



Estimación de curvas IDF para tormentas de larga duración en la cuenca del río Gualeguay en la provincia de Entre Ríos

Estimation of IDF curves for long-term storms in the Gualeguay river basin in the province of Entre Ríos

Margasín, Andrea ✉ - Bruno, Sabina - Gimenez, Vanesa - Mastaglia, María Inés - Sato, Rodolfo

Recibido: 7 de agosto de 2019 • Aceptado: 28 de enero de 2020

Resumen

A partir de la recopilación de datos pluviométricos disponibles en la provincia de Entre Ríos, utilizando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (SIG), en este caso el programa QGIS, y tomando como período de registro de 30 años (1986-2016) se estudiaron valores medios anuales de tormentas de larga duración para la cuenca del río Gualeguay, que drena un área de 21.549 km².

Se seleccionaron 54 estaciones representativas, cuyos datos se analizaron, completaron y validaron para la generación de un pluviómetro ficticio representativo de la Precipitación Media Areal (PMA) de la cuenca. Se efectuó un análisis de frecuencia, con el programa AFMULTI, con el que se determinaron intensidades para las series de precipitaciones medias areales máximas anuales (PMAMA) que permitieron estimar los parámetros de las expresiones matemáticas que definen las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF), para los distintos períodos de recurrencias analizados, por medio del programa ARHYMO. Este procedimiento se replicó para 6 subcuencas, estimándose también una familia de curvas IDF para cada una de ellas. Las curvas IDF definidas con esta metodología permiten obtener tormentas de diseño que consideran la distribución espacial de las precipitaciones.

La estimación de tormentas de diseño a partir de curvas IDF es una variable fundamental para la determinación de los caudales pico de diseño para proyectos de infraestructura tales como puentes, vías de comunicación, defensas contra inundaciones entre otras obras que afectan grandes extensiones de la provincia. Disponer de IDF de la región, permite diseños más eficientes, ajustados a las condiciones locales.

Palabras clave: intensidad de precipitación, cuencas extensas, precipitación media areal.

Abstract

Based on the collection of rainfall data available in the province of Entre Ríos, using a Geographic Information System (GIS) as a tool, in this case the QGIS software, and taking 30 years (1986-2016) as a recording period, annual average values of long-term storms were studied for the Gualeguay river basin, which drains an area of 21.549 km².

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Paraná (E.R.),
Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina.
✉ andreamargasín@gmail.com

54 representative stations were selected, whose data were analyzed, completed and validated for the generation of a fictitious rain gauge representative of the Average Areal Precipitation (PMA) of the basin. A frequency analysis was carried out with AFMULTI software which intensities were determined for the annual maximum average areal precipitation series (PMAMA) that allowed estimating the parameters of the mathematical expressions that define the Intensity Duration Frequency (IDF) curves, for the different recurrence periods analyzed through the ARHYMO software. This procedure was replicated for 6 sub-basins, also estimating a family of IDF curves for each of them. The IDF curves defined with this methodology allow to obtain design storms that consider the spatial distribution of rainfall.

The estimation of design storms from IDF curves is a fundamental variable for the determination of peak design flows for infrastructure projects such as bridges, communication roads, flood defenses among other works that affect large extensions of the province. Having IDF of the region, allows more efficient designs, adjusted to local conditions.

Keywords: precipitation intensity, large basins, average areal precipitation.

INTRODUCCIÓN

El estudio y análisis del comportamiento de las precipitaciones de la región permiten aportar patrones de conducta y la posibilidad de contar con indicadores efectivos y eficientes en el diseño hidrológico, (Pizarro et al., 2003).

El conocimiento de las intensidades extremas de precipitación, su duración y la frecuencia con que se producen es imprescindible para la planificación de obras hidráulicas y viales, la optimización de recursos hidráulicos en cuencas hidrográficas y la prevención de avenidas (Casas Castillo, 2005).

La cuenca del río Gualeguay es la cuenca interior más grande de la provincia de Entre Ríos, y muchas de las localidades dentro de ella sufren inundaciones severas en ocasión de tormentas de importancia.

La provincia cuenta con más de 200 estaciones pluviométricas, donde se efectúan lecturas diarias desde el año 1934. Ante la disponibilidad de registros pluviométricos abundantes en el territorio de la provincia de Entre Ríos y en conocimiento de la necesidad de contar con herramientas para la planificación territorial y el dimensionamiento de obras de infraestructura dentro de la cuenca, se plantea el estudio de tormentas para la cuenca del río Gualeguay que tengan en cuenta la distribución espacial de las mismas.

Para cuencas de pequeña a mediana extensión suele considerarse que la distribución de la lluvia es uniforme, y se utilizan tormentas de diseño en base a registros de una estación puntual. Para cuencas mayores, de más de 100 km², como es el caso de la cuenca del río Gualeguay y sus subcuencas, la suposición de uniformidad de la precipitación no es válida. La disponibilidad de información posibilitó la obtención de precipitaciones medias areales que caractericen en forma más adecuada las tormentas en la cuenca en estudio (y sus subcuencas).

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO

La cuenca del río Gualeguay abarca la zona central de la provincia de Entre Ríos, entre los sistemas de Lomada de Montiel y Lomada Grande, desde el Norte, en el departamento Federal, hasta el sur, en la desembocadura del río Gualeguay en el Delta entrerriano. Esta cuenca es la más extensa dentro de la provincia, drena un área de 21.549 km² y está compuesta por una gran variedad de suelos, en su gran mayoría fértiles y propicios para

la actividad agropecuaria. En la zona de bañados en la naciente, por ejemplo, los suelos se componen de arcillas, limos densos y limos arcillosos.

El río Gualeguay es uno de los afluentes del curso inferior del río Paraná, nace entre las ciudades de Federación y San José de Feliciano. Fluye en dirección Sudoeste, atravesando las localidades de Villaguay, Rosario del Tala y Gualeguay y desemboca en los brazos del Paraná Pavón y Paraná Ibicuy del Delta entrerriano. Desde su nacimiento, el cauce principal tiene aproximadamente 415 km. Entre los tributarios más importantes se destacan los arroyos Raíces, El Tigre y Clé por la margen derecha, y por la margen izquierda el arroyo Lucas y el Villaguay.

Las rutas de mayor importancia que atraviesan el río Gualeguay son la Provincial N.º 28 y 22 al Norte, la Nacional N.º 18 al centro, la Provincial N.º 39 en inmediaciones a la localidad de Rosario del Tala y la Nacional N.º 12 en la localidad de Gualeguay. En la Figura 1 pueden observarse los departamentos que comprende la cuenca y su distribución territorial.

Respecto de la morfometría de la cuenca, la misma es levemente alargada, con un perímetro de 884,34 km. Posee un coeficiente de forma de Horton de 0,125, un coeficiente de compacidad de 1,70 y una relación de elongación de 0,548. En la naciente de la cuenca las cotas rondan los 72 m IGN, alcanzando en su desembocadura cotas de 6 m IGN.

El cauce del río es sinuoso, formando múltiples meandros y bancos de arena, así como un amplio valle de inundación hacia ambas márgenes. Las crecidas de este río son regulares y pueden prolongarse por varias semanas. En presencia de crecidas máximas, vastos sectores de la planta urbana de Gualeguay resultan anegados como sucedió con las lluvias extraordinarias de abril de 2016, que anegaron también las localidades de Rosario del Tala y Puerto Ruiz.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

A fin de conocer el régimen pluviométrico de la zona en estudio y su comportamiento, en primera instancia se recopilieron los datos históricos de precipitación. En la provincia de Entre Ríos existen diferentes organismos que mantienen registros de carácter oficial de las mediciones de precipitación a los que se pudo acceder:

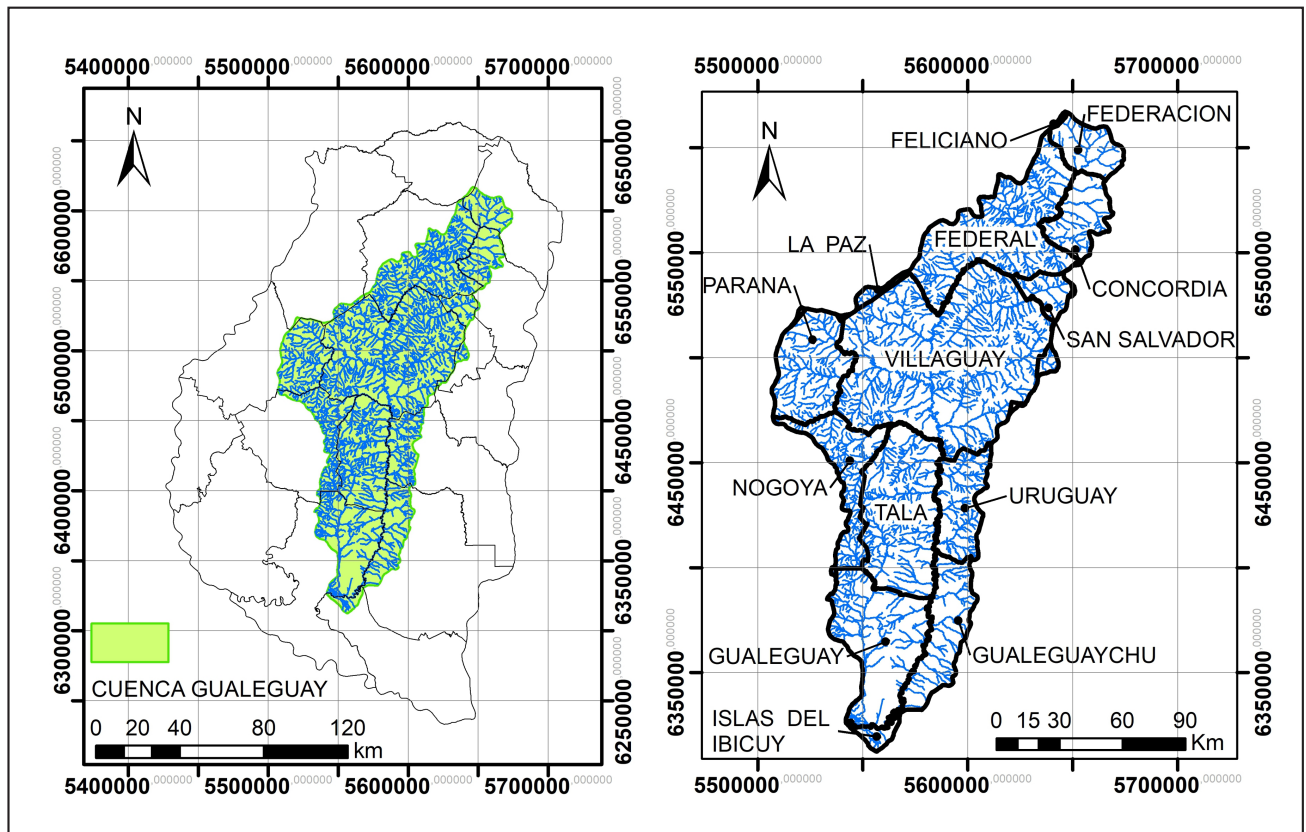


Figura 1. Cuenca del río Gualeguay.

- Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos (DHER)
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH)
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)
- Bolsa de cereales de Entre Ríos

Para el caso de estudio de la cuenca del río Gualeguay se dispuso de información proveniente de 70 estaciones localizadas en la cuenca del río Gualeguay y otras 39 ubicadas en cuencas aledañas: arroyo Feliciano, río Gualeguaychú, arroyo Nogoyá, río Mocoretá y propias del río Paraná. Estas últimas se consideraron estaciones auxiliares por encontrarse cerca del límite de la cuenca. De cada estación se evaluó la extensión del registro, la ubicación (coordenadas, cuenca y departamento al que pertenece) y operador (en general DHER). Del total de estaciones analizadas, existen 15 estaciones con registros de medición disponibles hasta 2016 y 22 estaciones que aún continúan operando con acceso normal a sus datos. Las estaciones restantes no poseen registros disponibles actuales o han dejado de operar.

Para el estudio de frecuencias de la cuenca del río Gualeguay se definió un intervalo de 30 años de registros pluviométricos, que comienza en septiembre del año 1985 y finaliza en agosto del 2016.

A fin de evaluar la relevancia de cada una de las estaciones, se elaboró un sistema de categorización en función de la extensión y continuidad de los registros. Se definieron 5 rangos con base en el cociente entre la cantidad de meses observados de todo el

período de registro y la cantidad total de meses de la serie anual completa, clasificando cuantitativamente a las estaciones de mayor a menor calidad. La categoría 1, corresponde a las estaciones con mayor extensión de datos continuos y completos: 30 años de registro con al menos 95 % de la información de cada año; a la categoría 2 corresponden pluviómetros con al menos 25 años de registros completos o que posean más del 90 % de la información en dichos años; categoría 3 se asigna a estaciones con un mínimo de 20 años de registros completos o que posean más del 80% de la información en dichos años; categoría 4 son los pluviómetros con mínimo 15 años de registros completos o que posean más del 70 % de la información en dichos años y la categoría 5 se asigna a estaciones, con períodos de registro cortos o discontinuos, que no cumplen ninguna de las condiciones anteriores (registros con menos de 15 años o menos del 70 % de la información en dichos años).

La información se sistematizó mediante una plataforma SIG, utilizando el programa QGIS (*QGIS Development Team, 2019*), en el que se consignaron las ubicaciones y categorías de las estaciones disponibles, tal como se aprecia en la Figura 2.

Como índice de estimación de la calidad de la información y la densidad de red se comparó la categoría y cobertura promedio con la red mínima establecida por la Organización Meteorológica Mundial (*OMM, 2008, 2011*). Esta proporciona las características generales de la precipitación u otras variables y ayuda a establecer su eventual densificación en función de necesidades reales que permiten llegar a una red óptima. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 1.

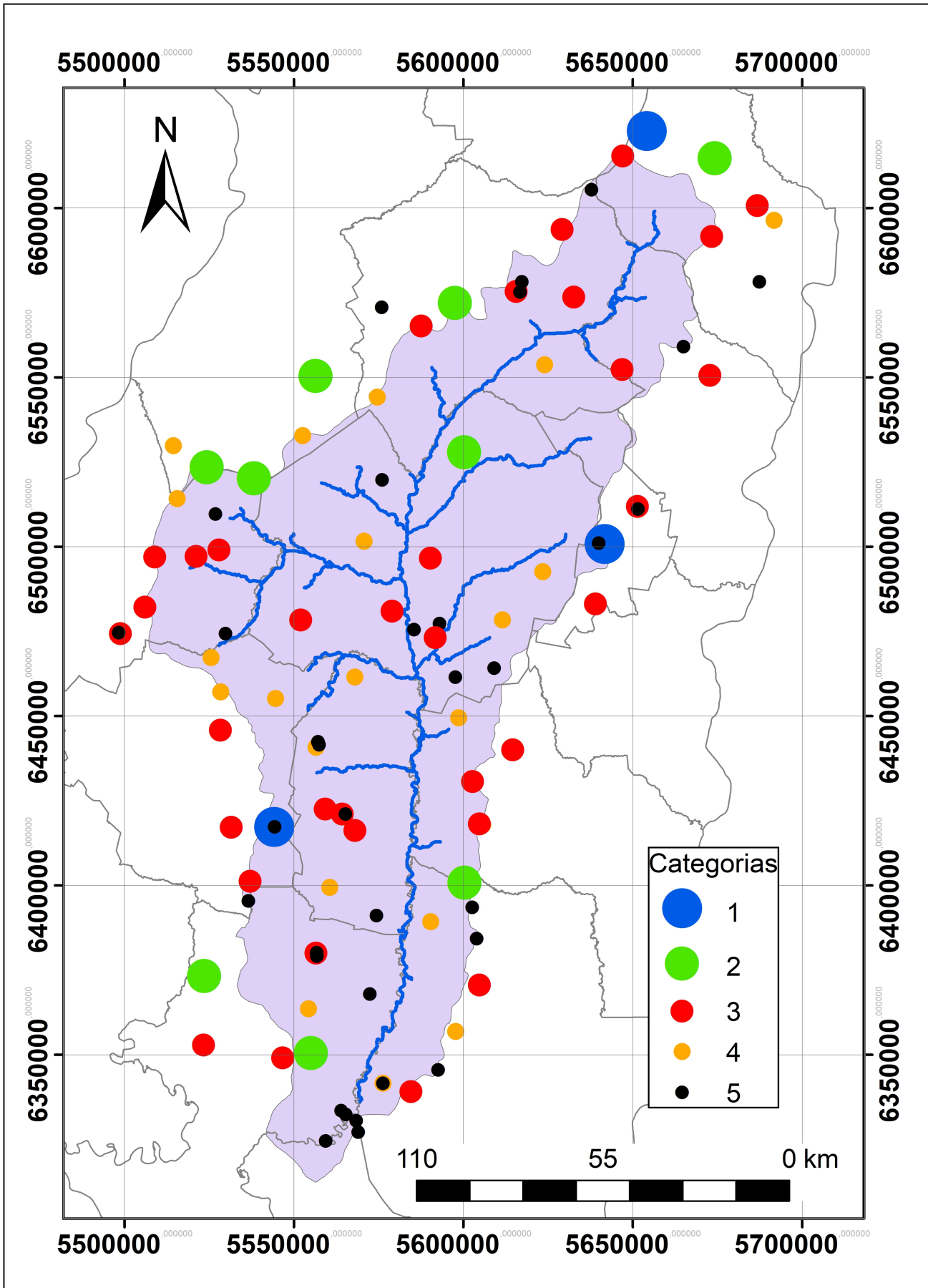


Figura 2. Estaciones pluviométricas según categoría.

Tabla 1. Densidad de la red pluviométrica de la Cuenca del río Gualeguay.

Área cuenca [km ²]	Estaciones	Categoría					Categoría Promedio	Total de Pluviómetros	Área Promedio [km ² /Pluv]
		1	2	3	4	5			
21.549	Internas	2	4	18	16	30	3,83	109	197,69
	Externas	1	5	16	5	12			
	Total	3	9	34	21	42			

La densidad obtenida satisface las condiciones establecidas por la OMM para una red mínima. Respecto a la categorización de los pluviómetros se halla en promedio entre 3 y 4.

SELECCIÓN DE ESTACIONES REPRESENTATIVAS

La generación de una base de datos pluviométricos en plataforma SIG, permitió el análisis espacial de la red facilitando el proceso de selección de las estaciones considerando la calidad de los datos, la extensión de los registros y la cobertura espacial de cada una.

La selección de estaciones se realizó mediante el trazado preliminar de círculos de influencia de 15 km de radio de acuerdo a criterios de la DHER cumpliendo los límites establecidos por la OMM para una red pluviométrica mínima. Se eliminaron los pluviómetros de categorías 4 y 5 cuyas áreas de influencia presentaron superposición con los de mayor categoría, logrando así una red pluviométrica depurada.

Como puede observarse en la Figura 3, prevalecieron las estaciones pluviométricas de categoría 3 y 4. La etiqueta numérica corresponde al código de identificación otorgado por el organismo propietario de cada estación. Se identificaron falencias en la cobertura espacial; resultando extensas áreas sin registros disponibles, especialmente en la zona centro y sur de la cuenca.

En la Figura 4 se representan las áreas de influencia resultantes del trazado de polígonos de Thiessen para cada pluviómetro seleccionado.

En la Tabla 2 se resume la categoría promedio y la densidad media de la red pluviométrica depurada en las zonas de estudio.

Tabla 2. Densidad media de la red pluviométrica adoptada para la cuenca del río Gualeguay.

Área cuenca [km ²]	Estaciones	Categoría					Categoría Promedio	Total de Pluviómetros Seleccionados	Área Promedio [km ² /Pluv]
		1	2	3	4	5			
21.549	Internas	0	3	19	12	7	3,4	54	399
	Externas	1	4	3	4	1			
	Total	1	7	22	16	8			

La cobertura media de las estaciones varió entre los 49 km² y 1.097 km², representando superficies de círculos equivalentes de radios de 4 a 19 km. Considerando que este último es levemente superior al límite deseable de 15 km de radio y que el valor promedio está dentro de los límites establecidos para una red mínima; se consideró aceptable la red de estaciones seleccionadas a los efectos de obtener precipitaciones medias en la cuenca para la ejecución del estudio.

Por otra parte, se halló que el valor promedio de la categoría de los pluviómetros seleccionados es cercano a 3,5. Esto significa, en términos de valores medios, la disponibilidad de registros entre 15 y 20 años de longitud mayoritariamente completos en los últimos 30 años.

RELLENAMIENTO Y VALIDACIÓN DE DATOS

Para poder realizar un análisis de frecuencias es necesario contar con series de 30 años de registros continuos completos. Por ello se evaluaron distintos métodos de rellenamiento de datos, adoptándose, por su ajuste y facilidad de ejecución, el método Inverse Distance Wighted (IDW) del *National Weather Service*.

Este método consiste en determinar la precipitación diaria faltante de una estación a partir de los registros de estaciones pluviométricas cercanas. La variable principal es la distancia entre la estación a completar y las estaciones seleccionadas para el relleno.

Se colocó la estación a completar (estación pivote) en el origen de un sistema de coordenadas cartesianas ficticio, tal como se observa en la Figura 5. Mediante el análisis espacial en la plataforma del SIG, se buscaron los pluviómetros más próximos y de mejor categoría en cada cuadrante con disponibilidad de datos para el rellenamiento de los registros faltantes en la estación pivote. Cuando las estaciones cercanas no contaban con los registros necesarios se seleccionaron estaciones más alejadas.

El procedimiento de rellenamiento se validó aplicando el método de curvas de doble acumulación, contrastando la serie obtenida con un registro extenso y completo de una estación confiable (categoría 1). Este método se basa en que, para zonas meteorológicamente homogéneas, existe una relación de proporcionalidad entre sus precipitaciones acumuladas que puede analizarse analítica y gráficamente.

DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUBCUENCAS

Debido a la extensión de la cuenca del río Gualeguay, se trazaron 6 (seis) subcuencas en puntos de control considerados de interés. La primera subcuenca tiene cierre en Cañada Bermúdez, la segunda en arroyo Guerrero, la tercera en Paso Duarte, en coincidencia con la Ruta Provincial N° 22, una cuarta subcuenca con cierre en Villaguay, donde se cuenta con aforos al igual que en la quinta, Rosario del Tala, y la última, en Paso Alonso, que abarca casi la totalidad de la cuenca. Las subcuencas delimitadas pueden apreciarse en la Figura 6. Los puntos de cierre que poseen datos de aforos posibilitan la calibración de futuras estimaciones a partir de modelos hidrológicos.

En la Tabla 3 se consignan las características físicas principales para las subcuencas propuestas. Los datos de las pendientes del escurrimiento fueron determinados a partir del Modelo de Elevación Digital del terreno (MDE) y con ellos se calcularon los tiempos de concentración por la fórmula de Kirpich (*Kirpich et al., 1940*).

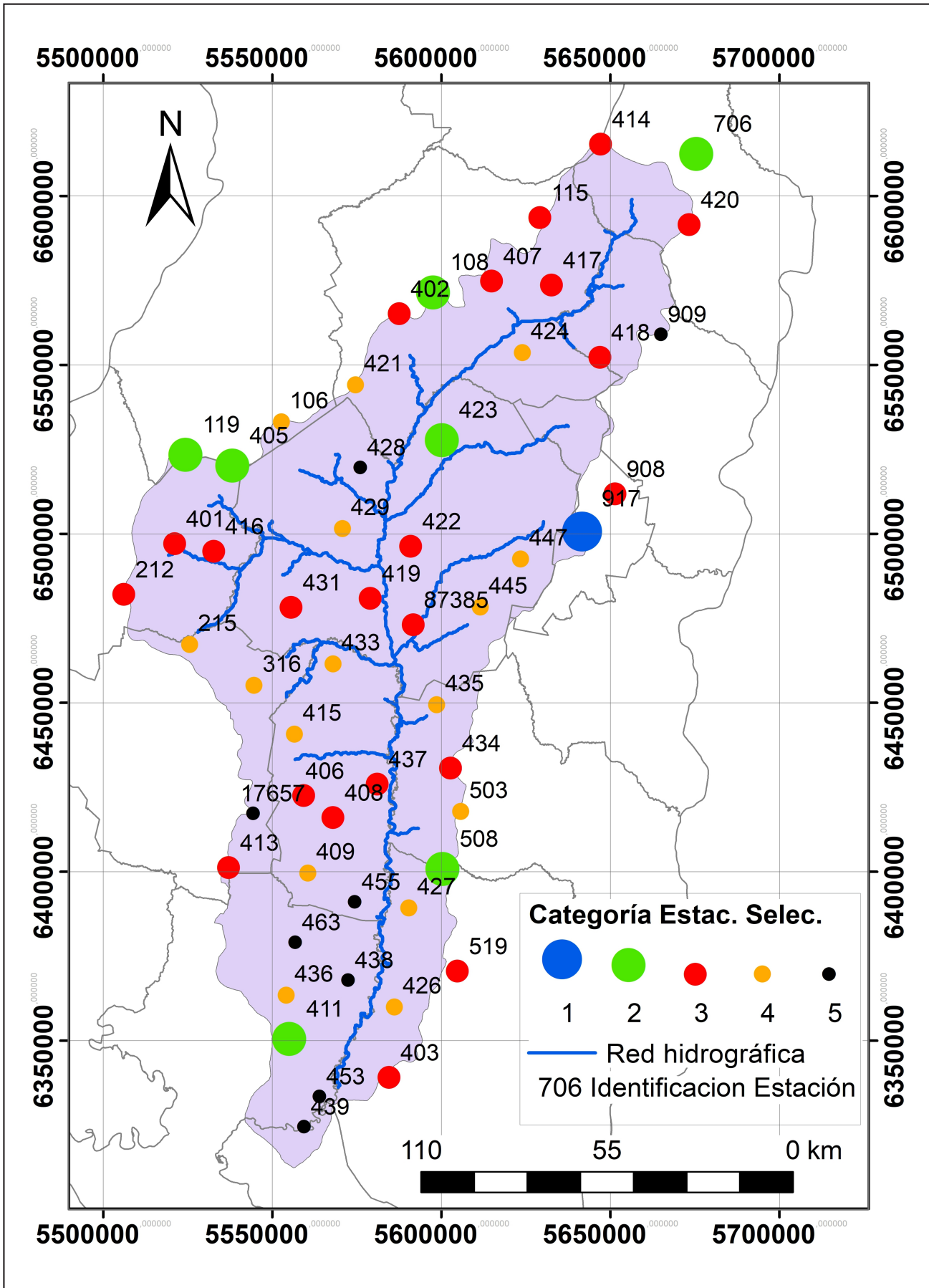


Figura 3. Red de estaciones seleccionadas cuenca del río Gualeguay.

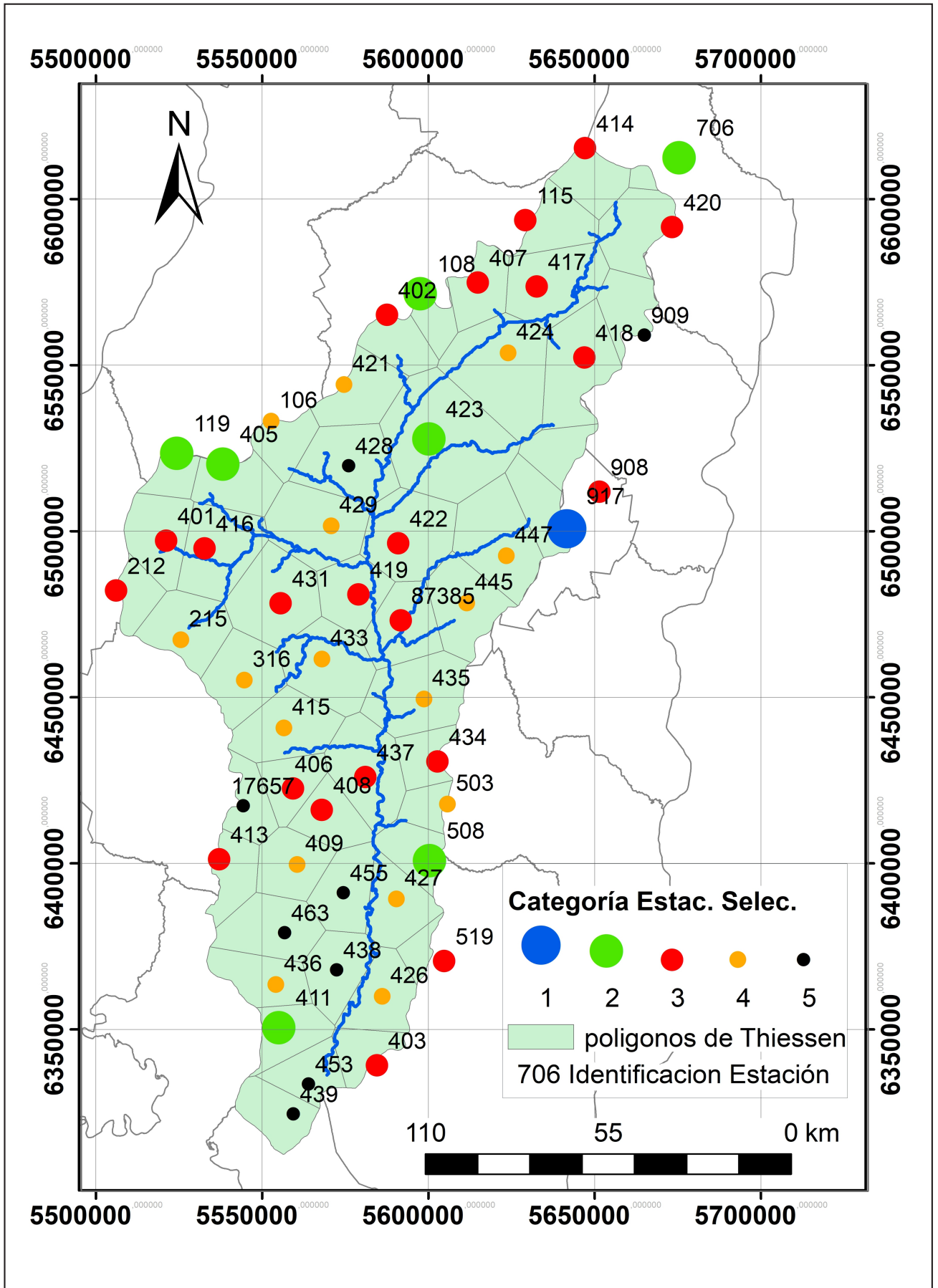


Figura 4. Trazado de poligonos de Thiessen para la red adoptada.

Tabla 3. Parámetros físicos de las subcuencas del río Guaqueguay.

Subcuencas	Mayor trayectoria del escurrimiento						
	Área	Longitud del curso	Cota aguas arriba	Cota aguas abajo	Diferencia de nivel	Pend. Cauce	Tiempo de concentración
Denominación	A	L _c	H ₁	H ₂	ΔH	i	t _c
Sección de control	[km ²]	[km]	[m IGN]	[m IGN]	[m]	[%]	[h]
Cañada Bermúdez	611	31	72	60	12	0,04	19,1
Arroyo Guerrero	818	31	72	60	12	0,04	19,1
Paso Duarte	2971	90	72	50	22	0,02	52,5
Villaguay	10.863	194	72	36	36	0,02	104,4
Rosario del Tala	16.098	266	72	30	42	0,02	142,0
Paso Alonso	21.239	383	72	6	66	0,02	181,8

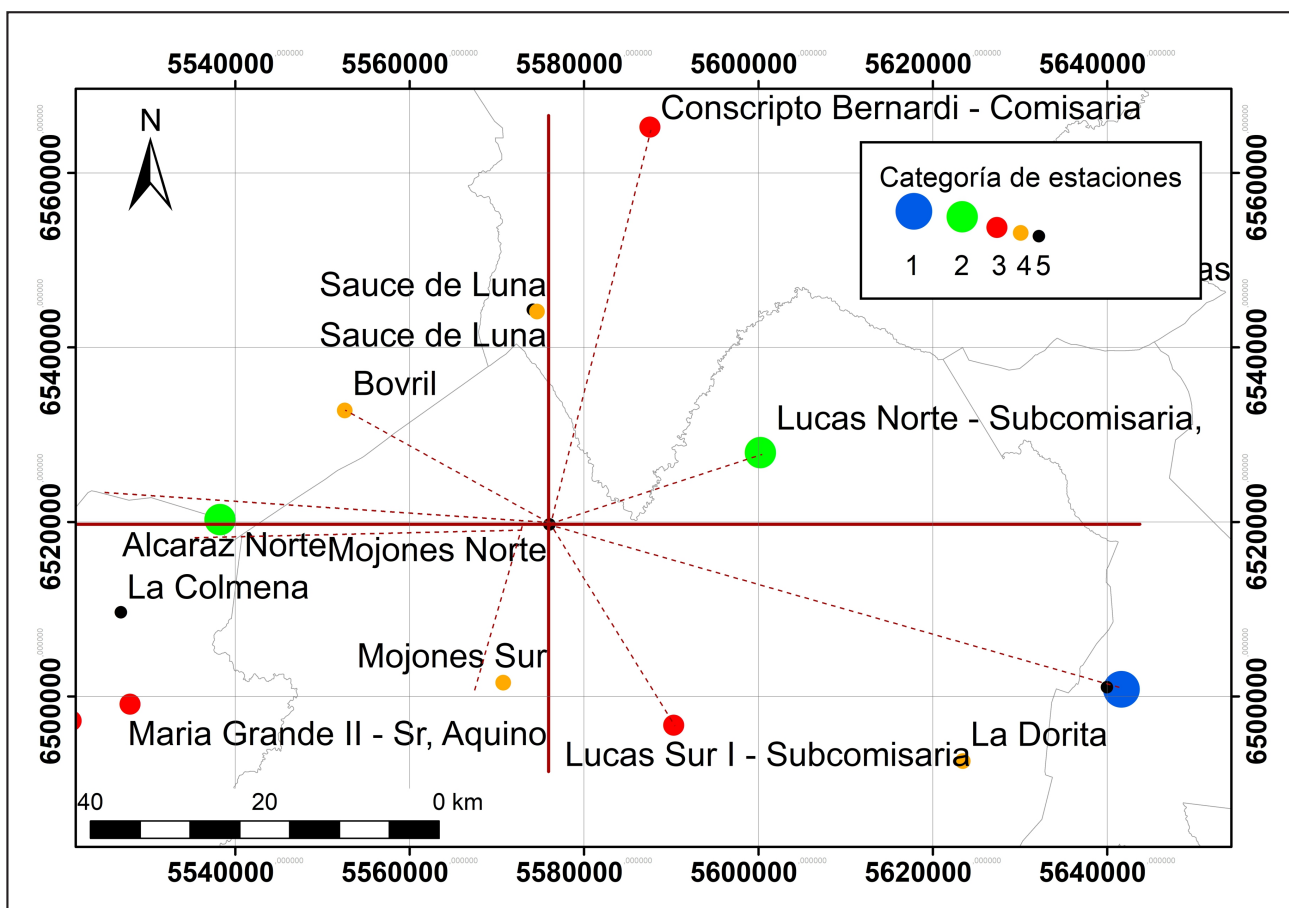


Figura 5. Ubicación de pluviómetros para el rellenamiento de datos.

ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN

Para cada subcuenca se generó una serie diaria de precipitaciones denominada “pluviómetro ficticio” (Caamaño et al., 2011). Cada registro diario es la PMA de la subcuenca para ese día, obtenida por el método de los polígonos de Thiessen. Este método considera la eventual falta de uniformidad en la

distribución de estaciones y provee mejores resultados en zonas de topografía suave y condiciones atmosféricas uniformes (Aparicio, 1997).

La PMA se calcula como la suma de los productos de la precipitación diaria de cada estación puntual por un coeficiente de proporción entre el área del polígono generado para esa estación y el área total de la cuenca o subcuenca considerada.

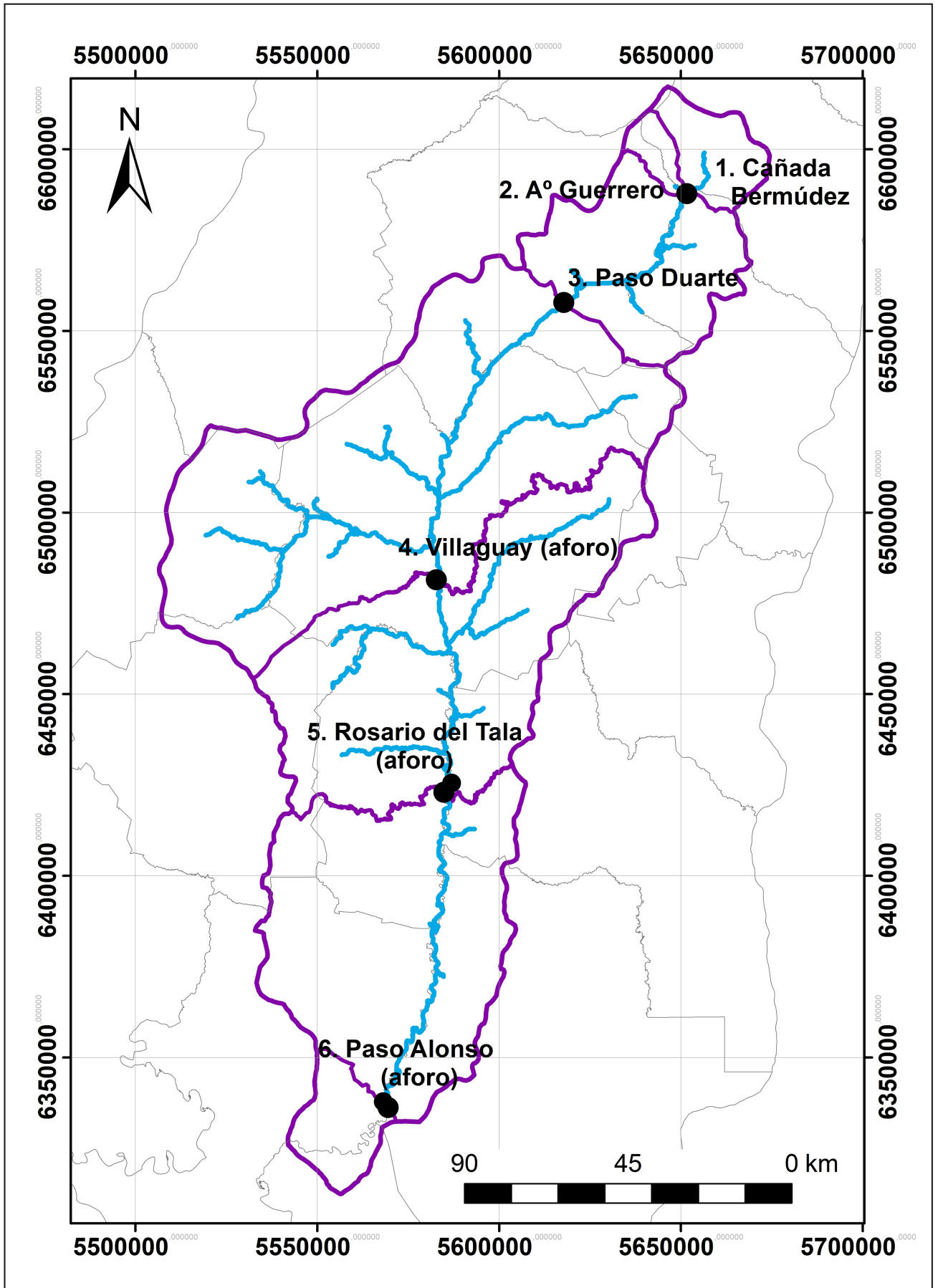


Figura 6. Delimitación de subcuencas del río Gualeguay.

En la Figura 7 se aprecia la PMA para el pluviómetro ficticio resultante en la cuenca del río Gualeguay para el período de estudio, año 1985 a 2016.

ANÁLISIS DE LAS SERIES

Se generaron las series de Precipitaciones Medias Areales Máximas Anuales (PMAMA), para cada subcuenca, utilizando los registros de los pluviómetros ficticios, para el año hidrológico septiembre-agosto para duraciones de tormenta de entre 1 y 4 veces el tiempo de concentración.

Se adoptaron 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 26, 30 y 35 días de duración de manera de garantizar el aporte de la

totalidad de las subcuencas del río Gualeguay consideradas en el punto de cierre.

La PMAMA es una serie en la cual el valor de precipitación para cada año hidrológico se obtiene como la máxima precipitación diaria acumulada para cada duración analizada en ese año.

Se efectuó un estudio estadístico de análisis de frecuencia sobre estas series de PMAMA que constan de 30 datos (un dato por año hidrológico). Para ello se analizaron distintos modelos de distribuciones de probabilidad a partir del software AFMULTI (*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL, 2017*), para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

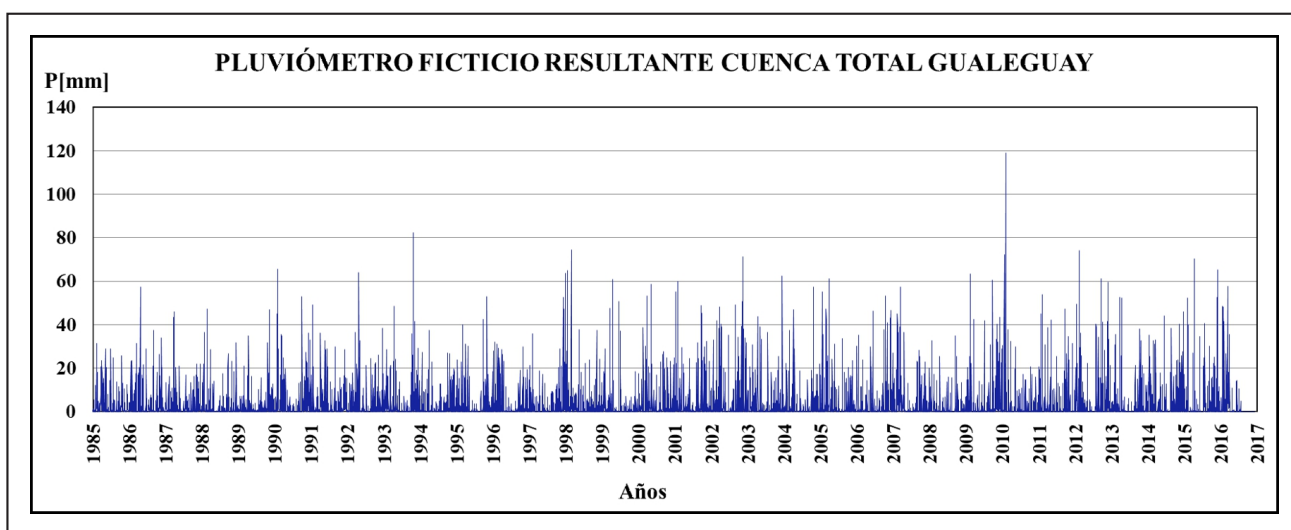


Figura 7. PMA para el Pluviómetro Ficticio resultante en la cuenca del Gualeguay. Año 1985 a 2016.

Tabla 4. Resultados del modelo AFMULTI para las precipitaciones de 1 día de duración para distintas funciones de distribución en la cuenca del río Gualeguay.

Probabilidad de ocurrencia	R [años]	VALOR DE LA VARIABLE PARA DIFERENTES RECURRENCIAS Y MODELOS					
		LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	LOG PEARSON	EXPONENC.
0,50	2	56,3	55,87	56,3	56,23	55,31	53,43
0,20	5	71,11	70,07	70,93	70,79	69,69	68,6
0,10	10	80,35	79,48	80,13	79,78	79,62	80,07
0,05	20	88,87	88,5	88,59	87,96	89,47	91,55
0,02	50	99,55	100,18	99,06	97,99	102,77	106,72
0,01	100	107,38	108,93	106,55	105,18	113,21	118,2

Tabla 5. Indicadores de bondad de ajuste y errores del modelo AFMULTI para las precipitaciones de 1 día de duración para distintas funciones de distribución en la cuenca del río Gualeguay.

	MODELOS DE DISTRIBUCIÓN					
	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	LOGPEARSON	EXPONENC.
KOLMOGOROFF	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	
CHI CUADRADO	—	—	—	—	—	—
ECMF	0,0452	0,0453	0,044	0,0441	0,052	0,0795
ECMV	42,82	40,19	42,85	43,74	38,72	48,57

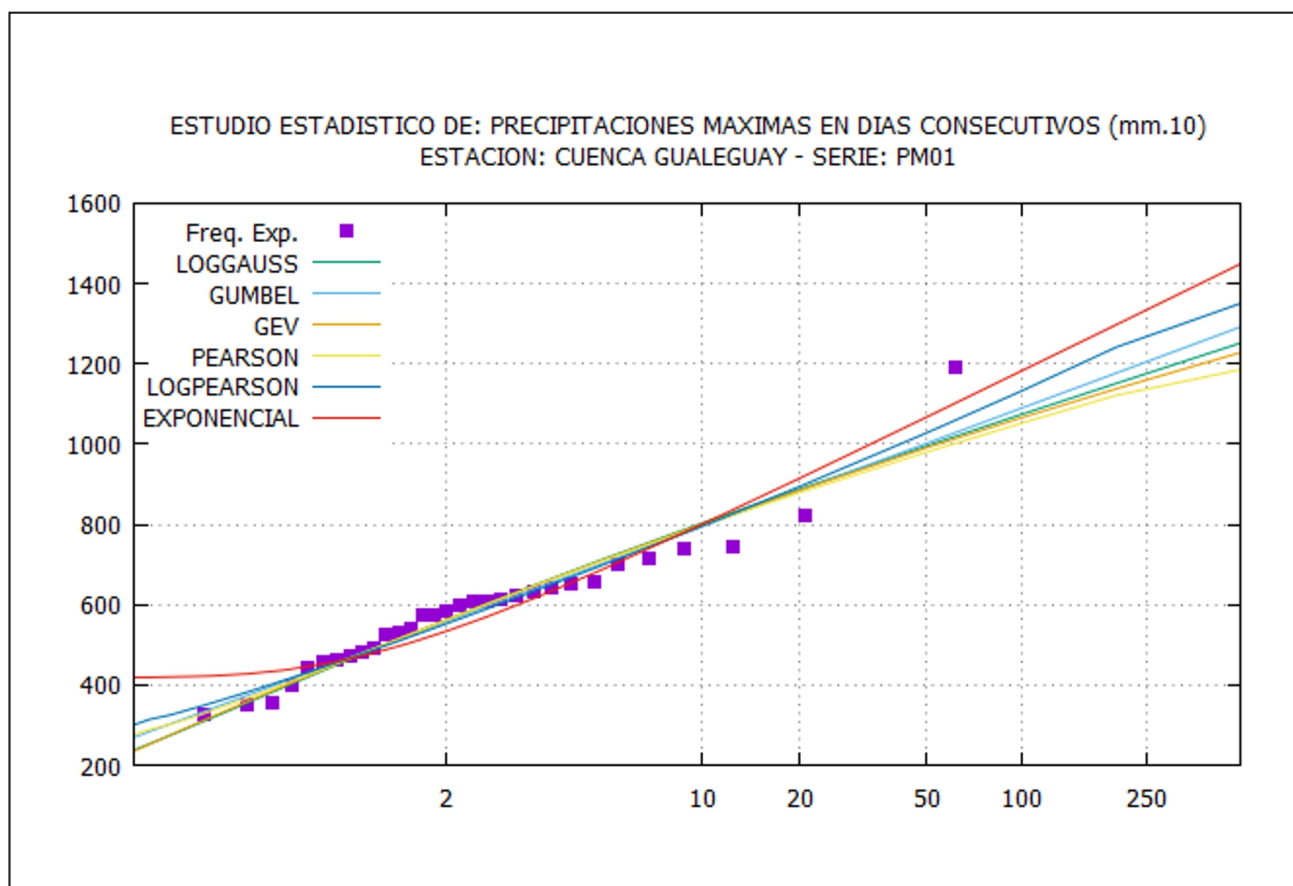


Figura 8. Salida gráfica del modelo AFMULTI para las precipitaciones de 1 día de duración para distintas funciones de distribución en la cuenca del río Gualeguay.

De esta manera se obtuvieron los valores de la variable para cada recurrencia y distribución analizada: LOGGAUSS, GEV, PEARSON, LOGPEARSON, GUMBEL, Y EXPONENCIAL. A modo de ejemplo, en la Tabla 4 y la Figura 8, se presentan los resultados del Programa AFMULTI para la cuenca total del río Gualeguay, para 1 (un) día de duración. En la Tabla 5 se presentan los indicadores para la misma.

A partir de la interpretación visual y el análisis de los indicadores de bondad de ajuste de cada distribución de probabilidad (Test Chi Cuadrado, Kolmogorof, Error Cuadrático Medio de la Frecuencia -ECMF-, Error Cuadrático Medio de la Variable -ECMV) se optó por la distribución GEV.

Para independizar las precipitaciones obtenidas de la hora de medición se aplicó un factor de corrección RT_n , que incorpora la diferencia entre el día pluviométrico y mediciones pluviográficas de 24 h de duración (Ecuación 1) que pudieran estar desfasadas (Zamanillo *et al.*, 2008). El factor queda definido según la Ecuación 2.

El valor de RT se recupera como "Relaciones RT de los pluviógrafos provinciales" del estudio de Zamanillo *et al.*, 2008; con valores de 1,16 para Concordia, 1,14 para Concepción del Uruguay y 1,15 para Paraná. Para el estudio se utilizó como valor promedio $RT= 1,15$ para efectuar la relación.

$$P_n = RT_n \times P_{\text{máx diaria}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$RT_n = 1 + \frac{(RT-1)}{n} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

- P_n : Precipitación para tormenta de n días de duración
- $P_{\text{máx diaria}}$: Precipitación máxima diaria de la subcuenca analizada (según distribución GEV)
- RT_n : Relación entre la precipitación de 24 h y n días de duración
- RT : Relación entre la precipitación de 24 h de duración y la precipitación diaria máxima.
- n : días de duración de la tormenta

Con los valores de precipitación según la distribución GEV, corregidos con el coeficiente RT_n , se procedió al cálculo de las intensidades de precipitación en mm/h para para las 6 subcuencas, para duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 18, 21, 26, 30 y 35 días; y recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Estos valores se ajustaron a través de una familia de curvas IDF las que debieron ser parametrizadas con el objeto de otorgarles la flexibilidad necesaria para su utilización en cualquier modelo lluvia-escorrentía (Borsellino *et al.*, 2005).

Las curvas IDF, obtenidas según el Método Chicago, son definidas mediante una expresión matemática del tipo representado en la Ecuación 3, para cada recurrencia.

$$i = \frac{A}{(d+B)^C} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde

i: intensidad de lluvia correspondiente a una duración d y tiempo de recurrencia T

d: duración de lluvia en minutos

A, B, C: coeficientes empíricos

Los coeficientes empíricos A, B y C se obtuvieron a partir de los datos de intensidad de precipitación para cada duración y recurrencia, con la herramienta de software ARHYMO (CRA del INCyTH, 1975).

En la Tabla 6 se presentan las intensidades calculadas y los coeficientes obtenidos para la cuenca del río Gualeguay.

RESULTADOS

Se obtuvieron las expresiones matemáticas para las relaciones IDF para cada recurrencia analizada para los pluviómetros ficticios que registran la PMA sobre la cuenca completa y las 6 subcuencas en estudio. En la Figura 9 se presentan las gráficas de las curvas IDF correspondientes a la cuenca total del río Gualeguay. La Tabla 7 presenta los coeficientes para las expresiones del tipo de la Ecuación 3 que representan las familias de curvas para cada subcuenca analizada.

A modo de ejemplo, se presenta la ecuación (4) que es la expresión de la intensidad de precipitación en [mm/h] para una recurrencia de 10 años para la subcuenca Villaguay, donde d es la duración de precipitación en minutos:

$$i = \frac{344,672}{(d+3,006)^{0,603}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Tabla 6. Intensidad para distintas recurrencias. Estación ficticia Cuenca total río Gualeguay.

Intensidad [mm/h]	Recurrencia [Años]						
	d [h]	2	5	10	20	50	100
24		2,70	3,40	3,84	4,24	4,75	5,11
48		1,79	2,26	2,55	2,83	3,16	3,41
96		1,10	1,46	1,70	1,94	2,25	2,50
144		0,83	1,10	1,29	1,46	1,68	1,85
192		0,71	0,92	1,05	1,17	1,31	1,41
240		0,59	0,79	0,92	1,06	1,23	1,37
288		0,54	0,71	0,83	0,94	1,09	1,20
336		0,50	0,65	0,76	0,85	0,97	1,06
432		0,45	0,60	0,70	0,79	0,90	0,99
504		0,41	0,56	0,65	0,73	0,84	0,91
624		0,38	0,50	0,56	0,62	0,69	0,73
720		0,36	0,46	0,52	0,57	0,63	0,66
840		0,33	0,43	0,50	0,55	0,62	0,66
Coefficientes	A	199,119	231,502	255,39	286,615	321,359	506,653
Curvas IDF	B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
	C	0,599	0,587	0,582	0,583	0,581	0,618

Si analizamos por ejemplo un período de retorno de 50 años, que es una recurrencia usualmente utilizada en diseño de obras de arte menores, podemos determinar la intensidad de precipitación para tormentas de distintas duraciones. A modo

de ejemplo, se calculan las intensidades para precipitaciones de 1,2,4,8,12,18,21,30 y 35 días de duración para cada subcuenca para 50 años de recurrencia.

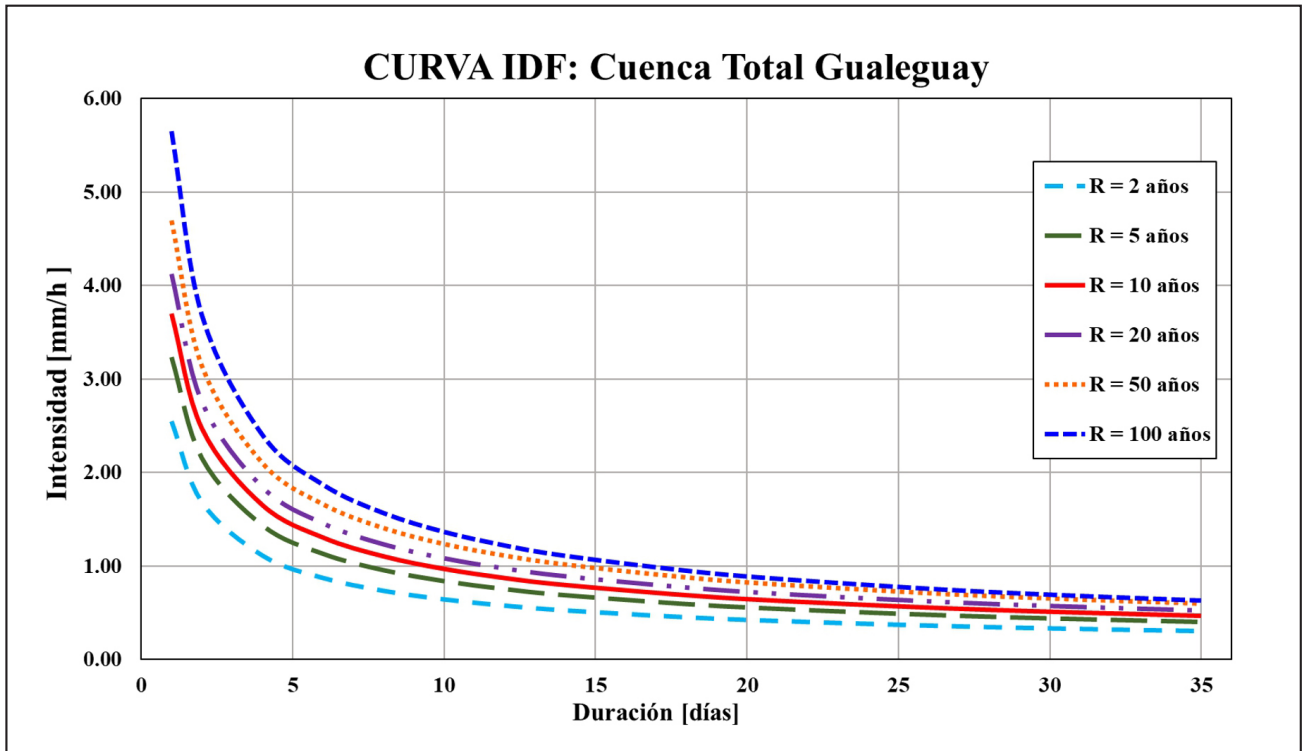


Figura 9. Relación intensidad-duración-recurrencia para la estación pluviométrica ficticia en la Cuenca total del río Gualeguay.

Tabla 7. Coeficientes empíricos de la familia de curvas IDF para cada subcuenca analizada.

Subcuenca	Área [km ²]	Coeficientes Empíricos IDF	Recurrencia [Años]					
			2	5	10	25	50	100
Subcuenca Cañada Bermúdez	610	A	547,406	755,859	929,273	1088,936	1317,69	1529,46
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,676	0,675	0,679	0,68	0,683	0,687
Arroyo Guerrero	818	A	559,862	737,533	861,703	1000,524	1193,144	1330,417
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,679	0,676	0,675	0,678	0,681	0,682
Paso Duarte	2971	A	307,665	365,579	405,488	460,216	543,792	616,472
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,623	0,611	0,607	0,607	0,609	0,612
Villaguay	10.863	A	248,264	310,155	344,672	376,622	428,724	459,407
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,615	0,608	0,603	0,599	0,596	0,593
Rosario del Tala	16.098	A	232,829	271,045	306,813	345,212	397,608	442,531
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,61	0,596	0,594	0,593	0,593	0,595
Paso Alonso	21.239	A	193,476	229,503	265,98	305,471	377,095	433,511
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,592	0,582	0,583	0,586	0,596	0,602
Cuenca total	21.552	A	199,119	231,502	255,39	286,615	321,359	506,653
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,599	0,587	0,582	0,583	0,581	0,618

Tabla 8. Intensidades de precipitación calculadas para cada subcuenca para distintas duraciones y 50 años de recurrencia.

Intensidad de Precipitación [mm/h]		Duración de la tormenta de diseño en días								
Subcuenca	Área [km ²]	1	2	4	8	12	18	21	30	35
Cañada Bermúdez	610	9,16	5,71	3,56	2,22	1,68	1,27	1,15	0,90	0,81
Arroyo Guerrero	818	8,42	5,25	3,28	2,05	1,55	1,18	1,06	0,83	0,75
Paso Duarte	2971	6,48	4,25	2,79	1,83	1,43	1,12	1,02	0,82	0,74
Villaguay	10863	5,61	3,72	2,46	1,63	1,28	1,00	0,92	0,74	0,68
Rosario del Tala	16098	5,32	3,53	2,34	1,55	1,22	0,96	0,88	0,71	0,65
Paso Alonso	21239	4,94	3,27	2,16	1,43	1,12	0,88	0,81	0,65	0,59
Cuenca total	21552	4,69	3,14	2,10	1,40	1,11	0,88	0,80	0,65	0,60

CONCLUSIONES

Se obtuvo una base de datos depurada de la red de estaciones pluviométricas para la cuenca en estudio, generada en plataforma SIG, que permitió su análisis espacial.

El análisis previo de disponibilidad y calidad de los registros pluviométricos de la cuenca permite concluir que, en términos de valores medios, la mayor proporción de estaciones tienen entre 15 y 20 años de registros completos, existiendo sólo una estación interior de categoría 1 con 30 años de observaciones. Esto representa un volumen de información aceptable, sin embargo, la distribución espacial es heterogénea, existiendo extensas áreas sin cobertura pluviométrica adecuada, principalmente en el centro y sur de la cuenca.

Las intensidades calculadas con las expresiones de las curvas IDF desarrolladas para las subcuencas denotan una marcada proporcionalidad inversa a la extensión de la subcuenca analizada. Los valores de intensidad obtenidos para las subcuencas más pequeñas (de hasta 1000 km²), llegan a ser alrededor de un 25 a 70 % mayores (e incluso más) que las intensidades calculadas para las subcuencas de mayor extensión (entre 10.000 y 25.000 km²), disminuyendo este porcentaje a medida que aumenta la duración de la tormenta. Esto es coincidente con

la atenuación espacial de las precipitaciones, manteniéndose la tendencia para las distintas recurrencias en análisis.

Las familias de curvas IDF obtenidas representan un avance hacia un mayor conocimiento de las características hidrológicas regionales. Son una herramienta para el diseño de obras de infraestructura, a partir de la estimación de caudales mediante modelos hidrológicos ajustados a las condiciones de precipitación locales. Ello posibilita un mejor aprovechamiento de los recursos económicos y ambientales disponibles, ya que permite una mejor predicción de, por ejemplo, caudales de escorrentía o cotas de inundación, conlleva mayores certidumbres y soluciones más económicas a la hora de proyectar obras hidráulicas. Todo esto redundará en un beneficio para las poblaciones alcanzadas por las obras y puede ser utilizada como información valiosa para un mejor planeamiento territorial.

Cabe destacar que estas curvas generadas a partir del registro de precipitaciones son indispensables para la comprensión de dicho fenómeno, la prevención del riesgo de catástrofes y el diseño de obras de interés para la sociedad como son las obras hidráulicas (puentes, alcantarillas, redes de drenaje, presas), viales, ferroviarias y de defensa e incluso una herramienta en la planificación territorial. Por ello es de fundamental importancia que se mantenga una política sostenida de medición de datos pluviométricos que permita retroalimentar el sistema.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

APARICIO, F., 1997.

Fundamentos de Hidrología de Superficie.
Balderas, México: Limusa.

BORSELLINO, M. J., MATTAR M. T. Y OLMOS L. A., 2005.

Estimación de CURVAS I-D-F para datos de lluvias a nivel diario.
Aplicación a la región centro-oeste de Santiago del Estero. Argentina.

CAAMAÑO NELLI, G. Y DASSO, C. M., 2011.

Lluvia de diseño sin atenuación de datos locales para una cuenca.
Cuadernos del CURIHAM (pp. 83-93). Rosario, Argentina.

CASAS CASTILLO M. CARMEN, 2005.

Análisis espacial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya.
Modelización y clasificación objetiva. Barcelona: Departament d'Astronomia i Meteorologia Universitat de Barcelona.

CENTRO REGIONAL ANDINO DEL INSTITUTO DE CIENCIA Y TÉCNICA HÍDRICAS (INCYTH-CRA). (1975).

ARHymo [Software].

FACULTAD DE INGENIERÍA Y RECURSOS HÍDRICOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL. (2017).

Afmulti. [Software].

- KIRPICH, Z.P., 1940.
Time of concentration of small agricultural watersheds.
Journal of Civil Engineering (Vol.10 (n.6). p. 362).
- OMM N°8, 2008.
Guía de Instrumentos Meteorológicos y Métodos de Observación.
Séptima Edición. Ginebra.
- OMM N°100, 2011.
Guía de Prácticas Climatológicas: Tiempo, Clima, Agua (p. 2-12).
Tercera Edición. Ginebra.
- PIZARRO T., R.; ABARZA M., A.; FARIAS D., C.; JORDAN D., C., 2003.
Construcción de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) en zonas semiáridas de Chile central.
XII Congreso Forestal Mundial, Québec City, Canadá.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM, (2019).
QGIS Geographic Information System.
Open Source Geospatial Foundation Project 3.4.10-Madeira. [Software]. <https://qgis.org>.
- ZAMANILLO, E. A.; LARENZE, G. R.; TITO, M. J.; PÉREZ, M. M. Y GARAT, M. E., 2008.
Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos.
Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional.