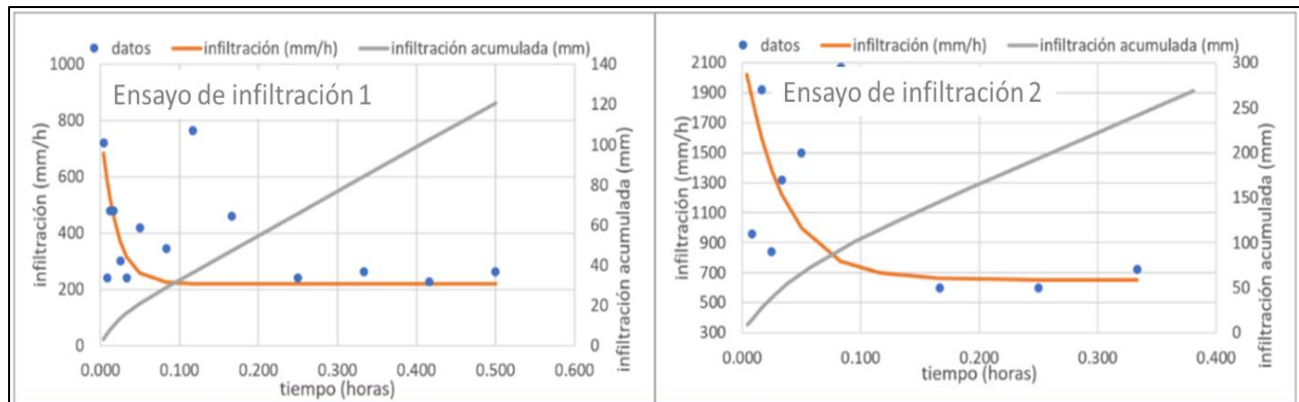


Figura 43: Ajuste de la ecuación de Horton a los datos de infiltración obtenidos.

|                           | Ecuación de Horton            | fo (mm/h) | fb (mm/h) | k (1/h) |
|---------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|---------|
| Ensayo de infiltración 01 | $f(t) = 220 + 360 e^{-0,9t}$  | 800       | 220       | 0,9     |
| Ensayo de infiltración 02 | $f(t) = 450 + 1950 e^{-0,9t}$ | 2400      | 450       | 0,9     |

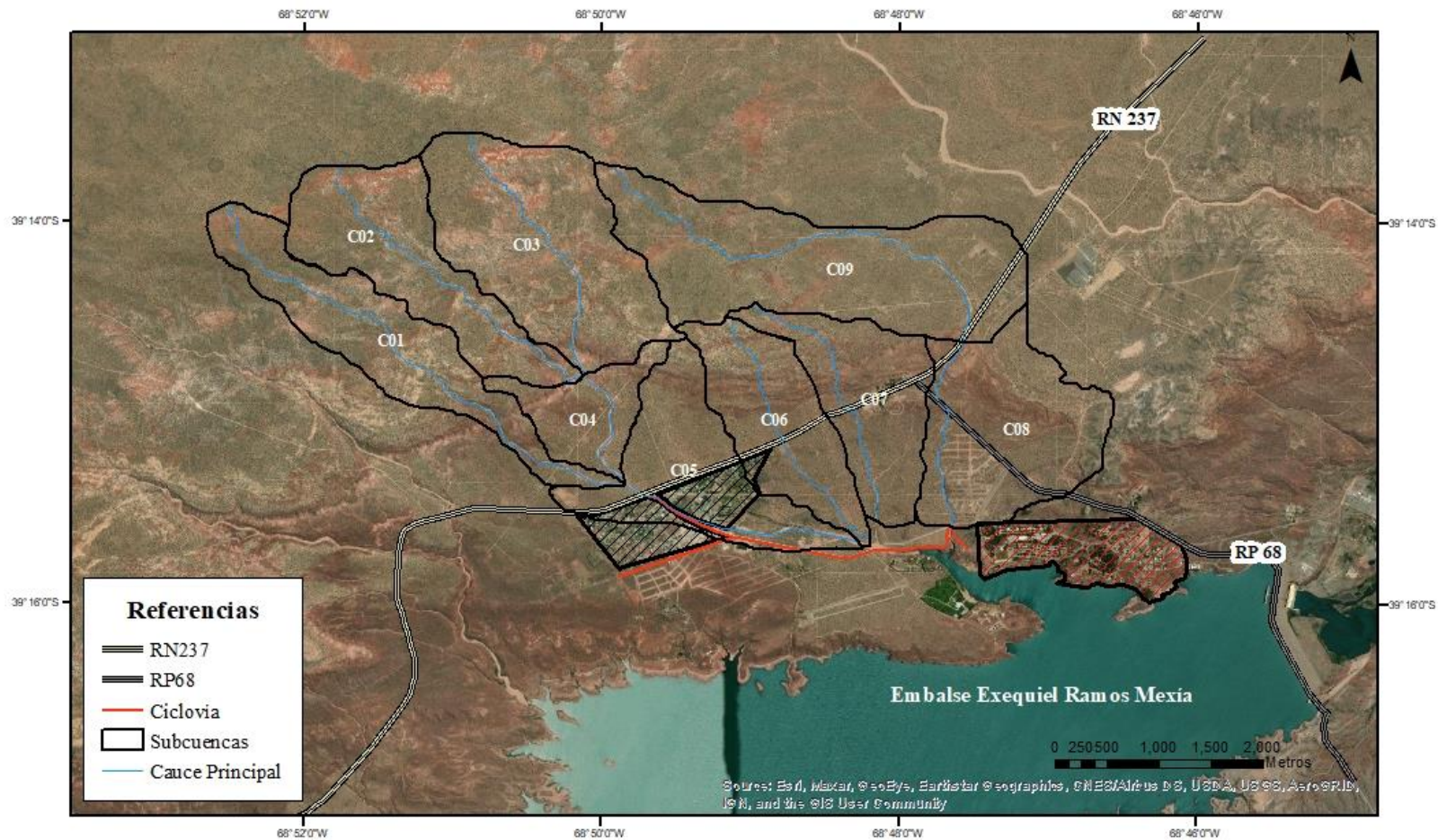
Tabla 16: Ecuación de Horton ajustada para cada ensayo de infiltración.

## 6.2 Delimitación y caracterización de cuencas

En un principio, se obtuvo un total de cuatro cuencas que fueron subdivididas en nueve subcuencas (**Fig. 44**). Para esta subdivisión se tuvo en cuenta un criterio geológico según tipo de suelo y relieve. Los suelos presentes se clasificaron en Grupos Hidrológicos (A, B, C, D) (**Fig. 45**) para asignar los distintos índices de curva número a través de una estadística zonal por tabla (**Fig. 46**). Las **tablas 17-20** muestran los valores cuantificados de los parámetros de caracterización de cuencas más relevantes para el estudio.

En función de lo observado en campo se adoptó como criterio conservador aumentar el Curva Numero para la condición de humedad II, en función de la pendiente y el poco desarrollo de suelo limitado por litología.







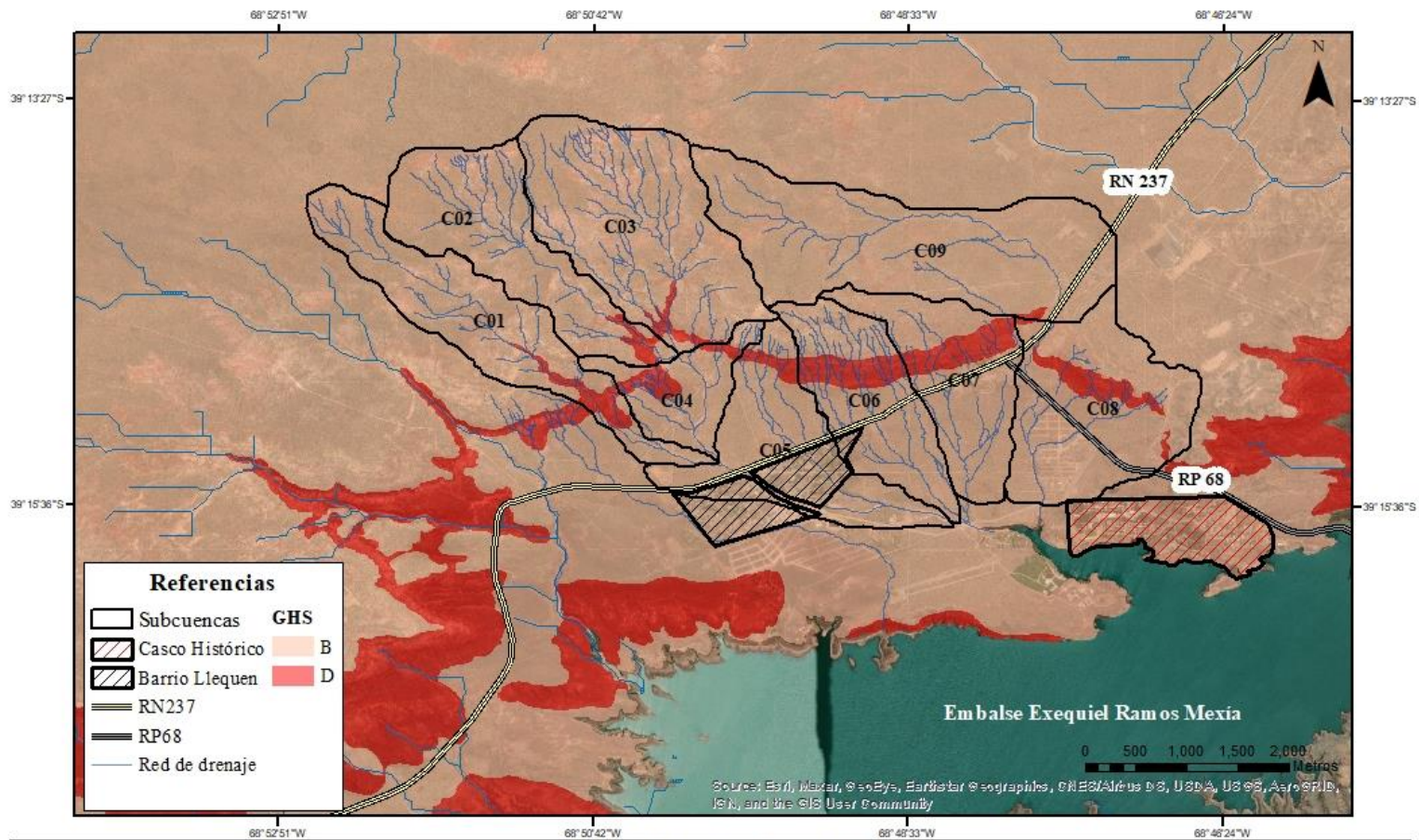
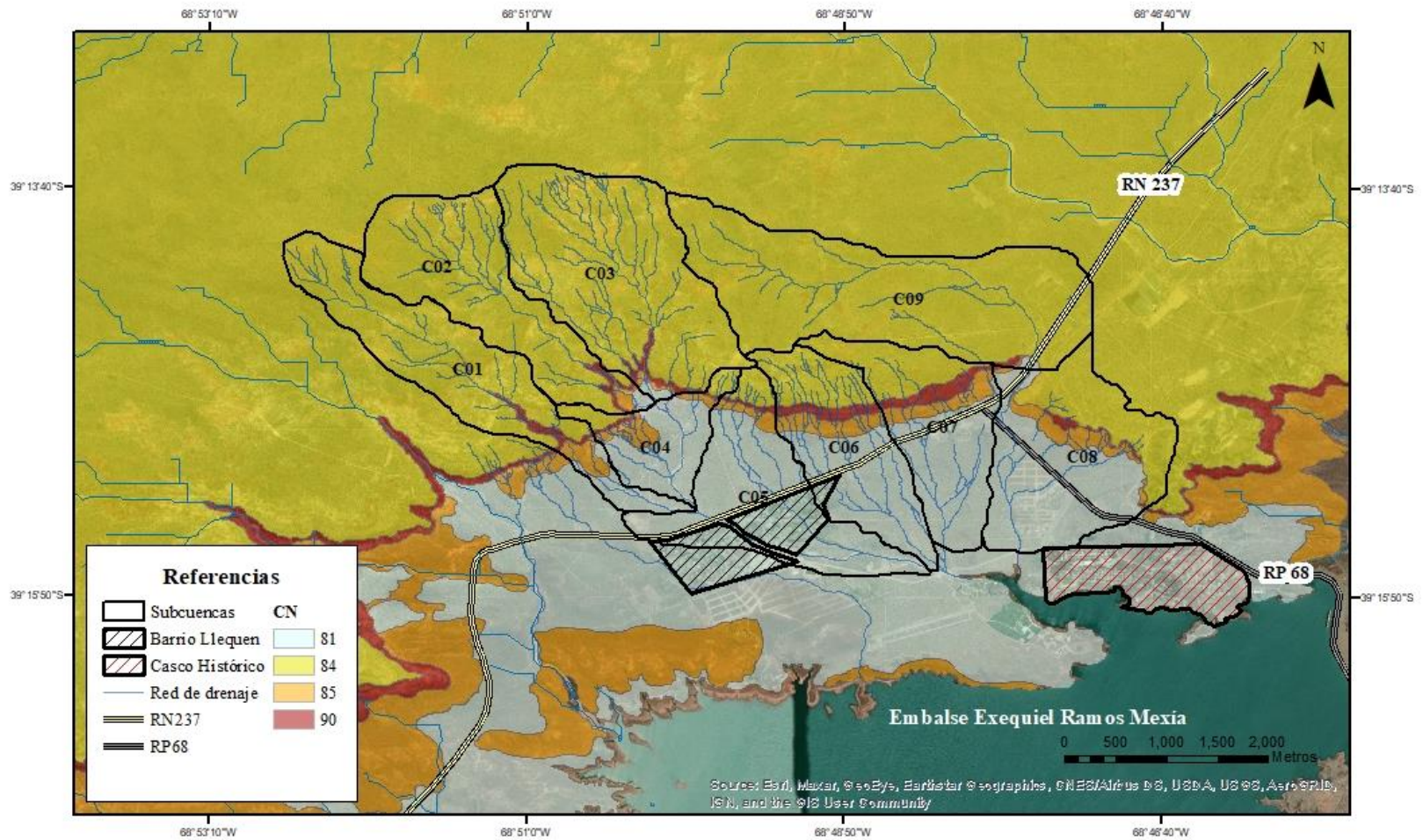
|   |                           |                            |
|---|---------------------------|----------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE  |                           |                            |
|   |                           |                            |
| <b>Licenciatura en Ciencias Geológicas</b>  |                           |                            |
| Facultad de Ingeniería  |                           |                            |
| Provincia: Neuquén  | Departamento: Confluencia | Localidad: Villa el Chocón |
| Autor: Acuña, Ezequiel Rodolfo  | Datum: D POSGAR_1994      | Escala: 1:50000            |
| <b>DELIMITACIÓN DE SUBCUENCAS</b>   |                           |                            |

Figura 44: Delimitación de las subcuencas de estudio.



|  |                           |                            |
|--|---------------------------|----------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE           |                           |                            |
|  |                           |                            |
| <b>Licenciatura en Ciencias Geológicas</b> |                           |                            |
| Facultad de Ingeniería                     |                           |                            |
| Provincia: Neuquén                         | Departamento: Confluencia | Localidad: Villa el Chocón |
| Autor: Acuña, Ezequiel Rodolfo             | Datum: D POSGAR 1994      | Escala: 1:50000            |
| <b>Grupo Hidrológico de Suelos (GHS)</b>   |                           |                            |

Figura 45: Determinación del grupo Hidrológico de Suelos (GHS) para el área de estudio.



|   |  |                            |
|---|--|----------------------------|
| <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE</b> |  |                            |
|   | <b>Licenciatura en Ciencias Geológicas</b> |                            |
| Facultad de Ingeniería                  |  |                            |
| Provincia: Neuquén                      | Departamento: Confluencia                  | Localidad: Villa el Chocón |
| Autor: Acuña, Ezequiel Rodolfo          | Datum: D POSGAR 1994                       | Escala: 1:50000            |
| <b>ÍNDICES DE CURVA NÚMERO</b>          |  |                            |

Figura 46: Índices de curva número asignados al área de estudio.

| Subcuenca | A (km <sup>2</sup> ) | A (ha) | P (km) | Pendiente (%) |
|-----------|----------------------|--------|--------|---------------|
| 1         | 2,40                 | 240,00 | 11,08  | 5,77          |
| 2         | 2,38                 | 238,80 | 8,70   | 5,25          |
| 3         | 3,45                 | 345,00 | 8,24   | 6,05          |
| 4         | 1,00                 | 100,00 | 5,65   | 6,57          |
| 5         | 2,23                 | 222,54 | 8,86   | 4,28          |
| 6         | 1,87                 | 187,38 | 6,75   | 6,44          |
| 7         | 1,91                 | 191,03 | 7,12   | 5,72          |
| 8         | 2,71                 | 270,84 | 7,48   | 6,66          |
| 9         | 4,11                 | 411,03 | 10,87  | 3,27          |

Tabla 17: Parámetros morfométricos principales para cada subcuenca.

| Subcuenca | Índice de Gravelius | Forma    |
|-----------|---------------------|----------|
| 1         | 2,02                | Alargada |
| 2         | 1,59                | Ovalada  |
| 3         | 1,25                | Ovalada  |
| 4         | 1,59                | Alargada |
| 5         | 1,67                | Alargada |
| 6         | 1,39                | Alargada |
| 7         | 1,45                | Ovalada  |
| 8         | 1,28                | Alargada |
| 9         | 1,51                | Ovalada  |

Tabla 18: Índices de Gravelius y determinación de la forma para cada subcuenca, según dicho índice.

| Subcuenca | Lc (km) | Jc (m/m) | Tc (h) Kirpich | Tc (h) SCS | Tc (h) Temez | Tc (h) Promedio | Tc (h) adoptado | T <sub>Lag</sub> adoptado |
|-----------|---------|----------|----------------|------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 1         | 4,55    | 0,051    | N/A            | 1,80       | 1,67         | 1,38            | <b>1,73</b>     | 1,04                      |
| 2         | 3,05    | 0,063    | N/A            | 1,56       | 1,18         | 1,06            | <b>1,37</b>     | 0,82                      |
| 3         | 2,53    | 0,064    | N/A            | 1,22       | 1,02         | 0,88            | <b>1,12</b>     | 0,67                      |
| 4         | 1,23    | 0,036    | N/A            | 0,57       | 0,66         | 0,50            | <b>0,62</b>     | 0,37                      |
| 5         | 2,41    | 0,020    | N/A            | 1,21       | 1,22         | 1,01            | <b>1,22</b>     | 0,73                      |
| 6         | 2,35    | 0,051    | N/A            | 1,13       | 1,01         | 0,85            | <b>1,07</b>     | 0,64                      |
| 7         | 2,34    | 0,050    | N/A            | 1,20       | 1,01         | 0,87            | <b>1,10</b>     | 0,66                      |
| 8         | 2,01    | 0,047    | N/A            | 0,84       | 0,91         | 0,71            | <b>0,88</b>     | 0,53                      |
| 9         | 3,30    | 0,029    | N/A            | 2,14       | 1,45         | 1,41            | <b>1,79</b>     | 1,08                      |

Tabla 19: Parámetros con respecto a la red de drenaje más relevantes para cada subcuenca. Se destacan las pendientes del cauce principal y el tiempo de concentración según diversos autores. N/A: No aplica.

| Subcuenca | Curva Número (CN) (2) |
|-----------|-----------------------|
| 1         | 83                    |
| 2         | 83                    |
| 3         | 83                    |
| 4         | 83                    |
| 5         | 83                    |
| 6         | 82                    |
| 7         | 83                    |
| 8         | 83                    |
| 9         | 84                    |

Tabla 20: Valores medios de los índices de curva número para cada subcuenca de estudio, obtenidos mediante una estadística zonal por tabla.

### 6.3 Modelación hidrológica HEC-HMS

Para la generación del modelo HEC-HMS, se presentaron las nueve subcuencas obtenidas (C01 – C09) (*Fig. 47*). Mediante la simulación hidrológica por medio de HEC-HMS, se obtuvo información de importancia como los hidrogramas de crecida de las cuencas (*Figs. 48-49*), volúmenes de agua generados por la tormenta, áreas de drenaje, etc (*Tablas 21-22*).

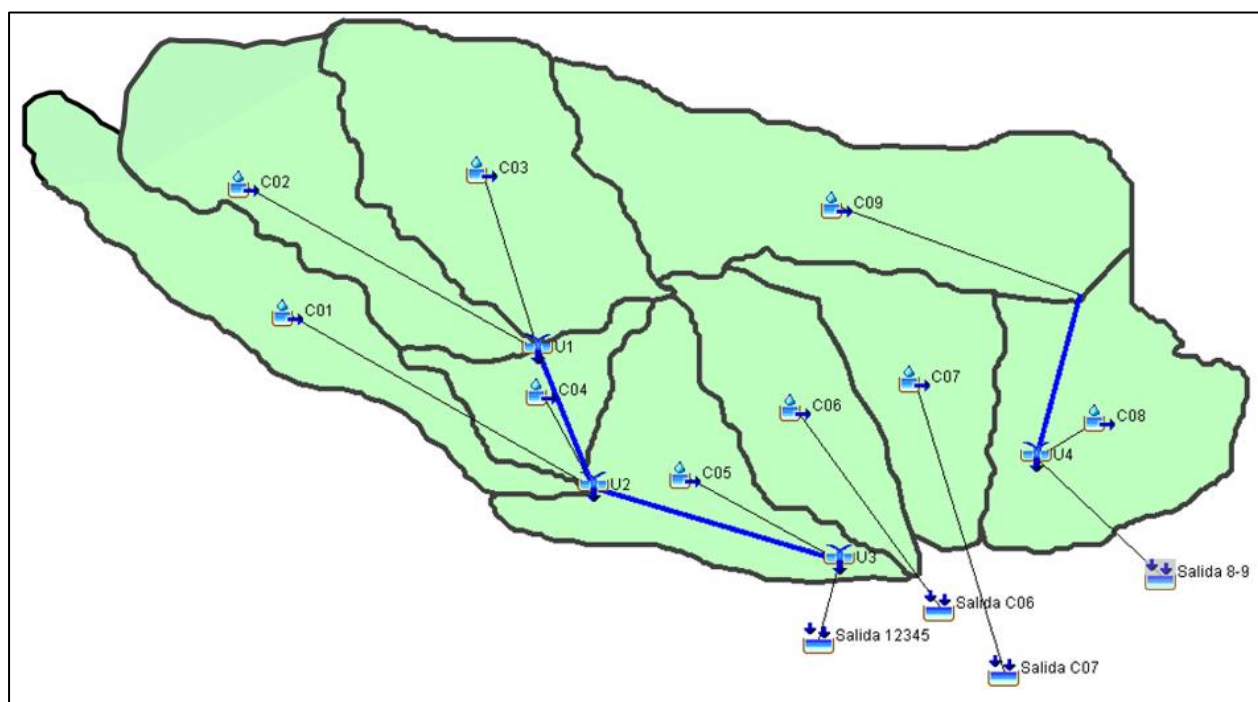


Figura 47: Esquema de las subcuencas consideradas y conexión entre ellas.

| Elemento hidrológico    | Área de drenaje (km <sup>2</sup> ) | Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s) | Volumen (mm) | Volumen (1000m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------|-------------------------------|
| <b>Salida 1-2-3-4-5</b> | 11,81                              | 43,60                           | 24,30        | 286,90                        |
| <b>Salida C06</b>       | 1,86                               | 9,80                            | 21,60        | 40,10                         |
| <b>Salida C07</b>       | 1,93                               | 11,40                           | 22,90        | 44,20                         |
| <b>Salida 8-9</b>       | 6,80                               | 19,00                           | 26,20        | 178,40                        |

Tabla 21: Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para las subcuencas propuestas para una tormenta de diseño de 25TR.

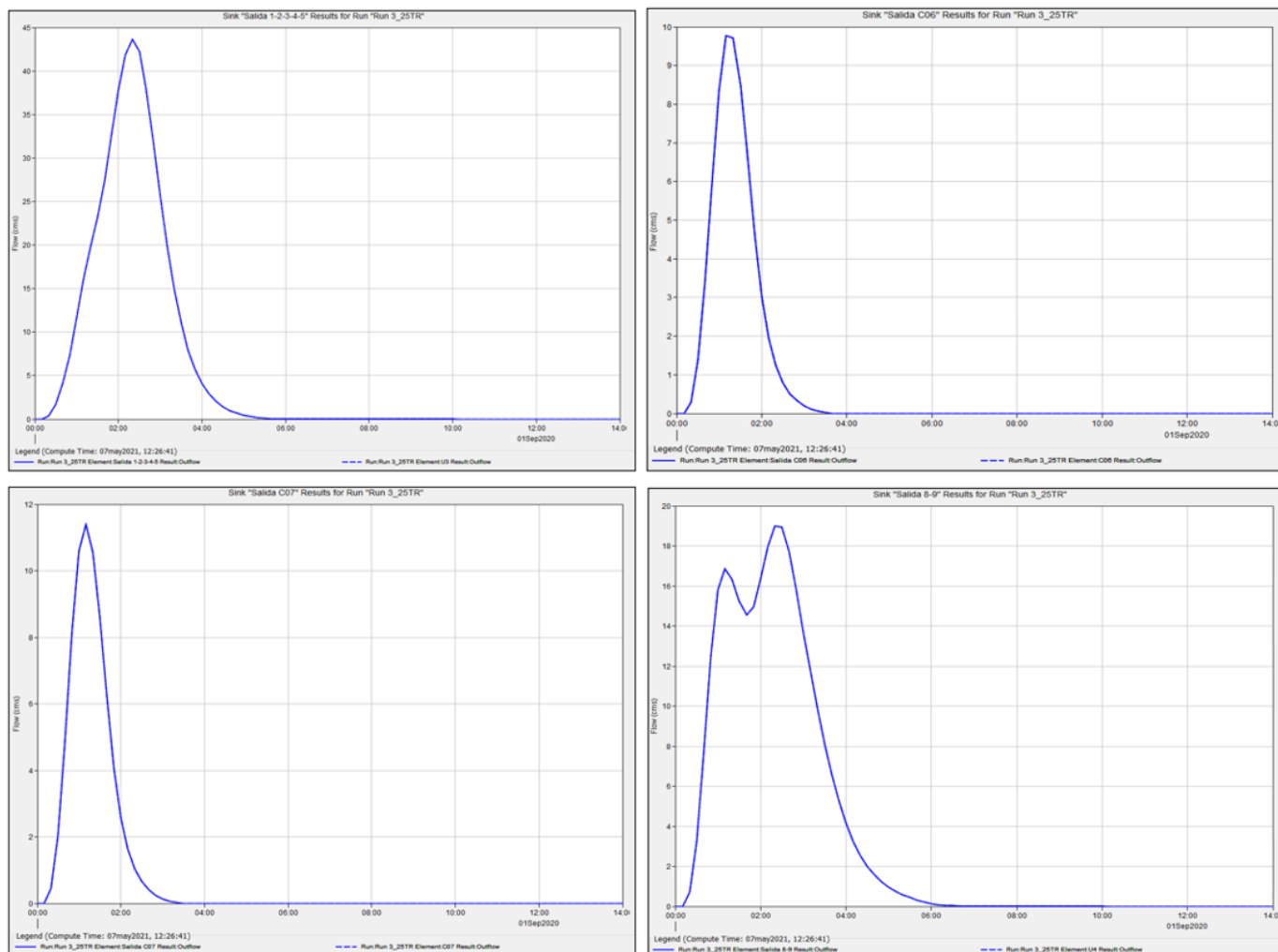


Figura 48: Hidrogramas de salida de las subcuencas propuestas (25TR).

| Elemento hidrológico | Área de drenaje (km <sup>2</sup> ) | Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s) | Volumen (mm) | Volumen (1000m <sup>3</sup> ) |
|----------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------|-------------------------------|
| Salida 1-2-3-4-5     | 11,81                              | 83,10                           | 46,25        | 546,30                        |
| Salida C06           | 1,86                               | 19,30                           | 42,10        | 78,20                         |
| Salida C07           | 1,93                               | 21,60                           | 44,00        | 84,90                         |
| Salida 8-9           | 6,80                               | 36,00                           | 49,40        | 336,30                        |

Tabla 22: Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para las subcuencas propuestas para una tormenta de diseño de 100TR

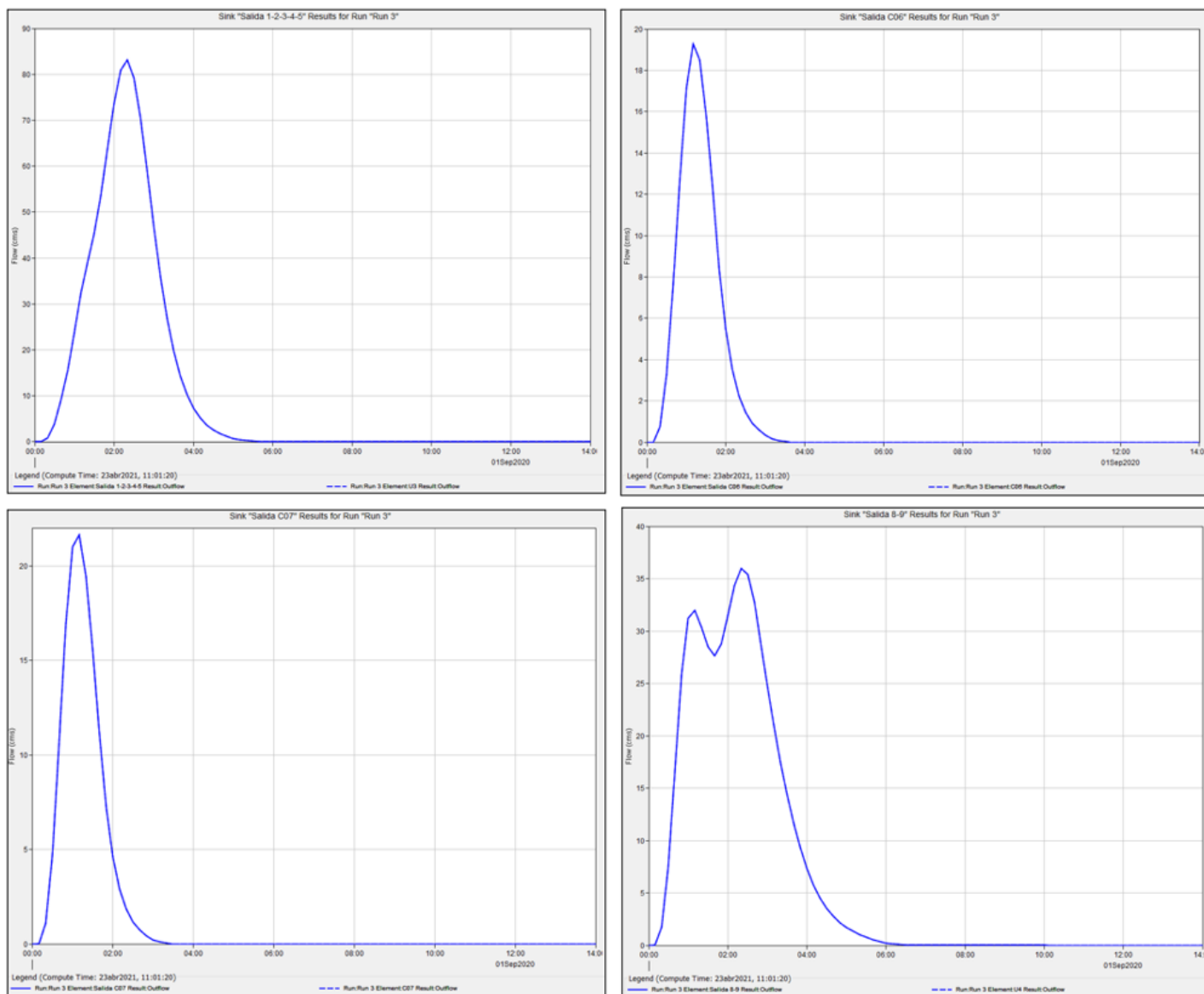


Figura 49: Hidrogramas de salida de las subcuencas propuestas (100 TR).

## 6.4 Modelación Hidráulica Bidimensional

Para el área analizada se generaron dos modelos hidráulicos según el grado de exposición a los cauces más importantes (**Fig. 50**). El primer modelo propuesto se situó en la intersección entre el Barrio Llequén y la RN 237; mientras que el modelo II se ubicó entre el Casco Histórico y el Barrio Llequén. Es importante tener en consideración que para el modelo I se asumió que el caudal pico generado por tormentas de 25 y 100 años de TR es conducido por el sistema de alcantarillado en condiciones normales. Esta asunción fue necesaria ante la falta de información que permita la generación de un modelo de elevación más amplio que abarque el área suficiente hacia el norte de la traza de la RN237 (**Fig. 51**).

Para cada uno de los modelos hidráulicos se generó la geometría de aplicación del modelo y su correspondiente mallado 2D (**Fig. 52**). Además, se establecieron las condiciones de contorno mediante la herramienta “*Boundary Conditions*” con el objetivo de definir el comportamiento del modelo en los límites de entrada y salida de los cauces. Para tener una mayor precisión en el modelo, se crearon a lo largo de los cauces analizados, una serie de estructuras denominadas “*Breaklines*”. Estas estructuras se encargan de generar celdas más precisas a lo largo de una línea dispuesta por el usuario (**Fig. 53**).

Para el modelo hidráulico II se observaron en relevamientos de campo, áreas caracterizadas por cambios abruptos de pendiente, lo que podría llevar a la existencia de saltos hidráulicos, fenómenos que se generan por el cambio súbito de una corriente rápida y poco profunda (supercrítica) a una corriente lenta y profunda (subcrítica). Dado que la modelación hidráulica bidimensional no resuelve de la mejor manera este tipo de fenómenos, es posible que existan errores en la modelación. En función de esto, se planteó un modelo alternativo con una condición de salida de alta pendiente para lidiar con los efectos de estos fenómenos hidráulicos (**Fig. 54**).



Figura 50: Sectores donde se generaron los modelos hidráulicos según su exposición a los cauces más importantes. En rojo se resaltan los cauces de mayor relevancia.



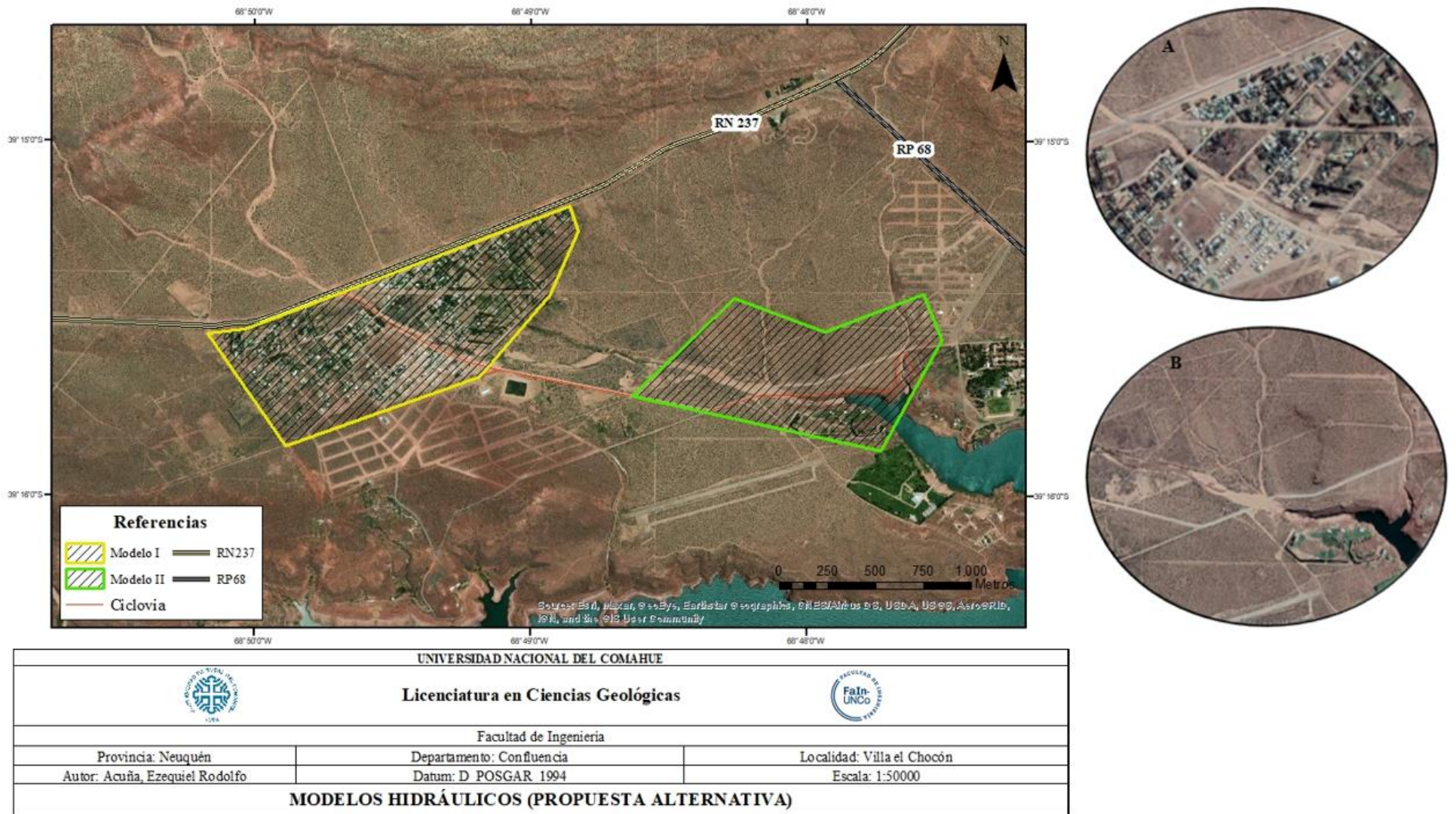


Figura 51: Ubicación de los modelos hidráulicos propuestos. Se observan secciones aumentadas del modelo I (A) y del modelo II (B).

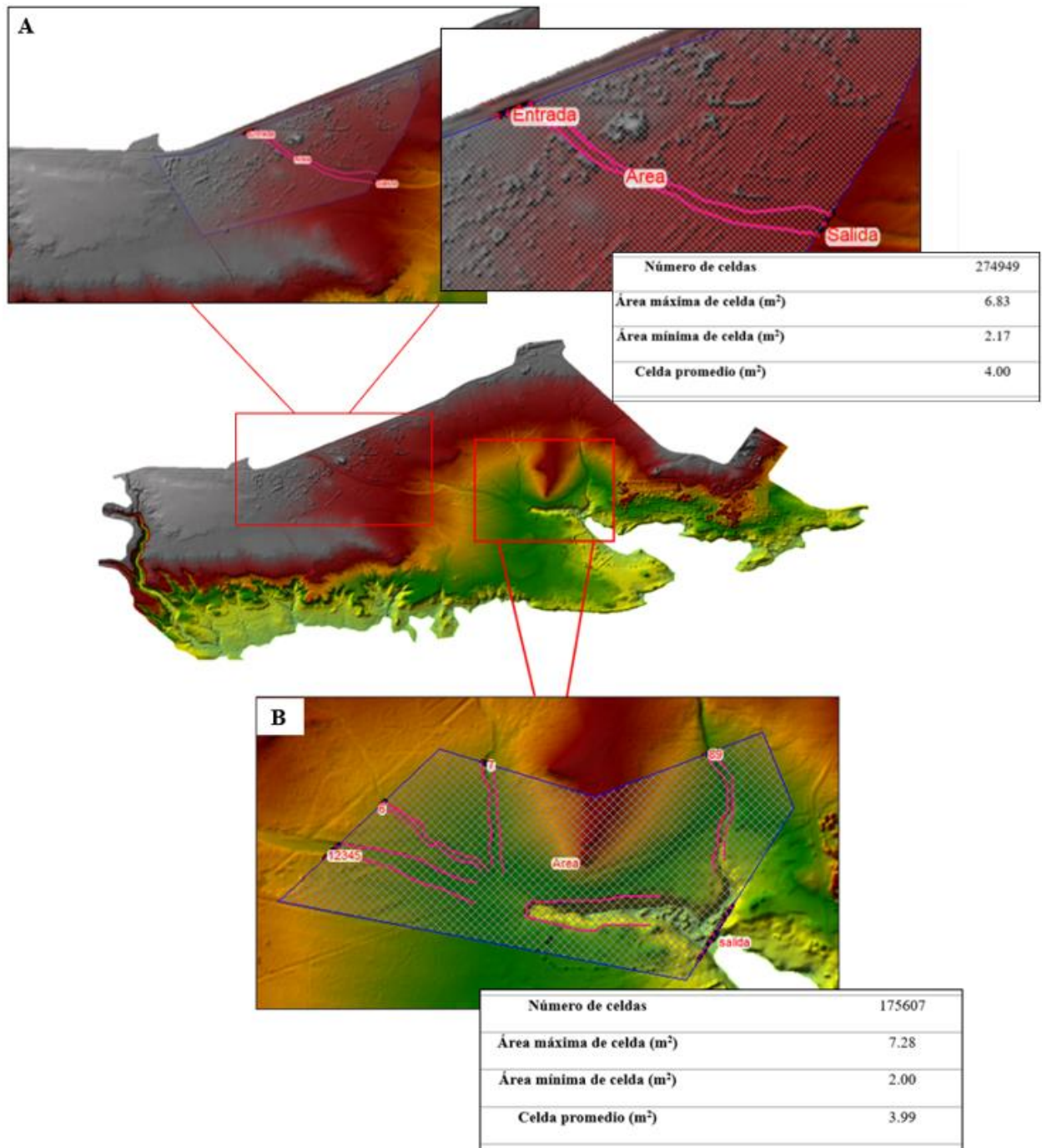


Figura 52: Geometría de los mallados generados a partir del modelo digital del terreno para modelo I (A) y modelo II (B).

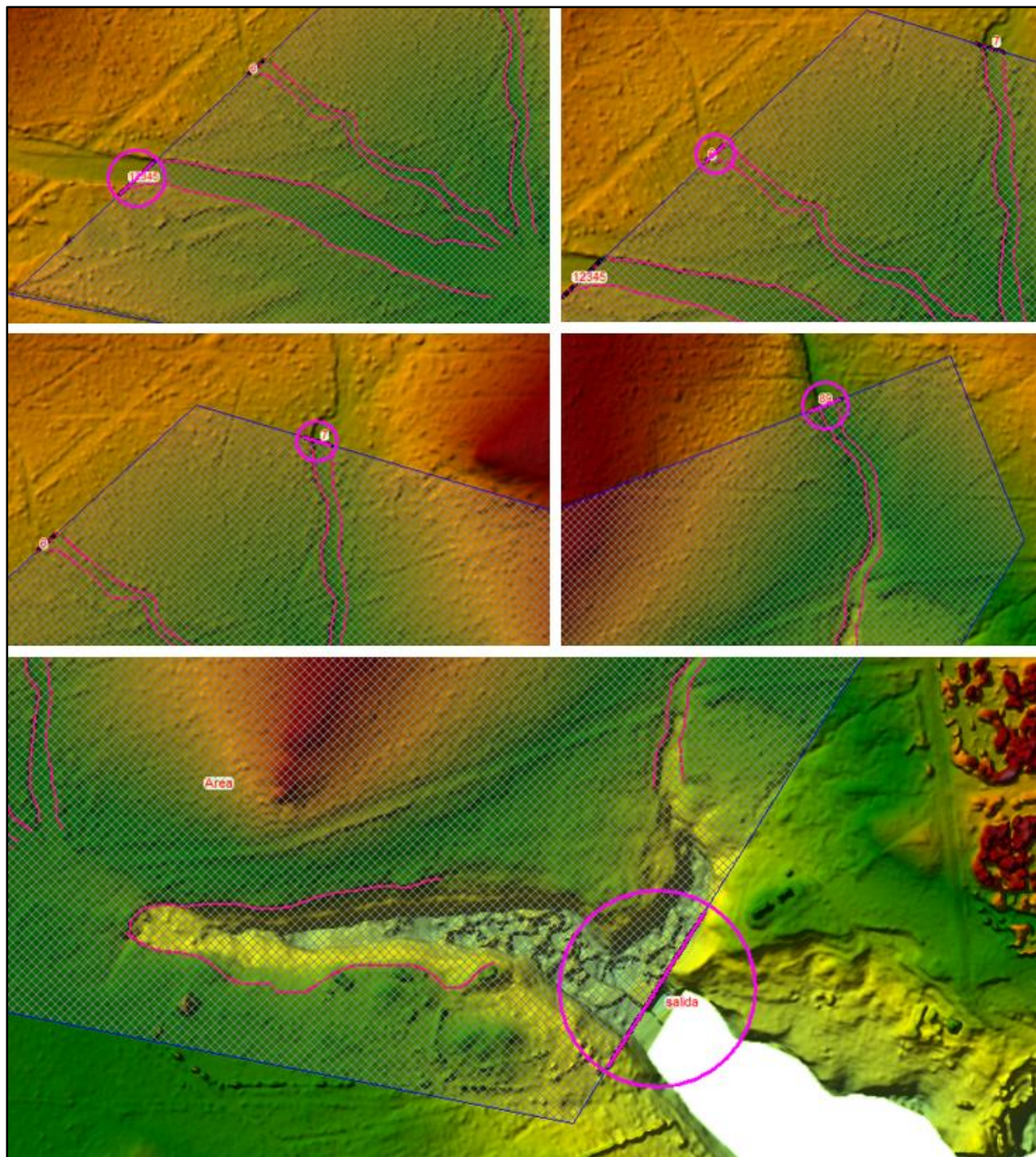
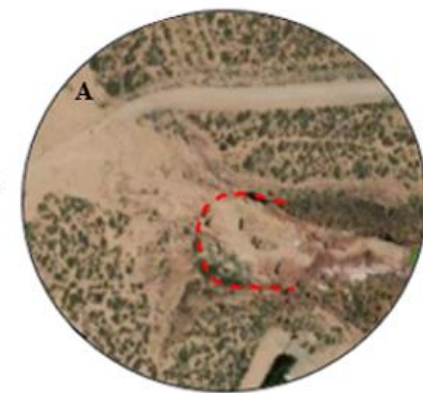
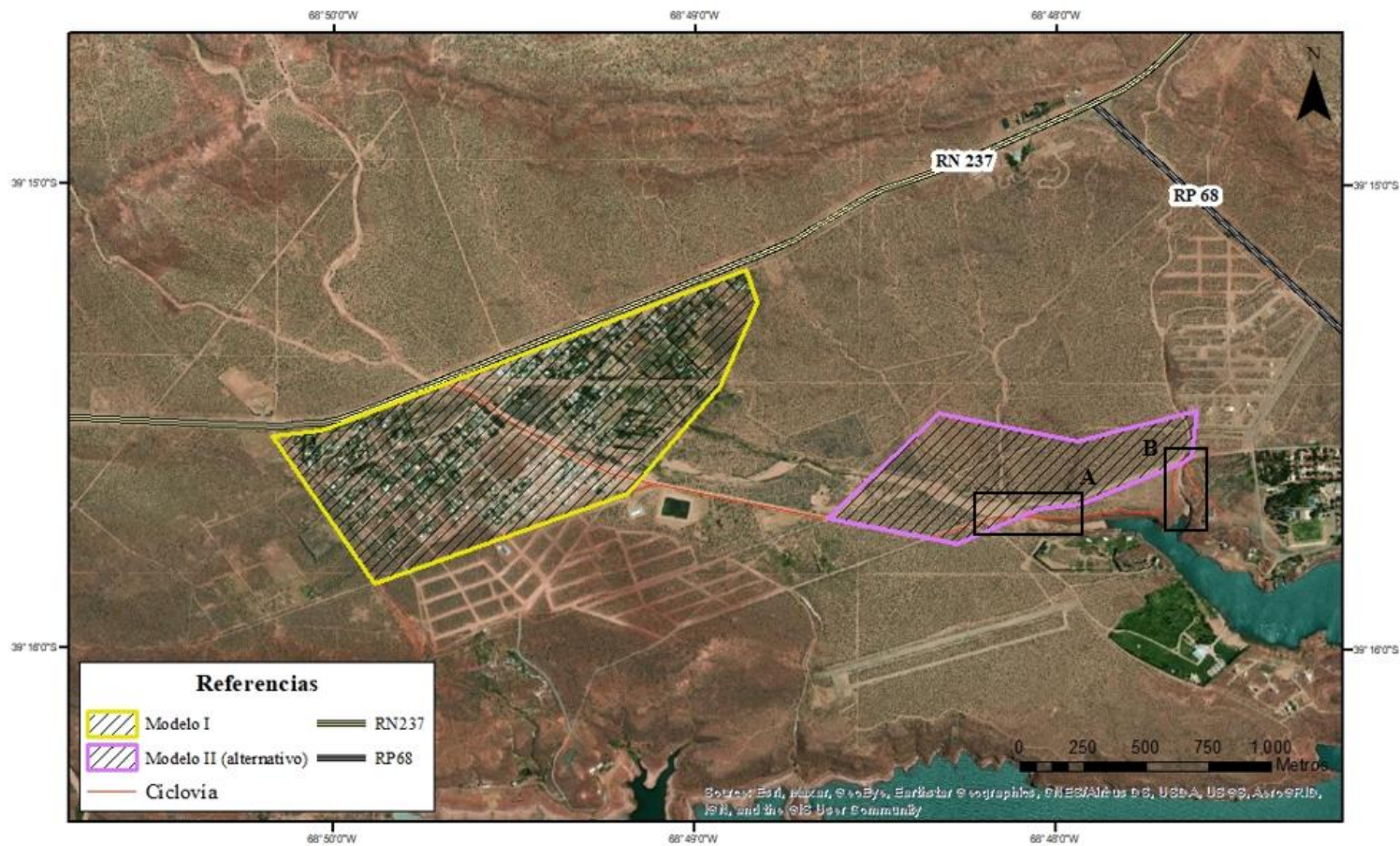


Figura 53: Vista de las condiciones de contorno y las breaklines para el mallado del modelo II. La numeración de los distintos braklines corresponde a los hidrogramas de las subcuencas.





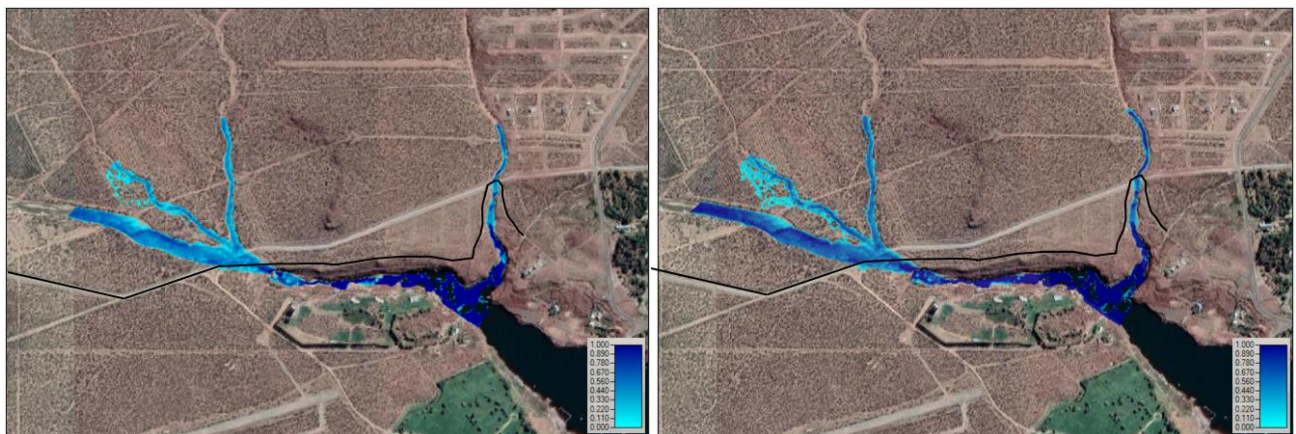
|   |                           |                            |
|---|---------------------------|----------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE  |                           |                            |
|   |                           |                            |
| <b>Licenciatura en Ciencias Geológicas</b>  |                           |                            |
| Facultad de Ingeniería  |                           |                            |
| Provincia: Neuquén  | Departamento: Confluencia | Localidad: Villa el Chocón |
| Autor: Acuña, Ezequiel Rodolfo  | Datum: D POSGAR 1994      | Escala: 1:50000            |
| <b>MODELOS HIDRÁULICOS (PROPUESTA ALTERNATIVA)</b>  |                           |                            |

Figura 54: Modelo hidráulico alternativo. Se muestran secciones aumentadas de las zonas influenciadas por posibles saltos hidráulicos.

Mediante la generación del modelo hidráulico llevada a cabo mediante HEC-RAS, se pudo obtener una estimación del manto de escorrentía generado para los tiempos de recurrencia propuestos. Además, se obtuvieron variables hidráulicas de importancia como la altura de la lámina de escorrentía (m) y la velocidad (m/s) que son necesarios para el cálculo de la tasa de disipación de energía del agua (P). Las **Figs. 55-56**, muestran el manto de escorrentía generado por el comportamiento de las subcuencas propuestas. Se pudo observar que, en cada modelo, los caudales se encuentran contenidos por los cauces. En el modelo I, el Barrio Llequén no se vio afectado por posibles desbordes del cauce y la traza de ciclovía no se vio afectada por la mancha de escorrentía generada por las tormentas propuestas. En el modelo II, se observó que la traza de ciclovía se vio afectada en dos tramos por la mancha de inundación estimada.



*Figura 55: Altura de la escorrentía (en metros) generada en el modelo I para 25TR (izq.) y 100TR (der.). En ambos casos el Barrio Llequén no es afectado por posibles desbordes del cauce.*



*Figura 56: Altura de la escorrentía (en metros) generada en el modelo II para 25TR (izq.) y 100TR (der.). En ambos casos la ciclovía es interceptada por el caudal de escorrentía estimado.*

#### 6.4.1 Variables hidráulicas de interés: altura de lámina de escorrentía y velocidad

Una vez generada la modelación hidráulica por medio de HEC-RAS y habiendo estimado el manto de escorrentía, para ambos modelos se propusieron perfiles transversales para un mejor análisis de la sección de los cauces y de las variables estimadas de altura de lámina de escorrentía y velocidad. Para el modelo I, se dispusieron tres líneas perfiles: a la entrada y salida del Barrio Llequén y en un punto intermedio (**Fig. 57**). Mientras que para el modelo II, se propusieron dos perfiles coincidentes con los puntos en donde el manto de escorrentía estimado intercepta la traza de la ciclovía propuesta por la Municipalidad de Villa El Chocón (**Fig. 58**).



Figura 57: Perfiles A, B y C propuestos para el análisis de altura de lámina de escorrentía y velocidad para el modelo I.

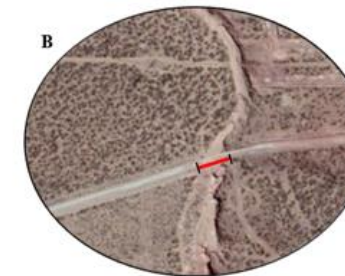


Figura 58: Perfiles A y B propuestos para el análisis de altura de lámina de escorrentía y velocidad para el modelo II.

Para el modelo I, según las estimaciones realizadas, no se observaron posibles desbordes que afecten la integridad del Barrio Llequén o la ciclovía. Se trazaron tres perfiles transversales al cauce que divide el Barrio Llequén, manteniéndose con una sección casi uniforme, con un ancho variable de 40 a 60 m y una profundidad máxima de 1 a 1,2 m. (**Fig. 59**).

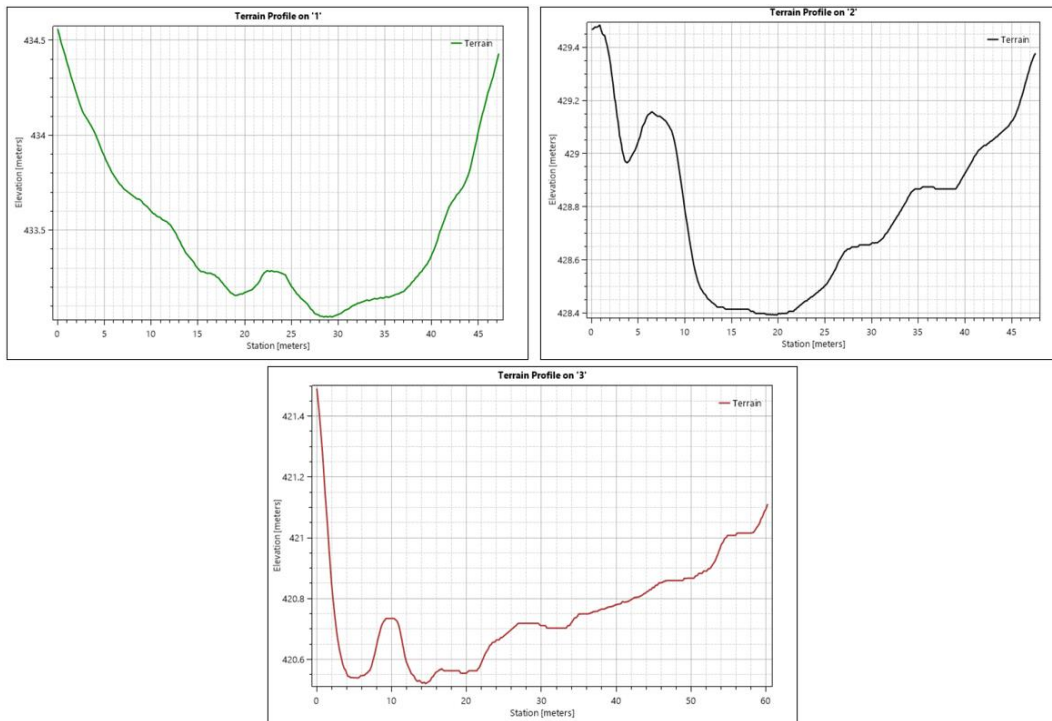


Figura 59: Perfiles A (arriba izq.), B (arriba der.) y C (abajo) que describen la sección del cauce del modelo I.

Para el modelo II, el perfil transversal A corresponde al mayor y más importante de los cauces estudiados con una sección de aproximadamente 100 m de ancho y una profundidad máxima de 2 m con un predominio de lentes de suelo residual y afloramientos de roca. Más hacia el este, se propuso el perfil B, transversal al cauce con una sección de 25 m de ancho y una profundidad máxima de 1 m (**Fig. 60**).

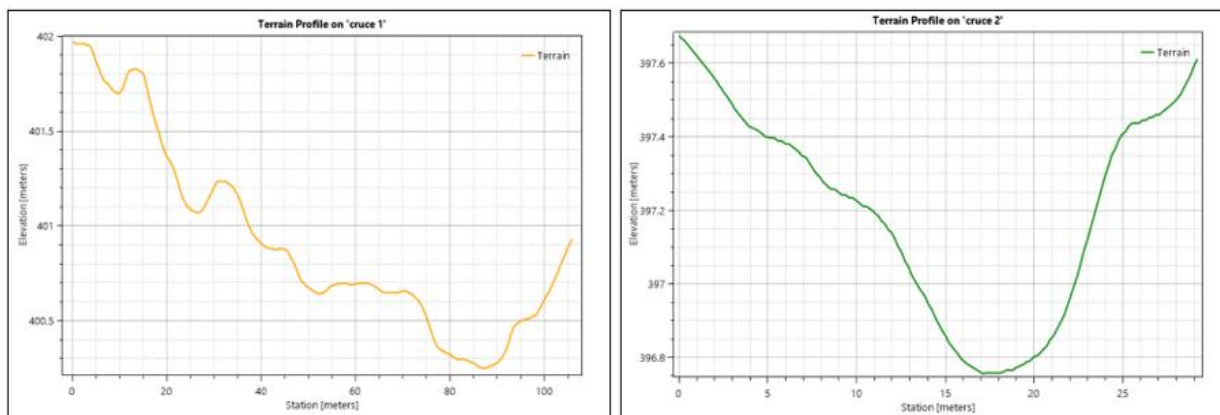


Figura 60: Perfiles A (izq.) y B (der.) que describen la sección de los cauces del modelo II.

De esta manera, mediante los perfiles propuestos se pudieron extraer los valores de altura de lámina de escorrentía y velocidad, parámetros necesarios para la determinación del caudal por unidad de ancho ( $q$ ) (**Tabla 23**).

| Modelo Hidráulico       | Tiempo de recurrencia | Perfil | Velocidad (m/s) | Lámina de escorrentía (m) |
|-------------------------|-----------------------|--------|-----------------|---------------------------|
| <b>I</b>                | 100 años              | A      | 3,32            | 1,39                      |
|                         |                       | B      | 4,18            | 1,15                      |
|                         |                       | C      | 3,38            | 1,02                      |
|                         | 25 años               | A      | 3,00            | 1,15                      |
|                         |                       | B      | 3,37            | 0,86                      |
|                         |                       | C      | 2,59            | 1,01                      |
| <b>II</b>               | 100 años              | A      | 3,19            | 0,85                      |
|                         |                       | B      | 4,49            | 0,82                      |
|                         | 25 años               | A      | 2,67            | 0,59                      |
|                         |                       | B      | 3,62            | 0,63                      |
| <b>II (ALTERNATIVO)</b> | 100 años              | A      | 3,40            | 0,83                      |
|                         |                       | B      | 4,90            | 0,82                      |
|                         | 25 años               | A      | 2,60            | 0,64                      |
|                         |                       | B      | 4,40            | 0,60                      |

Tabla 23: Valores de variables hidráulicas de velocidad y altura de lámina de escorrentía para modelos I, II y modelo II alternativo.

## 6.5 Método del Índice de Erodabilidad de Annandale

### 6.5.1 Tasa de disipación de Energía (P)

En la *tabla 24*, se especifican los valores de  $q$ ,  $\Delta E$  y  $P$  para cada escenario de análisis.

| Modelo Hidráulico       | Tiempo de recurrencia | Perfil | P.E del agua (kN/m <sup>3</sup> ) | q (VelxAlt.lámina) (m <sup>3</sup> /s) | $\Delta E$ (m/m) | P (kW/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------|-----------------------|--------|-----------------------------------|--|------------------|------------------------|
| <b>I</b>                | 100 años              | A      | 9,82                              | 4,62                                   | 0,02             | 0,91                   |
|                         |                       | B      | 9,82                              | 4,82                                   | 0,02             | 0,95                   |
|                         |                       | C      | 9,82                              | 3,46                                   | 0,02             | 0,68                   |
|                         | 25 años               | A      | 9,82                              | 3,45                                   | 0,02             | 0,68                   |
|                         |                       | B      | 9,82                              | 2,91                                   | 0,02             | 0,57                   |
|                         |                       | C      | 9,82                              | 2,62                                   | 0,02             | 0,52                   |
| <b>II</b>               | 100 años              | A      | 9,82                              | 2,71                                   | 0,042            | 1,12                   |
|                         |                       | B      | 9,82                              | 3,66                                   | 0,042            | 1,51                   |
|                         | 25 años               | A      | 9,82                              | 1,58                                   | 0,042            | 0,65                   |
|                         |                       | B      | 9,82                              | 2,28                                   | 0,042            | 0,94                   |
| <b>II (ALTERNATIVO)</b> | 100 años              | A      | 9,82                              | 2,82                                   | 0,042            | 1,16                   |
|                         |                       | B      | 9,82                              | 4,02                                   | 0,042            | 1,66                   |
|                         | 25 años               | A      | 9,82                              | 1,65                                   | 0,042            | 0,68                   |
|                         |                       | B      | 9,82                              | 2,64                                   | 0,042            | 1,09                   |



Tabla 24: Valores de  $q$ ,  $\Delta E$  y  $P$  para los modelos I, II y modelo II alternativo.

### 6.5.2 Índice de Erodabilidad de Annandale (K)

La **tabla 25** muestra los valores empleados para el cálculo del Índice de Erodabilidad de Annandale (K).

| Variable                         | K mínimo     | K intermedio  | K máximo      |
|----------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| $M_s$                            | 10,78        | 10,78         | 10,78         |
| $K_b$                            | 20,00        | 38,25         | 38,25         |
| $K_d$                            | 0,375        | 0,375         | 1,50          |
| $J_s$                            | 1,00         | 1,33          | 1,33          |
| <b>Índice de Erodabilidad Kh</b> | <b>80,85</b> | <b>205,65</b> | <b>822,60</b> |

Tabla 25: Tabla que resume los valores adoptados para calcular el Índice de Erodabilidad de Annandale (K) junto con los posibles valores de K.

## 7 DISCUSIÓN

### 7.1 Relevamiento de campo

Se relevaron un total de catorce cauces, de los cuales los más relevantes para este estudio fueron los puntos 11 al 14 (*en Fig. 29*), ya que son los que podrían afectar la integridad del Barrio Llequén y la futura traza de la obra propuesta por la Municipalidad de Villa El Chocón. En estos cauces, que han mantenido una sección uniforme los últimos 15 años, se observaron tanto afloramientos rocosos como cubierta de suelo. Los primeros corresponden a una intercalación de bancos peléticos con un predominio de bancos tabulares de areniscas con cemento carbonático. Los mismos presentaron diferente competencia debido a la resistencia a la compresión simple propia de cada litología. Se observó una presencia escasa de discontinuidades y un predominio de contactos horizontales a subhorizontales entre distintas litologías, aunque también se observó, en menor proporción, la presencia de diaclasas en las superficies de areniscas expuestas en los cauces. Estas fracturas se presentaron con rumbos predominantemente SW-NE, NW-SE y E-O siendo verticales o subverticales en su mayoría. Se las observaron espaciadas cada 80 a 200 centímetros aproximadamente y su continuidad superó los 10 metros de longitud antes de quedar cubiertos por cobertura cuaternaria. Sus superficies lisas no presentaron relleno. Además, se realizaron ensayos de infiltración de doble anillo para obtener la tasa de infiltración del suelo.

### 7.2 Delimitación y caracterización de cuencas

Por medio de las herramientas provistas por el software de información geográfica ArcGis ArcMap 10.5 se delimitaron cuatro cuencas en un área de 25km<sup>2</sup> (2.500 ha). Dos de esas cuatro cuencas, exhibieron un comportamiento hidrológico muy diferente hacia su cabecera, sector medio y bajo, lo cual se hizo visible al analizar los elementos geomorfológicos y los parámetros de relieve del área de estudio: los sectores superiores, de alturas topográficas mayores, presentaron un predominio de relieve en asomo rocoso con pendientes normales a subnormales (0-8%); el sector medio del área, también se caracterizó por presentar un predominio de manto de roca, aunque al tratarse de zonas de escarpa y talud, las pendientes se volvieron muy pronunciadas (>15%); conforme disminuye la altura topográfica hacia el sector más bajo, también denominado pedimento, el modelado del relieve disminuyó progresivamente, al igual que las pendientes y comenzó a predominar suelo franco-arenoso alternándose con asomos de roca. Esta gran variabilidad de elementos geomorfológicos y del relieve favorecieron un comportamiento hidrológico disfuncional de las cuencas, por lo que se realizó una subdivisión obteniendo un total de nueve subcuencas de formas variables, de ovaladas a alargadas según índices de Gravelius, con áreas de entre 1km<sup>2</sup> (100 ha) y 4,11 km<sup>2</sup> (411,03 ha); pendientes mínimas de 3,27%, pendientes máximas de 6,57% y una pendiente media de 5,55%.

Desde el punto de vista hidrológico, las pendientes de los cauces principales se mantuvieron entre los 0,02 m/m y 0,064 m/m, y los tiempos de concentración entre 0,62 y 1,79 horas. Se pudo establecer una relación entre los tiempos de concentración obtenidos y los parámetros de área, pendiente, y longitud del cauce principal para cada subcuenca: los menores tiempos de concentración se correspondieron con subcuencas de menor área, menor longitud de cauce principal, y mayor pendiente de cuenca; mientras que las subcuencas que mostraron los mayores tiempos de concentración exhibieron mayor área, mayor longitud de cauce principal y menor pendiente.

En cuanto al índice de Curva Número (CN) y bajo condiciones antecedentes normales de humedad (AMC II), fueron adoptados valores entre 82 y 84, en función de: suelo poco desarrollado, tipo de suelo y cobertura vegetal. Para los sitios de ensayo de infiltración, se determinó mediante la ecuación de Horton la capacidad de infiltración básica, obteniéndose valores que corresponderían a Grupo Hidrológico de Suelo tipo A, según la clasificación de Martínez Azagra (2003). En función de los datos de campo, pendiente >3% y suelo

limitado por un asomo roco a 60 cm, como criterio conservador se adoptaron Curva Numero de 81 para estas zonas.

### 7.3 Modelación Hidrológica

Los resultados obtenidos para períodos de retorno de 25 años arrojaron caudales de diseño de 43,6 m<sup>3</sup>/s, 9,8 m<sup>3</sup>/s, 11,4 m<sup>3</sup>/s y 19 m<sup>3</sup>/s; mientras que para períodos de retorno de 100 años los caudales pico obtenidos fueron de 83,1 m<sup>3</sup>/s, 19,3 m<sup>3</sup>/s, 21,6 m<sup>3</sup>/s y 36 m<sup>3</sup>/s, dejando en evidencia un incremento porcentual medio de aproximadamente 90% en los caudales de diseño para períodos de recurrencia de 100 años (**Fig. 61**).

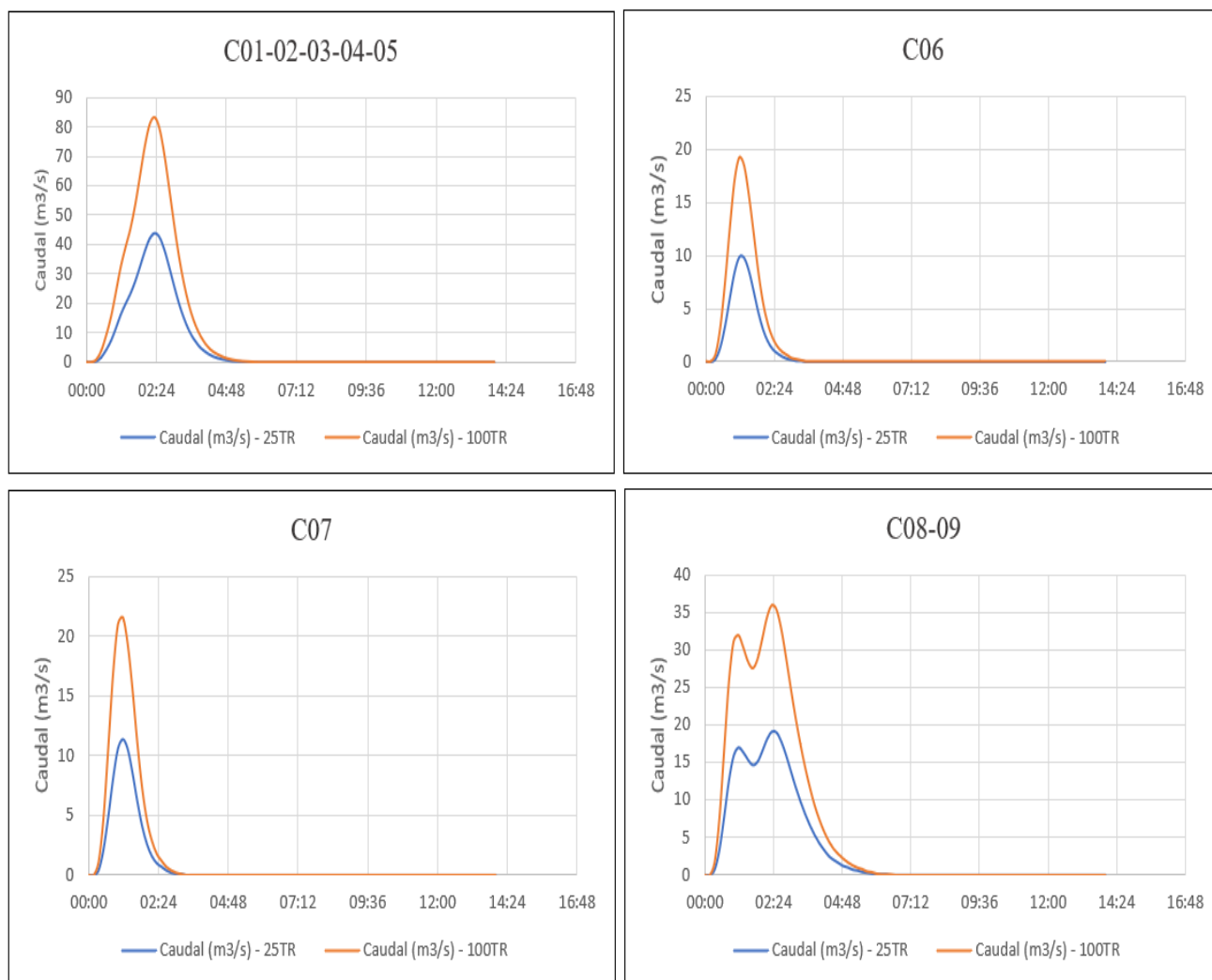


Figura 61: Hidrogramas de diseño de las subcuencas, obtenidos para tiempos de recurrencia de 25 y 100 años.

Si bien los datos de caudales a la salida de cada cuenca fueron importantes, se hizo necesario obtener información adicional para conocer con más precisión el comportamiento de las cuencas. Para esto, el software HEC-HMS brinda información de relevancia con respecto a las uniones propuestas (U1, U2, U3, U4) que representa el efecto de tránsito de los hidrogramas (ruteo según el método de Muskingum) (**Fig. 62**).

- Si se analiza el gráfico de la primera unión (U1) que es abastecida por el caudal generado por las subcuencas C02 (17,10 m<sup>3</sup>/s) y C03 (19 m<sup>3</sup>/s), se observa que el caudal de la subcuenca C03 es la que primero alcanza el punto de salida, seguido del caudal generado por la subcuenca C02.
- De la misma manera, si se analiza el gráfico de la segunda unión (U2), abastecida por las subcuencas C04 (7,60 m<sup>3</sup>/s), C01 (10,20 m<sup>3</sup>/s) y, además por el caudal transmitido de la U1 (R 2-3) (33,90 m<sup>3</sup>/s), se observa que el caudal de la subcuenca C04 es el que primero llega al punto de salida, seguido del caudal de la subcuenca C01 y, por último, el caudal transmitido de la U1 (R 2-3) que proviene de zonas topográficamente más altas.
- En cuanto al gráfico de la tercera unión (U3), abastecida por las subcuencas C05 (11,90 m<sup>3</sup>/s) y por el caudal transmitido de la U2 (R 1-2-3-4) (42 m<sup>3</sup>/s), se observa que el caudal generado por la subcuenca C05 es el que primero alcanza el punto de salida, seguido del caudal transmitido de la U2 (R 1-2-3-4) que, nuevamente, proviene de zonas topográficas más altas.
- Por último, analizando el gráfico de la cuarta unión (U4) que es abastecida por la subcuenca C08 (16,50 m<sup>3</sup>/s) y el caudal transmitido de la subcuenca C09 (18,90 m<sup>3</sup>/s), se observa un primer pico representado por el caudal generado por la subcuenca C08; mientras que el segundo pico representa el caudal transmitido de la subcuenca C09, proveniente de zonas topográficas más altas.

Mediante el análisis de los gráficos de las cuatro uniones propuestas, pudo establecerse que el comportamiento hidrológico de las subcuencas (tiempo y magnitud de avenida) está ligado a parámetros como la pendiente de los cauces, forma y pendiente de las subcuencas y, sobre todo, al CN. En el caso del hidrograma de salida C08-09, se observaron dos picos, lo cual refleja un comportamiento dispar, dejando en evidencia que las subcuencas provenientes de zonas topográficas de mayor altura tienen una respuesta hidrológica muy diferente a las subcuencas provenientes de sectores topográficos medios a bajos.

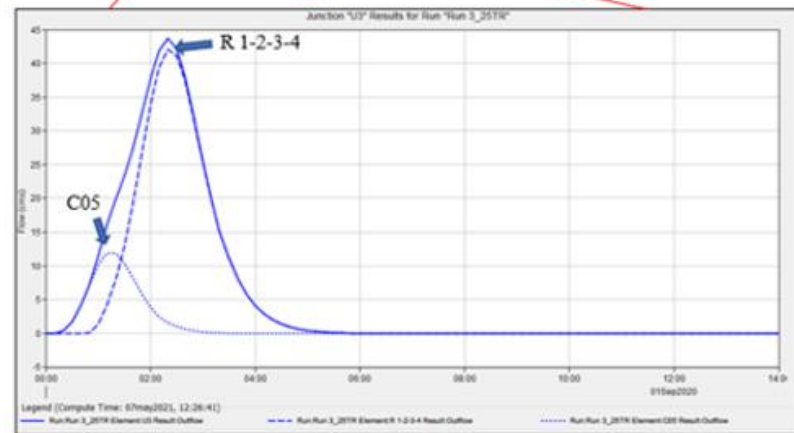
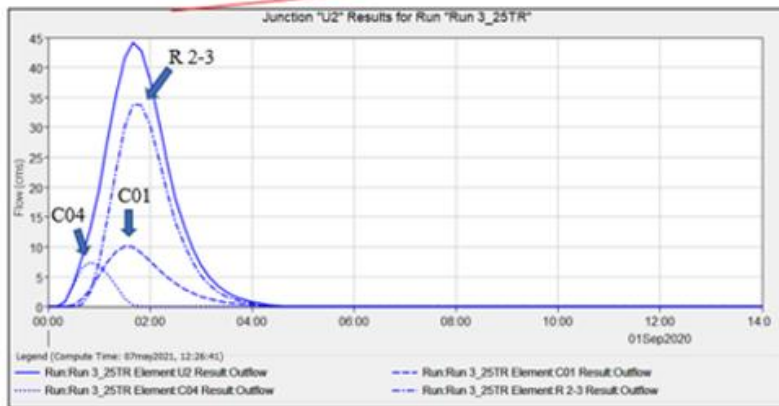
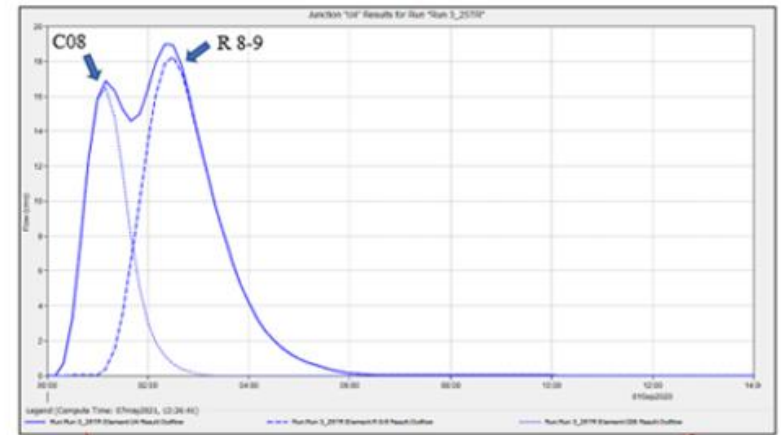
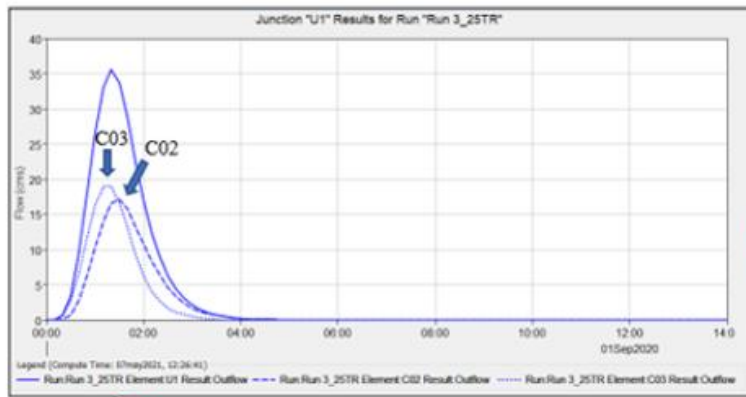


Figura 62: Representación gráfica de las cuatro uniones propuestas. Se observa cómo la altura topográfica de las subcuencas influye en la respuesta hidrológica de cada una.

## 7.4 Modelación Hidráulica

En cuanto a la modelación hidráulica bidimensional se pudo establecer que, en los perfiles transversales propuestos, las láminas de agua son contenidas por los cauces. Además, fue posible hacer un análisis basado en las variables estimadas de altura de lámina de escorrentía (m) y velocidad (m/s) considerando que para el modelo I se propusieron tres perfiles transversales al cauce (perfil A, B y C) y para el modelo II se propusieron dos perfiles de análisis (perfil A y B).

Para el modelo I (Figs. 63-64):

- Perfil A: Para tiempos de recurrencia de 25 años, los valores máximos de velocidad fueron de 3 m/s y los valores de altura de lámina de escorrentía de 1,15 m. Para tiempos de recurrencia de 100 años, se observó un incremento de velocidad del 15%, con valores de 3,5 m/s, e incrementos de la altura de lámina de escorrentía del 40%, con valores máximos de 1,6 m.
- Perfil B: Se obtuvieron valores máximos de velocidad de 3,3 m/s y 0,86 m de altura de lámina de escorrentía para 25 años de período de recurrencia; mientras que, para períodos de recurrencia de 100 años, se observó un incremento en la velocidad del 25%, con valores máximos de 4,1 m/s; y un incremento de la altura de lámina de escorrentía del 33%, con valores de 1,15 m.
- Perfil C: Para períodos de recurrencia de 25 años se observaron valores máximos de 2,6 m/s y valores máximos de la altura de lámina de escorrentía de 1 m, mostrando para tiempos de recurrencia de 100 años incrementos de velocidad del 45%, con valores de 3,8 m/s e incrementos de la altura de lámina de escorrentía del 10%, con valores de 1,1 m.

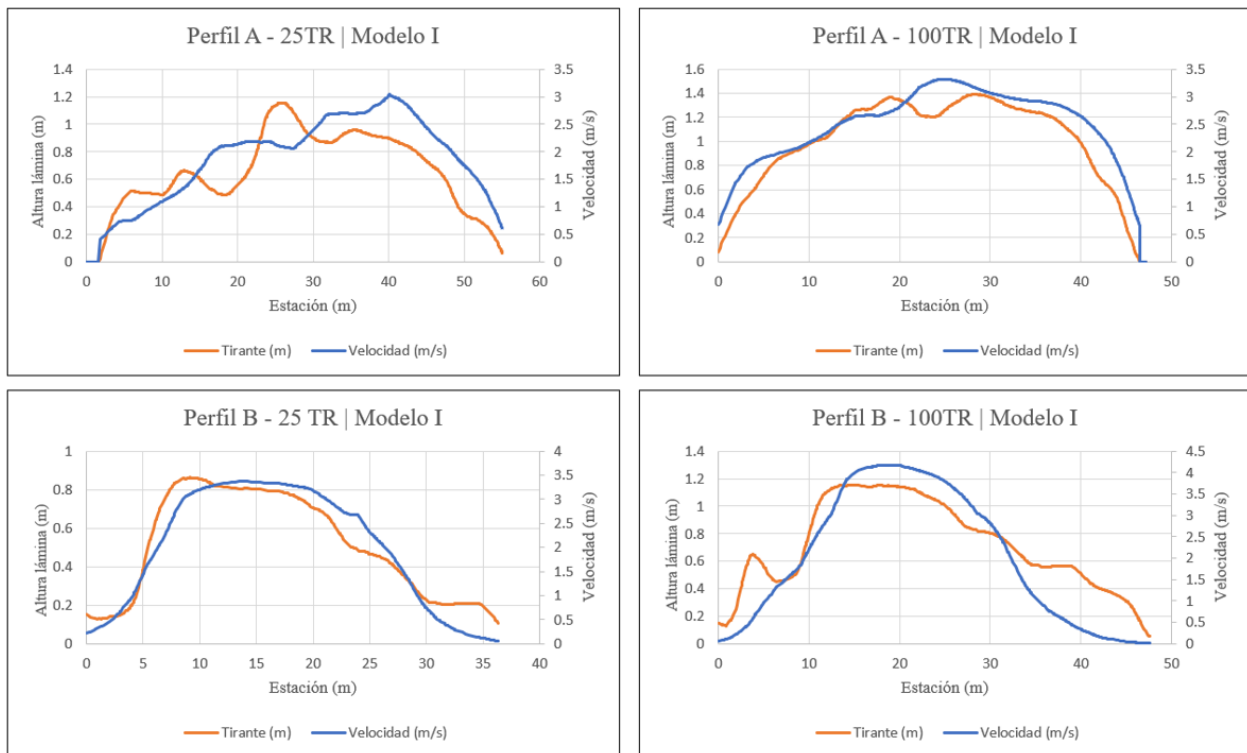


Figura 63: Representación de las variables estimadas de velocidad (m/s) y altura de lámina de escorrentía (m) para los perfiles A y B, modelo I.

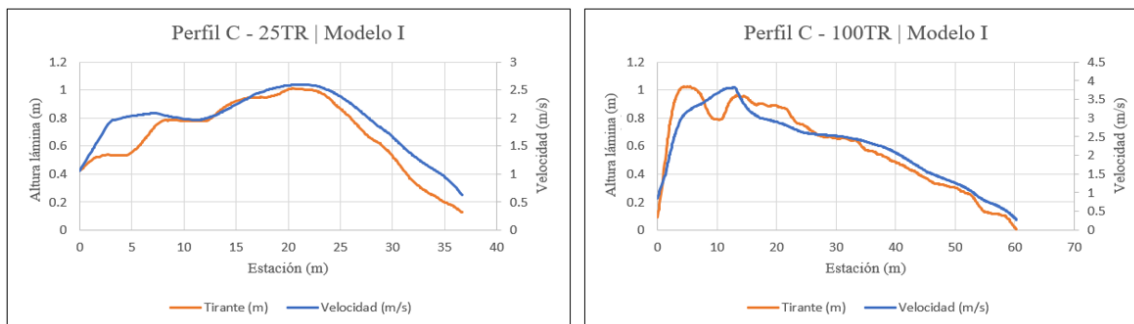


Figura 64: Representación de las variables estimadas de velocidad (m/s) y altura de lámina de escorrentía (m) para el perfil C, modelo I.

Para el modelo II (Fig. 65):

- Perfil A: Se obtuvieron valores máximos de velocidad de 2.6 m/s y valores máximos de altura de lámina de escorrentía de 0,6 m para tiempos de recurrencia de 25 años. Mientras que, para tiempos de recurrencia de 100 años, se obtuvieron valores máximos de velocidad de 3,4 m/s y valores máximos de altura de lámina de escorrentía de 0,85 m, lo cual significa un aumento de la velocidad en un 30% y un incremento de la altura de lámina de escorrentía en un 40%. En el modelo hidráulico alternativo propuesto, los valores de velocidad y altura de lámina de escorrentía no sufrieron variaciones
- Perfil B: Los valores máximos de velocidad para tiempos de recurrencia de 25 años fueron de 3,4 m/s y los valores de altura de lámina de escorrentía máximo de 0,6 m; mientras que para tiempos de recurrencia de 100 años las velocidades máximas fueron de 4,2 m/s y los valores máximos de altura de lámina de escorrentía de 0,8 m, reflejando un incremento de velocidades de un 25% y un incremento de la altura de lámina de escorrentía del 30%. En este caso, en el modelo hidráulico alternativo propuesto (Fig. 66), los valores de velocidad máxima fueron de 4,4 m/s para tiempos de recurrencia de 25 años (20% de incremento); mientras que, para tiempos de recurrencia de 100 años, los valores de velocidad máxima fueron de 4,9 m/s (15% de incremento).

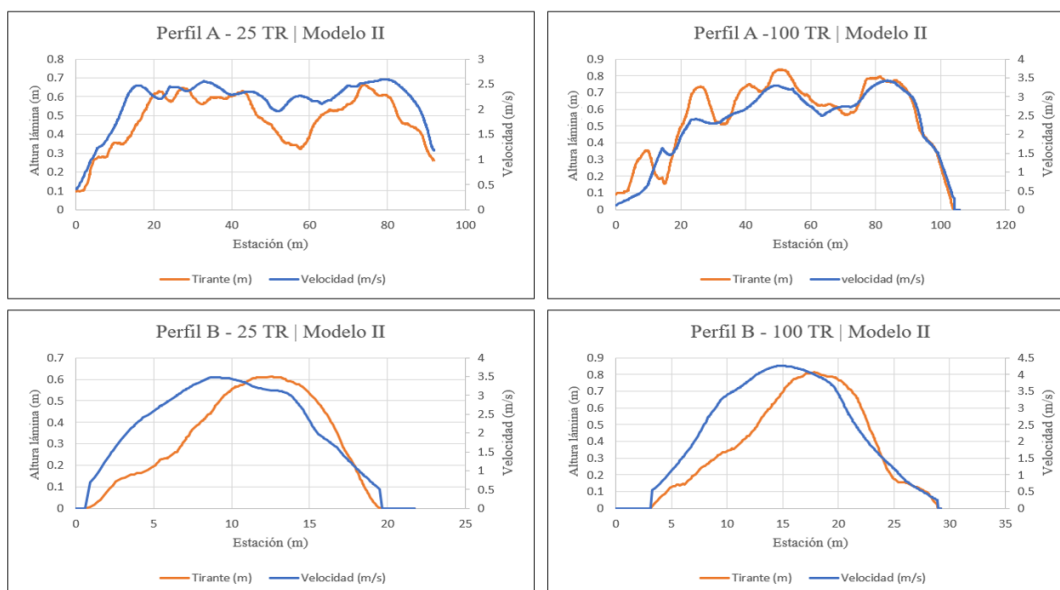


Figura 65: Representación de las variables estimadas de velocidad (m/s) y altura de lámina de escorrentía (m) para los perfiles A y B, el modelo II.

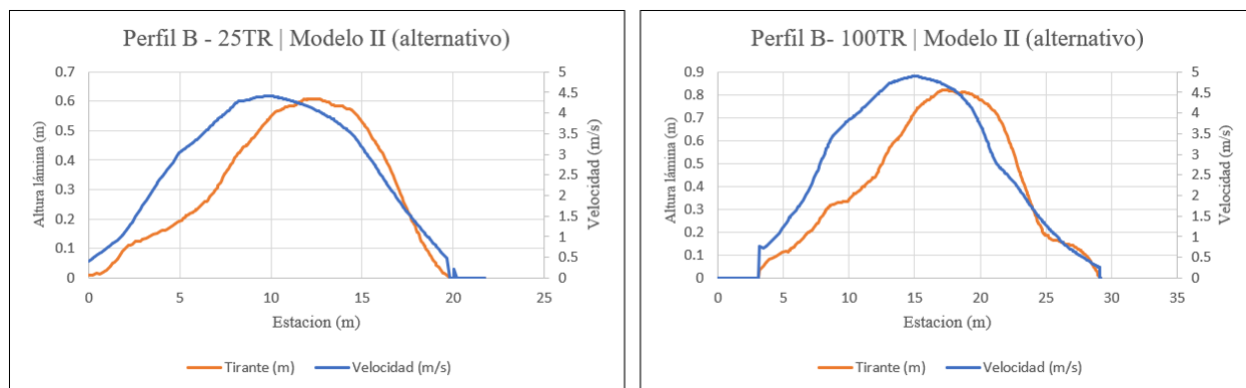


Figura 66: Representación del parámetro hidráulico de velocidad (m/s) para el perfil B, modelo II alternativo.

Las **tablas 26-28** presentan de forma resumida los valores obtenidos de las variables hidráulicas estimadas según modelo y período de recurrencia. Además, se indica el incremento porcentual de cada parámetro para tiempos de recurrencia de 100 años, con respecto a los obtenidos para 25 años de recurrencia. La **tabla 29** muestra información asociada al ancho de escurrimiento obtenido en los perfiles propuestos.

| <b>Modelo I</b> |                 |                           |                 |                           |                       |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Perfil          | 25 TR           |                           | 100 TR          |                           | Incremento Porcentual |                           |
|                 | Velocidad (m/s) | Lámina de escorrentía (m) | Velocidad (m/s) | Lámina de escorrentía (m) | Velocidad (m/s)       | Lámina de escorrentía (m) |
| <b>A</b>        | 3,00            | 1,15                      | 3,50            | 1,60                      | 15%                   | 40%                       |
| <b>B</b>        | 3,30            | 0,86                      | 4,10            | 1,15                      | 25%                   | 33%                       |
| <b>C</b>        | 2,60            | 1,00                      | 3,80            | 1,10                      | 45%                   | 10%                       |

Tabla 26: Valor de las variables hidráulicas estimadas para el modelo I, junto con el porcentaje de incremento de cada parámetro para períodos de recurrencia de 100 años.

| <b>Modelo II</b> |                 |                           |                 |                           |                       |                           |
|------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Perfil           | 25 TR           |                           | 100 TR          |                           | Incremento Porcentual |                           |
|                  | Velocidad (m/s) | Lámina de escorrentía (m) | Velocidad (m/s) | Lámina de escorrentía (m) | Velocidad (m/s)       | Lámina de escorrentía (m) |
| <b>A</b>         | 2,60            | 0,60                      | 3,40            | 0,85                      | 30%                   | 40%                       |
| <b>B</b>         | 3,40            | 0,60                      | 4,20            | 0,80                      | 25%                   | 30%                       |

Tabla 27: Valor de las variables hidráulicas estimadas para el modelo II, junto con el porcentaje de incremento de cada parámetro para períodos de recurrencia de 100 años.

| <b>Modelo II ALTERNATIVO</b> |                 |                           |                 |                           |                       |                           |
|------------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Perfil                       | 25 TR           |                           | 100 TR          |                           | Incremento Porcentual |                           |
|                              | Velocidad (m/s) | Lámina de escorrentía (m) | Velocidad (m/s) | Lámina de escorrentía (m) | Velocidad (m/s)       | Lámina de escorrentía (m) |
| <b>A</b>                     | 2,60            | 0,64                      | 3,40            | 0,83                      | 30%                   | 30%                       |
| <b>B</b>                     | 4,40            | 0,60                      | 4,90            | 0,82                      | 11%                   | 35%                       |

Tabla 28: Valor de las variables hidráulicas estimadas para el modelo II alternativo, junto con el porcentaje de incremento de cada parámetro para períodos de recurrencia de 100 años.



| Modelo Hidráulico | Tiempo de recurrencia | Perfil | Ancho de escurrimiento |
|-------------------|-----------------------|--------|------------------------|
| <b>I</b>          | 100 años              | A      | 49 m                   |
|                   |                       | B      | 43 m                   |
|                   |                       | C      | 66 m                   |
|                   | 25 años               | A      | 50 m                   |
|                   |                       | B      | 36 m                   |
|                   |                       | C      | 38 m                   |
| <b>II</b>         | 100 años              | A      | 93 m                   |
|                   |                       | B      | 26 m                   |
|                   | 25 años               | A      | 78 m                   |
|                   |                       | B      | 18 m                   |

Tabla 29: Ancho de escurrimiento para cada perfil propuesto según tiempos de recurrencia de 25 y 100 años. No se incluye el modelo II alternativo ya que se observaron anchos de escurrimiento muy similares al modelo II.

## 7.5 Método de Erodabilidad de Annandale

Como se mencionó anteriormente, para la evaluación de los procesos de erosión sobre el lecho rocoso, se propuso un intervalo de variación del índice de erodabilidad ( $K_h$ ) con un valor mínimo de 80,85, un valor máximo de 822,6 y un valor intermedio de 205,65. Este rango de valores de  $K_h$  permitió evaluar la resistencia a la erosión del material rocoso con cierto intervalo de confianza.

Los cálculos de la tasa de disipación de energía ( $P$ ) o potencia del flujo se realizaron teniendo en consideración valores de parámetros hidráulicos asociados a la altura de lámina de escorrentía y velocidad y, valores de rugosidad de Manning variables entre los 0,035 y 0,045. De esta manera, se obtuvieron valores de  $P$  variables de 0,5 a 1,66 kW/m<sup>2</sup>.

En la **Fig. 67** se ven representados los valores de  $K_h$  en un gráfico de erodabilidad crítica. Se exhiben los valores de  $K_h$  (mínimos, intermedios y máximos) contra los valores de la tasa de disipación de energía ( $P$ ), calculada con los parámetros de los modelos hidráulicos I, II y modelo I alternativo. Los valores ubicados por debajo de la línea de umbral de erosión no implicarían procesos erosivos de significancia en el lecho de roca. En base a este gráfico, se puede establecer que en ningún modelo estudiado ocurrirían procesos de erosión del lecho rocoso. Partiendo de esta premisa y según los valores obtenidos de  $P$  se observa que, si bien los puntos se superponen, los valores correspondientes al modelo II (cuadrados) son los que implicarían el menor riesgo a erosión; los correspondientes al modelo I (triángulos) implicarían un mayor riesgo de erosión; y los valores correspondientes a los índices de erodabilidad del modelo alternativo (círculos) son los que mayor riesgo a erosión implicarían.

Para que existan procesos de erosión sobre el lecho de roca, se barajaron dos hipótesis: la primera, considerando que las condiciones actuales de la roca estudiada se mantuvieran inalteradas, el estrangulamiento de los cauces alteraría los parámetros hidráulicos e incrementaría considerablemente la tasa de disipación de energía del flujo ( $P$ ), haciendo posible la erosión del lecho rocoso. En términos numéricos, teniendo un  $K_h$  de 80,85, la potencia de flujo ( $P$ ) debería ser de 27 kW/m<sup>2</sup> para que ocurran procesos erosivos; para un índice  $K$  de 205,65, la potencia necesaria sería de 54 kW/m<sup>2</sup>; mientras que, para un índice  $K$  de 822,60, la potencia de flujo necesaria para que ocurran procesos erosivos sería de 153 kW/m<sup>2</sup> (círculos rojos sobre la recta). La segunda hipótesis involucra la posibilidad de que la roca se vea alterada por el impacto de las actividades humanas, debilitándola y, haciendo que el valor de  $K$  disminuya considerablemente, requiriendo una potencia de flujo menor para que ocurran procesos erosivos en el lecho de roca.

## Método del Índice de Erodabilidad de Annandale

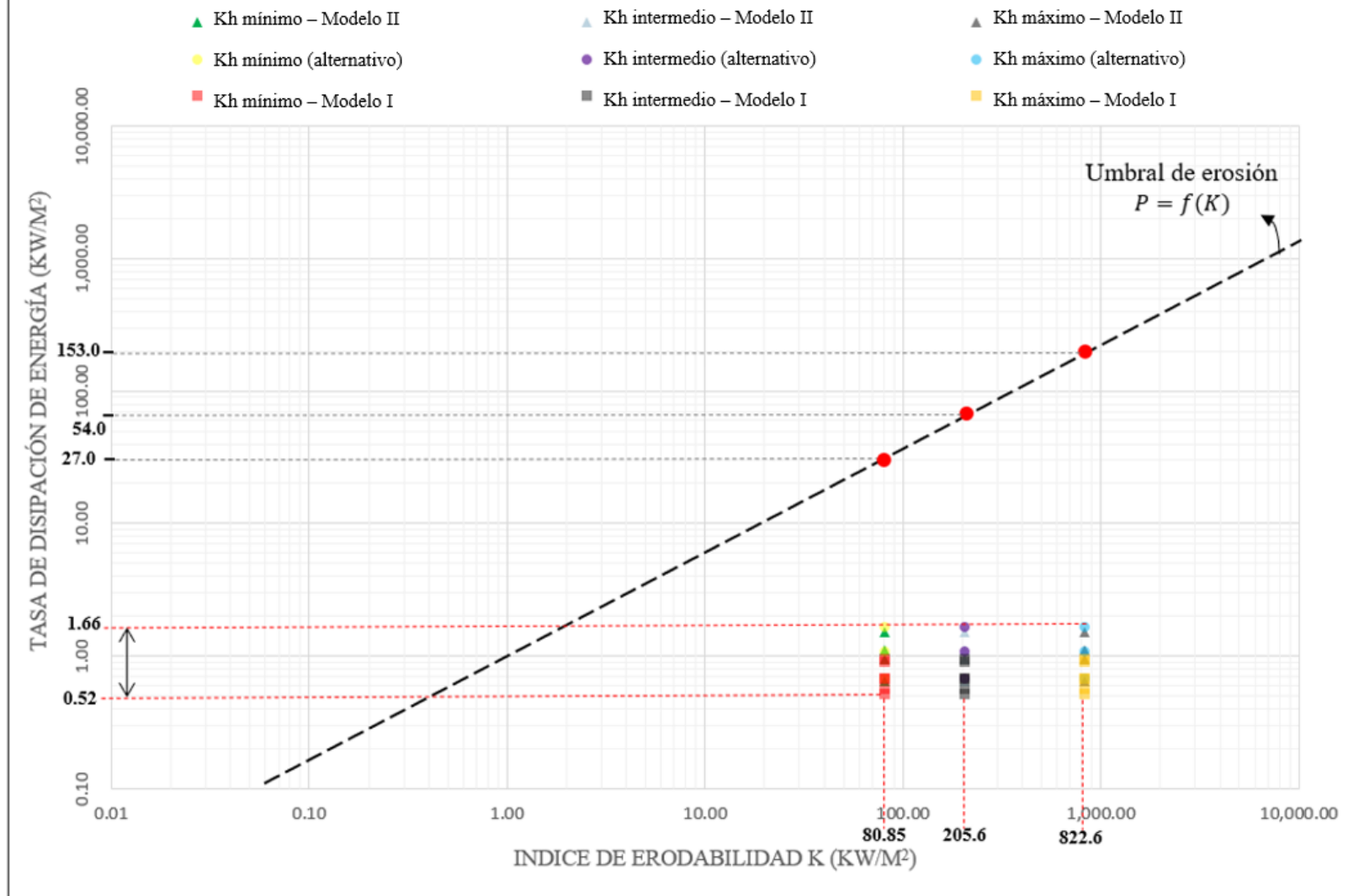


Figura 67: Representación gráfica de los índices de erodabilidad obtenidos según el Método de Annandale.

## 8 CONCLUSIONES

Los procesos erosivos, al resultar de la interacción entre el poder erosivo del agua y la resistencia ofrecida por las propiedades inherentes de un material determinado, requieren ser analizados bajo una visión integradora de conocimientos aplicados a la geología, geotecnia y suelos, hidráulica e hidrología. El análisis multidisciplinario resulta fundamental para el estudio de la erosión, ya sea en suelo o roca, en un área determinada. En este trabajo final de Licenciatura, se estudió el comportamiento hidrológico e hidráulico de un total de nueve subcuencas, promediando un área total cercana a los 25km<sup>2</sup> (2.500 ha) para brindar al municipio de Villa El Chocón información base de secciones de cruce para el futuro diseño y justificación de obras.

Para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo fueron necesarios estudios de campo y observaciones geológicas complementadas con ensayos de infiltración y estudios de suelo. Según parámetros relativos al suelo fue posible calibrar los índices de curva número, considerando que el área presenta pendientes mayores al 3% con dominio de asomos rocosos, se adoptaron CN de 80, los cuales evidencian suelos con bajo umbral de escorrentía, con valores próximos a los estimados por Fernández *et al.* (1980). Se construyeron los modelos hidrológicos mediante HEC-HMS contemplando los efectos de transmisión y atenuación de hidrogramas mediante parámetros de ruteo según Muskingum que permitieron obtener una visión más precisa sobre el tiempo y magnitud de avenidas de las subcuencas propuestas para el estudio. Por otro lado, mediante la generación de dos modelos hidráulicos propuestos, se pudieron estimar variables hidráulicas de relevancia como la velocidad (m/s) y la altura de lámina de escorrentía (m). Es importante mencionar que se propuso un modelo hidráulico alternativo con diferentes condiciones de salida, dada la incapacidad de resolución que exhibe la modelación hidráulica bidimensional ante posibles saltos hidráulicos en el área, generados por el cambio súbito de corrientes supercríticas a subcríticas.

Para la evaluación de la erosión en lecho rocoso se aplicó el método semiempírico del Índice de Erodabilidad de Annandale, el cual le da mayor relevancia a la propiedad de los materiales a resistir la erosión, cuantificado por una serie de índices geológicos y geomecánicos. Para la aplicación de este método, se propusieron tres escenarios diferentes para contrarrestar cierta incertidumbre del método.

Mediante relevamiento de campo se determinó que los principales cauces estudiados están dominados por afloramientos de roca acompañados de lentes de suelo residual propios de los procesos de transporte de los cauces. En las secciones de cauce estudiadas se pudo establecer que tormentas de 100 años de recurrencia generarían caudales un 90% mayores (19,30 m<sup>3</sup>/s a 83,10 m<sup>3</sup>/s) a los que generarían tormentas de 25 años de recurrencia (9,80 m<sup>3</sup>/s a 43,60 m<sup>3</sup>/s), con variables de velocidad y altura de lámina de escorrentía un 30-35% mayores. Los caudales estimados estarían contenidos por los cauces, por lo que no se vería afectada la integridad del Barrio Llequén y, en cuanto al estudio de posibles procesos erosivos, se pudo establecer que bajo las condiciones actuales, si bien existirían velocidades erosivas de suelo según Fischenich (2001) (ver apartado 5.6.5), no se observarían velocidades de flujo que incentiven la erosión del lecho rocoso según el método del Índice de Erodabilidad de Annandale, aunque no se descarta que en eventos extraordinarios se generen flujos de escorrentía con una importante carga de material fino que transporten grandes bloques de roca, tal como fueron observados en campo.

Según los resultados obtenidos con el método semi-empírico de Annandale, se analizaron dos situaciones en las cuales las condiciones de cauce o de la roca estudiada, podrían verse alteradas por intervención humana. Por una parte, ciertas actividades humanas podrían favorecer la disminución de sección de los cauces (estrangulamiento de cauce), lo cual incrementaría la tasa de disipación de energía del flujo (P) posibilitando la erosión del lecho rocoso. Por otra parte, cualquier acción humana constructiva sobre el lecho

rocoso podría incentivar el debilitamiento de la roca estudiada, disminuyendo su índice de erodabilidad ( $K_h$ ) y facilitando la existencia de procesos erosivos en el lecho rocoso. Es por esto que, en una etapa de ingeniería de detalle se sugiere realizar una reevaluación según tipología de obra, ya que es factible que las condiciones hidráulicas se vean alteradas. Al momento de la proyección de obras, se recomienda desestimar los lentes de suelo residual presentes en algunos sectores estudiados, ya que son mantos de suelo inestable que eventualmente serán erosionados con facilidad. Desde el punto de vista hidráulico, se recomienda preservar las condiciones naturales de escurrimiento y, en caso de fundar algún tipo de estructura en el lecho de roca, considerar obras reforzadas que sean lo suficientemente resistentes a procesos de abrasión. Es importante resaltar que los datos obtenidos son aplicables a los perfiles propuestos en este estudio y bajo las condiciones actuales de cauce. No se asegura la validez de los datos en otra sección del área estudiada.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Annandale, G. 1995. Erodibility. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 471-494.
- Aramayo, S.A. y Bocanegra, L.M. 2001. *Iconofcies de Scoyenia en la Formación Candeleros (Subgrupo Río Limay, Grupo Neuquén, Cretácico Tardío) provincia del Neuquén, Argentina. Asociación Paleontológica Argentina. Publicación Especial 9: 43-48.*
- Brieva, C. 2018. *Caracterización y Análisis multidisciplinario de la información hidrológica en cuencas. Programa Nacional Agua, 161 p.*
- Calvo, J.O. 1991. Huellas de dinosaurios en la Formación Río Limay (Albiano-Cenomaniano?), Picún Leufú, Provincia de Neuquén, República Argentina. (*Ornithischia-Saurischia: Sauropoda. Theropoda*). *Ameghiniana* 28(3-4): 241-258.
- Calvo, J.O. y Salgado, L. 1995. *Rebbachisaurus tessonei, sp. nov. A new sauropoda from the AlbianCenomanian of Argentina; new evidence on the origin of the Diplodocidae. Gaia* 11: 13-33.
- Calvo, J.O y Lockley M.G. 2001. The first pterosaur tracks from Gondwana. *Cretaceous Research* 22: 585–590.
- Castillo, L. G., y Carrillo, J. M. 2016. Scour, Velocities and Pressures Evaluations Produced by Spillway and Outlets of Dam. *Water* 8 (3): 68.
- Caminati Briceño, M. C. 2003. El método del índice de erodabilidad en el cálculo de la erosión local en pilares de puentes. Tesis de grado Ingeniería Civil: Universidad de Piura.
- Camino, M., Bo, M., Cionchi, J. Lopez de Armentia, J., Del Rios,J., y De Marco, S. 2018. Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de geografía.*, Vol. 27 (1) pp. 73-97.
- Cazau, L.B. y Uliana, M.A. 1973. El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina. V° Congreso Geológico Argentino. *Actas* 3: 131-163.
- Chow, V. T. 2005. *Hidráulica de Canales Abiertos (1ª.ed.)*. McGraw-Hill Interamericana.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L.W. 2000: *Hidrología Aplicada*. - McGraw-Hill Interamericana.
- Consejo Federal de Inversiones. 2017. *Plan de Ordenamiento Territorial de Villa el Chocón. Informe Final. Provincia del Neuquén.*
- Constanzo Caso, C. y Tomasevich, I. 2015. Características demográficas, económicas y sociales de la provincia del Neuquén. Proyecto FAO UTF ARG 017. *Desarrollo Institucional para la Inversión. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 59p.*
- Coria, R.A. y Salgado, L. 1995. A new giant carnivorous dinosaur from the Cretaceous of Patagonia. *Nature* 377: 224-226.
- 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*, 5(2), 198-203.

Di Paola, E.C. 1973. Caracterización litoestratigráfica de la Formación Neuquén. V° Congreso Geológico Argentino. Actas 3: 197-206.

Fariás, H. D. 2009. Propuesta metodológica para la evaluación del riesgo aluvional en cursos efímeros atravesados por conductos subterráneos. Estudios de casos en Mendoza, Argentina. En Farias, H. D., Brea, J. D., García, C. M. (eds.), Hidráulica Fluvial: Procesos de erosión y sedimentación, obras de control y gestión de ríos. Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santiago del Estero, Argentina.

García-Chevesich, P.A. 2010. Factores que afectan la erosión y la sedimentación. En Brea, J.D., Balocchi, F. (eds.), Procesos de erosión, sedimentación en cauces y cuencas. UNESCO Office Montevideo and Regional Bureau for Science in Latin America and the Caribbean; 138p.

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

Fernández, P., Segerer, C., Fernández, J.M., Segerer, E.C. de; Delgado, S.C., Buk, E.M. 1980. Estudio hidrológico de cuencas aluvionales en la Provincia de Neuquén y curvas generalizadas para el cálculo hidráulico de estructuras viales. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCYTH) - Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén, 48p.

Ferrer J. A., Irisarri J. A. y Mendiá 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.

Fischenich, J.C. 2001. Impacts of Stabilization Measures, EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-SR-32), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. Chapter 9. References 187.

Garrido, A. 2014. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista Del Museo Argentino De Ciencias Naturales Nueva Serie, 12(2), 121-177.

Garrido, A. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales. 12. 121-177.

Garrido, A.C. 2000. Estudio estratigráfico y reconstrucción paleoambiental de las secuencias fosilíferas continentales del Cretácico Superior en las inmediaciones de Plaza Huincul, 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.

Gaspari, F.J., Rodríguez Vagaría, A.M., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., y Besteiro, S. 2013. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP)

González Díaz, E.F. y Di Tommaso, I. 2011. Geomorfología. En Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J.C. y Vallés, J.M., 2011. (Eds.). Relatorio, XVIII Congreso Geológico Argentino (Neuquén). Asociación Geológica Argentina, 893 p., Buenos Aires.

González Díaz E.F. y Ferrer, J.A. 1986. Geomorfología de la Provincia del Neuquén. Consejo Federal de Inversiones, con mapa geomorfológico escala 1:500.000, 111p., Buenos Aires.

- Groeber, P. 1929. Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes. Dirección General de Minería, Geología e Hidrología. Publicación 58: 1-109. Buenos Aires.
- Groeber, P. 1931. El doctor Richard Wichmann y su obra científica. *Physis* 10(36): 267-278.
- Hjulstrom, F. 1935. The morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Bulletin of Geological Institute of Uppsala* 25: 221-527.
- Hill, G. W., Hales, T. A., y Aldrige, B.N. 1988. Flood hydrology near Flagstaff, Arizona; WRI; 87-4210.
- Ibañez S. 2011. Morfología de las cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Técnica de Valencia.
- Irisarri, J. 2006. Suelos de la provincia del Neuquén. Escala 1:500.000. INTA-CFI-UN del Comahue, 224 pp. Buenos Aires.
- Keidel, J. 1917. Über das patagonische Tafelland und ihre ziehungen zu den geologischen ercheinungen in den Argentinischen Anden gebiet und Litoral. *Zeitschrift der Deutsche Akademie Wiessenschaft* 3(5-6): 219-245. Stuttgart.
- Keidel, J. 1925. Sobre la estructura tectónica de las capas petrolíferas en el oriente del Territorio del Neuquén. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Minería y Geología, Publicación 8: 5-67. Buenos Aires.
- Leanza, H.A., Zanettini J.C.M. y Rodríguez M.F. 2011. Mapa Geológico de la Provincia del Neuquén, Escala 1:500.000. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).
- Leanza, H.A. 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie* 11 (2): 145-184. Buenos Aires.
- Llerena, C. A. 2003. Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. FAO Presentado en el Foro Regional sobre Sistemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA), Arequipa, Perú, 9-12 junio 2003, durante el Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- 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*, 1(1), 21-34.
- McCarthy, G. T. 1938. The unit hydrograph and flood routing. Proc. Conference of North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers, Rhode, Island.
- Méndez, V., Zanettini, J.C., y Zappetini, E.O. 1987. Aspectos geológicos del Orógeno Andino Central de la República Argentina. X° Congreso Geológico Argentino. Actas 1: 181-184.
- Morgan, R. 2005. Soil erosion and conservation. National Soil Resources Institute. Cranfield University. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK. 304 p.
- Movia, C.P., Ower, G, y Pérez C.E. 1982. Estudio de la vegetación natural de la Prov. de Neuquén. Subsecret. Rec. Nat. Prov. Neuquén.
- Movia, C., Ower, G, Perez, C. 2007. Estudio de la Vegetación Natural de la Provincia del Neuquén. Tomo I, II y III. Min.de Economía y Hacienda Prov. De Neuquén.

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.

Naranjo, D. O. 2011. Evaluación de Obras de Protección en San José del Guaviare, Colombia. En Farias, H. D., Brea, J. D., García, C. M. (eds.), Hidráulica Fluvial: Procesos de erosión y sedimentación, obras de control y gestión de ríos. Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santiago del Estero, Argentina.

Pereyra, F.X., Irisarri, J.A. y Ferrer, J.A. 2011. Suelos: factores de formación, procesos pedogenéticos y distribución. 18° Congreso Geológico Argentino. Relatorio 871-880, Neuquén.

Rapacioli R.A., D'Amico V. 2013. Determinación de Curvas IDF en la Cuenca Superior del Río Colorado. Universidad Nacional del Comahue.

Rodríguez-Entrena, M. 2007. Potencialidad de las técnicas SIG para la gestión medioambiental: aplicación al estudio de la erosión. Junta de Andalucía. Revista Electrónica de Medioambiente. Núm. 3, pp. 76-89.

Sánchez, F. J. 2017. Hidrología Superficial y Subterránea. Createspace Independent Pub., 414 pp.

Sherman, L. K. 1932. Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method. Eng. News Rec., 108, 501-505.

Snyder, F.F. 1938. Synthetic Unit Graphs. Transactions American Geophysics Union, Vol. 19, pp. 447-454.

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.

Spalletti, P., y Brea, J. D. 2011. Erosión en canales de roca. En Farias, H. D., Brea, J. D., García, C. M. (eds.), Hidráulica Fluvial: Procesos de erosión y sedimentación, obras de control y gestión de ríos. Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santiago del Estero, Argentina.

Ordoñez Gálvez, J. 2011. Cartilla Técnica: ¿Qué es una cuenca hidrológica? – Sociedad Geográfica de Lima, Perú.

Terrence, J., Foster, G., Renard, K. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. John Wiley and Sons, New York, NY. 338 p.

Torrens, C., Jurio, E., Cappelletti, V., Letes P., Milanese L., Cuevas, G. 2019. La construcción progresiva del riesgo en una cuenca aluvional del sector Noroeste de la Ciudad de Neuquén. VII Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas y XXI Jornadas de Geografía de la UNLP.

USACE. 2018. HEC-HMS Hydrologic Modeling System, version 4.3, User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers Civils. Hydrologic Engineering Center. Davis. California. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

USACE, Hydrologic Engineering Center. 2016. River Analysis System HEC-RAS, Hydraulic Reference Manual version 5.0. [www.usace.army.mil](http://www.usace.army.mil).

Bureau of Reclamation and U.S. Army Corps of Engineers. 2012. Best Practices in Dam Safety and Levee Safety Risk Analysis, Denver, Colorado.

Ven Te Chow, Maidment, D. R., y Mays, L.W. 2000. Hidrología Aplicada. - McGraw-Hill Interamericana.



Windhausen, A. 1922. Estudios geológicos en el valle superior del río Negro. Dirección de Minas, Geología e Hidrogeología. Boletín N° 29: 1-56. Buenos Aires.

## 10 ANEXOS

### 10.1 Mapas: Velocidad y altura de lámina de escorrentía

- Modelo I

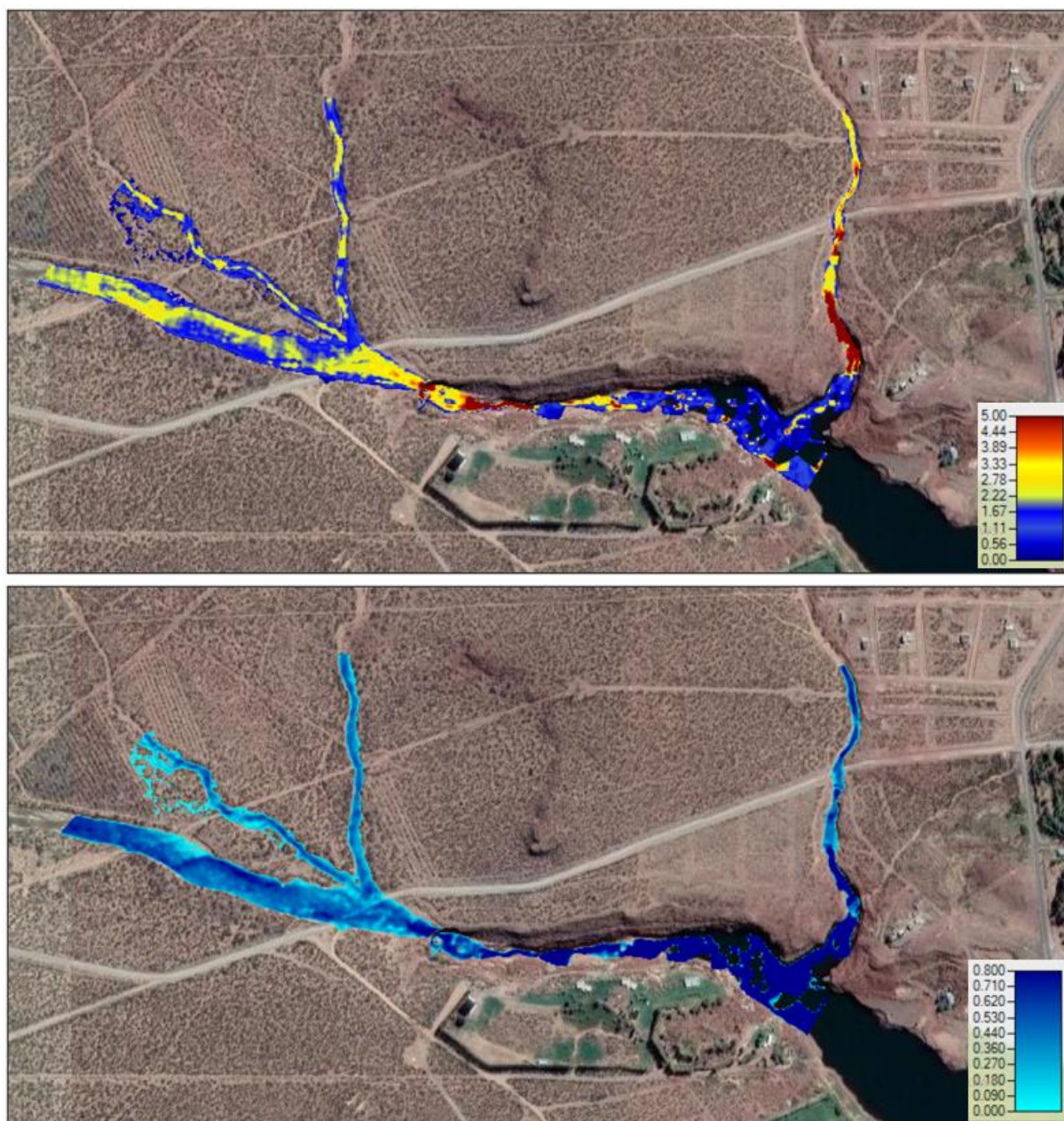


Figura 68: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondiente al modelo I para tormentas de 25TR.

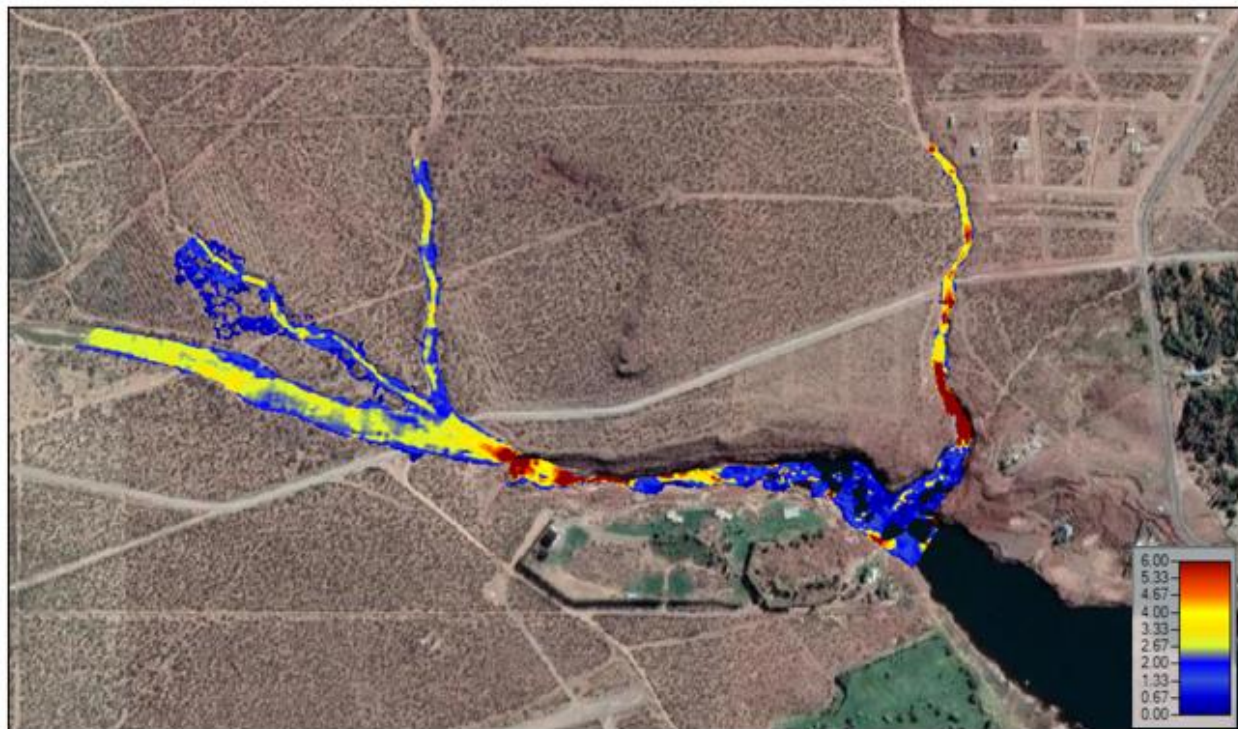


Figura 69: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondientes al modelo I para tormentas de 100TR.

▪ Modelo I (alternativo)

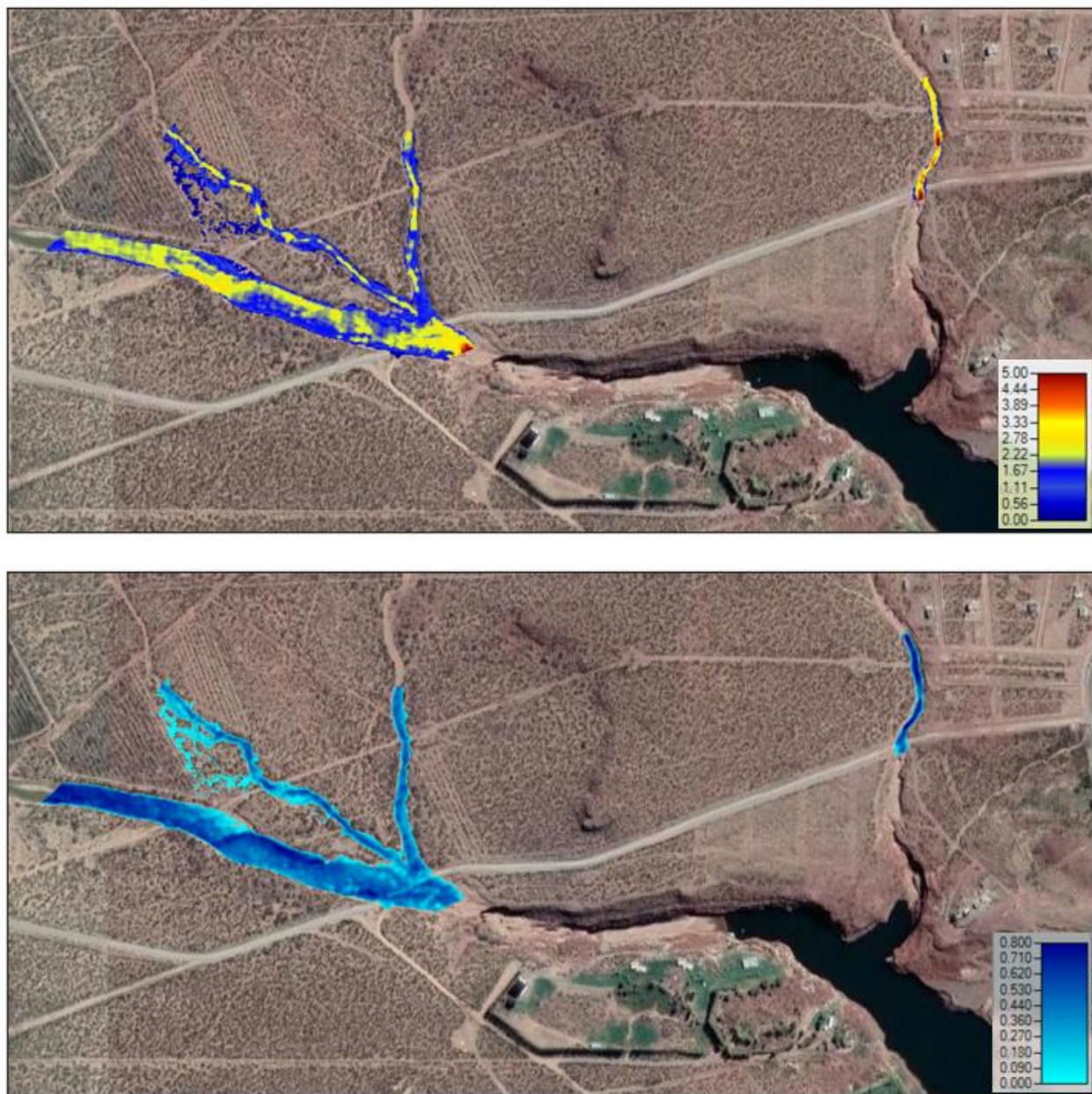


Figura 70: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondiente al modelo I (alternativo) para tormentas de 25 TR.

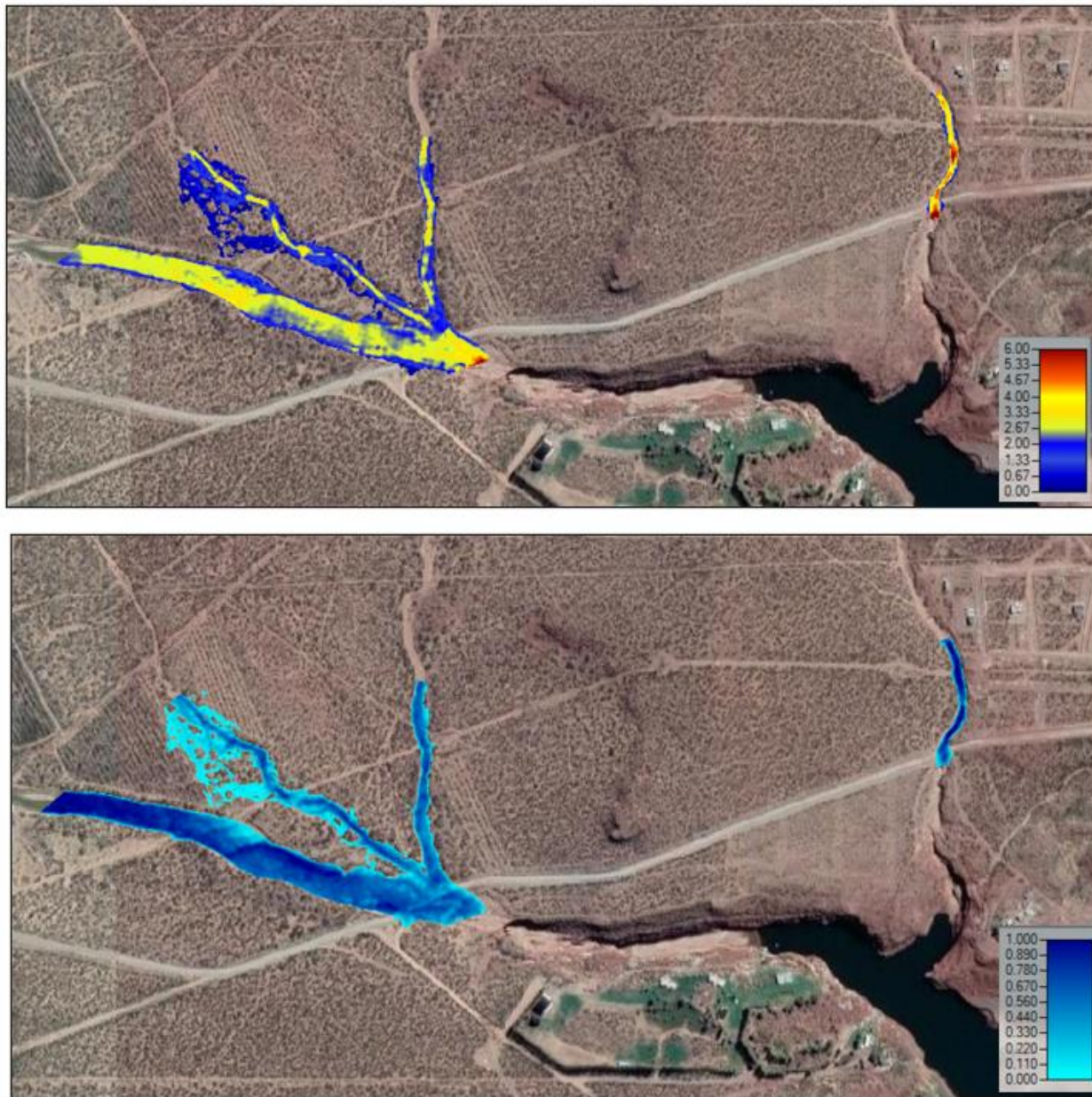


Figura 71: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondiente al modelo I (alternativo) para tormentas de 100 TR.

Modelo II

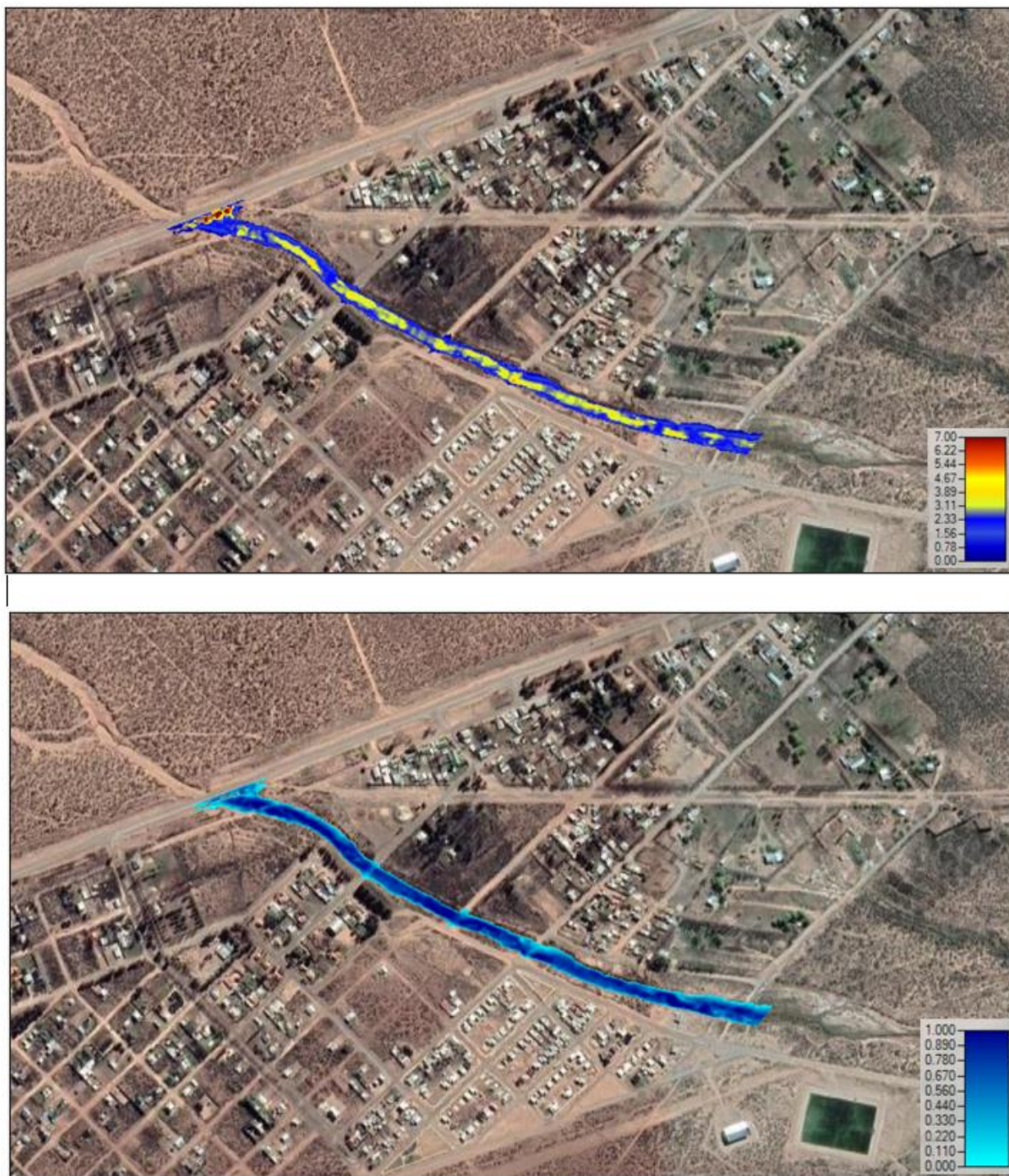


Figura 72: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondientes al modelo II para tormentas de 25TR.



Figura 73: Gráficos de velocidad (arriba) y altura de lámina de escorrentía (abajo) correspondiente al modelo II para tormentas de 100 TR.

## 10.2 Hidrogramas

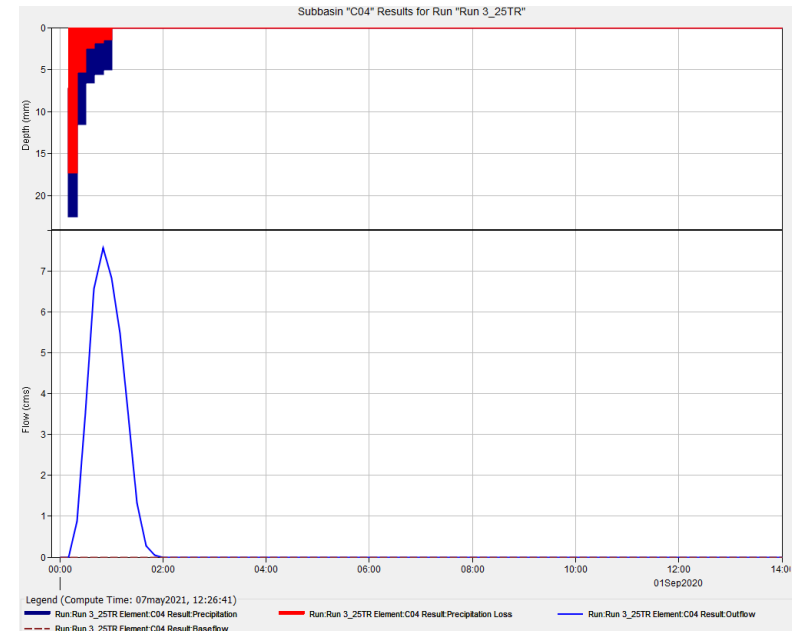
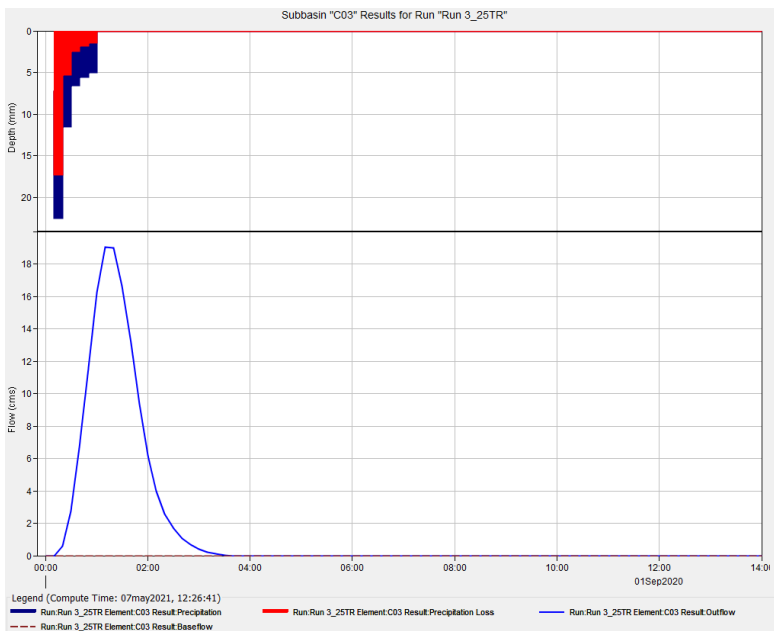
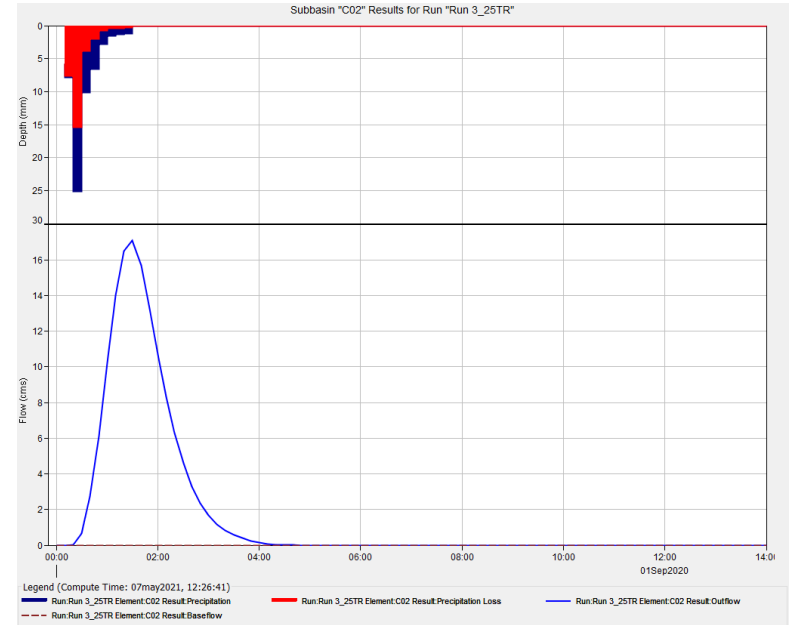
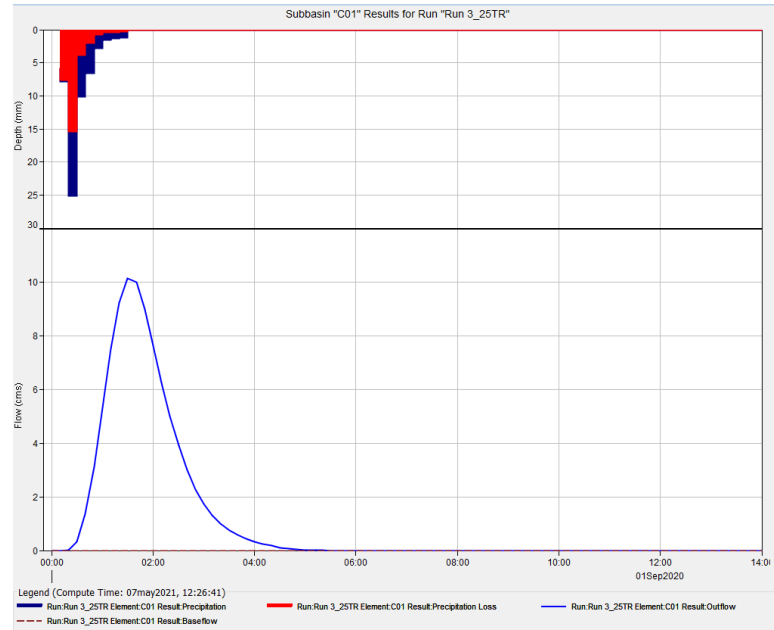


Figura 74: Hidrogramas para subcuencas C01-C04 para tiempos de recurrencia de 25 años con su respectivo hietograma.

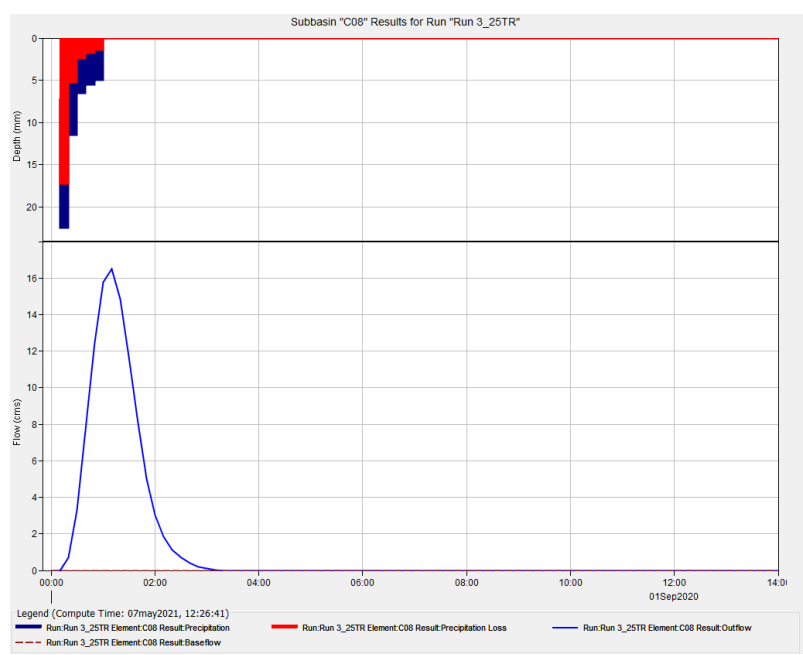
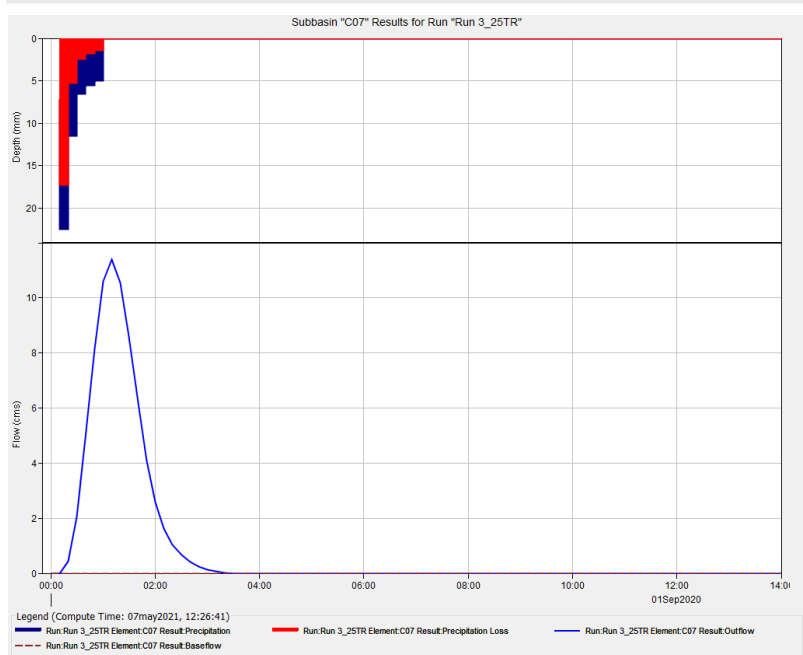
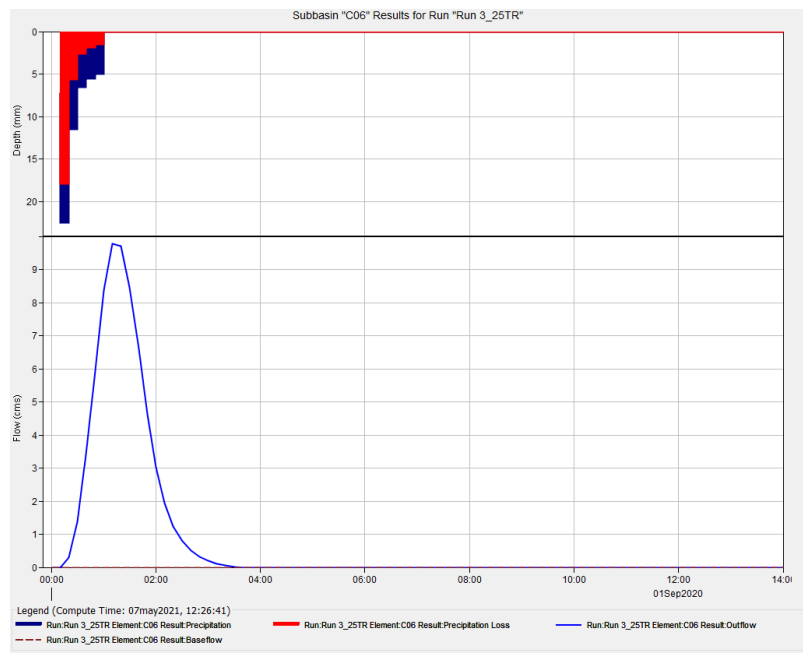
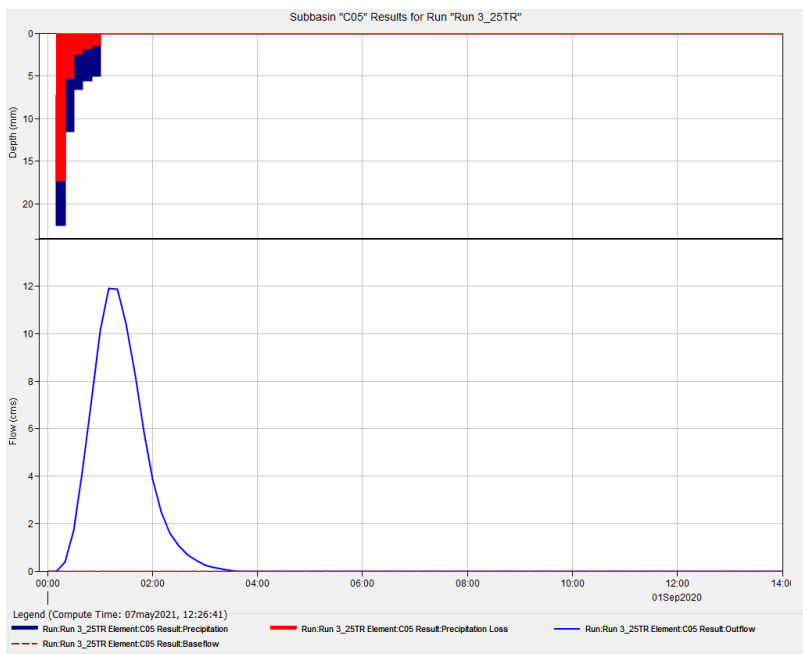


Figura 75: Hidrogramas para subcuencas C05-C08 para tiempos de recurrencia de 25 años con su respectivo histograma.



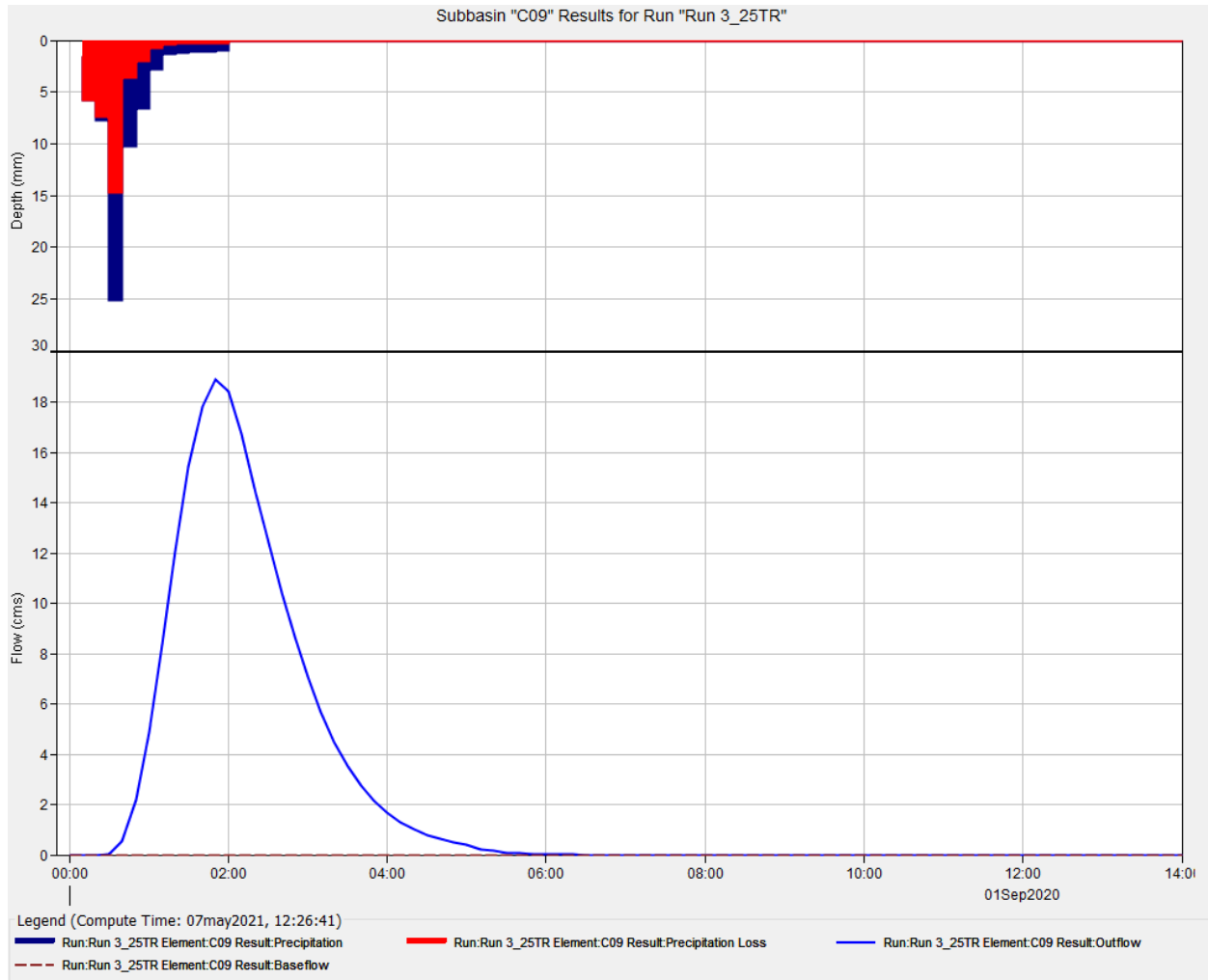


Figura 76: Hidrograma para subcuenca C09 para tiempos de recurrencia de 25 años con su respectivo hietograma.

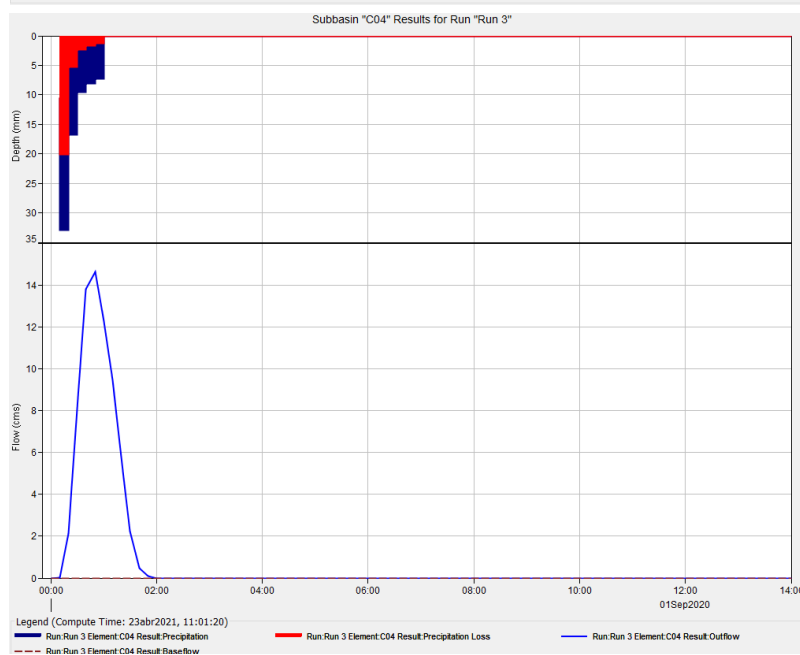
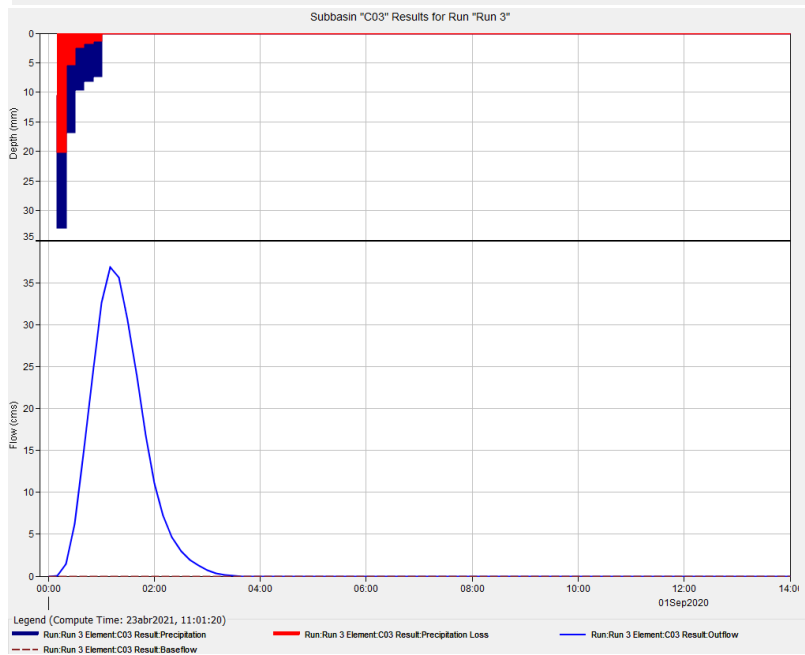
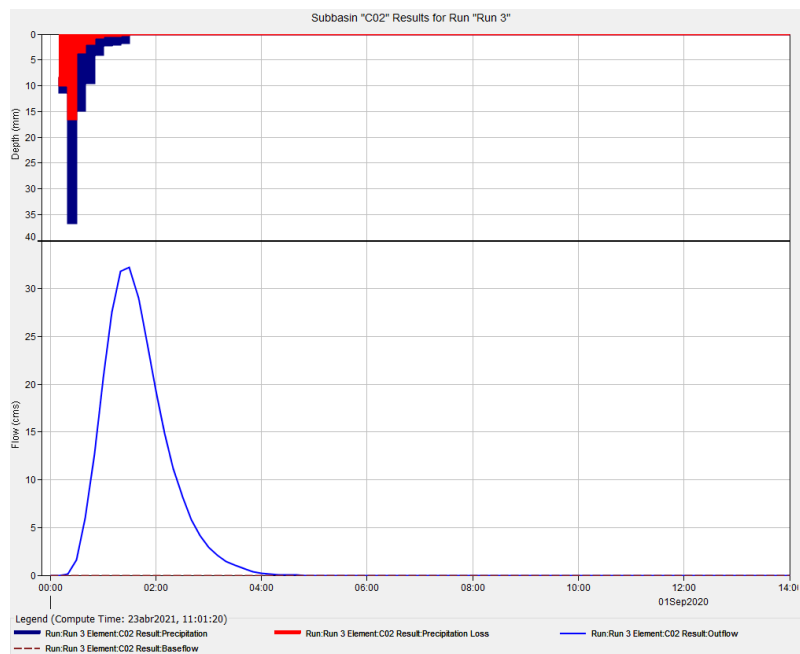
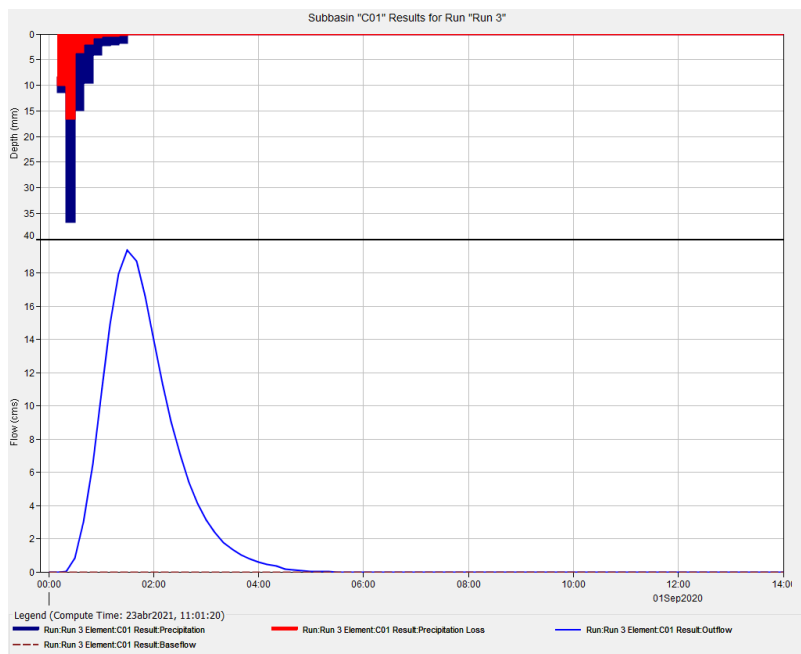


Figura 77: Hidrogramas para subcuencas C01-C04 para tiempos de recurrencia de 100 años con su respectivo hietograma.

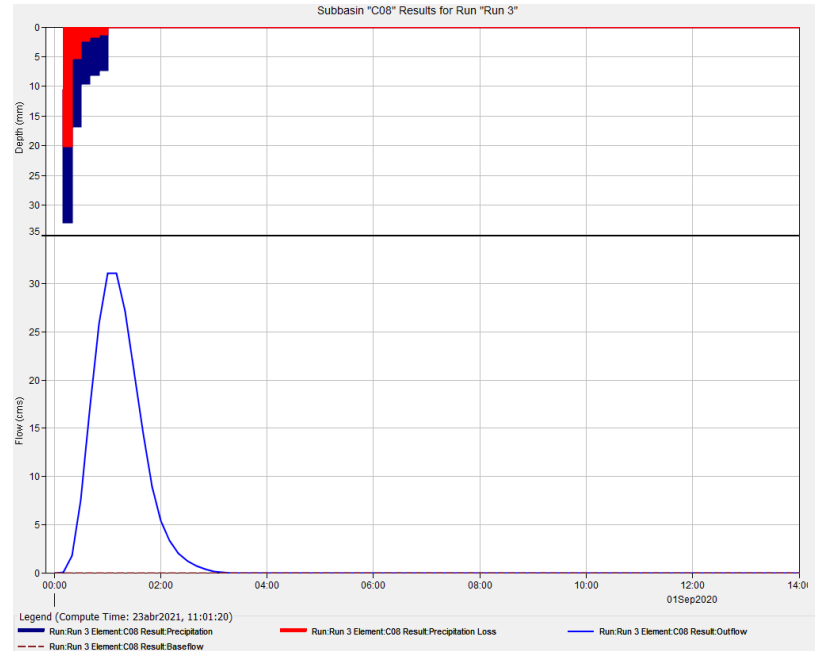
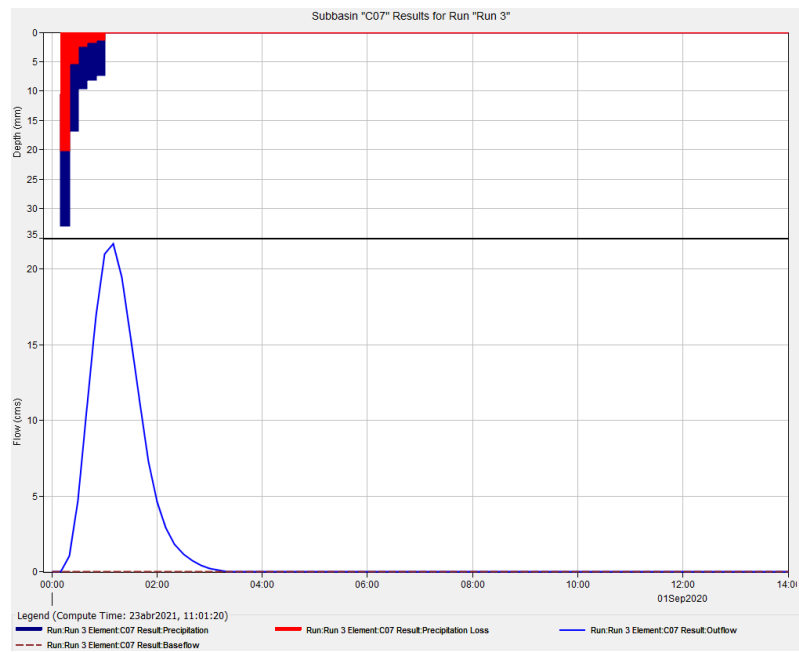
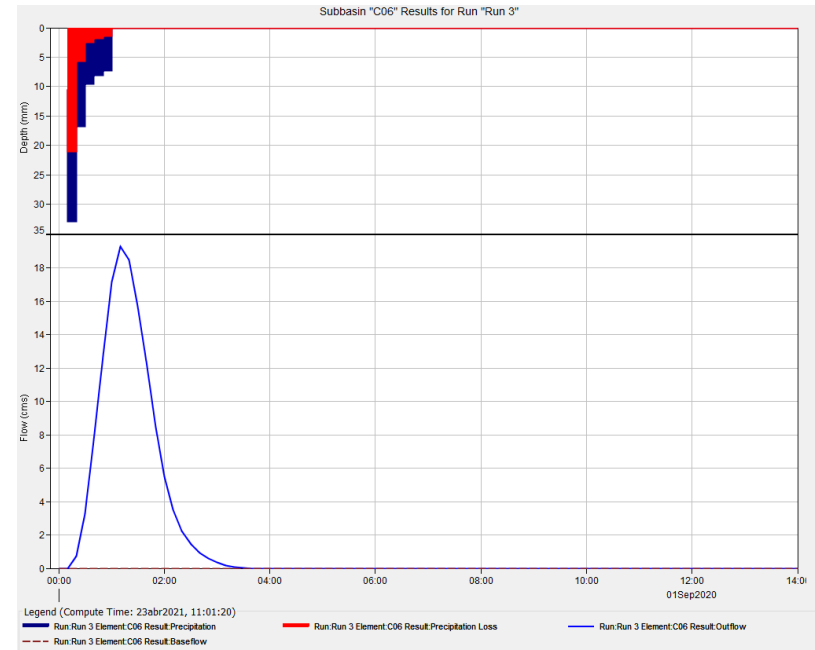
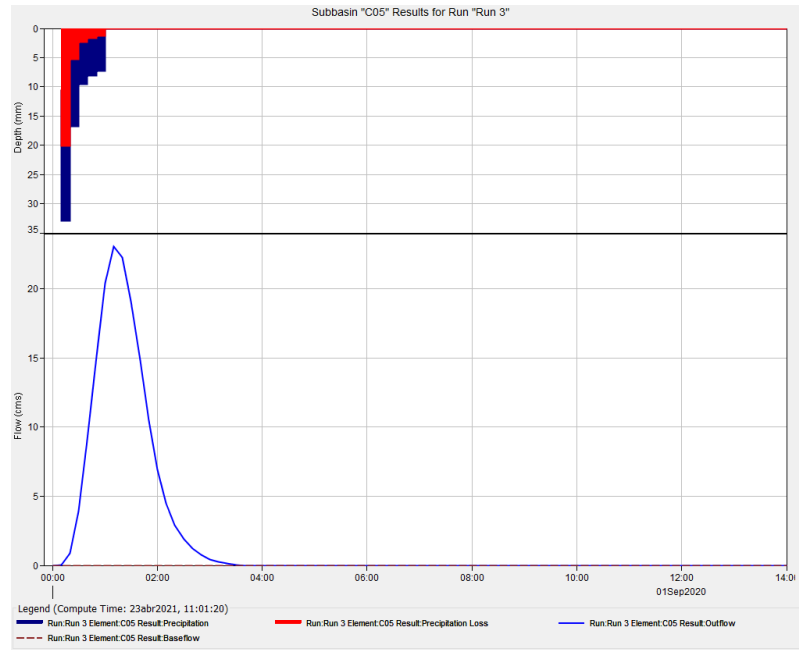


Figura 78: Hidrogramas para subcuencas C05-C08 para tiempos de recurrencia de 100 años con su respectivo hietograma.

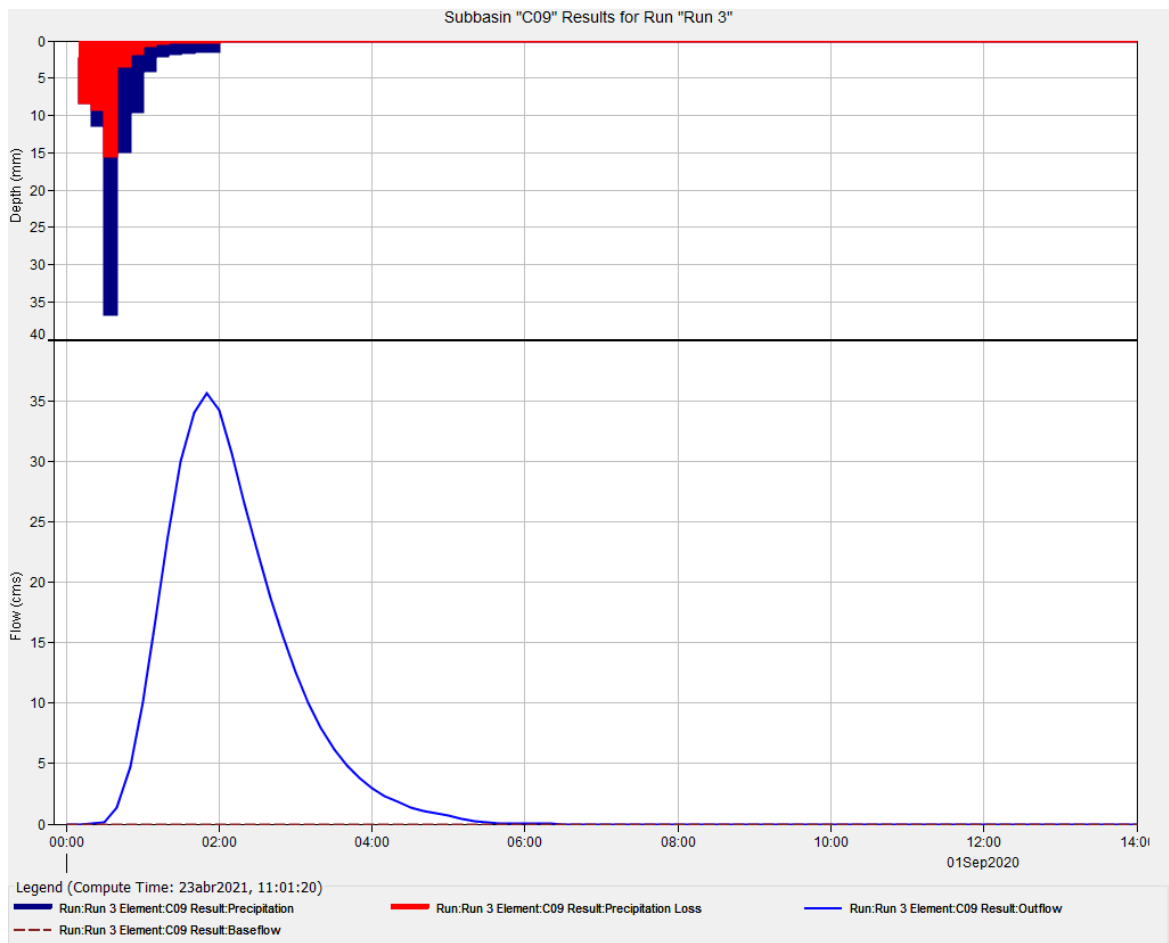


Figura 79: Hidrogramas para subcuenca C09 para tiempos de recurrencia de 100 años con su respectivo hietograma.