



**MUNICIPALIDAD DE RADA TILLY  
SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS**

**ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO  
PARA LA DETERMINACIÓN DE  
LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO  
DE LA LAGUNA KAPENKE  
ESCALANTE – MUNICIPIO DE RADA TILLY  
PROVINCIA DE CHUBUT**

**MEMORIA**

**DOCUMENTO**

P1057-MC-A-200-EHyH Laguna Rada Tilly.docx

## INDICE

<b>Artículo 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>Artículo 2. OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
<b>Artículo 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA.....</b>	<b>6</b>
Sección 3.01    Ubicación .....	6
<b>Artículo 4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA .....</b>	<b>6</b>
Sección 4.01    Variables intervinientes .....	7
4.01.1    Clima.....	7
4.01.2    Geología .....	8
4.01.3    Geomorfología .....	9
4.01.4    Suelos .....	10
4.01.5    Topografía .....	11
4.01.6    Delimitación de Cuencas y Determinación de Características Geométricas .....	12
Sección 4.02    Estudio de las Precipitaciones – Definición de la Tormenta de Diseño .....	15
Sección 4.03    Tiempo de Recurrencia .....	17
Sección 4.04    Relación Lámina Área.....	17
Sección 4.05    Hietogramas de Precipitación.....	18
Sección 4.06    Aplicación del Modelo de Simulación Hidrológica HEC-HMS .....	20
4.06.1    Datos de la Cuenca .....	20
4.06.2    Preparación del Modelo.....	27
4.06.3    Datos Meteorológicos .....	28
4.06.4    Resultados Obtenidos .....	28
4.06.5    Hidrogramas .....	30
<b>Artículo 5. ANÁLISIS PLANIALTIMÉTRICO.....</b>	<b>33</b>
Sección 5.01    Recopilación de antecedentes e información de base .....	33
Sección 5.02    Generación curvas Cota/Área y Cota/Volumen Cubicación de la capacidad de almacenamiento .....	36
<b>Artículo 6. EFECTO DE LAMINACIÓN LAGUNA KAPENKE.....</b>	<b>38</b>
Sección 6.01    Laminación de Caudales Frente a Eventos Climáticos.....	39
Sección 6.02    Laminación de Caudales al Volcado de Efluentes provenientes de la Planta de Tratamiento .....	43
<b>Artículo 7. PROPUESTA DE OBRAS DE DEFENSA ALUVIONAL PARQUE INDUSTRIAL .....</b>	<b>46</b>

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura N° 1: Laguna de Rada Tilly, luego de la tormenta del 29 de Marzo de 2017.	5
Figura N° 2: Ubicación Laguna de Kapenke	6
Figura N° 3: Mapa Climático	8
Figura N° 4: Mapa Geológico	9
Figura N° 5: Mapa Geomorfológico	10
Figura N° 6: Mapa Edafológico	11
Figura N° 7: Modelo de elevación de la zona analizada	11
Figura N° 8: Curvas de nivel con una equidistancia de 5 m	12
Figura N° 9: Cauces delimitados en la zona que descargan sus excedentes en la laguna	13
Figura N° 10: Cuecas de aporte a la laguna	13
Tabla N° 1: Parámetros geométricos de las cuencas delimitadas	14
Figura N° 11: Zona de embalsamiento cuenca C-01	14
Figura N° 12: Zona de embalsamiento cuenca C-01	15
Figura N° 13: Curvas IDF Estación Meteorológica Comodoro Rivadavia	17
Figura N° 14: Decaimiento espacial de precipitación	18
Figura N° 15: Hietogramas instantáneo y acumulado para TR=10 años	18
Figura N° 16: Hietogramas instantáneo y acumulado para TR=25 años	19
Figura N° 17: Hietogramas instantáneo y acumulado para TR=50 años	19
Figura N° 18: Hietogramas instantáneo y acumulado para TR=100 años	19
Figura N° 19: Mapa de pendientes	22
Figura N° 20: Pendientes clasificadas	22
Figura N° 21: Mapa geomorfológico digitalizado	23
Figura N° 22: Mapa resultante de la combinación de variables	24
Figura N° 23: Mapa de CN	25
Figura N° 24: Valores de CN promedio correspondiente a cada cuenca	25
Tabla N° 2: Valores de CN promedio correspondientes a las cuencas delimitadas	26
Figura N° 25: Hidrograma unitario, duración de la tormenta y tiempo de retardo	26
Tabla N° 3: Parámetros morfométricos de las cuencas delimitadas	27
Figura N° 26: Pantalla gráfica con disposición de cuencas y esquema resultante del modelo	28
Figura N° 27: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para TR=100 años	28
Figura N° 28: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para TR=50 años	29
Figura N° 29: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para TR=25 años	29
Figura N° 30: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para TR=10 años	30

- Figura N° 31: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para 60m en 10 minutos 30
- Figura N° 32: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke TR=10 años 31
- Figura N° 33: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke TR=25 años 31
- Figura N° 34: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke TR=50 años 32
- Figura N° 35: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke TR=100 años 32
- Figura N° 36: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke 60mm en 10 minutos 33
- Figura N° 37: Puntos y curvas procesadas 34
- Figura N° 38: DEM Laguna y zona de influencia. 34
- Figura N° 39: Curvas obtenidas del DEM – Equidistancia 0,5 m. 35
- Figura N° 40: Validación curvas de nivel – Imagen Google Earth 2018. 35
- Figura N° 41: Validación curvas de nivel – Imagen Google Earth 2003. 36
- Figura N° 42: Planilla e imagen elevaciones/áreas, para un rango de 0,5 metros – AutoCAD Civil 3D 36
- Tabla N° 1: Planilla de cálculo de Áreas y Volúmenes. 37
- Figura N° 43: Curva Cota – Área. 37
- Figura N° 44: Curva Cota – Volumen. 38
- Tabla N° 4: Cotas alcanzadas para los volúmenes aportados en cada escenario modelado 38
- Figura N° 45: Resultados de la modelación hidrológica de la laguna TR=100 años 39
- Figura N° 46: Resultados de la modelación hidrológica de la laguna TR=50 años 40
- Figura N° 47: Resultados de la modelación hidrológica de la laguna TR=25 años 40
- Figura N° 48: Resultados de la modelación hidrológica de la laguna TR=10 años 41
- Figura N° 49: Hidrograma de salida de la laguna a través del vertedero TR=100 años 41
- Figura N° 50: Hidrograma de salida de la laguna a través del vertedero TR=50 años 42
- Figura N° 51: Hidrograma de salida de la laguna a través del vertedero TR=25 años 42
- Figura N° 52: Hidrograma de salida de la laguna a través del vertedero TR=10 años 43
- Tabla N° 5: Caudales medios mensuales de operación de la planta 44
- Tabla N° 6: Caudales horarios para un día de enero 44
- Figura N° 53: Comportamiento del embalse frente al vuelco de efluentes desde la laguna 45
- Figura N° 54: Caudales volcados a través del vertedero producto del vuelco de efluentes 45
- Tabla N° 7: Caudal pico de descarga para el vertedero para el caso de vuelco de efluentes 46
- Figura N° 55: Ubicación Parque Industrial de Rada Tilly 46
- Figura N° 56: Traza tentativa de los colectores de guardia propuestos 47
- Tabla N° 8: Secciones propuesta para los colectores Norte y Sur para periodos de recurrencia de 25 y 10 años 47

## ARTÍCULO 1. INTRODUCCIÓN

La localidad de Rada Tilly se encuentra emplazada sobre la costa del Golfo San Jorge al sur de la ciudad de Comodoro Rivadavia, y está rodeada por dos importantes accidentes geográficos, denominados Punta Piedras al norte y Punta Del Marqués al sur. Los mismos conforman una rada o pequeña bahía a la cual la ciudad debe su nombre.

En el límite oeste del núcleo urbano, se encuentra la laguna de Rada Tilly (también denominada laguna Kapenke), un cuerpo de agua temporario natural, ubicado en la descarga o parte baja de las cuencas torrenciales que escurren desde el oeste para volcar finalmente sus excesos en la laguna.

Durante los últimos años, severas tormentas han azotado las localidades de Comodoro Rivadavia y Rada Tilly, en particular, el día 29 de Marzo del año 2017 se produjo un evento de una intensidad extraordinaria con una lámina de 60 mm que precipitó en un lapso de 10 minutos, alcanzando 232 mm en 24 horas.

Este fenómeno climático inusual, se tradujo en significativos flujos de agua y gran cantidad de sedimentos, que fueron evacuados a través de la red de drenaje del lugar, provocando desborde de cauces, canales, alcantarillas y puentes.

A raíz de las fuertes tormentas mencionadas, el nivel de la laguna creció súbitamente ocasionando que la planta de tratamiento de efluentes cloacales, que se ubica a pocos metros de la costa oeste de la laguna, quedara bajo el agua con la consecuente interrupción en su funcionamiento. Ver Figura N° 1.

Próximamente se prevé la ampliación de la planta de tratamiento de efluentes cloacales, por lo que se plantea la necesidad de conocer los volúmenes máximos y la cota máxima de embalse de la laguna, producto de una tormenta determinada, para proyectar las obras de defensa necesarias que permitan garantizar la operatividad de dicha instalación ante la ocurrencia de fenómenos climáticos.



Figura N° 1: Laguna de Rada Tilly, luego de la tormenta del 29 de Marzo de 2017.

## ARTÍCULO 2. OBJETIVOS

Los objetivos del presente informe son:

- Realizar un análisis de la información compilada a nivel cartográfico, climático, geológico, geomorfológico, hidrológico y de suelos.
- Determinar una tormenta de proyecto, a partir de un análisis estadístico de datos pluviométricos en el área.
- Analizar y caracterizar el sistema hidrológico que afecta a la laguna.
- Modelar el comportamiento hidrológico de las cuencas, determinando caudales y volúmenes máximos para diferentes escenarios.
- Realizar un análisis planialtimétrico de la laguna y su zona de influencia, obteniendo un modelo digital de elevaciones y curvas de nivel.
- Generar las curvas Cota/Área y Cota/Volumen de la laguna.

## ARTÍCULO 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA

### Sección 3.01 Ubicación

La laguna Kapenke se encuentra ubicada en límite oeste de la Localidad costera de Rada Tilly, en el Departamento de Escalante, Provincia de Chubut, a 45°55'40" de latitud Sur y a 67°34'30" de longitud Oeste, con una altitud cercana a los 10 msnm. Ver Figura N° 2.



Figura N° 2: Ubicación Laguna de Kapenke

## ARTÍCULO 4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

El área de estudio presenta, desde el punto de vista hidrológico, las características de cuencas torrenciales de régimen pluvial. En las subcuencas ubicadas en el área analizada predominan condiciones de aridez.

Las subcuencas son de tamaño reducido, por lo que las crecientes presentan cortos tiempos de concentración y fuertes picos.

En general, el coeficiente de escorrentía, es decir, la relación entre el volumen erogado y la lámina precipitada, aumenta a medida que la lámina caída es mayor. Esto se debe a que la velocidad de infiltración disminuye a medida que el suelo se moja, conformando un proceso de características no lineales. El punto inicial a partir del cual comienza la escorrentía directa es también variable según sea la condición del suelo por lluvia antecedente y a su vez varía con la intensidad de la lluvia según sea que la misma supere o no el valor de la infiltración del suelo en el momento de producirse la lluvia torrencial.

No toda la precipitación que llega a la superficie de la tierra produce escorrentía. Parte de ella es interceptada por la vegetación y por las depresiones del terreno, otra se evapora, parte también se infiltra en el suelo. El excedente, que se conoce también como precipitación neta, es el que genera la escorrentía.

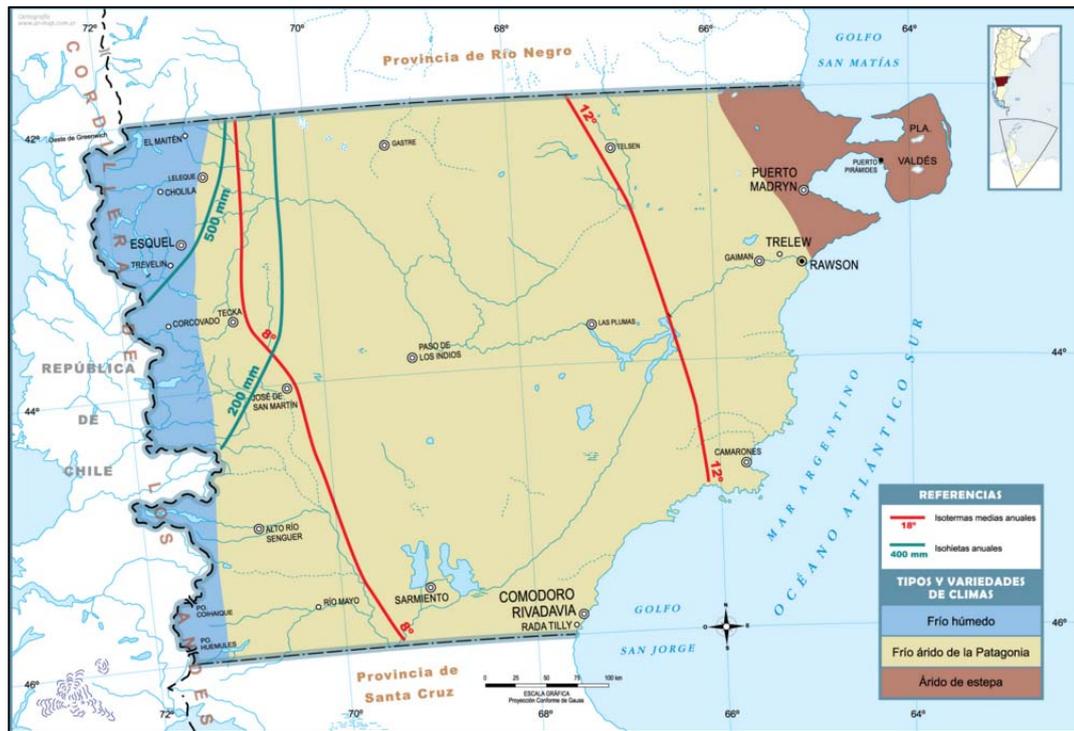
La precipitación neta depende fundamentalmente de la magnitud de las precipitaciones y de las características de la cuenca receptora. Dentro de esta última tiene especial importancia el complejo hidrológico suelo-vegetación, determinante de la magnitud de la intercepción de la vegetación y de las depresiones y de la infiltración, este concepto está enmarcado dentro del coeficiente de escorrentía utilizado en la modelación.

El modelo utilizado en este estudio permite la consideración de todos estos factores, lo que redundará en una simulación más adecuada a la realidad física del proceso. A continuación se analizan individualmente los factores que intervienen en el proceso.

## Sección 4.01 **Variables intervinientes**

### 4.01.1 **Clima**

La Villa de Rada Tilly está dominada por una estepa en un clima árido a semiárido. Las precipitaciones del área rondan los 150 – 200 mm anuales. Otoño e invierno son las estaciones más lluviosas, siendo mayo el mes con mayores precipitaciones y octubre aquel con menor promedio. La humedad relativa media anual oscila entre 50 y 70 %. El régimen de lluvias, sumado a los fuertes vientos que se producen en la región determina un importante déficit hídrico, que se acentúa drásticamente en los meses de primavera y verano. La temperatura media anual es de 12,5 °C, siendo enero el mes más caluroso con un promedio de 18,6 °C y Julio el más frío con una media de 6,6 °C. Los vientos promedio superan los 20 km/h siendo más fuertes durante el fin de la primavera y principios del verano (Noviembre a Enero). Los vientos predominantes son del oeste (43%) con velocidades medias de 41 km/h, y ráfagas que superan fácilmente los 100 km/h. (Ver Figura N° 3).



**Figura Nº 3: Mapa Climático**

#### 4.01.2 Geología

La localidad de Rada Tilly se encuentra ubicada en la zona central de la Cuenca del Golfo San Jorge. Esta corresponde a un área de depósito, y su geología está dada por sucesivas etapas sedimentarias. En la Figura Nº 4 puede verse el mapa geológico correspondiente a la zona bajo estudio.

A continuación se describen las unidades geológicas presentes en el área.

##### *i. Formación Chenque (Patagonia)*

Depósitos de materiales finos de la ingresión marina del Oligoceno al Mioceno Medio. Compuesta esencialmente de limolitas y areniscas finas, friables, con abundante participación de trizas vítreas en todo el perfil, apoya transicionalmente sobre la Formación Sarmiento e infrayace a la Formación Santa Cruz. De colores predominantemente gris verdosos, presenta bancos compactos de coquinas y torna a una composición básicamente arenosa hacia los términos superiores. Corresponde a una ingresión marina Atlántica y registra buena representación en el ámbito del Golfo San Jorge. Su importancia radica en que contiene el mayor acuífero de aguas dulces de la región. Andreis et al. (1975) y Andreis (1977) consideraron que las sedimentitas de esta unidad representan un depósito infralitoral, acumulado en una cuenca de fondo plano, poca profundidad de agua, con mareas débiles. De acuerdo con Bellosi (1986, 1988a, 1988b, 1990a, 1990b, 1994, 1995) y Bellosi y Barreda, (1993), la sedimentación se produjo sobre una plataforma levemente inclinada, comprendiendo profundidades de agua desde intermareales hasta no mayores de 50 metros, sobre una plataforma pelítica.

##### *ii. Depósitos de Cordones Litorales Marinos*

Arenas y gravas están presentes en la pequeña ensenada de la localidad de Rada Tilly y forman una estrecha terraza de acumulación a lo largo de la playa actual, preferentemente entre las puntas del

Marqués y Piedra. Estos depósitos están constituidos por arenas y gravas sueltas, cuyo techo llega a entre 8 y 19 m sobre el nivel del mar. Engloban gran cantidad de valvas trozadas y enteras.

#### Depósitos Aluviales y Coluviales

En este apartado se incluyen los depósitos de las planicies aluviales junto con el material que tapiza las laderas de las elevaciones. Su composición varía entre gravas, arenas, limos y arcillas. Se los encuentra en los bajos topográficos, muchas veces endorreicos, donde la erosión y sedimentación coetáneas se producen por una interacción eólico-hídrica. En los frentes de mesetas, especialmente en las de gravas, los materiales coluviales enmascaran las sedimentitas de las unidades infrayacentes.

#### Depósitos Actuales de Playas Marinas.

En las actuales playas marinas coexisten zonas de erosión en los promontorios (Punta del Marqués y Punta Piedra) y zonas de acumulación y erosión en las áreas abrigadas de las caletas y bahías. El material acumulado en las playas, según el sector, es de arenas y gravas.

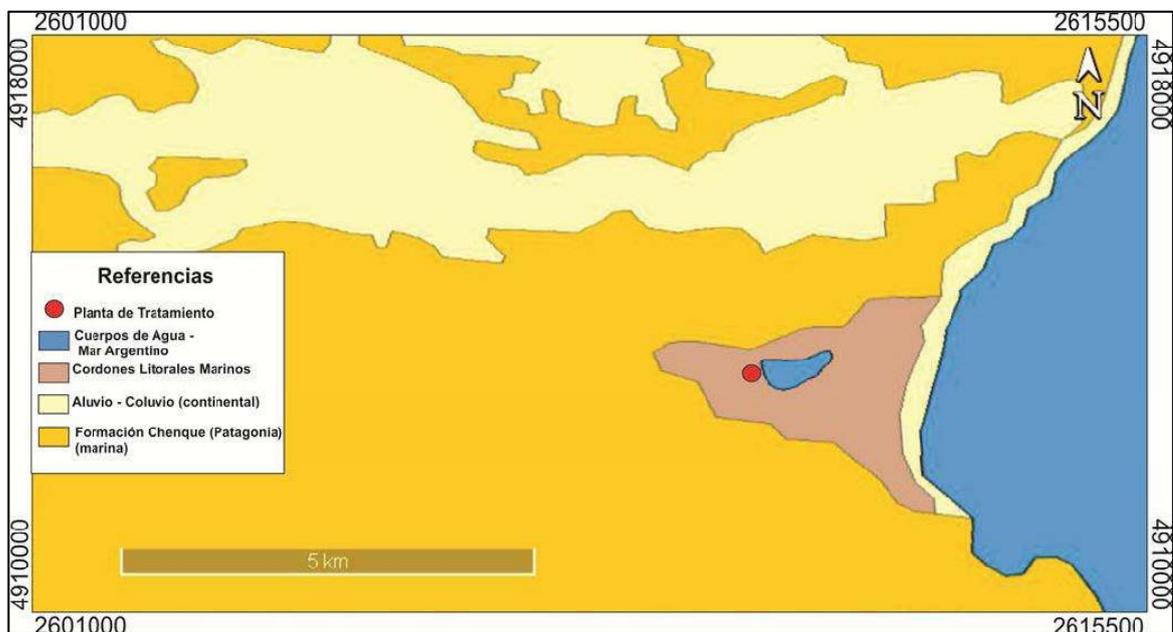


Figura N° 4: Mapa Geológico

### 4.01.3 Geomorfología

El paisaje está conformado por diferentes geoformas originadas por procesos erosivos relacionados principalmente con la acción hídrica y del viento, en menor grado a procesos de remoción en masa como los deslizamientos. Ver Figura N° 5.

Morfológicamente (José Alberto Kerster, 1991) gran parte de la franja costera patagónica está constituida por terrazas escalonadas con altitud descendiente hacia la costa, y surcada por depresiones que a modo de “cañadones” desembocan en el mar.

Rada Tilly está enclavada en una de esas hondonadas, cuya base no expuesta es precisamente “el patagoniano” o Formación Chenque, la misma se encuentra cubierta por sedimentos no consolidados, cuya génesis y ubicación espacial permite separarlo en tres unidades:

- Cordones litorales de origen marino: constituidos por gravas, arenas y fragmentos de conchillas. Se disponen en forma paralela a subparalela a la línea costera.

- Depósitos provenientes de los niveles superiores: bordeando los cerros Punta Piedras y Del Marqués, se observan depósitos provenientes de la remoción de los niveles superiores de la Formación Patagonia o Chenque, presentan aspectos de cerros menores o terraciformes compuestos por sedimentos finos fósiles redepositados, y cubiertos en parte por formaciones arenosas.
- Formaciones medanosas: pequeños médanos móviles y semifijos se encuentran en la zona de estudio.

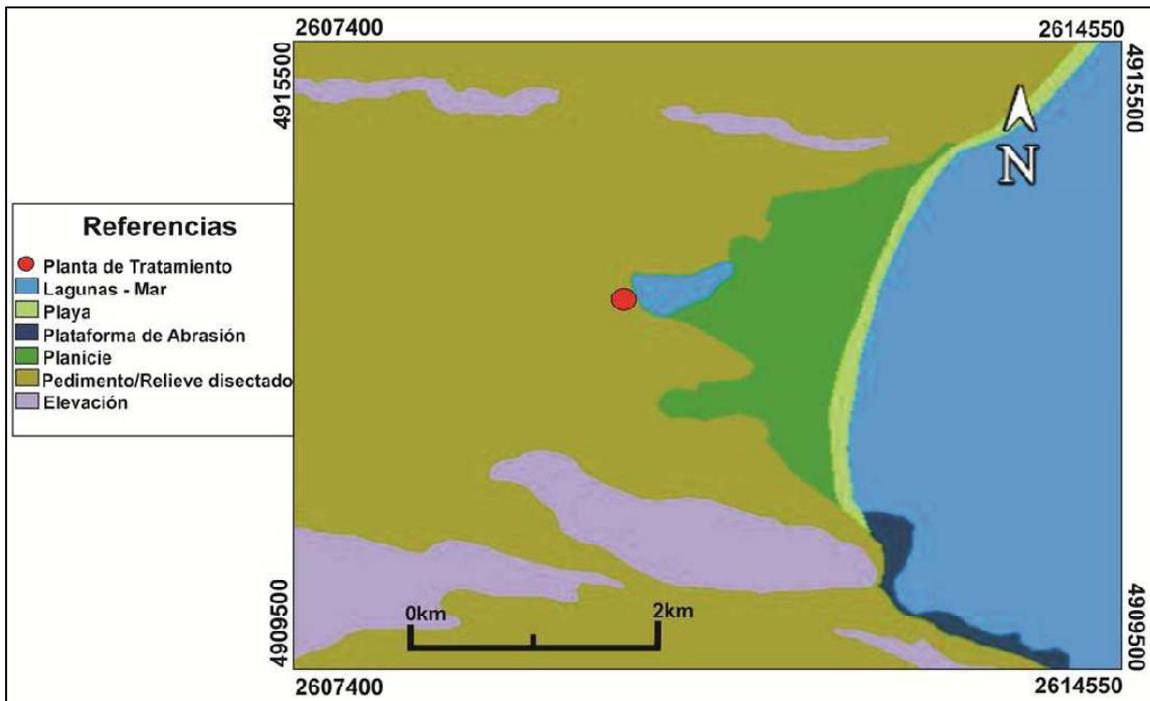


Figura N° 5: Mapa Geomorfológico

#### 4.01.4 Suelos

La característica del suelo se corresponde con los Aridisoles de textura franco-arenosa a franco-arcillosa, con bajos contenidos de materia orgánica, compuestos por sedimentos modernos no consolidados y arcillas que pertenecientes al Patagoniano o Formación Chenque. Hacia los cerros el espesor de estos suelos disminuye notoriamente quedando expuesta la Formación Chenque anteriormente descripta. Ver

Al orden Aridisol, se lo reconoce como un suelo joven, de horizonte superficial claro, pobre en materia orgánica (epipedón ócrico) que presenta un desarrollo de las de 1m de depósitos eólicos finos en la zona de estudio, su textura al tacto es arenosa y está desarrollado sobre depósitos de la Formación Chenque.

Por definición, los Aridisoles son suelos que se presentan en zonas de clima árido ya sean fríos o cálidos que no disponen durante largos períodos de agua suficiente para el crecimiento de pasturas. La mayor parte del tiempo la poca agua presente es retenida a gran tensión, lo que dificulta su utilización por parte de las plantas.

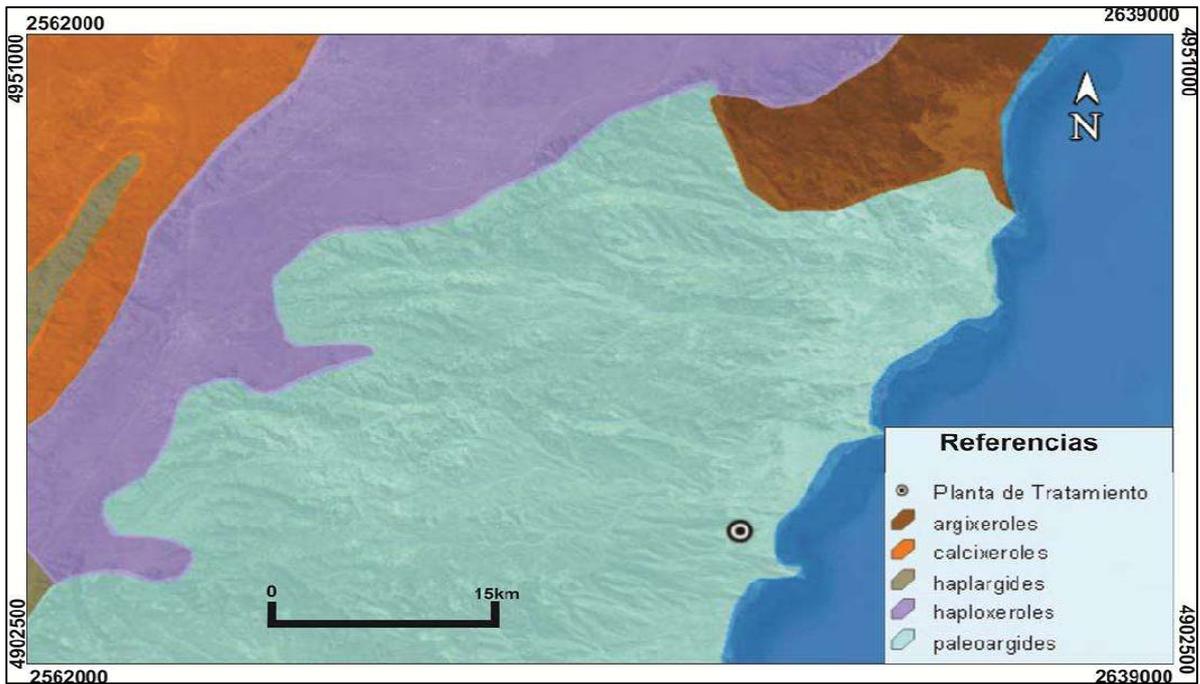


Figura N° 6: Mapa Edafológico

#### 4.01.5 Topografía

Se utilizó información topográfica resultante del procesamiento del modelo de elevación digital SRTM de la NASA, de 90 m de resolución. El modelo se presenta en la Figura N° 7.

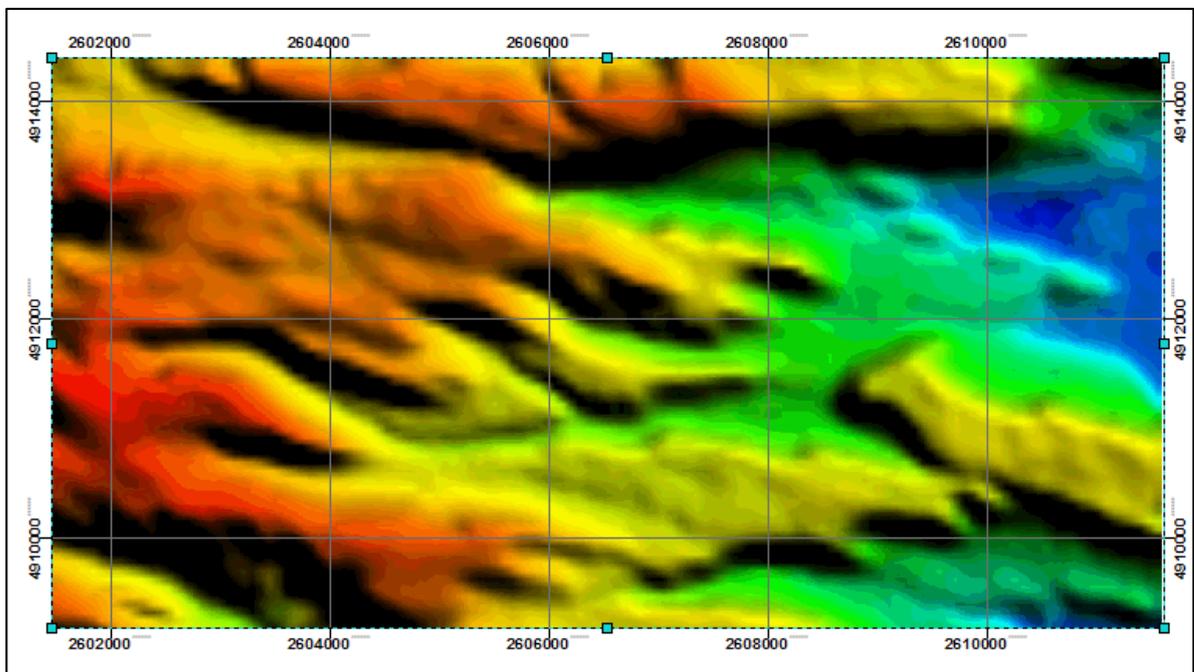


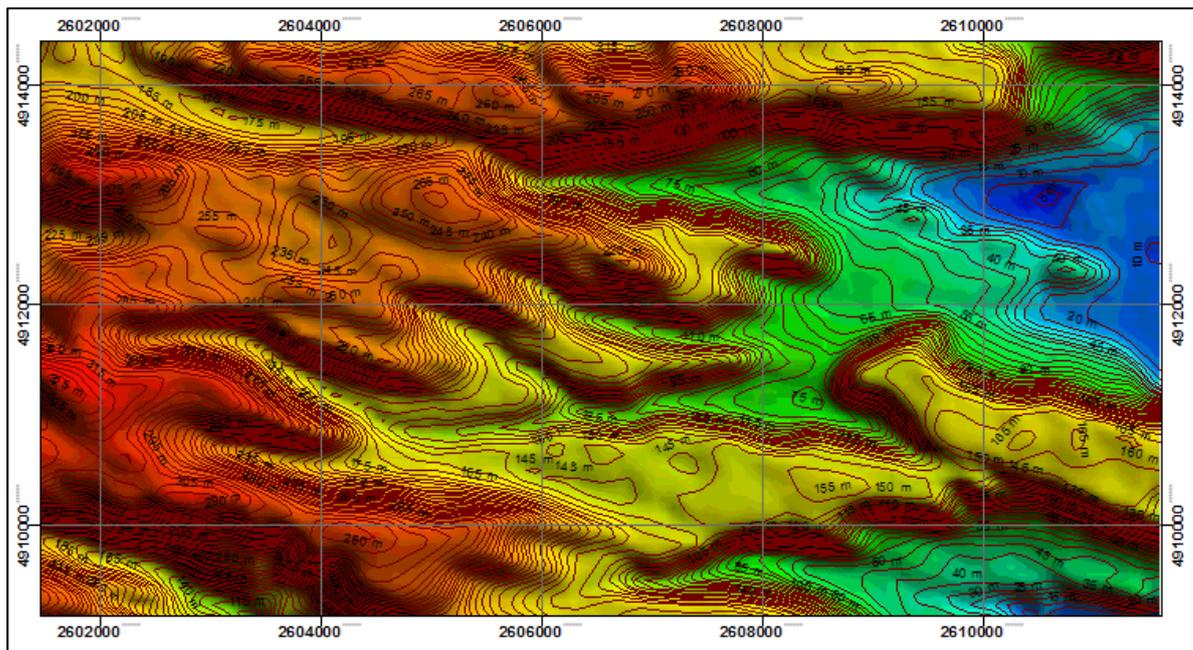
Figura N° 7: Modelo de elevación de la zona analizada

#### 4.01.6 Delimitación de Cuencas y Determinación de Características Geométricas

La extensión del sistema se limita físicamente por la localización del extremo de salida de la cuenca y su área se determina con mapas topográficos delimitando las divisorias de agua hasta el punto mencionado.

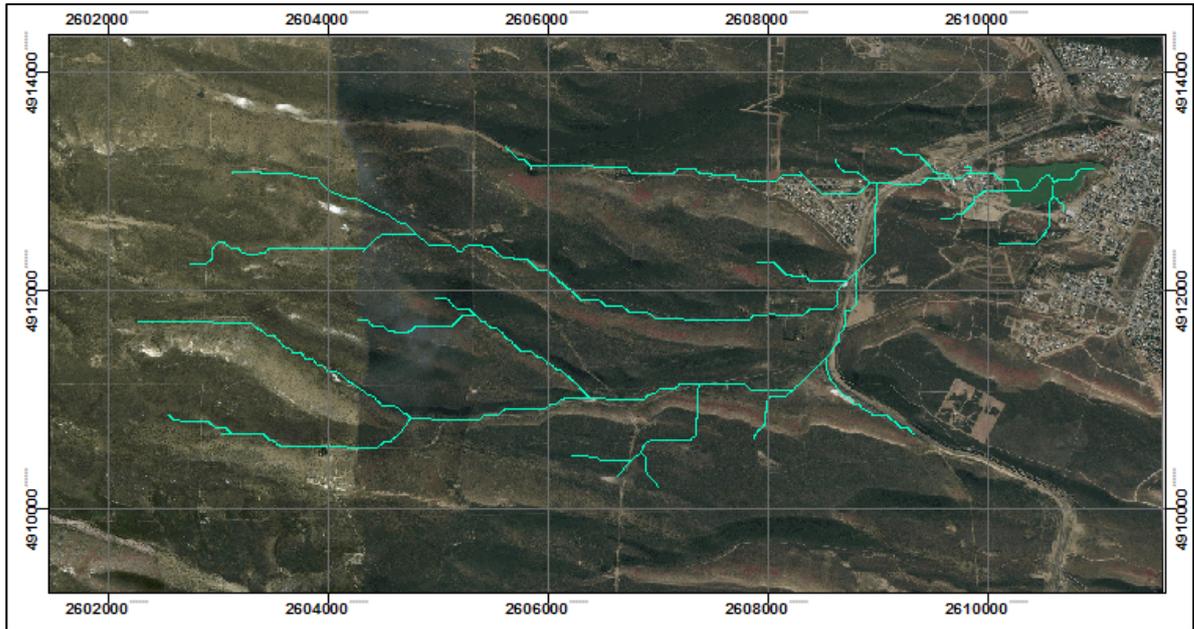
Para la delimitación de las cuencas y la determinación de sus características geométricas se trabajó con un modelo de elevación digital (MDE), el cual es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud (cota) de la superficie del terreno.

A partir del MDE se generaron curvas de nivel del sector de interés, el cual contiene las cuencas que afectan el área del proyecto. La equidistancia se estableció en 1,00 m con el objeto de analizar visualmente la topografía. El resultado de esta operación para una equidistancia de 5,00 m puede apreciarse en la Figura N° 8.



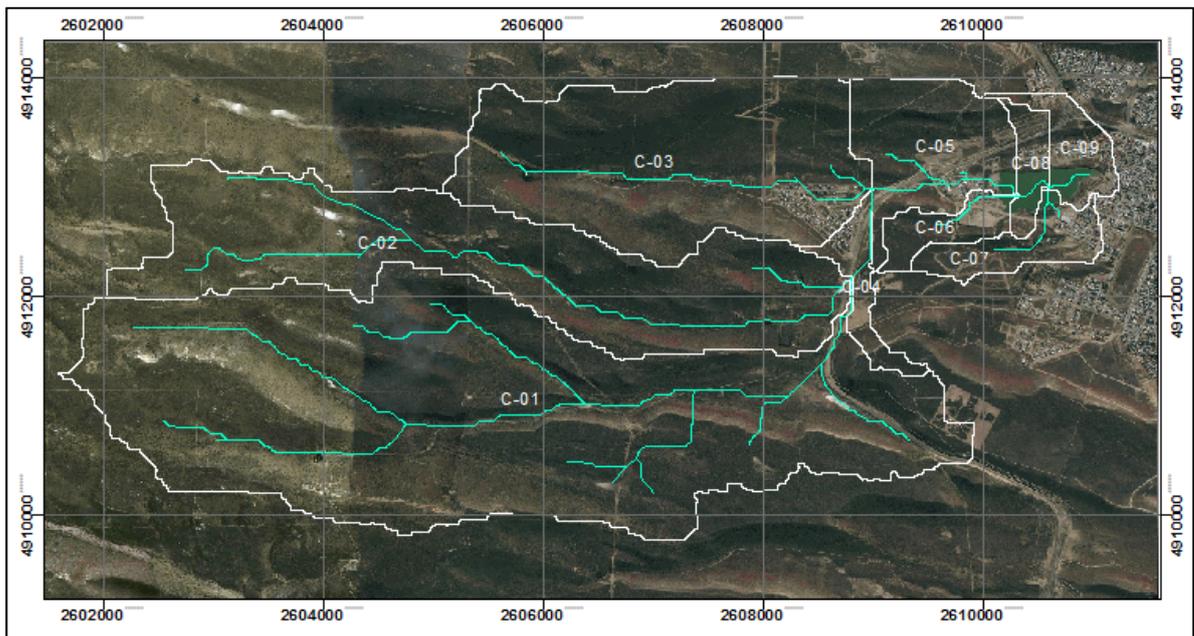
**Figura N° 8: Curvas de nivel con una equidistancia de 5 m**

Con el fin de delimitar las principales cuencas de aporte a la laguna, se adoptó como área de drenaje mínima requerida para formar el origen de un cauce, una superficie de 20 Ha. Los cauces generados se presentan en la Figura N° 9.



**Figura N° 9: Cauces delimitados en la zona que descargan sus excedentes en la laguna**

Las cuencas de aporte correspondientes a los cauces delimitados se muestran en la Figura N° 10.



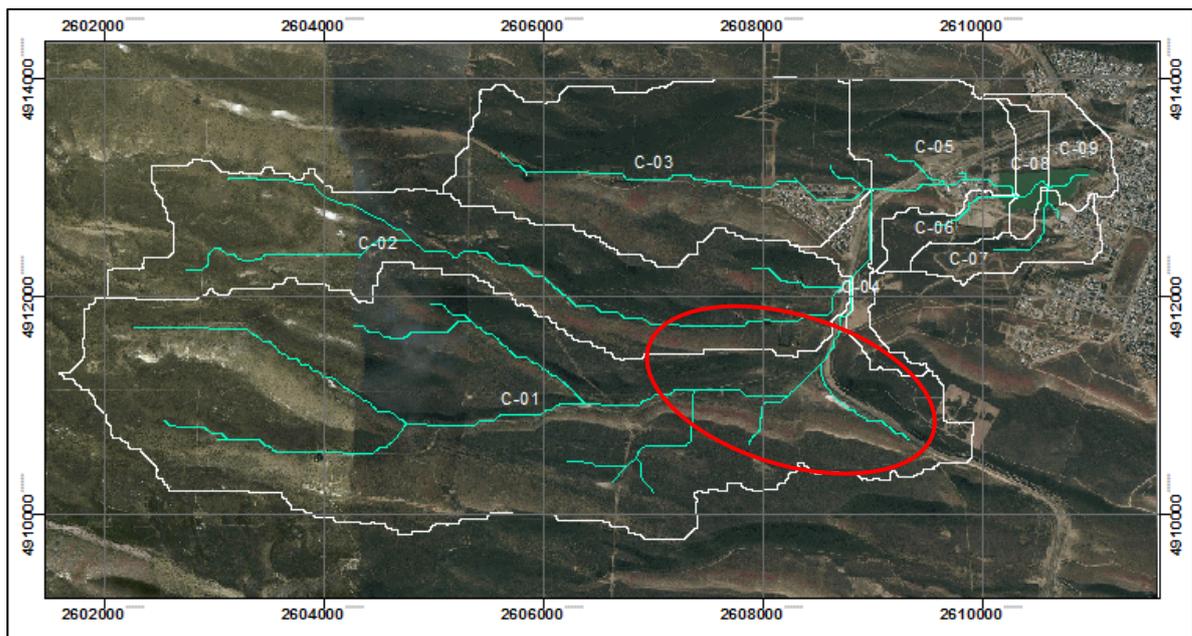
**Figura N° 10: Cuencas de aporte a la laguna**

Las principales características geométricas de las cuencas delimitadas se presentan en la Tabla N° 1.

Cuenca	Área m <sup>2</sup>	Área km <sup>2</sup>	LC m	Desnivel m	i %
C-01	13053286.0	13.1	4764.0	80.7	1.69
C-02	5875155.0	5.9	6255.0	189.5	3.03
C-03	4933226.0	4.9	3577.0	151.7	4.24
C-04	442089.0	0.4	875.0	27.2	3.11
C-05	1636662.0	1.6	1451.0	22.8	1.57
C-06	451635.0	0.5	873.0	28.8	3.30
C-07	657773.0	0.7	830.0	32.9	3.97
C-08	337333.0	0.3	367.0	5.0	1.35
C-09	532776.0	0.5	426.0	8.0	1.88

**Tabla N° 1: Parámetros geométricos de las cuencas delimitadas**

En el caso de la cuenca C-01, se observa que en las inmediaciones de la Ruta Nacional N° 3, presenta una depresión, donde los excedentes generados en la parte alta de la cuenca se acumulan en lugar de escurrir aguas abajo en dirección a la laguna. En la Figura N° 11, se indica la ubicación de la depresión descrita y en la Figura N° 12, se muestra el contorno de la depresión, y puede observarse la presencia de agua estancada.



**Figura N° 11: Zona de embalsamiento cuenca C-01**



**Figura N° 12: Zona de embalsamiento cuenca C-01**

Por este motivo, se analizó la topografía en la zona para determinar el volumen que dicha depresión es capaz de almacenar, arribando a un valor de 356.000 m<sup>3</sup>.

El resultado del análisis indicado será tenido en cuenta en los resultados de la modelación hidrológica, considerando que los volúmenes de escurrimiento generados en la cuenca C-01, que sean menores a la capacidad de almacenamiento de la depresión ubicada en la salida de dicha cuenca, no representan un aporte a la laguna.

#### **Sección 4.02 Estudio de las Precipitaciones – Definición de la Tormenta de Diseño**

Las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) permiten conocer la intensidad de precipitación para una duración y un tiempo de recurrencia determinado. Sin embargo, en la zona de proyecto no se dispone de curvas IDF generadas por organismos oficiales para su utilización en el desarrollo de análisis hidrológicos. Por este motivo, se recurrió al análisis estadístico de registros pluviométricos diarios. Se utilizaron los datos registrados por la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto de Comodoro Rivadavia, aproximadamente a 17 km de la zona en estudio, cuyos registros fueron provistos por el Servicio Meteorológico Nacional, contando con datos diarios desde 1956 hasta la actualidad.

La magnitud  $x_T$  de un evento hidrológico se puede representar como la media  $\mu$  más una desviación estándar  $\Delta x_T$  de la variable con respecto a la media.

$$x_T = \mu + \Delta x_T$$

Esta desviación con respecto a la media puede igualarse al producto de la desviación estándar  $\Delta$  y el factor de frecuencia  $k_T$ , es decir  $\Delta x_T = k_T \cdot \sigma$ . La desviación  $\Delta x_T$  y el factor de frecuencia  $k_T$  son funciones del período de retorno y del tipo de distribución de probabilidad a utilizarse en el análisis. Por lo tanto, la ecuación anterior puede expresarse como:

$$x_T = \mu + k_T \sigma \cong \mu + k_T s$$

La ecuación del factor de frecuencia fue propuesta por Chow, y aplica a muchas distribuciones de probabilidad utilizadas en el análisis de frecuencia hidrológica.

El estudio de eventos hidrológicos extremos incluye la selección de una secuencia de observaciones máximas de conjuntos de datos para cada uno de los años de la serie de registros históricos.

Existen tres formas asintóticas para las distribuciones de valores extremos conocidas como Tipo I, Tipo II y Tipo III.

La distribución de probabilidad de valor extremo Tipo I (EVI), es:

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$$

Los parámetros se estiman como:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}s}{\pi}$$

$$u = \bar{x} - 0.5772\alpha$$

El parámetro  $u$ , es la moda de la distribución (punto de máxima densidad de probabilidad). Una variable reducida " $y$ " puede definirse como:

$$y = \frac{x - u}{\alpha}$$

Sustituyendo la variable reducida, se encuentra que:

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

Entonces

$$y = -\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{F(x)} \right) \right]$$

$$\frac{1}{T} = 1 - F(x_T)$$

$$F(x_T) = \frac{T - 1}{T}$$

$$y_T = -\ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T - 1} \right) \right]$$

$$x_T = y + \alpha y_T$$

A partir de las expresiones indicadas, se determinan las intensidades correspondientes a cada tiempo de recurrencia para una duración de 24 hs.

Para la obtención de las intensidades correspondientes a duraciones menores a las 24 hs, se utilizaron las relaciones propuestas por Campos Aranda.

A partir del análisis presentado, se depende la siguiente ecuación de lluvia:

$$I \left[ \frac{mm}{h} \right] = \frac{152.677 \cdot T^{0.272}}{d^{0.61885}}$$

Mediante la aplicación de la ecuación anterior, se obtuvieron las curvas IDF que se presentan en la Figura N° 13.

Mediante el análisis de la información obtenida, se puede deducir que el evento de precipitación ocurrido en abril de 2017 posee un período de recurrencia cercano a 500 años.

#### Sección 4.03 Tiempo de Recurrencia

El período de retorno o tiempo de recurrencia, es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño. En el diseño el valor óptimo a adoptar es aquel que equilibra las variables costo - infraestructura a proteger.

En este caso se determinará el TR como un parámetro de diseño vinculado a la extensión del proyecto. Por lo tanto, se planteará una modelación multi-escenario para períodos de recurrencia de 10, 25, 50 y 100 años.

#### Sección 4.04 Relación Lámina Área

La lámina media de agua precipitada en una cuenca dependerá de la superficie de ésta. El coeficiente de reducción areal se obtuvo aplicando la ecuación de Leclerc y Schaake's (1972):

$$F = 1 - e^{-1.1 \cdot D^{0.25}} + e^{(-1.1 \cdot D^{0.25} - 38,61 \cdot 10^{-4} \cdot A)}$$

Los valores de reducción areal resultantes se aprecian en la Figura N° 14

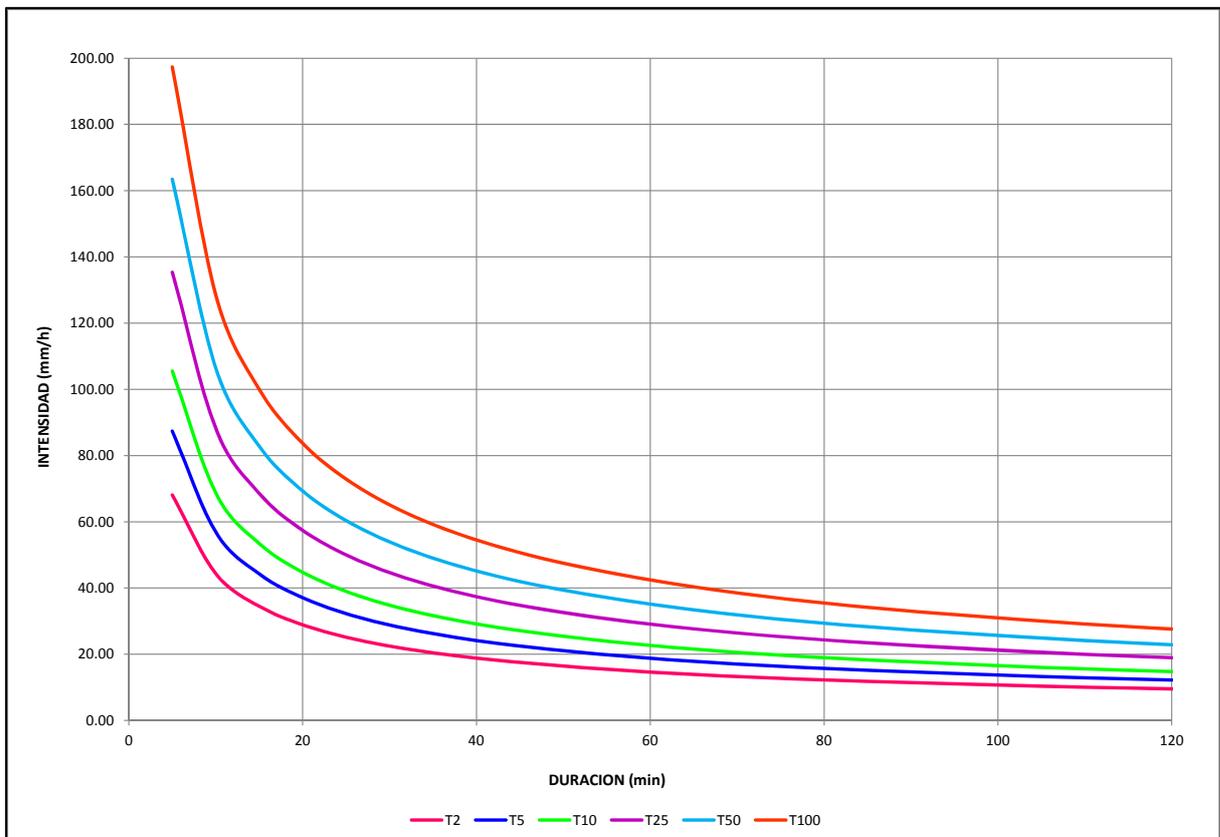


Figura N° 13: Curvas IDF Estación Meteorológica Comodoro Rivadavia

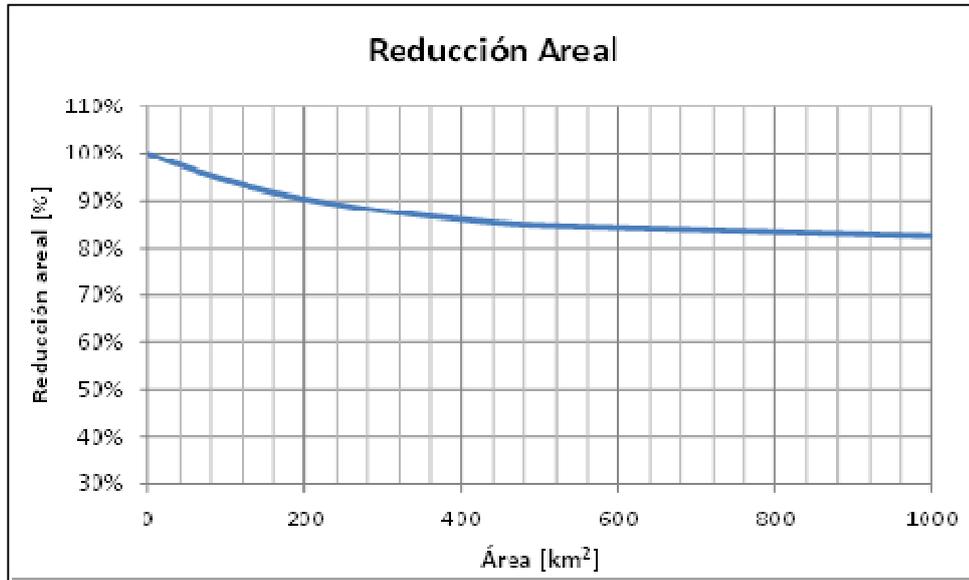


Figura N° 14: Decaimiento espacial de precipitación

#### Sección 4.05 Hietogramas de Precipitación

Los hietogramas de precipitación aplicados se obtuvieron mediante la aplicación del método de bloques alternos a partir de la ecuación de lluvia determinada mediante el análisis estadístico de datos pluviométricos, considerando un avance de tormenta de  $r=0,3$ , es decir que el pico de intensidad de precipitación se produce a un tercio de la duración de la misma. Los hietogramas generados se presentan en la Figura N° 15 a Figura N° 18.

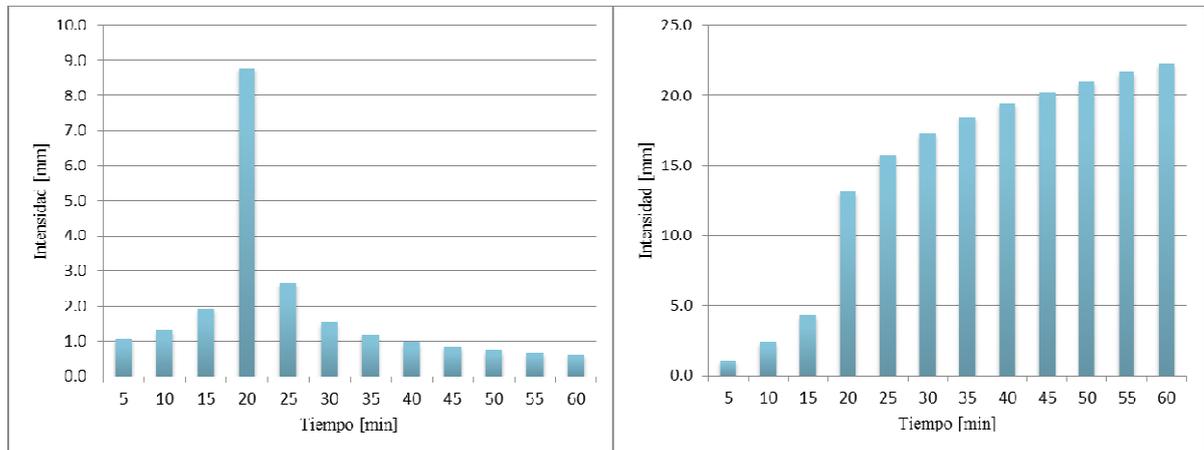
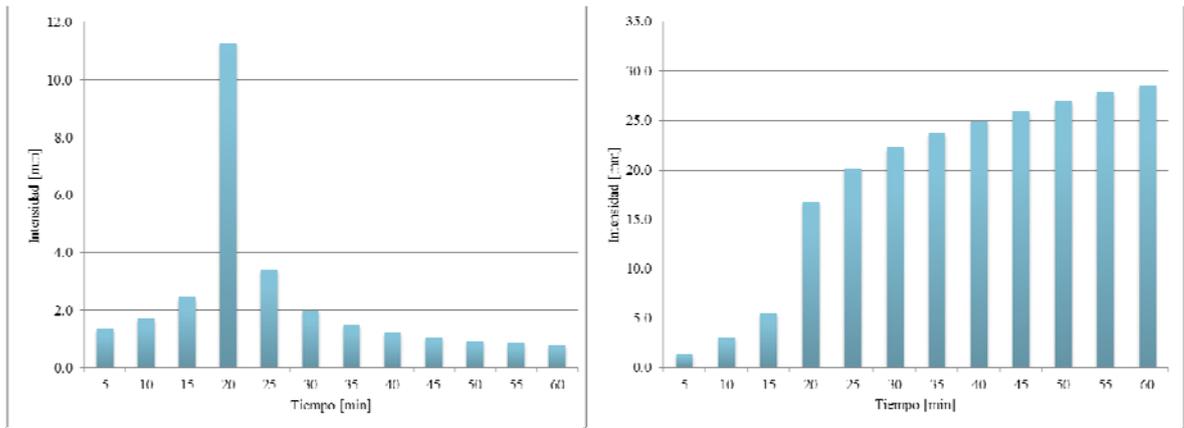
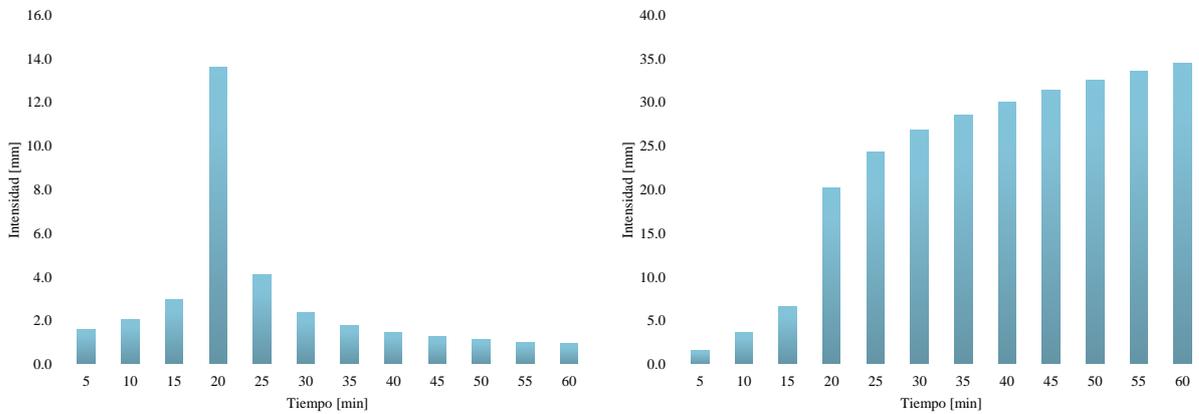


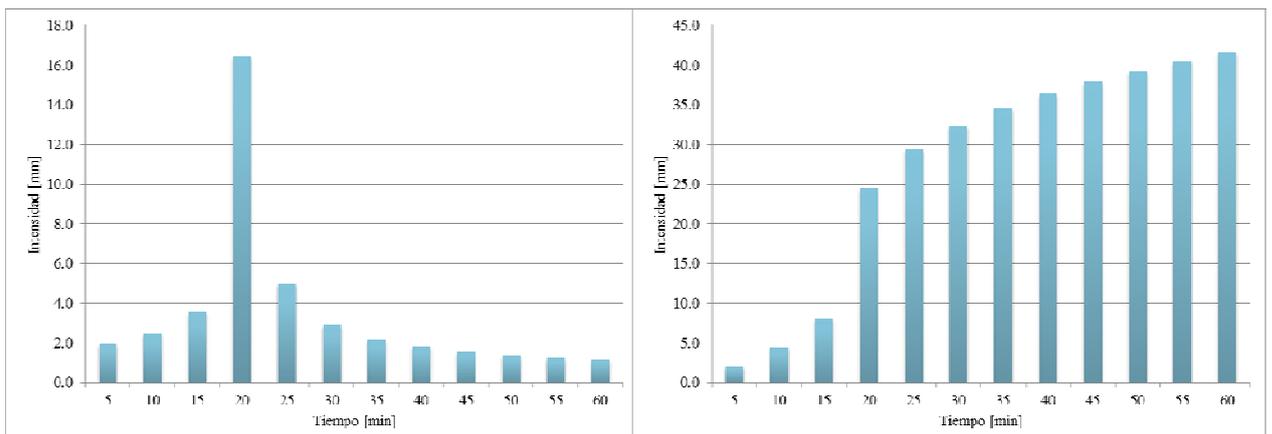
Figura N° 15: Hietogramas instantáneo y acumulado para TR=10 años



**Figura N° 16: Hietogramas instantáneo y acumulado para TR=25 años**



**Figura N° 17: Hietogramas instantáneo y acumulado para TR=50 años**



**Figura N° 18: Hietogramas instantáneo y acumulado para TR=100 años**

Adicionalmente se aplicó una tormenta para la cual precipitan 60 mm en 10 minutos emulando las condiciones de la tormenta registrada el 30 de abril de 2017, de acuerdo a lo expuesto en el documento "Sistemas fluviales efímeros e inundaciones repentinas en Comodoro Rivadavia: causas,

procesos y mitigaciones.” En el documento mencionado, se presentan los registros de precipitación horarios de un pluviómetro perteneciente a la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB) y han sido tomados como referencia para la modelación de un escenario adicional.

#### Sección 4.06 **Aplicación del Modelo de Simulación Hidrológica HEC-HMS**

El modelo HEC-HMS ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del United States Corps of Engineers. La versión utilizada en este estudio es la 3.5.

El Sistema de Modelación Hidrológica (HMS por sus siglas en inglés) está diseñado para simular el proceso de precipitación y escurrimiento de sistemas de cuencas dendríticas. Se aplica en un amplio rango de áreas geográficas para resolver distintos tipos de problemas. Estos incluyen hidrología de grandes cuencas, inundaciones, escurrimientos en cuencas urbanas y rurales, etc. Los hidrogramas generados por el programa se utilizan directamente o en conjunto con otras aplicaciones en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de caudales, impacto de futuras urbanizaciones, diseño de vertederos, reducción de daños por inundaciones, regulación de llanuras de inundación, etc.

Este programa cuenta con un ambiente de trabajo completamente integrado, el que incluye una base de datos, herramientas para el ingreso de datos, el motor de cálculo y herramientas de información de resultados.

Para el pronóstico de caudales de crecidas se deben ingresar los datos de la cuenca, los datos meteorológicos y los parámetros de salida de los resultados.

##### 4.06.1 Datos de la Cuenca

La cuenca es representada en el modelo mediante elementos hidrológicos conectados en una red dendrítica que simula los procesos de derrame. Los elementos utilizados en el modelo fueron subcuencas, conducciones y confluencias. Para su composición se procedió desde aguas arriba hacia aguas abajo.

A continuación debe optarse por alguno de los métodos disponibles para la simulación de las pérdidas por infiltración, para la transformación del exceso de precipitación en derrame y para la propagación de la crecida por el cauce.

##### *i. Método CN para el Cálculo de las Pérdidas por Infiltración*

En apartados previos se han analizado las características del área en lo que se refiere a vegetación, cobertura vegetal, suelos y geomorfología.

Para la determinación de los coeficientes de escurrimiento de las cuencas se ha utilizado la metodología de Número de Curva CN del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos, ampliamente difundida y aplicada a nivel internacional y local.

Esta se basa en analizar los tres factores fundamentales que inciden en la capacidad de retención o escurrimiento de una cuenca:

- Características del suelo
- Características de la cobertura vegetal
- Condición de humedad del suelo

La combinación de estos tres factores origina el llamado “CN” o número de curva, que es el coeficiente de escurrimiento, el cual puede tomar valores entre 1 y 100 (100 = máximo potencial de escurrimiento, es decir, todo lo que precipita escurre).

Debe tenerse en cuenta que, desde el punto de vista hidrológico, el concepto de suelo no es aplicable en sentido estricto. A efectos de determinar las pérdidas por infiltración se asume como tal a toda la cubierta superior del terreno más o menos permeable, capaz o no de soportar vegetación, incluyendo rocas diaclasadas y fragmentadas.

Este parámetro es compatible con la mayoría de los modelos hidrológicos determinísticos de eventos aislados o continuos, lo que lo convierte en una excelente herramienta para la modelación hidrológica. Además, ha sido usado en numerosos estudios en la zona andina y ha sido calibrado en varias cuencas, previa adaptación a las características de la geomorfología y de la vegetación local, ya que originalmente fue desarrollado para zonas rurales y suburbanas.

Su principal ventaja la constituye la simplicidad de las estimaciones y la posibilidad de síntesis que brinda. En efecto, clasifica los suelos en sólo cuatro grupos A, B, C y D, en orden creciente de potencial de escurrimiento. La cobertura se analiza en función del tipo (arbórea, arbustiva, herbácea, mantillo, etc.) y el grado de cobertura.

Luego se determinan los complejos suelo – cobertura por combinación de los grupos hidrológicos de suelo con la cobertura vegetal y finalmente se determina la “Condición de Humedad Antecedente” (CHA) entre tres niveles posibles que van de I (suelo seco) al III (suelo saturado).

Otro parámetro que se tiene en cuenta es la abstracción inicial, que contempla las pérdidas por intercepción, y que se calcula con base en la siguiente expresión de origen empírico:

$$Ia = \left[ \frac{25400}{CN} - 254 \right]^{0.55}$$

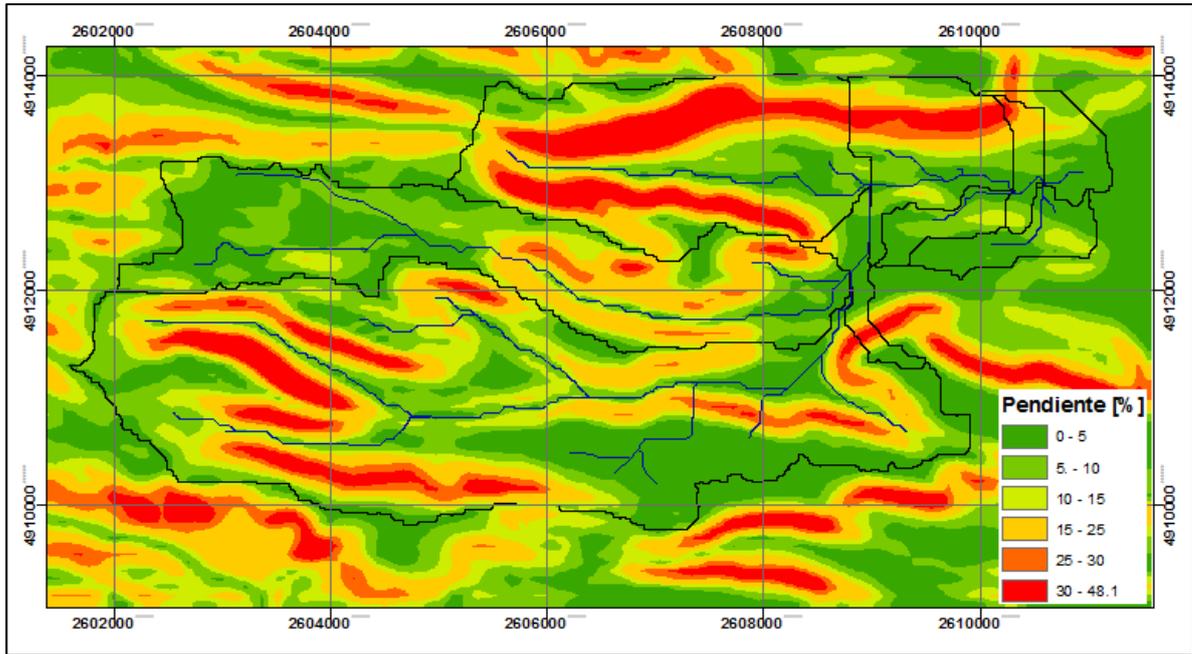
Como se ha dicho, el valor del parámetro número de curva para condiciones medias de humedad en el suelo depende del uso del suelo, las características hidrológicas, la pendiente del terreno y el tipo de suelo.

### Mapa de Pendientes

Una de las variables necesarias para definir el número de curva es la pendiente. Aún cuando el escurrimiento –y por ende, el CN-, varía con la pendiente para todos los valores de ésta, se considera suficiente clasificarla en dos grupos, menor al 3%, o mayor o igual al 3%.

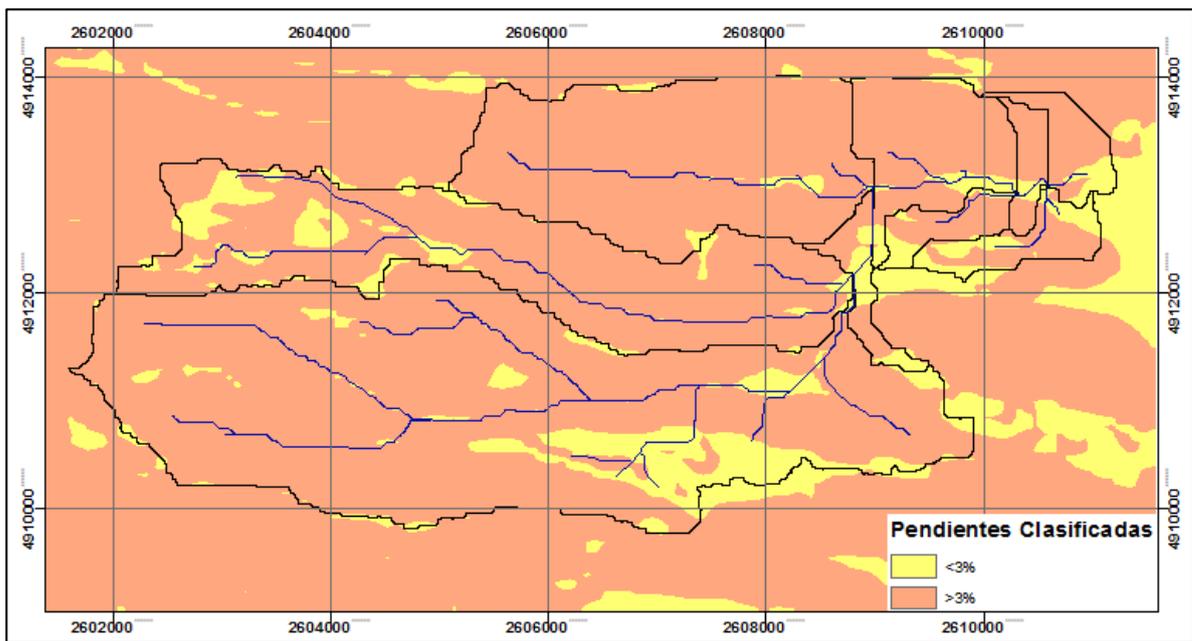
Para la obtención del mapa de pendientes debe contarse con un Modelo de Elevación Digital o DEM. En este caso, el DEM utilizado es el mismo que se ha utilizado para la delimitación de las subcuencas y que se muestra en la Figura N° 7.

El tratamiento de este archivo permitió obtener a continuación el mapa de pendientes del área, el cual puede verse en la Figura N° 19.



**Figura N° 19: Mapa de pendientes**

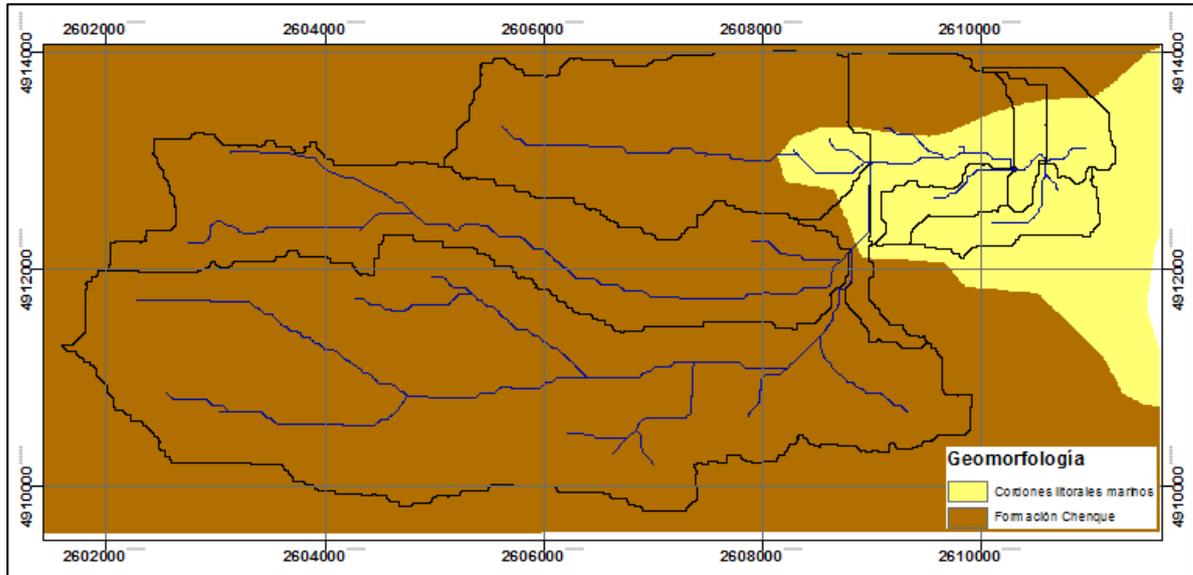
Teniendo en cuenta que se evaluarán por separado las áreas con pendientes menores y mayores al 3%, el mapa anterior fue reclasificado según este criterio, obteniéndose el que se observa en la Figura N° 20.



**Figura N° 20: Pendientes clasificadas**

### Mapa de Geomorfología

El mapa de geomorfología de las cuencas de aporte fue incorporado al modelo SIG mediante su digitalización, escalamiento y georreferenciación, obteniéndose el mapa de la Figura N° 21



**Figura N° 21: Mapa geomorfológico digitalizado**

### Mapa de Cobertura Vegetal

Se considera que el porcentaje de cobertura es uniforme en el área en estudio, del orden del 25%. Este valor se toma en cuenta en la elección del CN, pero no modifica las combinaciones de las variables entre los distintos mapas.

### Mapa de Suelos

Este mapa debe tener en cuenta la clasificación hidrológica en cuatro grupos que establece el SCS:

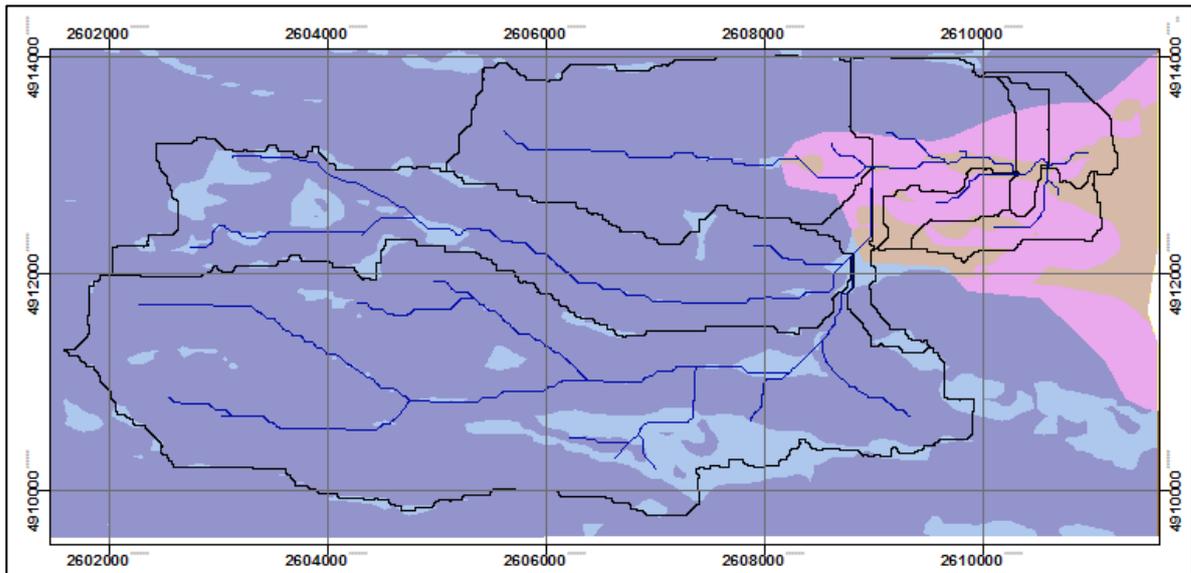
- A. En ellos el agua se infiltra rápidamente, aun cuando estén muy húmedos. Profundos y de texturas gruesas (arenosas o areno-limosas), están excesivamente drenados.
- B. Cuando están muy húmedos tienen una capacidad de infiltración moderada. La profundidad de suelo es de media a profunda y su textura es franco-arenosa, franca, francoarcillosa o franco-limosa. Están bien o moderadamente drenados.
- C. Cuando están muy húmedos la infiltración es lenta. La profundidad de suelo es inferior a la media y su textura es franco-arcillosa, francoarcillo-limosa o arcillo-arenosa. Son suelos imperfectamente drenados.
- D. Cuando están muy húmedos la infiltración es muy lenta. Tienen horizontes de arcilla en la superficie o próximos a ella y están pobremente o muy pobremente drenados. También se incluyen aquí los terrenos con nivel freático permanentemente alto y suelos de poco espesor (litosuelos).

El tipo de suelo en la zona bajo análisis no presenta variaciones. El tipo de suelo presente en la zona se toma en cuenta en la elección del CN, pero no modifica las combinaciones de las variables entre los distintos mapas.

### Mapa de Combinación de Variables

Mediante operaciones de álgebra de mapas efectuadas en el entorno SIG, se obtuvieron todas las combinaciones posibles de variables entre los distintos mapas. Dichas operaciones consistieron en multiplicar los valores de los números primos de las celdas de igual posición de cada uno de los mapas obtenidos. El uso de número primos se basa en que el producto entre combinaciones de ellos siempre da un número diferente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se obtuvo un mapa donde cada celda tiene asignado un valor que representa una combinación única de factores. En el mapa mostrado en la Figura N° 22, cada color representa las combinaciones de factores resultantes.

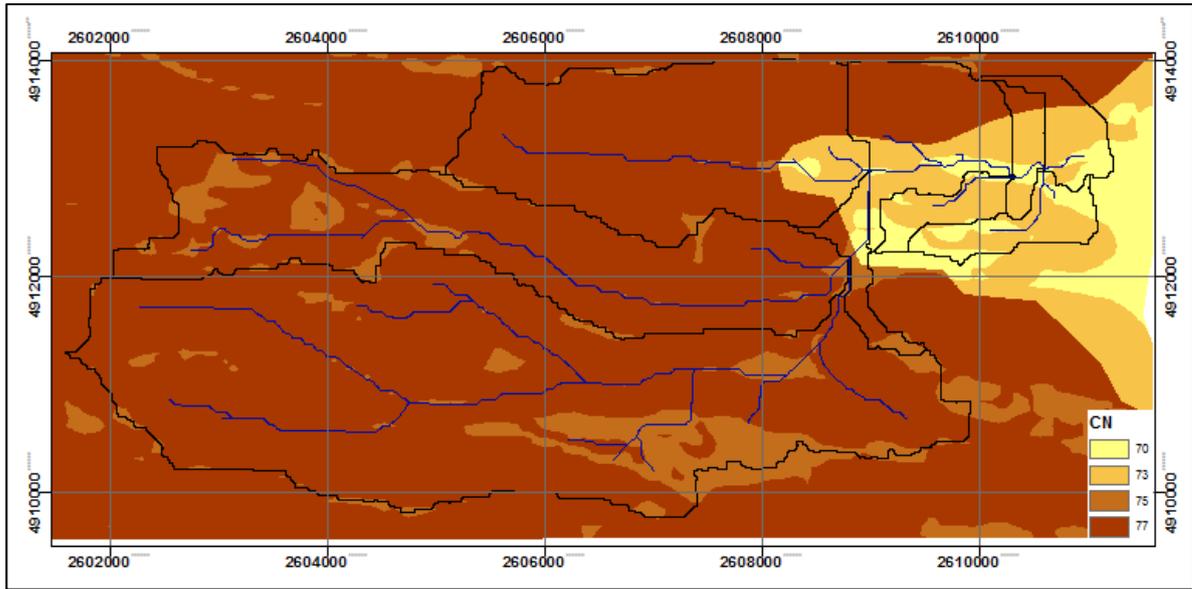


**Figura N° 22: Mapa resultante de la combinación de variables**

Los valores de CN se determinaron para una condición inicial de humedad intermedia AMII (AMI, suelo seco y AMIII, suelo saturado), valor intermedio entre la capacidad de campo y marchitez permanente, provocada por una lluvia de mediana importancia dentro de los cinco días previos a la tormenta de diseño.

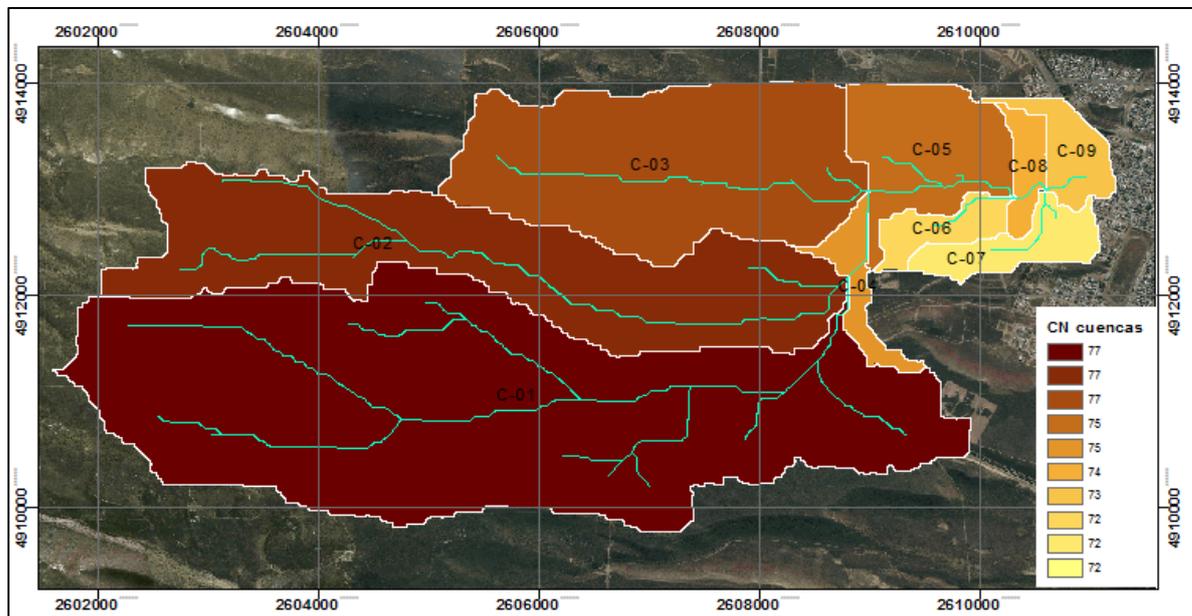
#### Mapas de Curve Number (CN)

Con los valores asignados de CN a cada zona delimitada se elaboró el mapa de CN o Curve Number del área en estudio. Ver Figura N° 23.



**Figura N° 23: Mapa de CN**

Para determinar el CN promedio a asignar a cada una de las cuencas, se las superpuso en el mapa de zonificación de CN. El SIG contiene herramientas que permiten determinar las superficies de los sectores con igual CN para cada cuenca, información que se procesa posteriormente para calcular el CN promedio en cada una de ellas. Los promedios obtenidos para cada cuenca se resumen en la Figura N° 24 y en la Tabla N° 2.



**Figura N° 24: Valores de CN promedio correspondiente a cada cuenca**

Cuenca	CN
C-01	78
C-02	78
C-03	78
C-04	76
C-05	76
C-06	73
C-07	73
C-08	75
C-09	74

**Tabla N° 2: Valores de CN promedio correspondientes a las cuencas delimitadas**

ii. Método del Hidrograma Unitario SCS

El método del SCS se basa en un hidrograma unitario adimensional y requiere como dato el tiempo de retardo  $t_{lag}$ , que es la diferencia de tiempo entre el centro de masa del exceso de lluvia y el pico del hidrograma unitario en la salida de la cuenca. Ver la Figura N° 25.

Este tiempo de retardo se define como:

$$t_{lag} = 0.6 tc$$

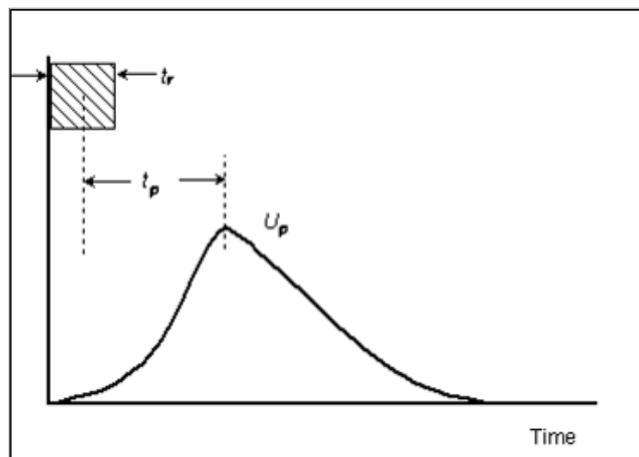
siendo el tiempo de concentración:

$$tc = t_{lámina} + t_{bajío} + t_{canal}$$

$t_{lámina}$  es el tiempo de tránsito del escurrimiento sobre la superficie del terreno

$t_{bajío}$  es el tiempo de tránsito del escurrimiento en tramos de poca profundidad

$t_{canal}$  es el tiempo de tránsito del escurrimiento por los cauces principales



**Figura N° 25: Hidrograma unitario, duración de la tormenta y tiempo de retardo**

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizó la fórmula de Kirpich:

$$t_c = 3.98 \left( \frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad [\text{Kirpich}]$$

Donde  $t_c$  es el tiempo de concentración en minutos,  $L$  la longitud del cauce en km y  $S$  la pendiente media del cauce en m/m.

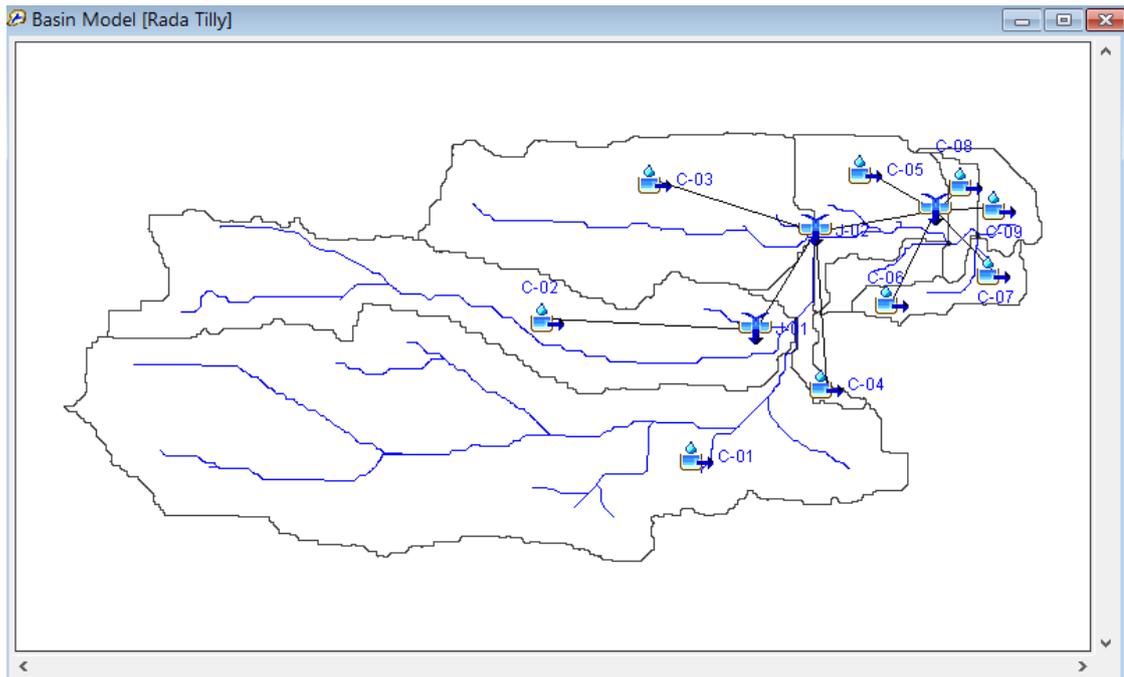
Los valores de tiempo de concentración y de retardo para cada una de las cuencas delimitadas se presentan en la Tabla N° 3.

Cuenca	Área km <sup>2</sup>	LC m	Desnivel m	i %	Área Cubierta %	CN	S mm	la mm	Tc Kirpich hs	Tlag hs	Tlag min
C-01	13.1	4764.0	80.7	1.69	0.00	78	72	10	1.06	0.63	38.00
C-02	5.9	6255.0	189.5	3.03	0.00	78	72	10	1.26	0.75	45.28
C-03	4.9	3577.0	151.7	4.24	0.00	78	72	10	1.00	0.60	35.90
C-04	0.4	875.0	27.2	3.11	0.00	76	80	11	0.23	0.14	8.15
C-05	1.6	1451.0	22.8	1.57	0.00	76	80	11	1.46	0.88	52.63
C-06	0.5	873.0	28.8	3.30	0.00	73	94	12	0.97	0.58	35.10
C-07	0.7	830.0	32.9	3.97	0.00	73	94	12	0.66	0.40	23.93
C-08	0.3	367.0	5.0	1.35	0.00	75	85	11	1.20	0.72	43.02
C-09	0.5	426.0	8.0	1.88	0.00	74	89	12	1.21	0.73	43.62

**Tabla N° 3: Parámetros morfométricos de las cuencas delimitadas**

#### 4.06.2 Preparación del Modelo

Mediante rutinas específicas de aplicaciones GIS se procedió a digitalizar los bordes de las subcuencas y los cursos de agua incluidos en ellas. Esta información se almacenó en un archivo \*.map, el que luego fue leído por el programa, permitiendo la visualización de subcuencas y cauces en la pantalla gráfica del modelo. El esquema resultante puede verse en la Figura N° 26.



**Figura N° 26: Pantalla gráfica con disposición de cuencas y esquema resultante del modelo**

#### 4.06.3 Datos Meteorológicos

Como datos de ingreso al programa de simulación hidrológica HEC-HMS, se utilizaron las tormentas de diseño descritas en la sección Estudio de las Precipitaciones – Definición de la Tormenta de Diseño, en la página 15. A las tormentas mencionadas se les aplicaron los porcentajes de reducción areal indicados en la sección Relación Lámina Área.

#### 4.06.4 Resultados Obtenidos

Elemento Hidrológico	Área Drenada km <sup>2</sup>	Descarga Pico m <sup>3</sup> /s	Tiempo al Pico	Volumen x 1000m <sup>3</sup>
C-01	13.1	33.4	20jul2018, 02:11	127.19
C-02	5.9	13.4	20jul2018, 02:19	57.29
C-03	4.9	12.9	20jul2018, 02:09	47.58
C-04	0.4	1.9	20jul2018, 01:30	3.39
C-05	1.6	2.8	20jul2018, 02:27	13.57
C-06	0.5	1.2	20jul2018, 01:54	3.56
C-07	0.7	1.4	20jul2018, 02:09	4.99
C-08	0.3	0.6	20jul2018, 02:18	2.45
C-09	0.5	0.9	20jul2018, 02:18	3.70
J-01	5.9	13.4	20jul2018, 02:19	57.29
J-02	11.2	26.1	20jul2018, 02:12	108.26
J-03	14.8	32.3	20jul2018, 02:13	136.53

**Figura N° 27: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para TR=100 años**

Elemento Hidrológico	Área Drenada km <sup>2</sup>	Descarga Pico m <sup>3</sup> /s	Tiempo al Pico	Volumen x 1000m <sup>3</sup>
C-01	13.1	21.5	20jul2018, 02:13	81.79
C-02	5.9	8.6	20jul2018, 02:21	36.84
C-03	4.9	8.3	20jul2018, 02:10	30.59
C-04	0.4	1.1	20jul2018, 01:31	2.13
C-05	1.6	1.8	20jul2018, 02:28	8.52
C-06	0.5	0.7	20jul2018, 01:56	2.17
C-07	0.7	0.8	20jul2018, 02:11	3.04
C-08	0.3	0.4	20jul2018, 02:20	1.53
C-09	0.5	0.6	20jul2018, 02:20	2.27
J-01	5.9	8.6	20jul2018, 02:21	36.84
J-02	11.2	16.7	20jul2018, 02:13	69.56
J-03	14.8	20.6	20jul2018, 02:14	87.09

Figura N° 28: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para TR=50 años

Elemento Hidrológico	Área Drenada km <sup>2</sup>	Descarga Pico m <sup>3</sup> /s	Tiempo al Pico	Volumen x 1000m <sup>3</sup>
C-01	13.1	13.4	20jul2018, 02:15	50.71
C-02	5.9	5.4	20jul2018, 02:22	22.84
C-03	4.9	5.2	20jul2018, 02:12	18.97
C-04	0.4	0.6	20jul2018, 01:33	1.28
C-05	1.6	1.1	20jul2018, 02:30	5.12
C-06	0.5	0.4	20jul2018, 02:01	1.26
C-07	0.7	0.5	20jul2018, 02:13	1.76
C-08	0.3	0.2	20jul2018, 02:21	0.92
C-09	0.5	0.3	20jul2018, 02:22	1.32
J-01	5.9	5.4	20jul2018, 02:22	22.84
J-02	11.2	10.4	20jul2018, 02:15	43.08
J-03	14.8	12.7	20jul2018, 02:16	53.46

Figura N° 29: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para TR=25 años

Elemento Hidrológico	Área Drenada km <sup>2</sup>	Descarga Pico m <sup>3</sup> /s	Tiempo al Pico	Volumen x 1000m <sup>3</sup>
C-01	13.1	6.3	20jul2018, 02:17	23.61
C-02	5.9	2.5	20jul2018, 02:24	10.63
C-03	4.9	2.5	20jul2018, 02:15	8.83
C-04	0.4	0.2	20jul2018, 01:40	0.56
C-05	1.6	0.5	20jul2018, 02:33	2.23
C-06	0.5	0.2	20jul2018, 02:07	0.51
C-07	0.7	0.2	20jul2018, 02:17	0.71
C-08	0.3	0.1	20jul2018, 02:24	0.40
C-09	0.5	0.1	20jul2018, 02:25	0.53
J-01	5.9	2.5	20jul2018, 02:24	10.63
J-02	11.2	4.9	20jul2018, 02:19	20.02
J-03	14.8	5.9	20jul2018, 02:19	24.41

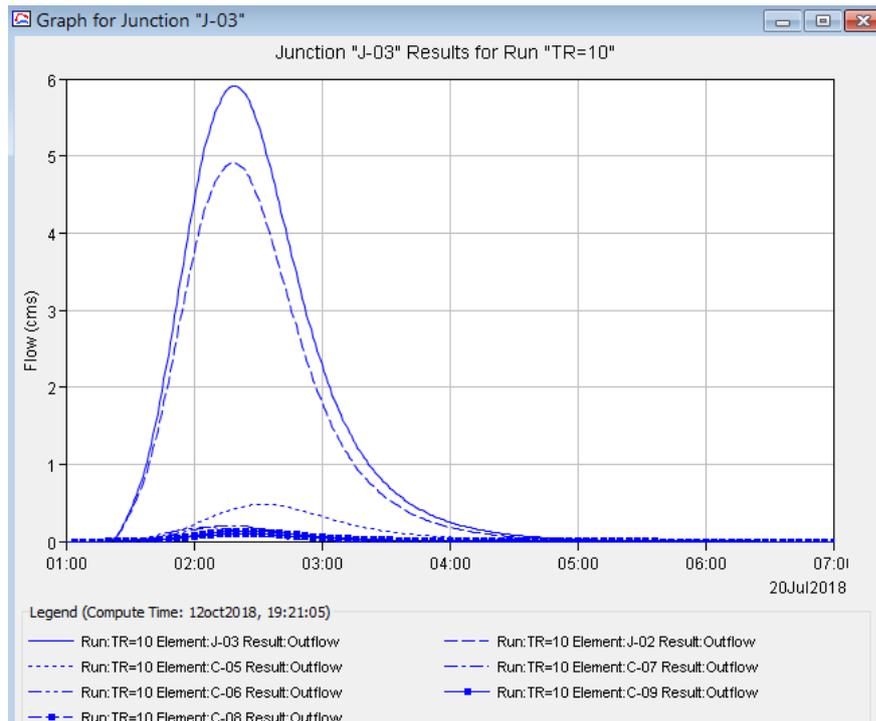
Figura N° 30: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para TR=10 años

Elemento Hidrológico	Área Drenada km <sup>2</sup>	Descarga Pico m <sup>3</sup> /s	Tiempo al Pico	Volumen x 1000m <sup>3</sup>
C-01	13.1	132.2	20jul2018, 02:03	457.09
C-02	5.9	51.5	20jul2018, 02:11	205.87
C-03	4.9	51.8	20jul2018, 02:01	170.97
C-04	0.4	12.4	20jul2018, 01:30	12.88
C-05	1.6	11.3	20jul2018, 02:19	51.51
C-06	0.5	6.0	20jul2018, 01:48	14.41
C-07	0.7	6.2	20jul2018, 02:00	20.17
C-08	0.3	2.4	20jul2018, 02:10	9.38
C-09	0.5	3.9	20jul2018, 02:09	14.84
J-01	5.9	51.5	20jul2018, 02:11	205.87
J-02	11.2	101.9	20jul2018, 02:04	389.72
J-03	14.8	127.6	20jul2018, 02:05	601.11

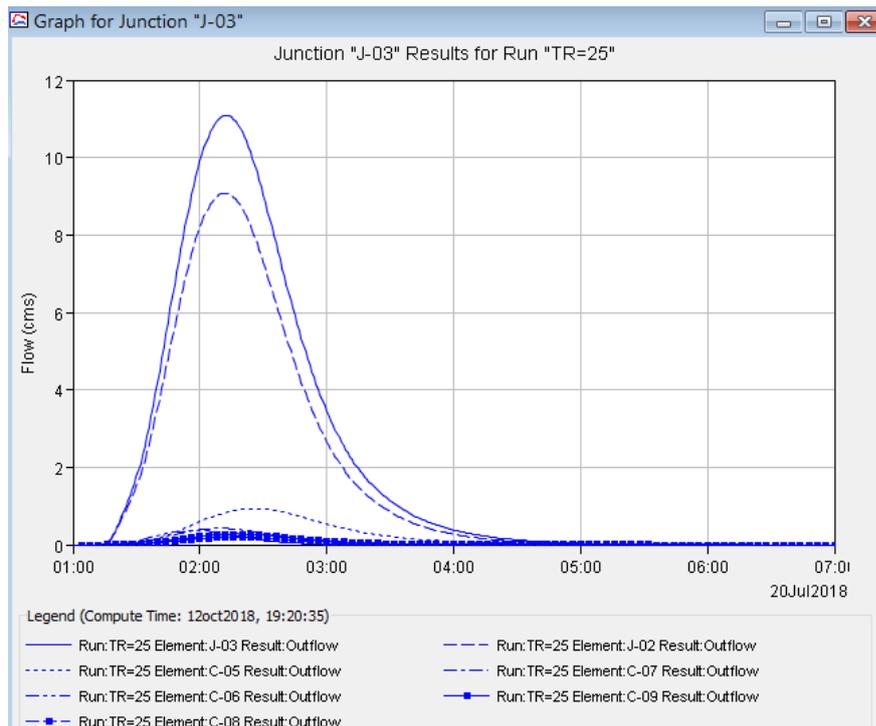
Figura N° 31: Área drenada, caudal, tiempo al pico y derrame para 60m en 10 minutos

#### 4.06.5 Hidrogramas

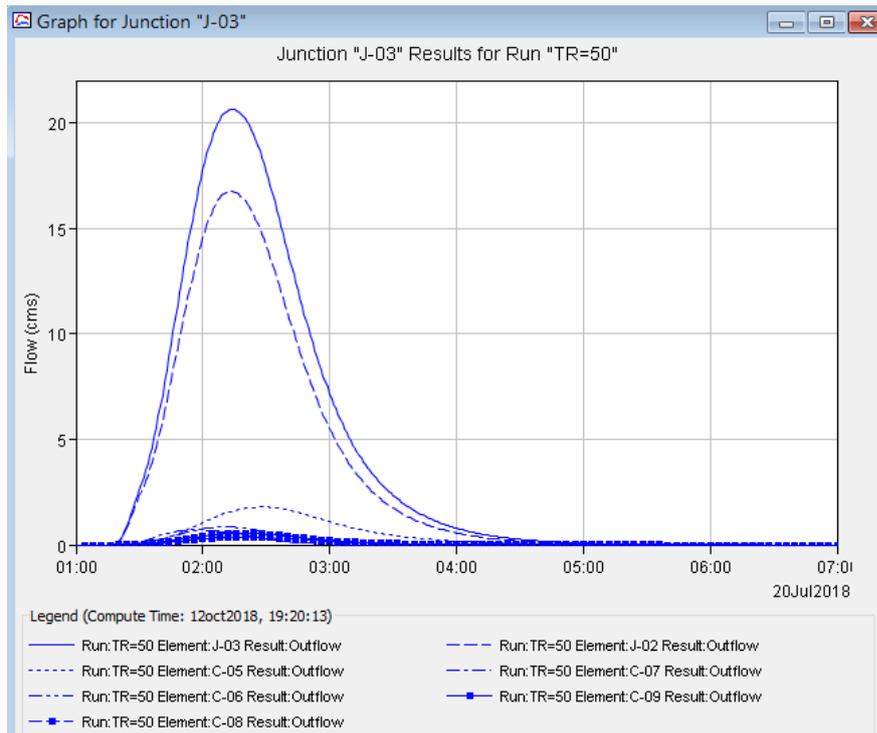
A continuación se presentan los hidrogramas de salida resultantes para el elemento J-03, correspondiente a la suma de los hidrogramas de salida de las cuencas de aporte de la laguna Kapenke, para los distintos escenarios modelados.



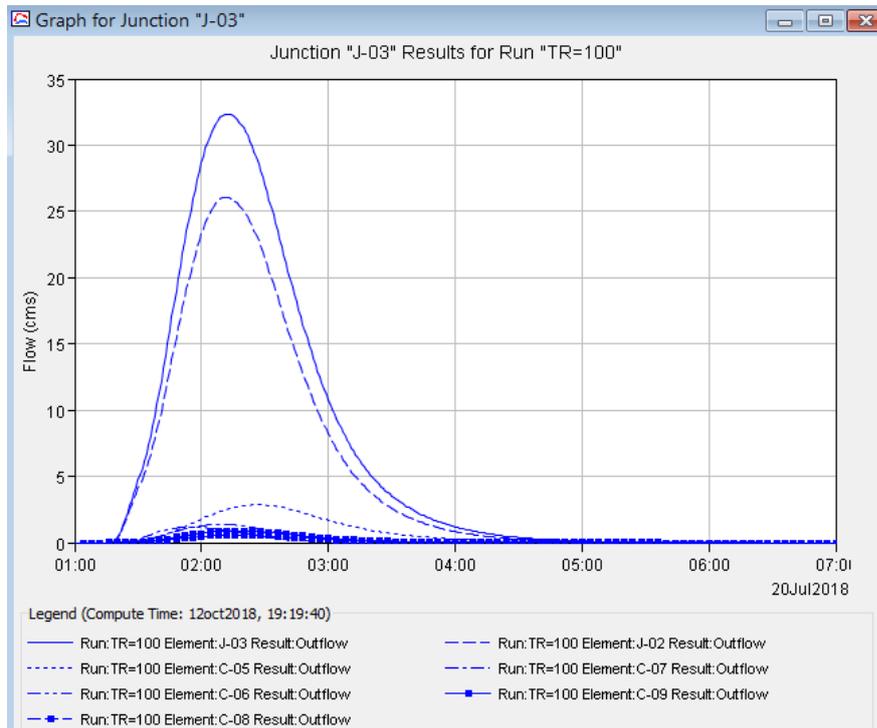
**Figura N° 32: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke TR=10 años**



**Figura N° 33: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke TR=25 años**



**Figura N° 34: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke TR=50 años**



**Figura N° 35: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke TR=100 años**

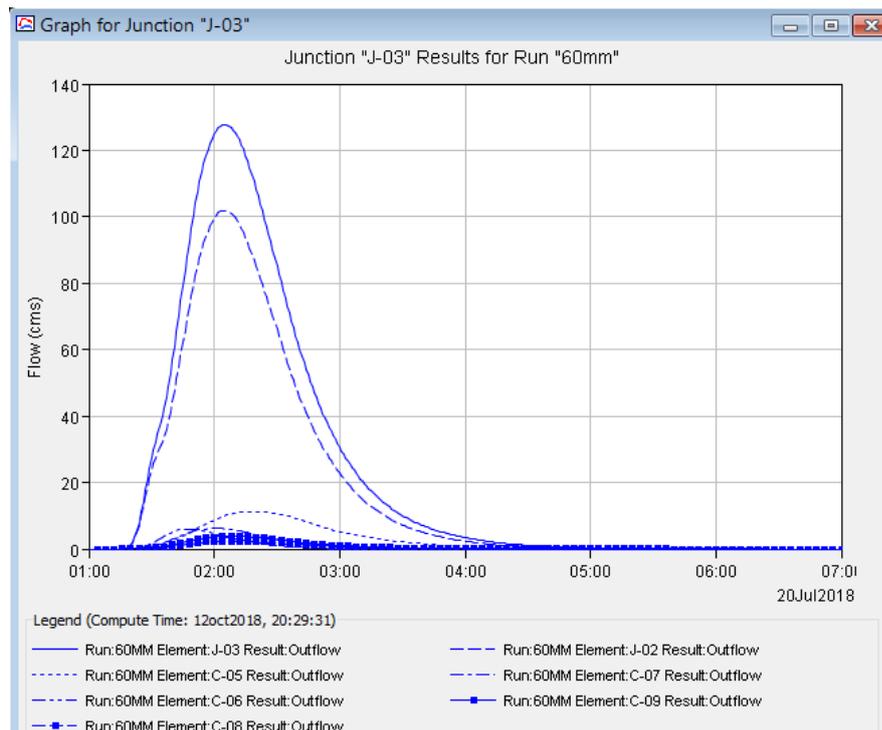


Figura N° 36: Hidrograma caudales de ingreso a la laguna Kapenke 60mm en 10 minutos

## ARTÍCULO 5. ANÁLISIS PLANIALTIMÉTRICO

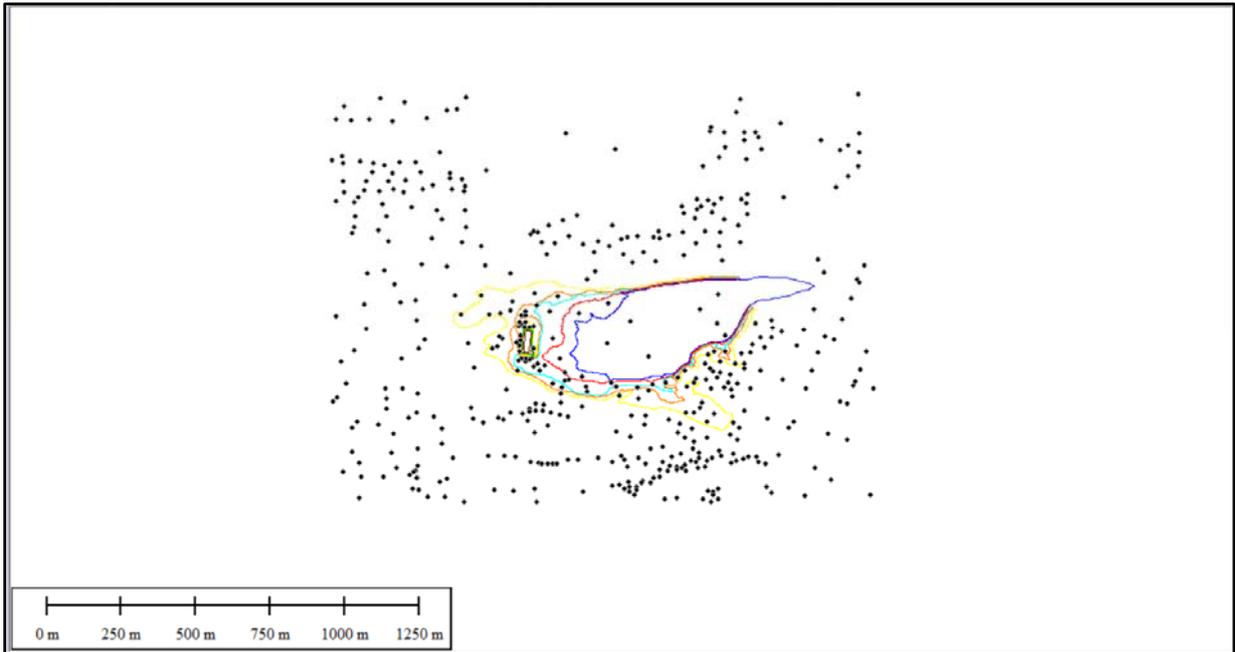
### Sección 5.01 Recopilación de antecedentes e información de base

Para la obtención del Modelo Digital del Terreno en el área donde se encuentra emplazada la laguna, se llevó a cabo el procesamiento de la información disponible en los siguientes archivos:

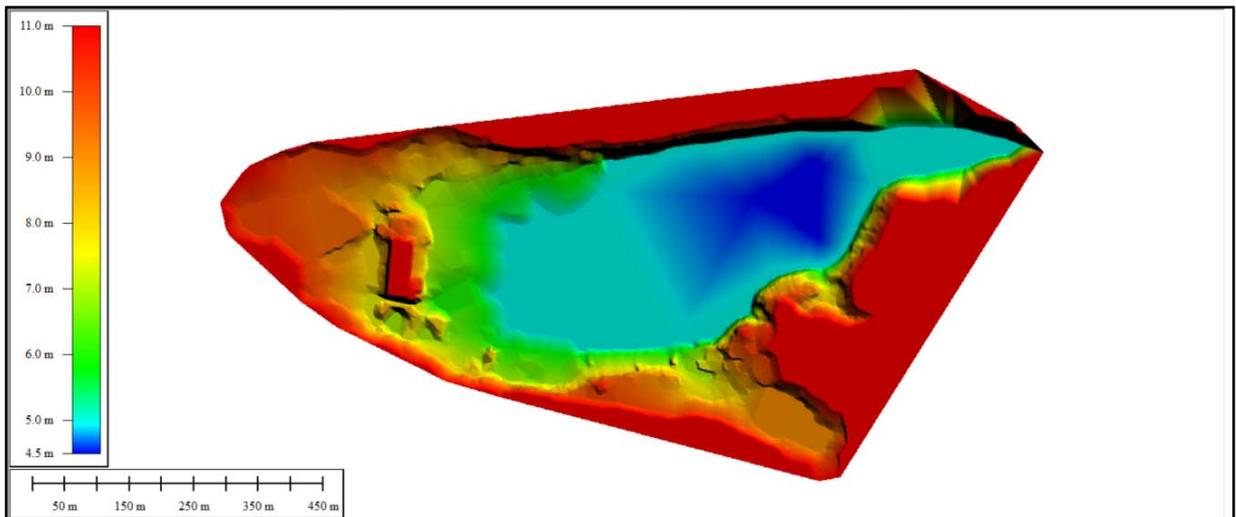
- Restitución completa.dwg
- Planta de niveles luis.dwg
- Copia de Histórico niveles laguna desde 02-2013 modif.xlsx

Algunas observaciones a tener en cuenta:

- La cota mínima es 6.37 m, dato obtenido de los parámetros de diseño para la construcción de un vertedero de excedencias.
- La cota máxima es de 11 m, 1 metro más que la cota indicada en la planilla de niveles históricos de la laguna. (Se adoptó este criterio teniendo en cuenta que la cota de nivel de terreno natural en la zona de la planta es de 12 m.)
- Para la obtención de las curvas de nivel de base, se identificaron y digitalizaron los puntos (asignándoles el valor de cota z a cada uno, un total de 471 puntos en la zona de influencia de la laguna) y las curvas del plano de Restitución, incorporando además, los puntos de nivel de terreno natural, obtenidos del relevamiento de niveles en la zona de la planta de tratamiento.
- Mediante la sumatoria de puntos y curvas, se obtuvo el DEM del sector. (Ver Figura N° 37 y Figura N° 38).



**Figura N° 37: Puntos y curvas procesadas**



**Figura N° 38: DEM Laguna y zona de influencia.**

Obtenido el DEM del terreno en la zona donde se ubica la laguna, se procedió a generar curvas de nivel con una equidistancia de 0,5 metros. (Ver Figura N° 39).





Figura N° 41: Validación curvas de nivel – Imagen Google Earth 2003.

### Sección 5.02 Generación de Cota/Área y Cota/Volumen Cubicación de la capacidad de almacenamiento

Se utilizaron las curvas de nivel obtenidas del DEM para la generación de las curvas Cota/Área y Cota/Volumen de la laguna.

Se trabajó con el software AutoCAD Civil 3D, se procesaron las curvas de nivel y se obtuvieron de manera automática los valores de áreas entre curvas, un resumen del análisis puede verse en la Figura N°6.

Elevations Table				
Number	Minimum Elevation	Maximum Elevation	Area	Color
1	4.00	4.50	0.00	
2	4.50	5.00	148531.66	
3	5.00	5.50	15732.03	
4	5.50	6.00	15216.26	
5	6.00	6.50	13651.80	
6	6.50	7.00	13765.88	
7	7.00	7.50	14645.23	
8	7.50	8.00	15974.36	
9	8.00	8.50	19547.09	
10	8.50	9.00	27006.71	
11	9.00	9.50	19015.37	
12	9.50	10.00	37187.59	
13	10.00	10.50	22040.91	
14	10.50	11.00	80534.37	

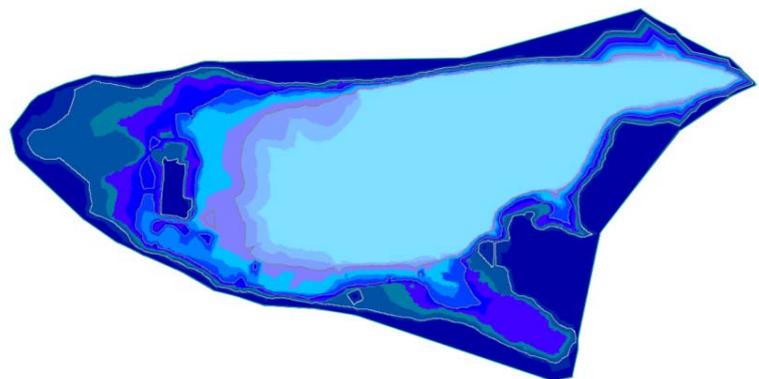


Figura N° 42: Planilla e imagen elevaciones/áreas, para un rango de 0,5 metros – AutoCAD Civil 3D

Con los valores determinados, se obtuvo el volumen almacenado entre curvas o volumen parcial y los volúmenes almacenados por cada cota o nivel de elevación (método de las áreas medias).

A continuación en la Tabla N°1 se pueden ver los valores calculados y en la Figura N° 43, Figura N° 44 las curvas Cota/Área y Cota/Volumen de la laguna.

INTERVALO	COTA [m]	ÁREAS ENTRE CURVAS [m <sup>2</sup> ]	ÁREAS PARCIALES [m <sup>2</sup> ]	ÁREAS ACUMULADAS [m <sup>2</sup> ]	ÁREAS PROMEDIO [m <sup>2</sup> ]	VOL. PARCIAL [m <sup>3</sup> ]	VOL. ACUMULADO [m <sup>3</sup> ]
1	4.5	0	0	0	0	0	0
2	5	148531.66	148531.66	148531.660	74265.83	37132.92	37132.92
3	5.5	15732.03	164263.69	312795.350	230663.51	115331.75	152464.67
4	6	16216.26	180479.95	344743.640	328769.50	164384.75	279716.50
5	6.5	18651.8	199131.75	379611.700	362177.67	181088.84	345473.58
6	7	19765.88	218897.63	418029.380	398820.54	199410.27	380499.11
7	7.5	14646.23	233543.86	452441.490	435235.44	217617.72	417027.99
8	8	15974.36	249518.22	483062.080	467751.79	233875.89	451493.61
9	8.5	19547.09	269065.31	518583.530	500822.81	250411.40	484287.30
10	9	27006.71	296072.02	565137.330	541860.43	270930.22	521341.62
11	9.5	19015.37	315087.39	611159.410	588148.37	294074.19	565004.40
12	10	37187.59	352274.98	667362.370	639260.89	319630.45	613704.63
13	10.5	22040.91	374315.89	726590.870	696976.62	348488.31	668118.76
14	11	80634.37	454950.26	829266.150	777928.51	388964.26	737452.57

Tabla N° 1: Planilla de cálculo de Áreas y Volúmenes.

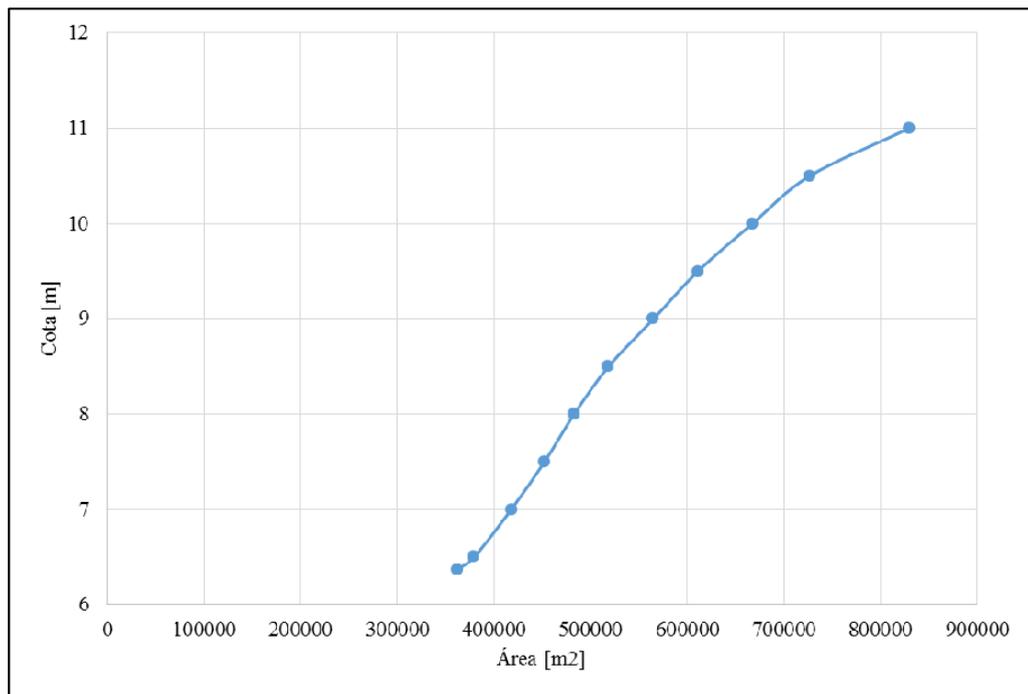
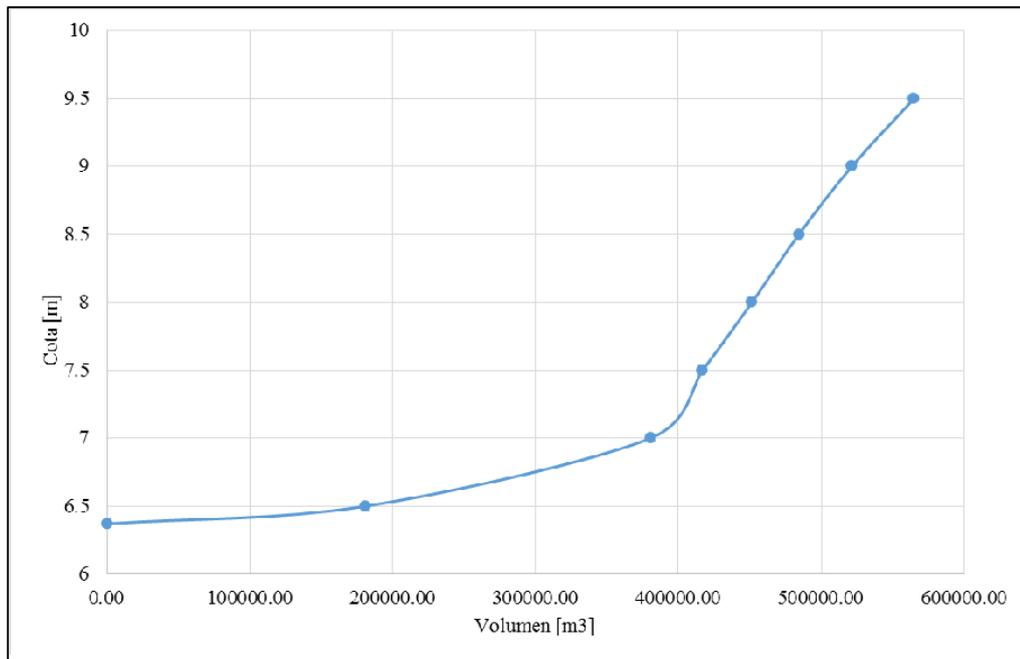


Figura N° 43: Curva Cota – Área.



**Figura N° 44: Curva Cota – Volumen.**

A continuación se indica la cota alcanzada para cada uno de los escenarios de tormenta analizados.

Tiempo de recurrencia	Volumen aportado [m3]	Cota alcanzada [m]
100 años	478692.61	8.41
50 años	429252.61	7.68
25 años	53460.00	7.20
10 años	24410.00	6.65

**Tabla N° 4: Cotas alcanzadas para los volúmenes aportados en cada escenario modelado**

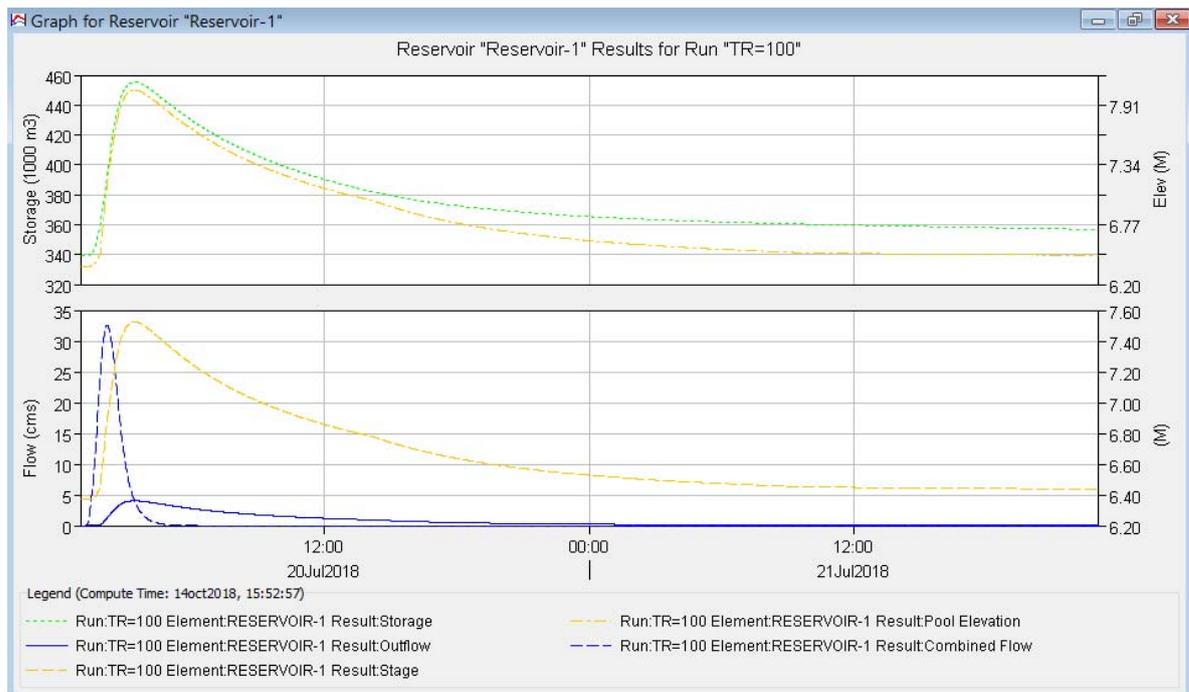
## ARTÍCULO 6. EFECTO DE LAMINACIÓN LAGUNA KAPENKE

Con el objeto de mantener un nivel estable en la laguna, se propone la construcción de un vertedero ubicado en el extremo noreste de la laguna, dicha estructura permitirá el volcado de excedentes cuando el nivel en la laguna supere la cota del labio del mismo para ser bombeados. El vertedero tendrá una longitud de 2 m con una cota de labio de 6,37 m.

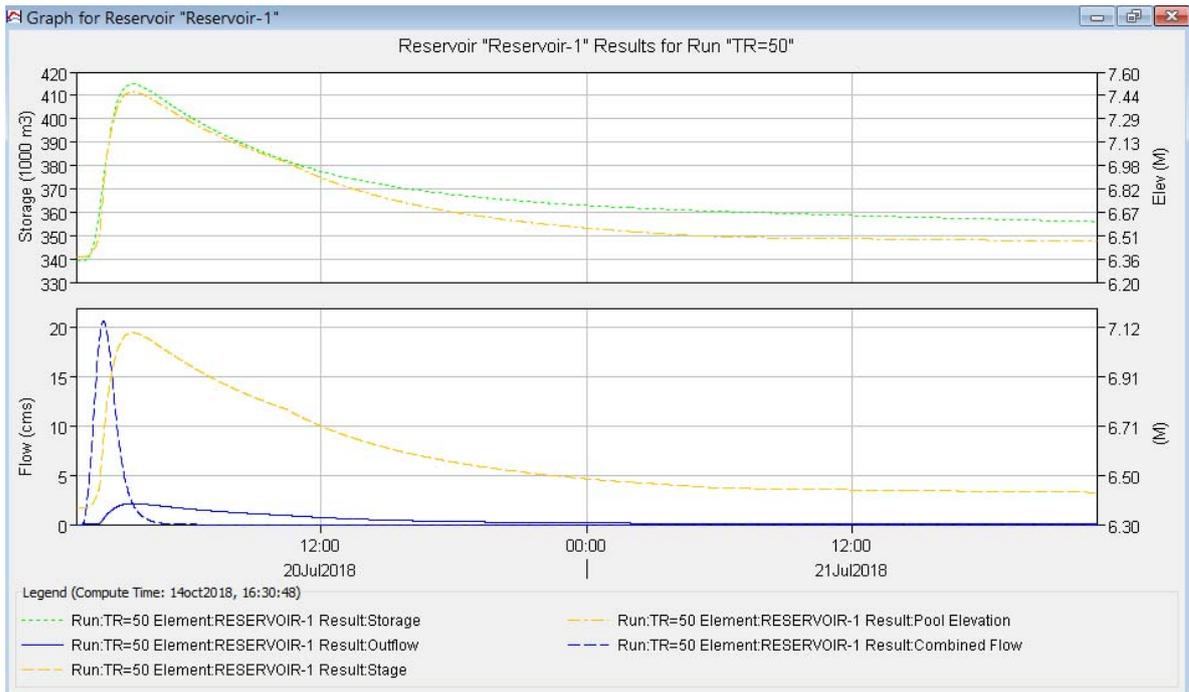
Conociendo dichos datos, se procede a modelar la laguna en el software HEC-HMS, utilizando el elemento Reservorio. Para ello es necesario ingresar los parámetros geométricos de la laguna (curva Cota-Almacenamiento, Cota-Área, elevación inicial del pelo de agua) y del vertedero (coeficiente de descarga, dimensiones). Una vez ingresados estos datos se procede a la modelación de los elementos para los distintos escenarios considerados.

### Sección 6.01 Laminación de Caudales Frente a Eventos Climáticos

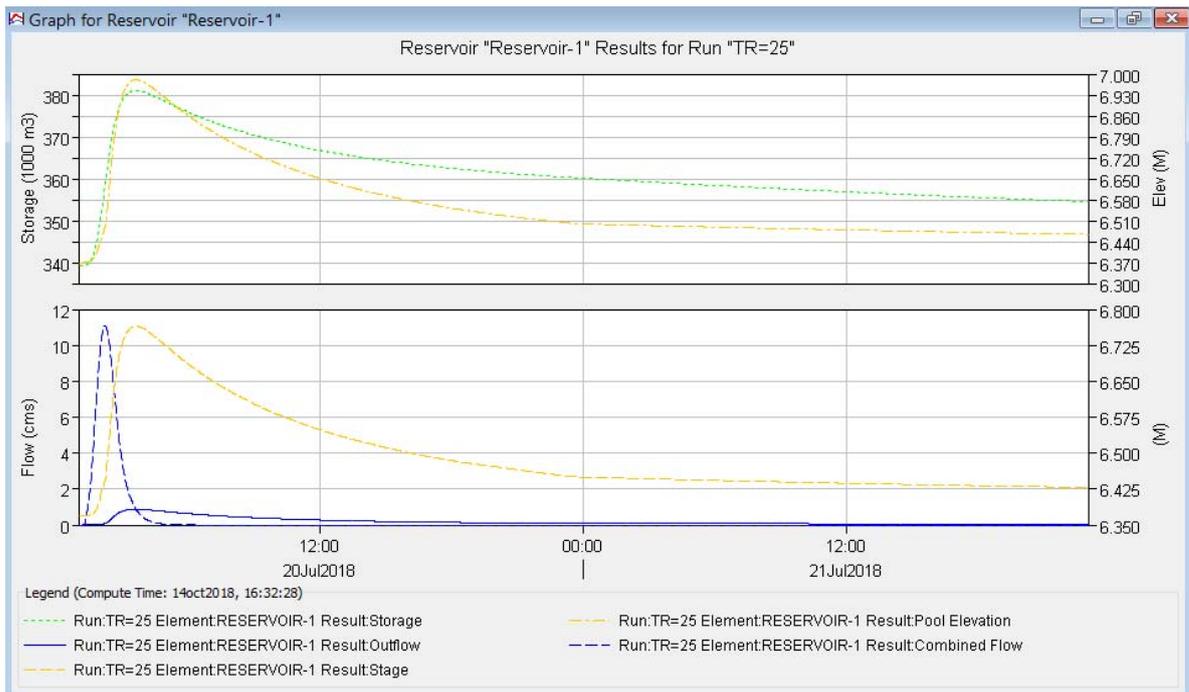
En la Figura N° 45 a Figura N° 48, se pueden ver los hidrogramas que reflejan el comportamiento del reservorio ante cada escenario modelado. En la parte superior de los gráficos, se observa el volumen almacenado y la cota alcanzada, mientras que en la parte inferior se presenta el hidrograma de ingreso de caudales y el hidrograma de salida. En la Figura N° 49 a Figura N° 52 se presentan los hidrogramas de salida, correspondientes a los caudales vertido a través del vertedero.



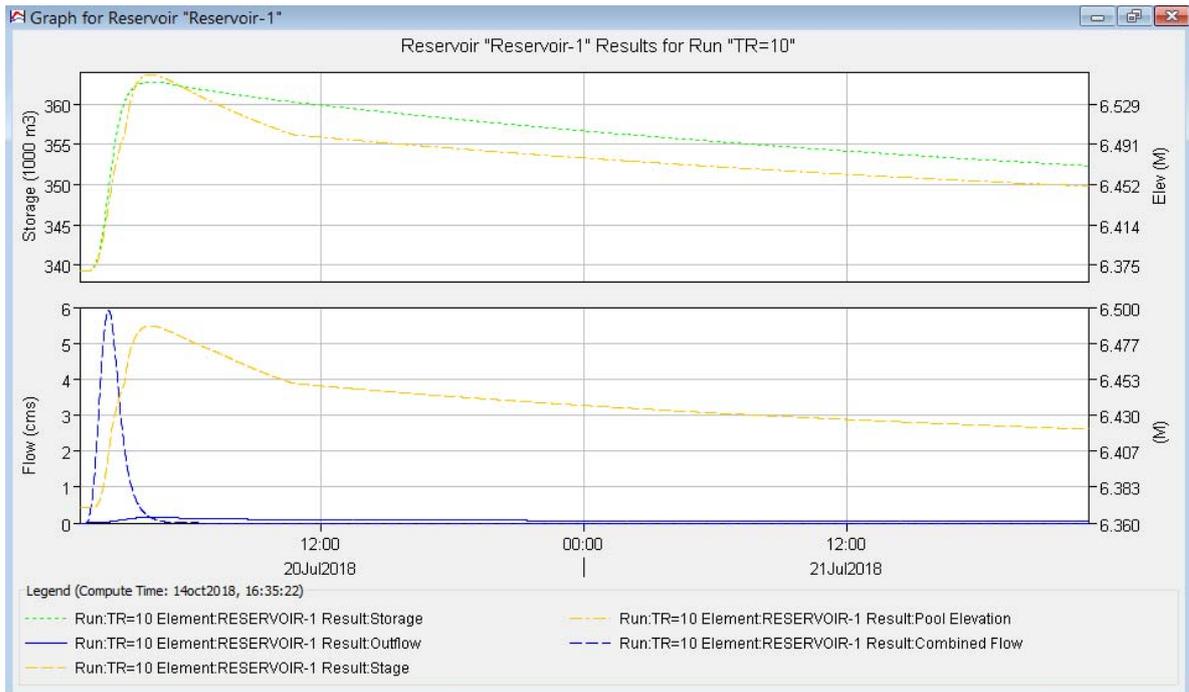
**Figura N° 45: Resultados de la modelación hidrológica de la laguna TR=100 años**



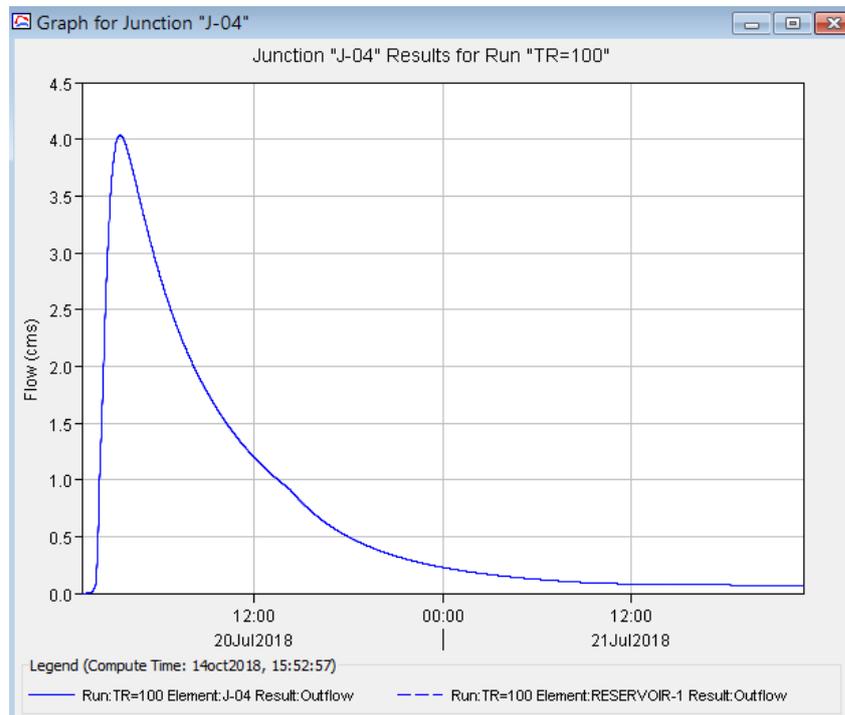
**Figura N° 46: Resultados de la modelación hidrológica de la laguna TR=50 años**



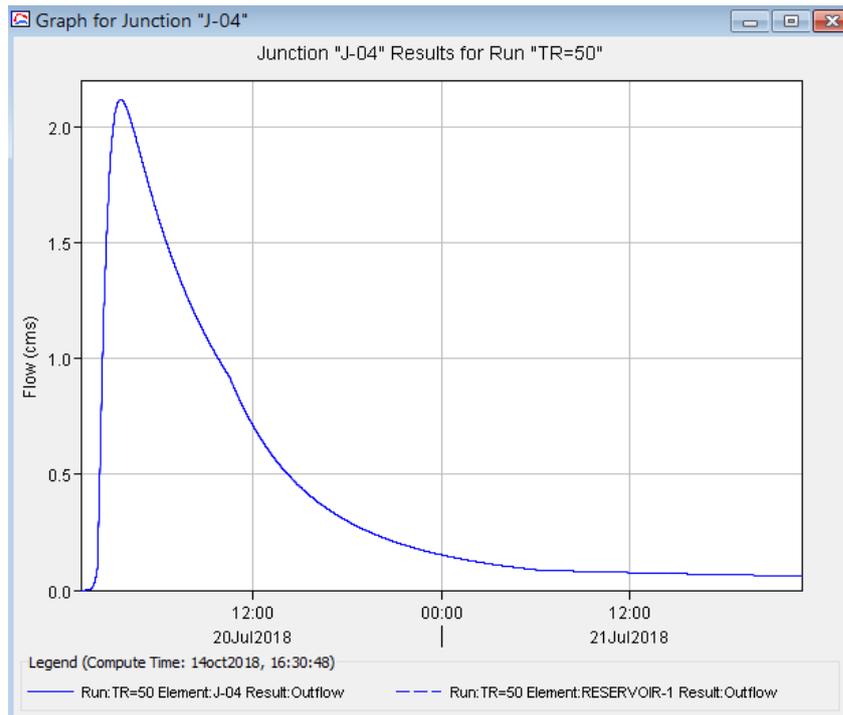
**Figura N° 47: Resultados de la modelación hidrológica de la laguna TR=25 años**



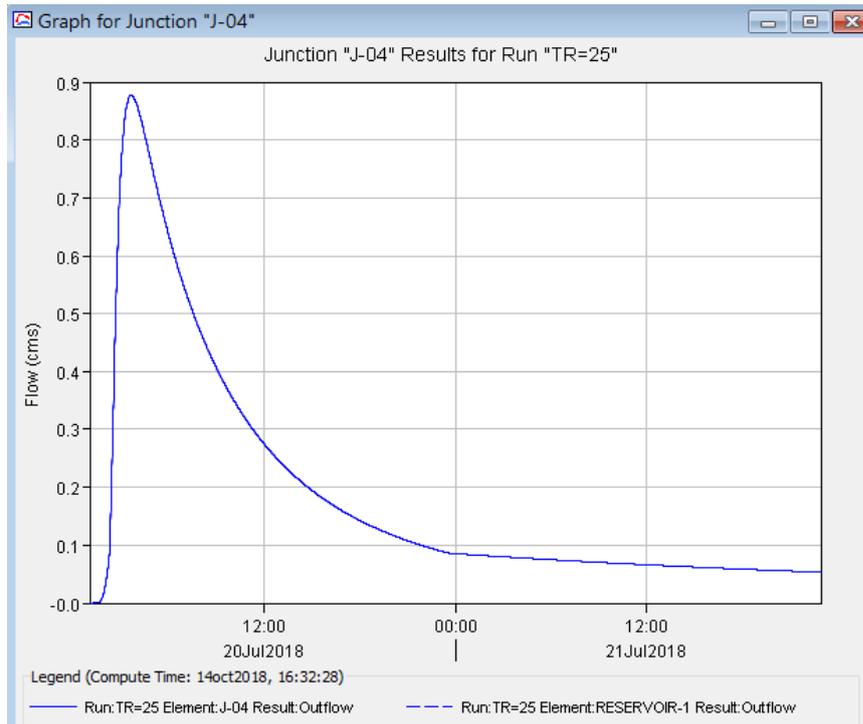
**Figura N° 48: Resultados de la modelación hidrológica de la laguna TR=10 años**



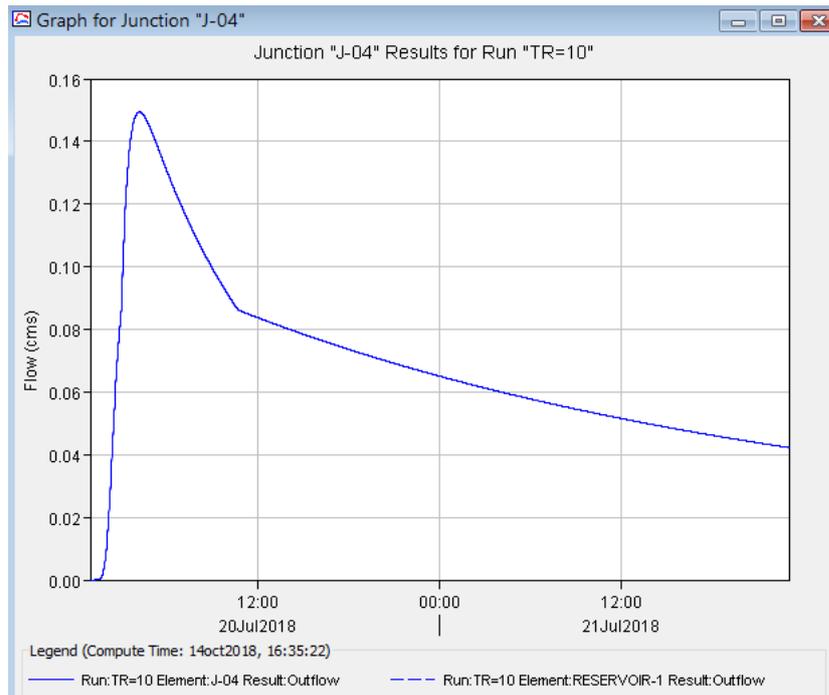
**Figura N° 49: Hidrograma de salida de la laguna a través del vertedero TR=100 años**



**Figura N° 50: Hidrograma de salida de la laguna a través del vertedero TR=50 años**



**Figura N° 51: Hidrograma de salida de la laguna a través del vertedero TR=25 años**



**Figura N° 52: Hidrograma de salida de la laguna a través del vertedero TR=10 años**

## Sección 6.02 **Laminación de Caudales al Volcado de Efluentes provenientes de la Planta de Tratamiento**

Otra situación a considerar en la modelación del comportamiento de embale, es el volcado de efluentes tratados o crudos provenientes de la planta de tratamiento. Para considerar este escenario, se tomaron como referencia los caudales de vuelco en situación de emergencia, siendo el total de efluentes crudos o tratados volcados al cuerpo de agua. En la Tabla N° 5, se muestran los caudales medios mensuales de operación de la planta, se observa que el máximo caudal se registra durante el mes de enero. En la Tabla N° 6, se muestran los caudales horarios durante un día de enero, que fueron aplicados en la modelación.

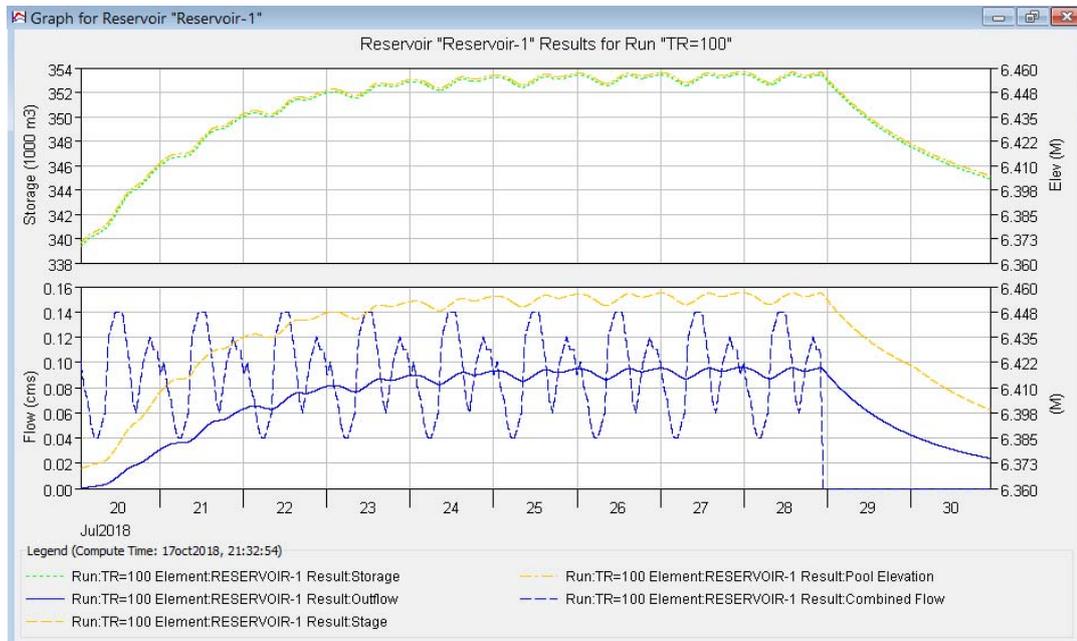
MES	Caudal diario medio mensual CLOACAL
SATURACION	m3/hora
ENERO	337.12
FEBRERO	293.78
MARZO	284.14
ABRIL	240.80
MAYO	192.64
JUNIO	168.56
JULIO	168.56
AGOSTO	192.64
SEPTIEMBRE	216.72
OCTUBRE	240.80
NOVIEMBRE	264.88
DICIEMBRE	313.04

**Tabla N° 5: Caudales medios mensuales de operación de la planta**

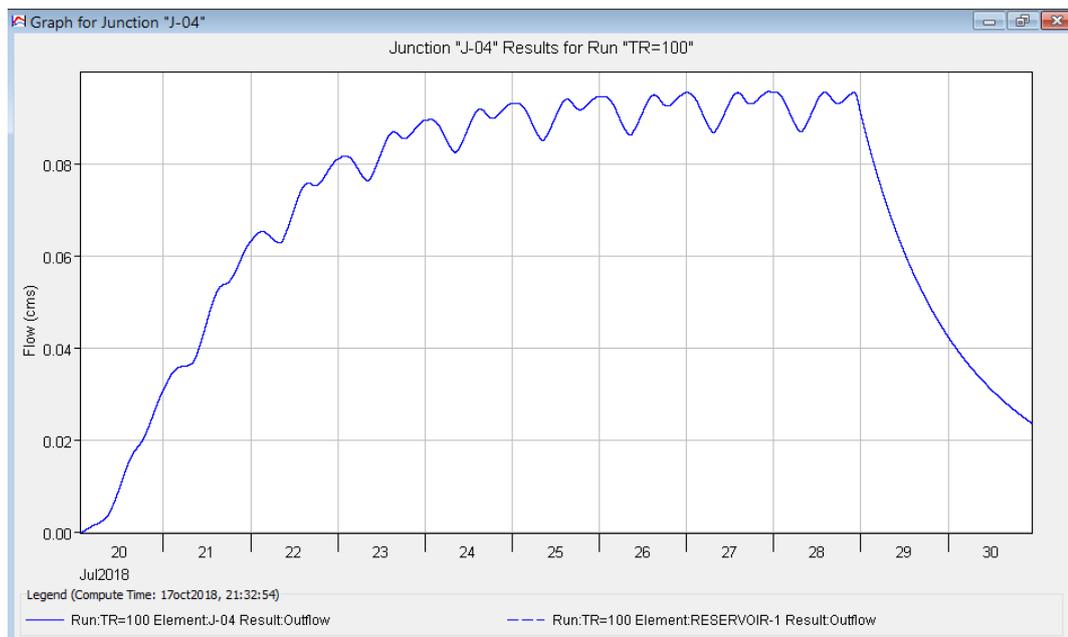
Tiempo [horas]	Ingreso Caudal CLOACAL
	m3/hora
00:00	0
01:00	342.51
02:00	300.07
03:00	249.13
04:00	185.75
05:00	141.59
06:00	161.82
07:00	195.53
08:00	230.93
09:00	421.40
10:00	471.97
11:00	505.68
12:00	505.68
13:00	488.82
14:00	421.40
15:00	370.83
16:00	252.84
17:00	202.27
18:00	303.41
19:00	370.83
20:00	404.54
21:00	438.26
22:00	407.58
23:00	378.08
00:00	339.48

**Tabla N° 6: Caudales horarios para un día de enero**

En la Figura N° 53, se muestran los hidrogramas de salida de la laguna como resultado del vuelco de los caudales indicados en la Tabla N° 6 durante tres días consecutivos, considerando un vertedero de pared delgada de 2 m de ancho, y una cota de labio de 6,37 m. En la Figura N° 54 se muestra el hidrograma de salida de la laguna, correspondiente al vuelco a través del vertedero.



**Figura N° 53: Comportamiento del embalse frente al vuelco de efluentes desde la laguna**



**Figura N° 54: Caudales volcados a través del vertedero producto del vuelco de efluentes**

Elemento Hidrológico	Descarga Pico $m^3/s$	Tiempo al Pico
J-04	0.096	27jul2018, 22:37

Tabla N° 7: Caudal pico de descarga para el vertedero para el caso de vuelco de efluentes

## ARTÍCULO 7. PROPUESTA DE OBRAS DE DEFENSA ALUVIONAL PARQUE INDUSTRIAL

El Parque Industrial de Rada Tilly, se encuentra ubicado al oeste de la laguna Kapenke, en la Figura N° 55 puede verse el área mencionada en color rojo, se observan también los cauces delimitados que ingresan al área. El ingreso de los aportes pluviales a la zona se produce principalmente desde el noroeste y desde el suroeste. Con el objetivo de encauzar dichos excedentes pluviales, se propone la construcción de dos colectores de guardia, uno en el límite norte y otro en el límite sur de la zona industrial, que coleccionarán las dichos excedentes hacia la laguna. En la Figura N° 56, se muestra la ubicación propuesta de los colectores de guardia propuestos.

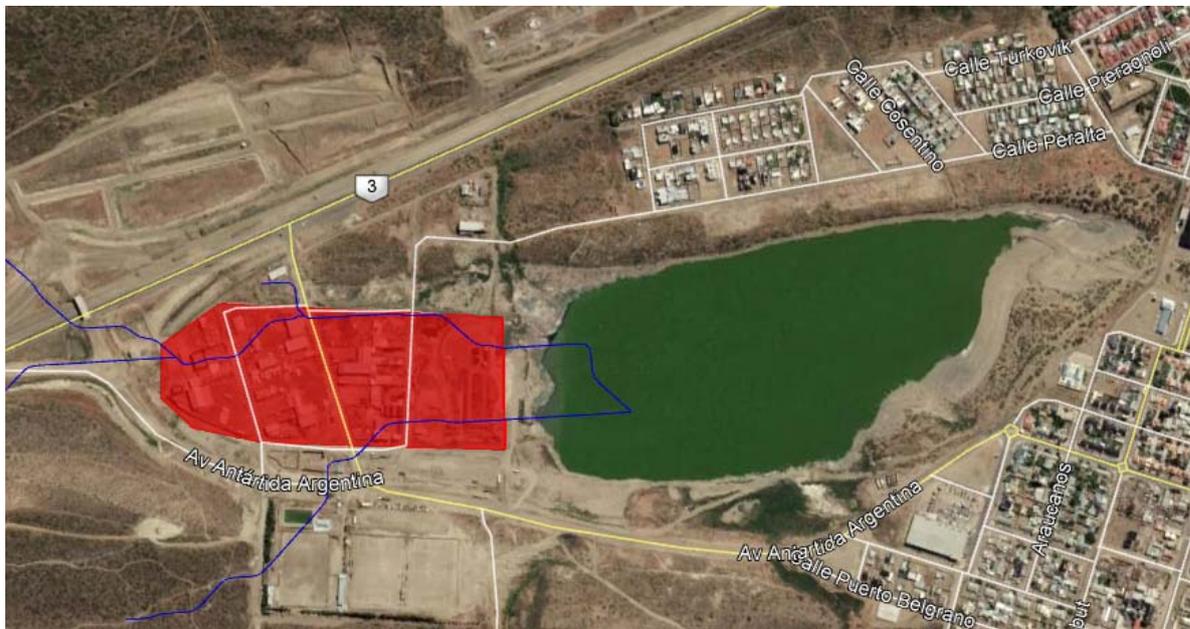


Figura N° 55: Ubicación Parque Industrial de Rada Tilly



**Figura N° 56: Trazo tentativa de los colectores de guardia propuestos**

Actualmente, existen zanjas excavadas con secciones irregulares, cuya capacidad de conducción no es suficiente para evacuar de forma eficiente los caudales que escurren hacia ellos.

El colector Norte recibirá los caudales generados en las cuencas C-01 a C-05, mientras que el Colector Sur recibirá los excedentes provenientes de la cuenca C-06.

En la Tabla N° 8, se muestran las secciones propuestas para el Colector Norte y Colector Sur para tiempos de recurrencia de 25 y 10 años respectivamente considerando una sección rectangular revestida en hormigón con una pendiente del 3%.

Sección	Periodo de Recurrencia	Caudal Aporte	Manning "n"	Pendiente	Ancho solera	Altura h	Área	Perímetro Mojado	Radio Hidráulico	Caudal Máximo	Velocidad	Obsevaciones
		m <sup>3</sup> /s		m/m	m	m						
Colector Norte	10	5.73	0.013	0.03	1	1	1.00	3.00	0.333	6.405	6.405	VERIFICA
	25	10.00	0.013	0.03	1.6	1.2	1.92	4.00	0.480	15.682	8.168	VERIFICA
Colector Sur	10	0.20	0.013	0.03	0.4	0.4	0.16	1.20	0.133	0.556	3.477	VERIFICA
	25	0.40	0.013	0.03	0.4	0.6	0.24	1.60	0.150	0.903	3.761	VERIFICA

**Tabla N° 8: Secciones propuesta para los colectores Norte y Sur para periodos de recurrencia de 25 y 10 años**