

Regionalización de láminas de lluvias máximas diarias y parámetros estadísticos en el noroeste de Argentina

Nicolás F. Guillén^{2,3}, M. Cecilia Botelli¹, Carlos M. García^{2,3}, Carlos G. Catalini⁴

¹Universidad Católica de Salta - Grupo de Investigación de Gabinete de Hidráulica e Instalaciones Sanitarias), Campo Castañares –Salta- República Argentina.

²CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua- Universidad Nacional de Córdoba-Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁴Universidad Católica de Córdoba - Grupo de Investigación de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobrementemente Aforadas (UCC -EHCPA) Camino a Alta Gracia km 7 ½, (X5016DHY), Córdoba República Argentina.

E-mail: nfguillen@hotmail.com

RESUMEN: Actualmente, el noroeste argentino no cuenta con herramientas normalizadas para predecir los parámetros de diseño hidrológico de las medidas estructurales y no estructurales requeridas para mitigar la amenaza hídrica; por lo que cada proyectista utiliza los datos disponibles y metodologías de predicción diferentes, según su grado de experiencia y criterio. Esta problemática, hace que se requiera contar con variables de diseño homogeneizados, estimados con metodologías estandarizadas de predicción disponibles en una interfaz amigable.

Este trabajo se desarrolló en el marco de un esfuerzo conjunto entre el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba, y las Universidades Católicas de Salta y Córdoba, con el fin de estimar el valor de la lámina de lluvia diaria de diseño de las provincias de Salta, Jujuy, Catamarca, Tucumán y Santiago del Estero; a través de un análisis de regionalización.

Hasta el momento se analizaron registros de 349 estaciones pluviométricas disponibles en la región de estudio. A partir de estos registros se elaboraron las series de máximos diarios anuales. Luego se verificaron las hipótesis estadísticas básicas (presencia de datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad) que debe cumplir una muestra para que tenga validez el análisis de estadística inferencial. Finalmente se seleccionaron registros de 193 estaciones que verificaron las hipótesis propuestas. Sobre los registros seleccionados se realizaron ajustes a 6 funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lámina de lluvia para los periodos de retorno entre 2, y 100 años, y los intervalos de confianza asociados a cada predicción. Se seleccionó la función Log Normal como óptima y se cuantificaron las diferencias relativas en la predicción debido a esta hipótesis. Los valores de lámina de lluvia diaria se regionalizaron en toda la región de estudio con un Sistema de Información Geográfica.

INTRODUCCIÓN

El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo. El diseño hidrológico se puede utilizar para mitigar amenazas hidrológicas proyectando medidas “estructurales”, tal es el caso de una represa para el control de crecientes, sistemas de control de excedentes pluviales en obras viales, entre otras, o bien, desarrollando medidas “no estructurales” como ser la determinación de áreas de riesgo, entre otros.

La escala de diseño hidrológico es el rango en magnitud de la variable de diseño dentro del cual se debe seleccionar un valor para determinar el flujo de entrada al sistema. Los factores determinantes en la selección de este valor para una obra civil, son el costo y la seguridad asociada. Sobredimensionar las obras es antieconómico, mientras que sub-dimensionar las mismas pueden ocasionar fallas con resultados catastróficos. La magnitud óptima para el diseño es aquella que equilibra criterios de costo y seguridad.

Generalmente al diseño hidrológico se lo utiliza para la estimación de la Creciente de Proyecto. Sin embargo la estimación de los caudales escurridos en la creciete de proyecto está afectada por la insuficiencia estadística de los registros históricos de caudales, lo cual lleva a evaluar indirectamente estos caudales mediante el uso modelos de transformación lluvia – caudal (P-Q), los cuales son alimentados por eventos hipotéticos críticos (lluvias de diseño). Si bien tienen otros componentes, estas lluvias de diseño parten de un vínculo esencial entre los rasgos característicos de la precipitación: la función intensidad-duración-Recurrencia (i-d-T). Las relaciones i-d-T y el patrón de distribución temporal de las lluvias, requeridos para estimar Crecientes de Proyecto, solo se pueden extraer de extensos registros de alta frecuencia, normalmente fajas pluviográficas. Aun remplazando caudal por intensidad de lluvia se continúa teniendo un problema, ya que las series pluviográficas largas también son escasas, aunque menos que las hidrométricas. En cambio, es habitual otro dato de lluvia provisto por pluviómetros: la lámina de lluvia diaria. De esta manera, los técnicos y proyectistas pueden proceder a la estimación mediante un análisis de estadística inferencial de las láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno, a partir de las series de datos pluviométricos registrados en diversos puntos de la cuenca.

En este trabajo lo que se hizo fue estimar la lámina de lluvia máxima diaria asociada a diferentes periodos de retorno en el noroeste argentino. A partir de ella, puede calcularse la lámina máxima asociada a una duración diferente (utilizando un coeficiente de reducción o maximización) y a partir de ella si calcular mediante un modelo de transformación P-Q, el caudal de diseño.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es la elaboración de mapas digitales de lluvias máximas diarias asociados a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años para el noroeste de Argentina. A continuación se detalla de manera resumida la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar el objetivo citado.

METODOLOGIA

La metodología utilizada se puede resumir de la siguiente manera:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones pluviométricas existentes.
2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas preseleccionadas.
3. Determinación del año hidrológico para la región de estudio.
4. Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.
5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas lluvias diarias seleccionadas tales como independencia, estacionalidad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series.
6. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
7. Análisis de estadística inferencial mediante el ajuste de distribución de probabilidad.
8. Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
9. Generación de mapas tendenciales digitales de máximas láminas de lluvia diaria de distintos periodos de retorno.

A continuación se describe en detalle cada una de las actividades:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones pluviométricas existentes.

Se recopiló información de la lámina de lluvia diaria precipitada, la misma se obtuvo de las estaciones pluviométricas instaladas en las diferentes provincias de la región de estudio. Para la obtención de datos se recurrió a diferentes fuentes como:

- Páginas web, en su mayoría pertenecientes a entidades gubernamentales, donde se encuentran datos históricos de lluvia diaria:

<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmFiltro.aspx>

<http://dev.siaa.gov.ar/series>

<http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/>

<http://www.tutiempo.net/clima/Argentina/AR.html>

- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

- Secretarías de Recursos Hídricos de las diferentes provincias.

En total se analizaron 349 estaciones pluviométricas dentro del territorio. Luego se realizó una preselección, de acuerdo a cada longitud de serie de las estaciones para continuar con el análisis. El criterio de Longitud de Serie consistió, en un principio, en fijar veinte años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar. Este condicionante, implica rechazar puestos pluviométricos disponibles, por lo que se adopta como criterio final la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a catorce años. Esta longitud mínima coincide con lo definido para estudios similares realizados en otras provincias de Argentina.

La Tabla 1 y la Figura 1 permiten visualizar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, mayores o igual a catorce años y mayor o igual de veinte. Así, por otra parte, existen 186 estaciones con más de catorce años de registro, conformando el 53% del total. Este porcentaje de estaciones son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Tabla 1.- Frecuencias de las estaciones pluviométricas en función de su longitud de serie.

Longitud de serie		
Estaciones con datos	349	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	163	47%
Longitud de serie ≥ 14	186	53%
Longitud de serie ≥ 20	147	42%

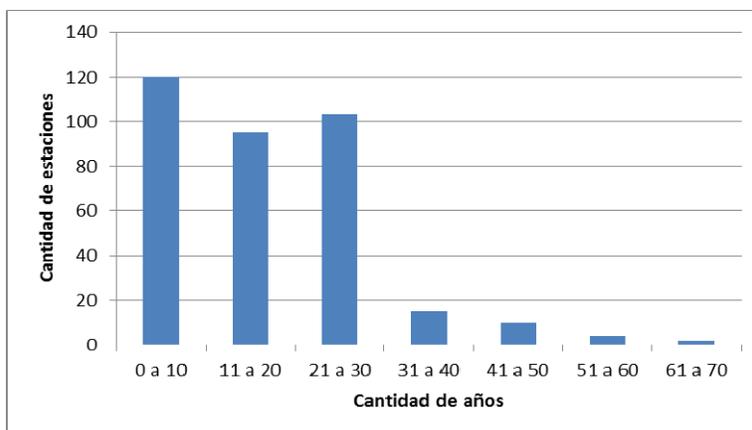


Figura 1.- Longitud de registro de las estaciones pluviométricas recopiladas inicialmente.

2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.

En la Figura 2 puede apreciarse la disposición espacial de las mismas pre-seleccionadas. Puede observarse una mayor concentración en la zona centro de Salta, este de Catamarca y en Santiago del Estero. En esta instancia del desarrollo del trabajo no se incluyeron estaciones en el sector de la Puna (oeste de Salta, Catamarca y Jujuy).

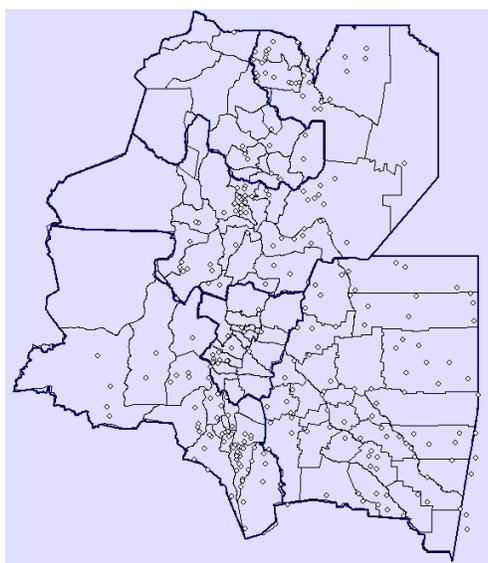


Figura 2.- Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas.

3. Determinación del año hidrológico para la región en estudio.

Para el análisis y procesamiento estadístico de las lluvias es recomendable dividir las series históricas en “años hidrológicos”. Este concepto, se define como el período anual que no fracciona el ciclo estacional de lluvia, pudiendo ser distinto al año calendario. Se observó, para los registros encontrados, que las máximas lluvias se daban entre los meses de Octubre a Abril, por ende, para el análisis se optó por determinar cómo año hidrológico al periodo desarrollado de Julio a Junio del año (calendario) siguiente.

4. Generación de la serie hidrológica de láminas de lluvias máximas diarias.

Luego de fijar el año hidrológico se elaboraron las series hidrológicas de máximos anuales de lámina de lluvias diarias. Se pudo determinar que los máximos de lluvia máxima diaria ocurrieron generalmente entre los meses de Octubre y Abril, inclusive. Por ello cuando no se contaba con datos en algunos de esos meses, se prescinde de ese año hidrológico, dado que en esos meses es probable que se dé la precipitación máxima anual, lo que podría ocasionar subestimaciones en los análisis estadísticos que se realizarán sobre ellas.

5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas anuales de lluvia diaria.

5.1. Detección de presencia de datos Atípicos.

Las series de máximos anuales de lluvia diaria de las 186 estaciones pluviométricas preseleccionadas que tenían una longitud de serie acorde fueron sometidas a la detección de datos atípicos. Si las series tenían uno o más valores atípicos, estos se removían y se realizaba el test nuevamente; y si luego de ello seguían

existiendo datos atípicos, la serie era descartada. Caso contrario, en el caso que la serie verifique esta prueba, se pasaba al siguiente test. De todas las estaciones analizadas, 12 no han pasado esta prueba (Ver tabla 2) y fueron descartadas. Dicha eliminación representa el 6% de las estaciones que tenían una longitud de serie acorde.

Tabla 2.- Estaciones pluviométricas que no pasaron la prueba de detección de presencia de datos atípicos.

Estaciones pluviométricas
El Ceibal
Presidente Roque Sáenz Peña Aeródromo
Toropan
Ancocha
Urutau
Roversi
La Fragua
Nueva Esperanza
San Francisco
Palo Negro
Garza
Tacañitas

5.2. Prueba de Independencia.

Las 174 estaciones que verificaron la hipótesis anterior fueron sometidas a la prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz). En la Tabla 3 se muestran las estaciones depuradas. Del total de estaciones analizadas 6 estaciones no pasaron la prueba, lo cual constituye el 3% del total de estaciones que verificaron datos atípicos.

Tabla 3.- Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios.

Estaciones pluviométricas
Tinogasta
Tuc-Tuca
Lules – Potrero de las Tablas
Frias
Santa Catalina
Brea Pozo

5.3. Prueba de Estacionalidad.

Las 168 estaciones que verificaron la hipótesis anterior fueron sometidas a la prueba de estacionalidad. En la Tabla 4 se muestran las estaciones depuradas. Del total de estaciones analizadas 9 estaciones no pasaron la prueba, lo cual constituye el 5% del total de estaciones que verificaron independencia.

Tabla 4.- Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Estacionalidad de sus valores máximos diarios.

Estaciones pluviométricas
Los Sosas – Ruta Provincial
Pavas – Las Mesadas
Nazareno
Poscaya
Peña Alta
Yuchan
Quimili
Ahí Veremo
Brea Pozo

5.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las 159 estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos. En la Tabla 5 se muestran las estaciones depuradas. Del total de estaciones analizadas solo una no pasó la prueba, lo cual constituye el 1% del total de estaciones que verificaron estacionalidad.

Tabla 5.- Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Homogeneidad de sus valores máximos diarios.

Estaciones pluviométricas
Peñas Bayas

Finalmente se decidió descartar la estación “Jujuy Aeródromo” debido a que esta presentaba problemas en los registros de lluvia, como ser 6 datos de lluvias que superan los 350 mm, lo cual se considera un registro excesivo. Debido a esta anomalía se decidió prescindir de la estación en cuestión (Ver Tabla 6). Como hay varios datos dudosos (con registro excesivo), estos no son detectados por el test que detecta los datos atípicos.

Tabla 6.- Estación que mostraba datos dudosos.

Estaciones Pluviométricas
Jujuy Aeródromo

De esta manera se concluye que de las 349 estaciones pluviométricas de las cuales se partió este trabajo, 157 pasaron las pruebas representando estas el 45% del total. En la Figura 3 se puede observar la distribución espacial de las estaciones que pasaron las pruebas.

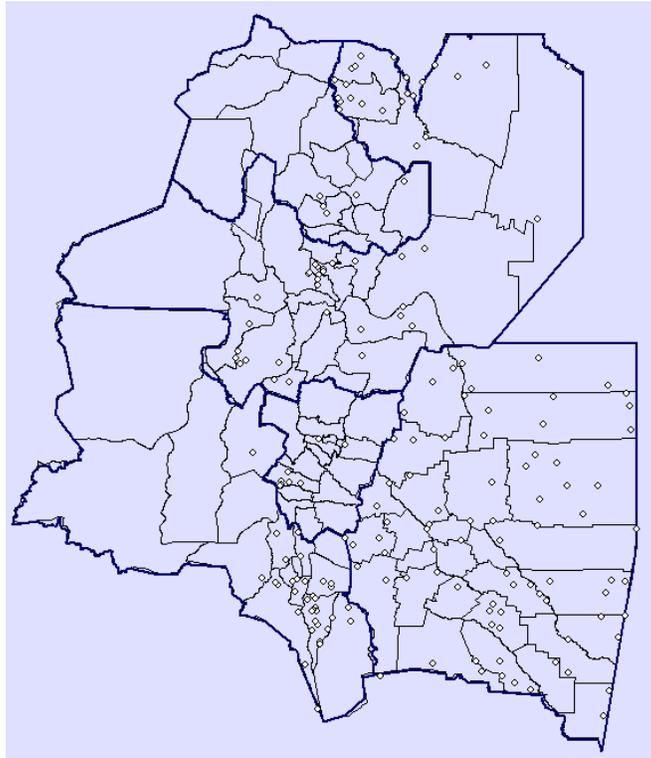


Figura 3.- Estaciones finalmente seleccionadas.

6. Análisis de estadística descriptiva

De cada una de las estaciones finalmente seleccionadas, se calcularon los datos estadísticos más importantes de las series anuales de máximos de lluvia diaria: Valor máximo observado en la serie, promedio aritmético y desvío estándar para las series.

7. Análisis de estadística inferencial.

En primer lugar, se determinaron las probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual observado, utilizando la Ecuación de Weibull en cada estación pluviométrica.

Luego, dichos datos se ajustaron a las 6 funciones de distribución de probabilidad teóricas siguientes:

- a) GEV (Método de Máxima Verosimilitud).
- b) Gumbel (Método de Máxima Verosimilitud).
- c) Log. Normal (Método de Máxima Verosimilitud).
- d) GEV (Método de Momentos).
- e) Gumbel (Método de Momentos).
- f) Log Pearson tipo III (Método de Momentos).

Debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina (Belli et al., 2012; Caamaño Nelli y Dasso, 2003; Catalini et al., 2010; Catalini et al., 2012), es que se adopta la misma función de distribución adoptada en esos estudios: Log Normal con parámetros ajustados por el método de Máxima Verosimilitud para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales.

Se analiza a continuación la relación existente entre la longitud de la serie de las estaciones seleccionadas con más de 14 años de datos versus la máxima diferencia porcentual entre los valores de lámina de lluvia para 100 años de periodo de retorno existente entre la función Lognormal y la función que arroja el valor de lámina más lejano a esta distribución adoptada. Se puede observar en la Figura 4 que la máxima diferencia de los valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la Log Normal disminuye a medida que aumenta la longitud de registro.

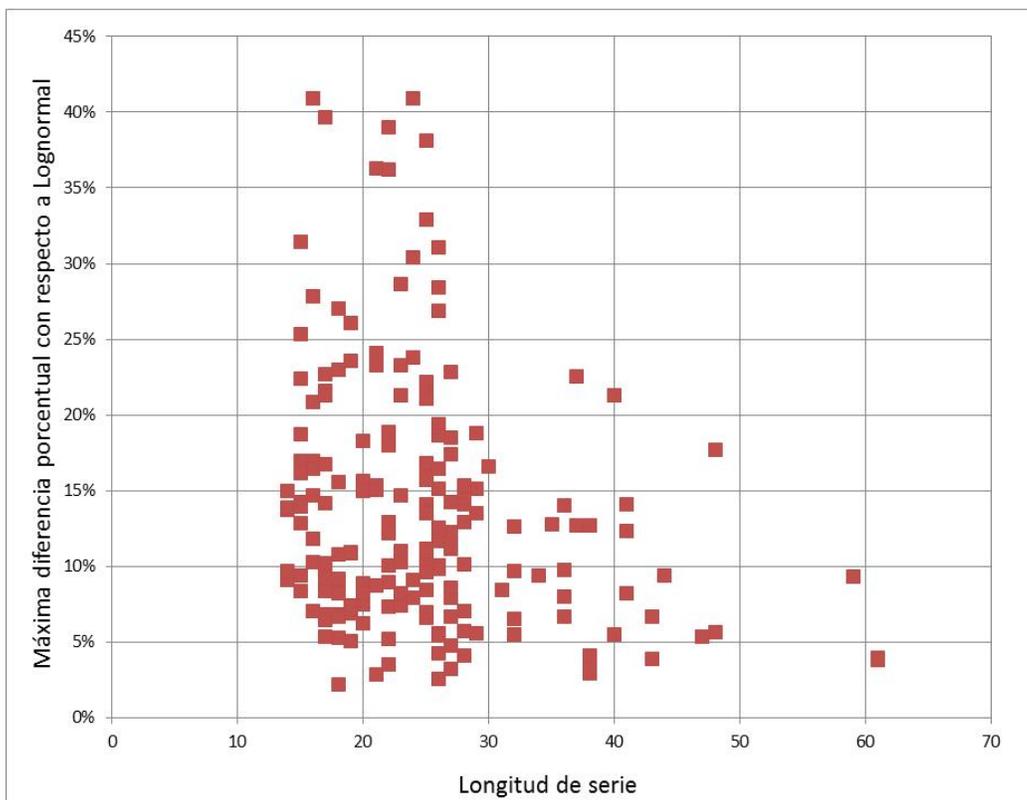


Figura 4.- Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y las otras funciones ensayadas a medida que aumenta la longitud de la serie, para la provincia de Catamarca.

A continuación se analizará la validez de adoptar la distribución Lognormal para relacionar la lámina de lluvia a diferentes recurrencias. Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se realiza un análisis para 100 años de periodo de retorno. Se elige este valor (y no los asociados a otros periodos de retorno) por ser el que más diferencia muestra en relación a los demás. En este análisis se compara la diferencia porcentual mostrada en la Figura 4 con un valor denominado “Incertidumbre del método Lognormal” representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado

como la diferencia relativa (límite superior – valor medio) / valor medio. En la Figura 5 se puede ver el análisis realizado. Así se verifica que todas las funciones de distribución se hallan dentro del intervalo de confianza de la función Lognormal.

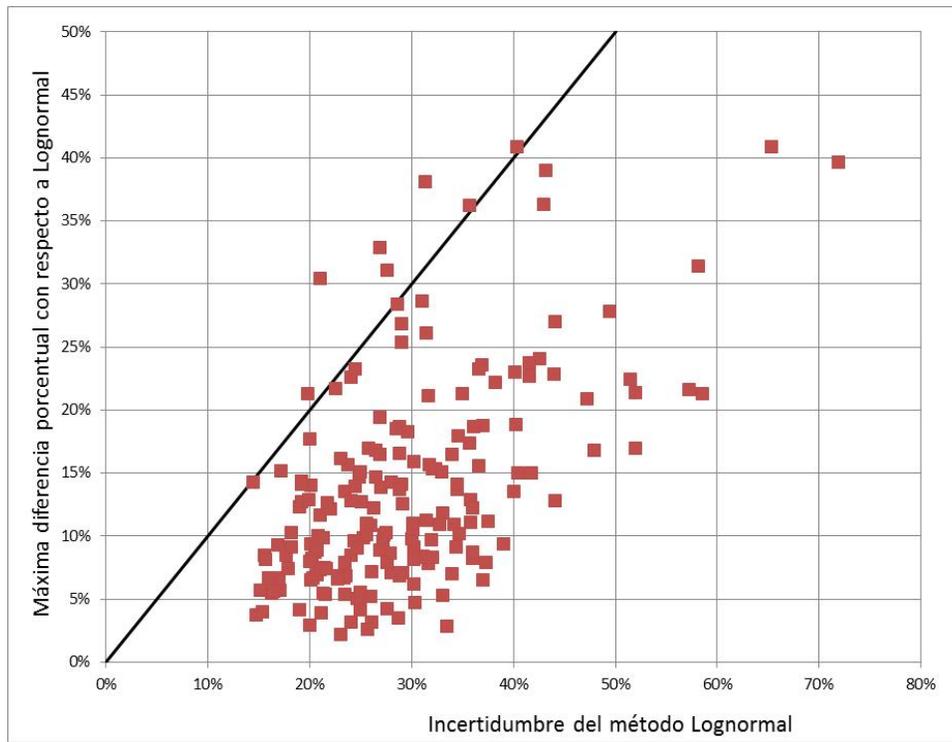


Figura 5.- Contraste entre de la máxima diferencia porcentual observada entre los valores estimados con la distribución LogNormal (denominada Máxima diferencia porcentual) y la “Incertidumbre del método Lognormal” representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado como la diferencia relativa (límite superior – valor medio) / valor medio.

8. Interpolación de la información puntual utilizando SIG

Con los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno en cada una de las estaciones pluviométricas se utilizaron técnicas de análisis espacial para poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el IdrisiSelva versión 17.00, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georreferenciado. Utilizando esta herramienta se realizó la interpolación espacial de los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno a través del método de Kriging. Específicamente este método permite generar archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectoriales anteriormente creados con la información de lluvia máxima diaria estimada para cada localización. La figura 6 muestra el Raster interpolado por el método Kriging para la precipitación diaria media máxima anual estimada para un período de retorno de dos años [en mm].

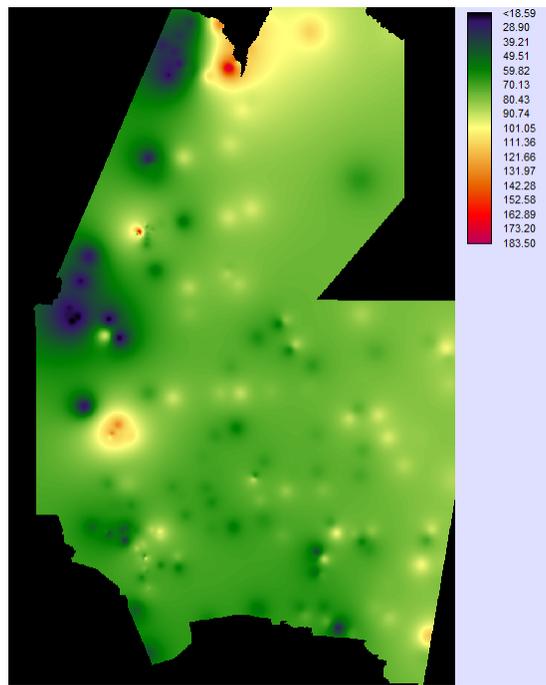


Figura 6.- Raster interpolado por el método Kriging para la Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años [en mm].

9. *Generación Mapas tendenciales de lluvias diarias máximas anuales para distintos periodos de retorno*

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de los valores medios de precipitación diaria para distintas recurrencias, se generó una imagen de superficie tendencial que suaviza las variaciones locales observadas. Esta imagen tendencial se construyó en base a realizar un ajuste polinómico de orden 3 (cubico) sobre la superficie obtenida anteriormente aplicando el método de Kriging.

RESULTADOS

En las Figuras 7 a 13 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados. Además se las superficies tendenciales obtenidas se observan las líneas de isohietas (cada una con una separación de 5 mm).

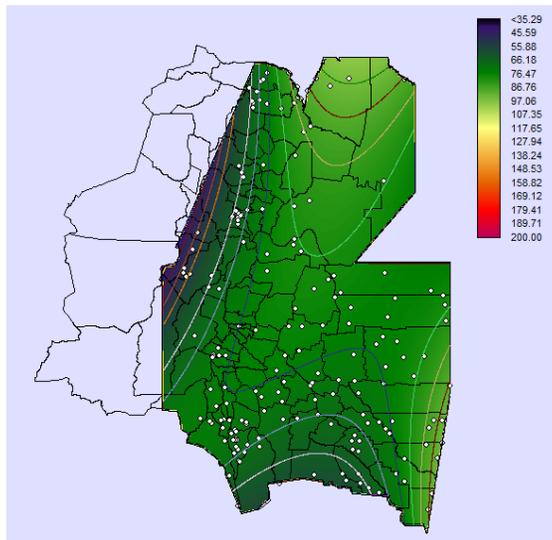


Figura 7.- Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 2$ años [en mm].

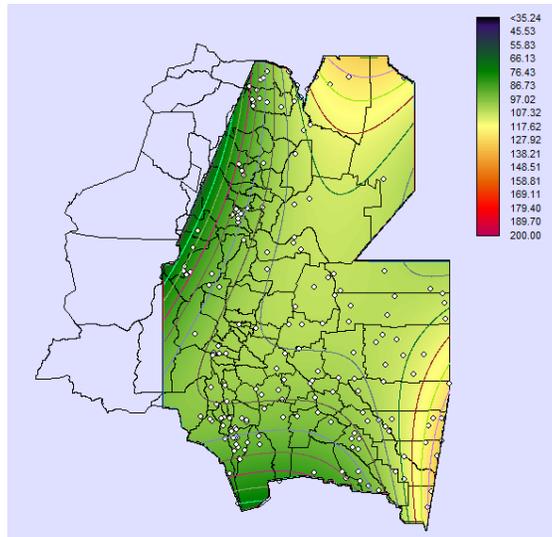


Figura 8.- Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 5$ años [en mm].

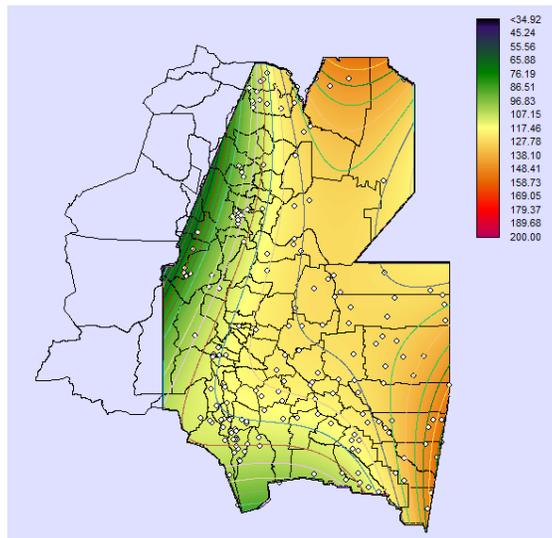


Figura 9.- Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 10$ años [en mm].

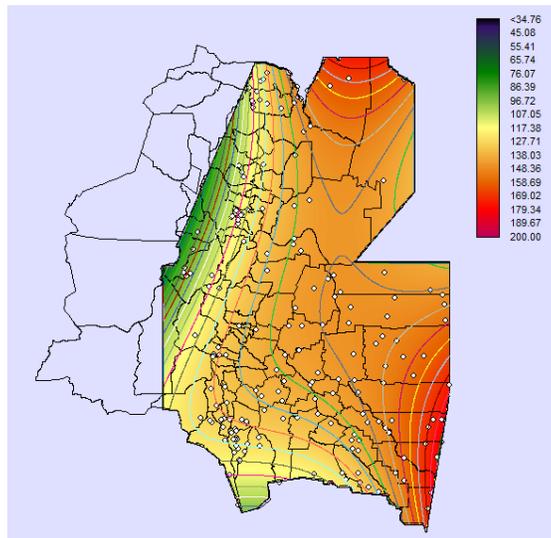


Figura 10.- Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=20$ años [en mm].

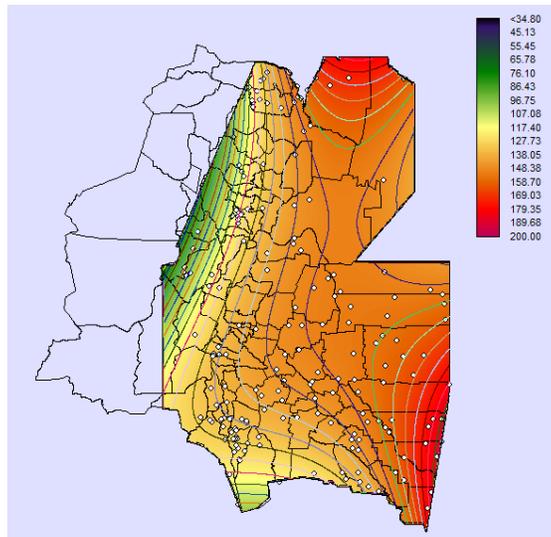


Figura 11.- Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=25$ años [en mm].

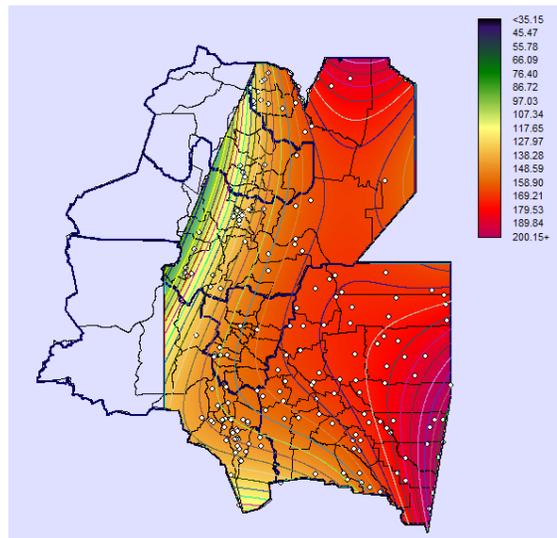


Figura 12.- Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=50$ años [en mm].

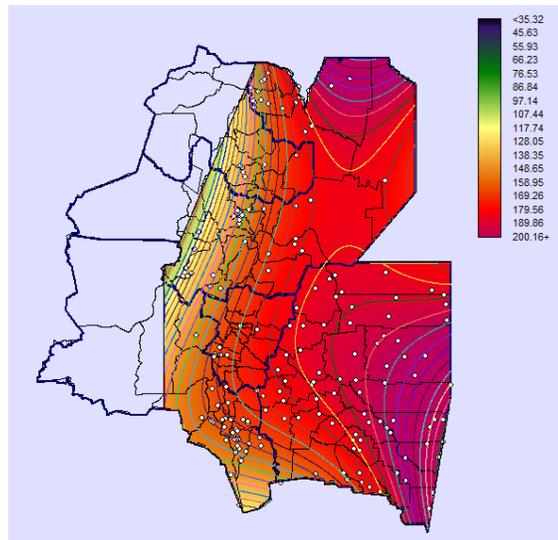


Figura 13: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno T= 100 años [en mm].

CONCLUSIONES

1. Se recopilaron y procesaron registros de 349 estaciones pluviométricas en la región de estudio.
2. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona de la Puna.
3. La determinación del año hidrológico Julio-Junio resultó ser el más adecuado para la región de estudio.
4. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de 157 estaciones verificaron estas pruebas
5. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verificó que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.
6. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva17.00.
7. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de valores anómalos en el espacio.
8. Se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno.

REFERENCIAS

- Audagna, Yael (2014). “Regionalización de lluvias máximas diarias en la provincia de Santiago del Estero” - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.
- Belli, Virginia Soledad; Cueto, César Agustín; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán

- Horacio (2012). "Regionalización de lluvias máximas – Aplicación a las provincias de Córdoba y Santa Fe" - Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería – Universidad Católica de Córdoba – Córdoba, Argentina.
- Caamaño Nelli, Gabriel; Dasso, Clarita (2003). "Lluvias de Diseño – Conceptos, Técnicas y Experiencias".
- Catalini, Carlos G.; Maidah, Andrea; García, Carlos M.; Caamaño Nelli, Gabriel (2010). "Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba".
- Catalini, Carlos G.; Caamaño Nelli, Gabriel E.; García Carlos M., Belli, Virginia Soledad; Bianchiotti, Bernabé; Cueto, César Agustín; Lérída, Gastón; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio; Sánchez, Ezequiel. (2012). "Regionalización Paramétrica De Funciones I-D-T. Aplicación A Las Provincias De Córdoba Y Santa Fe"
- Cervio, Magalí (2014). "Regionalización de lluvias máximas diarias en la provincia de Catamarca" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.
- Lencinas, Matías Javier (2014). "Validación de la tormenta de diseño para la Presa Los Molinos - Jujuy - utilizando técnicas de regionalización" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.