

TRABAJO FINAL



Universidad Nacional del Nordeste
Facultad de Ingeniería

ZONIFICACIÓN DE RIESGO HÍDRICO DEL ARROYO RIACHUELO EN SAN LUIS DEL PALMAR

Autoras:

- Gutnisky, Belén Mariana
- Rodríguez, María Silvia
- Wojcicki, Andrea

2019

Índice

Resumen ejecutivo	2
Capítulo 1: Introducción	
1.1 Objetivos.....	13
1.2 Ubicación de la zona de estudio.....	13
1.3 Población.....	14
1.4 Geomorfología y fitogeografía.....	15
1.5 Cuenca del arroyo Riachuelo.....	18
1.6 Clima.....	20
1.7 Descripción del problema.....	21
1.8 Necesidad de estudio hidrológico.....	22
Capítulo 2: Definición de cuencas	
2.1 Definición de cuencas.....	23
2.2 Parteaguas.....	24
2.3 Cuenca del arroyo Riachuelo.....	24
2.3.1 Subcuenca en estudio.....	25
2.3.1.1 Usos del suelo de la subcuenca en estudio.....	26
2.3.2 Microcuenca de la ciudad de San Luis del Palmar.....	29
2.2 Esteros.....	29
Capítulo 3: Estadística hidrológica	
3.1 Introducción.....	30
3.2 Estudio de precipitaciones máximas diarias.....	30
3.3 Condiciones hidrológicas antecedentes.....	34
3.4 Tiempos de recurrencia de los eventos hidrológicos.....	36
3.5 Estudios en el arroyo Riachuelo.....	37
3.5.1 Curva elevación – caudal (E- Q).....	39
Capítulo 4: Zonificación de riesgo hídrico mediante modelaciones hidrológicas	
4.1 Introducción.....	41
4.2 AR-HYMO.....	41
4.2.1 Modelación AR-HYMO.....	41
4.2.2 Resultados.....	44
4.3 Zonificación.....	45
4.2.1 HEC-RAS (Hydrologic engieneering center – river analysys system).....	45
4.3.1 Modelación HEC-RAS.....	45
4.4 Resultados y alcances.....	55

Capítulo 5: Zonificación de riesgo hídrico mediante imágenes satelitales

5.1 Introducción	57
5.2 Imágenes analizadas.....	57
5.2 Uso del Programa Arc Gis.....	62
5.3 Resultados y alcances.....	62

Capítulo 6: Soluciones

6.1 Introducción.....	64
6.2 Análisis de la sección del puente.....	64
6.3 Propuesta de terraplén de defensa.....	65
6.3.1 Traza y cota de terraplén de defensa.....	65
6.3.2 Desagüe pluvial.....	68
6.3.3 Reservorio.....	71
6.3.4 Bombas sumergibles.....	72
6.3.5 Compuertas.....	74
6.3.6 Sala de tableros, grupos electrógenos y medios de izaje.....	76
6.4 Relocalización y plan de contingencia.....	76
6.4.1 Relocalización.....	77
6.4.2 Proyección del ejido urbano.....	77
6.5 Plan de contingencia	78
6.5.1 Plan de contingencia existente en San Luis del Palmar.....	78
6.5.2 Propuesta.....	81

Capítulo 7: Ítems a tener en cuenta en una evaluación económica y financiera

7.1 Introducción.....	84
7.2 Alternativa 1.....	84
7.3 Alternativa 2.....	86
7.4 Conclusiones y recomendaciones.....	87

Bibliografía.....	88
--------------------------	-----------

Anexo.....	90
-------------------	-----------

Capítulo 1

Introducción

1.1 Objetivos

Delimitar y describir hidrológicamente la zona de la cuenca Riachuelo donde se emplaza la ciudad de San Luis del Palmar, Corrientes, y analizar las causas y zonas de anegamiento e inundaciones por precipitaciones y crecidas del arroyo Riachuelo de manera de determinar la zonificación de riesgo hídrico.

Logrado lo antedicho, se generarán alternativas estructurales y/o no estructurales con la finalidad proteger a la población afectada por las inundaciones de dicha localidad.

1.2 Ubicación de la zona de estudio

La ciudad de San Luis del Palmar está ubicada en la provincia de Corrientes (ver fig. 1.1), específicamente a 20km de la capital correntina, al noreste de la provincia sobre la Ruta Provincial nº 5. La misma, limita al norte con los departamentos de San Cosme e Itatí, al este con Berón de Astrada y General Paz, al sur con Mburucuyá y Empedrado y al oeste con el departamento Capital (ver fig. 1.2).



Figura 1. 1. Localización de la provincia de Corrientes en la República Argentina (Fuente: Wikipedia).



Figura 1. 2. Localización de San Luis del Palmar, Corrientes (Fuente: Secretaria de turismo de la provincia de Corrientes).

1.3. Población

Cuenta con una población de 17.590 habitantes según el último censo de 2010 realizado por el INDEC con una variación intercensal de 6,5% de incremento. El siguiente gráfico muestra el crecimiento de la población desde 1991 hasta 2010 según INDEC:

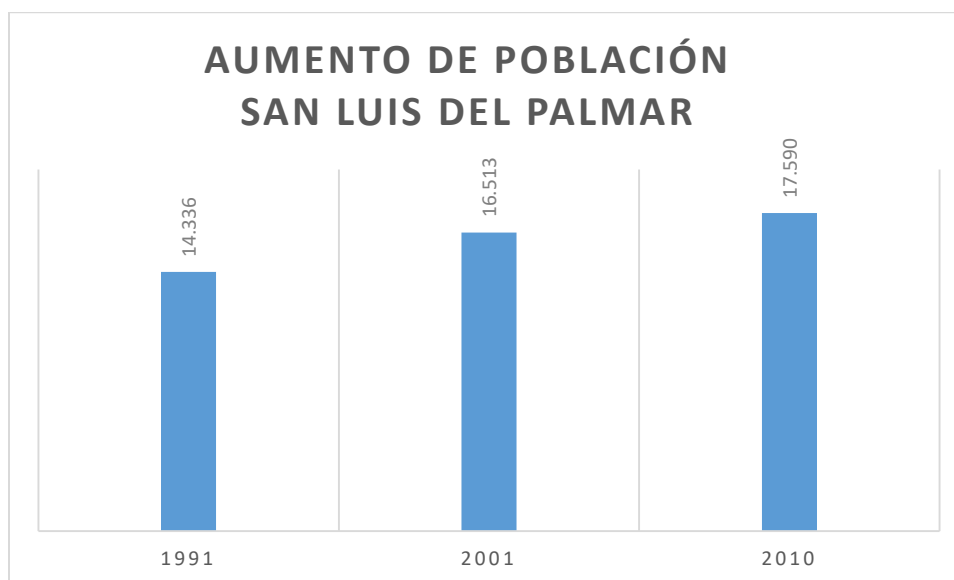


Figura 1.4. Crecimiento de la población (fuente: censos INDEC).

Por su cercanía, muchos sanluiseños trabajan y estudian en la capital correntina, formando junto con las localidades de Riachuelo y Santa Ana una periferia dinámica.

El 31 de mayo de 1806 se funda San Luis del Palmar, fecha en que se determina la creación de un Curato del Pueblo, cuyo templo se finalizó en 1828. Antes de esto, en 1779 el cabildo de Corrientes ya había dispuesto la construcción de una capilla y en 1793 fueron nombrados jueces comisionados. Se la declaró villa a la población por ley en 1873. (Fuente: Historia.: Origen del nombre San Luis del Palmar. Sitio web: <http://sanluisdelpalmar.com/home/historia-3/>)

En 1970 se registró una población total para la zona del departamento de San Luis del Palmar que pertenece a la cuenca del Riachuelo de 13.382 habitantes, de las cuales el 25,5 % era urbana. Es decir 3.411 personas residían en 1970 entre las localidades de San Luis del Palmar y otras menos densas. (Fuente: Ministerio de Defensa, 1973).

1.4. Geomorfología y fitogeografía

La provincia de Corrientes, perteneciente a la Mesopotamia argentina, se la puede dividir a grandes rasgos en tres grandes unidades morfogenéticas: Lomas y planicies embutidas del oeste, Depresión poligenética del Iberá, Planicie de erosión oriental.

Recordando que “(...) la red de escurrimiento y la morfología de los valles reflejan el modo de ser o de comportarse de un sistema hídrico y de los diferentes estados por los cuales pasó, ha dejado indicios más o menos reconocibles” (Popolizio, 1996), se destaca la importancia de la evolución del río Paraná en el relieve, que debido a procesos tectónicos, varió su cauce. Esto generó el modelado fluvial que presenta hoy el noroeste de la provincia por encima de la falla Iberiana. Los excesos hídricos se acumularon en las depresiones con orientación NE a SO de la provincia, conformando extensos humedales.

Básicamente se puede resumir que el sector este de Corrientes es una zona de suaves colinas diferenciándose de las extensas planicies del oeste.

El área en estudio se ubica dentro del siguiente **territorio fitogeográfico** (ver fig. 1.5): Dominio chaqueño, distrito oriental de la provincia chaqueña (1), subdistrito correntino (I), sector del parque chaqueño correntino (A) de *Shinopsis balansae* (quebracho colorado) de albardón y planicie subcóncava del NW. Esta clasificación corresponde a Carnevali, 1994.

Se describe al distrito oriental chaqueño (1) como “(...) un antiguo cono de deyección formando una enorme cuenca sedimentaria caracterizada por la distribución en abanico de sus principales unidades geomórficas y formaciones vegetales, a modo de un gigantesco delta interno con vértice en Ituzaingó, modelado por la red principal de drenaje fósil y actual” (Carnevali, R, 1994).

En el sector del parque chaqueño correntino predominan las planicies embutidas sobre lomadas arenosas del este y noreste; es decir, su relieve es una planicie subcóncava a plana inserta entre los diques del Paraná y las lomadas arenosas del E y NE.

Posee una cota media de 60msnm, siendo más elevada en su ángulo NE, con 65 msnm, generando una pendiente suave hacia el SO y conformando así la red de drenaje integrada y dispuesta en abanico, como se mencionó anteriormente.

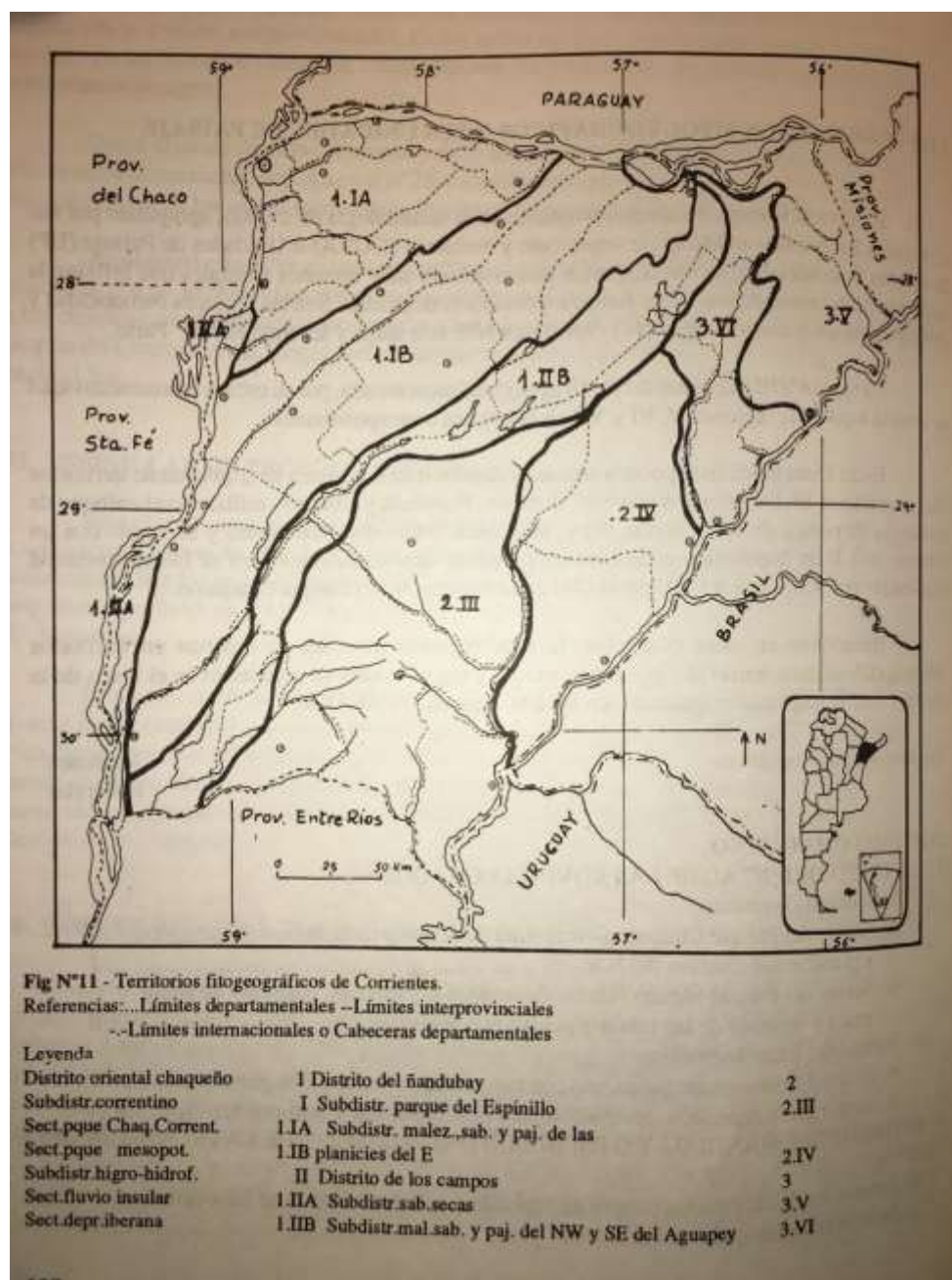


Figura 1.5. Territorios fitogeográficos (fuente: Carnevali, R. Fitogeografía de la provincia de Corrientes, 1994.)

Se distinguen en el sector seis unidades de paisaje (ver fig. 1.6), en la que la ciudad de San Luis del Palmar se sitúa en la unidad 2 (un cordón arenoso, sobreelevado, paralelo y próximo al alto Paraná) y la 6 (las llanuras aluviales de los cursos importantes, que desaguan a los esteros).

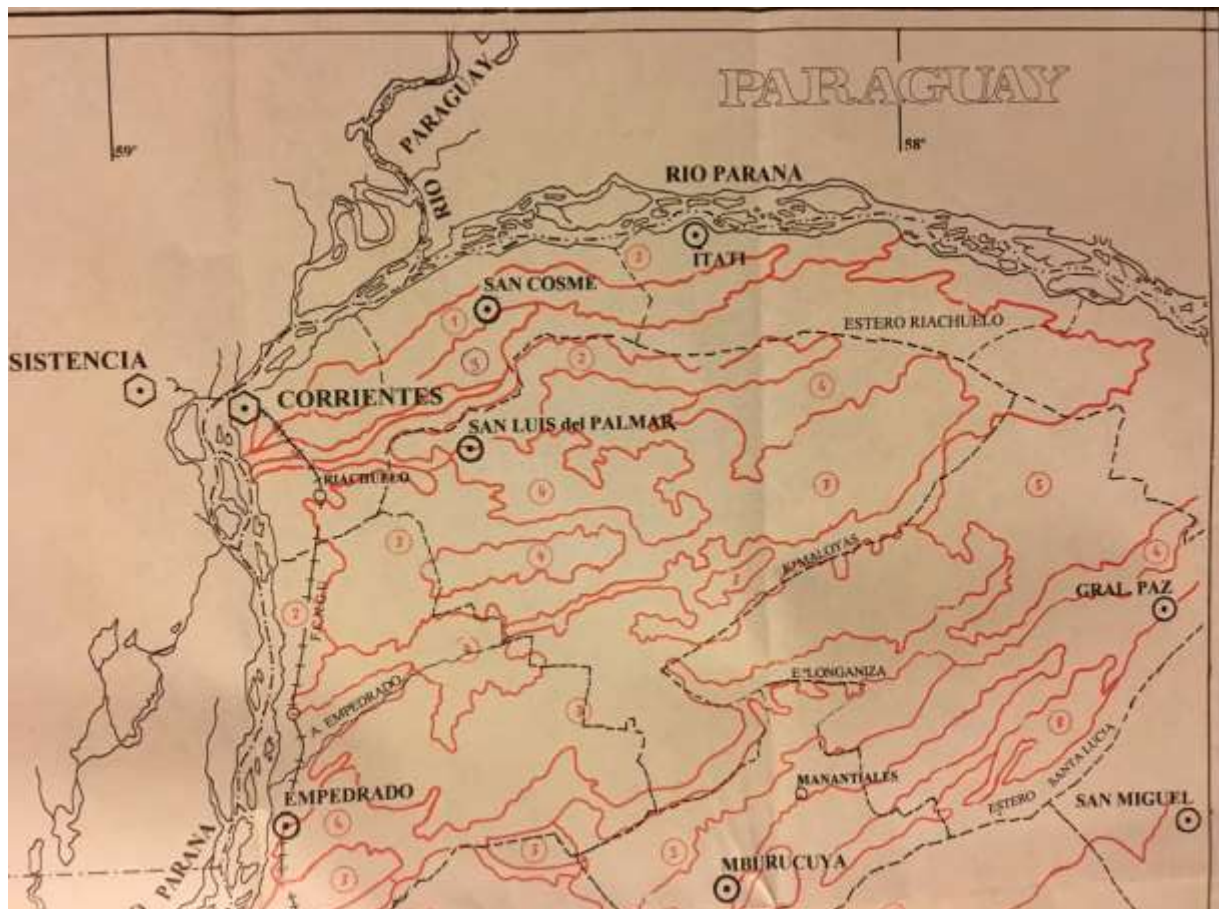


Figura 1.6. Unidades de paisaje. (fuente: Carnevali, R. Fitogeografía de la provincia de Corrientes, 1994.)

- Unidad 2: Dique natural del Paraná medio y afluentes principales

Bordeando el río Paraná medio y el arroyo Riachuelo. En la altura de la ciudad de San Luis del Palmar es un cordón arenoso sobreelevado y paralelo al Alto Paraná.

- Unidad 6: Esteros y bañados del noroeste

Constituye las áreas más bajas del Parque chaqueño – correntino. Como se observa en la figura 1.6, contiene a los esteros, bañados y zonas de arroyos. El de mayor superficie es el del sector norte que incluye a los esteros del Riachuelo, el aluvial del arroyo homónimo y la cañada del Toro.

Los porcentajes de ocupación de las distintas formas de paisaje que se presentan en esta unidad son:

1. Complejos de esteros y lagunas 20 %
2. Bañados y cañadas anexos a los esteros y llanuras aluviales 50%
3. Orillares y planos de terraza 25 %
4. Inclusiones de planicies arenosas hidromorfos 5%

La vegetación en el aluvial del Riachuelo se compone de pastizales y prados húmedos, seibales, palmares, bosques higrófilos en las barrancas del curso inferior del arroyo con algunos tacuarales.

1.5. Cuenca del arroyo Riachuelo

La cuenca del arroyo Riachuelo, localizada al oeste de la línea de falla iberiana, posee una baja amplitud de relieve, con cotas máximas al este y mínimas en función del nivel del río Paraná, donde desagua.

Las variaciones del río Paraná son un tercio de la amplitud de la cuenca, por lo cual se destaca su influencia en el funcionamiento de la cuenca en estudio.

Se extiende desde la desembocadura del arroyo Riachuelo hasta las Lomas de Arerunguá.

Se la puede dividir en dos partes: un sector de esteros y bañados con escurrimiento laminar, y uno con drenaje fluvial en valles entallados. Se trata de un área de 3.150km² con límites poco definidos debido a las transfluencias de aguas con cuencas vecinas y procesos pseudokársticos.

Como menciona el libro “Recuperación de áreas inundables de estero y río Riachuelo” realizado por el Ministerio de Defensa de la Nación en 1973: “Todo hace pensar en la existencia de dos cuencas diferentes que se han integrado por erosión regresiva, fluvial, de allí el modelo que el conjunto presenta en planta”; este es el caso del arroyo Riachuelo y Riachuelito, y de algunas cañadas de la zona.

También se diferencia la cuenca media entre las antedichas, que se extiende desde las cabeceras de los arroyos Riachuelo y Riachuelito hasta límite de la cañada el Toro y lagunas Toropí en el estero Riachuelo. La ciudad de San Luis del Palmar se emplaza en la cuenca baja donde los cauces son marcados y los inconvenientes de inundación se generan al superarse la capacidad de conducción de los mismos o por interferencias de obras de infraestructura en su curso (plano nº 1).

Existen factores endógenos y exógenos que van modificando la cuenca, los primeros se deben a un levantamiento por incorporación progresiva a la tectónica de los macizos del este y también por el ascenso de las estructuras cupulares del centro sur de la provincia.

Los factores exógenos se dan por los siguientes agentes: agua superficial, subterránea y viento; este último, al trabajar sobre sedimentos sueltos, influye más en períodos secos.

Las aguas superficiales modelan el relieve de dos maneras diferentes: como agua encauzada y como agua laminar, esta última se mueve como manto y origina un arrastre de suelos en función de la pendiente, la cobertura edáfica y la compacidad de los suelos.

La mayor ocupación de las lomas y el abandono de los cultivos, generan surcos de erosión haciendo que el agua laminar se vuelva agua encauzada; además el descenso del nivel de los esteros acelera este proceso.

En áreas de interfluvios tabulares aparecen extensos malezales con cobertura de gramíneas palustres, cubiertas por una lámina de agua de varios decímetros debido al freno del agua laminar por la nula pendiente.

El agua subterránea escurre horizontalmente bajo las lomas. Debido a procesos de disolución, esta seguirá direcciones preferenciales que genera en la topografía un canal de escurrimiento superficial.

Estos procesos pseudokársticos pueden dar lugar a cavernas y asentamientos diferenciales.

El límite noroeste de la cuenca se caracteriza por un drenaje cribado, es decir, depresiones circulares debido a mayores asentamientos diferenciales.

En resumen, las divisorias de aguas superficial depende del nivel de agua de las lagunas próximas y la divisoria freática no coincide con la superficial, por lo tanto, el límite de la cuenca siempre dependerá de la situación en análisis.

Según el estudio realizado por el Ministerio de Defensa (1970) se describe:

- áreas no recuperables (de inundación permanente, como el estero Riachuelo) representando 11,19% de la cuenca,
- áreas inundables semipermanentes (inundadas de 8 a 10 meses) 20,3%,
- recuperación total, inundables eventualmente (inundables de 1 a 2 meses), 43,20%
- áreas no inundables, afectadas por zonas perimetrales inundables, como Lomas de San Luis del Palmar, 21,35%
- áreas de inundación transitoria y valle de escurrimiento 3,93%, como el arroyo Riachuelo y Riachuelito.

Tabla 1.1. Datos de la cuenca discriminado por sectores (fuente: Ministerio de Defensa, 1973)

CUENCA	SUPERFICIE (km ²)	INDICE DE COMPACIDAD	PENDIENTE MEDIA (por mil)	DENSIDAD DE DRENAJE
Total	3.387,6	1,64	0,20	0,052
Baja	938,8	1,38	0,27	0,125
Media	1.435,2	1,65	0,05	0,0035
Alta	1.013,6	1,32	0,17	0,054

1.6. Clima

En la cuenca del Riachuelo se presenta un macro clima pluviométrico monzónico, donde las máximas precipitaciones se producen durante marzo y abril, concentrando 60 % de las precipitaciones entre el este y 70 y 75 % en el oeste.

En algunos años, se producen intensas precipitaciones relacionadas con el fenómeno de El Niño que provocan inundaciones extraordinarias en gran parte del territorio. También existen años en los que se acentúan y prolongan la sequía invernal, lo que favorece los incendios, naturales y provocados de sabanas y pastizales (Ginzburg y Adamoli, 2005).

Teniendo en cuenta la zona de la cuenca del Riachuelo, un estudio realizado por el Ministerio de Defensa de la Nación en 1973 arrojó la siguiente clasificación, a partir de estadísticas de datos de estaciones meteorológicas:

- Koeppen Cf “clima templado húmedo”: C – templado – temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C. f – húmedo- en todas las estaciones.
- Thornthwaite: subhúmedo con nula o pequeña deficiencia de agua, megatermal y con una concentración estival de la eficiencia térmica menor que 48%; esto es analizando 30 años con datos medios, sin embargo Corrientes ha presentado en distintos años características muy disímiles (de ser semiárido a húmedo).

En cuanto a las precipitaciones, los máximos principales se producen en otoño, durante marzo y abril, y el secundario en primavera, en noviembre; siendo el mínimo principal en invierno, julio y agosto, y el secundario en diciembre. Todas estas consideraciones hacen evidente que la zona de estudio está ubicada dentro del régimen estacional de precipitación de transición entre el subtropical continental durante todo el año, y subtropical atlántico durante el verano y de la zona templada en invierno, con predominante influencia marítima.

Lo antedicho puede corroborarse en el capítulo 3, donde se realiza un estudio estadístico de la serie de precipitaciones (1986/87;2017/18) de San Luis del Palmar, allí se expondrán los valores medios mensuales y anuales para esta variable hidrológica.

1.7. Descripción del problema

Debido a las crecidas del arroyo Riachuelo y a la ubicación de la ciudad, San Luis del Palmar sufre recurrentes problemas en aquellos barrios instalados próximos o en su valle de inundación. Esto se produce por falta de una planificación urbana acorde con la topografía del lugar, como ocurre en otras ciudades del noreste de Argentina.

De esta manera, se generaron planes de contingencia según la cota alcanzada por el arroyo en el puente de la Ruta Provincial n° 5. Con las constantes inundaciones, se ponen a disposición de los afectados, escuelas, iglesias y otros lugares para que funcionen provisoriamente como refugios.

En mayo y junio del 2018, 1.149 personas, que representan 80 % de los hogares censados por la Defensoría Civil Municipal, estaban asentadas en zona vulnerable. Esta zona, está compuesta por manzanas de los barrios San Cayetano, Inmaculada Concepción, Cruz de los Milagros y Virgen del Rosario con cota inferior a 55,28 m (IGN).

La figura 1.7 corresponde a un modelo de elevación digital de la zona de ribera de la ciudad, según se expone en el trabajo “Validación de modelos digitales de elevación para la generación de cartografía de riesgo de inundación en la ciudad de San Luis del Palmar, provincia de Corrientes” de Nigro Carriere y otros, 2018.

Se representa en línea negra la curva de nivel de 55,28 msnm (IGN) obtenida a partir de la proyección en el terreno de la altura máxima registrada (abril 2017) en el hidrómetro de la R.P n° 5.

Se observa con claridad que parte del ejido urbano invade el valle de inundación y sufre los problemas consecuentes con las diferentes recurrencias del evento.

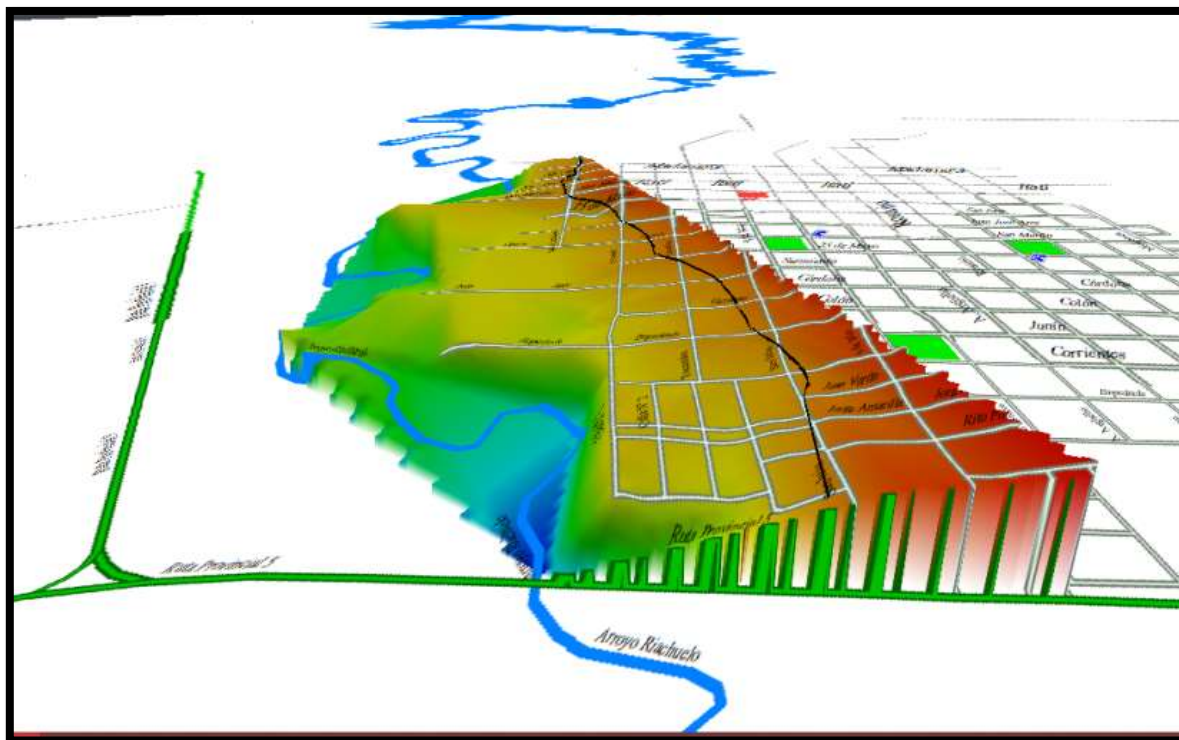


Figura 1.7. Trama urbana sobre el valle de inundación del arroyo Riachuelo (fuente: Nigro Carriere, et al., 2018)

También se destaca falta de manejo de excedentes pluviales dentro de la ciudad, pues la zona central de la misma descarga a un arroyo llamado Pozo de la Patria con necesidad de adecuaciones según se expone en el Trabajo Final titulado “Anteproyecto de plan integral de desagües pluviales para San Luis del Palmar” (Morresi, et al. 2015).

1.8. Necesidad de estudio hidrológico

Un estudio hidrológico permite conocer el comportamiento de la cuenca ante lluvias y crecientes conociendo el escurrimiento natural y tratando de relacionar las distintas cuencas y sub-cuencas que integran la zona de estudio, logrando proporcionar una zonificación de riesgo hídrico.

Dicha zonificación es una herramienta útil para la propuesta de distintas soluciones (estructurales y/o no estructurales) y prever la expansión urbana, ya que define criterios que deberán ser respetados para la elaboración de proyectos de urbanización y obras hidráulicas.

Capítulo 2

Subcuenca de estudio

2.1 Definición de cuencas

Como se mencionó en el capítulo 1, la cuenca media está compuesta por grandes esteros y flujo superficial en forma de manto, características que se ven modificadas en la cuenca baja debido a su mayor pendiente, lo que genera un comportamiento encauzado y propicia un mayor asentamiento de población en zonas de lomadas. En el plano 1 puede verse los límites entre cuenca alta, media y baja del Riachuelo.

Con el objetivo de describir las crecidas del arroyo Riachuelo y el funcionamiento de la subcuenca en la que se desarrolla la ciudad, el estudio se centrará en la cuenca baja teniendo como cabecera al estero Riachuelo que, como se dijo, trabaja como gran almacenador de agua. Así, se dividió a la cuenca baja del río Riachuelo respecto de sus principales tributarios: los arroyos Riachuelito y Riachuelo.

Luego, dentro de la cuenca del arroyo Riachuelo, se delimitó la subcuenca en estudio a calibrar con los datos de altura y caudal registrados en el puente de la R.P n°5. A su vez, se marcó una microcuenca, con una zona urbana y rural, en la que se generan anegamientos por precipitaciones.

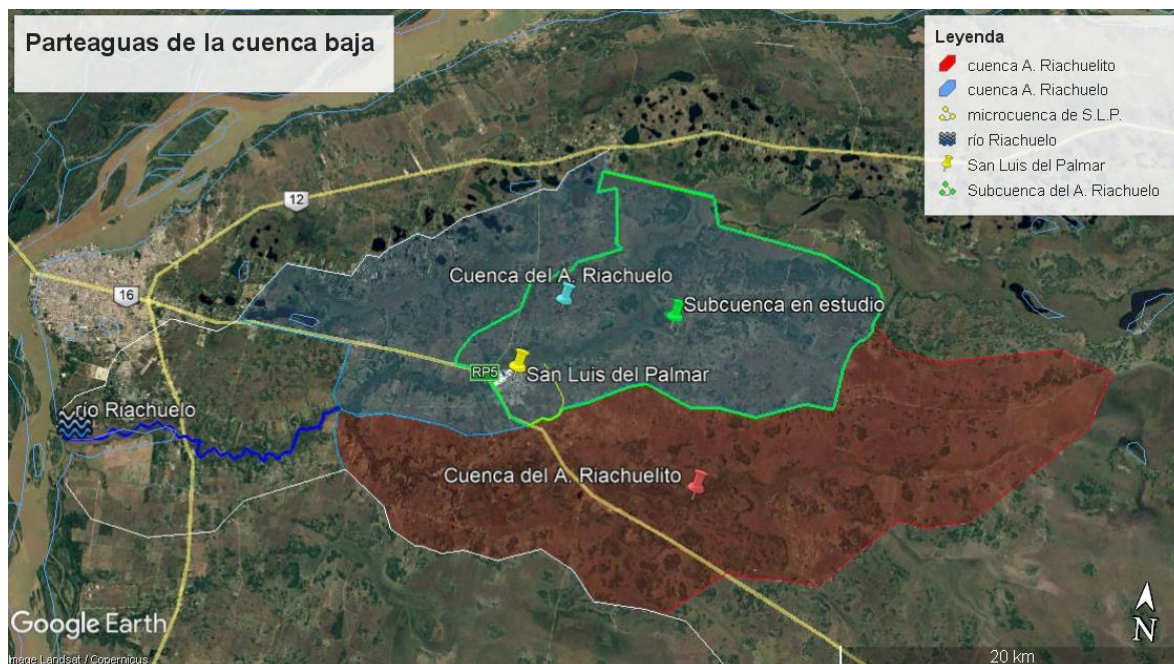


Figura 2.1. Subcuencas del río Riachuelo en la cuenca baja. (fuente: producción propia)

En la figura 2.1 se observa, en azul, la cuenca baja del arroyo Riachuelo y en rojo la del Riachuelito.

2.2 Parteaguas

Se define como parteaguas a “una línea imaginaria que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento, originado por la precipitación, que en cada sistema de corrientes fluye hacia el punto de salida de la cuenca” (Springall G, Rolando, 1976).

Por tanto, se puede decir que une a puntos de mayor cota topográfica generando una divisoria de aguas en superficie. Para lograrlo se analizó la siguiente documentación:

- Carta topográfica Corrientes con escala 1:100.000 del año 1946.
- Curvas de nivel cada 10m de IGN y cada 2,5m a partir del radar SRTM.
- Imágenes satelitales LANDSAT 8 tomada el 4 de febrero del 2018 y otra del 22 de abril del 2017.
- Archivos .shp de la provincia de Corrientes con hidrografía, ciudades, rutas y líneas ferroviarias.
- Herramienta Street View de Google Earth® sobre la ruta provinciales para localizar las alcantarillas existentes.

Todo lo anterior, se solapó a la planimetría de la ciudad y las zonas aledañas, brindado por la Dirección Provincial de Catastro, que cuenta con cotas IGN en la zona urbana.

Se analizó el plano N° IV – 03: Dinámica actual de escurrimiento, del libro “Recuperación y áreas inundables del Estero y río Riachuelo” de 1973, donde se observan patrones de escurrimiento y límites de lomas y de cuencas de toda la cuenca del Riachuelo.

Entre el arroyo Riachuelo y Riachuelito (cuenca baja) se extiende una zona de tierras altas, cuyo parteaguas se trazó aproximadamente en la mitad del ancho de la faja, lo que hace suponer que drena igualmente para ambos cauces, a la altura de la R.P n° 5. A esta lomada se la define como área no inundable, pero afectadas por zona perimetral inundable y cuenta con 12.936ha.

2.3 Cuenca del arroyo Riachuelo

Desde la confluencia con el arroyo Riachuelito, en dirección sur-norte hasta intersectar a la R.P n°5 y luego sigue su traza hacia la ciudad de Corrientes, incluye la laguna Brava y toma dirección noreste siguiendo el trazado del ex ferrocarril Económico hasta llegar al Ingenio Primer Correntino. Desde allí se conduce por un camino rural hasta el acceso a San Cosme.

El límite norte de la cuenca del río Riachuelo está dado por el terraplén de la Ruta Nacional n°12.

Se delimitó la subcuenca del arroyo Riachuelo, que servirá luego para la simulación del modelo hidrológico conociendo la serie de altura y caudal en el punto de control del puente de la R.P n°5.

2.4 Subcuenca en estudio

Básicamente, desde el puente de acceso a la ciudad de San Luis del Palmar hacia el sur este, sigue el trazado de la R.P n°5 hasta el punto más alto, luego continúa paralelo al arroyo hasta intersectar a la R.P n°4 adaptándose a su traza.

Se incluyó a la cuenca del arroyo Pehuajó por encontrarse en la cuenca baja estudiada, dejando de lado a la del arroyo Pisiquirí que descarga en un estero (cuenca media).

El límite noreste coincide con la divisoria de cuenca baja y media, donde se considera la cabecera del arroyo Riachuelo; el parteaguas se une a la R.P n°95 cercano al acceso a San Cosme, sigue su traza e incluye parte de la R.P n°9.

Pasa luego por cotas altas en el terreno que generan un escurrimiento en sentido noroeste hacia la cañada Mandiyuratí que desemboca en el arroyo Desaguadero y éste en el arroyo Riachuelo, aguas debajo de nuestro punto de control.

Una vez delimitada la subcuenca se procedió a la determinación de características físicas de la misma, donde la longitud del parteaguas es de 71,68km encerrando un área de 201,35km².

Para la determinación de la pendiente se trabajó con el método de Horton, trazando una malla de cuadrados de 1.500m de longitud en cada lado y se obtuvieron los resultados indicados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Resultados obtenidos por el método de Horton, elaboración propia.

	Sentido X	Sentido Y
Cantidad de cuadrados	16	14
Intersecciones	31	39
Longitud de la malla (m)	134.001	134.216,916

Contando con una equidistancia entre curvas de nivel de 5m, la pendiente obtenida por este método en el sentido X (sentido del cauce principal) es de 1,16 m/km, mientras en el sentido Y (sentido de los afluentes al cauce principal) es de 1,45 m/km.

$$S_x = \frac{N_x * D}{L_x} = 1,16 \text{ m/km} \quad S_y = \frac{N_y * D}{L_y} = 1,45 \text{ m/km}$$

Siendo:

Sx pendiente en el sentido X

Sy	Pendiente en el sentido Y
Nx	número total de intersecciones y tangencias de líneas de la malla con las curvas de nivel, en el sentido X
Ny	número total de intersecciones y tangencias de líneas de la malla con las curvas de nivel, en el sentido Y
D	equidistancia entre curvas de nivel
Lx	longitud total de líneas de la malla con curvas de nivel, en el sentido X
Ly	longitud total de líneas de la malla con curvas de nivel, en el sentido Y

Calculadas las pendientes en ambos sentidos, se pudo determinar la pendiente total mediante un promedio aritmético y un promedio geométrico obteniendo en ambos resultados similares:

$$\text{Promedio aritmético: } S = \frac{Sx + Sy}{2} = 1,3 \text{ m/km}$$

$$\text{Promedio geométrico: } S = \sqrt{Sx * Sy} = 1,29 \text{ m/km}$$

Por otro lado, se determinó el índice de compacidad “K”, el cual consiste en la relación existente entre el perímetro de la cuenca “P” y el perímetro de un círculo que tenga la misma superficie “A” que la cuenca.

Este índice indica que cuanto más se acerque a la unidad, más se aproximará la forma de la cuenca a la de un círculo de igual área, en cuyo caso la cuenca tendrá mayores posibilidades de producir crecientes con caudales picos mayores. Para el caso de la subcuenca se obtuvo:

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} = 1,42$$

Se observa que, al no ser un valor lejano a la unidad, el arroyo presenta crecientes ante elevados picos de caudales.

2.4.1. Usos del suelo de la subcuenca en estudio

El grado de impermeabilización del suelo estará dado por su uso, y es un elemento clave a determinar para la generación de un modelo hidrológico. Básicamente a partir de una variable de entrada (precipitaciones) se puede obtener una de salida (caudal) conociendo, para cierto uso y humedad antecedente, cuánto es capaz de absorber el suelo.

Mediante el programa ArcGis, utilizando clasificación no supervisada, se determinaron los porcentajes y distribución espacial de usos del suelo según cinco categorías como se observa en la figura 2.2. Se trabajó sobre una imagen satelital del 15 de diciembre de 2016.

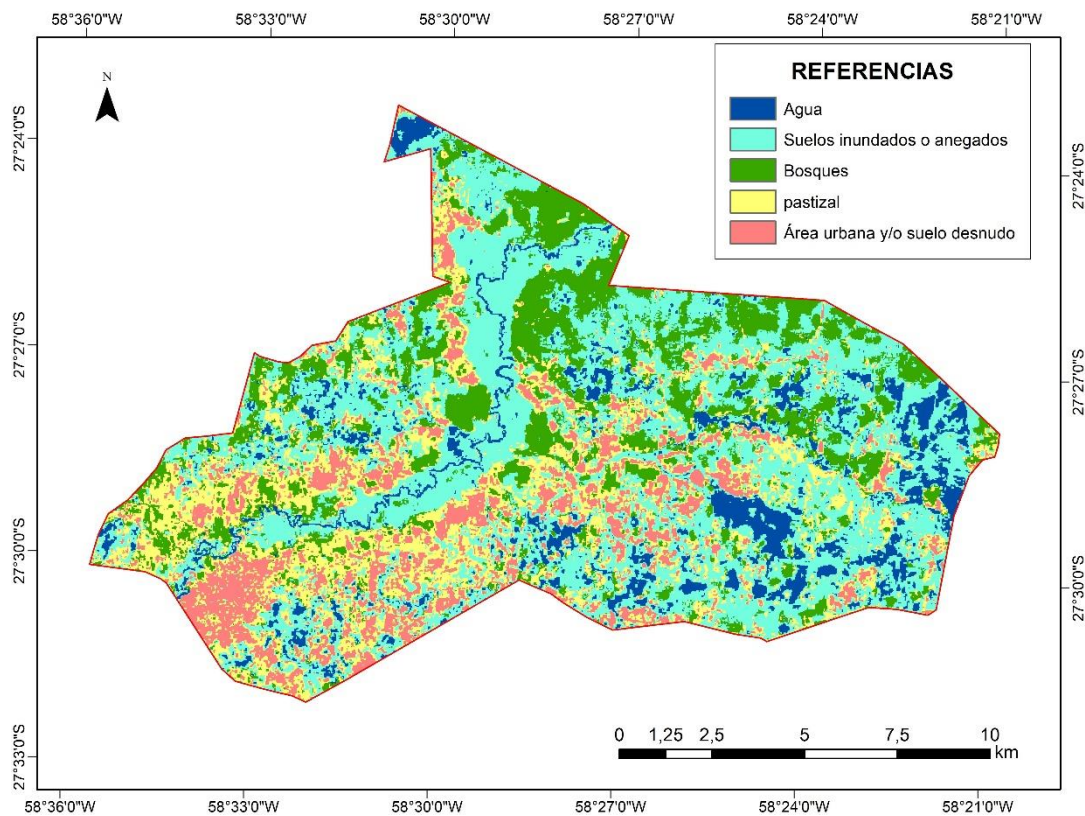


Figura 2.2. Usos del suelo de la subcuenca en estudio, imagen del 15 /12/2016 (fuente: producción propia).

También se analizó una imagen satelital del 22 de abril de 2017, año de inundación en que se registró el máximo valor de altura y caudal del arroyo en la R.P n°5. Se marca claramente el sector del valle de inundación. También se observa cómo el arroyo Pehuajó desagua áreas anegadizas usualmente del sector este de la subcuenca en estudio (ver figura 2.3.)

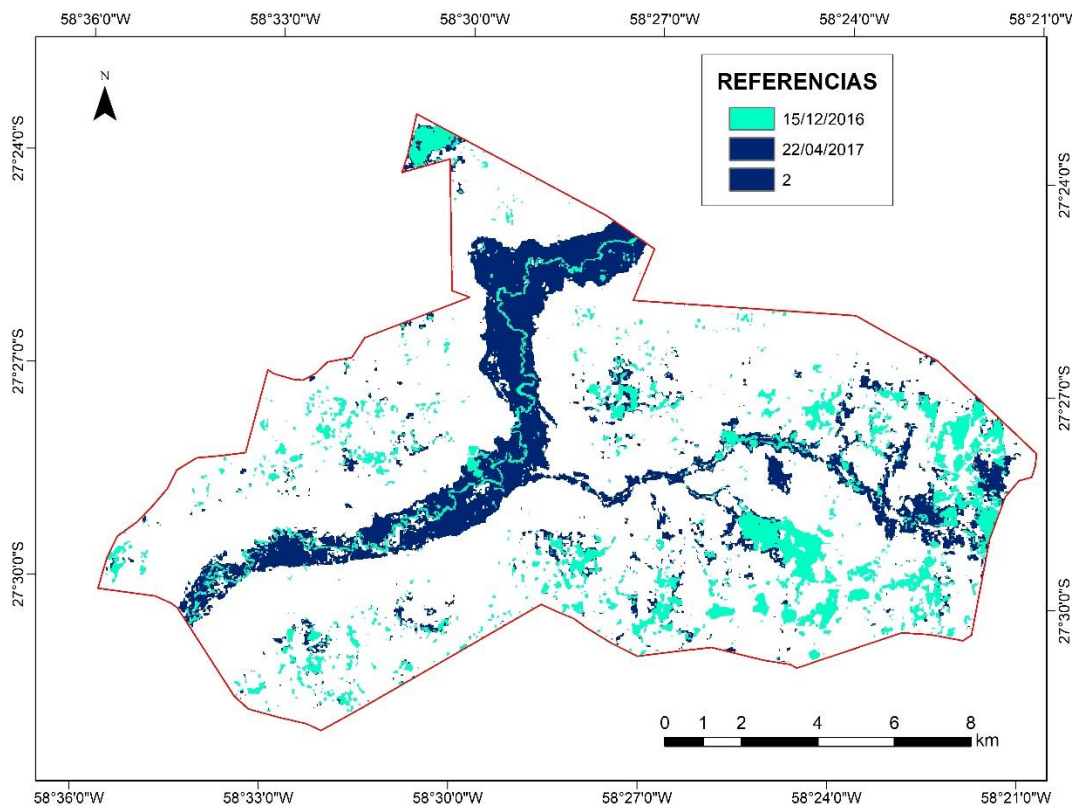


Figura 2.3. Comparación de año húmedo y normal (fuente: producción propia).

En la tabla 2.2 se resumen los resultados que arroja el programa para cada imagen. Sabiendo que en abril de 2017 la cuenca estaba muy saturada de agua, el programa confunde entre pastizales anegados y bosques, por lo tanto, se trabaja sobre estos valores para obtener datos representativos del evento. Conociendo los valores del 2016 que pertenece al mismo año hidrológico, se considerará para los posteriores cálculos los siguientes valores para el 2017:

Agua: 31% (62 km²); Anegamiento: 15% (30 km²); Bosque: 18% (37 km²); Pastizal 21% (41 km²); Urbano y suelo desnudo: 15% (29 km²)

- Se consideraron los mismos porcentajes de bosque y pastizal. La diferencia entre la suma de ambos usos del 2017 y 2016 se consideró como anegamiento (30 km²) y la suma de agua y áreas anegadas del 2017 (62 km²) se consideró como agua.

Tabla 2.2. Resultados de la figura 2.2 (fuente: producción propia)

USOS DEL SUELO	2016		2017	
	ÁREA (km ²)	PORCENTAJE (%)	AREA (km ²)	PORCENTAJE (%)
Agua	18	9	36	18
Inundada o anegada	79	40	26	13
Bosque	37	18	53	27
Pastizal	41	21	55	28
Urbano y suelo desnudo	24	12	29	14

Más adelante, se le asignará a cada uso de suelo un grado de impermeabilización y se lo ponderará en función del porcentaje de área que representa del total de la subcuenca estudiada.

2.4.2 Microcuenca de la ciudad de San Luis del Palmar

En busca de la determinación del área de aporte de escurrimientos donde se asienta la ciudad de San Luis del Palmar, se trazó un parteaguas que define una microcuenca que desagua al arroyo Riachuelo, la cual se divide en dos partes, una rural y una urbana. Ver plano 2.

Analizando las curvas de nivel obtenidas mediante las imágenes satelitales, se marcan zonas altas de cota 64msnm IGN hacia el este y zona central del ejido urbano, y una zona escarpada que revela el valle de inundación del arroyo. Esta información sirve solo para marcar una tendencia en el relieve, debido al error que tienen por la manera en la que el radar releva la altura del terreno.

El inicio del trazado del parteaguas se realizó en la R.P n°5 hasta la primera alcantarilla, donde se marca un escurrimiento hacia el oeste de la ruta, según las cotas catastrales.

Ante la falta de cotas de catastro en la zona rural, se priorizaron las imágenes de Google Earth® que demarcan las zonas bajas con permanencia de agua y cierto sentido de escurrimiento (Ver plano n°2).

2.5 Esteros

A partir de la cabecera de la cuenca del arroyo Riachuelo, dentro de la cuenca media del río Riachuelo, se encuentra el estero Riachuelo, que aporta caudal al arroyo, por lo que mediante la herramienta “polígonos” de Google Earth® se lo delimitó obteniendo un área de 171,6 km². Se variará la profundidad del estero para modelaciones del sistema hidrológico, considerando los aportes de caudales que brinda según distintas condiciones de humedad.

Capítulo 3

Estadística hidrológica

3.1. Introducción

Mediante un análisis de estadística hidrológica, se busca determinar la recurrencia de los distintos eventos, prestando especial importancia a aquellos que se dan con:

Recurrencias menores a 2 años, de manera de determinar la línea de ribera que la fija el promedio de las máximas crecidas ordinarias. La línea de ribera delimita el cauce natural del río, "(...) ARTICULO 1960.- Cauce del río. No constituye aluvión lo depositado por las aguas que se encuentran comprendidas en los límites del cauce del río determinado por la línea de ribera que fija el promedio de las máximas crecidas ordinarias" (Código civil y comercial, 2015).

Eventos que se dan con una recurrencia entre 2 y 5 años, los cuales generan las crecidas que determinan las zonas frecuentemente inundadas y pueden ser catalogadas con riesgo severo de inundación.

Eventos que se dan con una recurrencia entre 5 y 15 años, los cuales generan las crecidas que representan áreas donde las inundaciones se repiten en forma moderada en el tiempo y el riesgo asociado de ser inundadas puede ser clasificado como medio.

Eventos que se dan con una recurrencia mayor a 15 años, los cuales generan las crecidas que determinan áreas donde las inundaciones se repiten en forma esporádica y el riesgo asociado de ser inundadas puede ser identificado como leve.

Se ha optado por realizar los estudios hidrológicos del arroyo Riachuelo, tratando de representar con la mayor similitud posible las situaciones naturales, de manera tal que sobre ellas se volcarán luego las modificaciones que hagan a una solución.

Se estudiarán estadísticamente dos variables hidrológicas de manera independiente: precipitaciones máximas diarias, precipitación de 30 días antecedentes a las máximas.

3.2 Estudio de las precipitaciones máximas diarias

Contando con los datos de precipitaciones diarias desde enero del año 1986 hasta marzo del año 2019, del pluviómetro ubicado en San Luis del Palmar perteneciente a la Dirección Provincial de Vialidad (DPV), se procedió al análisis estadístico de los mismos con el fin de determinar el tiempo de recurrencia de las distintas precipitaciones.

Para ello, se realizó una serie de máximas precipitaciones diarias anuales, para cada año hidrológico (de septiembre a agosto) y luego se ordenaron de mayor a menor para su posterior tratamiento. De esta manera la longitud de la serie es de 32 años.

Con la utilización del programa AFMULTI (Paoli et al; Fich-UNL, 1991), se determinaron los parámetros estadísticos de la serie indicados en la figura 3.1.

AÑO INICIAL: 1 AÑO FINAL: 32						
CANTIDAD DE VALORES: 32						
VARIABLE ORIGINAL (X):						
MEDIA	DESUDIO	COEF. ASIMETRIA	COEF. VARIACION	COEF. ASIM/VARI	COEF. CURTOSIS	
133.1	38.59	0.35	0.2900	1.21	2.07	
MOMENTOS PONDERADOS:						
MW1	MW2	MW3	MW4	MGEV1	MGEV2	MG1
55.08	33.29	23.41	17.88	77.98	56.18	55.36
VALORES EXTREMOS:						
MAXIMO	MINIMO	RANGO	MAXIMA	MINIMA	MIN-MAX	MAX-MIN
215.	75.	140.	1.616	0.564	0.349	2.867

Figura 3.1. Resultados de AFMULTI: parámetros estadísticos para serie de precipitaciones de S.L.P (1986/1987-2017/2018).

Para la elección del método probabilístico de series máximas, se realizó la comparación entre seis métodos: Log Gauss, Gumbel, GEV (General Extremes Values), Pearson, Exponencial y Wakeby con la utilización del programa AFMULTI (Paoli et al; Fich-UNL, 1991).

En primer lugar mediante los test de bondades de ajustes de Kolmogoroff y χ^2 , se determinó que se aceptan las hipótesis de cualquiera de los métodos ya que los datos ajustan a las distribuciones, como puede observarse en la figura 3.2.

BONDAD DE AJUSTE						
	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	EXPONENC.	WAKEBY
KOLMOGOROFF:	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	
CHI-CUADRADO:	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	
ECMF:	0.0386	0.0387	0.0278	0.0398	0.0946	*****
ECMV:	6.27	7.89	5.95	7.96	12.91	5.29
SIMBOLOGIA PARA LA BONDAD DEL AJUSTE:						
A: SE ACEPTA LA HIPOTESIS.						
R: SE RECHAZA LA HIPOTESIS.						
SE CONSIDERAN 3 NIVELES DE SIGNIFICACION: 5, 1 Y 0.1 % DE ACUERDO A SU						
UBICACION DE IZQUIERDA A DERECHA EN EL CARACTER DE CALIFICACION.						
---: EL NUMERO DE INTERVALOS DE CLASE RESULTANTE EN EL TEST						
DEL CHI-CUADRADO ES MENOR QUE 5						

Figura 3.2. Resultados de AFMULTI. Bondad de ajuste para serie de precipitaciones de S.L.P (1986/1987-2017/2018).

Por otro lado, se observó el error cuadrático medio de la frecuencia (ECMF) y el error cuadrático medio de la variable (ECMV) contemplando que el método con menor error en ambos casos es GEV, con un ECMF de 0,0278 y un ECMV de 5.95, como se ve en la figura 3.2.

Los resultados obtenidos de probabilidades para cada variable, según cada método se pueden observar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de AFMULTI. Probabilidades para serie de precipitaciones de S.L.P (1986/1987-2017/2018)

PROBABILIDADES PARA DISTINTOS VALORES DE LA VARIABLE								
VARIABLE	AÑO	FREC.EXP	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	EXPONENC.	WAKEBY
215.	1	0.0156	0.0336	0.0433	0.0374	0.0454	0.0440	0.0000
200.	2	0.0469	0.0575	0.0680	0.0657	0.0715	0.0649	0.0000
200.	3	0.0781	0.0575	0.0680	0.0657	0.0715	0.0649	0.0000
180.	4	0.1094	0.1140	0.1227	0.1297	0.1278	0.1090	0.0000
180.	5	0.1406	0.1140	0.1227	0.1297	0.1278	0.1090	0.0000
174.	6	0.1719	0.1387	0.1459	0.1567	0.1511	0.1273	
168.	7	0.2031	0.1679	0.1730	0.1878	0.1780	0.1488	0.0000
160.	10	0.2344	0.2145	0.2161	0.2363	0.2202	0.1830	0.0000
160.	8	0.2656	0.2145	0.2161	0.2363	0.2202	0.1830	0.0000
160.	9	0.2969	0.2145	0.2161	0.2363	0.2202	0.1830	
149.	11	0.3281	0.2945	0.2900	0.3164	0.2911	0.2434	0.0000
140.	12	0.3594	0.3741	0.3641	0.3931	0.3614	0.3073	0.0000
140.	13	0.3906	0.3741	0.3641	0.3931	0.3614	0.3073	0.0000
135.	14	0.4219	0.4235	0.4106	0.4395	0.4052	0.3499	0.0000
135.	15	0.4531	0.4235	0.4106	0.4395	0.4052	0.3499	
134.	16	0.4844	0.4338	0.4204	0.4491	0.4144	0.3590	0.0000
130.	17	0.5156	0.4760	0.4607	0.4881	0.4525	0.3983	0.0000
130.	18	0.5469	0.4760	0.4607	0.4881	0.4525	0.3983	0.0000
125.	19	0.5781	0.5310	0.5137	0.5382	0.5027	0.4534	
114.	20	0.6094	0.6562	0.6373	0.6501	0.6219	0.6029	0.0000
113.	21	0.6406	0.6675	0.6487	0.6601	0.6332	0.6187	0.0000
113.	22	0.6719	0.6675	0.6487	0.6601	0.6332	0.6187	0.0000
110.	23	0.7031	0.7012	0.6828	0.6899	0.6670	0.6688	0.0000
100.	24	0.7344	0.8060	0.7910	0.7833	0.7789	0.8666	0.0000
97.	25	0.7656	0.8341	0.8206	0.8087	0.8109	0.9366	0.0000
95.	26	0.7969	0.8517	0.8393	0.8249	0.8315	0.9865	0.0000
94.	27	0.8281	0.8601	0.8483	0.8327	0.8416	0.9999	0.0000
90.	28	0.8594	0.8914	0.8817	0.8621	0.8797	0.9999	0.0000
85.	29	0.8906	0.9244	0.9173	0.8945	0.9215	0.9999	0.0000
80.	30	0.9219	0.9504	0.9456	0.9218	0.9553	0.9999	0.0000
77.	31	0.9531	0.9627	0.9590	0.9358	0.9711	0.9999	0.0000
75.	32	0.9844	0.9696	0.9666	0.9441	0.9796	0.9999	0.0000

Una vez obtenidas las probabilidades según el método GEV, se le asigna a cada variable el tiempo de recurrencia correspondiente tal como se observa en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Probabilidades para serie de precipitaciones de S.L.P y asignación de tiempos de recurrencias (1986/1987-2017/2018). Elaboración propia.

Hp(mm)	Probabilidad	T.R. (años)
215	0,0374	26,74
200	0,0657	15,22
200	0,06257	15,98
180	0,1297	7,71
180	0,1297	7,71
174	0,1567	6,38
168	0,1878	5,32
160	0,2363	4,23
160	0,2363	4,23
160	0,2363	4,23
149	0,3164	3,16
140	0,3931	2,54
140	0,3931	2,54
135	0,4395	2,28
135	0,4395	2,28
134	0,4491	2,23
130	0,4881	2,05
130	0,4881	2,05
125	0,5382	1,86
114	0,6501	1,54
113	0,6601	1,51
113	0,6601	1,51
110	0,6899	1,45
100	0,7833	1,28
97	0,8087	1,24
95	0,8249	1,21
94	0,8327	1,20
90	0,8621	1,16
85	0,8945	1,18
80	0,9218	1,08
77	0,9358	1,07
75	0,9441	1,06

Se analizan las recurrencias de la variable hidrológica de precipitaciones máximas diarias que se dan en la subcuenca en estudio con el objetivo de observar el impacto

que tienen las mismas al variar el estado de humedad de la cuenca (sensibilidad del parámetro CN).

3.3 Condiciones hidrológicas antecedentes

Se quiere analizar la humedad de 30 días antecedentes a cada evento de precipitación máxima diaria para evaluar hidrológicamente que pasa con cada uno de éstos, ante la variación de las condiciones que se dan en ese momento.

Una vez determinados los valores de humedad antecedente de 30 días, se procedió mediante la prueba de bondad de ajuste de χ^2 , para saber si la distribución de Gauss ajusta a la información como puede observarse en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Prueba de bondad de ajuste de χ^2 , para datos de humedad antecedente de 30 días a los eventos.

Rango	ni	fs(xi)	Fs(xi)	$z = (x_i - \mu) / \sigma$	F(x)	p(x)	X2
< 50	6	0,1875	0,1875	-0,93	0,1814	0,1814	0,00656406
50-100	5	0,15625	0,34375	-0,49	0,3156	0,1342	0,11593502
100-150	4	0,125	0,46875	-0,05	0,484	0,1684	0,35792114
150-200	9	0,28125	0,75	0,38	0,6554	0,1714	2,25288635
200-250	4	0,125	0,875	0,82	0,7995	0,1441	0,08101263
250-300	1	0,03125	0,90625	1,26	0,8997	0,1002	1,51827625
300-350	1	0,03125	0,9375	1,69	0,9564	0,0567	0,36554638
350-400	1	0,03125	0,96875	2,13	0,9842	0,0278	0,01370072
>400	1	0,03125	1	inf	1	0,0158	0,4834481
Total	32	1				1	5,19529065

La función de distribución χ^2 , adoptando un nivel de confianza para la prueba de 95% y 6 grados de libertad, da un valor de 12,6. Comparando este valor con χ^2 calculado, se acepta la hipótesis nula para la prueba, es decir que la distribución de probabilidad propuesta, ajusta adecuadamente a la información ya que $\chi^2_c (5,19) < \chi^2 (12,6)$.

Posteriormente se estima para cada valor de humedad antecedente, un tiempo de recurrencia esperado (tabla 3.6.)

Tabla 3.5. Tiempos de recurrencia esperado para datos de humedad antecedente de 30 días a los eventos de precipitación máxima de S.L.P (2009/2010-2017/2018). Elaboración propia.

	z	Fz	Px	TR
0	-1,37	0,0885	0,9115	1,1
16	-1,23	0,1131	0,8869	1,1
28	-1,12	0,1335	0,8665	1,2
32	-1,09	0,1423	0,8577	1,2

35	-1,06	0,1492	0,8508	1,2
38	-1,03	0,1539	0,8461	1,2
70	-0,75	0,2296	0,7704	1,3
75	-0,71	0,2451	0,7549	1,3
79	-0,67	0,2546	0,7454	1,3
88	-0,60	0,281	0,719	1,4
98	-0,51	0,3121	0,6879	1,5
110	-0,40	0,3483	0,6517	1,5
113	-0,38	0,3594	0,6406	1,6
115	-0,36	0,3669	0,6331	1,6
139	-0,15	0,4483	0,5517	1,8
151	-0,05	0,488	0,512	2,0
151	-0,05	0,488	0,512	2,0
155	-0,01	0,504	0,496	2,0
161	0,04	0,5239	0,4761	2,1
163	0,06	0,5319	0,4681	2,1
171	0,13	0,5596	0,4404	2,3
190	0,30	0,6217	0,3783	2,6
194	0,33	0,6368	0,3632	2,8
194	0,33	0,6368	0,3632	2,8
218	0,54	0,7123	0,2877	3,5
224	0,59	0,7291	0,2709	3,7
236	0,70	0,7642	0,2358	4,2
246	0,79	0,7881	0,2119	4,7
260	0,91	0,8238	0,1762	5,7
315	1,39	0,9207	0,0793	12,6
389	2,04	0,9798	0,0202	49,5
543	3,38	0,9997	0,0003	3333,3

Para el valor de 543 mm de precipitación antecedente a 30 días aplicando el método de Gauss, se estima un tiempo de recurrencia de 3333.3 años, sin embargo este es un valor que escapa a la coherencia ya que se cuentan únicamente con 32 años de datos. Por este motivo, para dicho valor se estima el tiempo de recurrencia aplicando el método de Ven Te Chow.

Conociendo:

$$Media = 156.16$$

$$Desvíó = 114.38$$

$$Precipitacion\ antecedente = 543mm$$

$$K = \frac{543 - 156,16}{114,38} = 3,38$$

Con $K=3,38$ y longitud de la serie de 32 años, para 543mm. Se obtiene un T.R.=78,5 años.

3.4. Tiempos de recurrencia de los eventos hidrológicos

Con los tiempos de recurrencia estimados para precipitaciones máximas diarias y para precipitaciones de 30 días anteriores a estas, se estiman tiempos de recurrencia de que ambos eventos se den simultáneamente. Los resultados obtenidos, son los que se observan en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Tiempos de recurrencia estimados para precipitaciones máximas diarias y precipitación de 30 días anteriores a dichos eventos de S.L.P (2009/2010-2017/2018). Elaboración propia.

P(mm)	T.R.	P.A. 30 días(mm)	T.R.	Promedio
88	1,16	28	1,2	1,18
90	1,2	32	1,2	1,2
95	1,24	35	1,2	1,22
85	1,18	70	1,3	1,24
80	1,08	113	1,6	1,34
94	1,21	98	1,5	1,355
100	1,45	75	1,3	1,375
113	1,51	88	1,4	1,455
77	1,07	151	2	1,535
113	1,54	115	1,6	1,57
130	2,05	38	1,2	1,625
97	1,28	163	2,1	1,69
135	2,28	110	1,5	1,89
130	2,05	161	2,1	2,075
135	2,28	155	2	2,14
114	1,86	190	2,6	2,23
75	1,06	218	3,5	2,28
140	2,54	171	2,3	2,42
149	3,16	151	2	2,58
160	4,23	16	1,1	2,665
160	4,23	139	1,8	3,015
140	2,54	236	4,2	3,37

134	2,23	246	4,7	3,465
110	1,51	260	5,7	3,605
160	4,23	224	3,7	3,965
180	7,71	79	1,3	4,505
174	6,38	194	2,8	4,59
200	15,98	194	2,8	9,39
180	7,71	315	12,6	10,155
215	26,74	0	1,1	13,92
200	15,22	389	49,5	32,36
168	5,32	543	78,5	41,91

3.5. Estudios en el arroyo Riachuelo

Se analizarán también los caudales con el objetivo de buscar una relación que vincule sus recurrencias con las de la precipitación y la humedad antecedente.

Contando con los datos de caudales puntuales aforados desde enero del año 2009 hasta febrero del año 2019, del punto de control ubicado en la sección del puente de la R.P nº5 en San Luis del Palmar proporcionados por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, se grafican dichos valores altura-caudales como puede observarse en la figura 3.3.

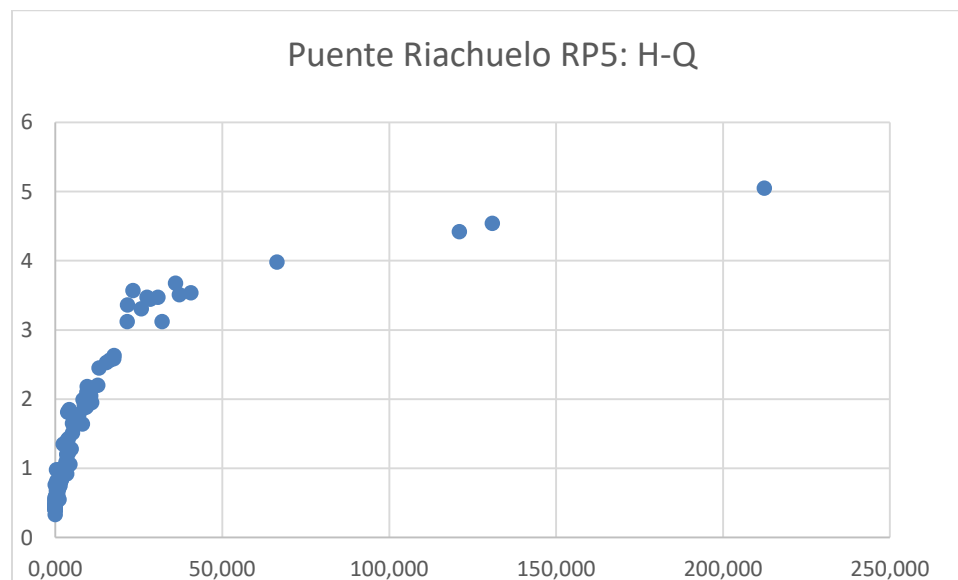


Figura 3.3. Datos de caudales aforados de la sección del puente de la ruta provincial Nº5 en San Luis del Palmar. Elaboración propia.

La representación de la variación de la altura del arroyo Riachuelo en la sección mencionada, en función del tiempo, puede observarse en la figura 3.4.

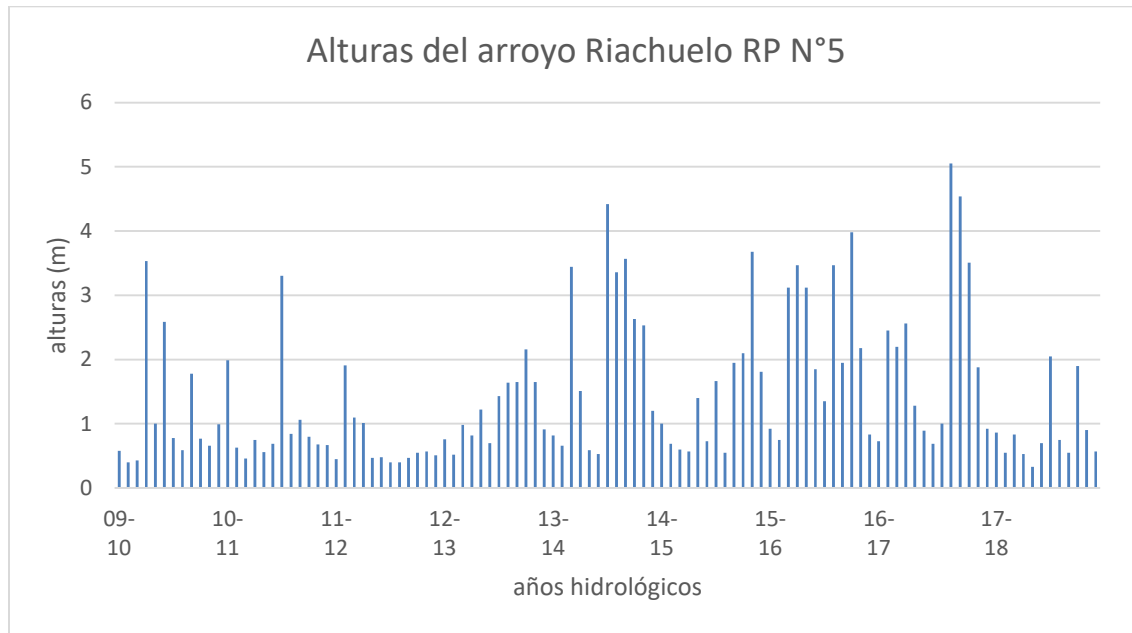


Figura 3.4. Variación de la altura del arroyo Riachuelo en la sección del puente de la ruta provincial N°5 en función del tiempo.

La representación de la variación de los caudales aforados del arroyo Riachuelo en la sección mencionada, en función del tiempo en el cual se tiene registro, puede observarse en la figura 3.5.

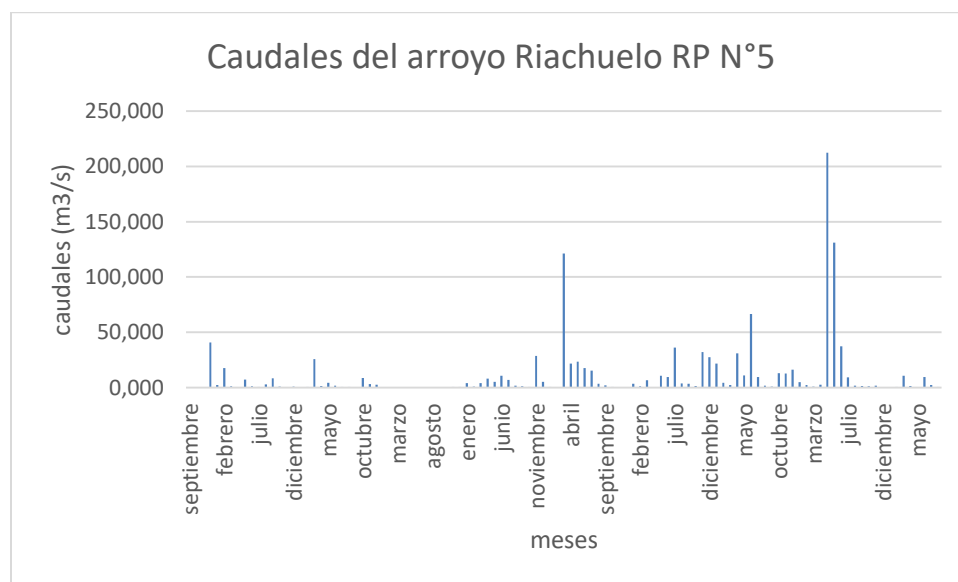


Figura 3.5. Variación de caudales puntuales del arroyo Riachuelo en la sección del puente de la ruta provincial N°5 en función del tiempo. Elaboración propia.

3.5.1. Curva elevación – caudal (E - Q)

El conocer una curva de elevación y gasto de un curso de agua, en una sección, permite a partir de lecturas de altura inferir el caudal correspondiente. Es importante aclarar que: “Esta curva es continua si la sección de control es constante y no se presentan alteraciones debidas a la sedimentación o erosión y, además, si la corriente tiene régimen establecido en el momento de efectuar las mediciones de elevaciones y de gastos” (Springall, R. 1976)

No se tienen datos diarios de aforos, por lo que no se cuentan con los datos de caudales que corresponden a los días en los cuales se dan valores máximos, sin embargo, se cuentan con datos de alturas diarias. A partir de datos medidos, se busca extrapolar valores de caudales para definir el comportamiento del arroyo para datos de caudales no aforados aplicando el método logarítmico, que es aplicable a secciones simétricas respecto al eje central, obteniéndose los siguientes resultados:

$$Q = c. (E - a)^n$$

- Q: gasto aforado en régimen establecido m^3/s
- E: elevación de la superficie libre del agua para ese gasto en mm
- a: elevación correspondiente a un gasto nulo
- c, n: constantes para cada estación

Se inicia el método tanteando valores de a, que se conoce aproximadamente por los pares de valores de los aforos. Luego, se selecciona como elevación que corresponde a un gasto nulo a aquella cuya gráfica en un papel bilogarítmico (E-a) vs. Q es una línea recta aproximadamente.

$$\log Q = \log c + n. \log(E - a)$$

De esta manera se deducen:

- *Coefficiente angular de la recta:* $n = \frac{\log Q - \log c}{\log(E - a)} = \frac{\Delta Q}{\Delta(E - a)}$
- si $(E - a) = 1$, entonces $\log 1 = 0$ y $\log c = \log Q = \text{constante}$

Se graficaron los aforos del arroyo Riachuelo tomados en la sección de control del puente de la ruta provincial N° 5, en el acceso a San Luis del Palmar, obteniéndose una nube de puntos (Ver figura 3.3).

Cabe destacar, que se realizó una curva elevación caudal según año hidrológico que se buscaba conocer la función. Esto se tuvo en cuenta debido a la modificación de la sección de control producidas por sedimentaciones y/o erosiones que suelen afectarla, según recomendaciones de la entidad encargada de recopilar los datos.

Además, se ajustó la distribución para rangos de altura cuando fue necesario, por lo que un mismo año puede tener dos funciones que describen el comportamiento del arroyo. Por ejemplo, el año 2017 tiene una función $Q = f_n(H)$ para alturas mayores o iguales a 3.5 m y otra para menores o iguales a dicha altura.

En Anexo 3 se encuentra el método gráfico desarrollado.

Capítulo 4

Zonificación de riesgo hídrico mediante modelaciones hidrológicas

4.1. Introducción

Una vez determinadas la recurrencias de los eventos registrados, se procede a la zonificación. Para esto, se necesitan los valores de caudales que se dan con cada evento, y como no se cuenta con una serie de aforos de la misma extensión que la de los datos de precipitaciones, se procede a la modelación con el sistema de modelación hidrológica AR-HYMO (INCYTH, 1993).

Una vez obtenidos los caudales necesarios para la zonificación, se trabajará con ellos en el sistema de modelación HEC-RAS (Centro de ingenieros de la armada de EEUU, 1990), determinando la superficie inundada.

4.2. AR-HYMO

El Sistema de modelado hidrológico AR-HYMO (INCYTH, 1993) está diseñado para simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas dendríticas. La representación física de una cuenca se logra con un modelo de cuenca.

Los elementos hidrológicos están conectados en una red dendrítica para simular procesos de escorrentía. La computación se procede de elementos aguas arriba en una dirección aguas abajo.

4.2.1. Modelación AR-HYMO

En primer lugar, observando imágenes satelitales, se divide el área en estudio en subcuencas para lograr una representación de la misma lo más parecido a la realidad posible. De esta manera, el resultado obtenido fue el que se observa en la figura 4.1, en la que la sub área 1 (A1) corresponde a una zona rural con alta capacidad para almacenar agua y baja pendiente; la sub área 2 (A2) corresponde a un área rural que, en conjunto con el área 1, descargan en el arroyo Pehuajó. La sub área B, aporta caudal al arroyo Riachuelo, el cual, en el nodo uno (N1) confluye con el arroyo Pehuajó, y aguas abajo continúa el arroyo Riachuelo. Luego, se encuentra la sub área C1 a la derecha del arroyo Riachuelo en sentido del flujo, y a la izquierda del mismo las subdivisiones de áreas C2 y C3. A excepción de la subárea C2, la cual representa a la ciudad de San Luis del palmar, todas representan áreas rurales.

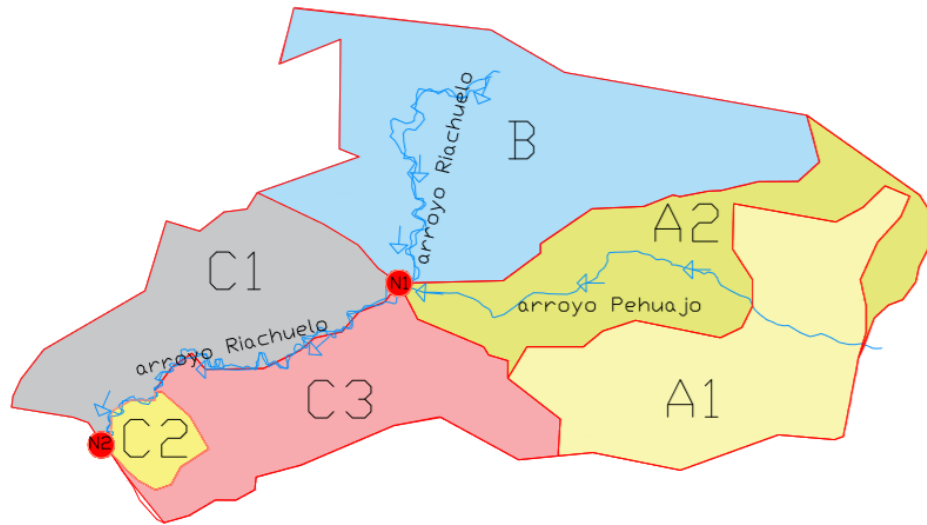


Figura 4.1. Subcuencas del área en estudio. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta esta división, el modelo de cuenca que la representa, es el que se observa en la figura 4.2., siguiendo una secuencia aguas arriba hacia aguas abajo, donde el nodo 1 (N1), representa la confluencia del arroyo Pehuajó y el arroyo Riachuelo, y el nodo 2 (N2) representa la sección de control y punto de salida de la cuenca ubicado en el puente de la ruta provincial N°5.

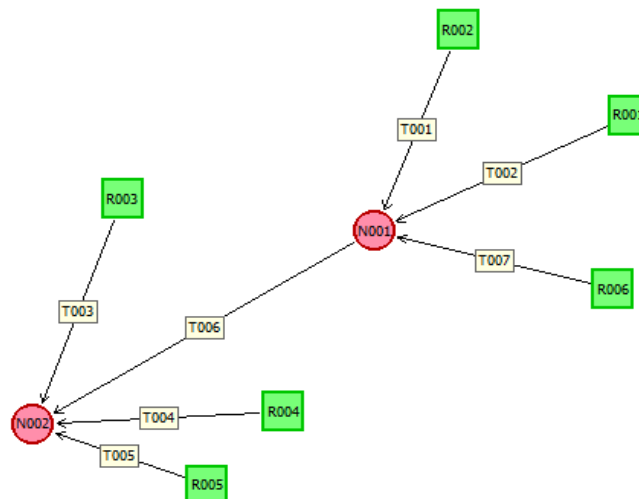


Figura 4.2. Modelo de la subcuenca en estudio logrado mediante Ar - HYMO. Elaboración propia.

Para determinar el volumen de escurrimiento se debe hacer una estimación del parámetro CN, cuyo valor varía entre 0 y 100, siendo CN=100 cuando el total precipitado escurre, mientras que las condiciones en que no se produce escurrimiento superficial CN=0. Este valor, depende de características de la cuenca tales como uso de la tierra, condiciones del suelo y condiciones de humedad de la cuenca en el momento de ocurrir la precipitación para lo cual, en función de las características fitogeográficas mencionadas en el capítulo 1, siguiendo valores indicados en las tablas para la estimación del CN proporcionados en Hidrología Aplicada (VenTeChow, 19), y del análisis de imágenes satelitales con diferentes grados de humedad, se obtuvieron los valores de CN indicados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores de CN para distintas condiciones hidrológicas.

Uso de la tierra o cubierta	área		Condiciones	Grupo hidrológico	CN para clase II		CN para clase III
2016 (Clase III - 25)	km2	%				Ponderado	
Agua	18	9	-	C	95	8,55	
Inundada o anegada	79	40	-	B	84	33,6	
bosque	37	18	regulares	B	60	10,8	
pastizal	41	21	regulares	B	69	14,49	
urbano o suelo desnudo	24	12	-	B	82	9,84	
total	199	100		-		77,28	88,64
2017 (Clase III - 528mm)							
Agua	62	31	-	C	95	29,45	
Inundada o anegada	30	15	-	B	84	12,6	
bosque	37	18	regulares	B	60	10,8	
pastizal	41	21	regulares	B	69	14,49	
urbano o suelo desnudo	29	15	-	B	82	12,3	
total	199	100		-		79,64	89,82

Para la calibración del modelo, en primer lugar, se observaron datos aforados y los eventos de precipitación coincidentes con las fechas de estos datos, llegando a la conclusión de que estos valores de CN no son representativos de lo que ocurre en la cuenca al utilizarlos para la modelación, ya que dan valores de caudales muy por encima de los datos registrados. Por lo que se recurre a la estimación de este parámetro a partir de datos medidos, mediante prueba y error. Con éste método, para eventos con una recurrencia de hasta 15 años, se obtienen los valores de CN que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de CN para distintas condiciones hidrológicas.

Sub área	Área (km2)	CN
A1	36,52	40
A2	34,43	55
B	62,55	55
C1	31,28	55
C2	4,34	60
C3	32,28	55

Para eventos extremos, como son los que se dan en abril de 1998 y abril de 2017, en los que la cuenca se encuentra en un estado de humedad saturado y conociendo que tiene un comportamiento hidrológico "no típico" (al producirse excedentes de agua con un estado de humedad saturado se generan trasvases a cuencas vecinas), se complejiza nuestro estudio simplificado, sin lograr la determinación del flujo base en diferentes situaciones.

El CN determinado con los datos medidos que se ve en la tabla 4.2 es erróneo para estos eventos, ya que suponemos que el caudal es producido exclusivamente por la precipitación de la subcuenca en estudio, sin considerar los aportes de cuencas vecinas.

Por lo tanto, para estos eventos, en la modelación se trabaja con el caudal aforado de abril de 2017.

4.2.2. Resultados

Se observan los resultados obtenidos en el análisis estadístico y se analizan los eventos que se dan con una recurrencia de $TR < 2$ años; $2 \text{ años} < TR < 5$ años; $5 \text{ años} < TR < 15$ años; y $TR > 15$ años, y los resultados obtenidos fueron los que se observan en rojo en la tabla 4.3., mientras que los caudales en negro son datos medidos.

Tabla 4.3. Valores de caudales para distintos eventos.

TR < 2 años			
fecha	P(mm)	Precipitación antecedente 30 días.	Q(m ³ /seg)
28/nov/2002	97	163	32,4
19/ene/2010	135	110	0
25/nov/2001	130	161	59,8
16/feb/1999	135	155	64
2años < TR < 5 años			
6/may/1990	160	224	85,845
24/feb/1996	110	260	44,25
5 años < TR < 15 años			
2/mar/2007	200	194	159,34
20/dic/2003	180	315	169,28
24/ene/1994	215	0	124,15
TR > 15 años			
23/abr/1998	200	398	270
25/abr/2017	168	543	239,95

4.3. Zonificación

Con estos caudales, se procede al trazado de la zonificación de riesgo hídrico en la ciudad de San Luis del Palmar, ubicada al suroeste de la subcuenca en estudio como se observa en la figura 4.3.

Para esto, con la utilización del programa de modelación hidráulica de ríos HEC-RAS (centro de ingenieros de EEUU, 1995), se analiza el área que se ve afectada según los eventos con una determinada recurrencia.

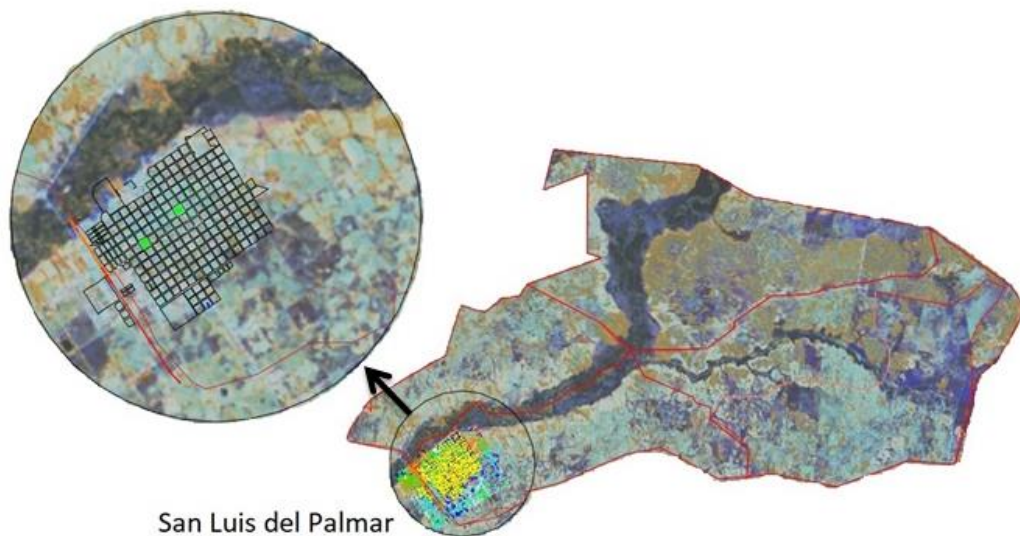


Figura 4.3. Ubicación de San Luis del Palmar dentro de la subcuenca en estudio. Elaboración propia.

4.3.1. HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System)

Este programa está diseñado para realizar cálculos hidráulicos de una y dos dimensiones para una red completa de canales naturales y construidos.

4.3.2. Modelación en HEC-RAS

Para calibrar el modelo hidrológico en el programa HEC-RAS (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, 1995), es necesario contar con una serie de parámetros de entrada tanto hidrológicos como topográficos del arroyo Riachuelo, para llegar a la validación del sistema y poder recrear una serie de eventos no medidos.

Este programa permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua, por lo que su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad y determinar las zonas inundables.

En primer lugar se cargan los perfiles topográficos, de manera de delimitar el curso natural de agua y la zona inundable según las recurrencias mencionadas. Los perfiles utilizados, están conformados por cotas que fueron medidas desde el pelo de agua del arroyo hasta varios metros entrando a la ciudad de San Luis de Palmar, datos que se obtienen de “Validación de modelos digitales de elevación para la generación de cartografía de riesgo de inundación en la localidad de San Luis del Palmar, provincia de Corrientes” de Paruzzo y otros, 2018, referenciadas al sistema de coordenadas del IGN. Para obtener una representación topográfica completa a ambas márgenes del arroyo, se tomaron como referencia los mismos datos para el margen derecho del arroyo teniendo como límite la RP N° 9 que tiene una cota de 66,22msnm. Como cota del punto de control, que en nuestro caso es el puente de la RP N° 5 es 49,98msnm.

Como pendiente del cauce se utiliza 0,125m/m, valor obtenido de “Recuperación de áreas inundables, estero y río Riachuelo” ministerio de defensa de la Nación, 1973.

Otro dato significativo ingresado para la calibración del modelo es la curva H-Q mencionada en el capítulo 3.

Un parámetro de importancia necesario para la calibración, es el coeficiente Manning para definir la rugosidad del cauce. Se utiliza un valor de 0,035 para el cauce por ser terreno natural, y 0,1 para las costas, tanto derecha como izquierda ya que se cuenta con terreno natural con abundante vegetación, lo que significa mayor rugosidad.

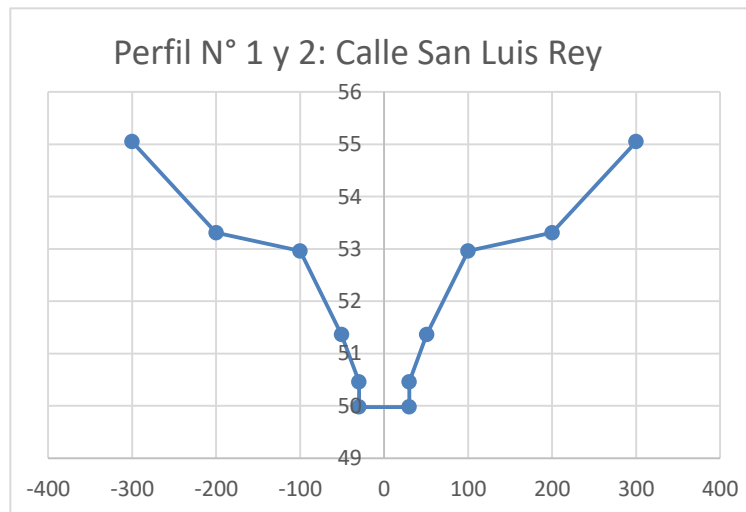
Los perfiles topográficos cargados fueron los que se observan en la figura 4.4:



Figura 4.4. Perfiles topográficos.

Perfiles N° 1 y 2: representan la sección natural del puente, nuestro punto de control.

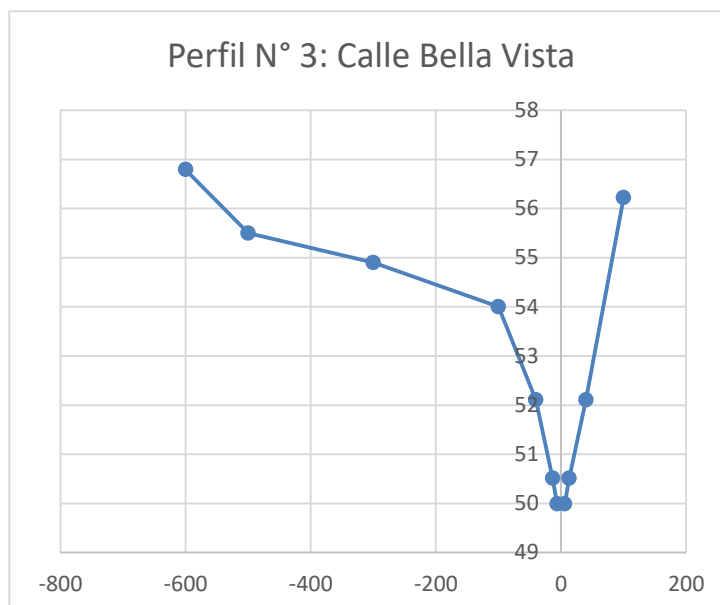
PERFIL N°1 y2: CALLE SAN LUIS REY	
X: Ancho (m)	Y: Altura (m)
-300	55.051
-200	53.31
-100	52.96
-50.6	51.362
-30	50.46
-30	49.98
30	49.98
30	50.46
50.6	51.362
100	52.96
200	53.31
300	55.051



Perfil N° 3:

Distancia al punto de control siguiendo la longitud del curso de agua: 346m

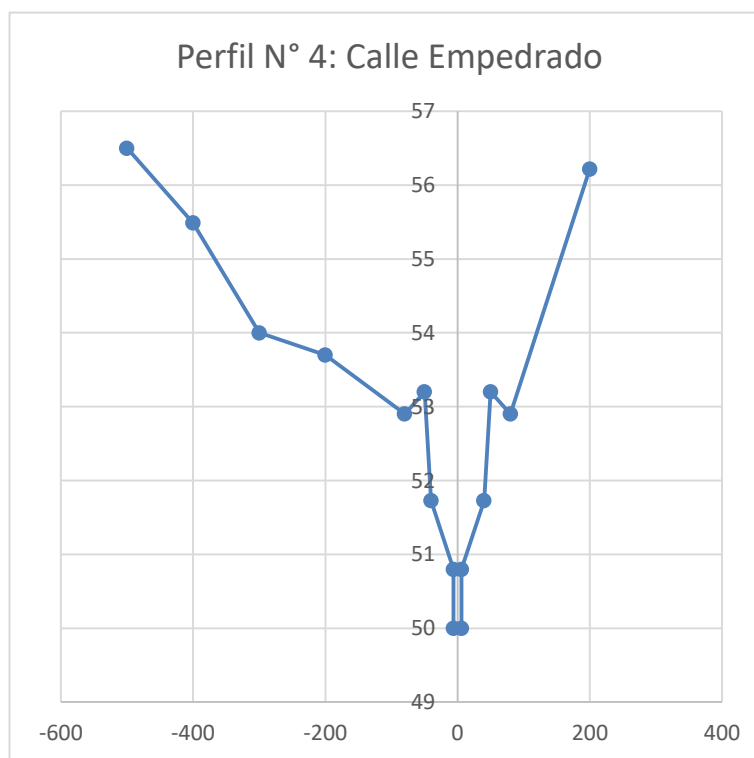
PERFIL N°3: CALLE BELLA VISTA	
X: Ancho (m)	Y: Altura (m)
-600	56.79
-500	55.5
-300	54.9
-100	54
-40	52.102
-13.2	50.51
-6	49.99
6	49.99
13.2	50.51
40	52.102
100	56.22



Perfil N° 4:

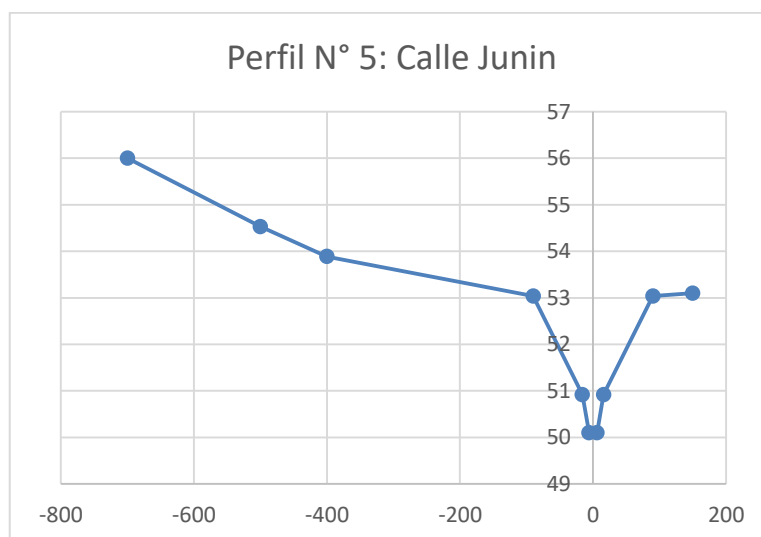
Distancia al punto de control siguiendo la longitud del curso de agua: 1000m

PERFIL N° 4: CALLE EMPEDRADO	
X: Ancho (m)	Y: Altura (m)
-500	56.5
-400	55.49
-300	54
-200	53.7
-80	52.902
-50	53.201
-40	51.728
-6	50.8
-6	50
6	50
6	50.8
40	51.728
50	53.201
80	52.902
200	56.22

**Perfil N° 5:**

Distancia al punto de control siguiendo la longitud del curso de agua: 1200m

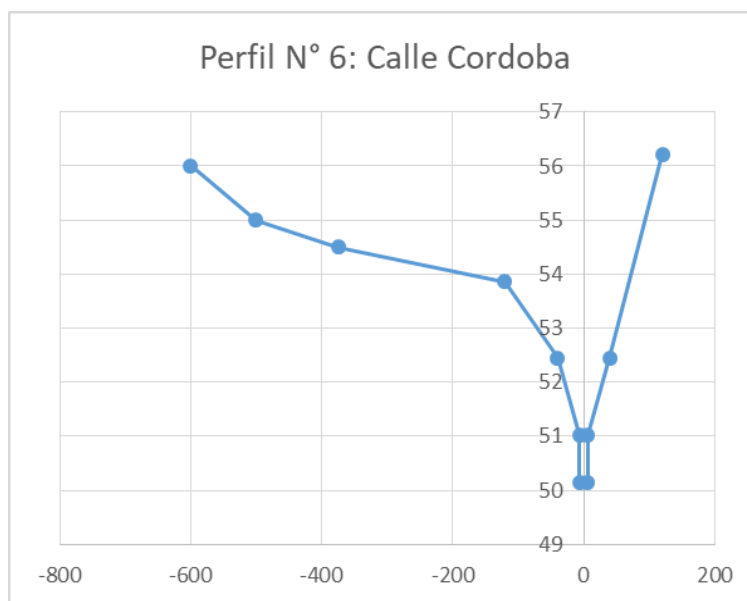
PERFIL N°5: CALLE JUNIN	
X	Y
-700	56
-500	54.53
-400	53.886
-90	53.036
-16	50.918
-6	50.1
6	50.1
16	50.918
90	53.036
150	53.1



Perfil N° 6:

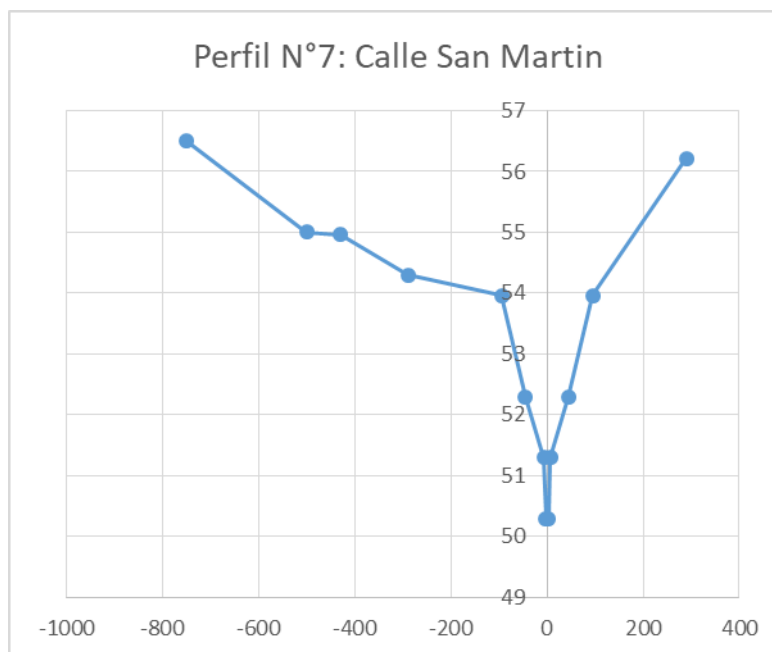
Distancia al punto de control siguiendo la longitud del curso de agua: 1400m

PERFIL N°6: CALLE CORDOBA	
X: Ancho (m)	Y: Altura (m)
-600	56
-500	55
-375	54.5
-120	53.856
-40	52.45
-6	51.028
-6	50.15
6	50.15
6	51.028
40	52.45
120	56.22

**Perfil N° 7:**

Distancia al punto de control siguiendo la longitud del curso de agua: 2075m

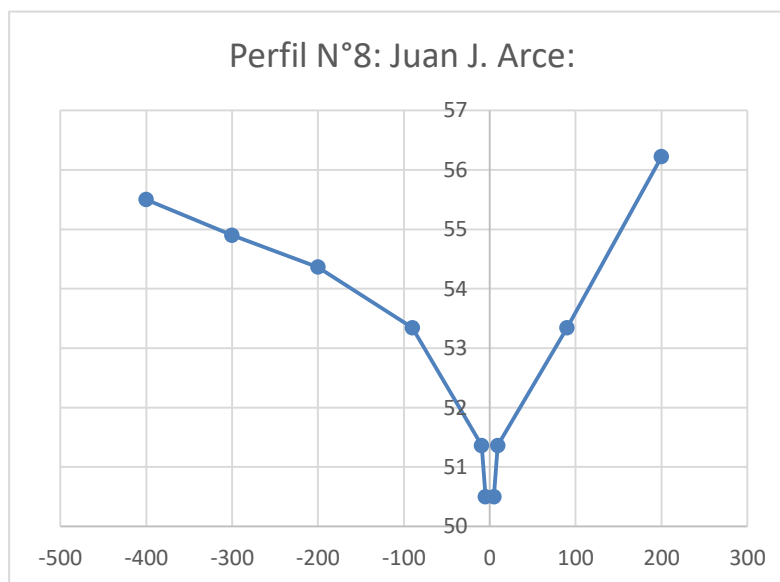
PERFIL N° 7: CALLE SAN MARTIN	
X: Ancho (m)	Y: Altura (m)
-750	56.5
-500	55
-430	54.96
-290	54.299
-95	53.961
-45	52.29
-6.35	51.301
-3	50.3
3	50.3
6.35	51.301
45	52.29
95	53.961
290	56.22



Perfil N° 8:

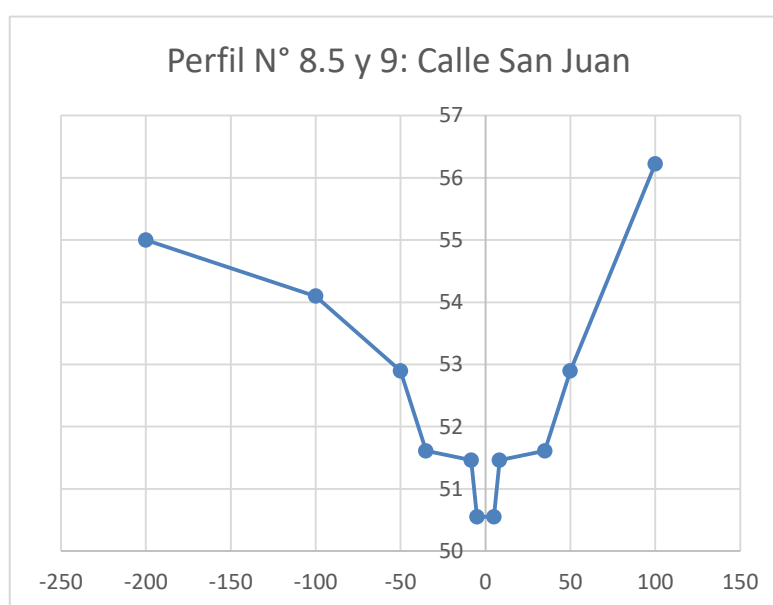
Distancia al punto de control siguiendo la longitud del curso de agua: 2343m

PERFIL N°8: JUAN J ARCE	
X: Ancho (m)	Y: Altura (m)
-400	55.5
-300	54.9
-200	54.364
-90	53.342
-9.4	51.362
-5	50.5
5	50.5
9.4	51.362
90	53.342
200	56.22

**Perfiles N° 8.5 y 9:**

Distancia al punto de control siguiendo la longitud del curso de agua: 2543m

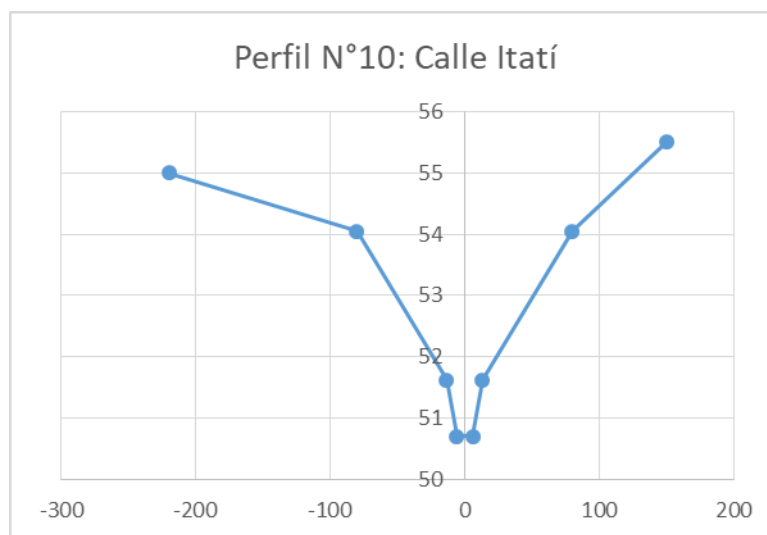
PERFIL N°9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	
X: Ancho (m)	Y: Altura (m)
-200	55
-100	54.096
-50	52.896
-35	51.611
-8.35	51.461
-5	50.55
5	50.55
8.35	51.461
35	51.611
50	52.896
100	56.22



Perfil N° 10:

Distancia al punto de control siguiendo la longitud del curso de agua: 2800m

PERFIL N° 10: CALLE ITATI	
X: Ancho (m)	Y: Altura (m)
-220	55
-80	54.048
-13.4	51.618
-6	50.7
6	50.7
13.4	51.618
80	54.048
150	55.5



Con información obtenida del departamento de Vialidad Provincial se pudo cargar también, la estructura del puente ubicado en la RP N° 5, usado como punto de control. El puente fue ubicado entre los perfiles N° 1 y 2, cuya sección transversal se observa en la figura 4.5.

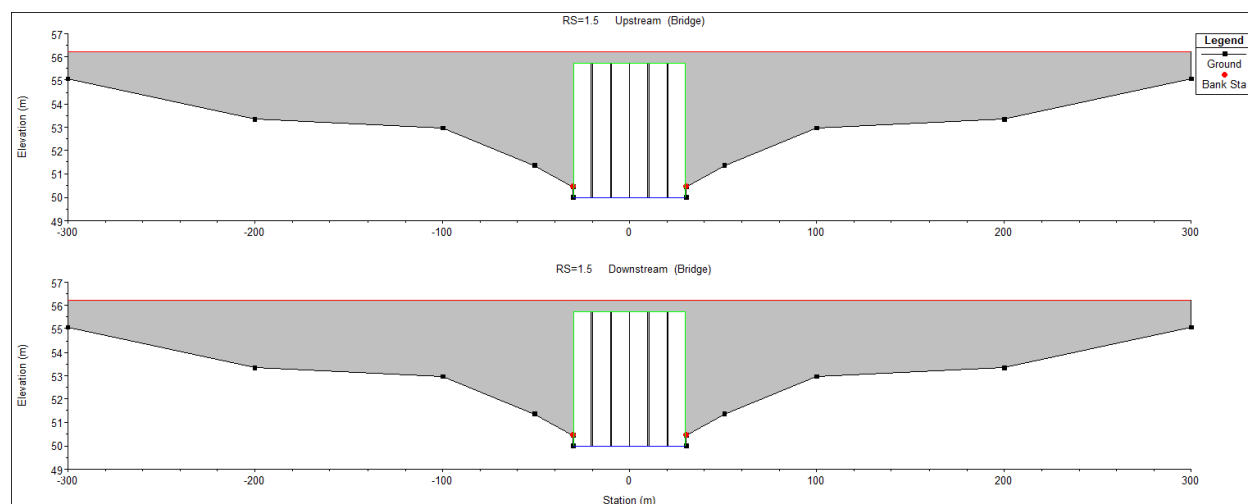


Figura 4.5. Perfiles topográficos de la ruta provincial N°5.

Una vez cargados los perfiles, el programa realiza una interpolación entre los mismos, obteniendo el resultado que se observa en la figura 4.6.

Luego, se procede a la calibración del modelo, obteniendo datos satisfactorios ya que los resultados de altura - caudal obtenidos, coinciden con los datos medidos en dicha sección de control.

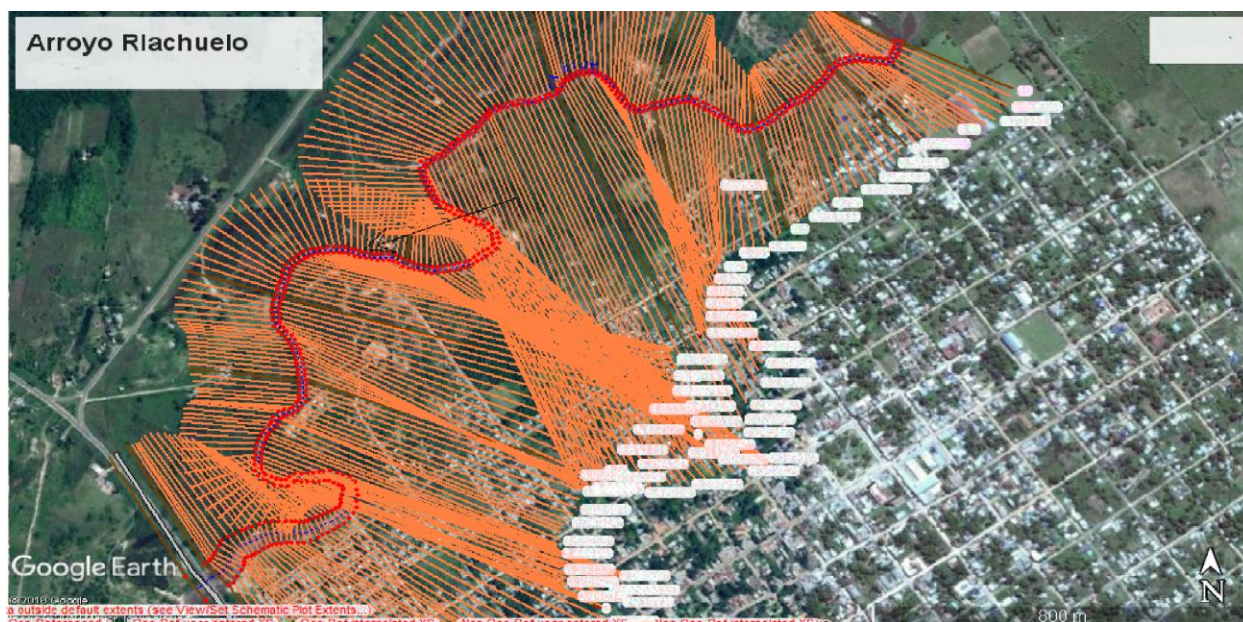


Figura 4.6. Perfiles topográficos e interpolaciones.

Calibrado el modelo, se inició la modelación de eventos no registrados, obteniendo la delimitación de zonas inundables para eventos con diferentes recurrencia.

Los resultados obtenidos para los caudales modelados se observan en la tabla 4.4, donde se observa que para distintas cotas alcanzadas, se inunda en menor o mayor medida el valle de inundación.

Tabla 4.4. Resultados HEC-RAS

TR 2 AÑOS				
FECHA	CAUDAL (m ³ /s)	CALLE	Cota IGN (m)	DISTANCIA EN X (m)
22/11/2002	32.4	PERFIL Nº 1: PUENTE RP Nº 5	53.15	120
		PERFIL Nº1 y2: CALLE SAN LUIS REY	53.15	120
		PERFIL Nº3: CALLE BELLA VISTA	53.16	65
		PERFIL Nº 4: CALLE EMPEDRADO	53.18	119
		PERFIL Nº5: CALLE JUNIN	53.19	121
		PERFIL Nº6: CALLE CORDOBA	53.21	71
		PERFIL Nº 7: CALLE SAN MARTIN	53.29	60
		PERFIL Nº8: JUAN J ARCE	53.31	89
		PERFIL Nº9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	53.33	40
		PERFIL Nº 10: CALLE ITATI	53.36	57
25/11/2001	59.8	PERFIL Nº 1: PUENTE RP Nº 5	53.84	201
		PERFIL Nº1 y2: CALLE SAN LUIS REY	53.84	201
		PERFIL Nº3: CALLE BELLA VISTA	53.84	90
		PERFIL Nº 4: CALLE EMPEDRADO	53.87	250

		PERFIL Nº5: CALLE JUNIN	53.89	277
		PERFIL Nº6: CALLE CORDOBA	53.91	140
		PERFIL Nº 7: CALLE SAN MARTIN	54	115
		PERFIL Nº8: JUAN J ARCE	54.04	151
		PERFIL Nº9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	54.05	101
		PERFIL Nº 10: CALLE ITATI	54.09	95.8
16/2/1999	64	PERFIL Nº 1: PUENTE RP Nº 5	53.93	230
		PERFIL Nº1 y2: CALLE SAN LUIS REY	53.93	230
		PERFIL Nº3: CALLE BELLA VISTA	53.95	80
		PERFIL Nº 4: CALLE EMPEDRADO	53.97	200
		PERFIL Nº5: CALLE JUNIN	53.98	280
		PERFIL Nº6: CALLE CORDOBA	54.08	120
		PERFIL Nº 7: CALLE SAN MARTIN	5.12	130
		PERFIL Nº8: JUAN J ARCE	54.14	140
		PERFIL Nº9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	54.16	80
		PERFIL Nº 10: CALLE ITATI	54.17	90

TR 5 AÑOS				
FECHA	CAUDAL (m3/s)	CALLE	ALTURA EN Y (m)	DISTANCIA EN X (m)
6/5/1990	85.85	PERFIL Nº 1: PUENTE RP Nº 5	54.12	206
		PERFIL Nº1 y2: CALLE SAN LUIS REY	54.12	206
		PERFIL Nº3: CALLE BELLA VISTA	54.13	95
		PERFIL Nº 4: CALLE EMPEDRADO	54.16	215
		PERFIL Nº5: CALLE JUNIN	54.18	298
		PERFIL Nº6: CALLE CORDOBA	54.2	164
		PERFIL Nº 7: CALLE SAN MARTIN	54.34	209
		PERFIL Nº8: JUAN J ARCE	54.38	163
		PERFIL Nº9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	54.4	100
		PERFIL Nº 10: CALLE ITATI	54.43	110
24/2/1996	44.25	PERFIL Nº 1: PUENTE RP Nº 5	53.58	200
		PERFIL Nº1 y2: CALLE SAN LUIS REY	53.58	200
		PERFIL Nº3: CALLE BELLA VISTA	53.58	70
		PERFIL Nº 4: CALLE EMPEDRADO	53.6	143
		PERFIL Nº5: CALLE JUNIN	53.61	223
		PERFIL Nº6: CALLE CORDOBA	53.63	83
		PERFIL Nº 7: CALLE SAN MARTIN	53.7	84
		PERFIL Nº8: JUAN J ARCE	53.73	118
		PERFIL Nº9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	53.75	74

		PERFIL Nº 10: CALLE ITATI	53.78	74.5
--	--	---------------------------	-------	------

TR 10 Y 15 AÑOS				
FECHA	CAUDAL (m3/s)	CALLE	ALTURA EN Y (m)	DISTANCIA EN X (m)
2/3/2007	159.34	PERFIL Nº 1: PUENTE RP Nº 5	54.72	250
		PERFIL Nº1 y2: CALLE SAN LUIS REY	54.72	250
		PERFIL Nº3: CALLE BELLA VISTA	54.79	165
		PERFIL Nº 4: CALLE EMPEDRADO	54.81	256
		PERFIL Nº5: CALLE JUNIN	54.83	345
		PERFIL Nº6: CALLE CORDOBA	54.99	272
		PERFIL Nº 7: CALLE SAN MARTIN	55.04	330
		PERFIL Nº8: JUAN J ARCE	55.06	235
		PERFIL Nº9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	55.11	141
		PERFIL Nº 10: CALLE ITATI	55.14	143
20/12/2003	169.28	PERFIL Nº 1: PUENTE RP Nº 5	54.77	253
		PERFIL Nº1 y2: CALLE SAN LUIS REY	54.77	253
		PERFIL Nº3: CALLE BELLA VISTA	54.78	174
		PERFIL Nº 4: CALLE EMPEDRADO	54.85	250
		PERFIL Nº5: CALLE JUNIN	54.88	352
		PERFIL Nº6: CALLE CORDOBA	54.9	280
		PERFIL Nº 7: CALLE SAN MARTIN	55.06	345
		PERFIL Nº8: JUAN J ARCE	55.1	242
		PERFIL Nº9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	55.13	139
		PERFIL Nº 10: CALLE ITATI	55.18	145
24/1/1994	124.15	PERFIL Nº 1: PUENTE RP Nº 5	54.45	235
		PERFIL Nº1 y2: CALLE SAN LUIS REY	54.45	235
		PERFIL Nº3: CALLE BELLA VISTA	54.46	134
		PERFIL Nº 4: CALLE EMPEDRADO	54.52	230
		PERFIL Nº5: CALLE JUNIN	54.54	327
		PERFIL Nº6: CALLE CORDOBA	54.56	234
		PERFIL Nº 7: CALLE SAN MARTIN	54.71	266
		PERFIL Nº8: JUAN J ARCE	54.76	203
		PERFIL Nº9 y 8.5: CALLE SAN JUAN	54.78	124
		PERFIL Nº 10: CALLE ITATI	54.82	127

Finalmente, la zonificación de riesgo hídrico lograda mediante modelaciones, es la que se puede observar en la figura 4.6.



Figura 4.4. Zonificación de riesgo hídrico a partir de sistemas de modelación hidráulica.

4.4. Resultados y alcances

Zona prohibida (demarcada en color rojo): Para aquellas zonas anegadas visibles en el modelo con tiempos de recurrencia menores a 2 años ($TR < 2$ años), es decir el promedio crecidas ordinarias, las cuales determinan la línea de ribera, se observa un total de 60 viviendas construidas dentro del cauce del arroyo, las cuales sufren anegamientos muy frecuentes.

Zona de riesgo severo (demarcada en color naranja): Aquellas zonas inundadas visibles en el modelo con tiempos de recurrencia entre 2 a 5 años, que determinan áreas donde frecuentemente se producen anegamientos, se observan 101 viviendas afectadas, es decir 41 viviendas a partir de la línea de ribera hasta el límite del promedio de eventos máximos que se dan con un tiempo de recurrencia de hasta 5 años.

Zona de riesgo medio (demarcada en color verde): Asimismo, se observan aquellas zonas inundadas visibles en el modelo con tiempos de recurrencia de entre 5 a 15 años, áreas donde las inundaciones se repiten en forma moderada en el tiempo, se ven afectadas 174 viviendas, de las cuales 73 están ubicadas dentro de los límites establecidos por los promedios de las crecientes con tiempos de recurrencia entre 5 y 15 años.

Zona de eventos extremos, riesgo de inundación leve (demarcada en color violeta): aquellas áreas donde las inundaciones se repiten en forma esporádica y el riesgo asociado de ser inundada es leve, se ven afectadas 270 viviendas, de las cuales 96 se encuentran entre los límites de eventos con 15 años de recurrencia, y los eventos máximos registrados asociados a recurrencias mayores a 15 años.

La superposición de estos cuatro niveles de riesgo de inundación solapados en el orden presentado, conformará la cartografía de riesgo hídrico por inundación para el área de influencia de la zonificación de riesgo hídrico del sector estudiado, y será comparado con el resultado de la superposición de los mismos niveles de riesgo, analizadas a partir de imágenes satelitales.

Estos resultados están restringidos a las siguientes cuestiones:

- La complejidad de la cuenca ya explicada, genera dificultades al momento de generar una topología que la represente;
- La topografía a margen izquierdo del arroyo Riachuelo no fue medida con la misma precisión que el margen derecho;
- No se utilizó un hidrograma de crecidas.

Capítulo 5

Zonificación de riesgo hídrico mediante imágenes satelitales

5.1 Introducción

Luego de realizar un estudio estadístico de las precipitaciones de la zona (capítulo 3), se busca determinar cartográficamente áreas con diferentes capacidades de ser inundadas frente a eventos de distintas recurrencias. Es decir, se procederá en el presente capítulo a la zonificación de riesgo hídrico de áreas rurales y urbanas de la subcuenca estudiada con la ayuda de imágenes satelitales.

5.2 Imágenes analizadas

Se buscaron imágenes de la plataforma Landsat que sean inmediatamente posteriores a los eventos analizados (tabla 3.6), y a la vez que sean útiles para su procesamiento en un programa SIG (Sistema de Información Geográfica).

Con esta última aclaración, se destaca la importancia de la baja nubosidad y de algunas líneas que demuestran el error con que el satélite captó algunas imágenes.

Se trabajó con la proyección del sistema de coordenadas: Transverse Mercator y el sistema de coordenadas utilizado: WGS 1984 UTM ZONA 21 N (en donde el datum: WGS84; nivel de proyección del mapa: UTM; zona de UTM: 21)

Las imágenes son de la columna 226 y fila 79, descargadas de la plataforma gratuita de USGS (United States Geological Survey).

Se seleccionaron las siguientes imágenes, según sus recurrencias:

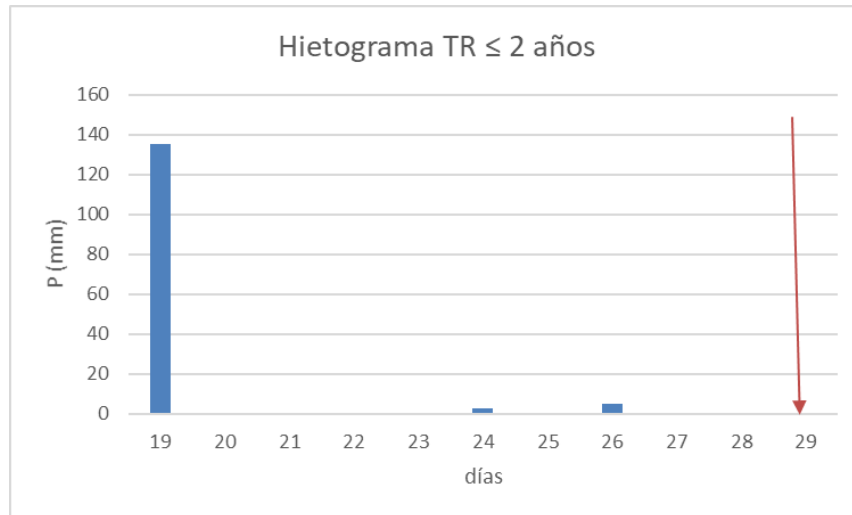
Tiempo de recurrencia ≤ 2 años

Nos posibilita la determinación de la línea de ribera. Divide el dominio público del privado.

Imágenes estudiadas en color natural corresponden a:

TR ≤ 2 años		
imagen	evento	diferencia
8/5/1988	26/4/1988	13
6/12/2001	25/11/2001	12
29/1/2010	19/1/2010	10
6/2/2010	19/1/2010	18

Se trabajó sobre la de **29/01/2010** que corresponde al evento del 19 de enero de 2010.



Tiempo de recurrencia ≤ 5 años

Por debajo de este límite se considera riesgo alto de inundación.

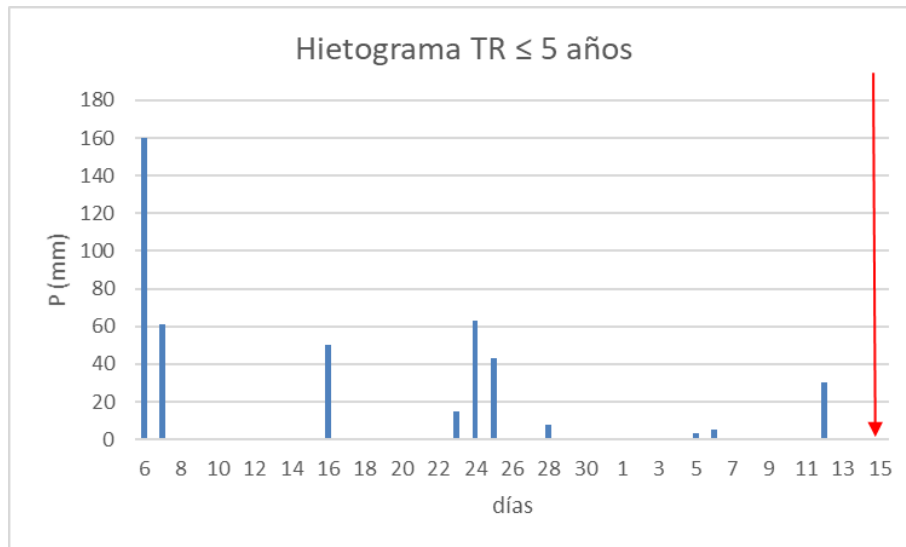
Imágenes estudiadas en color natural corresponden a:

TR ≤ 5 años		
imagen	evento	diferencia
15/6/1990	6/5/1990	40
27/3/1996	24/2/1996	35
26/1/2009	12/1/2009	14
13/5/2016	24/2/2016	24

Se trabajó sobre la del **15/06/1990**. Cabe destacar que, debido a la cantidad de días entre el evento y la imagen y conociendo las precipitaciones dadas en ese período, la imagen no resulta representativa en su totalidad.

Se observa claramente la saturación de los bajos, sin tener anegado el valle de inundación del arroyo, por lo que se consideró aceptable el resultado que allí arroja.

La elección de esta imagen para determinar la zona inundable cada cinco años se debe a que el evento generó el máximo caudal de escorrentía según el modelo hidrológico desarrollado en el capítulo anterior.



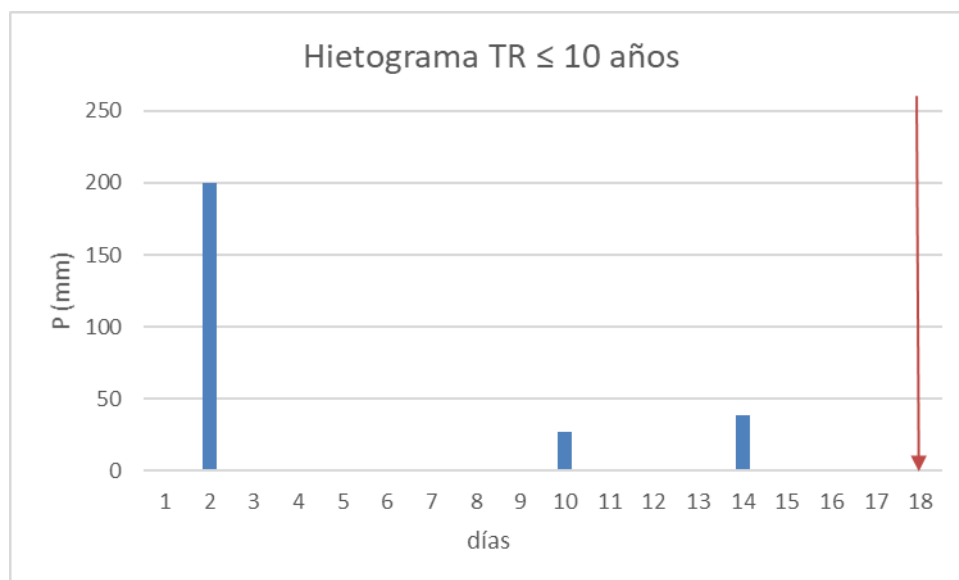
Tiempo de recurrencia ≤ 15 años

Entre 5 y 15 años tendremos riesgo medio de inundación.

Las imágenes estudiadas en color natural corresponden al mismo evento:

5 años $\leq$ TR $\leq$ 15 años		
imagen	evento	diferencia
18/3/2007	2/3/2007	16
26/3/2007	2/3/2007	26

Se trabajó sobre la imagen del día 18/03/2007 que es la más cercana al evento.



Evento Extremo

Entre 15 años y este límite tendremos riesgo bajo de inundación. El evento extremo estudiado es el que alcanzó la altura de 5,05 m y caudal igual a 239,95

m^3/s en el punto de control, corresponde al aforo del día 27/04/2017 a las 09:11 hs. La altura máxima registrada es 5,30 del día 26/04/2017.

Las imágenes corresponden a:

- 22/04/2017: Situación previa al evento de máxima, nos permite inferir en el grado de humedad de la cuenca, y cuan inundado estaba el valle de inundación.
- 30/04/2017: Situación posterior al evento.



Es interesante el estudio de la imagen del 22 de abril, ya que se observa con claridad que el estado de inundación supera el estudiado para los 10 años de recurrencia.

El agua de la zona norte de la ruta provincial N° 9 se acumulaba sobre su terraplén. Para la fecha del 30 de abril, ya se aprecia que esta ruta queda con agua a sus lados, en una longitud aproximada de 2 km. (Ver figuras 5.1 y 5.2)

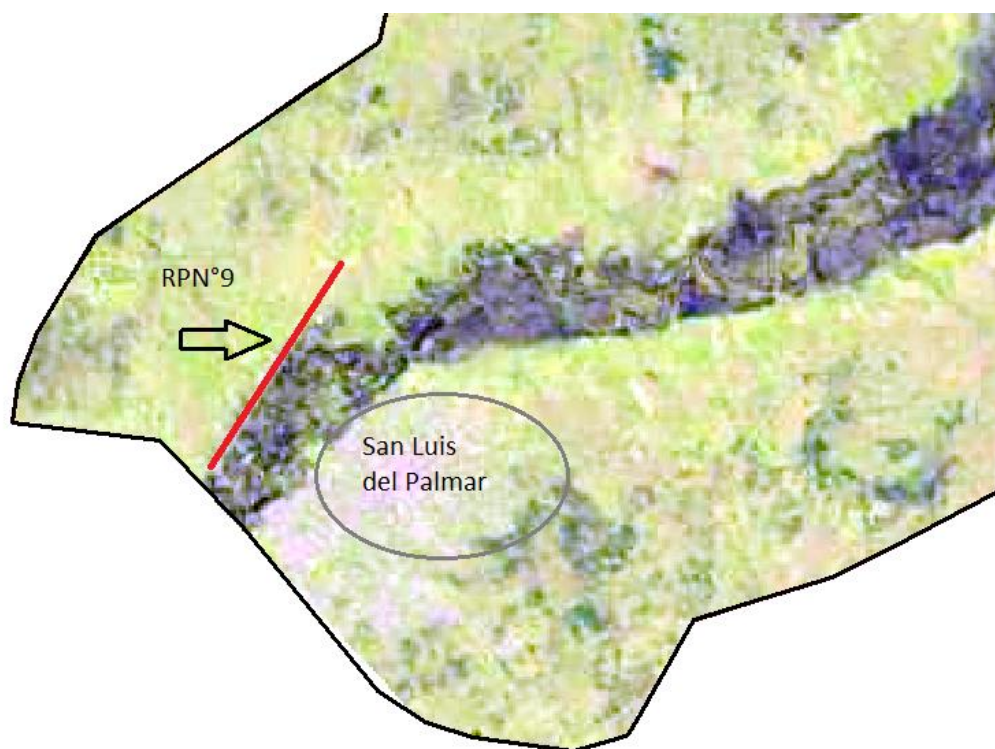


Figura 5.1. Situación del 22 de abril de 2017. (Fuente: producción propia)

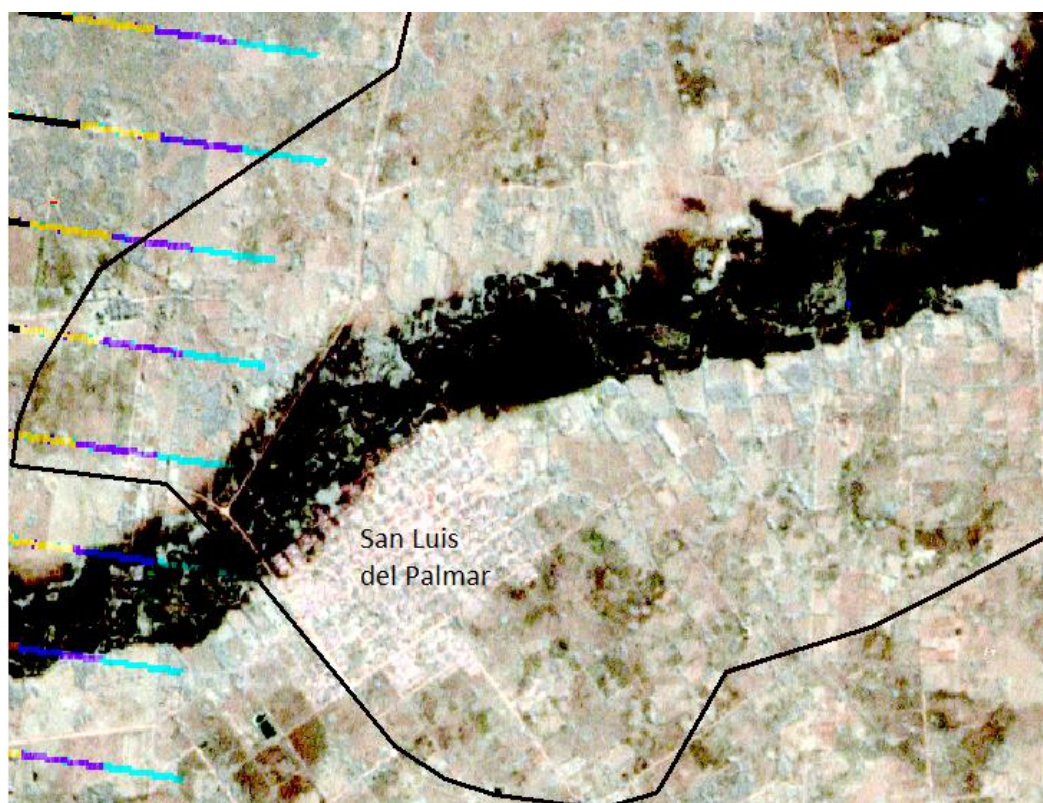


Figura 5.2. Situación del 30 de abril de 2017. (Fuente: producción propia)

La imagen usada para marcar la superficie máxima del valle inundado fue del **30/04/2017** (figura 5.2).

Se desechó la imagen del 21 de junio de 1998 debido al tiempo transcurrido desde la ocurrencia del evento (23/04/1998).

5.2 Uso del Programa Arc Gis

Se seleccionaron las más representativas de cada caso y se las compuso con las bandas: R: B4, G: B5, B: B3 que corresponden al satélite Landsat 7 ETM+, y nos permite identificar los usos de suelo y las masas de agua, a diferencia de otro tipo de composiciones.

Luego, se realizó la clasificación no supervisada mediante 8 clases más representativas. Básicamente se detectan tres clases de agua, una de bajos, tres de vegetación (pastizal, monte y monte alto) y suelo urbano o desnudo.

Se creó un dataset (conjunto de datos) mosaico de color natural con nitidez pancromática mediante un algoritmo de refinado pancromático. Esto da como resultado una imagen con un pixel más pequeño que el de 30 metros por 30 metros usuales de las imágenes Landsat y, por lo tanto, permite una clasificación más definida. El pixel resultante posee 15 metros de lado. Este método se utilizó en las imágenes del 30/04/2017 y 18/03/2007.

5.3. Resultados y alcances

La clasificación final se observa en las cartografías anexas de este capítulo.

La cartografía de zonificación de riesgo hídrico es el resultado de la superposición de los polígonos respectivos a cada recurrencia. Para lograrlo, primero se exportó de formato ráster a polígono a las clasificaciones que señalaban agua o anegamiento. El resultado es el que sigue:

Zona prohibida: se demarcó con color rojo. Corresponde al tiempo de recurrencia igual a 2 años.

Zona de riesgo severo: se demarcó con color amarillo y tiene una recurrencia de inundación menor a 5 años.

Zona de riesgo medio: con color verde se marca la franja de inundación con una recurrencia menor a 15 años.

Zona de eventos extremos (riesgo de inundación leve): con violeta se observa la máxima inundación registrada. Posee una recurrencia de 42 años.

Teniendo en cuenta las limitaciones que tiene trabajar con imágenes satelitales, como por ejemplo los días transcurridos desde la ocurrencia del evento y la restricción espacial de un pixel, se puede decir que realizar una zonificación de riesgo hídrico de esta manera en el área urbana conlleva un margen de error.

Sin embargo, a cierta escala permite la definición de áreas anegables con cierta recurrencia y así una herramienta para la proyección del ejido urbano de la ciudad de San Luis del Palmar, como también de áreas con posibilidades de ser productivas para la agricultura. Esto se traduce en una medida no estructural para paliar el problema de inundación.

Parte del cordón arenoso que conforma la geomorfología ya explicada en el capítulo 1, es el área propicia para el desarrollo de la ciudad. En la imagen 5.2. se observa una zona al noreste de San Luis que no fue afectada durante el evento de inundación extraordinaria.

Se trazaron líneas en la parte de la subcuenca donde se posiciona la ciudad siguiendo la distribución de los polígonos (ver imagen 5.3.).

Se hace notar que en la planimetría son prácticamente coincidentes la de 2 y 5 años de recurrencia, siguen la sinuosidad del cauce; la de 15 años tiene más diferencia y la del evento extremo se aleja mucho más.

Esta situación no se repite aguas arriba. Aquí las líneas revelan un “encajonamiento” del cauce que se desborda para eventos extremos.

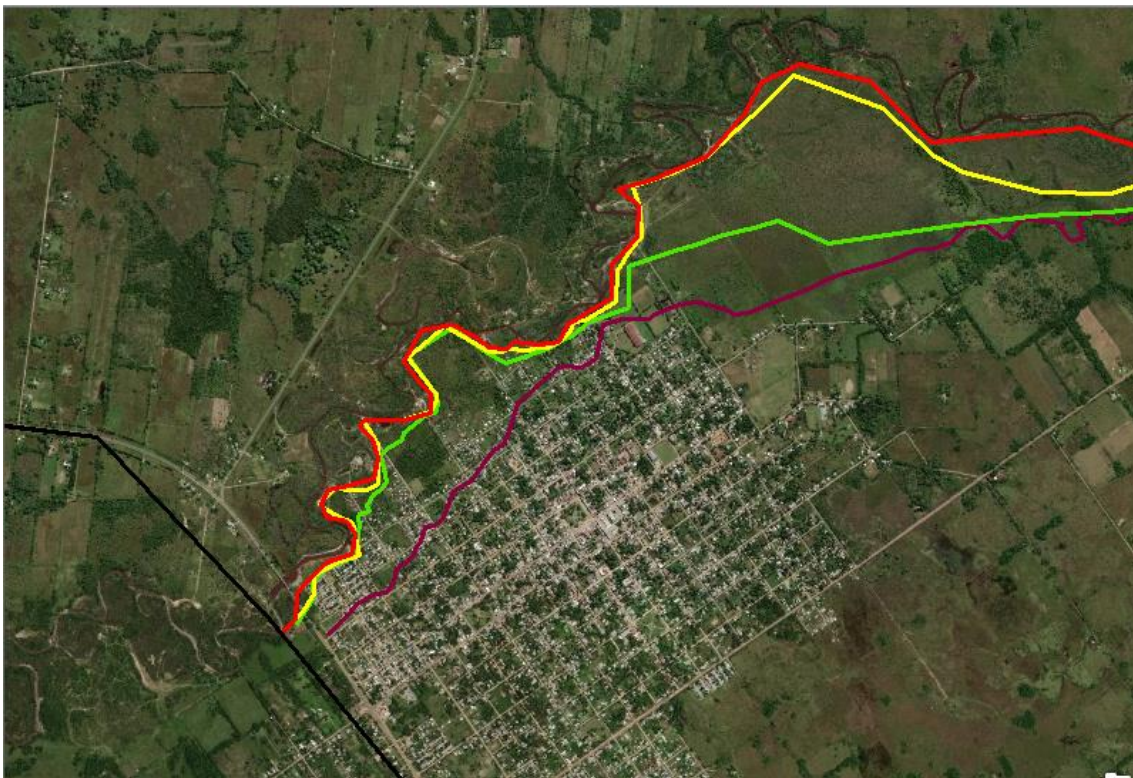


Figura 5.3. Líneas de zonificación para riesgo severo (amarillo), medio (verde) y extremo (violeta) y línea de ribera (roja). (Fuente: producción propia)

Capítulo 6

Soluciones

6.1. Introducción

Como se ha descrito anteriormente, la ciudad de San Luis del Palmar se desarrolló sobre la costa del arroyo Riachuelo, siendo una ciudad que sufre el anegamiento en forma frecuente de las zonas más bajas y próximas a la costa debido a las crecientes del mismo. Una vez determinada la zonificación de riesgo hídrico, se puede ver que esto se debe a que un gran número de viviendas fue construida dentro del cauce o del valle de inundación del arroyo.

Por otro lado en las zonas contiguas a la línea de ribera, se realizaron asentamientos sin tener en cuenta ningún criterio hidrológico.

Es por ello que se analizarán distintas alternativas para evitar problemas de anegamiento e inundaciones, para lo que se tendrá en cuenta la zonificación de riesgo hídrico realizada anteriormente.

6.2. Análisis de la sección del puente

Siguiendo el curso natural del arroyo, se observa que la RP5 lo atraviesa mediante un puente (figura 6.1), el cual fue tomado como punto de control de la subcuenca en estudio, como se mencionó anteriormente.



Figura 6.1. Puente de la RP5. (Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google maps)

Se analiza si la sección del mismo no obstruye el libre escurrimiento del arroyo en el mayor de los eventos registrados, para lo que se observan tanto resultados de la modelación hidrológica realizada mediante HEC-RAS (centro de ingenieros de EEUU, 1995), como imágenes satelitales para dicho evento.

Mediante la modelación, se observa que para el evento máximo registrado (abril, 2017) el tirante aguas arriba del puente tiene una cota de 55,22m y una velocidad de 0,46m/s; y aguas abajo se tiene una cota de 55,2m y una velocidad de 0,46m/s, como se observa en la figura 6.2. Como estos valores se mantienen prácticamente constantes, no existe un remanso significativo, manteniendo un régimen constante; por lo que se llega a la conclusión de que el mismo no actúa como un obstáculo para el flujo del arroyo.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl	
Tramo 1	10	MAX	240.00	50.70	55.67		55.70	0.000255	1.33	726.10	370.00	0.19	
Tramo 1	9	MAX	240.00	50.55	55.63		55.66	0.000259	1.36	671.95	291.10	0.19	
Tramo 1	8.5	MAX	240.00	50.55	55.58		55.61	0.000275	1.39	657.47	290.35	0.20	
Tramo 1	8	MAX	240.00	50.50	55.55		55.56	0.000173	1.11	1012.13	574.31	0.16	
Tramo 1	7	MAX	240.00	50.30	55.51		55.52	0.000209	1.24	1142.49	813.52	0.17	
Tramo 1	6	MAX	240.00	50.15	55.37		55.39	0.000207	1.13	962.58	638.38	0.16	
Tramo 1	5	MAX	240.00	50.10	55.34		55.35	0.000067	0.71	1550.49	774.67	0.10	
Tramo 1	4	MAX	240.00	50.00	55.32		55.33	0.000135	0.93	1084.15	555.63	0.13	
Tramo 1	3	MAX	240.00	49.99	55.23		55.27	0.000283	1.45	722.08	496.24	0.20	
Aguas arriba del puente	Tramo 1	2	MAX	240.00	49.98	55.22	51.16	55.22	0.000029	0.46	1418.01	600.00	0.06
Aguas abajo del puente	Tramo 1	1.5	Bridge										
	Tramo 1	1	MAX	240.00	49.98	55.20	51.17	55.21	0.000029	0.46	1408.92	600.00	0.06

Figura 6.2. Resultados de la modelación HEC-RAS(centro de ingenieros de la armade de EEUU). (Fuente: elaboración propia)

Mediante la observación de la imagen satelital del 30 de abril del 2017, 5 días posteriores al evento máximo (ver plano n..., anexo) se determina que no se produce un embalse aguas arriba del puente, llegando a la misma conclusión que en la modelación, es decir, la sección del puente es suficiente.

6.3. Propuesta de terraplén de defensa

6.3.1. Traza y cota de terraplén de defensa

Se propone la traza de un terraplén de defensa con una cota coincidente con la de la RP5, teniendo en cuenta que para el mayor de los eventos, el pelo de agua no superó la misma. De esta manera, se busca lograr el resguardo de las viviendas asentadas en la ribera del arroyo. La traza propuesta es la que se muestra en la figura 6.3.

El mismo recorre una longitud aproximada de 2,9km, una elevación media de 1,92m, se propone un ancho de coronamiento de 6m con el objetivo de que el mismo se utilice como paseo peatonal, y un talud de 1:20.

Teniendo en cuenta estos datos, el volumen de suelo es aproximadamente de $39.859,2\text{m}^3$.

Por otro lado, se complementa esta solución teniendo en cuenta el desagüe pluvial urbano con reservorio y sistemas de bombeo de los mismos.



Figura 6.3. Traza de terraplén propuesta. (Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google earth)

Mediante el sistema de modelación de cursos HEC-RAS, se evalúa la situación con dicho terraplén de manera de evitar resultados contraproducentes con la construcción del mismo, ya que ante los mismos caudales, la sección de escurrimiento sería menor.

Por este motivo, se realiza la modelación para el evento máximo (abril 2017), y se comparan las situaciones con y sin proyecto (figuras 6.4 y 6.5), y se logran los resultados que se observan en la figura 6.6, donde se ve que los valores de velocidad y tirante en la sección del puente permanecen aproximadamente constantes antes y después de la construcción del terraplén. Por lo tanto, se llega a la conclusión que dicho terraplén no sería una obstrucción al flujo del arroyo.

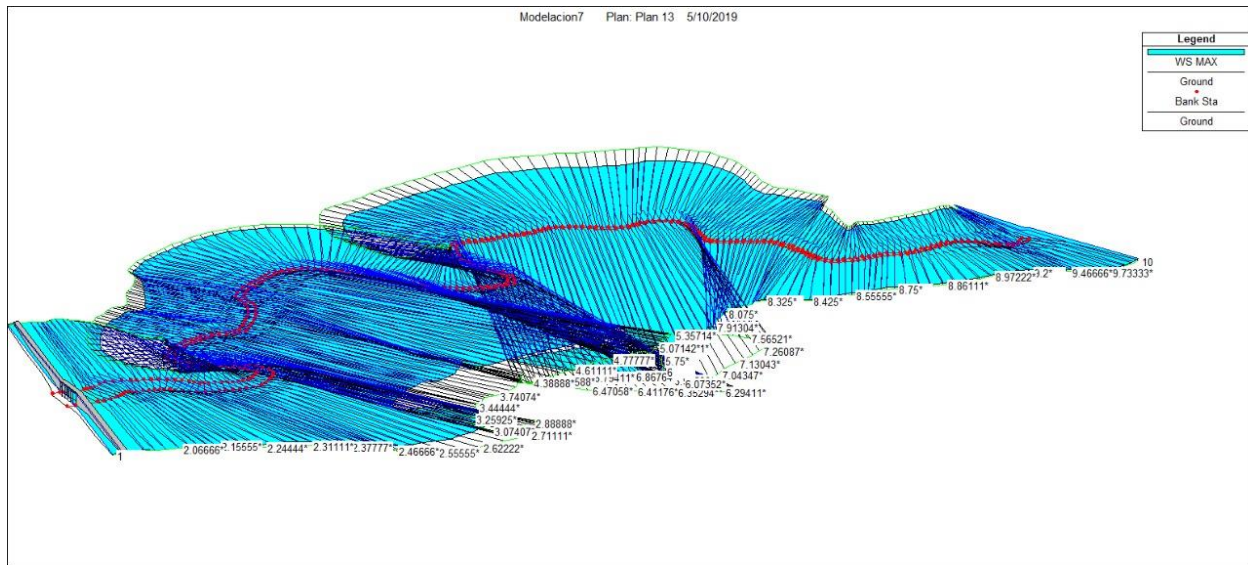


Figura 6.4. Situación ante el evento máximo sin proyecto. (Fuente: Elaboración propia)

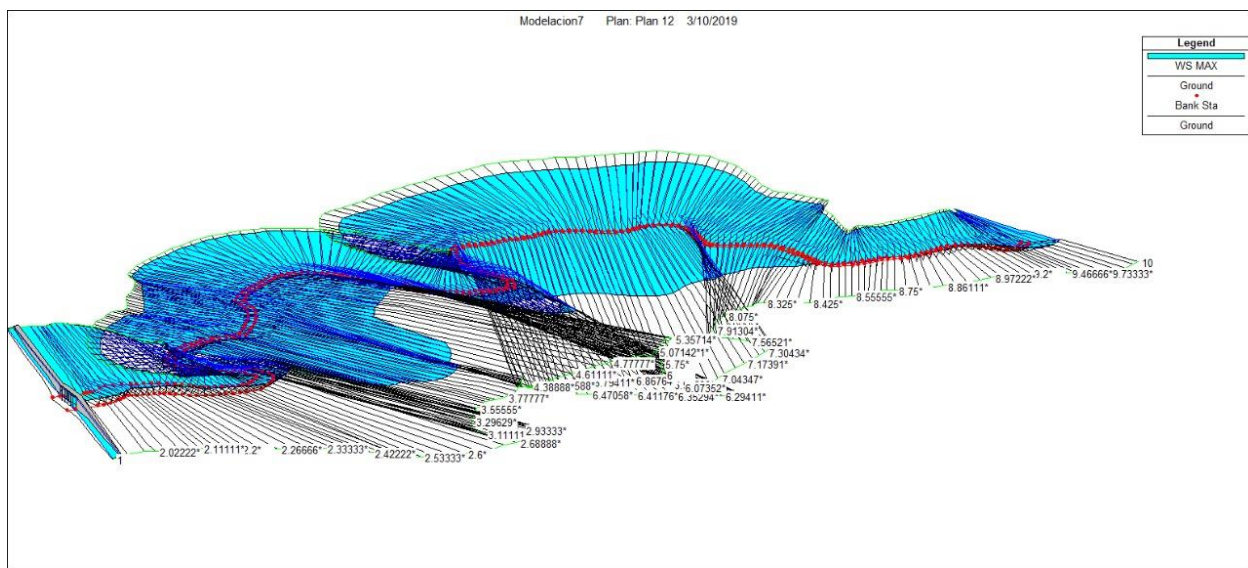


Figura 6.4. Situación ante el evento máximo con proyecto. (Fuente: Elaboración propia)

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl	
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)		
Tramo 1	10	MAX	240.00	50.70	55.83		55.89	0.000345	1.58	512.12	214.33	0.22	
Tramo 1	9	MAX	240.00	50.55	55.78		55.83	0.000340	1.59	455.85	142.49	0.22	
Tramo 1	8.5	MAX	240.00	50.55	55.72		55.77	0.000359	1.62	446.61	141.29	0.23	
Tramo 1	8	MAX	240.00	50.50	55.69		55.71	0.000176	1.14	846.27	362.72	0.16	
Tramo 1	7	MAX	240.00	50.30	55.66		55.67	0.000173	1.15	1077.02	588.63	0.16	
Tramo 1	6	MAX	240.00	50.15	55.45		55.49	0.000313	1.40	579.44	255.27	0.19	
Tramo 1	5	MAX	240.00	50.10	55.42		55.43	0.000113	0.92	987.04	387.25	0.13	
Tramo 1	4	MAX	240.00	50.00	55.39		55.40	0.000122	0.89	1120.72	555.28	0.12	
Tramo 1	3	MAX	240.00	49.99	55.23		55.31	0.000437	1.90	373.64	125.46	0.25	
Aguas arriba del puente →	Tramo 1	2	MAX	240.00	49.98	55.21	51.16	55.22	0.000044	0.57	897.84	344.11	0.08
	Tramo 1	1.5	Bridge										
Aguas abajo del puente →	Tramo 1	1	MAX	240.00	49.98	55.20	51.17	55.21	0.000029	0.46	1408.92	600.00	0.06

Figura 6.6. Resultados de la modelación HEC-RAS situación con terraplén (centro de ingenieros de la armade de EEUU). (Fuente: elaboración propia)

6.3.2. Desagüe pluvial

Solucionar la problemática de la inundación con una defensa implica integrarla con el sistema de desagüe pluvial de la ciudad.

Según lo expuesto en el trabajo “Anteproyecto plan integral de desagües pluviales en San Luis del Palmar” de Morresi et. al, el arroyo Pozo de la Patria y una zanja que bordea a la ruta N° 5 son los canales de salida de aguas de lluvia.

De esta manera, se proyecta una estación de bombeo pluvial en el caso en que el arroyo alcance cierto nivel, lo que imposibilita su descarga a gravedad mediante un sistema de compuertas.

El estudio hidrológico que se desarrolla en ese trabajo da como resultado el siguiente caudal a tener en cuenta, que acometería mediante un conducto de hormigón rectangular de 3 m de ancho por 1,7 m de alto y un tirante igual a 1,6 m:

- $Q = 8,79 \frac{m^3}{s}$; considera aportes rurales y urbanos que transporta el arroyo Pozo de la Patria.

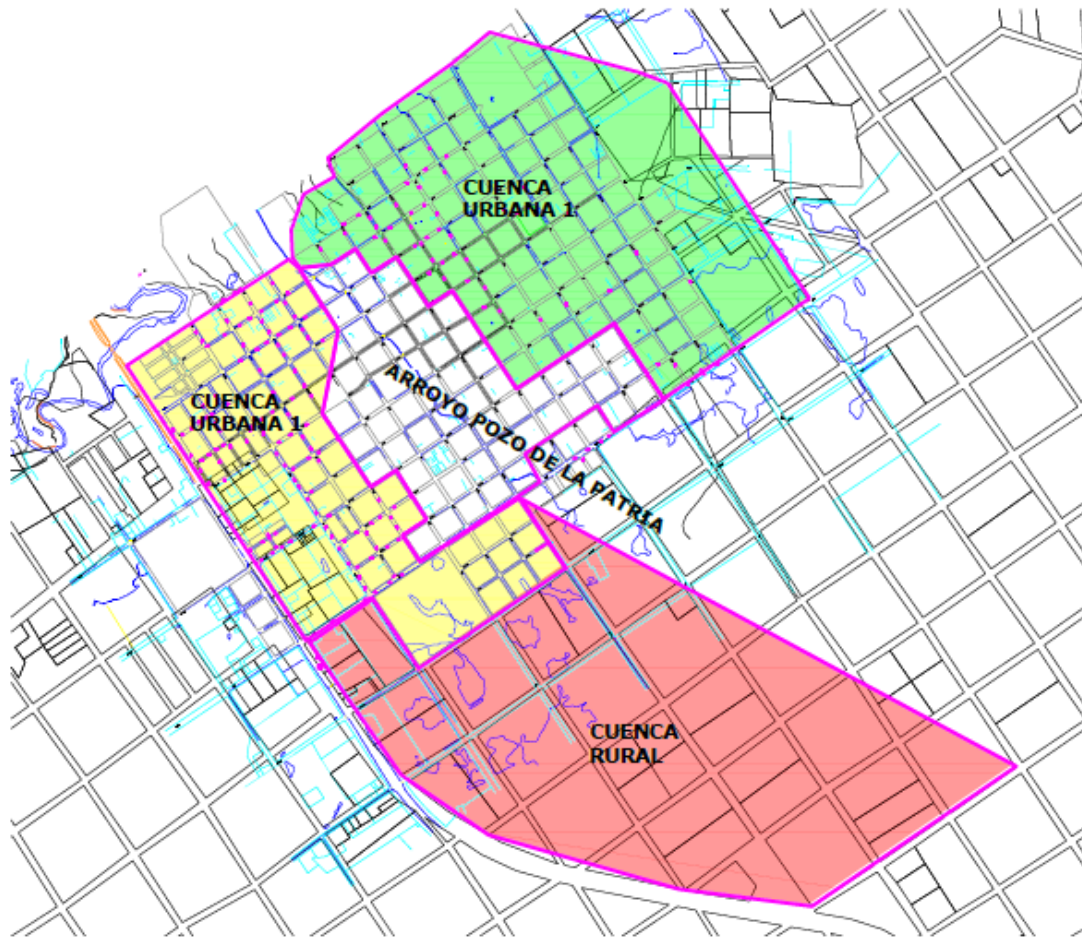


Figura 6.7. Cuencas cuyas descargas quedarán obstruidas con la construcción de la defensa. (Fuente: producción propia.)

Se estimaron caudales picos provenientes del resto del área que también quedarán obstruidos por la defensa (Ver figura 6.7) con el método racional:

$$Qp(m^3/s) = 0,275 \times A (km^2) \times Ip (mm/h) \times C$$

Donde A es el área de cada cuenca, Ip es la intensidad de precipitación calculada con la ayuda de las curvas IDF del Área Metropolitana del Gran Resistencia (consideradas válidas por encontrarnos en una zona homogénea pluviométricamente) y C el coeficiente de escorrentía. En la tabla 6.1 se pueden observar los valores para las cuencas que no fueron analizadas en el trabajo mencionado; corresponden a dos cuencas urbanas (U1 y U2) y una cuenca rural:

Tabla 6.1 Datos y caudal pico resultante para cuencas faltantes.

	Cuenca U 1	Cuenca U 2	Cuenca rural
Area (Ha)	197	125	255
Longitud (m)	2700	2531	3602
Pendiente (m/m)	0,0022	0,0024	0,00065
Td (min)	380	344	616
Ip (mm/h)	20	22	15
C	0,5	0,5	0,26
Qp (m3/s)	5,49	3,72	2,67

El tiempo de duración de la tormenta (Td) se la iguala al tiempo de concentración (Tc) de la cuenca, ya que la situación crítica se dará cuando toda la cuenca esté aportando. Básicamente se propone un primer valor de intensidad para empezar la iteración y se calcula un Tc a partir de la ecuación de la onda cinemática, el que luego se introduce en la ecuación de la curva IDF. El proceso se repite hasta obtener iguales intensidades.

La ecuación de la onda cinemática es:

$$T_c = \frac{0,94 \times L^{0,6} \times n^{0,6}}{i^{0,4} \times S^{0,3}}$$

Donde L (pies) es la longitud del flujo superficial, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, i (pulg/h) es la intensidad de lluvia y S es la pendiente promedio del terreno.

El coeficiente de Manning para el área rural es de 0,0075, siguiendo el mismo criterio de cálculo para área rural del trabajo de desagües pluviales para la ciudad. En el caso de las cuencas urbanas se adoptó n = 0,02 que corresponde a canales de tierra.

La ecuación que define la curva intensidad – duración – frecuencia del AMGR:

$$i = \frac{A}{(B + td)^C}$$

Donde A = 1201,5; B = 11,1; C = 0,6846 son los parámetros de ajuste de la función para un tiempo de recurrencia de 5 años. Con esta recurrencia se calcularon los alcantarillados urbanos.

Se sumaron los hidrogramas a la salida de cada cuenca para:

- Arroyo pozo de la patria: Incluye excedentes pluviales de una cuenca rural y una urbana
- Cuenca urbana 1
- Cuenca urbana 2
- Cuenca rural

El hidrograma final es el que se observa en la figura 6.7. Cabe destacar que no se realizó la propagación de los mimos desde la salida de sus respectivas subcuencas hasta el reservorio.

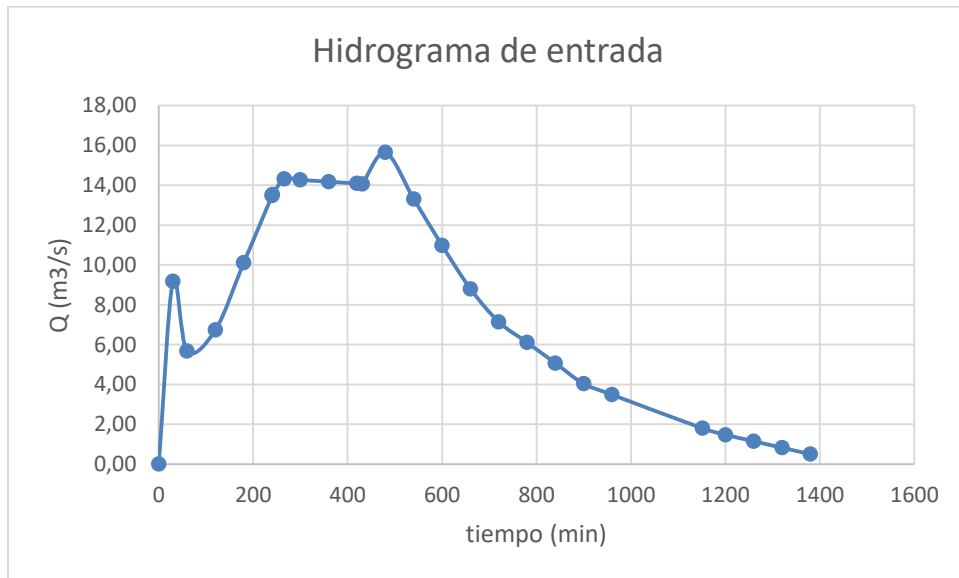


Figura 6.7. Hidrograma de entrada al reservorio

Con el objetivo de determinar a grandes rasgos la dimensión de los equipos de bombeo necesarios para evacuar ese caudal total, se proyecta una única estación elevadora con su reservorio. El resultado fue el siguiente:

6.3.3. Reservorio

Los caudales detallados más arriba ingresarán por los lados del reservorio, evitando generar torbellinos que alteren el funcionamiento de las bombas. La localización del reservorio se planteó sobre un terreno sin viviendas de 185 m por 250 m.

El volumen del reservorio definirá la cantidad de bombas, pues es el encargado de almacenar el caudal en cierta cantidad de tiempo en la que se supone que se mantendrá el pico. En la tabla N°6.2 se ven las dimensiones resultantes.

Tabla 6.2. Dimensiones del reservorio.

Reservorio	
Largo (m)	170,0
Ancho (m)	170,0
Alto (m)	2,5

Volumen (m ³)	72250,0
---------------------------	---------

El sumidero de admisión se lo planteó con un desnivel de 1,5 metros respecto al fondo del reservorio:

Tabla 6.3 Dimensiones del sumidero.

Sumidero	
Largo (m)	150,0
Ancho (m)	10,0
Alto (m)	4,0
Volumen (m ³)	6000,0

En el siguiente gráfico se observa la relación entre volumen acumulado y tiempo, es decir la integral del hidrograma de entrada a lo largo del tiempo:

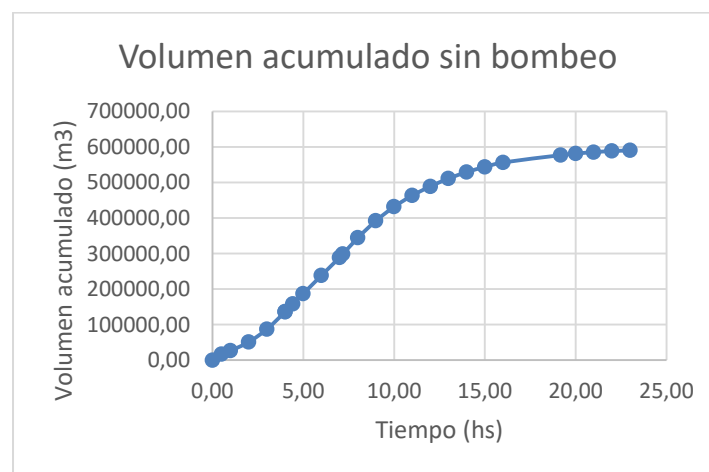


Figura 6.8. Volumen acumulado del hidrograma de entrada.

6.3.4. Bombas sumergibles

Se usó un selector virtual de la marca Flygt (Xylect) y se optó el dimensionamiento por aplicación. El tipo de fluido seleccionado fue el agua residual y la estación de bombeo para agua de lluvia.

Dentro de los tipos de bombas, se eligieron las bombas sumergibles para instalación sumergida o seca.

Datos de entrada:

- Caudal total a bombear: $Q = 8,5 \frac{m^3}{s}$
- Altura de impulsión: $H = 7 m$. Considera el desnivel topográfico (desde el pelo de agua mínimo (50,33 m) hasta la altura de coronamiento de la defensa (56,22 m) y las pérdidas de carga localizadas y continuas que se darán en el sistema (Se tomó un 10% de la longitud de la cañería de impulsión = 0,70 m).
La cota del nivel mínimo de agua es la de la solera del reservorio, es decir cuando este se vacía y queda solo agua dentro del sumidero. Ver tabla 6.4.

Resultados:

Se dispondrán seis bombas iguales trabajando en paralelo. Se deberán tener en cuenta tres bombas de reserva. En la tabla 6.5 se resume la variación de los volúmenes y alturas medidas desde la solera del sumidero. Se aprecia que en el valor pico

El código de la bomba seleccionada es CP 3800/905 3-1240. (Ver ficha técnica en el Anexo, capítulo 6).

Tabla 6.4 Cotas referenciadas al sistema IGN.

Niveles IGN	
Acometida a EE (m)	52,83
Solera reservorio (m)	50,33
Solera sumidero (m)	48,83
Fondo del cauce (m)	49,98

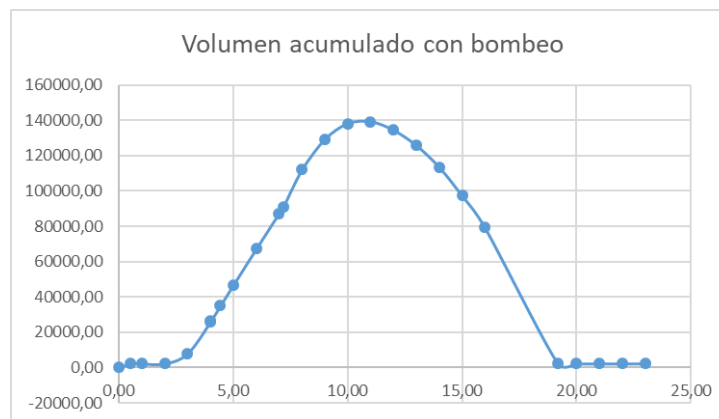


Figura 6.9. Volumen acumulado en el reservorio con bombeo.

Cabe destacar que, en el pico, para un caudal constante de bombeo de $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$, se ve superada por 2 cm el nivel del reservorio/ sumidero. Esto se consideró aceptable debido a la falta de precisión en la determinación de los hidrogramas.

Tabla 6.5 Tabla resumen de la situación con cinco bombas funcionando en paralelo.

Q entrada (m^3/s)	Q entrada (l/s)	t (hs)	Vol (m^3)	Vol Acum (m^3)	Vol Acum c/ bomb (m^3)	Nivel de agua sin bombeo (m)	Nivel de agua con bombeo (m)	Nivel topograf. Del agua con bombeo (m)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,19	9185,06	0,50	16533,10	16533,10	2250	1,76	1,50	50,33
5,67	5670,11	1,00	10206,20	26739,30	2250	1,95	1,50	50,33
6,74	6740,22	2,00	24264,80	51004,10	2250	2,40	1,50	50,33
10,11	10110,33	3,00	36397,20	87401,29	8047	3,07	1,61	50,43
13,48	13480,44	4,00	48529,60	135930,89	25977	3,96	1,94	50,76
13,53	13525,38	4,01	649,22	136580,11	26218	3,97	1,94	50,77
14,32	14318,41	4,43	21649,43	158229,54	35015	4,37	2,10	50,93
14,27	14266,44	5,00	29103,54	187333,08	46779	4,90	2,32	51,15
14,17	14174,73	6,00	51029,04	238362,12	67208	5,84	2,69	51,52
14,08	14083,03	7,00	50698,90	289061,03	87307	6,77	3,06	51,89
14,07	14065,91	7,19	9452,29	298513,32	91047	6,95	3,13	51,96
15,64	15641,54	8,00	45798,44	344311,76	111958	7,79	3,52	52,34
13,31	13308,23	9,00	47909,63	392221,39	129267	8,67	3,83	52,66
10,97	10974,92	10,00	39509,70	431731,09	138177	9,39	4,00	52,83
8,80	8799,45	11,00	31678,04	463409,13	139255	9,98	4,02	52,85
7,14	7142,05	12,00	25711,36	489120,49	134366	10,45	3,93	52,76
6,11	6105,29	13,00	21979,05	511099,54	125745	10,85	3,77	52,60
5,07	5068,54	14,00	18246,74	529346,28	113392	11,19	3,54	52,37
4,03	4031,78	15,00	14514,42	543860,70	97307	11,46	3,25	52,08
3,48	3484,32	16,00	12543,54	556404,24	79250	11,69	2,92	51,74
1,80	1800,00	19,19	20660,83	577065,07	2346	12,07	1,50	50,33
1,48	1475,00	20,00	4309,60	581374,67	2250	12,15	1,50	50,33
1,15	1150,00	21,00	4140,00	585514,67	2250	12,22	1,50	50,33
0,83	825,00	22,00	2970,00	588484,67	2250	12,28	1,50	50,33
0,50	500,00	23,00	1800,00	590284,67	2250	12,31	1,50	50,33

6.3.5. Compuertas

Cuando el nivel del arroyo alcance la solera de la compuerta principal, se deberá cerrarla para evitar el ingreso del agua. En este caso, y ante la ocurrencia de lluvias, se abrirán compuertas secundarias que hacen caer los desagües pluviales que fluyen por los tres canales al reservorio (Ver figura 6.8). Luego, se pondrán en funcionamiento las bombas necesarias según el caudal afluente en cada caso. La compuerta deberá estar dimensionada para resistir los empujes hidrostáticos en esta situación.

En caso de niveles bajos del arroyo, la compuerta estará abierta permitiendo el paso de las descargas pluviales. Las compuertas secundarias se mantendrán cerradas.

Se proyectan compuertas planas deslizantes. En el caso de la compuerta principal, se busca encontrar el largo necesario para evacuar el caudal pico, se analiza la situación de descarga libre definida por la siguiente ecuación:

$$Q = C * A * V$$

- $Q_{pico} = 15,64 \text{ m}^3/s$
- C: Coeficiente de descarga = 0,60
- A: Área de la compuerta = largo * alto. El alto será igual al del canal colector, se lo supone igual a 1,7 m. El largo es la incógnita.
- V: Velocidad del flujo bajo la compuerta = $\sqrt{2 * g * (H_o - H_1)}$
- H_o : nivel de agua de los canales = 54,80 m. Se tomo como referencia el pelo de agua en el desagüe pluvial entubado proyectado para el arroyo Pozo de la Patria (1,6 m). (Morresi, et al.)
- H_1 : nivel de agua del arroyo = 53,18 m. Se tomo como nivel de agua el correspondiente con la línea de ribera, con un tiempo de recurrencia de 2 años.

Despejando de la ecuación, se obtiene el largo: 2,7 m. Se adopta un largo igual a 3 m.

Si se observa la tabla 6.4, la acometida del pluvial Pozo de la Patria tiene una cota inferior a la de salida por la compuerta (37 cm), por lo que funcionará por vertido.

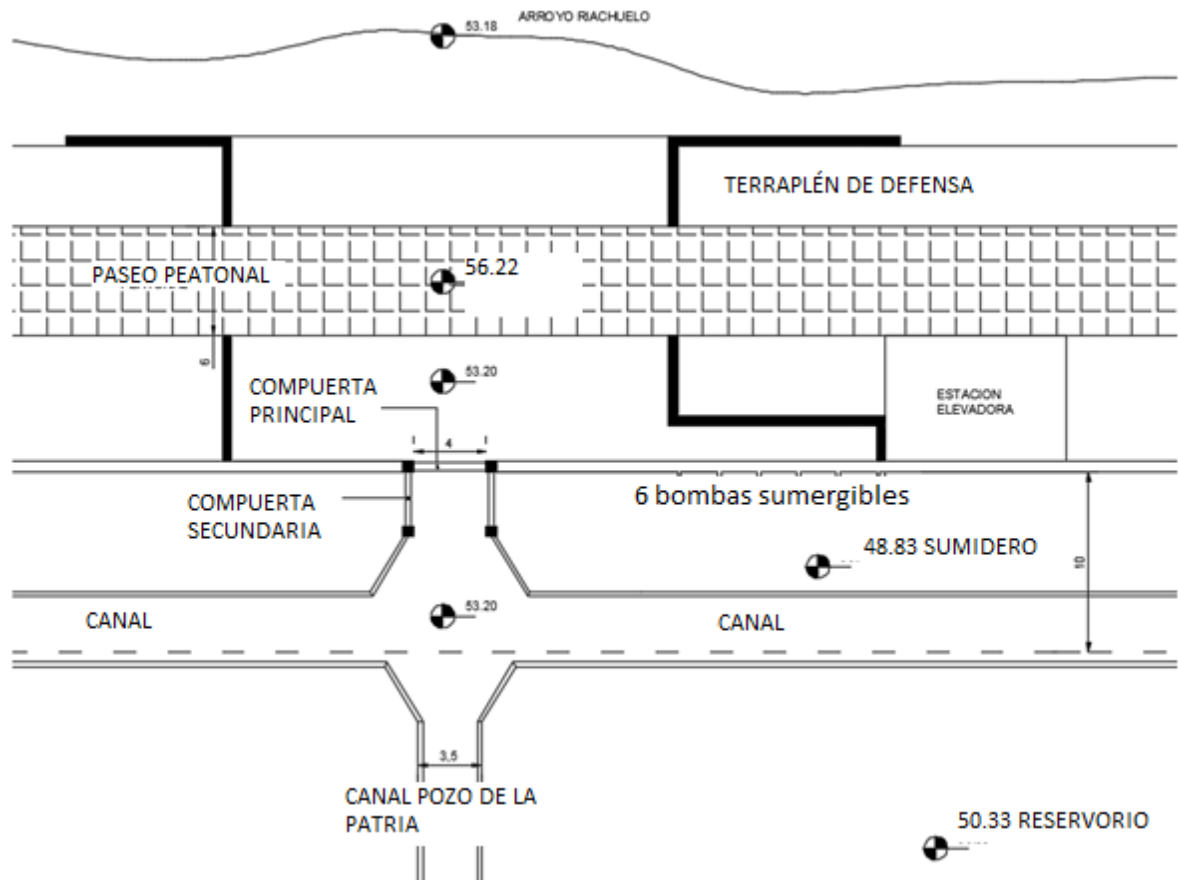


Figura 6.8. Esquema de estación de bombeo pluvial. (Fuente: Elaboración propia)

6.3.6. Sala de tableros, grupos electrógenos y medios de izaje

Para el sustento de las cinco bombas en el caso de un corte de energía eléctrica se deberá tener previsto los grupos electrógenos con la capacidad requerida. Esto junto con los tableros se dispondrán en un local diseñado para tal fin.

Como se propusieron bombas sumergidas, una grúa deslizante será clave para el izaje cuando se las tenga que reparar o limpiar e intercambiarla con una bomba de reserva.

6.4. Relocalización y plan de contingencia

6.4.1. Relocalización

Una alternativa a la construcción de una defensa, es la propuesta de relocalización de viviendas afectadas ante determinadas recurrencias, acompañado de un plan de contingencia para viviendas que se vean afectadas con recurrencias mayores.

Se citan los siguientes conceptos contemplados en el Código Civil y Comercial de la Nación (2015):

Artículo 235 “Bienes pertenecientes al dominio público” inciso c: “(...)los ríos, estuarios, arroyos y demás aguas que corren por cauces naturales, los lagos y lagunas navegables, los glaciares y el ambiente periglacial y toda otra agua que tenga o adquiera la aptitud de satisfacer usos de interés general, comprendiéndose las aguas subterráneas, sin perjuicio del ejercicio regular del derecho del propietario del fundo de extraer las aguas subterráneas en la medida de su interés y con sujeción a las disposiciones locales. Se entiende por río el agua, las playas y el lecho por donde corre, delimitado por la línea de ribera que fija el promedio de las máximas crecidas ordinarias. Por lago o laguna se entiende el agua, sus playas y su lecho, respectivamente, delimitado de la misma manera que los ríos”.

Artículo 1974: “(...)Camino de sirga. El dueño de un inmueble colindante con cualquiera de las orillas de los cauces o sus riberas, aptos para el transporte por agua, debe dejar libre una franja de terreno de quince metros de ancho en toda la extensión del curso, en la que no puede hacer ningún acto que menoscabe aquella actividad”.

En base a estos conceptos y a la zonificación realizada, se observa que prolongando 15 metros a lo largo de la línea de ribera (camino de sirga), este trazo se asemeja al límite establecido por el promedio de crecidas máximas con tiempo de recurrencia menor a 5 años. Por este motivo, se plantea la relocalización de las viviendas ubicadas dentro de este límite.

A su vez, para crecientes que se dan con recurrencias mayores, se propone que se tenga en cuenta el plan de contingencias que se detalla a continuación

6.4.2. Proyección del ejido urbano

Según el análisis de imágenes satelitales (figura 6.9) se ve que el mejor lugar tanto para la relocalización de viviendas como para el crecimiento urbano siguiendo el cordón arenoso es hacia el noreste o hacia el sureste. Ya que siguiendo el análisis de las imágenes satelitales en los eventos máximos, se observa que no es área inundable.



Figura 6.9. Evento extremo, ubicación de puntos altos (Fuente: Elaboración propia en base a imágenes satelitales)

Dentro del área determinada por estos límites, se propone la creación de parques, evitando el asentamiento en dicho lugar.

Para recurrencias mayores, se tiene en cuenta el plan de contingencia detallado a continuación.

6.5. Plan de contingencia

Una alternativa a las soluciones mencionadas anteriormente, es la propuesta de un plan contingencia para el caso actual de la población, sin ninguna de las medidas estructurales propuestas anteriormente, teniendo en cuenta el mapa de zonificación de riesgo hídrico. El mismo sería utilizado ante posibles eventos de inundación.

“(…)El plan de contingencia establece las medidas a tomar, los roles a cubrir, los recursos que se necesitan y las indicaciones para la población a fin de disminuir los daños posibles. De esta manera, la comunidad entera se prepara para enfrentar una posible situación de emergencia.” Gobierno de la ciudad de Santa Fe, plan de contingencia 2019.

6.5.1. Plan de contingencia existente en San Luis del Palmar

El jefe de defensoría del municipio en cuestión, facilitó la información de la existencia de un plan de contingencia que consiste en dos alertas principales. La primera es la denominada “naranja”, que entra en vigencia cuando la altura que registra el hidrómetro

ubicado en el puente de la ruta provincial N° 5 alcanza los 3,5m. Esta altura corresponde a un caudal de $35 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual, según los análisis realizados se da en correspondencia a eventos con recurrencia menores de 2 años.

Los barrios afectados por dicha alerta son: Virgen del Rosario, Cruz de los Milagros, Inmaculada Concepción, en los cuales se evacúan aproximadamente 12 familias. (Figura 6.8)

La segunda alerta es la denominada “roja”, que entra en vigencia cuando la altura que registra el hidrómetro mencionado alcanza los 4m de altura del arroyo. Esta altura corresponde a un caudal de $55 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual, según los análisis realizados se da en correspondencia a eventos con recurrencia de hasta 5 años.

En este caso, además de los barrios afectados anteriormente, es afectado también el barrio San Cayetano. Ver figura 6.10.

Es importante destacar que en el caso de realizar la relocalización antedicha, las alertas variarán en cuanto a las alturas en las que entran en vigencia siendo mayores a estas, ya que para las alturas mencionadas la población no sufriría anegamientos.

Los caudales para los cuales se tendría en cuenta el plan de contingencia en ese caso superan los $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

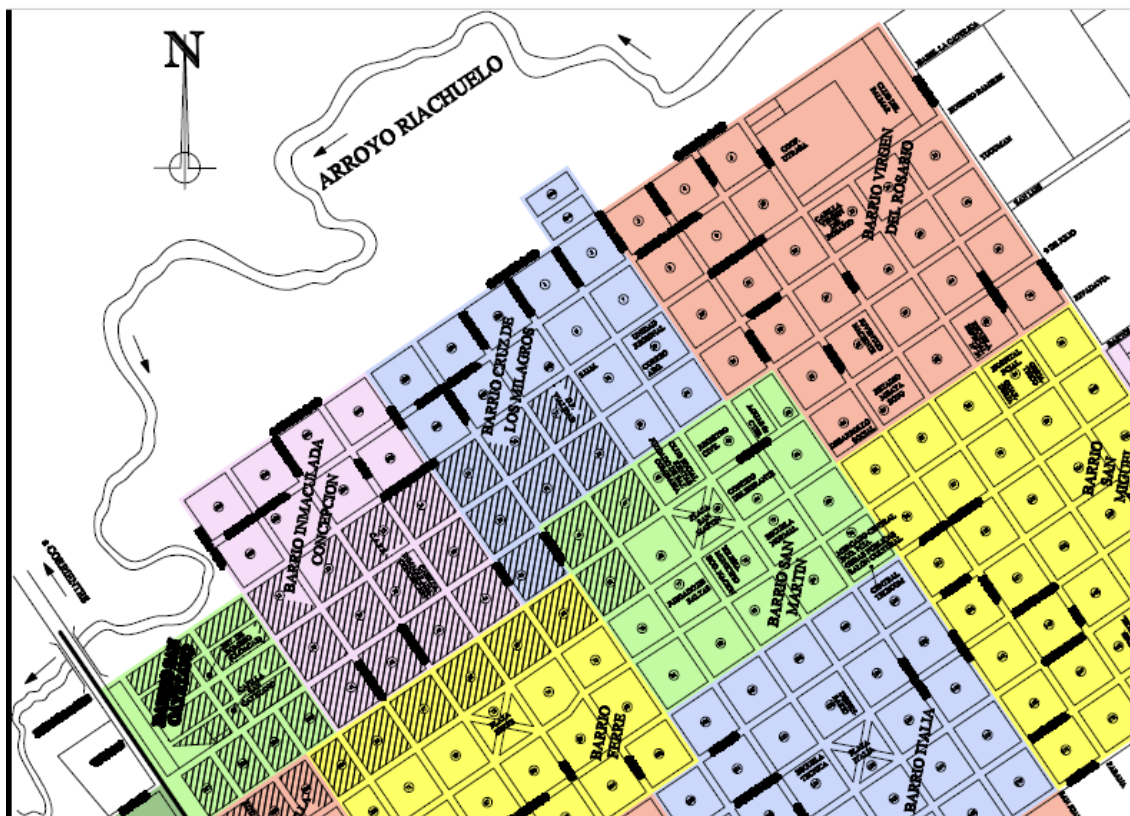


Figura 6.10. Ubicación y límites de los barrios afectados por las inundaciones. (Fuente: “Validación de modelos digitales de elevación para la generación de cartografía de riesgo de inundación en la localidad de San Luis del Palmar, provincia de Corrientes” de Paruzzo y otros, 2018.)

Actualmente, la manera de alertar a los vecinos es utilizando la sirena del camión de bomberos, ubicándola en el puente ya antes mencionado.

Los lugares disponibles por la municipalidad para albergar a los evacuados, son los siguientes:

- 1er Centro de Evacuados: Salón de usos múltiples (SUM), ubicado en la intersección de calles 25 de mayo y Eugenio F. Ramírez, barrio Cruz de los Milagros. Capacidad: 12 familias aproximadamente.
- 2do Centro de Evacuados: Polideportivo Municipal, ubicado en la intersección de calles Rivadavia y Paraná, Barrio virgen del Rosario. Capacidad: 30 familias aproximadamente.
- 3er Centro de Evacuados: Centro Cultural, ubicado en la intersección de calles Juan J. Arce y Aviador Arguello, Barrio San Martín. Capacidad: 12 familias aproximadamente. Ver figura 6.11

Vale aclarar que la cantidad que la capacidad de albergar de cada lugar mencionado, es variable en función de elementos personales que lleve consigo cada albergado.



Figura 6.11. Ubicación de los refugios utilizados para emergencia de inundaciones (fuente: elaboración propia en base a imágenes de Google Earth).

Otro aspecto importante a resaltar, es que una vez que el arroyo Riachuelo alcanza la altura correspondiente al estado de alerta Roja, todas las familias que se encuentran en

el barrio construido por INVICO (San Cayetano) deben desalojarse, creando un gran problema para la municipalidad, ya que son aproximadamente 40 familias, por lo que se deben de disponer, además de los centros de refugio mencionados, escuelas para albergarlos.

6.5.2. Propuesta

Con el objetivo de complementar el plan ya existente, se proponen otros factores para lograr una mejor organización y efectividad del mismo.

Para lo que se tiene como base el plan de contingencia de Santa Fe, el cual propone que ante una lluvia se conforme un centro de operaciones, el cual incluye tres áreas:

- Mesa de Decisiones, donde las autoridades monitorean el evento, evalúan las necesidades y disponen las acciones de respuesta.
- Área Operativa, que evalúa e informa sobre la situación en el terreno y brinda las respuestas necesarias.
- Área de Comunicaciones, que brinda información a la población y al personal, además de ocuparse de la recepción y derivación de reclamos para su rápida atención.

Se propone adoptar las mismas medidas para San Luis del Palmar, teniendo en cuenta la importancia de la capacitación de para funcionarios y personal municipal sobre los protocolos de actuación, por lo que se propone el dictado de talleres con tal fin.

Es importante también, que la municipalidad en cuestión lleve un control diario de lluvias y sus pronósticos futuros, así como también de las magnitudes de lluvias acontecidas aguas arriba. Ya que se conoce cuál es la humedad antecedente a una precipitación, que hace que ésta produzca inundaciones. Con esto se logra alertar a la población ribereña que con próximos eventos deberían ser evacuados.

Por otro lado, se requiere el conocimiento de recursos materiales y económicos requeridos en caso de evacuaciones, para los cuales se debe disponer de los mismos o mantenerse en contacto con proveedores para su disponibilidad.

Ante los casos de evacuaciones, se conforma un centro de distribución, responsable del suministro y la distribución de los bienes, para lo cual se cuenta con el apoyo de organizaciones de ayuda humanitaria.

Por otro lado, resulta necesario contar con una organización comunitaria, acordando e informando indicaciones de evacuación. Esto, se puede lograr mediante la elaboración de material informativo, como el reparto de folletos indicativos y visitas a los vecinos de zonas vulnerables para recordar los pasos a seguir y las recomendaciones ante una

emergencia donde se deben señalar vías de escape y los puntos de encuentro y refugio.

Todos los refugios deben tener designados responsables de la municipalidad, quienes serían capacitados para una adecuada atención, incluyendo la distribución de funciones, la organización de sectores y actividades y la coordinación de los voluntarios que colaboren en el lugar.

De manera complementaria, se propone emitir información mediante la aplicación telefónica “Whatsapp”, integrada por los vecinos en estado de vulnerabilidad y administrado por los responsables de cada refugio, logrando que los mismos puedan recibir información ante estados de alerta, recomendaciones de caminos, recomendaciones de objetos personales a llevar, recordar las precauciones y pasos a seguir para llegar sanos y salvos a los refugios mencionados. (Figura 6.12)

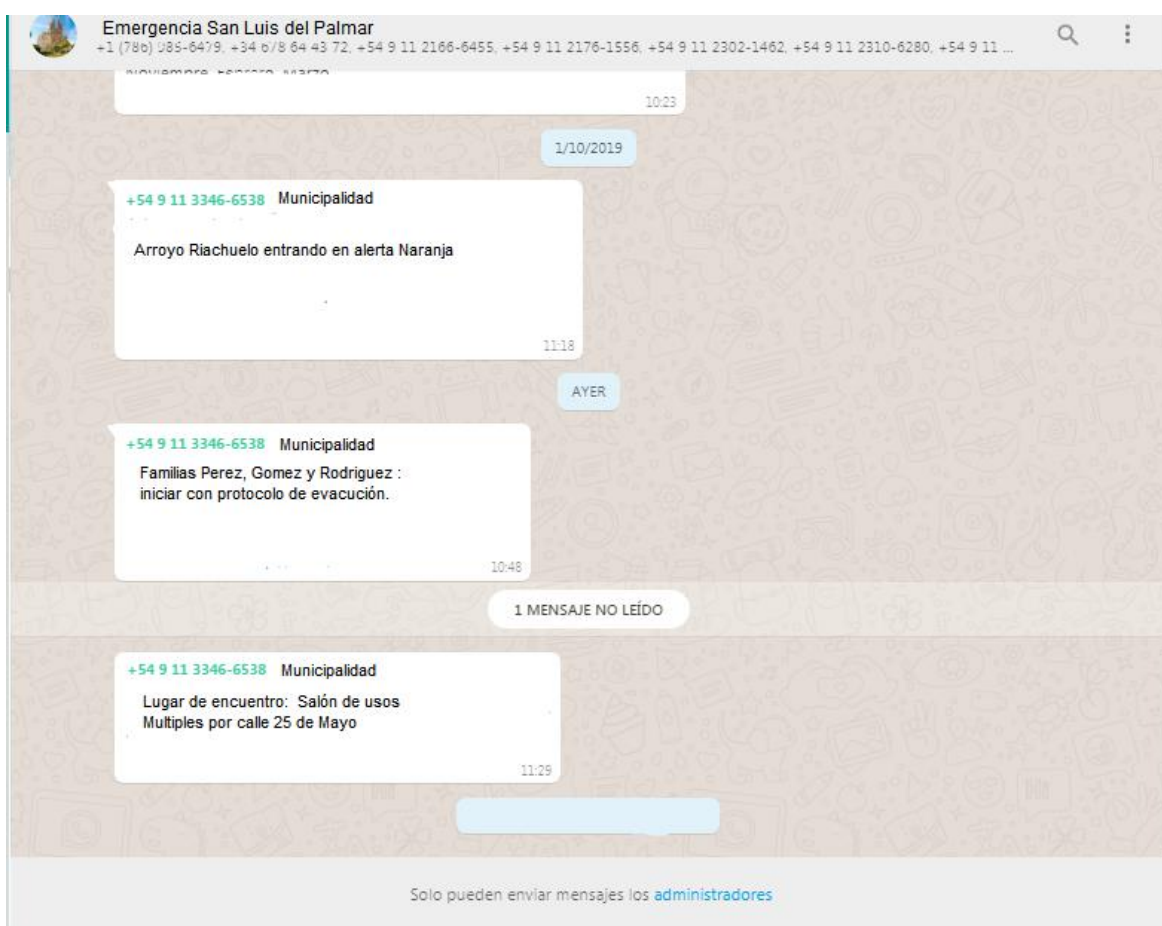


Figura 6.12. Grupo armado en aplicación Whatsapp (fuente: elaboración propia)

Otra cuestión a tener en cuenta, es cuando la alerta roja entra en vigencia, caso en el que se deben desalojar aproximadamente 40 familias, creando una situación de desorden en el municipio ya que se deben de disponer varias escuelas.

Dicho esto, se propone la firma de convenios con instituciones específicas, evitando que las mismas sean escuelas, para el refugio de estas personas a la hora de una emergencia. Pueden ser por ejemplo empresas locales, donde las mismas tengan previamente todos los recursos necesarios para albergar a las personas.

Por otro lado, los vecinos que se encuentran en alerta deberán seguir una serie de pasos a la hora de la emergencia, los mismo deberán ser informados por el municipio mediante charlas educativas y folletos.

Las recomendaciones que se proponen realizar a la hora de evacuar son las siguientes:

- Establecer previamente los puntos altos de la vivienda para resguardar objetos que pueden dañarse con las inundaciones;
- Desconectar aparatos eléctricos e ubicarlos en puntos altos del lugar;
- Ubicar la mayor cantidad de muebles y objetos personales;
- Seleccionar aquellos objetos personales especiales para llevar a los refugios como ropa seca para cada integrante de la familia, los medicamentos de uso diarios utilizados, y la documentación personal de cada uno y de la casa.

Luego de que cese el evento y los habitantes puedan volver a sus viviendas es importante que la municipalidad disponga de elementos de limpieza y desinfectantes para la reocupación de las casas, ya que las mismas no se encontraran en condiciones para ser habitadas.

Capítulo 7

Ítems económicos de las alternativas propuestas

7.1. Introducción

En el presente capítulo se lleva a cabo la determinación de ítems a tener en cuenta para el análisis económico de cada alternativa de las soluciones propuestas, que se realizan con el objetivo de determinar el proyecto que sería más conveniente a ejecutar.

En primer lugar se deben evaluar las fuentes de beneficios y costos sociales, mediante las cuales se desarrolla el flujo de fondos con el objetivo de obtener los indicadores de rentabilidad económicos.

Básicamente, se consideran beneficios al valor de aquellas propiedades y terrenos cuyas pérdidas se ven evitadas en la situación con cada proyecto propuesto. Los costos abarcan aquellos asociados al desarrollo de las obras y su posterior mantenimiento.

Cabe destacar que el siguiente análisis se realiza con el objetivo de demostrar la factibilidad económica de cada proyecto facilitando la toma de decisión de conveniencia de la ejecución de uno de ellos, y no con el de establecer el costo detallado de la obra. Es por ello que su carácter es preliminar, ya que serán incluidas simplificaciones.

7.2. Alternativa 1

La primera alternativa consiste en la construcción de un terraplén de defensa logrando el resguardo de la mayor cantidad de los asentamientos ribereños posible, complementando el mismo con desagües pluviales, reservorios y sistemas de bombeo.

Por lo tanto, las cuestiones a evaluar en un análisis económico del mismo son:

1. Beneficios económicos

Como se mencionó anteriormente, los mismos son evaluados a partir de las pérdidas materiales evitadas por la presencia de la defensa en un periodo de tiempo determinado.

1.2. Beneficios sociales por terreno protegido

Se debe analizar el terreno que se logra proteger, en base a la duración de la obra, longitud de costa protegida y un valor por m² de terreno el que aumentará luego de la ejecución del proyecto.

1.2. Beneficios sociales por propiedades protegidas

Se analizan las propiedades que se logran proteger en la situación con proyecto, teniendo en cuenta la cantidad de propiedades que se ven afectadas en la situación sin proyecto y estarán a salvo luego de la ejecución del mismo.

1.3. Beneficios sociales por valor residual de activos

Luego de haber finalizado el horizonte de evaluación del proyecto, es muy probable que el terraplén aún siga en pie, es decir que seguirá teniendo un valor económico. Es a éste al que se denomina valor social residual de activos, ya que seguirá representando un beneficio para la sociedad.

2. Costos sociales

Los mismos abarcan todos aquellos costos económicos asociados a la materialización de la obra, como ser: movimiento de suelos, construcción y protección del mismo, recubrimiento, construcción y terminación de la senda peatonal y gastos adicionales. Previo al análisis de cada uno de ellos, se debe determinar el valor social de la mano de obra no calificada, el cual es factor clave para la determinación del costo social.

2.1. Costos sociales de movimiento de suelo y ejecución de terraplén

2.2. Costo social de construcción de senda peatonal y baranda

2.3. Costo social de ejecución de reservorio

2.4. Costo social de colocación de sistema de bombeo

2.5. Costo social por gastos adicionales

2.6. Costo social de mantenimiento

3. Indicadores de rentabilidad social

Una vez determinados los beneficios y costos, es posible llevar a cabo un flujo de fondo de recursos. Para ello se ponen de manifiesto los mismos en una tabla, de forma tal de poder hallar un valor total para cada año de evaluación y así poder finalmente determinar los indicadores de rentabilidad social, que comprenden a:

-TIR= tasa interna de retorno social.

-VAN= valor actual neto social

Para llegar a la conclusión de que sea conveniente desarrollar el proyecto desde el punto de vista social, el valor social neto debe ser mayor que cero y la tasa social interna de retorno debe ser mayor al costo de oportunidad.

7.3. Alternativa 2

En este caso, se propone la relocalización de viviendas ubicadas dentro de la zona delimitada por crecientes con recurrencias de hasta 5 años, proponiendo planes de contingencia para eventos que se dan con recurrencias mayores.

Por lo tanto, las cuestiones a evaluar en un análisis económico del mismo son:

1. Beneficios económicos

- 1.1. Beneficios sociales por daños evitados
- 1.2. Beneficios sociales por asistencia sanitaria evitada
- 1.3. Beneficios sociales por resguardo temporal evitada

2. Costos sociales

- 2.1. Costo social terreno de relocalización
- 2.2. Costo social de construcción de viviendas relocalizadas
- 2.3. Costo social de infraestructura de viviendas a relocalizar

3. Indicadores de rentabilidad social

Una vez determinados los beneficios y costos, es posible llevar a cabo un flujo de fondo de recursos. Para ello se ponen de manifiesto los mismos en una tabla, de forma tal de poder hallar un valor total para cada año de evaluación y así poder finalmente determinar los indicadores de rentabilidad social, que comprenden a:

-TIR= tasa interna de retorno social.

-VAN= valor actual neto social

Para llegar a la conclusión de que sea conveniente desarrollar el proyecto desde el punto de vista social, el valor social neto debe ser mayor que cero y la tasa social interna de retorno debe ser mayor al costo de oportunidad.

Conclusiones y recomendaciones

Se analizan las situaciones en la tabla 7.1.

Tabla 7.1 Comparación de alternativas

	Alternativa 1	Alternativa 2
Relocalización (viviendas)	45	101
Protegidos por defensa	225	0
Plan de contingencia	0	169

Si bien la elección de una alternativa es un trabajo multidisciplinario, desde el punto de vista técnico adoptamos la segunda alternativa.

Para tomar esta decisión, se tiene en cuenta que para la primer alternativa, si bien el número de viviendas salvadas es mayor, existen varios aspectos que complejizan el sistema defensa-desagüe pluvial, y requieren mantenimiento periódico para su funcionamiento óptimo. En el caso en el que dicho mantenimiento no se realice con las precauciones necesarias, la población se expone a un riesgo aún mayor que sin la ejecución de la defensa.

Se recomienda para la alternativa adoptada:

- Dar a conocer la zonificación de riesgo hídrico y plan de contingencia como;
- Ejecutar desagües pluviales urbanos;
- El crecimiento del ejido urbano se dé siguiendo la geomorfología del cordón arenoso de San Luis del Palmar, adaptándolo a las condiciones naturales;
- Adopción y garantía de cumplimiento del plan por parte del municipio.

ANEXO GRAFICOS, FICHAS Y PLANOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Gráficos

Curvas H-Q del arroyo Riachuelo

ANEXO 2: Ficha

Ficha técnica de bomba sumergible

Resumen ejecutivo

Introducción

El presente trabajo consiste en un estudio hidrológico, determinando la zonificación de riesgo hídrico de la ciudad de San Luis del Palmar, capital del departamento homónimo, Corrientes.

San Luis del Palmar es una ciudad en expansión, en la cual parte de este crecimiento habitacional está siendo desarrollado dentro del valle de inundación del arroyo Riachuelo, por lo que se ve anegada de manera periódica por las crecidas de dicho curso.

Un estudio hidrológico permite estudiar el comportamiento de la cuenca ante lluvias y crecientes, tratando de relacionar las distintas cuencas y sub-cuencas que integran la zona de estudio, logrando proporcionar una zonificación de riesgo hídrico.

Mediante dicho estudio, se determina el escurrimiento natural del arroyo mencionado, a fin de proponer distintas soluciones al problema de las inundaciones y su compatibilidad con la expansión urbana; por tanto, representa una herramienta fundamental para el análisis y elaboración de proyectos de obras hidráulicas y planeamiento urbano, constituyendo un documento de valor político importante.

Geomorfología y fitogeografía: Cuenca Riachuelo

Para llegar a dicha zonificación, es imprescindible el conocimiento geomorfológico y fitogeográfico en el cual se encuentra ubicado.

La ciudad de San Luis del Palmar, se encuentra ubicada dentro de la cuenca Riachuelo, localizada al oeste de la línea de falla iberiana, posee una baja amplitud de relieve, con cotas máximas al este y mínimas en función del nivel del río Paraná, donde desagua.

Las variaciones del río Paraná son un tercio de la amplitud de la cuenca, por lo cual se destaca su influencia en el funcionamiento de la cuenca en estudio.

Se la puede dividir en dos partes: un sector de esteros y bañados con escurrimiento laminar, y uno con drenaje fluvial en valles entallados. Se trata de un área de 3.150km² con límites poco definidos debido a las transfluencias de aguas con cuencas vecinas y procesos pseudokársticos.

También se diferencia la cuenca media entre las antedichas, que se extiende desde las cabeceras de los arroyos Riachuelo y Riachuelito hasta límite de la cañada el Toro y lagunas Toropí en el estero Riachuelo.

La ciudad de San Luis del Palmar se emplaza en la cuenca baja donde los cauces son marcados y los inconvenientes de inundación se generan al superarse la capacidad de conducción de los mismos o por interferencias de obras de infraestructura en su curso.

División de cuencas

Con el objetivo de describir las crecidas del arroyo Riachuelo y el funcionamiento de la subcuenca en la que se desarrolla la ciudad, el estudio se centra en la cuenca baja teniendo como cabecera al estero Riachuelo que trabaja como gran almacenador de agua. Así, se dividió a la cuenca baja del río Riachuelo respecto de sus principales tributarios: los arroyos Riachuelito y Riachuelo.

Luego, dentro de la cuenca del arroyo Riachuelo, se delimitó la subcuenca en estudio a calibrar con los datos de altura y caudal registrados en el puente de la RP 5. A su vez, se marcó una microcuenca, con una zona urbana y rural, en la que se generan anegamientos por precipitaciones.

Cuenca del arroyo Riachuelo

Desde la confluencia con el arroyo Riachuelito, en dirección sur-norte hasta intersectar a la RP 5 y luego sigue su traza hacia la ciudad de Corrientes, incluye la laguna Brava y toma dirección noreste siguiendo el trazado del ex ferrocarril Económico hasta llegar al Ingenio Primer Correntino. Desde allí se conduce por un camino rural hasta el acceso a San Cosme.

El límite norte de la cuenca del río Riachuelo está dado por el terraplén de la Ruta Nacional n°12.

Subcuenca en estudio

Básicamente, desde el puente de acceso a la ciudad de San Luis del Palmar hacia el sur este, sigue el trazado de la RP 5 hasta el punto más alto, luego continúa paralelo al arroyo hasta intersectar a la RP 4 adaptándose a su traza.

Se incluyó a la cuenca del arroyo Pehuajó por encontrarse en la cuenca baja estudiada, dejando de lado a la del arroyo Piquirí que descarga en un estero (cuenca media).

El límite noreste coincide con la divisoria de cuenca baja y media, donde se considera la cabecera del arroyo Riachuelo; el parteaguas se une a la ruta provincial N°95 cercano al acceso a San Cosme, sigue su traza e incluye parte de la RP9.

Pasa luego por cotas altas en el terreno que generan un escurrimiento en sentido noroeste hacia la cañada Mandiyuratí que desemboca en el arroyo Desaguadero y éste en el arroyo Riachuelo, aguas debajo de nuestro punto de control.

Características físicas de subcuenca:

- longitud del parteaguas: 71,68km
- área: 201,35km².
- pendiente: 1,3^m/km
- índice de compacidad "K": 1,42

Estadística hidrológica

Se determinó mediante un análisis hidrológico la recurrencia de los eventos, prestando especial importancia a aquellos que se dan con:

- TR < 2 años, de manera de determinar la línea de ribera que la fija el promedio de las máximas crecidas ordinarias. La línea de ribera delimita el cauce natural del río.
- 2 años < TR < 5 años, los cuales generan las crecidas que determinan las zonas frecuentemente inundadas y pueden ser catalogadas con riesgo severo de inundación.
- 5 años < TR < 15 años, los cuales generan las crecidas que representan áreas donde las inundaciones se repiten en forma moderada en el tiempo y el riesgo asociado de ser inundadas puede ser clasificado como medio.
- 15 años < TR, los cuales generan las crecidas que determinan áreas donde las inundaciones se repiten en forma esporádica y el riesgo asociado de ser inundadas puede ser identificado como leve.

Se estudiarán estadísticamente 2 variables hidrológicas de manera independiente: precipitaciones máximas diarias y precipitación de 30 días antecedentes a las máximas.

Contando con los datos de precipitaciones diarias desde enero del año 1986 hasta marzo del año 2019, del pluviómetro ubicado en San Luis del Palmar perteneciente a la Dirección Provincial de Vialidad (DPV), se procedió al análisis estadístico de los mismos.

Para ello, se realizó una serie de máximas precipitaciones diarias anuales, para cada año hidrológico (de septiembre a agosto) y luego se ordenaron de mayor a menor para su posterior tratamiento. De esta manera la longitud de la serie es de 32 años.

Con la utilización del programa AFMULTI (Paoli et al; Fich-UNL, 1991), se realizó la comparación entre seis métodos: Log Gauss, Gumbel, GEV (General Extremes Values), Pearson, Exponencial y Wakeby.

En primer lugar mediante los test de bondades de ajustes de Kolmogoroff y χ^2 , se determinó que se aceptan las hipótesis de cualquiera de los métodos ya que los datos ajustan a las distribuciones.

Por otro lado, se observó el error cuadrático medio de la frecuencia (ECMF) y el error cuadrático medio de la variable (ECMV) contemplando que el método con menor error en ambos casos es GEV, con un ECMF de 0,0278 y un ECMV de 5.95.

Paralelamente, se determinó la humedad antecedente a 30 días de cada uno de estos eventos de máxima.

Se procedió mediante la prueba de bondad de ajuste de χ^2 , para saber si la distribución de Gauss ajusta a la información, adoptando un nivel de confianza para la prueba de 95% y 6 grados de libertad, da un valor de 12,6. Comparando este valor con χ^2 calculado, se acepta la hipótesis nula para la prueba, es decir que la distribución de probabilidad propuesta, ajusta adecuadamente a la información ya que $\chi^2_c (5.19) < \chi^2 (12,6)$, por lo que se aplicó el método de Gauss para determinar la recurrencia de humedad antecedente.

Luego, se promediaron las recurrencias de precipitaciones máximas con las de sus correspondiente humedad antecedente, obteniendo una recurrencia para el evento total.

Zonificación de riesgo hídrico mediante modelaciones hidrológicas

Una vez determinadas la recurrencias de los eventos registrados, se procede a la zonificación.

En primer lugar, se obtienen los caudales necesarios para la modelación con el sistema de modelación hidrológica AR-HYMO (INCYTH, 1993).

Para esto, observando imágenes satelitales, se divide el área en estudio en subcuencas para lograr una representación de la misma lo más parecida de la realidad posible, y obtener un modelo de cuenca que dé resultados certeros.

Luego, se procede a la calibración del modelo mediante prueba y error, con caudales medidos, obteniendo el valor de CN de cada subcuenca.

Posteriormente a la calibración se modelan los caudales faltantes coincidentes con los eventos que se dan con las recurrencias mencionadas, necesarios para llegar a la zonificación.

Con estos, se trabaja en el sistema de modelación de cursos HEC-RAS (Centro de ingenieros de la armada de EEUU, 1990).

Se determina la superficie inundada con los caudales modelados, que se dan según las frecuencias mencionadas, obteniendo con esto la zonificación de riesgo.

Zonificación de riesgo hídrico mediante imágenes satelitales

Se busca determinar cartográficamente áreas con diferentes capacidades de ser inundadas frente a eventos de distintas frecuencias. Es decir, se procede en el presente capítulo a la zonificación de riesgo hídrico de áreas rurales y urbanas de la subcuenca estudiada con la ayuda de imágenes satelitales.

Se buscaron imágenes de la plataforma Landsat que sean inmediatamente posteriores a los eventos con las frecuencias mencionadas, y a la vez que sean útiles para su procesamiento en un programa SIG (Sistema de Información Geográfica). Con esta última aclaración, se destaca la importancia de la baja nubosidad y de algunas líneas que demuestran el error con que el satélite captó algunas imágenes.

Se seleccionaron las más representativas de cada caso y se las compuso con las bandas: R: B4, G: B5, B: B3 que corresponden al satélite Landsat 7 ETM+, y nos permite identificar los usos de suelo y las masas de agua, a diferencia de otro tipo de composiciones.

Luego, se realizó la clasificación no supervisada mediante 8 clases más representativas. Básicamente se detectan tres clases de agua, una de bajos, tres de vegetación (pastizal, monte y monte alto) y suelo urbano o desnudo.

La cartografía de zonificación de riesgo hídrico es el resultado de la superposición de los polígonos respectivos a cada frecuencia.

Teniendo en cuenta las limitaciones que tiene trabajar con imágenes satelitales, se puede decir que realizar una zonificación de riesgo hídrico de esta manera no es la adecuada para la escala requerida dentro del ámbito urbano.

Sin embargo, a cierta escala permite la definición de áreas anegables con cierta frecuencia y así una herramienta para la proyección del ejido urbano de la ciudad de San Luis del Palmar, como también de áreas con posibilidades de ser productivas para la agricultura. Esto se traduce en una medida no estructural para paliar el problema de inundación.

Soluciones

Una vez determinada la zonificación de riesgo hídrico, se proponen alternativas de soluciones.

Como primera medida, mediante el sistema de modelación de cursos HEC-RAS (Centro de ingenieros de la armada de EEUU, 1990), se estudia si el puente de la ruta provincial N°5 genera una obstrucción al flujo del arroyo.

Se observan las alturas y velocidades del arroyo antes y después del mismo, y se concluye con que este no genera remanso en el arroyo, por lo que no se lo considera como una obstrucción.

Por esto, una mayor sección del puente no se considera como alternativa.

- Alternativa 1: Propuesta de terraplén de defensa, desagüe pluvial, reservorio y sistema de bombeo.

Se propone la traza de un terraplén de defensa con una cota coincidente con la de la RP5, con lo que se busca lograr el resguardo de las viviendas asentadas en la ribera del arroyo.

Mediante el sistema de modelación de cursos HEC-RAS, se evalúa la situación con dicho terraplén de manera de evitar resultados contraproducentes con la construcción del mismo, ya que ante los mismos caudales, la sección de escurrimiento sería menor.

Por este motivo, se realiza la modelación para el evento máximo (abril 2017), y se comparan las situaciones con y sin proyecto. Los valores de velocidad y tirante en la sección del puente permanecen aproximadamente constantes antes y después de la construcción del terraplén. Por lo tanto, se llega a la conclusión que dicho terraplén no sería una obstrucción al flujo del arroyo.

La propuesta de una defensa implica el estudio exhaustivo de los desagües pluviales de la ciudad. Los canales de salida de aguas de lluvia principales son el arroyo Pozo de la Patria y una zanja que bordea la ruta provincial N° 5.

De esta manera, se proyecta una estación de bombeo pluvial en el caso en que el arroyo

alcance cierto nivel (cuando se supera la línea de ribera), lo que imposibilita su descarga a gravedad mediante un sistema de compuertas.

Los hidrogramas que surgen de un análisis detallado de Morresi et. al, es de parte del área de

aporte a tener en cuenta para la estación de bombeo. Este es el que transporta el arroyo Pozo

de la Patria actualmente. Por lo tanto, se estimaron los hidrogramas para las cuencas provenientes del resto del área que también quedarán obstruidos por la defensa, para un TR de 5 años.

Se considera que, al no haberse realizado un estudio detallado de caudales erogados por cada cuenca con la propagación de sus hidrogramas respectivos hasta el reservorio, lo que disminuye el caudal pico, los resultados son válidos a efectos de tener noción general de la magnitud de la estación de bombeo.

Con el objetivo de determinar a grandes rasgos la dimensión de los equipos de bombeo necesarios para evacuar ese caudal total, se proyecta una única estación elevadora con su reservorio. Además, se hace hincapié en la necesidad de medios de izaje grupos electrógenos y demás medios mecánicos necesarios.

- Alternativa 2: Relocalización y plan de contingencia.

Una vez trazada la línea de ribera, y teniendo en cuenta el camino de sirga contiguo a esta, se puede definir a los mismos como espacios de dominio público teniendo en cuenta lo establecido en el Código Civil y Comercial de la Nación.

Se asemeja el límite definido por el camino de sirga a la línea de riesgo hídrico que define eventos de hasta 5 años de recurrencia, y debido a lo expuesto en el párrafo anterior, se propone la relocalización de las viviendas ubicadas dentro de estos límites.

Por otro lado, para las viviendas no relocalizadas que aún se encontrarán en riesgo de inundación con recurrencias mayores a 5 años, se propone un plan de contingencia.

Ítems a tener en cuenta en una evaluación económica y financiera

Se lleva a cabo la determinación de ítems a tener en cuenta para el análisis económico de cada alternativa de las soluciones propuestas, que se realizan con el objetivo de determinar el proyecto que sería más conveniente a ejecutar.

La primer alternativa consiste en la construcción de un terraplén de defensa logrando el resguardo de la mayor cantidad de los asentamientos ribereños posible, complementando el mismo con desagües pluviales, reservorios y sistemas de bombeo.

las cuestiones a evaluar en un análisis económico del mismo son:

1. Beneficios económicos
 - 1.2. Beneficios sociales por terreno protegido
 - 1.2. Beneficios sociales por propiedades protegidas
 - 1.3. Beneficios sociales por valor residual de activos

2. Costos sociales

2.1. Costos sociales de movimiento de suelo y ejecución de terraplén

2.2. Costo social de construcción de senda peatonal y baranda

2.3. Costo social de ejecución de reservorio

2.4. Costo social de colocación de sistema de bombeo

2.5. Costo social por gastos adicionales

2.6. Costo social de mantenimiento

3. Indicadores de rentabilidad social

Para llegar a la conclusión de que sea conveniente desarrollar el proyecto desde el punto de vista social, el valor social neto debe ser mayor que cero y la tasa social interna de retorno debe ser mayor al costo de oportunidad.

En la segunda alternativa se propone la relocalización de viviendas ubicadas dentro de la zona delimitada por crecientes con recurrencias de hasta 5 años, proponiendo planes de contingencia para eventos que se dan con recurrencias mayores.

1. Beneficios económicos

1.1. Beneficios sociales por daños evitados

1.2. Beneficios sociales por asistencia sanitaria evitada

1.3. Beneficios sociales por resguardo temporal evitada

2. Costos sociales

2.1. Costo social terreno de relocalización

2.2. Costo social de construcción de viviendas relocalizadas

2.3. Costo social de infraestructura de viviendas a relocalizar

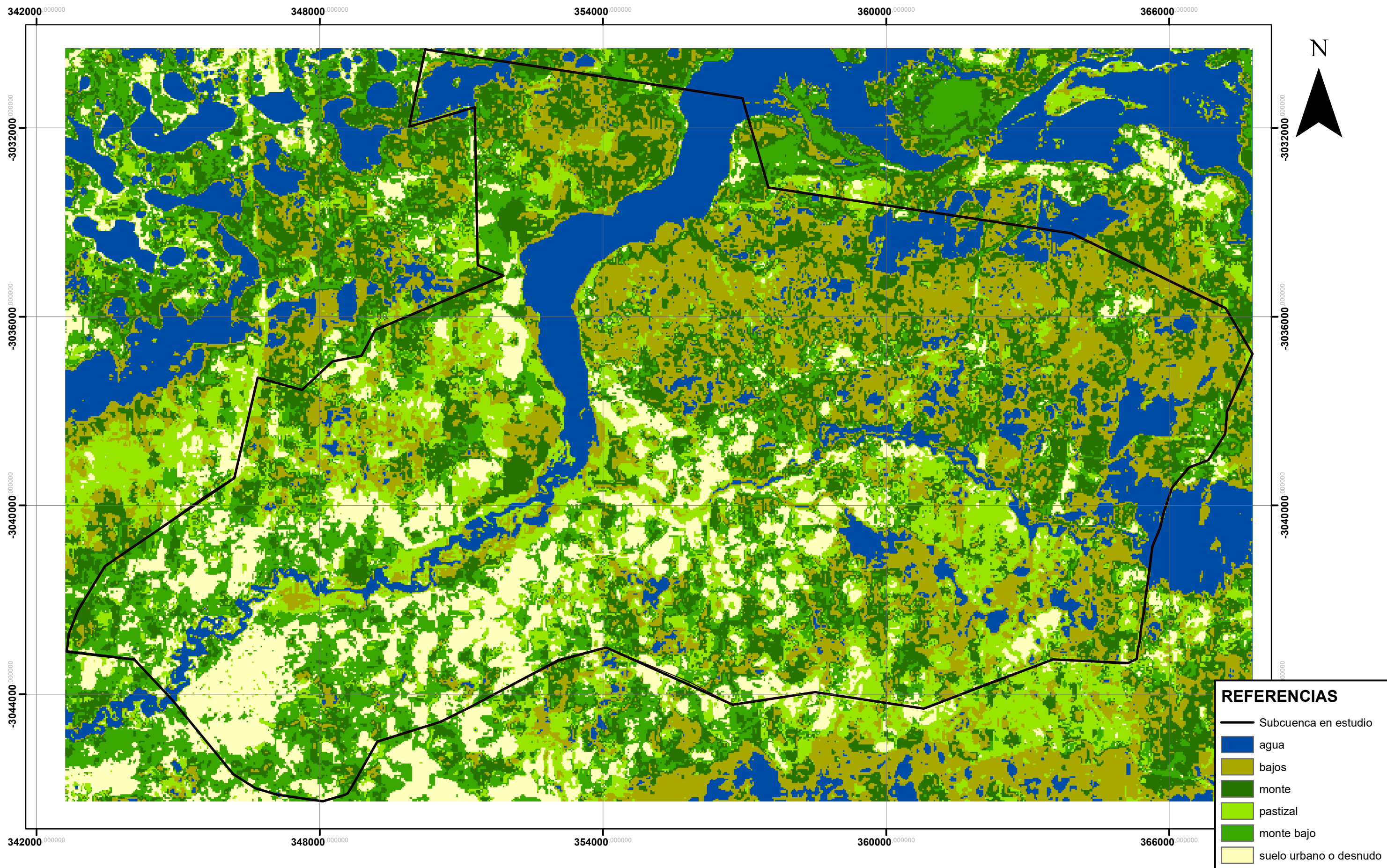
Conclusiones y recomendaciones

Si bien la elección de una alternativa es un trabajo multidisciplinario, desde el punto de vista técnico adoptamos la segunda alternativa.

Para tomar esta decisión, se tiene en cuenta que para la primer alternativa, si bien el número de viviendas salvadas es mayor, existen varios aspectos que complejizan el sistema defensa-desagüe pluvial, y requieren mantenimiento periódico para su funcionamiento óptimo. En el caso en el que dicho mantenimiento no se realice con las precauciones necesarias, la población se expone a un riesgo aún mayor que sin la ejecución de la defensa.

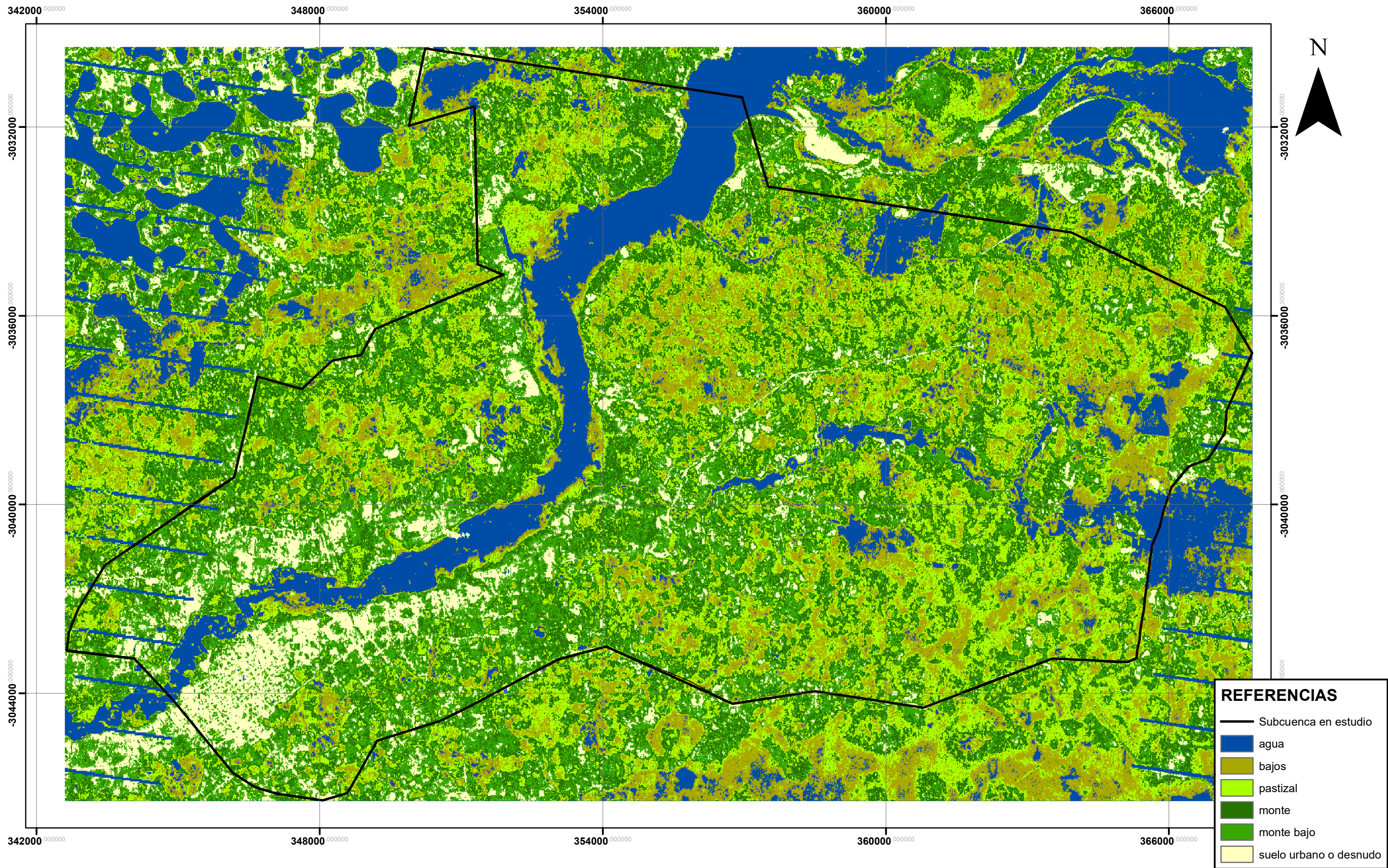
Se recomienda para la alternativa adoptada:

- Dar a conocer la zonificación de riesgo hídrico y plan de contingencia como;
- Ejecutar desagües pluviales urbanos;
- El crecimiento del ejido urbano se dé siguiendo la geomorfología del cordón arenoso de San Luis del Palmar (dirección NE), adaptándolo a las condiciones naturales;
- Adopción y garantía de cumplimiento del plan por parte del municipio.



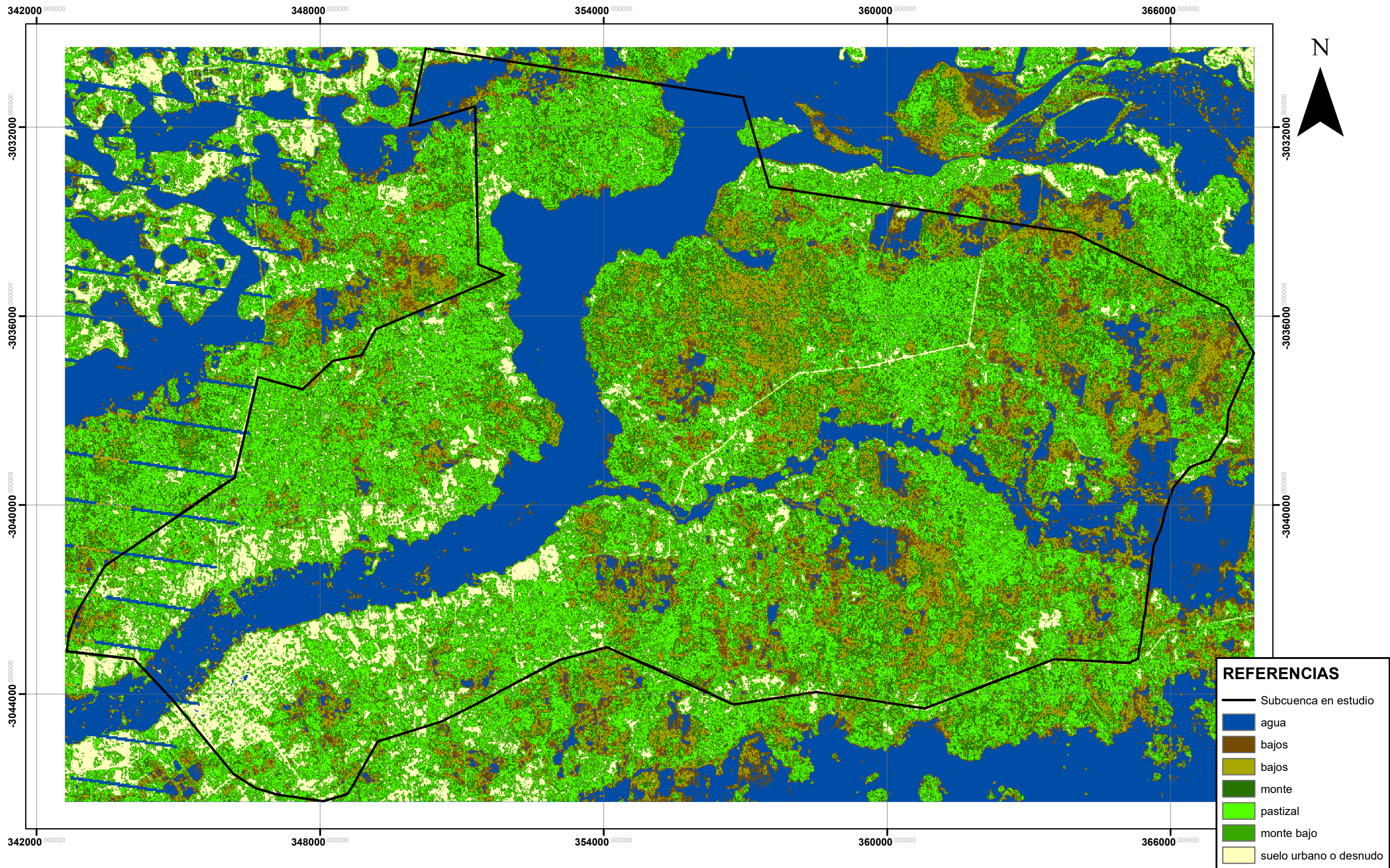
0 0,75 1,5 3 4,5 6 Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE	
Facultad de Ingeniería	
Gutnisky - Rodríguez - Wojcicki	
Clasificación de usos de suelo para TR = 2 años	
Plano 3	ESCALA = 1:75.000



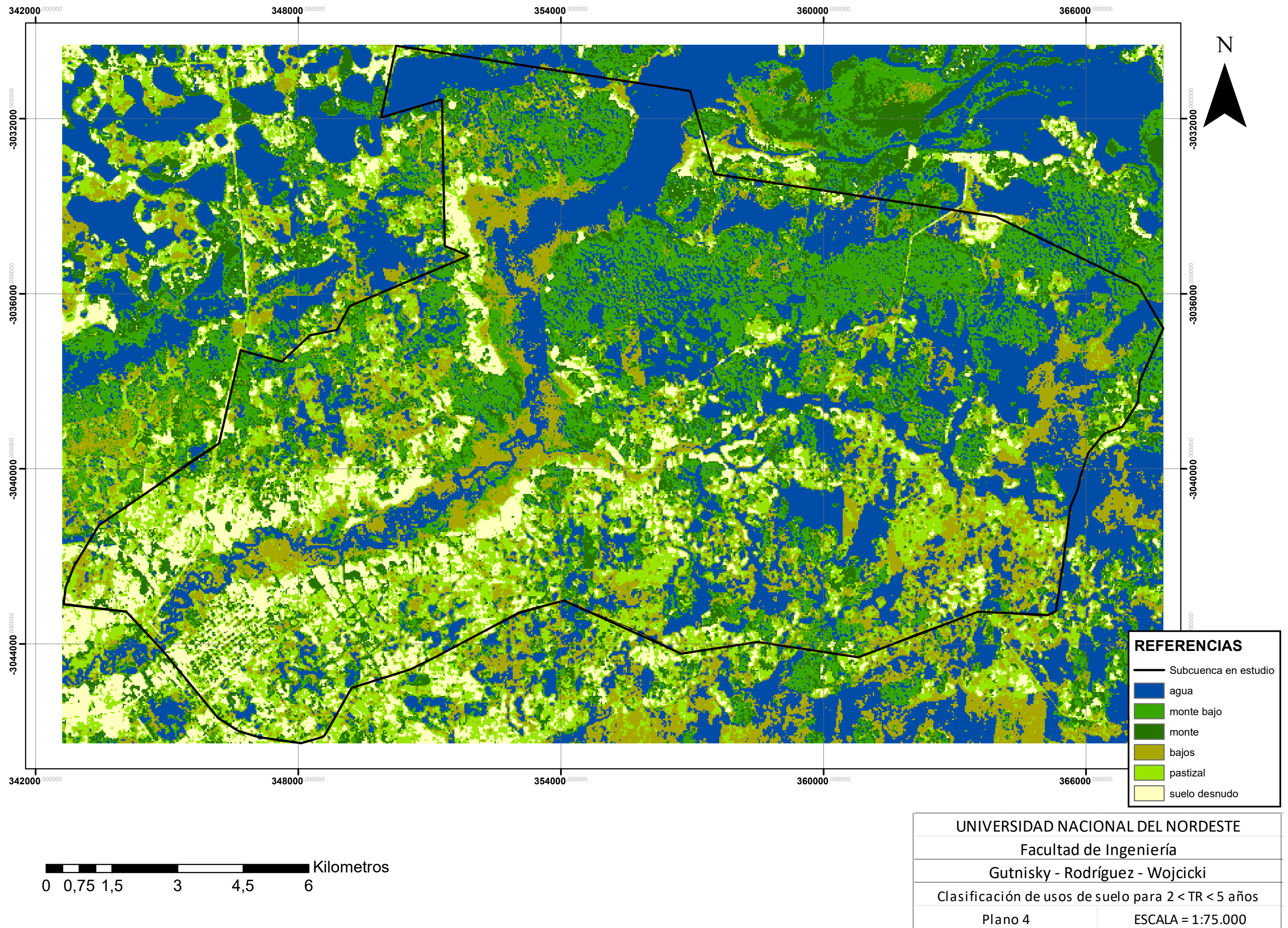
0 0,75 1,5 3 4,5 6 Kilometros

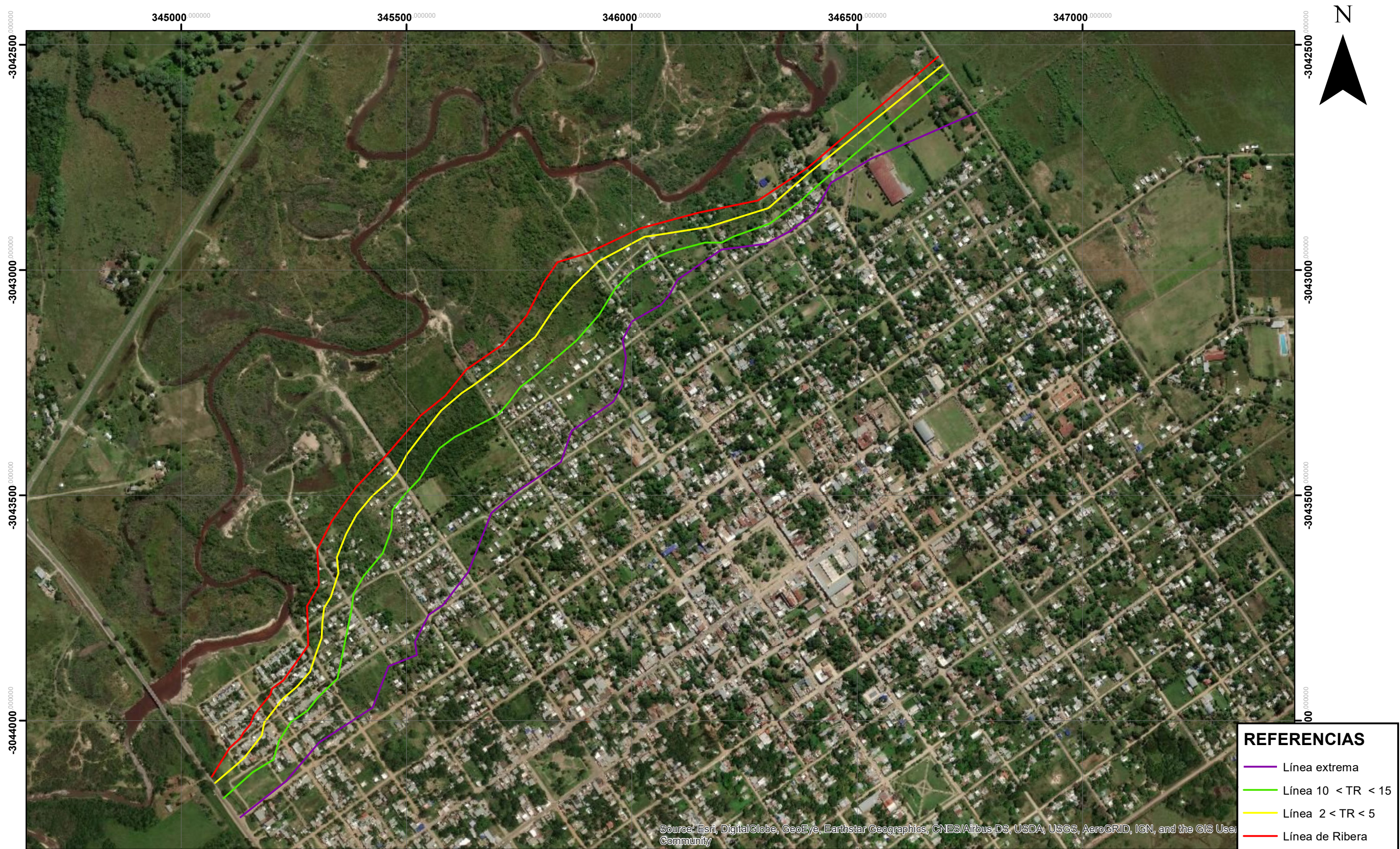
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE	
Facultad de Ingeniería	
Gutnisky - Rodríguez - Wojcicki	
Clasificación de usos de suelo para $5 < TR < 15$ años	
Plano 5	ESCALA = 1:75.000



0 0,75 1,5 3 4,5 6 Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE	
Facultad de Ingeniería	
Gutnisky - Rodríguez - Wojcicki	
Zonificación de riesgo hídrico	
Plano 7	ESCALA = 1:75.000





0 100 200 400 600 800 metros

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE	
Facultad de Ingeniería	
Gutnisky - Rodríguez - Wojcicki	
Líneas de riesgo hídrico	
Plano 8	ESCALA = 1:8.000

