

**ANTEPROYECTO DE ORDENAMIENTO
HÍDRICO DE LOS ESCURRIMIENTOS
SUPERFICIALES**

LOTEO: VILLA VERDE

MALAGUEÑO, SANTA MARÍA - CÓRDOBA

Mg. Ing. Civil – Eder, Matías

Mayo de 2022


SANTIAGO CORNET
D.N.I. 29.607.731
Administrador Titular
Córdoba Investment Trust

Índice

1.	Memoria Descriptiva	3
1.1.	Zona de estudio.....	3
1.1.	Visita a campo.....	4
1.1.	Relevamiento Topográfico.....	6
1.2.	Configuración del loteo	7
1.3.	Estudio Hidrológico.....	11
1.4.	Estudio Hidráulico	11
2.	Memoria de cálculo	12
2.1.	Información topográfica.....	12
2.2.	Delimitación de cuencas – Situación Actual (Pre Urbanización).....	15
2.3.	Determinación de parámetros característicos – Cuencas sin urbanizar	16
2.4.	Determinación de parámetros característicos – Cuencas urbanizadas	24
2.5.	Determinación de lluvia de diseño	26
2.6.	Modelo de cálculo de caudales: Transformación lluvia caudal.....	34
2.7.	Lagunas de regulación	40
2.8.	Verificación hidráulica de canales.....	44
3.	Planos	46



1. Memoria Descriptiva

En el presente informe se describen las tareas y estudios realizados en el loteo "Villa Verde" ubicado sobre la Calle Suecia en la localidad de Malagueño, relacionado al anteproyecto de ordenamiento hídrico de los escurrimientos superficiales. A continuación, se presenta la zona de estudio, la configuración del loteo y los estudios hidrológicos e hidráulicos realizados.

El estudio hidrológico tiene como objetivo evaluar la situación hidrológica actual, el impacto producido por la urbanización del loteo en los escurrimientos superficiales y proyectar las obras de regulación necesarias para minimizar los impactos producidos en los caudales pico generados para diferentes eventos de diseño.

El estudio hidráulico tiene como finalidad dimensionar los canales principales de la red de drenaje futura con los caudales de diseño y las obras de descarga de las lagunas de regulación necesarias para minimizar el impacto hidrológico producido por la urbanización.

1.1. Zona de estudio

El loteo se encuentra ubicado en la localidad de Malagueño (con una población de 13 102 habitantes, INDEC – 2010), pertenece al departamento de Santa María, en la provincia de Córdoba, Argentina. El loteo se ubica a 15 km al oeste de la ciudad de Córdoba sobre la Ruta Nacional 20.



Figura 1: Ubicación de la zona de estudio en la provincia de Córdoba.

1.1. Visita a campo

Con el objetivo de conocer la zona en estudio, identificar las principales características hidrológicas de la zona (vegetación, tipo de suelo y principales líneas de escurrimiento, etc.), relevar la infraestructura hídrica existente y la ubicación de las estructuras de descarga, conducción y regulación se realizó una visita a la zona en estudio.

En la Figura 2 se presentan dos fotografías de una laguna de regulación existente, ubicada próxima a la Ruta N° 20.

En la Figura 3 y Figura 4 se presentan fotografías de dos badenes ubicados sobre la Calle Italia al Oeste del loteo. Finalmente, en la Figura 5 se puede observar un bajo natural ubicado al Sureste del loteo el cual colecta gran parte de los escurrimientos del sector.



Figura 2: Vistas de la laguna de regulación existente entre la ruta N° 20 y el predio del loteo.



Figura 3: Badén 1 ubicado sobre la calle Italia al Oeste del loteo.

[Handwritten signature]



Figura 4: Badén 2 ubicado sobre la Calle Italia al Oeste del loteo.

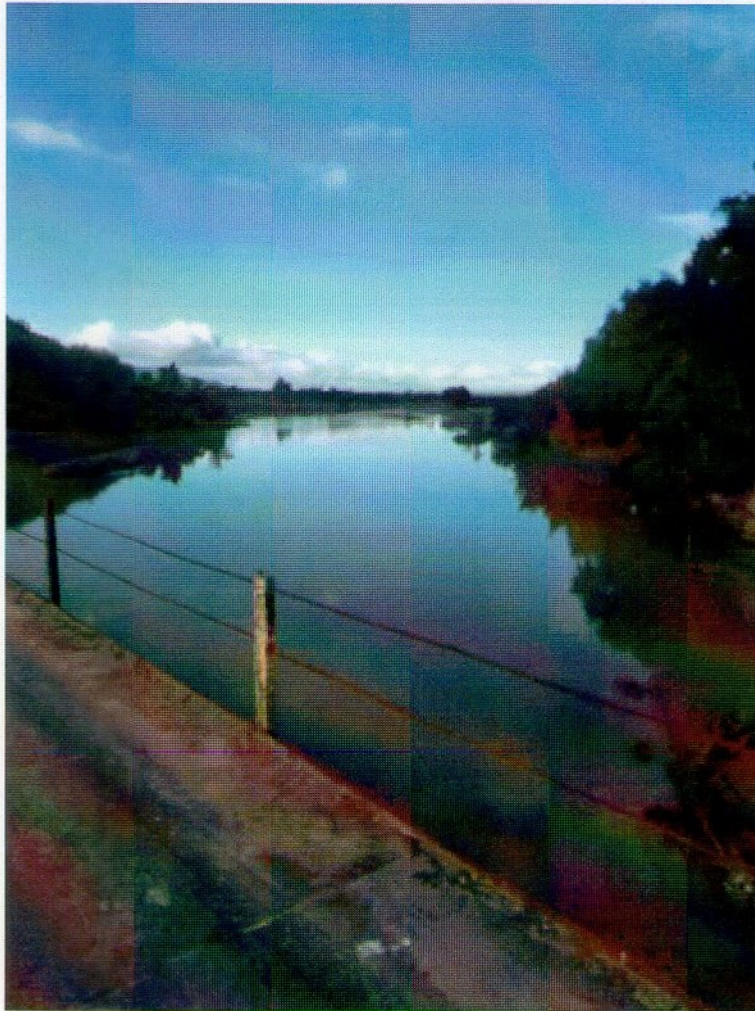


Figura 5: Bajo natural ubicado al Este del predio del loteo.

Jee

1.1. Relevamiento Topográfico

Para realizar el presente estudio, se realizó un relevamiento topográfico de la zona de estudio. Sobre la base de datos topográficos relevados en campo, se compone el mapeo de curvas de nivel en la zona de estudio con equidistancia de 0.5 m (Figura 6). El sentido de escurrimiento en el loteo es principalmente de Oeste-Este.

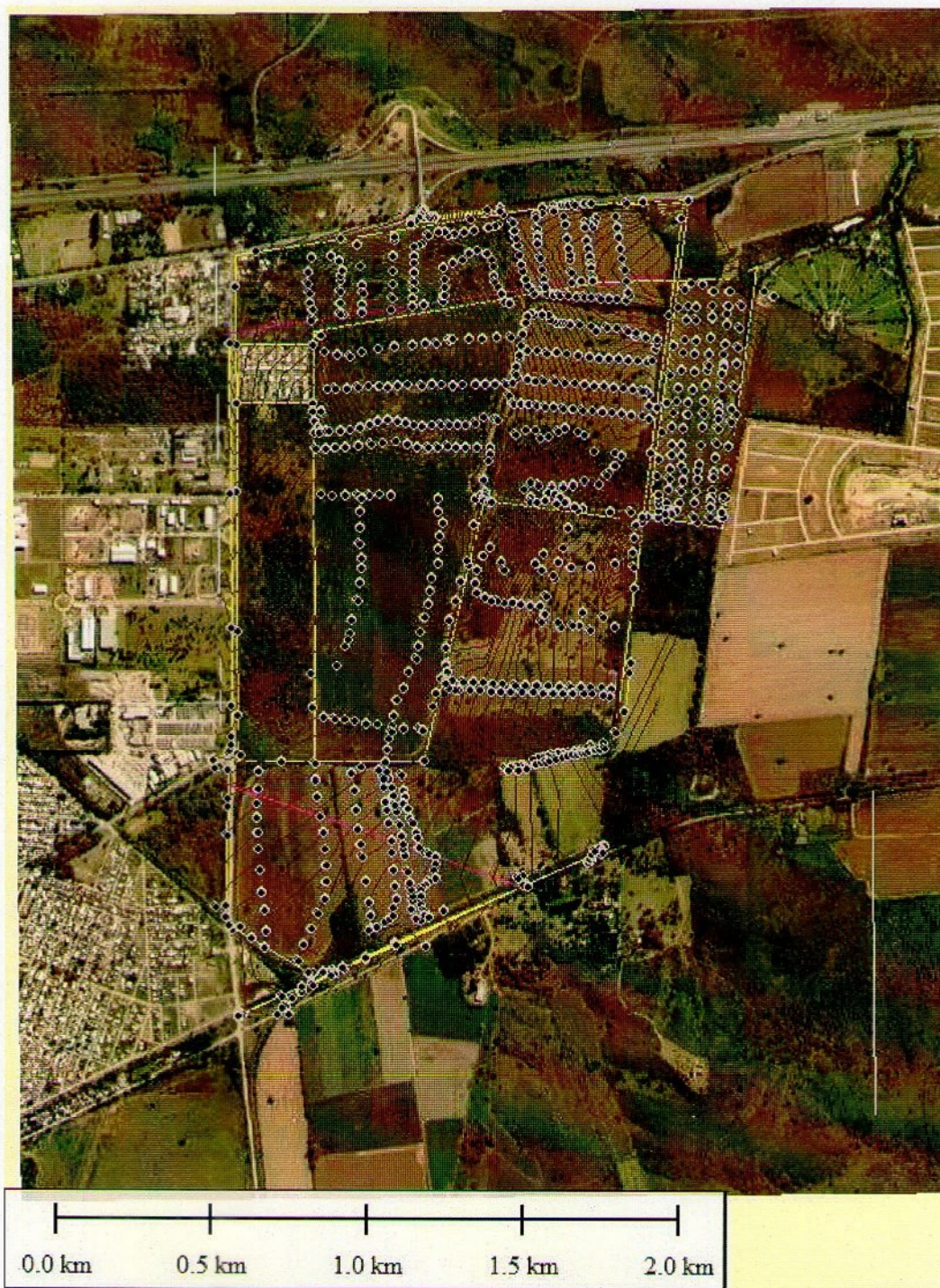


Figura 6: Curvas de nivel del terreno en la zona de estudio.

1.2. Configuración del loteo

En la Figura 7 se presenta el esquema de escurrimiento actual en el terreno a lotear, con la configuración de las macro parcelas y las cuencas geográficas previas a la urbanización (actuales) con las direcciones de los escurrimientos.

En la Figura 8 se muestra el sistema de drenaje y regulación proyectado. Este sistema está compuesto por 2 canales interceptores de los escurrimientos externos al loteo, 5 canales internos y 5 lagunas de regulación. Finalmente, en la Figura 9 se presenta el esquema de escurrimientos post urbanización (futuros) con las cuencas externas e internas y el sistema de drenaje propuesto.

Obras Proyectadas:

- Canal interceptor C1
- Canal interceptor C2
- Canal Interno C1-2
- Canal Interno CInt1A
- Canal Interno CInt1B
- Canal Interno CInt2A
- Canal Interno CInt2B
- 5 Lagunas de regulación (L1, L2, L3, L4 y L5)



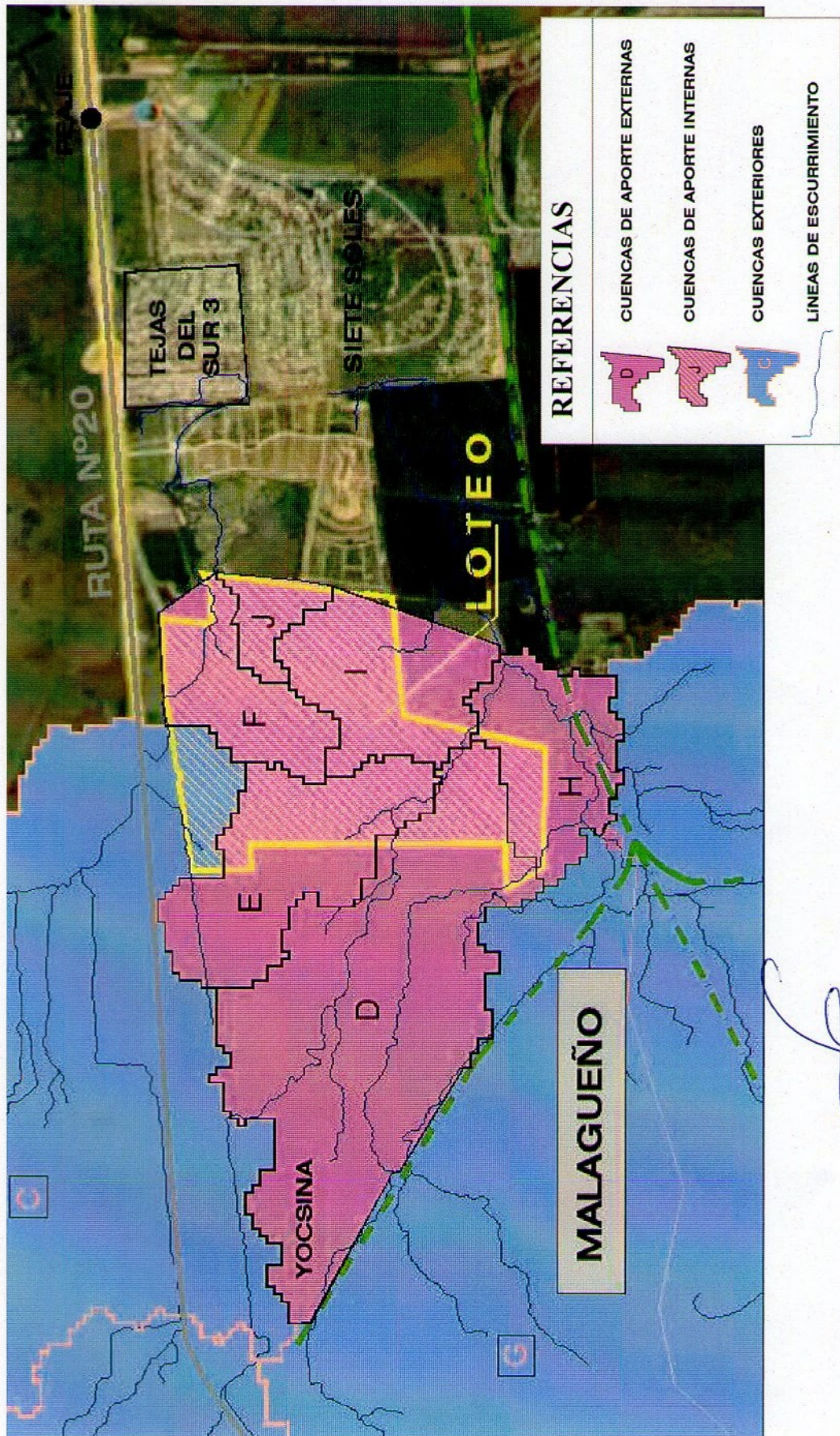


Figura 7: Esquema de escurrimiento actual en el sector del loteo.

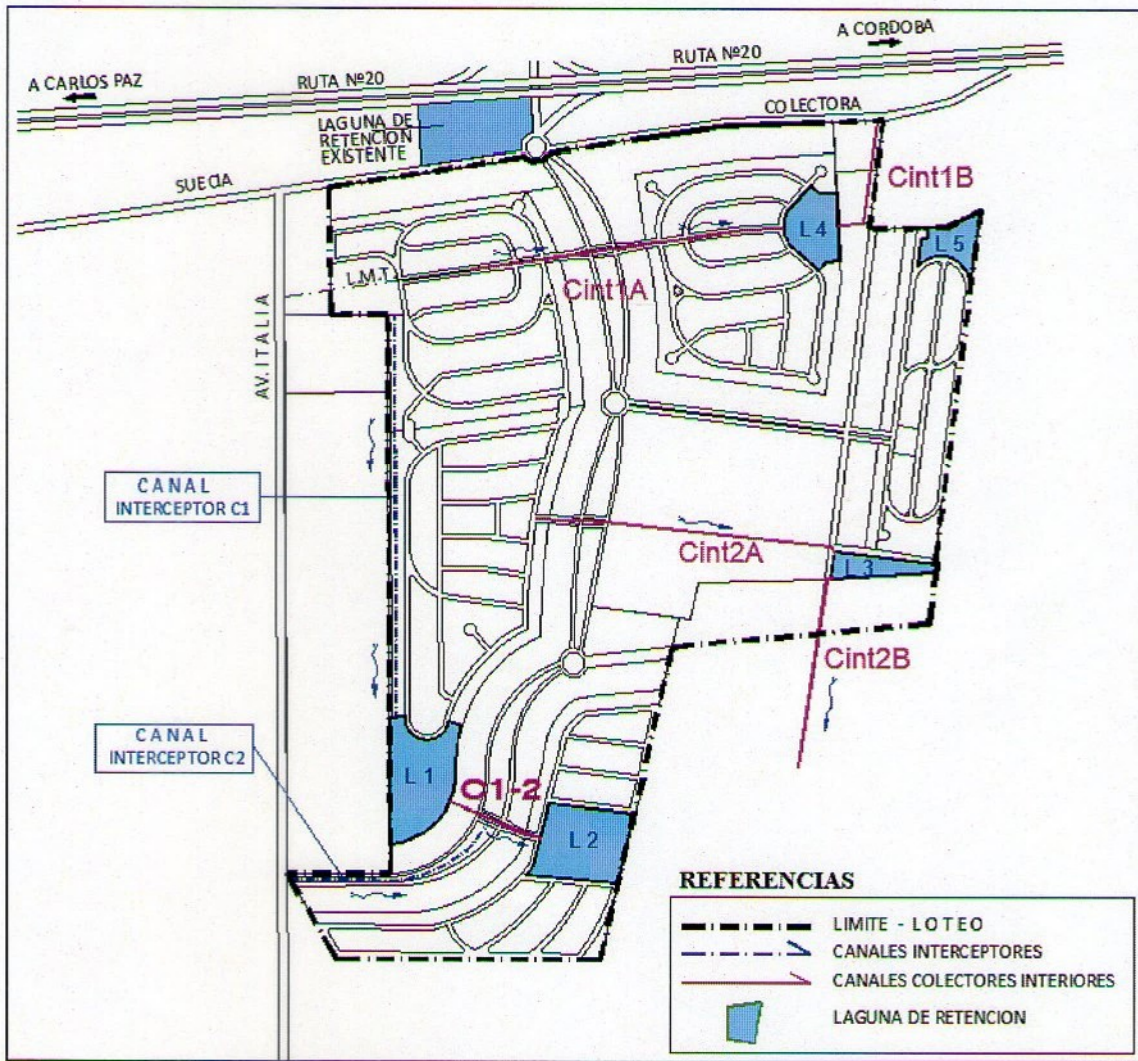


Figura 8: Sistema de escurrimiento y regulación proyectado.

Handwritten signature

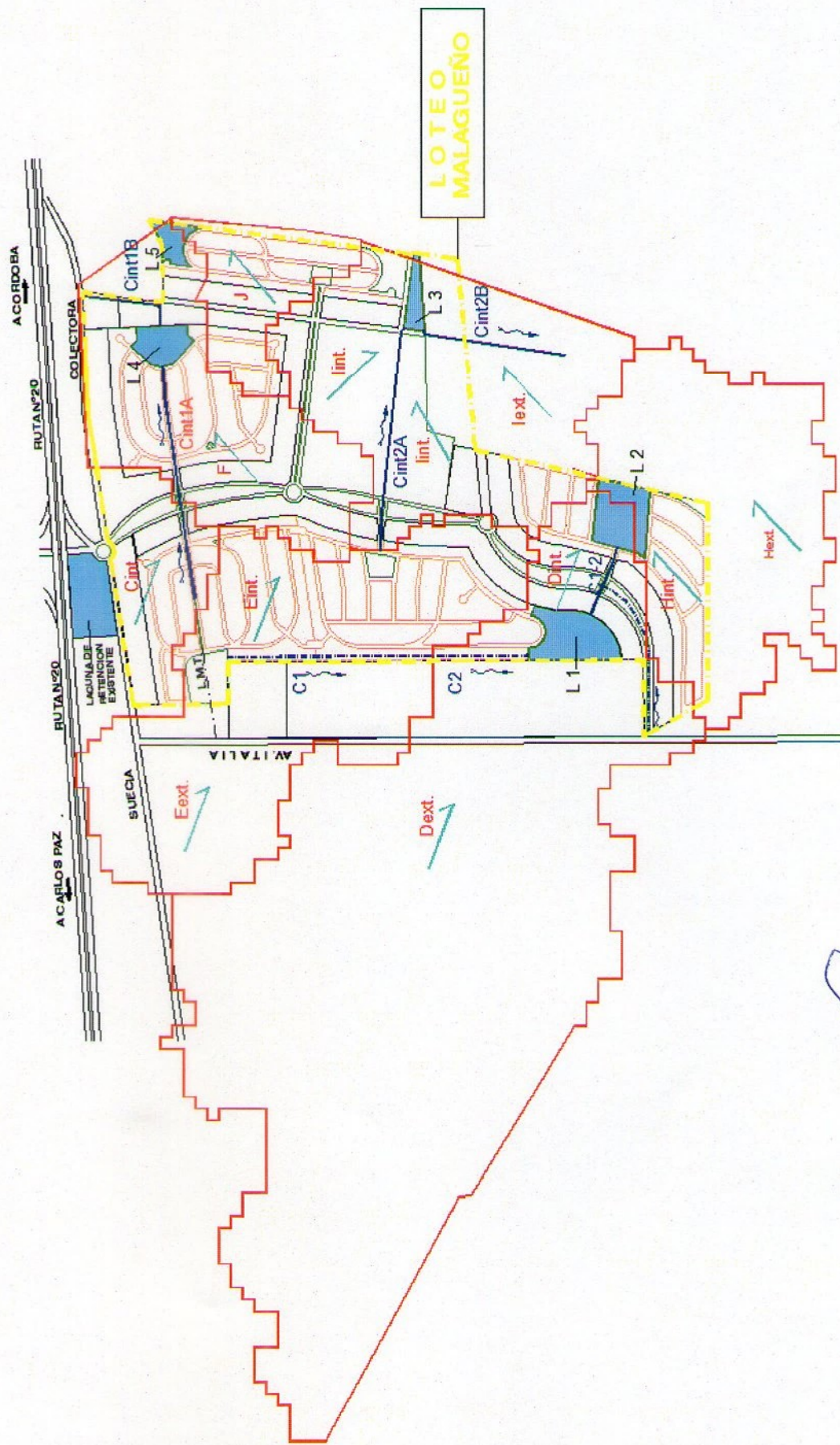


Figura 9: Esquema de escurrimiento futuro y cuencas externas al sector del loteo.

1.3. Estudio Hidrológico

Se realizó un estudio hidrológico de transformación lluvia – caudal para obtener los hidrogramas y los caudales de diseño asociados a diferentes recurrencias (Tr: 5, 25 y 100 años). Se utilizó el programa HEC HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos para realizar las modelaciones hidrológicas. Se utilizó el método de la curva número (CN) del Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos para el cálculo de las abstracciones (SCS – CN), el método del Hidrograma Unitario (HU) para la transformación lluvia-caudal y el método de Muskingum para realizar los tránsitos hidrológicos en canales y el método de Puls para el tránsito de los hidrogramas en las lagunas de regulación. Por otro lado, para el cálculo de la intensidad de precipitación se utilizaron las curvas Intensidad Duración Recurrencia (IDT) calculadas a partir del modelo DIT (Caamaño y Dasso, 2003). La definición de las cuencas y sus parámetros principales se realizó a partir de información topográfica satelital provista por el modelo digital de elevación del IGN.

El estudio hidrológico se dividió en 2 etapas, las cuales se describen a continuación:

Etapa I – Pre Urbanización (Actual):

La finalidad de esta etapa es conocer la situación hidrológica del sector antes de la urbanización y cuantificar los escurrimientos superficiales producidos por el terreno en su estado actual. Se realizó el estudio hidrológico de la cuenca completa y se determinaron los hidrogramas y caudales picos correspondientes a diferentes recurrencias (Tr: 5, 25 y 100 años) en los 3 principales puntos de descarga del loteo. Posteriormente, estos caudales se utilizan para analizar el impacto hidrológico producido por la urbanización en los escurrimientos superficiales y tomar medidas para minimizar su impacto.

Etapa II – Post Urbanización (con el 100 % de los loteos urbanizados):

Se realizó el estudio hidrológico de la situación futura en la cual se considera que el 100% de los lotes se encuentran urbanizados. En esta etapa del estudio se realizó el diseño (Tr:25 años) y verificación (Tr: 100 años) de las lagunas de regulación y de sus correspondientes estructuras de regulación y se evaluó el impacto en los caudales pico en los 3 puntos de descarga del loteo. En todos los casos se reducen los caudales pico en los puntos de descarga.

1.4. Estudio Hidráulico

Tiene como objetivo verificar la capacidad hidráulica de los elementos que componen el sistema de drenaje superficial propuesto para la Etapa II (Post Urbanización). Se presenta la verificación de cada uno de los canales para caudales asociados a 25 años de recurrencia.

2. Memoria de cálculo

Se presenta la información topográfica en la zona de estudio utilizada para definir las cuencas externas al loteo, las líneas de escurrimientos y las características morfométricas de las subcuencas. Posteriormente, se presentan los estudios hidrológicos correspondientes a la Etapa I (Pre Urbanización) y a la Etapa II (Post Urbanización). Finalmente, se presentan los cálculos de la verificación hidráulica de la infraestructura proyectada.

2.1. Información topográfica

Información topográfica en la zona de estudio para definir las cuencas externas

Para la determinación de las curvas de nivel, la delimitación de las cuencas y subcuencas de la zona de estudio y de los cauces existentes en el presente estudio se utilizó información satelital de Modelos Digitales de Elevaciones (DEM por sus siglas en inglés). Un DEM es una estructura numérica de datos topográficos que representa la distribución espacial de la altitud (cota) con respecto al nivel medio del mar, y que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. En este trabajo en primer lugar se recopilaron diferentes fuentes disponibles de modelos de elevación, las cuales se presentan a continuación:

1. *The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, presenta datos topográficos 3D del terreno en una escala global de 56° S a 60° N, para generar la base de datos topográficos digitales de alta resolución. Tiene una resolución planimétrica de 90 a 30 m según la zona de cobertura.
2. *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*, es un instrumento de imagen a bordo de Terra, un satélite del Sistema de Observación de la Tierra (EOS por sus siglas en inglés) de la NASA. El DEM utilizado, tiene una resolución de 30 a 15 m.
3. *Modelo Aerofotogramétrico del Instituto Geográfico Nacional (IGN)*: este modelo digital de elevaciones ha sido determinado a partir de una serie de vuelos fotogramétricos realizados por el IGN con un sistema aerofotogramétrico digital compuesto por: a) una cámara marca Vexcel modelo UltraCam Xp, b) una unidad de medición inercial (IMU, por su sigla en inglés), c) una plataforma giroestabilizadora sobre la cual se monta la cámara solidariamente, y d) un equipo GNSS de doble frecuencia instalado en el fuselaje del avión, entre otros.

El vuelo se realizó en diciembre de 2014 y posee una resolución espacial de 5 metros y una precisión vertical promedio submétrica (e igual a de 21 centímetros).

Debido a su alta resolución espacial y a la gran precisión es que este modelo fue el utilizado en este trabajo para realizar la determinación de las curvas de nivel, la delimitación de cuencas y la definición de los cauces existentes. En la Figura 10 se presenta el modelo digital de la zona de estudio:

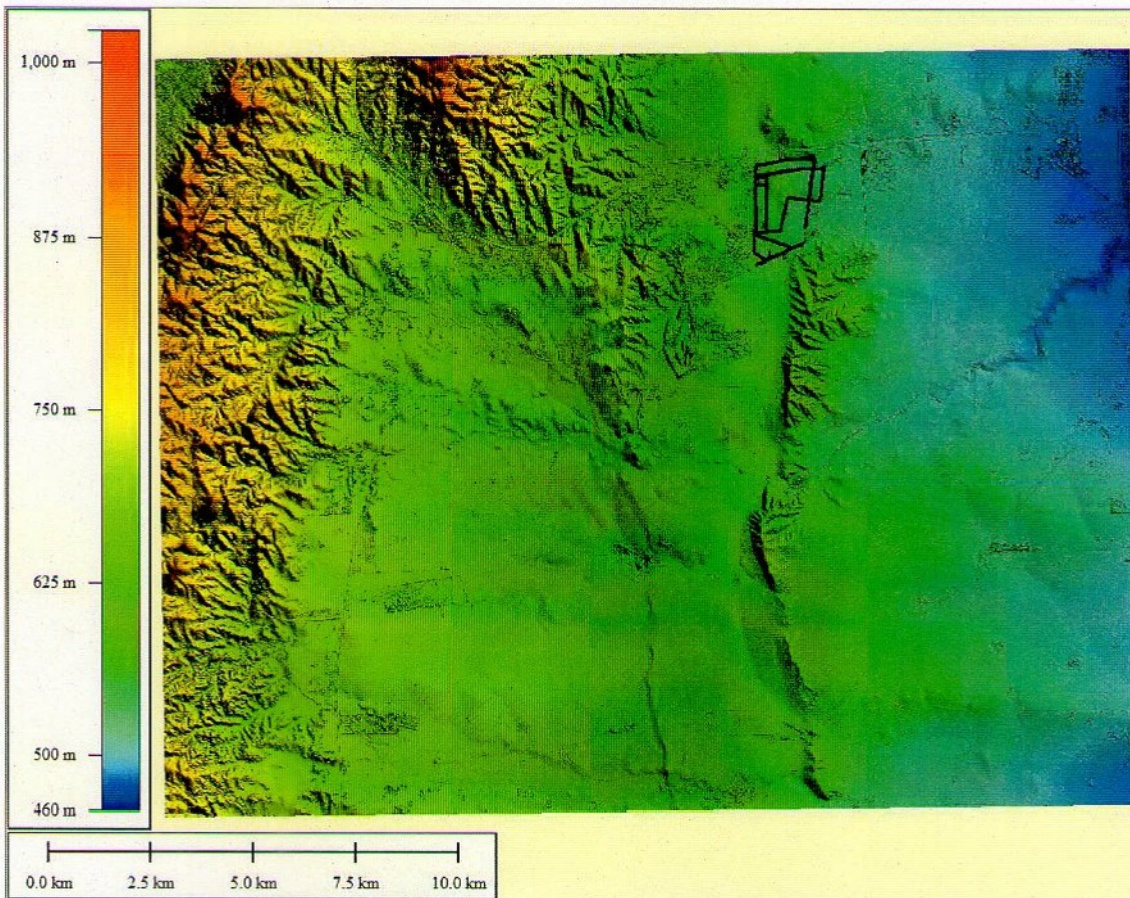


Figura 10: DEM Aefotogramétrico del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la Zona de estudio.

Curvas de Nivel del DEM

A partir de la utilización del DEM de alta resolución del IGN, se determinaron las curvas de nivel con un intervalo de 5 metros en la zona de estudio, las cuales se observan en la Figura 11:

[Handwritten signature]

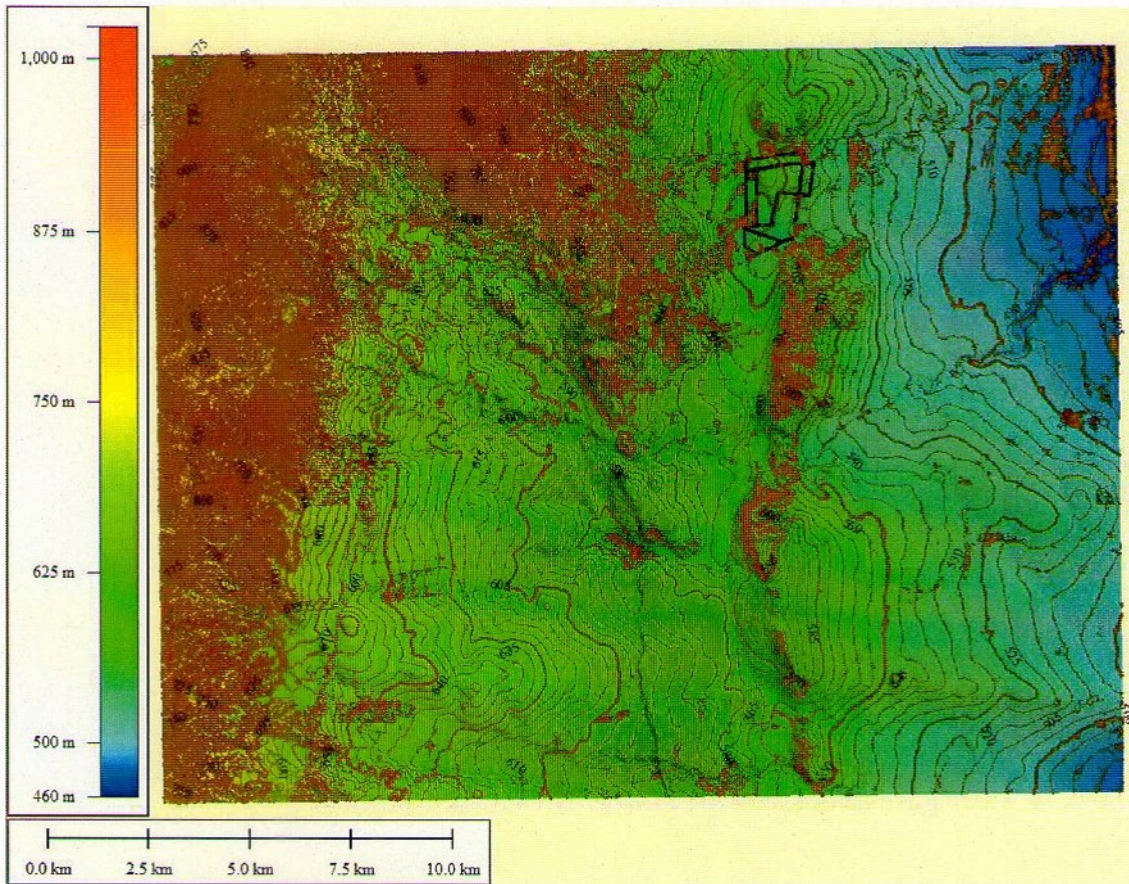


Figura 11: Curvas de nivel en la zona de estudio utilizando el modelo digital de elevación del IGN.

Curvas de Nivel del relevamiento topográfico

A partir del relevamiento topográfico se obtuvieron las curvas de nivel cada 0.5 m.

[Handwritten signature]



Figura 12: Curvas de nivel del terreno en la zona de estudio.

2.2. Delimitación de cuencas – Situación Actual (Pre Urbanización)

A partir de la utilización del DEM de alta resolución del IGN, se delimitaron las cuencas y las principales líneas de escurrimiento existentes en la zona de estudio (Figura 13).



Figura 13: Principales subcuencas y red de drenaje superpuestas a una imagen satelital del terreno y con la ubicación del loteo en estudio.

2.3. Determinación de parámetros característicos – Cuencas sin urbanizar

Las subcuencas (áreas tributarias) que conforman la cuenca de estudio, se definieron a partir de la información topográfica satelital provista por el modelo digital de elevación de alta resolución del IGN y se complementó el análisis mediante la visualización de la zona de estudio con imágenes satelitales de alta resolución. Se detectaron de este modo 12 subcuencas, cuyas superficies varían entre los 0.5 y los 10 Km². En la Figura 14 se presentan las subcuencas y sus respectivos cauces principales con la nomenclatura adoptada.

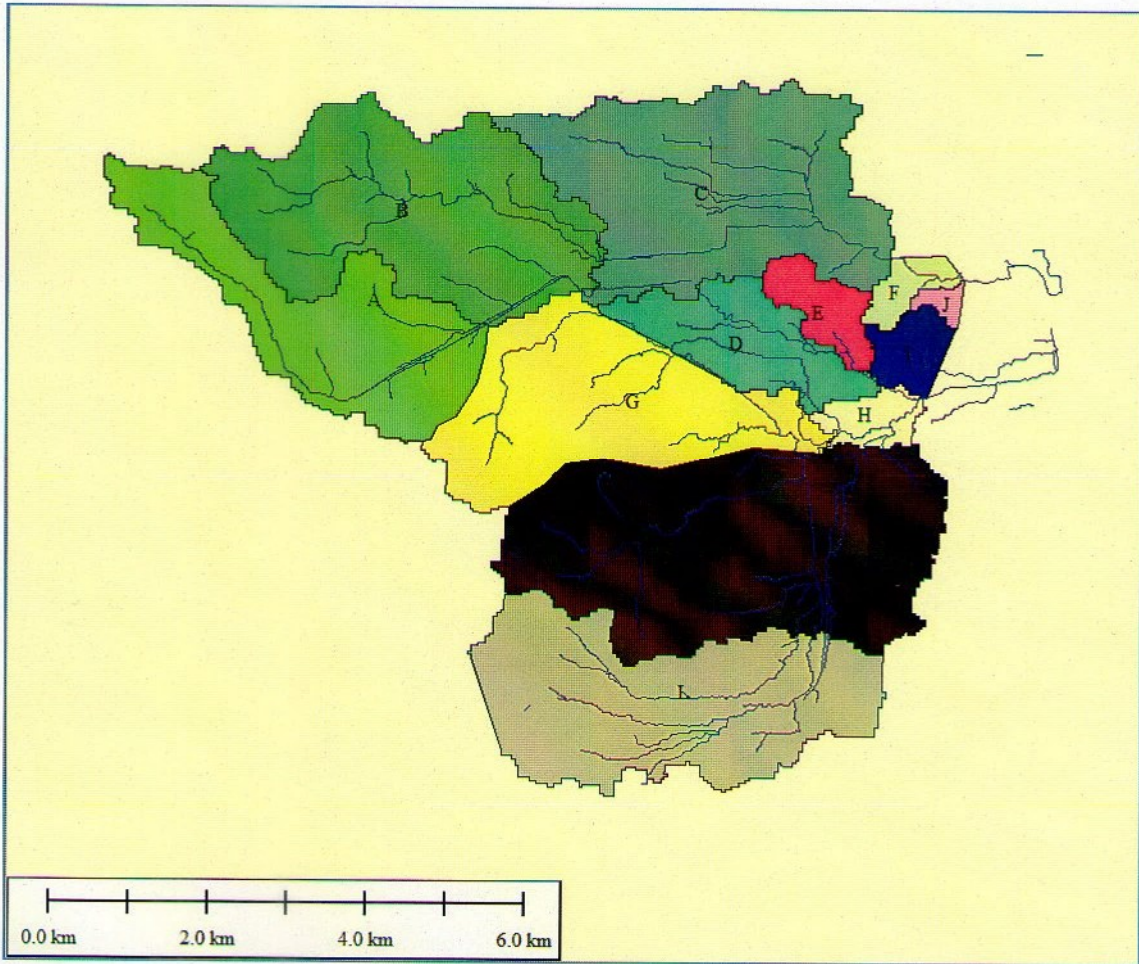


Figura 14: Nomenclatura adoptada para las principales subcuencas.

Los parámetros principales de las subcuencas se indican en la Tabla 1:

Tabla 1: Parámetros principales de cada una de las subcuencas.

Subcuenca	Área [km ²]	Cauce principal		
		L [m]	ΔH [m]	S [m/m]
A	5.3	6440	212	0.03
B	7.7	5109	162	0.03
C	7.6	5855	85	0.01
D	2.4	1934	22	0.01
E	0.9	1666	16	0.01
F	0.5	1014	12	0.01
G	6.1	3669	71	0.02
H	0.7	1255	7	0.01
I	0.7	730	14	0.02
J	0.2	221	3	0.01
K	10.1	5921	81	0.01
L	7.3	5631	30	0.01

dónde:

Área: área de las subcuencas.

Handwritten signature

L : longitud del cauce principal de las subcuencas.

ΔH : desnivel máximo del cauce principal de las subcuencas.

S : pendiente del cauce principal de las subcuencas.

Para el cálculo de los tiempos de concentración (TC) de las subcuencas; Roussel et al. 2005 concluyen que generalmente la ecuación de Kirpich, y en particular la ecuación de Kerby-Kirpich para estimar el tiempo de la concentración de una cuenca es adecuada. Esta ecuación produce estimaciones de tiempo de concentración consistentes con valores obtenidos en cuencas que fueron calculados a partir de tormentas reales e hidrogramas de escorrentía. Al aplicar este método para el cálculo de TC, el tiempo total de concentración se obtiene sumando el tiempo de flujo superficial en lámina t_o (Kerby) y el tiempo de flujo en canal t_c (Kirpich):

$$TC = t_o + t_c$$

dónde:

$$t_o = K_o(L_o \cdot N)^{0.467} S_o^{-0.235}$$

$$t_c = K_c L_c^{0.77} S_c^{-0.385}$$

K_o : coeficiente de conversión de unidades. Es igual a 1.44 para unidades del sistema internacional (SI)

K_c : coeficiente de conversión de unidades. Es igual a 0.0195 para unidades del sistema internacional (SI)

L_o : longitud del flujo superficial (o flujo en láminas).

L_c : longitud del flujo en canal

S_o : pendiente de la cuenca adimensional en la zona de flujo superficial (en el caso analizado es igual a S)

S_c : pendiente de la cuenca adimensional en la zona de flujo en canal (en el caso analizado es igual a S)

N : coeficiente de retardo del flujo. Su valor se obtiene de tablas.

A su vez, en cuencas hidrográficas con baja pendiente topográfica (plana), el cálculo de TC usando ecuaciones comúnmente aceptadas con el valor de pendiente de la cuenca en el denominador a menudo resulta en valores excesivamente grandes. Es decir, como la pendiente se aproxima a cero, el tiempo de concentración se aproxima a infinito. Además, debido a que la intensidad es función de la lámina de lluvia (h) dividida por la duración d (que es aproximadamente igual a TC), TC finalmente genera en la cuenca una muy pequeña intensidad y por lo tanto un caudal de salida de la cuenca de poca magnitud. En estos casos, Cleveland et al. (2012) recomienda un ajuste de 0.0005 a la pendiente, tanto en los métodos de Kerby como de Kirpich para permitir resultados más realistas en las cuencas de baja pendiente topográfica.

La pendiente ajustada de la cuenca quedaría:

$$S = S_o + 0.0005(\text{adimensional})$$

Siendo la pendiente ajustada la que debe introducirse en las fórmulas de Kerby y Kirpich previamente desarrolladas.

Finalmente, para el caso analizado los valores de TC estimados fueron:

Tabla 2: Tiempos de concentración de cada una de las subcuencas.

Subcuenca	TC [min]
A	76
B	68
C	97
D	63
E	45
F	31
G	70
H	57
I	40
J	35
K	99
L	131

Para los tránsitos se utiliza el método de Muskingum, el cual utiliza para el tránsito 2 parámetros: K y X. K puede asimilarse igual al tiempo de recorrido de la onda cinemática de un extremo al otro del tramo estudiado y X es una constante que vale entre 0 y 0.5; y a mayor valor de X menor es la amortiguación del hidrograma a lo largo del tramo del cauce. En la Figura 15 se presenta la nomenclatura adoptada para cada uno de los tránsitos:



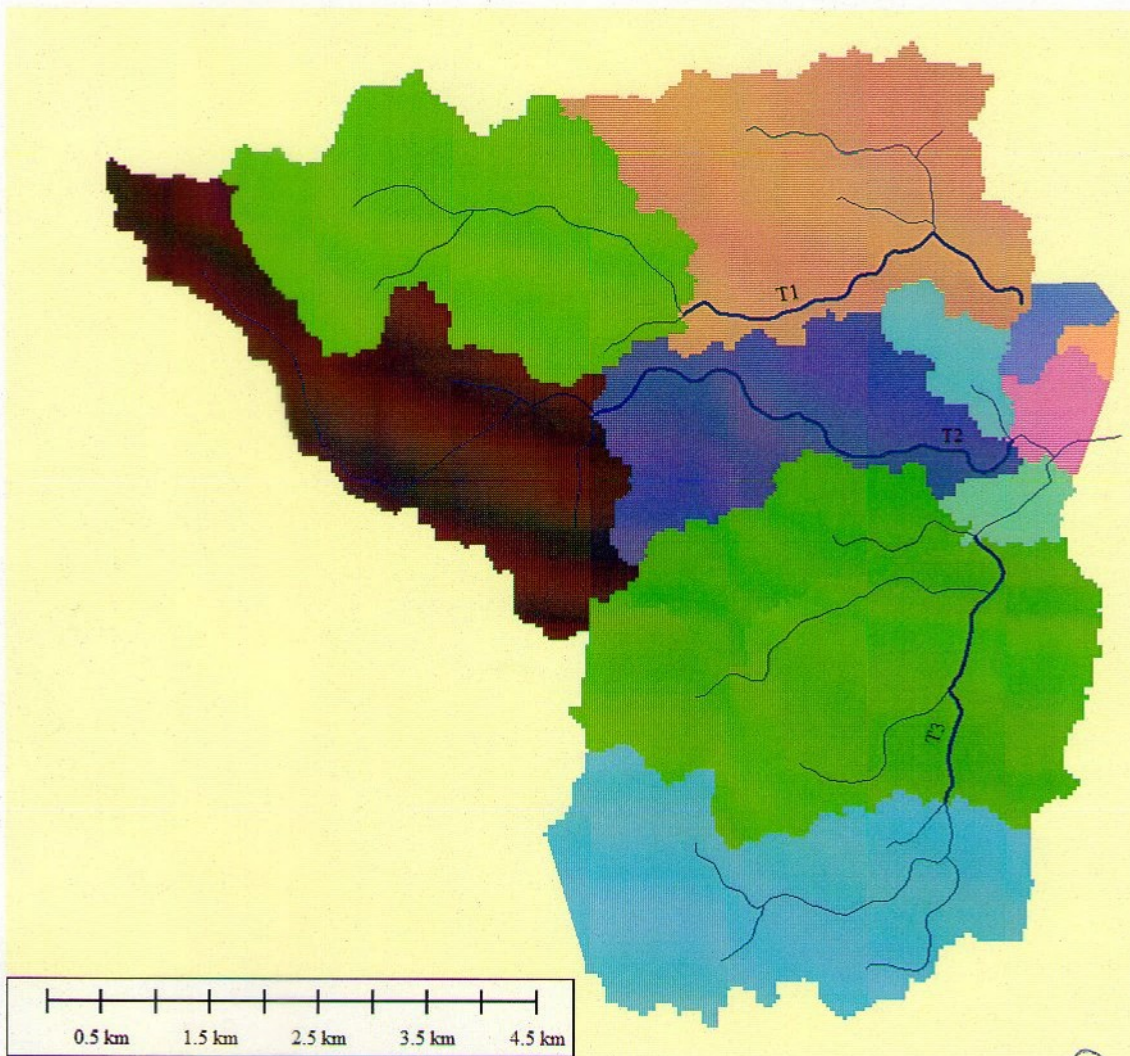


Figura 15: Principales subcuencas y cauces principales con la nomenclatura de cada uno de los tramos de tránsitos de caudales en la cuenca de estudio.

Para cada uno de los tramos transitados se usaron los siguientes parámetros (Tabla 3):

Tabla 3: Parámetros de tránsitos de Muskingum de cada uno de los tramos.

Tramos	K [hs]	X
T1	0.10	0.3
T2	0.23	0.3
T3	0.18	0.3

Debido a la pendiente de los tramos se adoptó un coeficiente X igual a 0.3; mientras que en función de la longitud de los tramos y la velocidad que puede tomar una onda de crecida en cada uno de ellos se estimó el valor de K.

Para el cálculo de las pérdidas en las subcuencas se utiliza el método del SCS – CN. Este método utiliza dos parámetros: CN e infiltración inicial (I_a); pero este último se obtiene a partir del valor de CN con la siguiente ecuación:

$$I_a [mm] = 0.2 \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right)$$

Para definir los valores de curva número (CN) de las subcuencas se necesitan datos de uso y tipo de suelo.

Para el tipo de suelo, teniendo en cuenta que según el método de pérdidas del SCS – CN se dividen los tipos de suelo en 4 categorías, a continuación se caracteriza cada una de ellas:

- ✓ Grupo A: arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- ✓ Grupo B: suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- ✓ Grupo C: margas arcillosas, o bien arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y con alto contenido de arcilla.
- ✓ Grupo D: suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Del SIG de la base de datos "Suelos de la República Argentina - Escala 1-500.000" del INTA, se extrajo la siguiente carta de suelos de la zona de estudio:

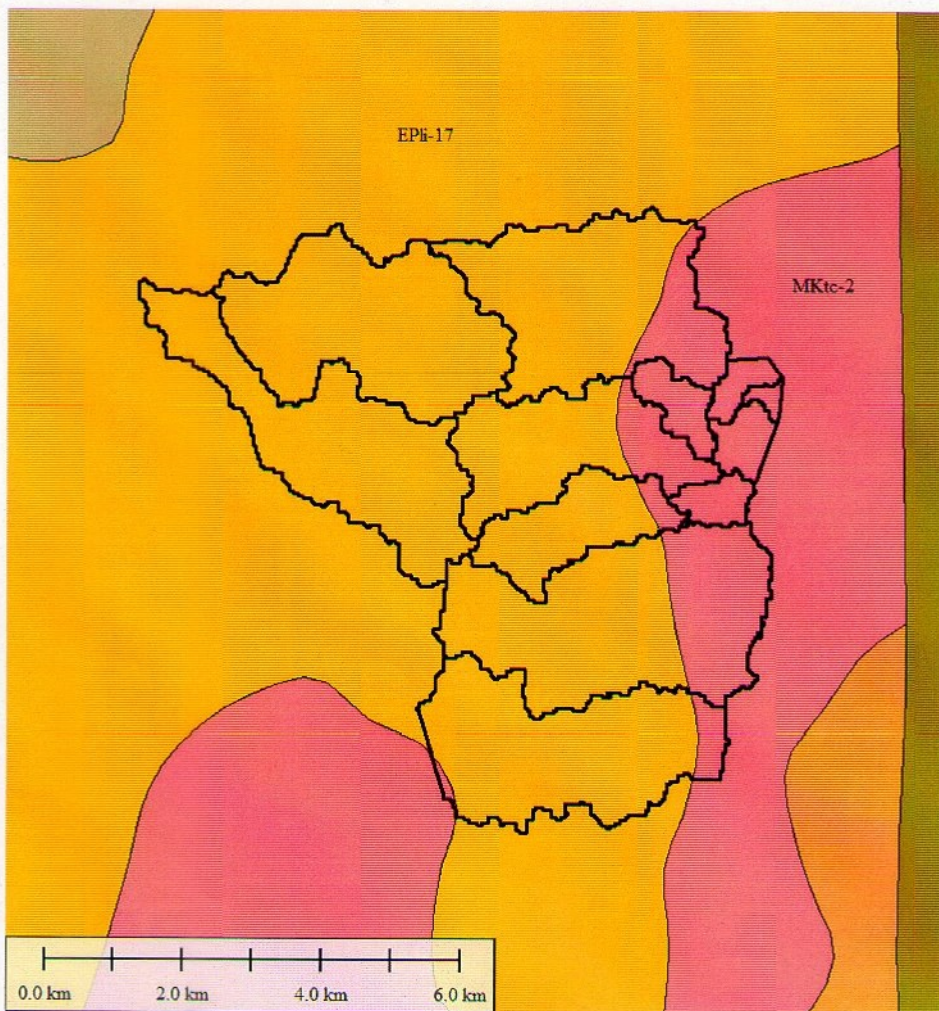


Figura 16: Tipos de suelo en el área de estudio.

Al analizar la última figura se observa que en la zona existen 2 tipos de suelo:

- ✓ MKtc-2: está compuesto en un 70% por suelos planos suavemente deprimidos, bien drenado, profundo (+ de 100 cm), franco en superficie, franco arcilloso limoso en el subsuelo, ligeramente inclinado (1-0.5%); en un 30% por suelos de pendientes moderadas, algo excesivamente drenado, profundo (+ de 100 cm), franco limoso en superficie y subsuelo.
- ✓ EPli-17: está compuesto en un 40% por suelo de laderas escarpadas, excesivamente drenado; algo somero (75 – 50 cm), areno franco en superficie y en el subsuelo, extremadamente pedregoso; en un 30% por suelo de laderas muy colinadas, excesivamente drenado, muy somero (– 25 cm), areno franco en superficie y en el subsuelo, muy pedregoso; en un 10% por suelo de vallecitos, algo excesivamente drenado, profundo (+ de 100 cm), franco en superficie y subsuelo, pedregoso; y en un 20% por roca.

Estos tipos de suelo corresponden a suelos tipo B según la clasificación del SCS.

Para el uso del suelo se realizó un análisis de imágenes satelitales del terreno. Si se observa una imagen satelital de la cuenca, se observan regiones bien diferenciadas (ver Figura 17).

- Por un lado, en el noroeste de la zona de estudio se observan usos de suelo con especies arbóreas y pastizales con una buena cobertura vegetal.
- En los extremos norte y sur existen zonas cultivables
- En la zona central se observan áreas con un importante desarrollo urbanístico.

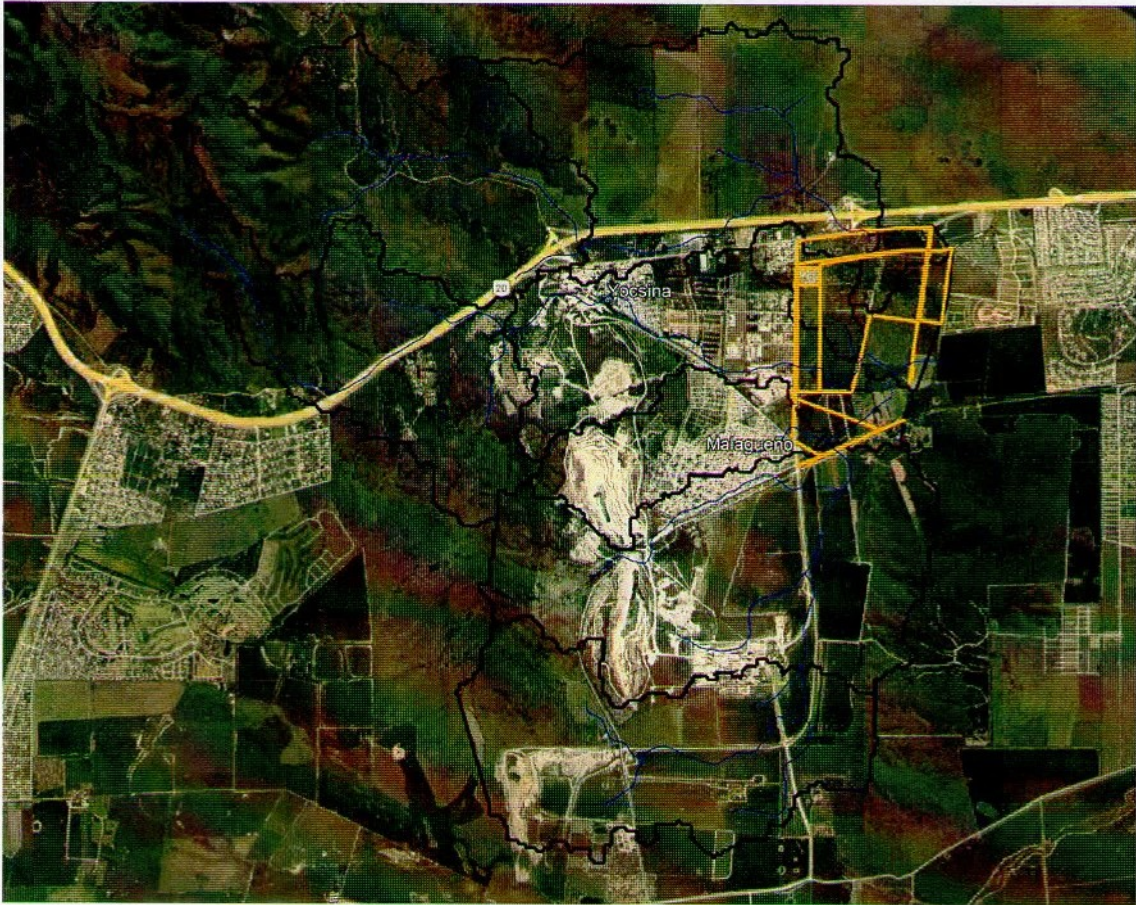


Figura 17: Uso de suelo en el área de estudio.

Los valores estimados de CN a partir de los usos y tipos de suelo de cada una de las subcuencas se presentan a continuación:

Tabla 4: Parámetros del modelo de pérdidas del SCS-CN de cada una de las subcuencas.

Subcuenca	CN
A	68
B	68
C	73
D	83
E	80
F	75
G	83
H	80
I	75
J	75
K	80
L	78

Vale aclarar que todas las modelaciones se realizaron considerando como referencia la condición de humedad antecedente II (condición intermedia). Además, para analizar la variación de los caudales de diseño ante diferentes condiciones de humedad antecedente en la cuenca y cambios en el uso del suelo en la misma, es que se presentará un análisis de sensibilidad del estudio hidrológico ante la variación de los valores de CN previamente presentados en la tabla previa.

2.4. *Determinación de parámetros característicos – Cuencas urbanizadas*

Para realizar el estudio hidrológico correspondiente a la situación Post Urbanización (Futura), con el 100% de loteo urbanizado, se definen las cuencas internas (Figura 18) en función de la configuración del loteo y del sentido de los escurrimientos superficiales. Para definir los valores del número de curva (CN) del método del SCS se utilizaron los mismos valores presentados en el apartado anterior para las cuencas externas y se consideró un 40% de áreas impermeables en cada una de las cuencas internas.

En la Figura 18 se presenta la configuración de las cuencas internar y externas y el sistema de drenaje y regulación propuesto. En la Tabla 5 se presentan los principales parámetros de cada una de las cuencas.



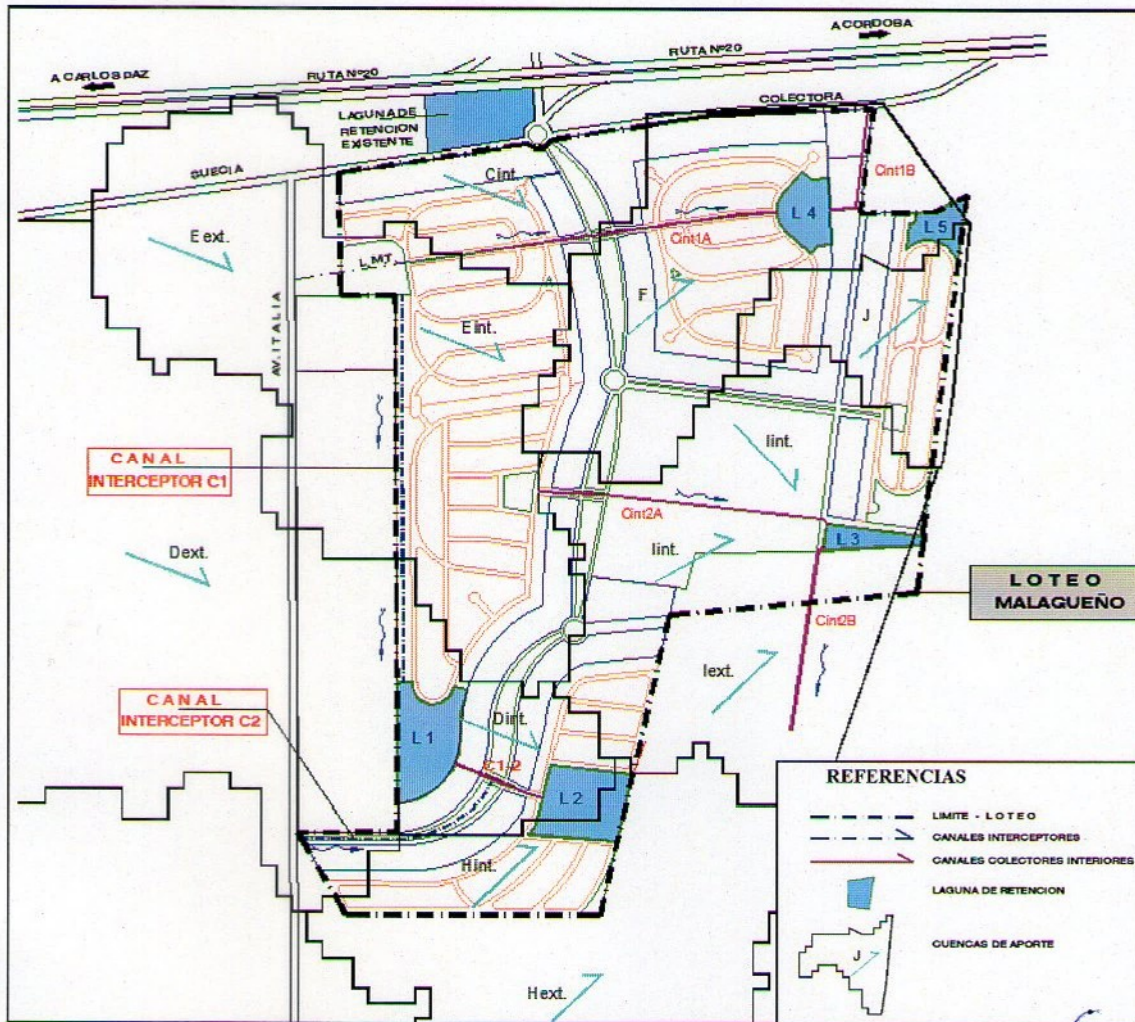


Figura 18: Configuración de cuencas post urbanización.

Tabla 5: Parámetros de las cuencas post urbanización.

Subcuenca	Área [km ²]	CN	la [mm]	Área Impermeable [%]
Cinterior	0.1908	80	10	0
Dexterior	2.1995	80	10	0
Dinterior	0.233	80	10	40
Eexterior	0.5114	80	10	40
Einterior	0.414	80	10	40
Finterior	0.5146	75	11	40
Hexterior	0.5239	80	10	0
Hinterior	0.134	75	11	0
Iexterior	0.2325	75	11	40
Iinterior	0.4903	73	12	40
Jinterior	0.1748	75	11	40

2.5. Determinación de lluvia de diseño

Cálculo de la curva IDT

La probabilidad de ocurrencia de una lluvia depende de su persistencia o duración por lo que hace falta establecer la relación entre tres variables: la intensidad (i), la duración (d), y el período de retorno (T , inversamente relacionado a la probabilidad de ocurrencia) las cuales requieren para su construcción de registros continuos (pluviografía), escasos en Argentina (al igual que en muchos lugares del mundo), tanto por su cobertura espacial como por la extensión temporal de sus series. Estas curvas o relaciones están disponibles en menos de 29 localidades en Argentina, las cuales se muestran en la Figura 19:

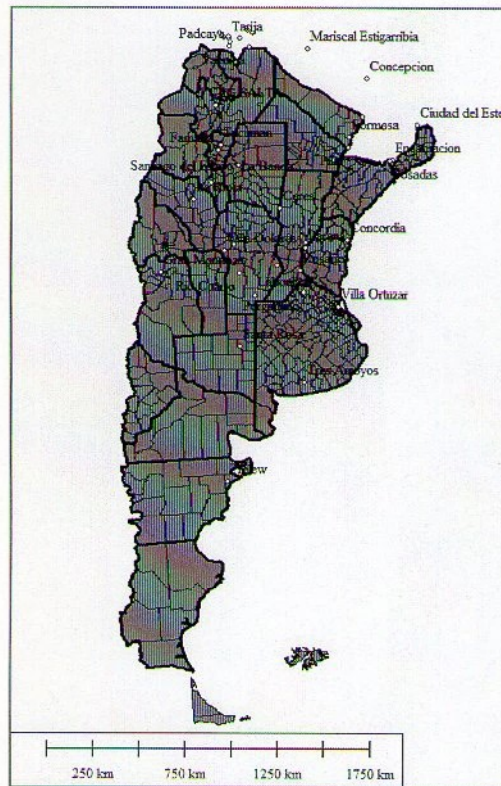


Figura 19: Localización de las estaciones pluviográficas en la Argentina y en países limítrofes.

Esta información será transpuesta a localidades más cercanas a la zona de estudio (donde se encuentren disponibles registros pluviométricos históricos) regionalizando la información pluviográfica con técnicas apropiadas asumiendo que esta estación pluviográfica y la estación pluviométrica se encuentran en una zona meteorológicamente homogénea de acuerdo a lo propuesto por Caamaño et al., 2003.

Dentro del marco del proyecto nacional de "Estimación de láminas de lluvias máximas diarias y sus parámetros estadísticos en Argentina" (Guillén et al., 2018), se han analizado más de 1500 estaciones pluviométricas en la Argentina, las cuales se presentan en la Figura 20:

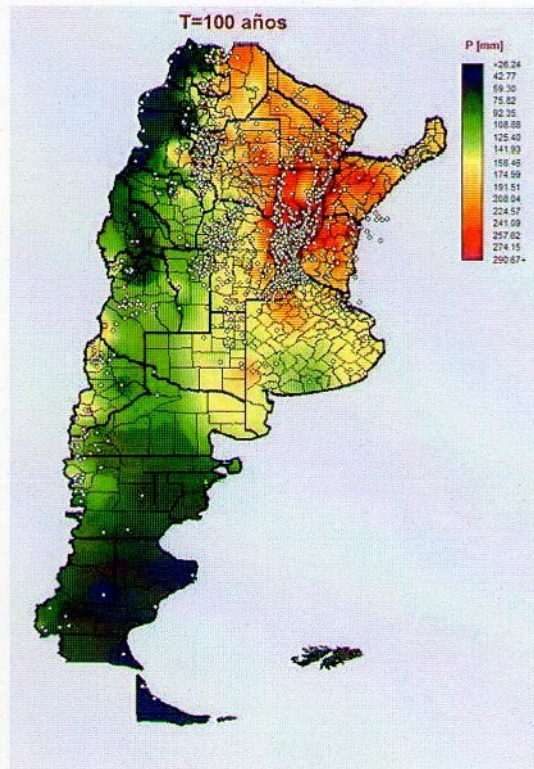


Figura 20: Localización de las estaciones pluviométricas en la Argentina superpuestas con el mapa de láminas de lluvia máximas diarias asociadas a 100 años de tiempo de retorno (Guillén et al., 2018).

Para la transposición de la información se utilizará el algoritmo denominado DIT (Caamaño y García, 1999) que parametriza el rol de la lluvia diaria en el vínculo i-d-T y permite transponerlo como una superficie tridimensional continua. El modelo DIT plantea al logaritmo de la intensidad como una función lineal del factor de frecuencia ϕ_y (Chow, 1951) y de un factor de persistencia δ_y (Caamaño Nelli y García, 1998) vinculados mediante dos parámetros locales, propios de la estación de medición, A y C, y uno zonal, B:

$$\ln i_{d,T} = A \cdot \phi_y - B \cdot \delta_y + C \quad [1]$$

Siendo:

$$\phi_y = 2,584458 \cdot (\ln T)^{3/8} - 2,252573 \quad [2]$$

$$\delta_y = (\ln d)^{5/3} \quad [3]$$

Los parámetros de este algoritmo, llamado DIT de aquí en adelante, son A, B, C y el exponente q de la ecuación (3). La estimación de este último, en las estaciones de ensayo del modelo arrojó valores próximos a 5/3 (Caamaño et al., 2011) lo que será adoptado aquí como constante. Lógicamente, la bondad de ajuste decae por perder flexibilidad, pero como sigue siendo muy buena, la mejora en la parsimonia del modelo, justifica suprimir un parámetro.

Más allá de su carácter conceptual y su buen desempeño numérico, la gran ventaja del DIT es la forma explícita en que los parámetros locales C y A se transforman en C' y A' , al transponer la función i - d - T de un pluviógrafo cercano a un pluviómetro (estación pluviométrica cercana a la cuenca analizada), dentro de una zona meteorológicamente homogénea, donde B y q son constantes (Caamaño Nelli, García y Dasso, 1998). Basta con sustituir la media, μ , y el desvío estándar, σ , de los logaritmos de la serie pluviográfica diaria, por los homólogos de la pluviométrica, μ' y σ' , según las ecuaciones (4) y (5):

$$A' = A - \sigma + \sigma' \quad [4]$$

$$C' = C - \mu + \mu' \quad [5]$$

Las estaciones pluviométricas más cercanas a la zona de estudio se muestran en la Figura 21. Ellas son: La Lagunilla (aparece con el N° 167 en la figura y tiene una longitud de serie pluviométrica de 20 años), Frigorífico La Perla (la N° 163, con una longitud de 42 años), Estancia La Cocha (la N° 166, con una longitud de 18 años) y Malagueño (la N° 164, con una longitud de 33 años). Debido a la cercanía a la zona de estudio, a que la zona de estudio es homogénea y fundamentalmente a la mayor longitud de la serie es que la estación pluviométrica Frigorífico La Perla se utilizará como satélite y la IDT se estimará en esta localización.

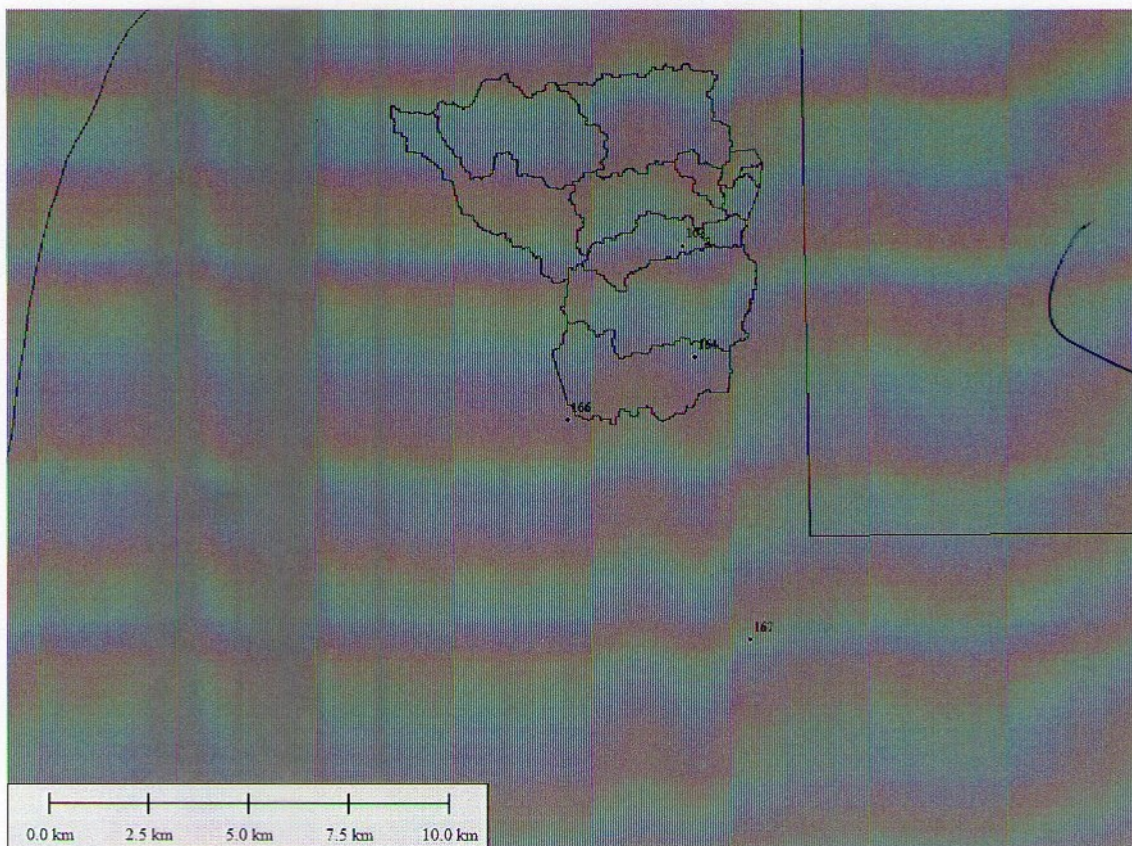


Figura 21: Localización de las estaciones pluviométricas más cercanas a la ubicación de la zona de estudio.

Posteriormente es necesario definir la estación pluviográfica base para poder estimar la IDT aplicando el modelo DIT en el caso de estudio. Para ello se utilizaron como estaciones base pluviográficas las existentes en la localidad de Córdoba Observatorio, La Suela y Villa Dolores (todas en la Provincia de Córdoba). Para transponer la curva IDT a la zona de estudio se utilizaron datos de la estación pluviométrica de Malagueño. La localización de las estaciones pluviográficas respecto a la zona de estudio se muestra en la Figura 22:

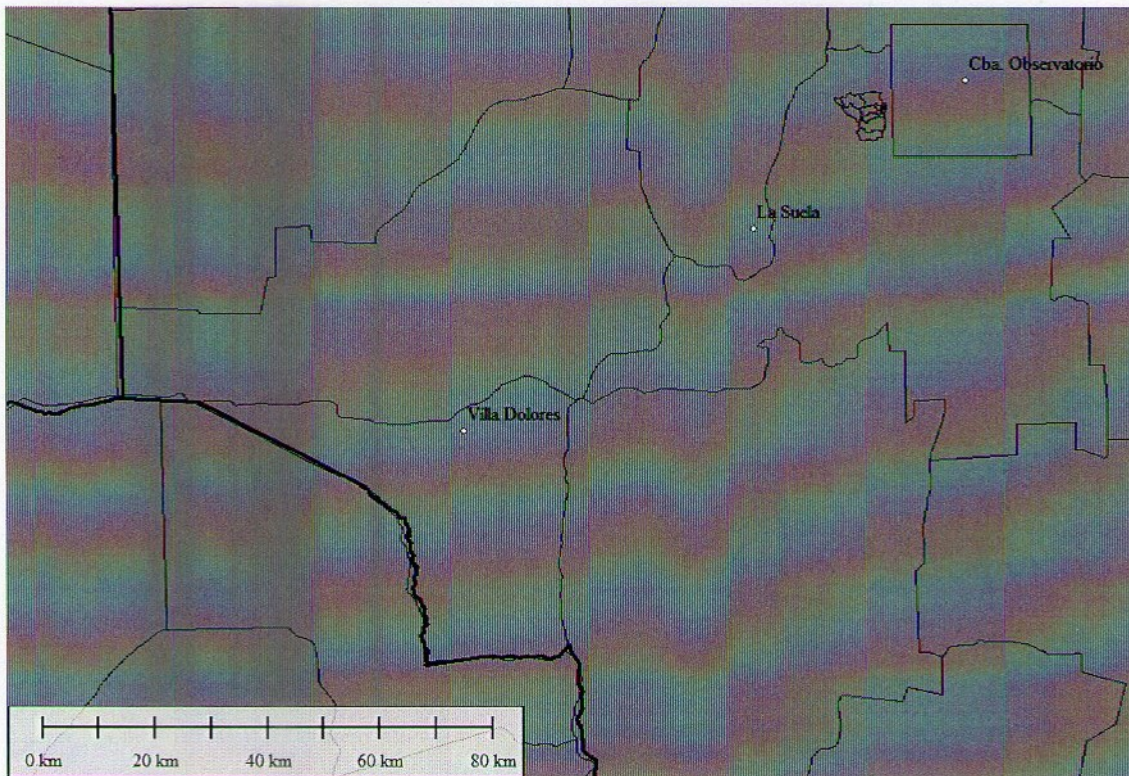


Figura 22: Localización de las estaciones pluviográficas respecto a la ubicación de la zona de estudio.

El análisis que es importante realizar para estimar la IDT, es elegir adecuadamente la estación pluviográfica base para a posteriori usarla en la transposición aplicando el modelo DIT. Para ello, se calculó en la estación pluviométrica Frigorífico La Perla, la IDT tomando como base a las tres estaciones pluviográficas para posteriormente compararlas.

Al realizar la comparación, se observó para todas las recurrencias un comportamiento similar. Para demostrar lo ocurrido, a continuación a modo de ejemplo se muestra la IDT resultante para T=25 años aplicando diferentes estaciones pluviográficas base:

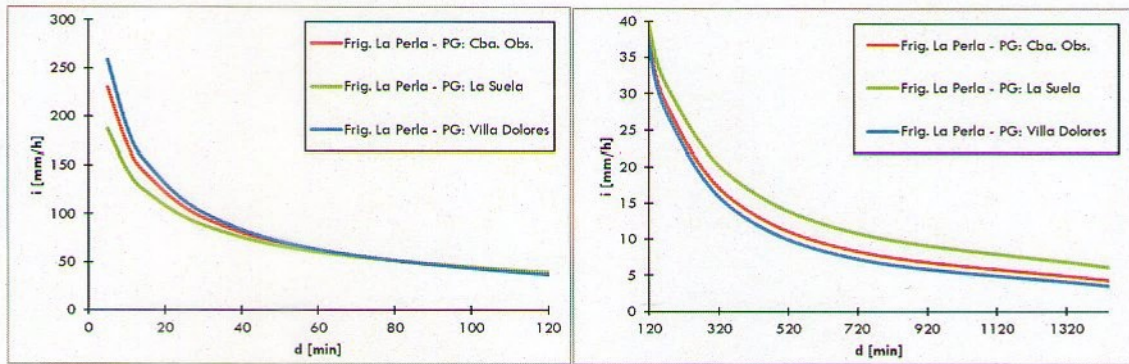


Figura 23: Curva IDT asociada a $T=25$ años en la localidad de Frigorífico La Perla para duraciones de entre 5 y 1440 minutos aplicando diferentes estaciones pluviográficas base.

Lo que de este análisis se observa es que para las duraciones menores al estimar la IDT aplicando el método DIT se obtienen las menores intensidades usando la estación pluviográfica de La Suela y las máximas utilizando Villa Dolores; mientras que por el contrario, para las duraciones largas se obtiene lo opuesto (es decir los menores valores al utilizar la estación de Villa Dolores y los máximos al usar La Suela).

Para poder elegir una de las tres familias de curvas IDT, es que se recurre a la única duración con la cual se cuenta con datos en las localidades a transponer. Como en Frigorífico La Perla existen solo datos pluviométricos, es que la única duración con la cual se pueden contrastar las curvas IDT previamente desarrolladas es 1440 minutos. A continuación se contrasta el dato pluviométrico con las IDT previamente estimadas:

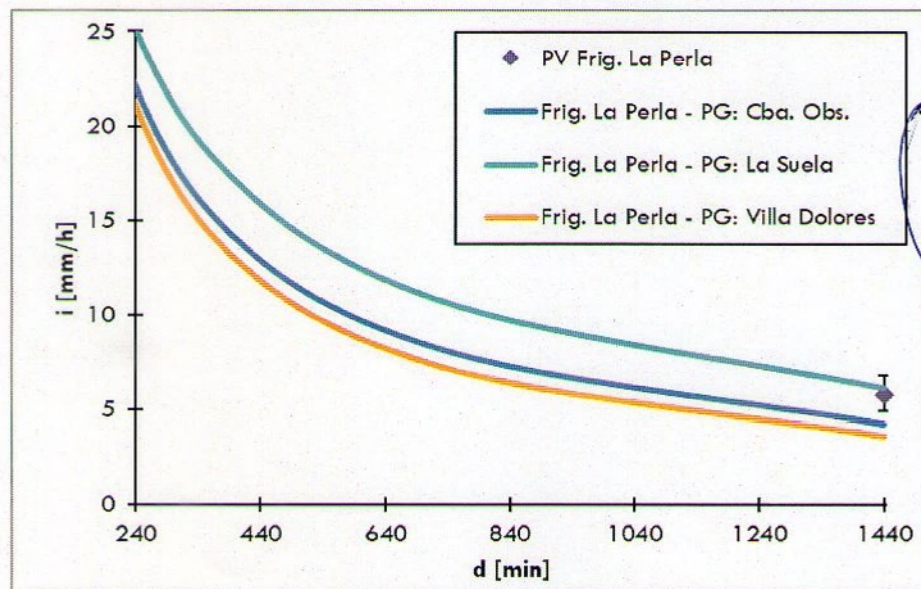


Figura 24: Contraste entre curvas IDT asociadas a $T=25$ años en la localidad de Frigorífico La Perla aplicando diferentes estaciones pluviográficas base y el dato pluviométrico asociado a la duración diaria de precipitación.

De esta última figura se observa que el dato pluviométrico se encuentra mucho más cercano al valor estimado partiendo de la estación pluviográfica de La Suela. Exactamente lo mismo que lo aquí desarrollado ocurrió para las demás recurrencias. De este análisis puede concluirse que la estación de La Suela es la más adecuada para utilizarla como estación base pluviográfica en el modelo DIT.

Si se aplicara como estación base pluviográfica la existente en Córdoba Observatorio o en Villa Dolores se estimarían valores de láminas de lluvia del orden de entre un 30 y un 40% inferiores a los realmente medidos en la duración diaria; mientras que al utilizar la estación La Suela, la diferencia entre el valor diario y el estimado con el DIT al aplicar la transposición se reduce a valores del orden de 5%.

En resumen, partiendo de la estación pluviográfica base de La Suela, se estimó la relación IDT en la localidad de Frigorífico La Perla, para ser aplicada al caso de estudio.

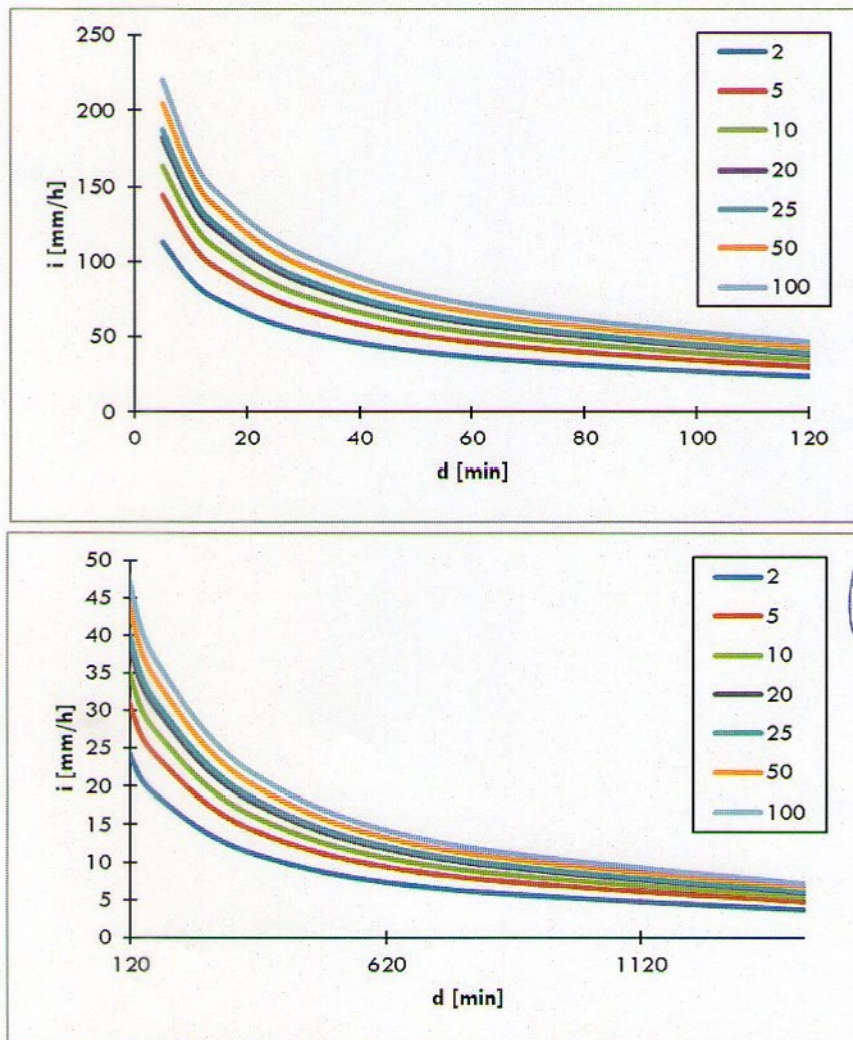


Figura 25: Curva IDT en la localidad de Frigorífico La Perla para duraciones de entre 5 y 120 minutos (gráfico superior) y para duraciones mayores a 120 minutos (gráfico inferior).

Cálculo de la duración de la tormenta crítica sobre la cuenca

Para calcular la duración de la tormenta crítica de la cuenca analizada, se modelaron para una recurrencia de 25 años lluvias de diferentes duraciones para encontrar cual es la duración que genera el caudal pico máximo (caso más desfavorable); y esto se hizo teniendo en cuenta aplicando el modelo del SCS – CN con los valores previamente presentados. A continuación se grafican los caudales picos obtenidos para cada una de las duraciones de lluvia modeladas:

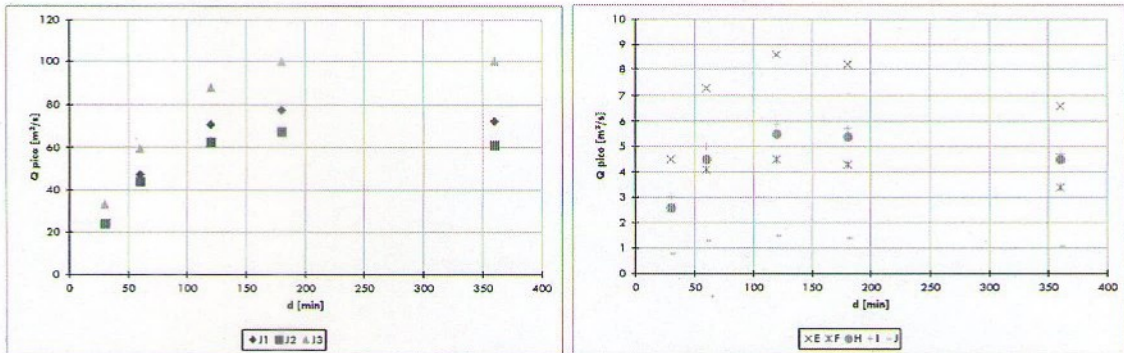


Figura 26: Caudales pico obtenidos para diferentes duraciones de lluvias modeladas sobre la cuenca.

Vale aclarar que se denomina J1 a la cuenca formada por la conjunción de las subcuencas B y C; J2 a las subcuencas A y D; y J3 a G, K y L. Las mismas se agruparon ya que poseen una misma desembocadura hacia el loteo de estudio.

En la Figura 26 se observan dos casos bien diferenciados:

- En el caso de las cuencas de mayor tamaño (es decir J1, J2 y J3); a partir de una duración de tormenta de 180 minutos (3 horas) todas las cuencas analizadas entran en régimen, es decir que los caudales picos alcanzan su valor máximo o bien ya no crecen significativamente en su magnitud. Para duraciones mayores a la misma se obtienen caudales menores, por lo que la tormenta de duración igual a 3 horas es la crítica sobre estas cuencas de estudio. Es por ello que la duración de la lluvia de diseño a ser ingresada al modelo hidrológico para la determinación de los caudales de diseño es de 180 minutos en estos casos (y esta generará la respuesta más desfavorable sobre la cuenca).
- En el caso de las cuencas menores (E, F, H, I, J); ocurre un fenómeno similar para la duración de 120 minutos; por lo que la tormenta de duración igual a 2 horas es la crítica sobre estas cuencas de estudio. Es por ello que la duración de la lluvia de diseño a ser ingresada al modelo hidrológico para la determinación de los caudales de diseño es de 120 minutos en estos casos (y esta generará la respuesta más desfavorable sobre la cuenca).

Partiendo de la curva IDT previamente calculada, se estimaron las lluvias de diseño asociadas a las recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Las láminas de lluvia correspondientes a una duración de 120 y 180 minutos (duraciones críticas de las cuencas) y a los diferentes T son:

Tabla 6: Láminas de lluvia (en mm) caídas en 120 minutos para las diferentes recurrencias.

T [años]	2	5	10	25	50	100
h [mm]	48	61	69	79	86	93

Tabla 7: Láminas de lluvia (en mm) caídas en 180 minutos para las diferentes recurrencias.

T [años]	2	5	10	25	50	100
h [mm]	55	70	79	91	99	107

Atenuación espacial de la lámina de lluvia

No tiene en cuenta debido a que el área de las cuencas es menor a 25 km².

Distribución temporal de la lámina de lluvia

Se aplicaron los hietogramas tipo del trabajo "Distribución Sintética De Lluvias Intensas en el área serrana de la provincia de Córdoba, Argentina" de Dasso y Caamaño Nelli, 2011.

La siguiente figura muestra los hietogramas tipo para duraciones entre 30 y 1440 minutos sintetizados en La Suela, con el método de la mediana de la distribución empírica (técnica de Huff) y por el método del ordenamiento de intervalos (técnica de Pilgrim), expresados en sextiles. Cada bloque de las ocho series dura 1/6 de la duración, es decir, 5 a 240 minutos desde el IMA de 30 al de 1440 minutos respectivamente.

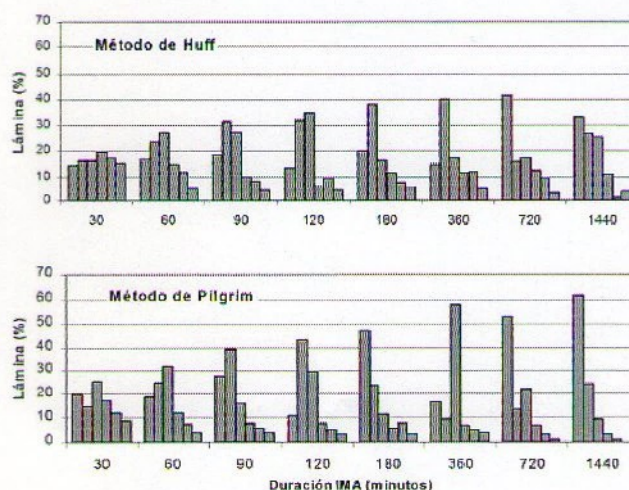


Figura 27: Hietogramas tipo estimados en La Suela.

[Handwritten signature]

Teniendo en cuenta estos resultados y la duración crítica de la tormenta en la cuenca, en este trabajo se utilizó un coeficiente de avance (es decir una relación entre la posición del pico de la tormenta y la duración total de la precipitación) de 0.33.

2.6. Modelo de cálculo de caudales: Transformación lluvia caudal

Como se mencionó anteriormente en este estudio se utilizó el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) para realizar todas las simulaciones numéricas. El método del Soil Conservation Service SCS de Estados Unidos para el cálculo de las abstracciones (SCS – CN), el método del Hidrograma Unitario modificado (HU) del SCS para la transformación lluvia-caudal, el método de Muskingum para realizar los tránsitos hidrológicos en canales y el método de Puls para el tránsito de los hidrogramas en las lagunas de regulación.

En la Figura 28 se presenta el esquema del modelo realizado en HEC-HMS para reproducir la situación Pre Urbanización y en la Figura 29 el correspondiente a la situación Post Urbanización. En ambas figuras se destacan los 3 puntos de descarga:

- Pto1: Punto de descarga ubicado sobre la cuneta Sur de la Ruta 20.
- Pto2: Punto de descarga en el bajo natural ubicado al Este del loteo.
- Pto3: Punto de descarga de la cuenca J, al Este del loteo.



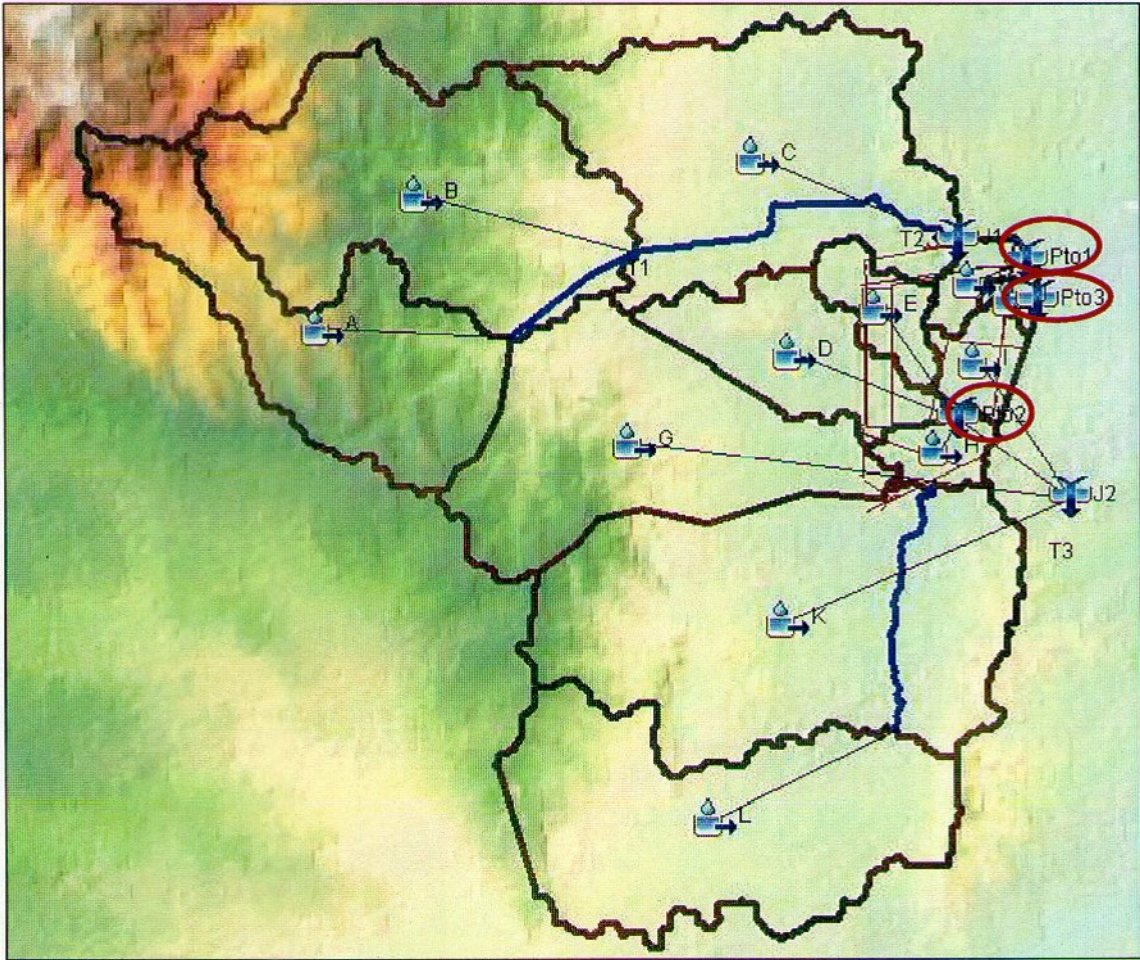


Figura 28: Esquema de modelación en HEC-HMS – Situación Actual.

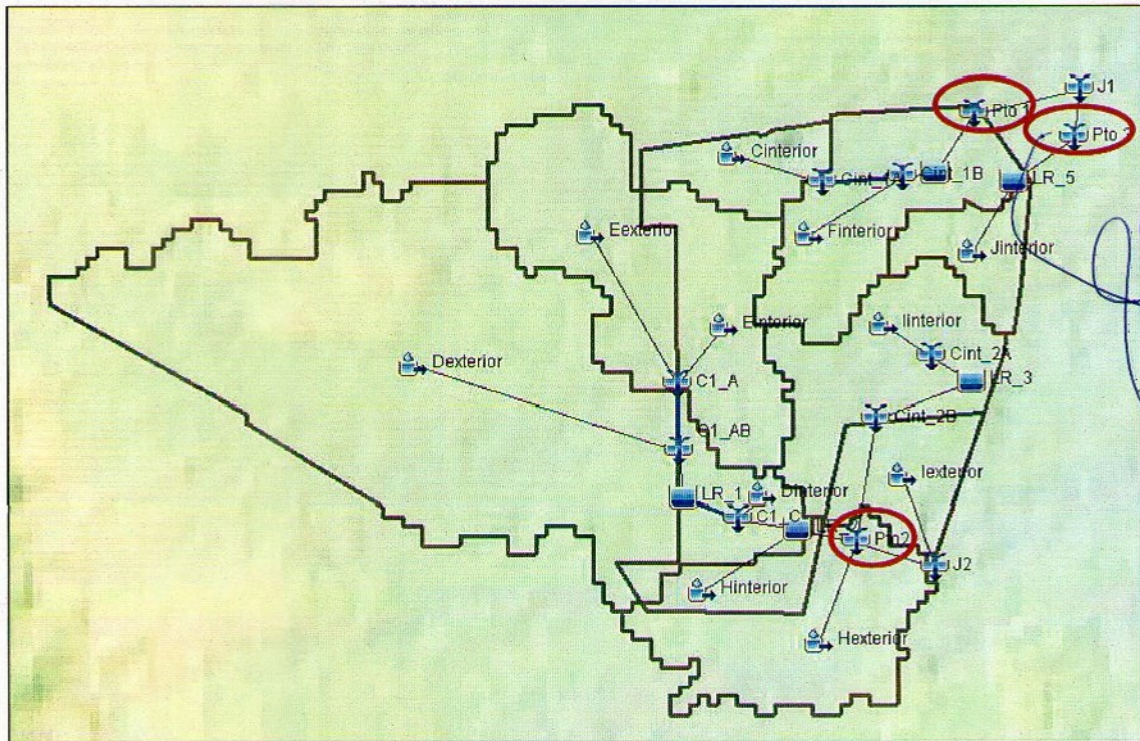


Figura 29: Esquema de modelación en HEC-HMS – Situación urbanizada.

Resultados

En la Tabla 8 se muestran, para los 3 puntos de control (Punto 1, 2 y 3), los caudales pico correspondientes a cada uno de los escenarios simulados (Tr: 5, 25 y 100 años) para la situación Pre y Post Urbanización y el porcentaje de laminación. Posteriormente, desde la Figura 30 hasta la Figura 35, se presentan los hidrogramas correspondientes en los 3 puntos de control (Punto 1, 2 y 3) para los escenarios de diseño asociados a Tr: 5 y 100 año.

Tabla 8: Caudales picos asociados a Tr: 5, 25 y 100 años en los puntos 1, 2 y 3 para situación sin loteo; y urbanizada con lagunas de regulación.

	Pre Urbanización			Post Urbanización			Diferencias %		
	Tr: 5	Tr: 25	Tr: 100	Tr: 5	Tr: 25	Tr: 100	Tr: 5	Tr: 25	Tr: 100
Pto 1	3	5	6.7	2.6	3.6	4.9	-13%	-28%	-27%
Pto 2	20.6	33.1	43.5	10.9	21.9	33.1	-47%	-34%	-24%
Pto 3	1	1.6	2.2	0.3	0.7	1	-70%	-56%	-55%

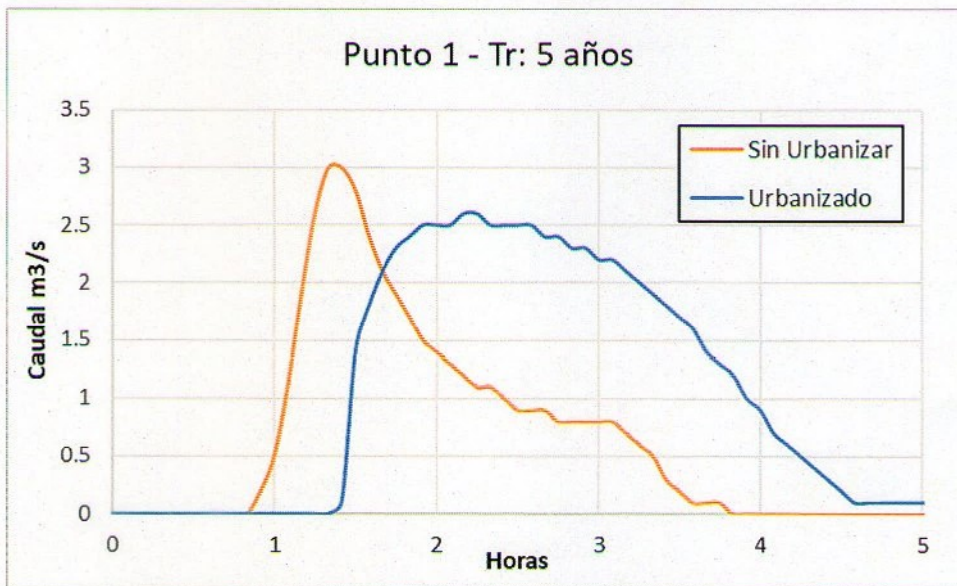


Figura 30: Hidrogramas Pre y Post Urbanización en el Punto 1 para Tr: 5 años.

Handwritten signature

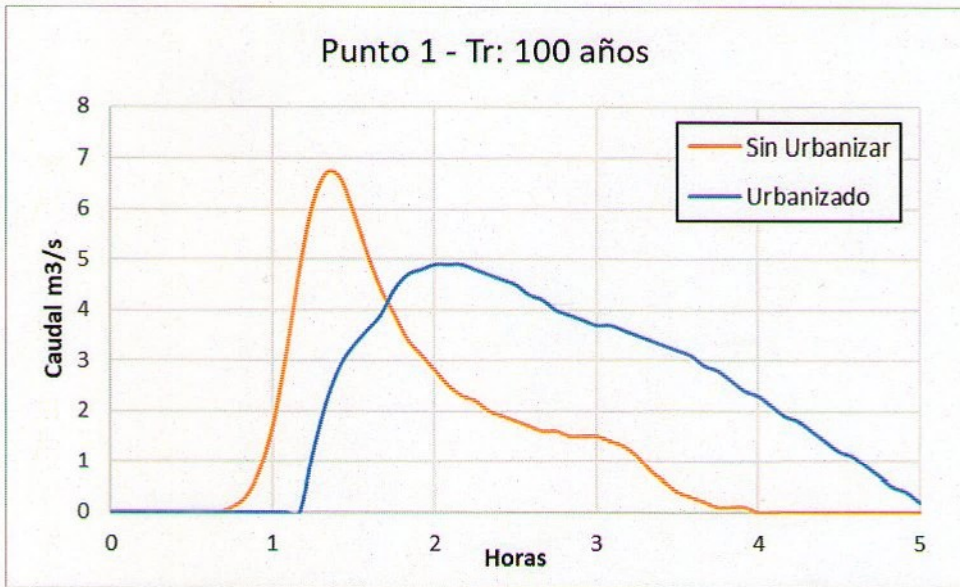


Figura 31: Hidrogramas Pre y Post Urbanización en el Punto 1 para Tr: 100 años.

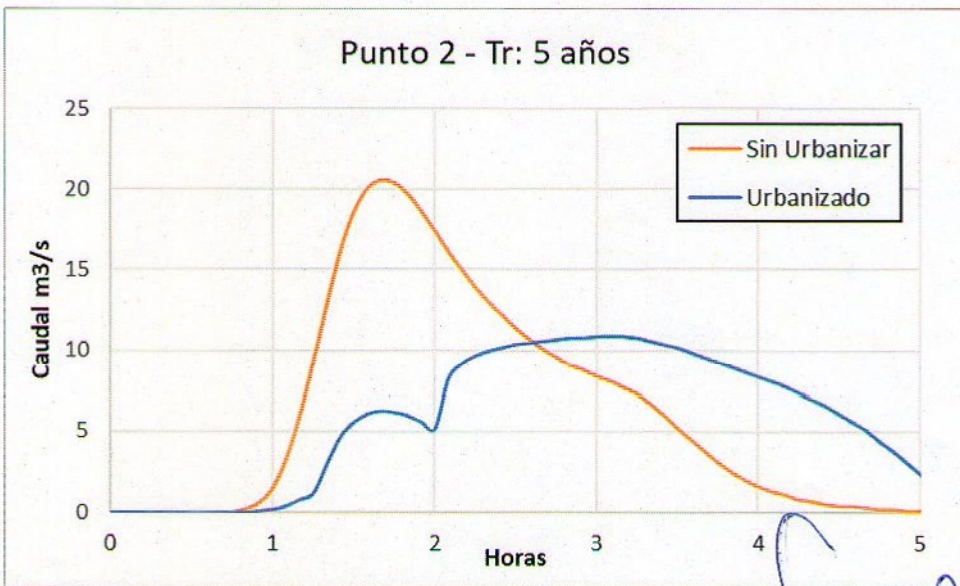


Figura 32: Hidrogramas Pre y Post Urbanización en el Punto 2 para Tr: 5 años.

[Handwritten signature]

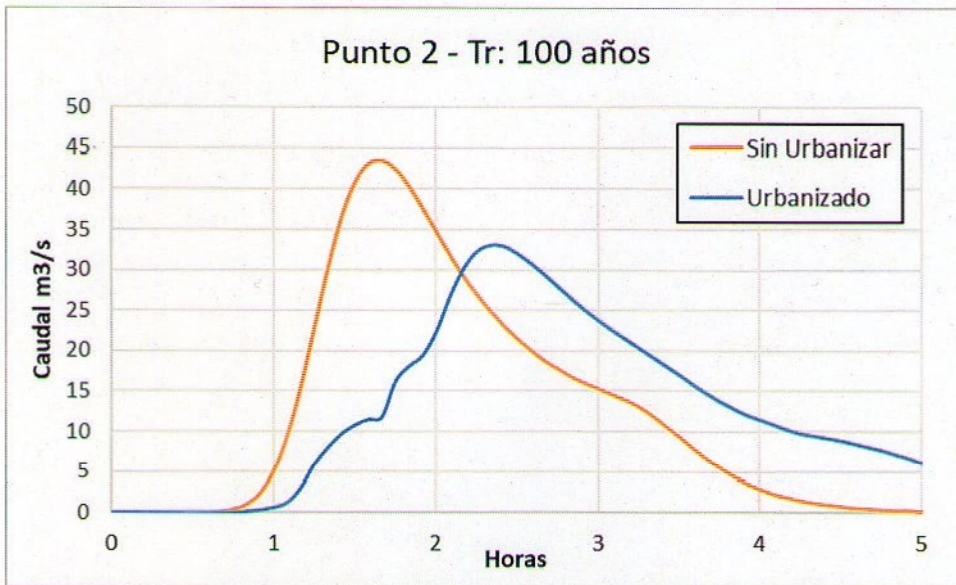


Figura 33: Hidrogramas Pre y Post Urbanización en el Punto 2 para Tr: 100 años.

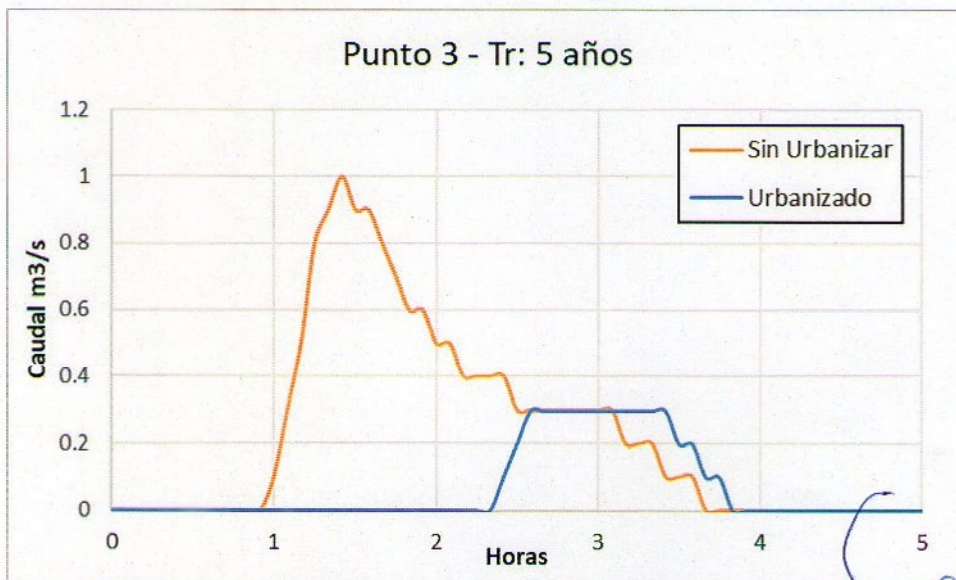


Figura 34: Hidrogramas Pre y Post Urbanización en el Punto 3 para Tr: 5 años.

[Handwritten signature]

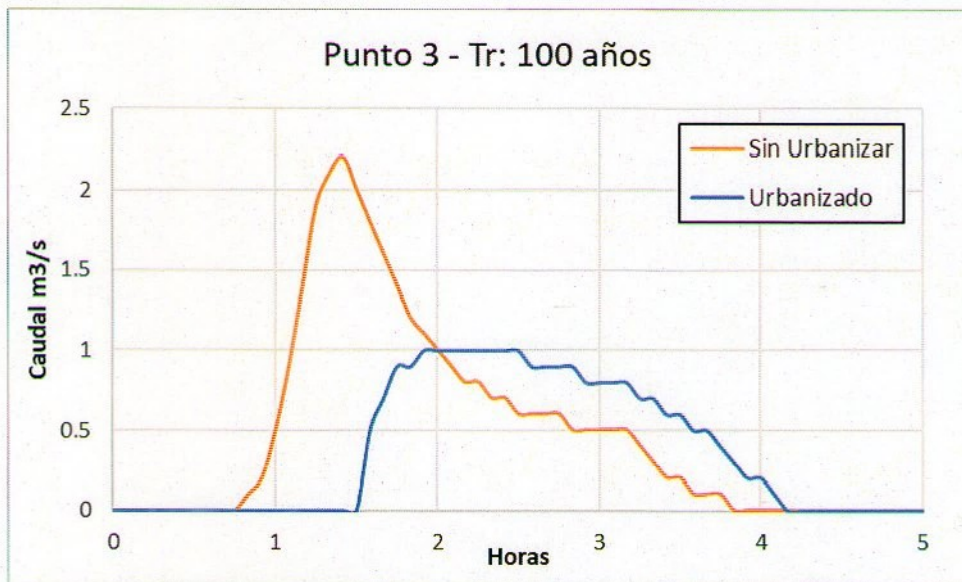


Figura 35: Hidrogramas Pre y Post Urbanización en el Punto 3 para Tr: 100 años.

2.7. Lagunas de regulación

En la Tabla 9 se presenta, para cada una de las lagunas de regulación proyectadas: el área en planta A y su altura H correspondiente, la pendiente del talud perimetral en todas las lagunas es de 1:1 (H:V), y las dimensiones de las estructuras de descarga (ver detalles de ubicación en planos adjuntos). Desde la Figura 36 hasta la Figura 40 se presentan las variaciones de niveles, de almacenamiento y los hidrogramas de ingreso y egreso a cada una de las lagunas de regulación para el evento de Tr:100 años.

Tabla 9: Características de las estructuras de regulación (L1, L2, L3, L4 y L5).

Lagunas	Área A	Altura H	Talud	Estructuras	
	m ²	m	m/m	Descargador	Vertedero
L1	37000	1.5 m	1:1	5 de 1x1m	H: 1m - L:20m
L2	35000	1.5 m	1:1	5 de 1x1m	H: 1m - L:20m
L3	10000	1.0 m	1:1	3 de 1x1m	H: 1m - L:10m
L4	19000	1.1 m	1:1	2 de 1x1m	H: 1m - L:10m
L5	12000	0.6 m	1:1	1 de 1x1m	H: 1m - L:5m

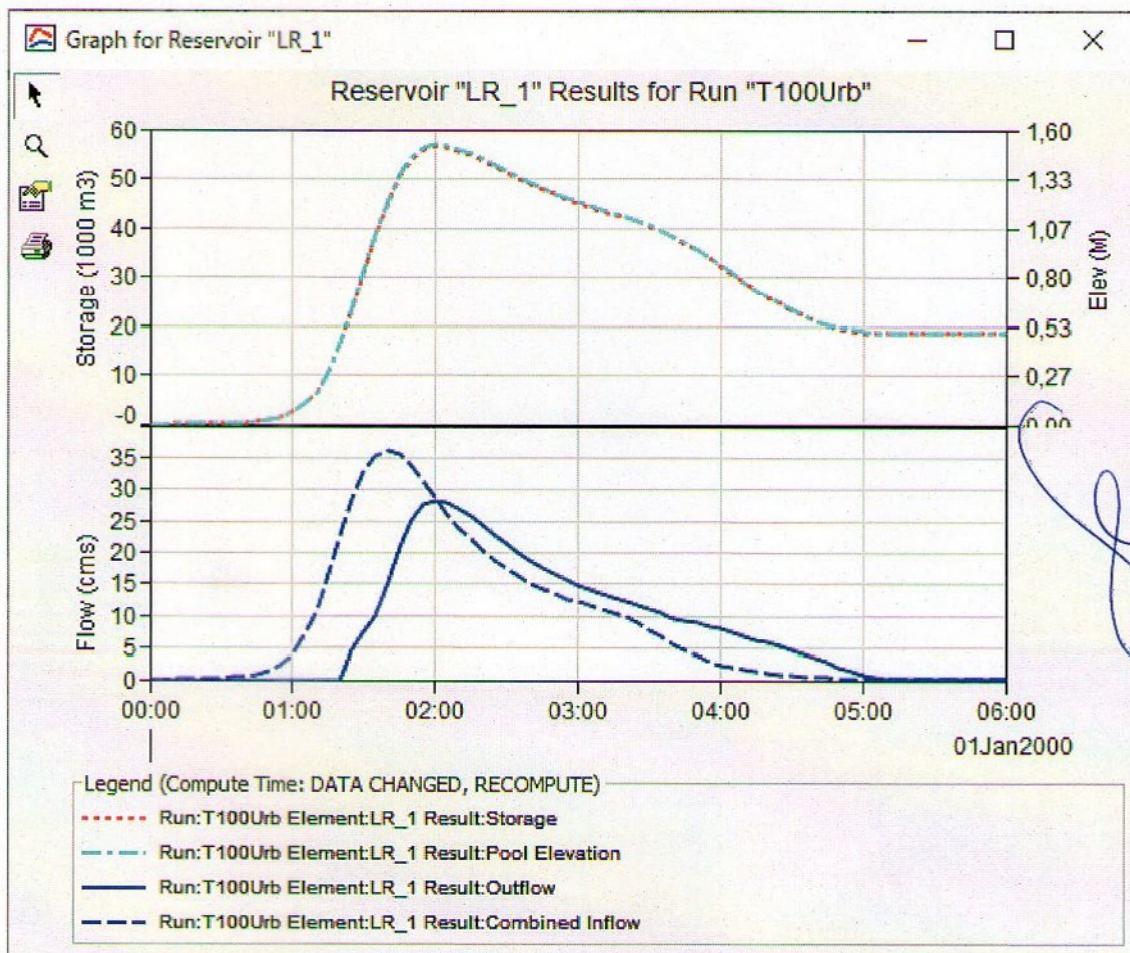


Figura 36: Niveles, almacenamiento e hidrogramas de ingreso y egreso de la Laguna 1 para Tr: 100 años.

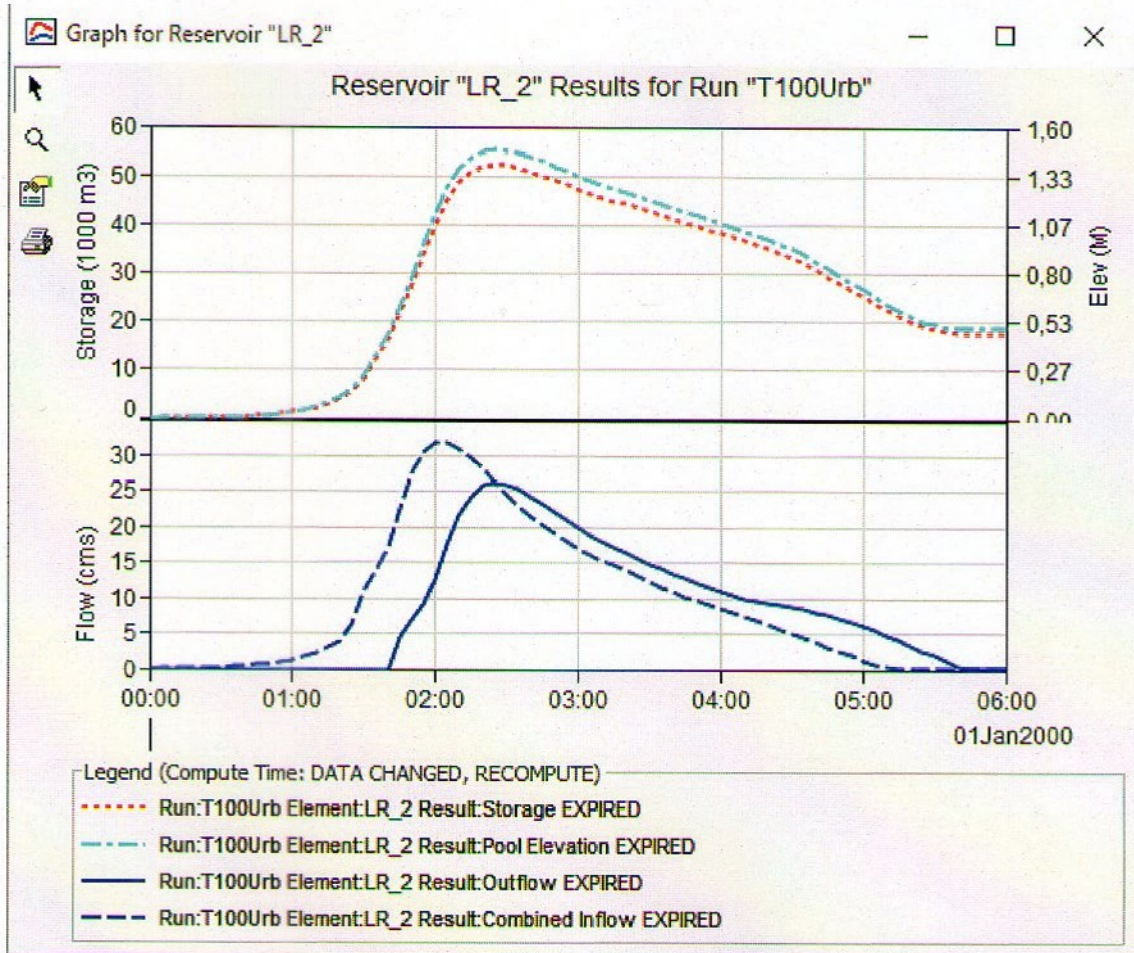


Figura 37: Niveles, almacenamiento e hidrogramas de ingreso y egreso de la Laguna 2 para Tr: 100 años.

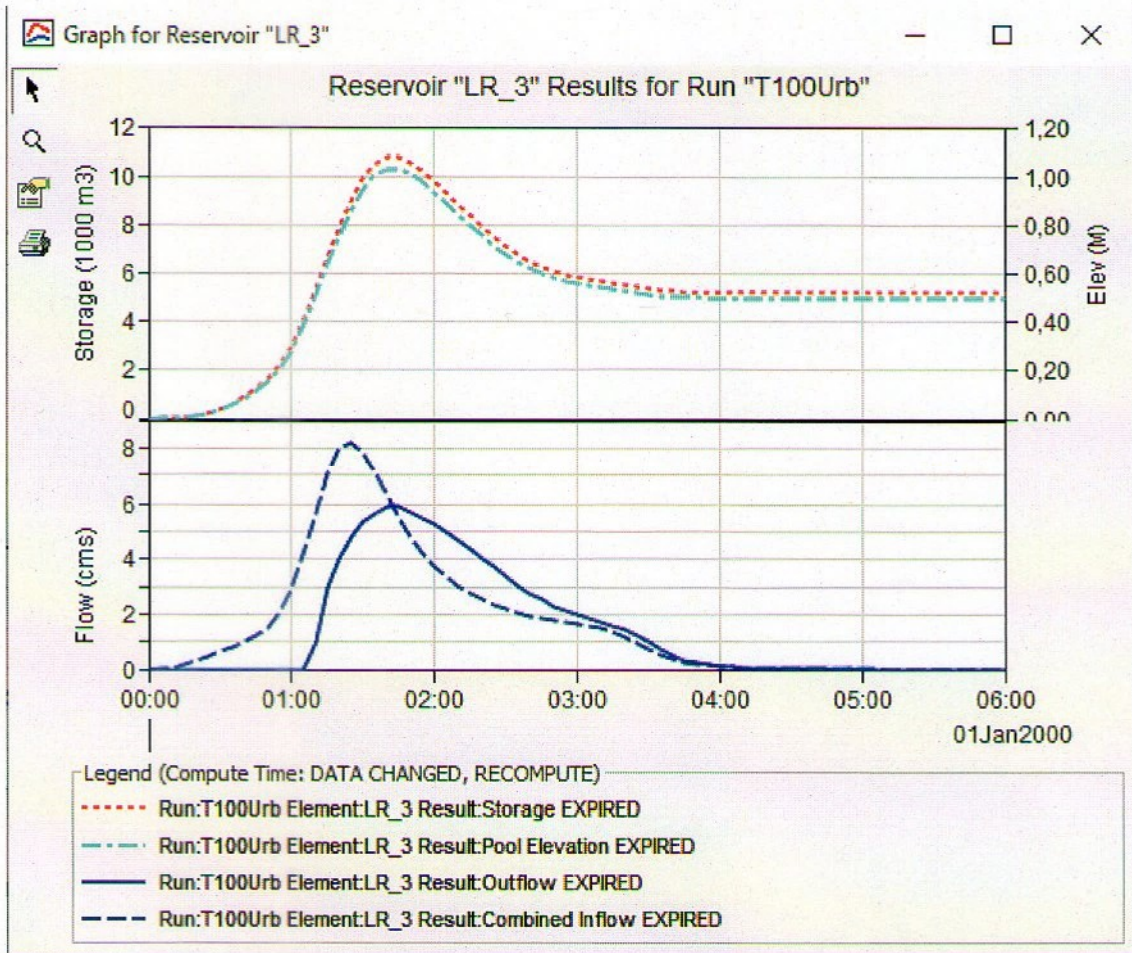


Figura 38: Niveles, almacenamiento e hidrogramas de ingreso y egreso de la Laguna 3 para Tr: 100 años.

Handwritten signature

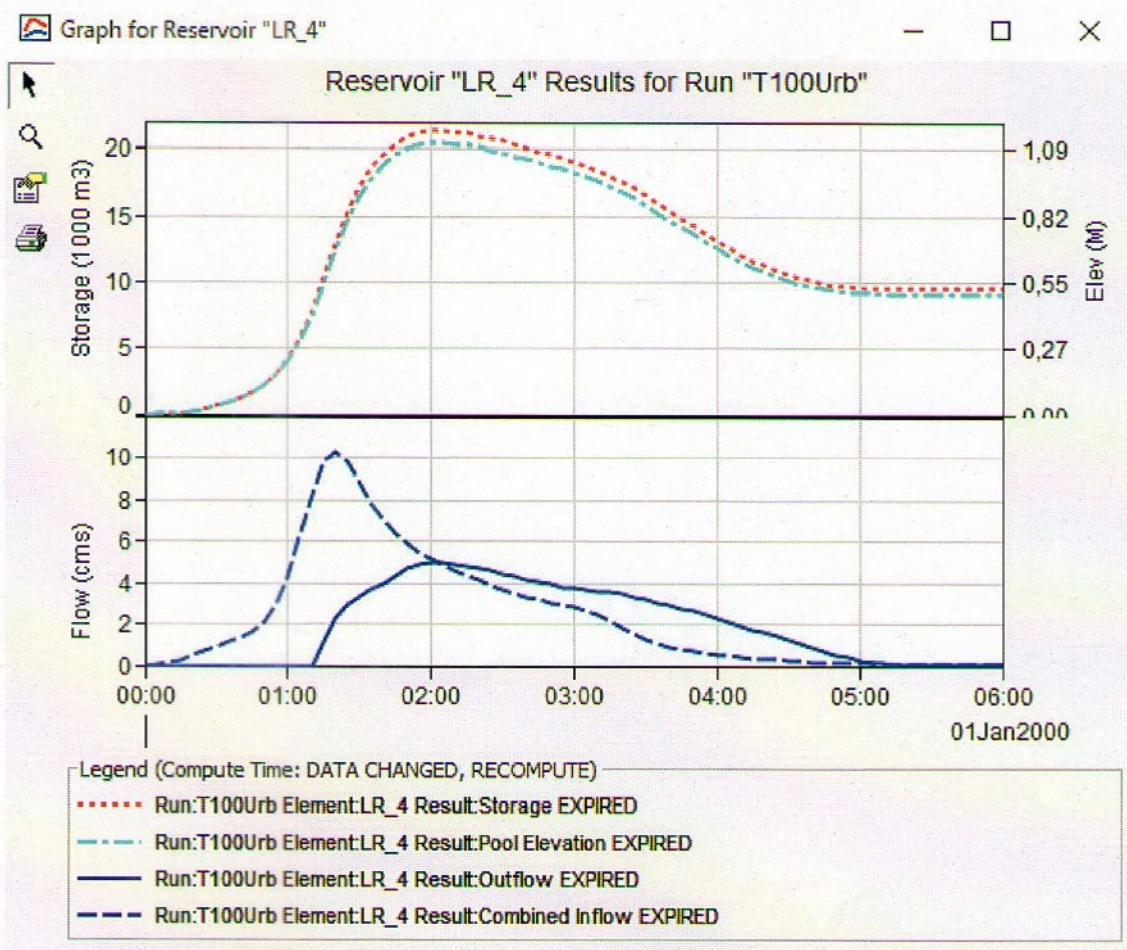


Figura 39: Niveles, almacenamiento e hidrogramas de ingreso y egreso de la Laguna 4 para Tr: 100 años.

geel

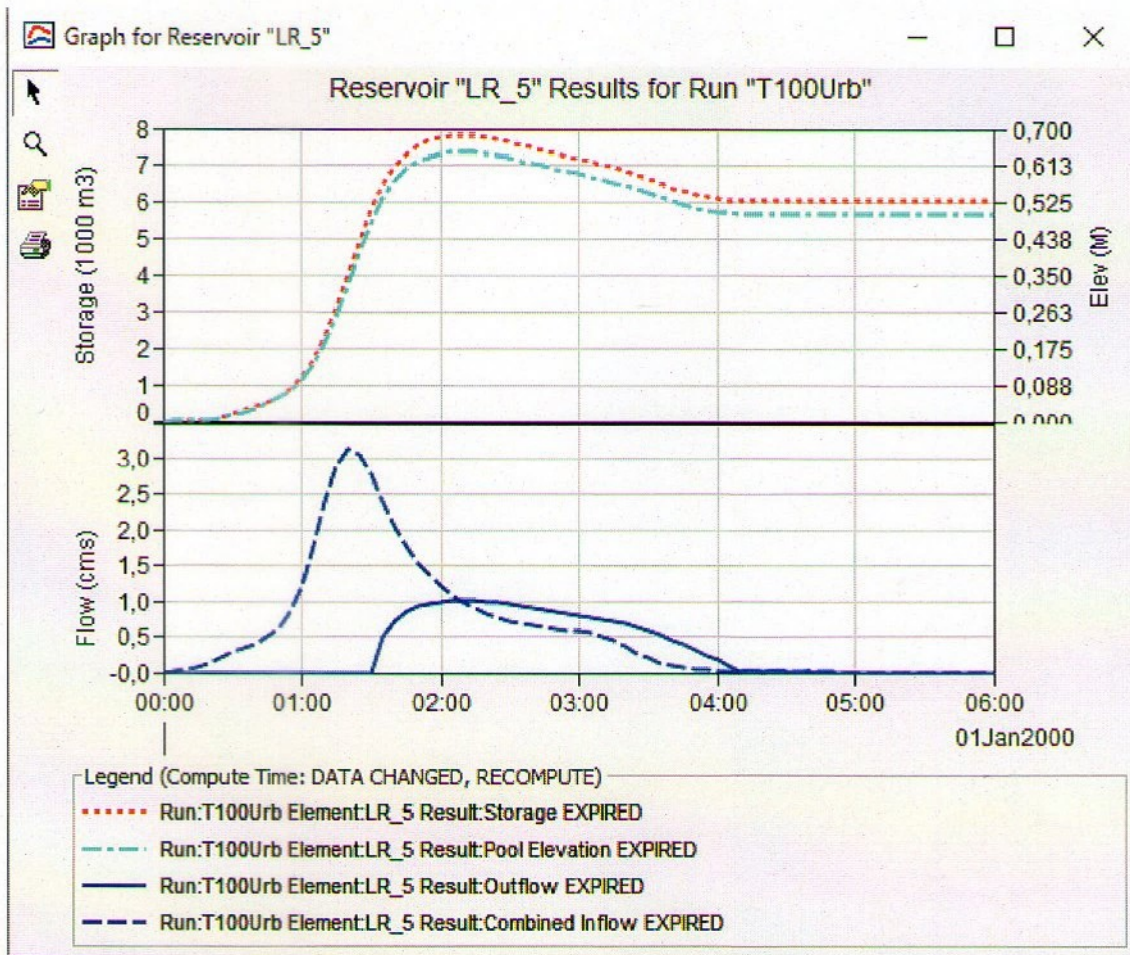


Figura 40: Niveles, almacenamiento e hidrogramas de ingreso y egreso de la Laguna 5 para Tr: 100 años.

2.8. Verificación hidráulica de canales

Para realizar la verificación hidráulica de los canales interceptores e internos se utilizó el programa HCanales el cual se basa en la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Dónde:

- V: velocidad del flujo en m/s
- n: coeficiente de rugosidad
- R: radio hidráulico, en m
- S: pendiente longitudinal m/m

Se utilizó el caudal correspondiente a Tr: 25 años para el diseño y verificación de los canales. A continuación se presentan las secciones tipo de cada uno de los canales y sus dimensiones, todos son de sección rectangular y revestidos de H°.

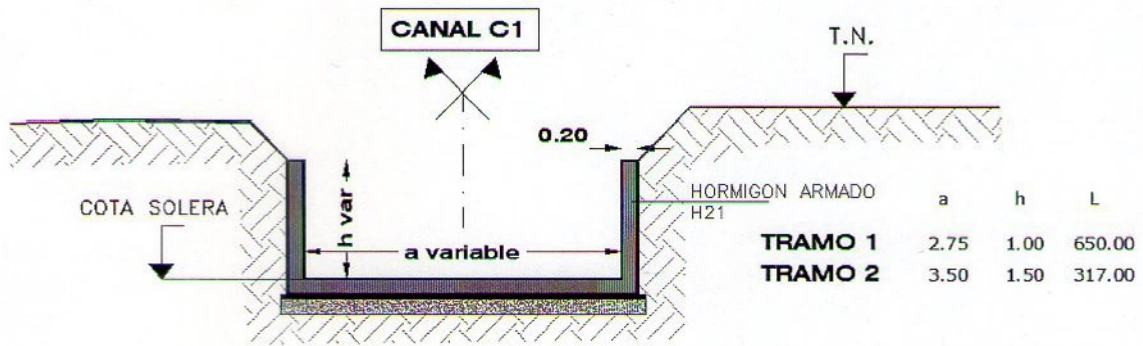


Figura 41: Sección tipo Canal C1.

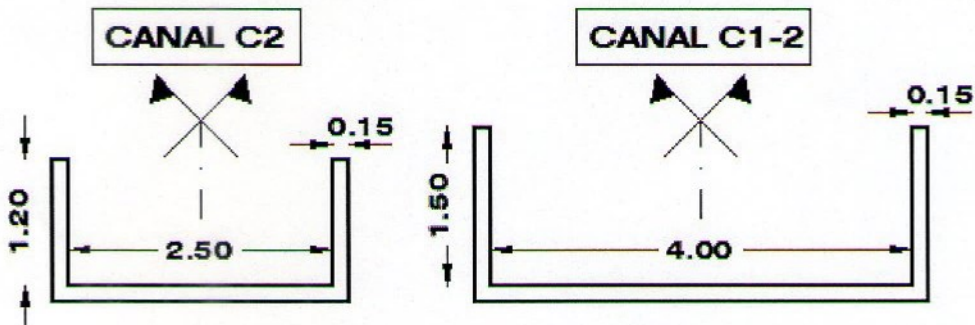


Figura 42: Secciones tipo de Canal C2 (izquierda) y C1-2 (Derecha).

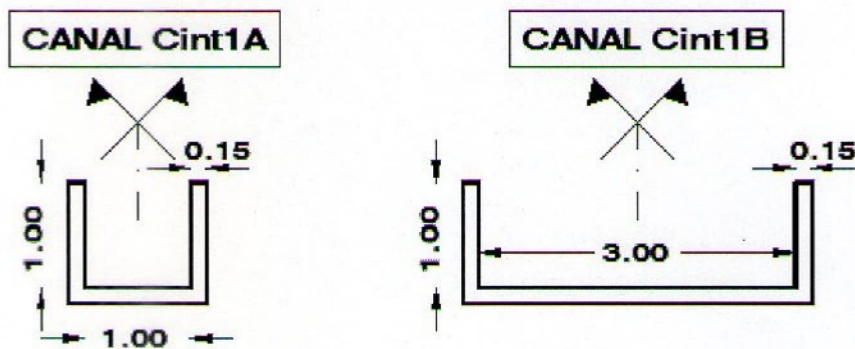


Figura 43: Secciones tipo de Canal interno 1.

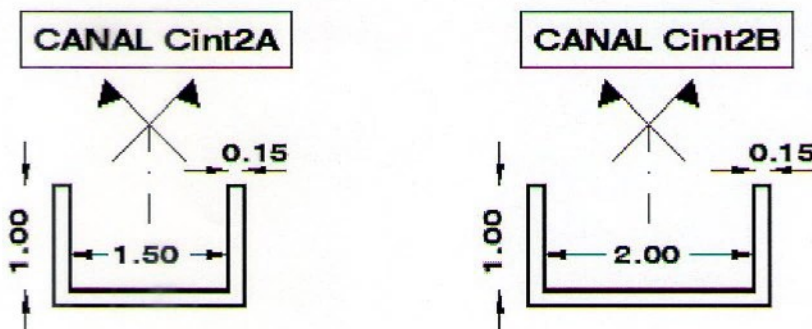


Figura 44: Secciones tipo de Canal interno 2.

[Handwritten signature]

Resultados

En la Tabla 10 se presentan las verificaciones de los canales interceptores e internos proyectados.

Tabla 10: Verificación hidráulica de canales.

	Parámetros de canales				Capacidad	Caudal m ³ /s
	S	B (m)	H (m)	L (m)	m ³ /s	Tr: 25
C1-Tramo 1	0.008	2.75	1	650	13.1	10.6
C1-Tramo 2	0.007	3.5	1.5	317	29.3	27.7
C1-2	0.005	4	1.5	235	29.4	21.6
C2	0.004	2.5	1.2	532	10.5	5.9
Cint-1A	0.026	1	0.8	755	5.5	1.5
Cint-1B	0.004	3	1	310	10.4	8.3
Cint-2A	0.02	1.5	1	732	8.6	6.6
Cint-2B	0.005	2	1	475	6.4	4.8

3. Planos

Plano 1 – Ubicación General – Cuencas de Aporte

Plano 2 – Loteo – Espacios Verdes Circulación Vial

Plano 3 – Obras a Realizar – Cuencas Internas

Plano 4 – Canales – Lagunas – Secciones Tipo – Detalles

