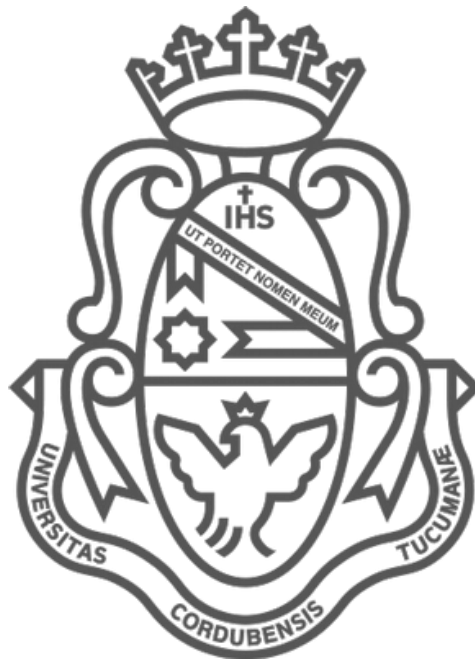


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención en
Recursos Hídricos



Tesis de Maestría

“Efectos de la variabilidad climática en la predicción de lluvias para diseño en la provincia de Córdoba”

Autor: Ing. Baraquet, María Magdalena

Director: MSc. Ing. Guillén, Nicolás Federico

Córdoba, 2018

EFFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PREDICCIÓN DE LLUVIAS PARA DISEÑO EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Resumen

Los conceptos de cambio y variabilidad climática están cobrando una importancia significativa en los últimos años. Según investigaciones, estos cambios obedecen mayormente a que el hombre está incrementando de manera exponencial los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (IPCC, 2001b). Algunas de las tendencias de calentamiento, identificadas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2003), no están ligadas directamente con el cambio climático, pero sí con cambios globales, que contribuyen al calentamiento global (uso de materiales modernos de construcción, incremento de la urbanización, alteraciones en el uso del suelo, etc.). Todas estas variaciones del sistema climático tienen efectos en el ciclo hidrológico, porque están ligadas en un sistema complejo de retroalimentación, de tal forma, que los cambios en el clima inducen modificaciones en los sistemas hidrológicos, que a su vez inducen variaciones climáticas.

Las variables que caracterizan la evolución del clima presentan variabilidad en casi todas las escalas de tiempo; por ello, generalmente, la información climática se sintetiza a través del análisis estadístico de las series históricas de las variables que caracterizan sus procesos. Hasta no hace mucho tiempo, los análisis estadísticos de la información climática se realizaban con la premisa que el clima era estacionario, es decir, el clima futuro sería igual al del pasado inmediato. Sin embargo, últimamente esta premisa no siempre es apropiada. Las acciones antrópicas y procesos naturales han generado y generan variaciones en los parámetros climáticos que hacen que la hipótesis casi siempre implícita de que las series climáticas son estacionarias ya no siempre sea válida (Barros et al., 2006).

En este trabajo, se hace un análisis detallado de información pluviométrica disponible en la provincia de Córdoba con el objetivo de identificar la presencia o ausencia de efectos de variabilidad climática. Se hace hincapié en el análisis de series de diferentes variables hidrológicas diferenciando aquellas que tienen un comportamiento estacionario de aquellas otras que se comportan de manera no estacionaria. Este análisis se lleva a cabo profundizando sobre conceptos básicos de estadística hidrológica, distinguiendo entre el análisis que se debe hacer sobre una serie estacionaria y aquel que debe hacerse sobre una serie no estacionaria. Finalmente, se proponen dos metodologías de trabajo a ser aplicadas en la definición de Lluvias de diseño a la hora de realizar diseño hidrológico: una para cuando se cuente con series de variables hidrológicas estacionarias, y otra, para cuando el comportamiento de las series sea no estacionario.

Palabras claves: Variabilidad climática – Análisis estadístico – Series estacionarias – Series no estacionarias – Diseño Hidrológico – Lluvias de diseño

EFFECTS OF CLIMATE VARIABILITY IN THE PREDICCIÓN OF RAINFALLS FOR DESIGN IN THE PROVINCE OF CÓRDOBA

Abstract

The concepts of climate change and variability are gaining significant importance in recent years. According to research, these changes are mainly due to the fact that man is exponentially increasing the levels of greenhouse gas (GHG) emissions, mainly carbon dioxide (IPCC, 2001b). Some of the warming trends, identified by the World Meteorological Organization (WMO, 2003), are not directly linked to climate change, but are linked to global changes, which contribute to global warming (use of modern construction materials, increase in urbanization, alterations in land use, etc.). All these variations of the climatic system have effects on the hydrological cycle, because they are linked in a complex system of feedback, in such a way that the changes in the climate induce modifications in the hydrological systems, which in turn induce climatic variations.

The variables that characterize the evolution of the climate present variability in almost all time scales; therefore, generally, climate information is synthesized through the statistical analysis of the historical series of the variables that characterize its processes. Until not long ago, the statistical analyzes of climate information were carried out with the premise that the climate was stationary, that is, the future climate would be the same as in the immediate past. However, lately this premise is not always appropriate. Anthropogenic actions and natural processes have generated and generate variations in climate parameters that make the almost always implicit hypothesis that climate series are stationary is no longer always valid (Barros et al., 2006).

In this work, a detailed analysis of rainfall information is made available in the province of Córdoba with the aim of identifying the presence or absence of climate variability effects. Emphasis is placed on the analysis of series of different hydrological variables, differentiating those that have a stationary behavior from those that behave in a non-stationary manner. This analysis is carried out deepening on basic concepts of hydrological statistics, distinguishing between the analysis that must be done on a stationary series and that which must be done on a non-stationary series. Finally, two work methodologies are proposed to be applied in the definition of design rainfall when carrying out hydrological design: one for when there are series of stationary hydrological variables, and another, for when the behavior of the series is not stationary.

Keywords: Climatic variability - Statistical analysis - Stationary series - Non-stationary series - Hydrological design - Design rains

Agradecimientos

- A Marcelo por darme la oportunidad de seguir aprendiendo para poder especializarme en esta rama de la Ingeniería Civil.
- A Nico por seguir enseñándome y por seguir confiando en mi trabajo. Mi guía desde hace años.
- A todos los profesores de la Maestría por el conocimiento que me brindaron. En especial a la Dra. Teresa Reyna y al Dr. Santiago Reyna por alentarnos siempre a seguir para adelante, y también por tomarse el tiempo de corregir mi tesis como miembros del tribunal, junto al Ing. Jorge Gironás.
- A los amigos que encontré en este camino: Tomi, Anita, Gastón, Pipa, Javi, Yari, Fede, Euge, Eze, Maga y Mati E. por el apoyo cotidiano y los momentos compartidos.
- A Gabi y Giuli por ayudarme a recorrer este trayecto al igual que en la carrera de grado. Y al resto de las civiles que siempre están.
- A todos mis compañeros del CETA y del Laboratorio de Hidráulica.
- A mi familia: mamá, papá, Mariana, Emi, Valy, Luci, Diego, Sole y Fede por el apoyo de siempre.
- A mis sobrinos: Feli, Emi, Oli, Vicen y Pedro por las sonrisas y el amor.
- A mi abuela por el cariño incondicional.
- A las amigas de siempre Kar, Ani y Carla por acompañarme siempre más allá de la distancia.
- A Lucio por el apoyo en esta última parte del camino.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
1. Capítulo 1: Marco referencial del informe	12
1.1. Introducción.	12
1.2. Fenómenos climáticos estacionarios y no estacionarios.	12
1.3. Descripción de la zona de estudio.....	14
1.3.1. Geografía.	15
1.3.2. Clima.	16
1.3.3. Recursos Hídricos	17
1.4. Motivación del trabajo	19
1.5. Objetivos del trabajo	20
1.5.1. Objetivo general	20
1.5.2. Objetivos específicos	20
1.6. Metodología del informe.....	20
2. Capítulo 2: Conceptos básicos sobre hidrología de diseño.	23
2.1. Lluvias de diseño.....	23
2.2. Metodología aplicada sobre las series históricas para la realización de análisis de frecuencia	25
I. Recopilación de la información meteorológica histórica	27
II. Determinación del año hidrológico	27
III. Generación de las series hidrológicas	27
IV. Verificación de hipótesis básicas.	27
V. Análisis de estadística descriptiva.	36
VI. Análisis de estadística inferencial.....	36
3. Capítulo 3: Información pluviométrica analizada.....	42
3.1. Descripción de los datos pluviométricos analizados.....	42
3.1.1. Localización espacial de las estaciones pluviométricas.	42
3.1.2. Longitud de los registros pluviométricos históricos recopilados.	44
3.2. Variables analizadas mediante análisis estadístico	45
4. Capítulo 4: Aplicación y nuevos avances en el análisis estadístico recomendado.....	48
5. Capítulo 5: Resultados del análisis estadístico de las series de las estaciones seleccionadas.	56
5.1. Análisis de series estacionarias.	56
5.2. Análisis de series no estacionarias.	64
5.3. Resumen de resultados obtenidos.....	75
6. Capítulo 6: Aplicaciones recomendadas al diseño hidrológico.....	81
6.1. Diseño hidrológico para series estacionarias (DHSE).	81
6.2. Diseño hidrológico para series no estacionarias (DHSNE).	101
6.2.1. Caso de Precipitación Máxima Diaria Anual con tendencia.....	101
6.2.2. Caso de días lluviosos al mes, días lluviosos al año y/o días consecutivos con lluvia con tendencia.....	113

7. Capítulo 7: Conclusiones.....	117
7.1. Aspectos técnicos.	117
7.2. Aspectos personales.	119
7.3. Perspectivas a futuro.....	119
Anexos.	122
Anexo 1: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 11: Grande – Cerro Blanco.	122
Anexo 2: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 12: Grande – El Manzano.	123
Anexo 3: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 13: Grande – La Puente.....	124
Anexo 4: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 14: Grande – Lutti.....	125
Anexo 5: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 15: Grande – Pampichuela.	126
Anexo 6: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 16: Grande – Yacanto.	127
Anexo 7: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 17: El Durazno – La Florida.	128
Bibliografía y Referencias.	131

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Ejemplo de no estacionariedad en una distribución de probabilidad normal. (Fuente: Tercer Informe IPCC, 2001a).....</i>	13
<i>Figura 2: Mapa político de la provincia de Córdoba (Fuente: Presidencia de la Nación - http://mapoteca.educ.ar/.files/index.html.1.1.html).....</i>	15
<i>Figura 3: Mapa de climas de la provincia de Córdoba. (Fuente: Presidencia de la Nación - http://mapoteca.educ.ar/.files/index.html.1.1.html).....</i>	17
<i>Figura 4: Mapa físico de la provincia de Córdoba (Fuente: Presidencia de la Nación - http://mapoteca.educ.ar/.files/index.html.1.1.html).....</i>	18
<i>Figura 5: Ejemplo de serie no independiente. (Fuente: Prof. Camilo Daleles Rennó).....</i>	26
<i>Figura 6: Ejemplo de serie no homogénea debido a variación de la media (izquierda) y debido a la variación del desvío (derecha). (Fuente: Prof. Camilo Daleles Rennó).....</i>	26
<i>Figura 7: Ejemplo de serie no estacionaria. (Fuente: Prof. Camilo Daleles Rennó).....</i>	27
<i>Figura 8: Ejemplo de análisis inferencial de una serie estacionaria de precipitaciones máximas diarias anuales.</i>	37
<i>Figura 9: Ejemplo de la variación de la relación variable-período de retorno para distintos horizontes de tiempo.....</i>	39
<i>Figura 10: Ejemplo de análisis inferencial de una serie no estacionaria de precipitaciones totales anuales.</i>	40
<i>Figura 11: Localización de las estaciones pluviométricas recopiladas en la Provincia de Córdoba.</i>	43
<i>Figura 12: Longitud de las series de las estaciones pluviométricas recopiladas en la Provincia de Córdoba.</i>	44
<i>Figura 13: Año de registro de las estaciones pluviométricas analizadas.</i>	45
<i>Figura 14: Valores estimados (YT) asociados a los diferentes tiempos de retorno (T).</i>	50
<i>Figura 15: Relación entre NT y TrealT.</i>	51
<i>Figura 16: Serie de precipitaciones máximas diarias anuales, Córdoba Observatorio.</i>	56
<i>Figura 17: Distribución de probabilidades de precipitación máxima diaria anual, Córdoba Observatorio.....</i>	57
<i>Figura 18: Serie de precipitaciones totales anuales, Córdoba Observatorio.....</i>	58
<i>Figura 19: Distribución de probabilidades de precipitación total anual, Córdoba Observatorio.....</i>	59
<i>Figura 20: Serie de días lluvioso al año, Córdoba Observatorio.....</i>	60
<i>Figura 21: Serie de días lluvioso al mes, Córdoba Observatorio.</i>	61
<i>Figura 22: Distribución de probabilidades de días lluviosos al mes, Córdoba Observatorio.....</i>	62
<i>Figura 23: Serie de días consecutivos con lluvia, Córdoba Observatorio.</i>	63
<i>Figura 24: Distribución de probabilidades de días consecutivos con lluvia, Córdoba Observatorio.....</i>	64
<i>Figura 25: Serie de precipitaciones máximas diarias anuales, El Durazno-La Florida.</i>	65
<i>Figura 26: Distribución de probabilidades de precipitación máxima diaria anual, El Durazno-La Florida.....</i>	66
<i>Figura 27: Serie de precipitaciones totales anuales, El Durazno-La Florida.....</i>	67
<i>Figura 28: Relación entre precipitación total anual y período de retorno a lo largo del tiempo, El Durazno-La Florida.</i>	68

<i>Figura 29: Relación entre precipitación total anual y período de retorno para diferentes horizontes de tiempo, El Durazno-La Florida.</i>	68
<i>Figura 30: Serie de días lluvioso al año, El Durazno-La Florida.</i>	69
<i>Figura 31: Distribución de probabilidades de días lluviosos al año, El Durazno-La Florida.</i>	70
<i>Figura 32: Serie de días lluvioso al mes, El Durazno-La Florida.</i>	71
<i>Figura 33: Relación entre días lluviosos al mes y período de retorno a lo largo del tiempo, El Durazno-La Florida.</i>	72
<i>Figura 34: Relación entre días lluviosos al mes y período de retorno para diferentes horizontes de tiempo, El Durazno-La Florida.</i>	72
<i>Figura 35: Serie de días consecutivos con lluvia, El Durazno-La Florida.</i>	73
<i>Figura 36: Distribución de probabilidades de días consecutivos con lluvia, El Durazno-La Florida.</i>	74
<i>Figura 37: Verificación de estacionariedad para las series de PMDA.</i>	76
<i>Figura 38: Verificación de estacionariedad para las series de PTA.</i>	77
<i>Figura 39: Verificación de estacionariedad para las series de DLLA.</i>	78
<i>Figura 40: Verificación de estacionariedad para las series de DLLM.</i>	78
<i>Figura 41: Verificación de estacionariedad para las series de DCcLL.</i>	79
<i>Figura 42: Delimitación de la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	82
<i>Figura 43: Delimitación de las subcuencas de la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	83
<i>Figura 44: Tipos de suelo en la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	86
<i>Figura 45: Usos de suelo en la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	87
<i>Figura 46: Hietograma observado en el punto de cierre de la cuenca durante el evento de calibración.</i>	92
<i>Figura 47: Caudales medidos en el punto de cierre de la cuenca durante el evento de calibración.</i>	92
<i>Figura 48: Comparación entre hidrograma obtenido de la simulación del evento de calibración y los caudales registrados para el caso de DHSE.</i>	93
<i>Figura 49: Curva S para una lluvia constante en el tiempo y sin pérdidas para el caso de DHSE.</i>	93
<i>Figura 50: Distribución temporal patrón de Huff (1970) para diferentes tipologías de lluvia.</i> ...	94
<i>Figura 50: Hidrogramas generados para diferentes duraciones de lluvia para el caso de DHSE.</i>	95
<i>Figura 51: Punto de cierre de la cuenca de estudio para el caso de DHSE.</i>	96
<i>Figura 52: Hietogramas tipo para intervalos de IMA en La Suela.</i>	98
<i>Figura 53: Cuenca modelada en HEC-HMS.</i>	99
<i>Figura 54: Hidrogramas obtenidos de la modelación hidrológica para diferentes períodos de retorno para el caso de DHSE.</i>	100
<i>Figura 55: Localización de la estación pluviométrica Iruya-Poscaya.</i>	101
<i>Figura 56: Serie de precipitaciones máximas diarias anuales, Iruya Poscaya.</i>	102
<i>Figura 57: Valores de probabilidad para series no estacionarias de la precipitación máxima diaria anual, Iruya Poscaya.</i>	103
<i>Figura 58: Comparación de periodos de retorno de la precipitación máxima diaria anual, Iruya Poscaya.</i>	103
<i>Figura 59: Localización de la cuenca analizada para el caso de DHSNE.</i>	105
<i>Figura 60: Delimitación de las subcuencas de la cuenca analizada para el caso de DHSNE.</i>	105

<i>Figura 61: Tipos de suelo en la cuenca analizada para el caso de DHSNE.</i>	107
<i>Figura 62: Usos de suelo en la cuenca analizada para el caso de DHSNE.</i>	107
<i>Figura 63: Curva S para una lluvia constante en el tiempo y sin pérdidas para el caso de DHSNE.</i>	109
<i>Figura 64: Hidrogramas generados para diferentes duraciones de lluvia para el caso de DHSNE.</i>	110
<i>Figura 65: Hietogramas obtenidos para las lluvias de diseño definidas para los años 2017 y 2057.</i>	111
<i>Figura 66: Cuenca modelada en HEC-HMS para el caso de DHSNE.</i>	112
<i>Figura 67: Comparación entre los resultados de las simulaciones para el horizonte de tiempo actual y el futuro.</i>	112

ÍNDICE DE TABLAS

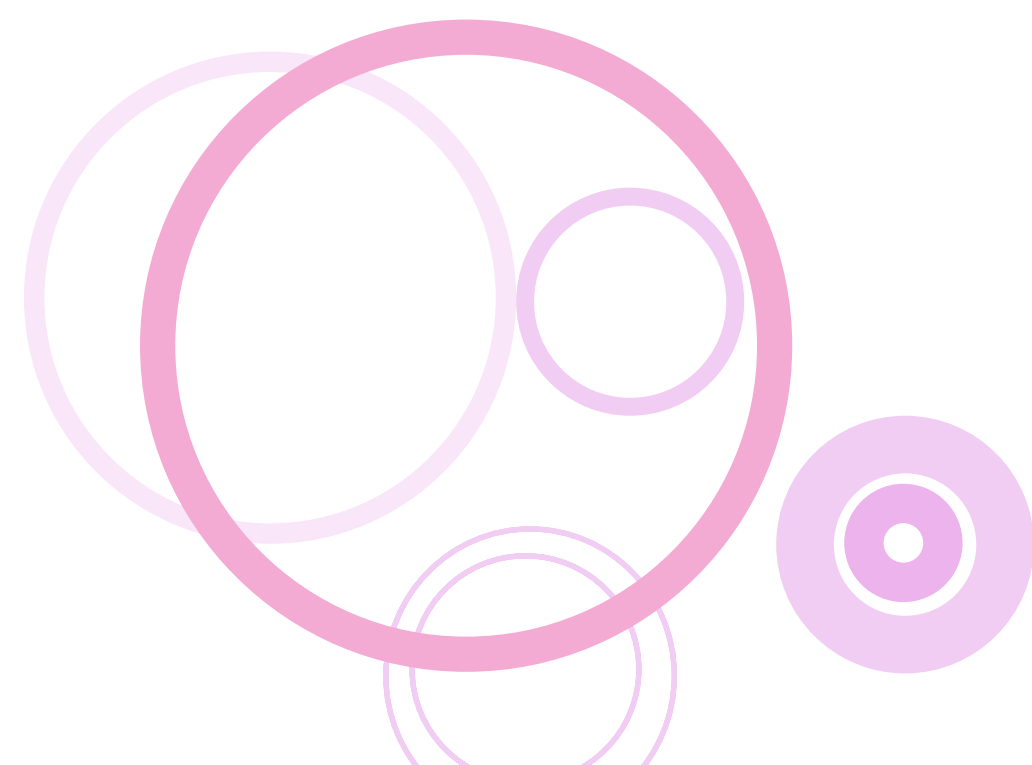
<i>Tabla 1: Valores Kn para la prueba de datos atípicos (Chow, 1959).</i>	28
<i>Tabla 2: Valores Icri para el Test Mann – Kendall (Kendall, 1938).</i>	34
<i>Tabla 3: Estaciones pluviométricas recopiladas de la Base de Datos Hidrológica Integrada de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.</i>	42
<i>Tabla 4: Estaciones pluviométricas recopiladas de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional.</i>	43
<i>Tabla 5: Relación entre NT y TrealT.</i>	50
<i>Tabla 6: Valores de precipitaciones máximas diarias anuales, Córdoba Observatorio.</i>	58
<i>Tabla 7: Valores de precipitaciones totales anuales, Córdoba Observatorio.</i>	60
<i>Tabla 8: Valores de días lluviosos al mes, Córdoba Observatorio.</i>	62
<i>Tabla 9: Valores de días consecutivos con lluvia, Córdoba Observatorio.</i>	64
<i>Tabla 10: Valores de precipitaciones máximas diarias anuales, El Durazno-La Florida.</i>	66
<i>Tabla 11: Valores de días lluviosos al año, El Durazno-La Florida.</i>	70
<i>Tabla 12: Valores de días consecutivos con lluvia, El Durazno-La Florida.</i>	74
<i>Tabla 13: Resumen de los resultados de los test estadísticos sobre cada una de las series analizadas.</i>	75
<i>Tabla 14: Parámetros morfométricos de cada una de las subcuencas de la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	83
<i>Tabla 15: Tipologías y formas de cálculo para el Número de Curva (CN).</i>	85
<i>Tabla 16: Valores del Número de Curva (CN) de las subcuencas pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	88
<i>Tabla 17: Coeficiente de retardo del flujo para la determinación del tiempo de flujo superficial (to). (Fuente: “Hydraulic Design Manual”, 2016).</i>	90
<i>Tabla 18: Tiempos de concentración y tiempos de retardo para cada una de las subcuencas pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	90
<i>Tabla 19: Tiempos de concentración y tiempos de retardo para la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	91
<i>Tabla 20: Parámetros del método de Muskingum para cada uno de los tránsitos pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	91
<i>Tabla 21: Curva idT para la cuenca analizada para el caso de DHSE.</i>	97
<i>Tabla 22: Errores entre los picos de las distribuciones.</i>	99
<i>Tabla 23: Parámetros morfométricos de cada una de las subcuencas de la cuenca analizada y de la cuenca en su conjunto para el caso de DHSNE.</i>	106
<i>Tabla 24: Valores del Número de Curva (CN) de las subcuencas pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSNE.</i>	108
<i>Tabla 25: Tiempos de concentración y tiempos de retardo para cada una de las subcuencas pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSNE.</i>	108
<i>Tabla 26: Tiempos de concentración y tiempos de retardo para la cuenca analizada para el caso de DHSNE.</i>	108
<i>Tabla 27: Parámetros del método de Muskingum para cada uno de los tránsitos pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSNE.</i>	108

Tabla 28: Lámina de lluvia diaria asociada al período de retorno de la obra en cuestión para la actualidad y para el final de la vida útil de dicha obra. 111

Tabla 29: Características de los 10 eventos máximos en la estación El Durazno-La Florida. ... 115



Marco referencial del informe



1. Capítulo 1: Marco referencial del informe.

1.1. Introducción.

Tanto el concepto de cambio climático, como el de variabilidad climática, están cobrando una importancia significativa en los últimos años. Según algunas investigaciones, estos cambios obedecen mayormente a que el hombre está incrementando de manera exponencial los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (IPCC, 2001b). Algunas de las tendencias de calentamiento, identificadas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2003), no están ligadas directamente con el cambio climático, pero sí con cambios globales, que contribuyen al calentamiento global. Todas estas variaciones del sistema climático tienen notables efectos en el ciclo hidrológico, porque están estrechamente ligadas en un sistema complejo de retroalimentación, de tal forma, que los cambios en el clima inducen modificaciones en los sistemas hidrológicos, que a su vez inducen variaciones climáticas.

Las variables que caracterizan la evolución del clima presentan variabilidad en casi todas las escalas de tiempo; y es por ello por lo que, generalmente, la información climática se sintetiza fundamentalmente a través del análisis estadístico de las series históricas de las variables que caracterizan sus procesos.

Hasta no hace mucho tiempo, los análisis estadísticos de la información climática se realizaban con la premisa que el clima era estacionario, y que por lo tanto el clima futuro sería igual al del pasado inmediato. Sin embargo, últimamente la hipótesis de que las series climáticas son estacionarias no siempre es apropiada. Las acciones antrópicas y procesos naturales han generado y generan variaciones en los parámetros climáticos que hacen que la hipótesis casi siempre implícita de que las estadísticas del clima pasado pueden representar las del clima futuro ya no siempre sea válida (Barros et al., 2006). En los siguientes párrafos se profundiza sobre los fenómenos climáticos estacionarios y no estacionarios.

1.2. Fenómenos climáticos estacionarios y no estacionarios.

La no estacionariedad de una serie puede implicar cambios en cualquiera de sus momentos estadísticos. En la Figura 1 se muestra, a modo de ejemplo, una distribución normal de temperaturas y como esta varía ante la no estacionariedad en su media y/o en su varianza. La no estacionariedad en la media implica que el valor promedio de la serie cambia a lo largo del tiempo, mientras que la no estacionariedad en la varianza indica que se modifican los desvíos a medida que transcurre el tiempo.

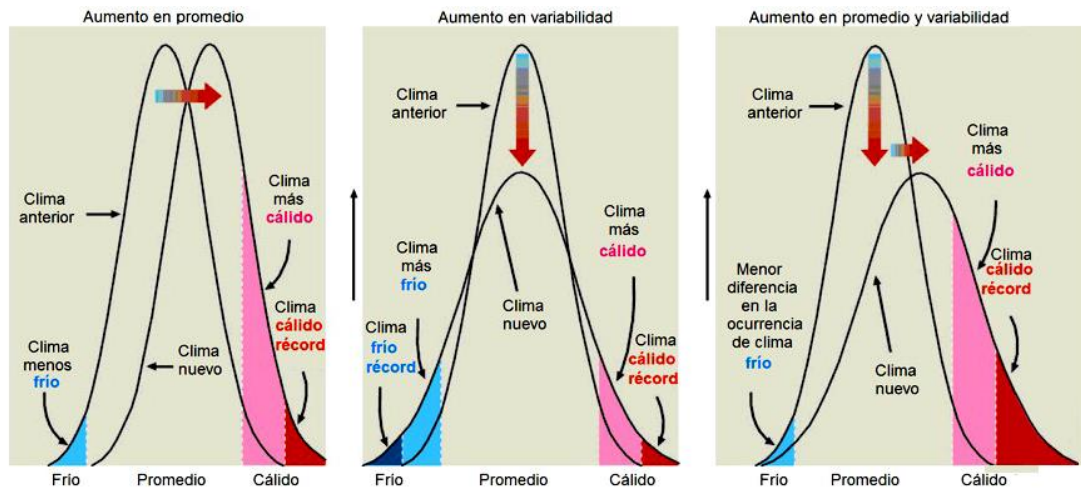


Figura 1: Ejemplo de no estacionariedad en una distribución de probabilidad normal. (Fuente: Tercer Informe IPCC, 2001a)

Del análisis de la Figura 1 se distinguen tres casos:

- En la distribución de temperaturas de la izquierda, un aumento en la media conduce a una mayor probabilidad de alcanzar temperaturas máximas que antes eran menos probables; sin embargo, un cambio en la temperatura media no implica un cambio en la variabilidad. En este caso el rango entre las temperaturas más cálidas y las más frías no cambia.
- En la distribución de temperaturas del centro, aparece un aumento en la variabilidad sin un cambio en la media; lo que implica un aumento en la probabilidad de valores extremos tanto cálidos como fríos.
- En la distribución de temperaturas de la derecha se muestra un caso combinado de los dos previamente explicados, es decir un cambio tanto en la media como en la varianza.

En todos los casos, se aprecia cambio en la probabilidad de ocurrencia de valores extremos; y a menudo es incierto conocer si esos cambios son causados por un cambio en la media, varianza o ambos.

Las predicciones de la evolución futura de variables que caracterizan el clima (por ejemplo, la predicción de la lluvia) se utilizan generalmente en el Diseño Hidrológico, el cual consiste en la definición precisa de las variables hidrológicas de diseño de medidas estructurales y no estructurales requeridas para mitigar el riesgo hídrico. En esas predicciones se utiliza, habitualmente, la presunción de estacionariedad que, como se mencionó anteriormente, no siempre es apropiada.

Por lo tanto, a la hora de estimar alguna o varias características del clima futuro para algún requerimiento de planificación y/o diseño se debe ser cuidadoso antes de emplear a priori la hipótesis de que el clima es estacionario y por lo tanto se requieren de nuevos métodos tanto para la detección de la existencia de estacionariedad como para el análisis de los datos no estacionarios. A pesar de esta necesidad, no hay aún una metodología totalmente desarrollada y segura para estimar el clima futuro. En rigor, el gran desafío para la climatología mundial durante los próximos años será desarrollar los métodos que permitan anticipar el clima de las próximas décadas en el contexto del cambio climático en curso.

Como se anticipó, el Diseño Hidrológico consiste en la estimación de los valores correspondientes a las variables hidrológicas representativas (caudal, lluvia, etc.) con fines de diseño. La precisa determinación del valor de diseño de cada variable hidrológica es relevante para el diseño sustentable de infraestructura hídrica ya que sobredimensionar las obras genera un impacto innecesario sobre el medio ambiente y es antieconómico, en tanto que si se subestiman las obras a diseñar estas pueden fallar con resultados catastróficos con un impacto aun mayor para la sociedad y el medio ambiente, tanto por la pérdida de vidas humanas como de bienes públicos y privados.

Para el diseño de infraestructura hídrica relacionado a proyectos de hidrología, la información histórica de caudales no está habitualmente disponible y se ve afectada por la insuficiencia estadística de los registros históricos, lo cual lleva a evaluar indirectamente estos caudales mediante el uso de modelos de transformación lluvia – caudal (P-Q) alimentados por “Lluvias de Diseño”. Este último concepto se desarrolla en el Capítulo 2.

1.3. Descripción de la zona de estudio.

Este trabajo se centra en analizar la información pluviométrica de la provincia de Córdoba. Córdoba es una de las 23 provincias que componen la República Argentina. Situada en la Región Centro, limita al norte con la provincia de Catamarca y Santiago del Estero, al este con Santa Fe, al sureste con Buenos Aires, al sur con La Pampa, y al oeste con San Luis y La Rioja. Su capital es la ciudad homónima. Con 165 321 km² de extensión, es la quinta provincia más extensa del país, ocupando el 5.94% de su superficie total.

Según el censo nacional del 2010 su población es de 3 308 876 habitantes, con lo cual es la segunda provincia más poblada de la República Argentina. Casi el 40.18% de la población está aglomerada en la capital provincial, con 1 329 604 habitantes,

convirtiéndola en la segunda aglomeración urbana del país después del Gran Buenos Aires. En la Figura 2 se muestra el mapa político de la provincia de Córdoba.



Figura 2: Mapa político de la provincia de Córdoba (Fuente: Presidencia de la Nación - <http://mapoteca.educ.ar/.files/index.html.1.1.html>).

1.3.1. Geografía.

Córdoba presenta dos áreas diferenciadas en cuanto a su geografía:

- La Llanura Pampeana: ocupa la parte oriental con dos subregiones: al norte, se asocia a la cuenca de la gran laguna de Mar Chiquita, y al sur, a la cuenca del río Quinto.
- Las Sierras Pampeanas: ocupan un quinto del territorio provincial extendiéndose por su parte noroccidental. Se encuentra recorrida por las llamadas Sierras australes o de Córdoba y San Luis. Son antiguas y de poca altura. Entre las sierras se forman valles longitudinales de origen tectónico y se destaca por su extensión el Valle de Punilla. La altura máxima de la provincia es

el cerro Champaquí de 2 790 metros y a partir de ahí, continúa un cordón llamado la sierra de Comechingones.

Al noroeste de las sierras, en el Departamento Cruz del Eje compartida con las provincias de Catamarca, La Rioja y Santiago del Estero, se encuentra una gran cuenca desértica resultado de un antiguo mar que actualmente es uno de los mayores salares del planeta, esta región de clima muy continental se llama Salinas Grandes.

1.3.2. Clima.

Las condiciones climáticas son diferentes según la región, aunque predomina el clima templado. La Provincia de Córdoba, presenta generalmente veranos cálidos e inviernos frescos a templados según la región. La temperatura media anual está comprendida entre 16° y 17°C.

La porción oriental de la provincia tiene un clima templado pampeano al sur y subtropical con estación seca al norte. En el extremo oeste y noroeste el clima es semiárido. La zona central y los valles serranos presentan un clima templado de transición. Debido a la combinación de diferentes elementos naturales es posible encontrar en la Provincia de Córdoba climas regionales característicos y microclimas particulares locales.

Las lluvias son estacionales de verano con unos 800 mm anuales. No obstante, las temperaturas al igual que las precipitaciones disminuyen de norte a sur y de este a oeste, salvo en las faldas orientales de las sierras, que, por influencia de los vientos del este, debido a la significativa humedad que transportan, las precipitaciones son abundantes siendo el régimen de hasta 1500 mm por año. La temperatura máxima promedio es de 30°C y la mínima de 10°C, existiendo una buena diferenciación de las cuatro estaciones.

En las zonas más altas de la Provincia, como las Sierras Grandes, ocurren nevadas todos los años. Las precipitaciones en forma de nieve también suelen ocurrir casi todos los años, ya a mediados del otoño austral, en las zonas más elevadas de la geografía cordobesa, como las Sierras Chicas y los distintos valles. Las tormentas eléctricas son comunes en toda la provincia, con mayor presencia en los meses de primavera y verano y especialmente en la zona de altas cumbres de las Sierras de Córdoba. La zona pampeana presenta mayor frecuencia de días con tormentas algunas de las cuales pueden ser severas. El granizo es también un fenómeno bastante común en la provincia.

Los diferentes tipos de climas pueden distinguirse gráficamente en el mapa de climas de la provincia de Córdoba que se muestra en la Figura 3.

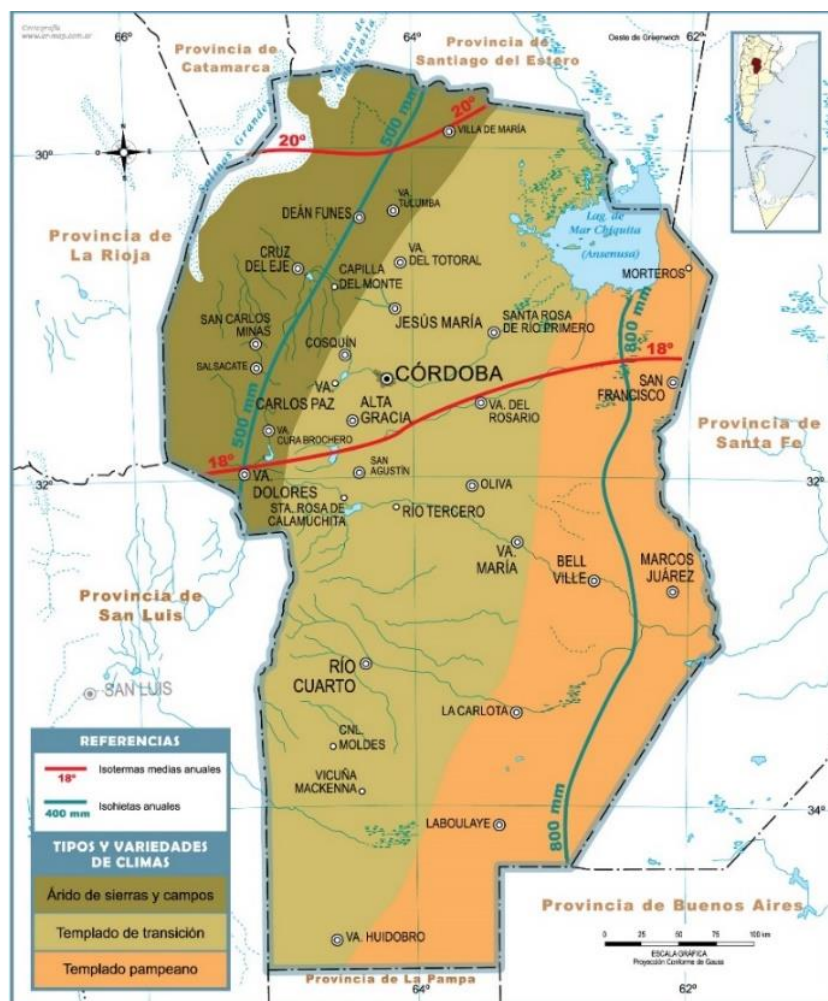


Figura 3: Mapa de climas de la provincia de Córdoba. (Fuente: Presidencia de la Nación - <http://mapoteca.educ.ar/files/index.html.1.1.html>).

1.3.3. Recursos Hídricos

En la porción noroccidental se encuentran ríos cortos de desagüe endorreico, como el San Marcos, Pintos, de la Candelaria, Cruz del Eje, Soto, de Pichanas, Guasapampa, Chanani y de los Sauces. Algunos poseen sus aguas artificialmente embalsadas. En esta zona se encuentra el embalse de Cruz del Eje.

Los ríos más destacados nacen en las sierras Grande y de Comechingones siendo de norte a sur los siguientes: río Suquía (o Primero), río Xanaes (o Segundo), río Calamuchita (o Tercero), río Chocancharava (o Cuarto) y río Popopis (o Quinto), que nace en las sierras de San Luis, y recorren la provincia en dirección oeste-este. Estos

ríos y sus afluentes presentan máximos caudales durante el verano, con crecidas violentas e inesperadas tras las lluvias.

La localización de estos ríos puede verse en el mapa físico de la provincia de Córdoba que se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Mapa físico de la provincia de Córdoba (Fuente: Presidencia de la Nación - <http://mapoteca.educ.ar/.files/index.html.1.1.html>).

La provincia de Córdoba posee decenas de represas y embalses, los más importantes por su volumen de agua o por su espejo de agua son: el Lago San Roque (el más antiguo de los embalses de tipo moderno construido en Latinoamérica), dique Los Molinos, la Viña, Piedras Moras, embalse Río Tercero (este embalse es el mayor de la Provincia y el más importante) y Cruz del Eje. Su localización también puede verse en la Figura 4.

Estos embalses son multifuncionales: sirven de reservorios de agua dulce, producen energía hidroeléctrica, regulan los caudales hídricos, aportan aguas para el riego (en especial si el riego es en zonas de secano), en ellos se practica la piscicultura y

complementariamente la pesca. Ésta puede ser tanto industrial como deportiva, aunque, merced a los paisajes serranos en los que suelen encontrarse, uno de los mayores valores económicos es el turismo al practicarse en ellos actividades balnearias y deportes náuticos.

En el noreste de la provincia se encuentra la gran laguna de Mar Chiquita. En el sur, el río Chocancharava antes de confluir con el río Calamuchita forma un importante humedal llamado “Bañados del Saladillo” o de “Loboy”. En el centro sur de la provincia se encuentra la reserva provincial de flora y fauna Laguna La Felipa, en cercanías de Uacha. Más curiosa es la situación del río Popopis, ya que en el sur de la provincia de Córdoba forma una amplia y muy variable extensión de humedales y lagunas conocida como “Bañados de la Amarga” (antiguamente: “Laguna Amarga”). En ciertas épocas el mencionado río Popopis se subsume en dichos bañados, y en otras, cuando se incrementan los caudales las aguas superan los Bañados de la Amarga y, sin un cauce preciso, el río se une con el río Salado bonaerense.

1.4. Motivación del trabajo

Como se explicó en el último párrafo del punto 1.2, para el diseño de infraestructura hídrica, la información histórica de caudales no está habitualmente disponible y se ve afectada por la insuficiencia estadística de los registros históricos, lo cual lleva a evaluar indirectamente estos caudales mediante el uso modelos de transformación lluvia – caudal (P-Q) alimentados por “Lluvias de Diseño”.

Las lluvias de diseño son eventos hipotéticos que se definen a partir de series históricas pluviográficas o en su defecto, series históricas pluviométricas, sobre las cuales es necesario aplicar un análisis estadístico, pero de acuerdo con lo expuesto en el último párrafo del punto 1.1 es importante tener en cuenta, a la hora de realizar este análisis, que la hipótesis de que las series climáticas son estacionarias ya no siempre es apropiada.

En función de lo anteriormente citado es que surge la idea de evaluar cómo podría llevarse a cabo un análisis estadístico de series climáticas no estacionarias (afectadas por la variabilidad climática) y cómo esto afecta al diseño hidrológico; esto da origen al objetivo de esta tesis.

1.5. Objetivos del trabajo

1.5.1. Objetivo general

El objetivo general del trabajo es evaluar los efectos de la variabilidad climática en la predicción de lluvias para diseño en la provincia de Córdoba. Para ello se analiza información pluviométrica existente en la Provincia de Córdoba y a partir de ella se evalúa la variabilidad climática en el territorio y sus efectos en la predicción de lluvias para diseño en la provincia.

1.5.2. Objetivos específicos

Para cumplimentar el objetivo general previamente desarrollado es que se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Profundizar sobre conceptos básicos de estadística hidrológica, haciendo hincapié en la distinción entre el análisis que se debe hacer sobre una serie estacionaria (análisis de frecuencia clásico) y una serie no estacionaria (nuevo paradigma de análisis de frecuencia).
- Recopilar información pluviométrica de la provincia de Córdoba para ser analizada al detalle.
- Analizar la evolución temporal de diferentes variables para determinar la existencia de patrones que demuestren la presencia o no de variabilidad climática en diferentes zonas de la provincia.
- Definir dos metodologías de trabajo para el diseño hidrológico de infraestructura hídrica: una para los casos de series estacionarias y otra para aquellos casos particulares en que se presenten series no estacionarias.

1.6. Metodología del informe

En el Capítulo 1 se presenta el marco referencial del informe a través del cual se definen conceptos fundamentales para el desarrollo del trabajo, vinculados principalmente con los fenómenos estacionarios y no estacionarios. Además, se describe la zona de estudio y se plantean los objetivos generales y particulares del trabajo.

En el Capítulo 2 se presentan conceptos básicos sobre hidrología de diseño, desde la definición de diseño hidrológico, haciendo énfasis en el concepto de lluvias de diseño, hasta la descripción del análisis estadístico recomendado para el estudio de series hidrológicas, tanto estacionarias como no estacionarias.

En el Capítulo 3, se presenta la información pluviométrica de la provincia de Córdoba que será analizada, y se describe su localización espacial y su longitud de registro. Además, se definen las variables climáticas que serán analizadas en este trabajo.

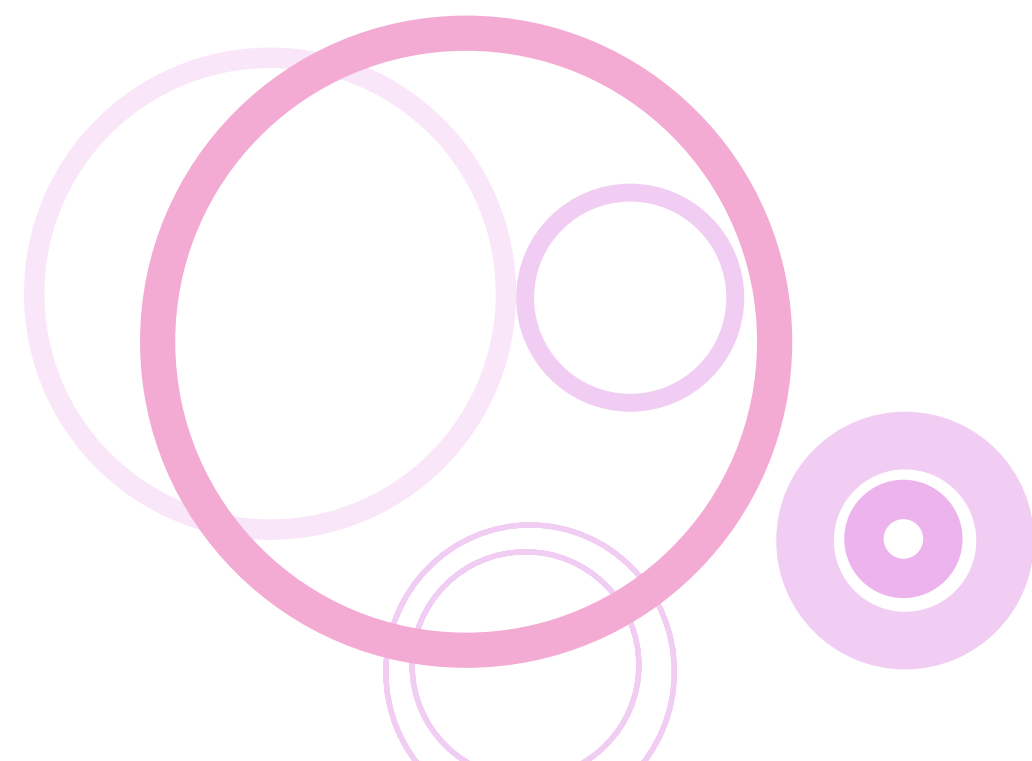
En el Capítulo 4, se muestran avances en el análisis estadístico recomendado y se resume la aplicación de este a la información recopilada. Mientras que en el Capítulo 5 se incorporan dos ejemplos del análisis estadístico completo sobre dos de las estaciones analizadas, en las que se tienen series sin y con tendencia a lo largo del tiempo. Además, se resumen los principales resultados alcanzados durante este trabajo.

En el capítulo 6 se proponen metodologías de trabajo para llevar a cabo el diseño hidrológico de medidas estructurales y no estructurales para mitigar el riesgo hídrico, tanto para casos en los que se cuente con series estacionarias como así también para casos en los que se cuente con series no estacionarias.

Finalmente, en el Capítulo 7 se resumen las principales conclusiones obtenidas en este informe. Se presentan también las perspectivas a futuro.



Conceptos básicos sobre hidrología de diseño



2. Capítulo 2: Conceptos básicos sobre hidrología de diseño.

Como se anticipó, el Diseño Hidrológico consiste en la estimación de los valores correspondientes a las variables hidrológicas representativas (caudal, lluvia, etc.) con fines de diseño. La precisa determinación del valor de diseño de cada variable hidrológica es relevante para el diseño sustentable de infraestructura hídrica ya que sobredimensionar las obras genera un impacto innecesario sobre el medio ambiente y es antieconómico, en tanto que si se subestiman las obras a diseñar estas pueden fallar con resultados catastróficos con un impacto aun mayor para la sociedad y el medio ambiente, tanto por la pérdida de vidas humanas como de bienes públicos y privados.

Para el diseño de infraestructura hídrica relacionado a proyectos de hidrología, la información histórica de caudales no está habitualmente disponible y se ve afectada por la insuficiencia estadística de los registros históricos, lo cual lleva a evaluar indirectamente estos caudales mediante el uso modelos de transformación Lluvia – caudal (P-Q) alimentados por “Lluvias de Diseño”. Este último concepto se desarrolla en el siguiente punto.

2.1. Lluvias de diseño

Las Lluvias de Diseño son eventos hipotéticos que involucran un conjunto de rasgos de índole diversa, algunos de los cuales se traducen en variables concretas interrelacionadas. Esos rasgos o componentes se presentan a continuación (Caamaño y Daaso, 2003):

- **Magnitud:** valor que alcanzaría la intensidad precipitada en un punto. La intensidad, i , se define como el cociente entre la altura de la lámina de lluvia, h , y la duración del intervalo que demandó su acumulación, d . Es, entonces, un promedio temporal en ese lapso, estimado para un punto específico del espacio. La magnitud se plantea para intervalo fijo (vínculo altura-recurrencia) si proviene de una serie pluviométrica, con paso de medición diario, o puede depender de la duración.
- **Persistencia:** duración del intervalo de lluvia para el cual se predice. Este es un dato que el proyectista establece, dependiendo de las características físicas de la cuenca en cuyo cierre quiere estimar el pico de la creciente de proyecto.

- Probabilidad: frecuencia futura estimada o período de retorno anual del evento. Es el otro dato por definir de antemano, en función de la amenaza o del riesgo asumido. El monto de lluvia se asocia habitualmente a la probabilidad de ocurrencia, a la frecuencia relativa histórica f (función i-d-f) o a su recurrencia anual, T , (función i-d-T). Pero también se puede referir al evento de mayor magnitud esperable en una región, denominado Valor Límite Estimado, VLE (en el caso de lluvia, la Precipitación Máxima Probable, PMP), al que no se le puede asignar una probabilidad de ocurrencia.
- Ubicación: posición donde interesa predecir, en relación con la red de medición. Las ternas de valores para calibrar un modelo idT provienen de registros continuos o de alta frecuencia; por lo tanto, sólo es posible la estimación directa en un pluviógrafo. Si, como es común, no existe una serie pluviográfica local apta, se necesita transponer la función, con técnicas específicas. En tal caso, un pluviómetro próximo al punto de interés brindaría información valiosa para la transposición.

Cuando no lo haya, la única opción es interpolar entre puestos con datos, siempre que la densidad de la red y la orografía lo permiten. El valor local de PMP suele surgir de estimadores regionales. No se transpone dentro de la misma unidad espacial, sino de una región a otra, lo cual es altamente desaconsejable.

- Distribución: patrón de variación temporal interna de la intensidad de lluvia. Es costumbre deducir los patrones temporales, denominados hietogramas tipo, de la función idT, pero las distribuciones no resultan verosímiles, porque se mezclan datos de fenómenos de características diferentes. También se los suele definir por síntesis de tormentas históricas, pero una tormenta es un fenómeno hidrometeorológico completo, no el suceso requerido para predicción.
- Atenuación: reducción de lluvia local a escala de cuenca, para predecir descargas. La disminución del valor de la lámina precipitada depende del área de la cuenca, A , y de la duración de la lluvia. La forma usual de representarla es mediante curvas h-d-A. En lugar de la altura de lámina, se utiliza a veces el coeficiente de reducción areal. Estas funciones son propias de cada región y están afectadas en especial por su topografía, razón por la cual no es recomendable su transposición. Un modo elaborado de reflejar la estructura de la lluvia es un mapa de isohietas sintéticas, adaptable a la orientación geográfica dominante de las precipitaciones. Esto sólo tiene sentido para

utilizar modelos de transformación espacialmente distribuidos, sea por el tamaño del sistema o por el grado de detalle requerido.

Las relaciones idT y el patrón de distribución temporal de las lluvias, requeridos para estimar Crecientes de Proyecto, sólo se pueden extraer de extensos registros de alta frecuencia, normalmente fajas pluviográficas. Aun remplazando caudal por intensidad de lluvia se continúa teniendo un problema en nuestro país, ya que las series pluviográficas largas también son escasas. En cambio, es habitual otro dato de lluvia provisto por pluviómetros: la lámina de lluvia diaria.

A partir de esta información es que los técnicos y proyectistas en muchos casos proceden a la estimación de caudales de diseño mediante la aplicación de modelos de transformación lluvia caudal, en los cuales la lluvia de diseño se estima partiendo de información de lámina de lluvia diaria cercana a la zona de estudio. Sobre esa información es que se realiza un Análisis de Frecuencia y mediante el mismo se estiman las relaciones que hay entre una variable hidrológica de interés y las diferentes recurrencias.

A continuación, se detalla la metodología aplicada sobre las series históricas para la realización de análisis de frecuencia.

2.2. Metodología aplicada sobre las series históricas para la realización de análisis de frecuencia

El análisis de frecuencia es una metodología mediante la cual se ajusta una distribución de probabilidad a una serie de observaciones para definir las probabilidades de sucesos futuros de algunos eventos de interés; es decir, nos permite relacionar una variable dada con su probabilidad de ocurrencia (y por lo tanto con su período de retorno). El uso de esta metodología desempeña un papel importante en la práctica de la ingeniería.

Esta metodología consta de una serie de etapas que deben ser realizadas para poder, finalmente, relacionar la variable y la probabilidad: (1) Recopilación y procesamiento de series; (2) Determinación del año hidrológico; (3) Generación de series hidrológicas; (4) Verificación de las series mediante pruebas estadísticas; (5) Estadística Descriptiva: determinación de parámetros estadísticos; y (6) Estadística Inferencial: ajuste de distribuciones de probabilidad.

Para poder realizar el análisis de frecuencia clásico se debe asegurar que la serie muestral de la que se parte es una variable aleatoria; y para que eso se cumpla deben verificarse algunas pruebas estadísticas, más precisamente las pruebas de datos atípicos, independencia, estacionariedad y homogeneidad.

La prueba de datos atípicos detecta datos que se alejan significativamente de la tendencia que se observa en el resto de la serie. Se supone que los datos se encuentran normalmente distribuidos. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos, especialmente en muestras pequeñas.

Una serie no es independiente cuando un valor está ligado al anterior o posterior, y se observa una correlación entre los valores sucesivos (un ejemplo de serie no independiente se muestra en la Figura 5).

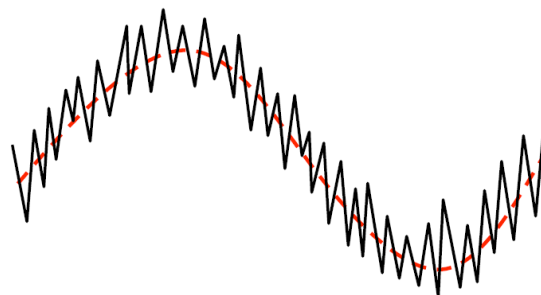


Figura 5: Ejemplo de serie no independiente. (Fuente: Prof. Camilo Daleles Rennó)

Por otro lado, una serie es no homogénea cuando alguno de sus parámetros de estadística descriptiva (por ejemplo, su media, desvío, coeficiente de variación, entre otros) no permanece constante en el tiempo (un ejemplo de serie no homogénea se muestra en la Figura 6).

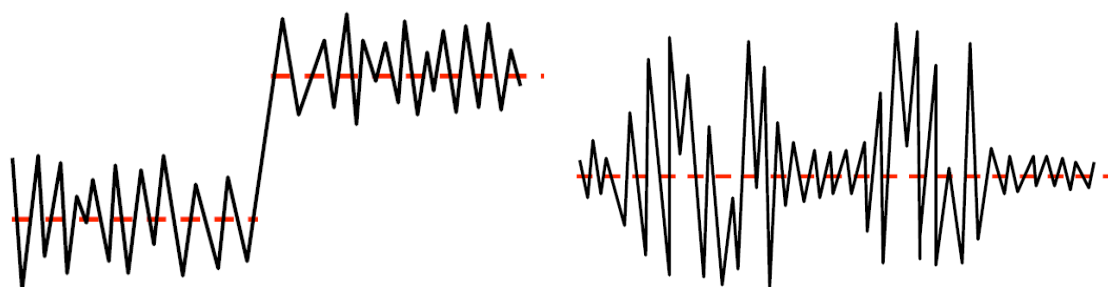


Figura 6: Ejemplo de serie no homogénea debido a variación de la media (izquierda) y debido a la variación del desvío (derecha). (Fuente: Prof. Camilo Daleles Rennó)

Además, una serie es no estacionaria si presenta una tendencia temporal significativa (un ejemplo de serie no estacionaria se muestra en la Figura 7). En la práctica, una serie puede presentar tendencia (y por ende es no estacionaria) debido a diferentes fenómenos tales como variaciones climáticas o efectos de las actividades humanas

(por ejemplo, a aprovechamientos hidráulicos, cambios de uso del suelo, urbanización, etc.). Según la serie de la que se trate, la no estacionariedad puede generar tendencias ascendentes o descendentes en los registros de datos hidrológicos extremos.

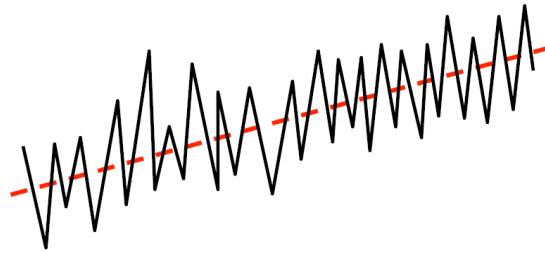


Figura 7: Ejemplo de serie no estacionaria. (Fuente: Prof. Camilo Daleles Rennó)

A continuación, se detalla la metodología empleada en el análisis de frecuencia, con la finalidad de obtener los valores de las diferentes variables a analizar asociados a diferentes recurrencias (tiempos de retorno) mediante un análisis regional de variables hidrometeorológicas.

I. Recopilación de la información meteorológica histórica.

Se recopila información histórica de variables climáticas de las estaciones instaladas en la zona de estudio.

II. Determinación del año hidrológico

Para asegurar que los valores de las series recopiladas son independientes, se determina como período de análisis al año hidrológico. Este concepto, se define como el período anual que no fracciona el ciclo estacional de lluvia, pudiendo ser distinto al año calendario.

III. Generación de las series hidrológicas

Luego de definir el año hidrológico se procede a elaborar las series hidrológicas a ser analizadas.

IV. Verificación de hipótesis básicas.

En primer lugar, se analiza la longitud de cada una de las series. Luego, a cada una de estas se les realiza pruebas estadísticas para poder conocer si las mismas son

adecuadas para ser posteriormente analizadas mediante estadística inferencial, distinguiéndose para este último análisis dos metodologías de trabajo: una para series estacionarias y otra para series no estacionarias.

A continuación, se detallan las pruebas estadísticas a aplicar.

Longitud de serie mínima.

Para poder analizar los valores de diseño asociados a diferentes recurrencias con su respectivo grado de incertidumbre, es fundamental la longitud de serie hidrológica que se esté analizando. *En el Capítulo 2 se incorpora un análisis complementario a los realizados por Caamaño y Daaso, (2003); Catalini et al., (2011) y Guillén, (2014) para definir el criterio de longitud mínima de serie.*

Presencia de Datos Atípicos.

La prueba de datos atípicos detecta datos que se alejan significativamente de la tendencia que se observa en el resto de la serie. Se supone que los datos se encuentran normalmente distribuidos. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos, especialmente en muestras pequeñas.

Los procedimientos para tratar estos datos requieren un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas. En el presente trabajo se optó por el empleo de la metodología propuesta por Chow (1959), la cual considera una ecuación de frecuencia que puede utilizarse para detectar la presencia de datos atípicos, a saber:

$$Y = \bar{y} \pm K_n \cdot S_y \quad (1)$$

Donde Y es el umbral de dato atípico alto o bajo, en unidades logarítmicas, K_n es un valor que depende del tamaño de la muestra, el cuál proviene de la distribución normal (Tabla 1), \bar{y} es la media de los logaritmos de la muestra y S_y es el desvío estándar de los logaritmos de la misma.

Tabla 1: Valores K_n para la prueba de datos atípicos (Chow, 1959).

Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n
10	2.036	29	2.549	48	2.753
11	2.088	30	2.563	49	2.76

Tamaño de muestra n	Kn	Tamaño de muestra n	Kn	Tamaño de muestra n	Kn
12	2.134	31	2.577	50	2.768
13	2.175	32	2.591	55	2.804
14	2.213	33	2.604	60	2.837
15	2.247	34	2.616	65	2.866
16	2.279	35	2.628	70	2.893
17	2.309	36	2.639	75	2.917
18	2.335	37	2.65	80	2.94
19	2.361	38	2.661	85	2.961
20	2.385	39	2.671	90	2.981
21	2.408	40	2.682	95	3
22	2.429	41	2.692	100	3.017
23	2.448	42	2.7	110	3.049
24	2.467	43	2.71	120	3.078
25	2.486	44	2.719	130	3.104
26	2.502	45	2.727	140	3.123
27	2.519	46	2.736		
28	2.534	47	2.744		

Para detectar los datos atípicos, se calculan umbrales superiores e inferiores para cada serie de datos de las estaciones analizadas. Si los logaritmos de los valores en una muestra son mayores que Y entonces se consideran como datos atípicos altos, análogamente en el caso de ser menores que Y serán tomados como datos atípicos bajos.

En síntesis, la metodología para la detección de los datos atípicos consiste en el análisis de las series históricas correspondientes a las distintas variables de las estaciones emplazadas en el territorio en estudio. A dichas series se les aplicó el logaritmo neperiano procediendo a la determinación de la media μ y el desvío estándar σ . Aplicando sobre ella la metodología propuesta por Chow (1959).

El procedimiento consiste en depurar los datos atípicos en caso de que existan y volver a realizar el análisis; en caso de no encontrar datos atípicos nuevamente la prueba verifica y se continúa. En caso contrario, la prueba no verifica y se descarta los registros de esta estación.

Prueba de independencia.

Uno de los requisitos para analizar estadísticamente las series de datos es que los mismos sean aleatorios. Se busca que la probabilidad de ocurrencia de uno cualquiera de ellos no dependa de la ocurrencia de los datos que le preceden y que tampoco este influya a los datos que le siguen o datos futuros. Es decir que para el análisis

estadístico se requiere que la muestra esté compuesta por datos independientes de los demás.

Una de las pruebas estadísticas de independencia que se conoce es la de Wald-Wolfowitz, que permite verificar la existencia de una autocorrelación significativa de primer orden entre las observaciones. Esta prueba contrasta si dos muestras con datos independientes proceden de poblaciones de la misma distribución. Si esto es así los parámetros poblacionales de ambas muestras son los mismos.

En esta prueba, las hipótesis a contrastar son las siguientes:

H_0 : El proceso que genera el conjunto de datos numéricos es aleatorio.

H_1 : El proceso que genera el conjunto de datos numéricos no es aleatorio.

En esta prueba se compara cada valor con la media de la muestra. Se le asigna a cada dato un término E o F (éxito o fracaso) según si el valor es mayor o menor que la media.

Para evaluar la aleatoriedad de la muestra, se considera como estadístico de prueba al número de corridas presente en los datos. Una corrida se define como una serie éxitos o fracasos consecutivos. Luego en la muestra completa se puede distinguir:

R : número de corridas.

n_1 : número de éxitos, o de valores superiores a la media.

n_2 : número de fracasos, o de valores inferiores a la media.

n : número de datos en la muestra.

En la prueba se utiliza el valor estadístico Z para una prueba de dos extremos. Si Z es mayor o igual al valor crítico superior, o menor o igual al valor crítico inferior, la hipótesis nula de aleatoriedad puede ser rechazada al nivel de significancia α . Sin embargo, si Z se encuentra entre estos límites, la hipótesis nula de aleatoriedad puede aceptarse.

El valor estadístico Z se determina de la siguiente manera:

$$Z = \frac{R - \mu_r}{\sigma_r} \quad (2)$$

Donde:

$$\mu_r = \frac{2n_1 \cdot n_2}{n} + 1 \quad (3)$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{(\mu_r - 1) \cdot (\mu_r - 2)}{n - 1}} \quad (4)$$

Donde el valor del estadístico Z , se contrasta con el valor de tabla de la distribución normal para un cierto nivel de significancia establecido.

En el caso que una serie histórica de datos correspondientes a las precipitaciones máximas anuales no verifique esta prueba, se descarta esa estación pluviométrica.

Prueba de homogeneidad a escala anual.

La prueba de homogeneidad a escala anual de Wilcoxon permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra.

En el caso que una serie histórica de datos correspondientes a las precipitaciones máximas anuales no verifique esta prueba, se descarta esa estación pluviométrica.

Para efectuar esta prueba se debe sustituir las observaciones de las dos muestras de tamaños N_1 y N_2 , por sus rangos combinados. Los rangos son asignados de tal manera que el rango 1 se asigna a la más pequeña de las $N = N_1 + N_2$ observaciones combinadas, el rango 2 se le asigna a la siguiente más alta y así sucesivamente, de modo que el rango N queda asignado a la observación más grande. Si varias observaciones tienen el mismo valor, se asigna a cada una de estas el promedio de los rangos que, en otra circunstancia, se les habría asignado.

La estadística de la prueba de Wilcoxon T_1 , es simplemente la suma de los rangos asignados a las N_1 observaciones de la muestra más pequeña. Para cualquier valor entero N , la suma de los N primeros enteros consecutivos puede calcularse fácilmente como $N \cdot (N + 1)/2$. La estadística de prueba T_1 , más la suma de los rangos asignados a los N_2 elementos de la segunda muestra, T_2 , por consiguiente, debe ser igual a este valor, es decir;

$$T_1 + T_2 = \frac{N \cdot (N + 1)}{2} \quad (5)$$

De modo que esta ecuación puede ser empleada como verificación del procedimiento de asignación de rangos.

La prueba de la hipótesis nula puede ser de dos extremos o de un extremo, dependiendo de si se está probando si las dos medianas de población son exclusivamente diferentes o si una es mayor que la otra.

La estadística de prueba, T_1 , está distribuida de manera aproximadamente normal. Se puede emplear la siguiente fórmula de aproximación de muestra grande para probar la hipótesis nula:

$$|Z| = \frac{T_1 - \mu_{T_1}}{\sigma_{T_1}} \quad (6)$$

El valor medio de la estadística de prueba T_1 , puede calcularse con:

$$\mu_{T_1} = \frac{N_1 \cdot (N+1)}{2} \quad (7)$$

Y la desviación estándar de la estadística de prueba T_1 , se puede calcular con:

$$\sigma_{T_1} = \sqrt{\frac{N_1 \cdot N_2 \cdot (N+1)}{12}} \quad (8)$$

Basándose en el nivel de significación seleccionado α , la hipótesis nula puede ser rechazada si el valor Z calculado cae en la región de rechazo apropiada.

Pruebas de estacionariedad.

Las pruebas de estacionariedad se aplican a series hidrológicas para determinar si las mismas presentan o no tendencias, dado que uno de los requisitos para analizar estadísticamente las series de datos es que los mismos no presenten tendencias.

Para poder identificar las tendencias que generan no estacionariedad en series hidrológicas, numerosos autores han orientado sus estudios a la identificación de estas tendencias en series de variables hidrometeorológicas.

La prueba más utilizada en la identificación de tendencias en series de variables hidrometeorológicas es la de Mann-Kendall. El inconveniente que presenta es que la autocorrelación existente en algunas de estas series afecta los resultados de la prueba, causando problemas en la detección y evaluación del nivel de significación. La presencia de autocorrelación positiva tiende a aumentar la probabilidad de detección

de tendencia cuando, en efecto, ésta no existe, mientras que la autocorrelación negativa tiende a disminuirla (López et al. 2007)

Para corregir este efecto, Hamed y Rao (1998) derivan una relación teórica para calcular la varianza del estadístico de la prueba para datos autocorrelacionados y proponen la prueba Mann-Kendall modificada; mientras que Yue, et al. (2002b) presenta una técnica de pre-blanqueo (Tren Free Pre-Whitening –TFPW- por sus siglas en inglés) que remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie.

A priori, en este trabajo, la prueba que se utiliza para la identificación de tendencias en las series es la de Mann-Kendall. Pero debido a lo que se explicó anteriormente (que la autocorrelación existente en algunas de estas series afecta los resultados de esta prueba) es que se complementan los resultados aplicando también la prueba de Mann-Kendall modificada y la técnica de pre-blanqueo.

En resumen, la metodología seguida en esta tesis en lo relacionado a la existencia o no de series estacionarias es la siguiente:

1. En primer lugar, se aplica la prueba de Mann-Kendall; y si la misma es aceptada se prosigue con el análisis de frecuencia clásico.
2. Por el contrario, si la prueba es rechazada se aplica entonces la prueba de Mann-Kendall modificada y la técnica de pre-blanqueo para verificar la existencia de la tendencia que genera la no estacionariedad. Si estas últimas dos pruebas también son rechazadas, entonces se prosigue con el análisis para series no estacionarias (que se explica posteriormente). En caso de que al menos una de estas dos pruebas resulte rechazada, se prosigue también con el análisis para series no estacionarias.

A continuación, se detalla cada una de las pruebas de estacionariedad.

a) Prueba de Mann-Kendall.

En la prueba de Mann-Kendall, para cada dato de la serie, la cual se encuentra ordenada cronológicamente, se calcula cuantos datos posteriores son superiores. De esta forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} s(i) \quad (9)$$

En donde $s(i)$ es el número de los valores de $X_j > X_i$, siendo $i < j \leq n$.

Por otro lado, se determinan cuantos valores posteriores son menores. Los mismos se determinan de la siguiente manera:

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} t(i) \quad (10)$$

En donde $t(i)$ es el número de valores $X_j < X_i$, siendo $i < j \leq n$.

Con los valores de S y T calculados, se define el índice $I = S - T$, que debe ser próximo a cero si se verifica la estacionariedad.

Por lo tanto, se deben verificar las siguientes condiciones:

- $I < I_{cri}(\alpha)$, o sea que el I calculado sea menor que un valor de I crítico tabulado en función del tamaño de la muestra y según diferentes niveles de significación.
- Para tamaños de muestra (n) mayores a 10, el valor del estadístico se aproxima a una distribución normal. Por lo que se debe utilizar una forma estandarizada del estadístico en donde se transforma el índice I en el índice K , definido como:

$$K = \frac{I_{cri}-1}{\left(\frac{n \cdot (n-1) \cdot (2n+5)}{18}\right)^{0.5}} \quad \text{si } I > 0 \quad (11)$$

$$K = 0 \quad \text{si } I = 0 \quad (12)$$

$$K = \frac{I_{cri}+1}{\left(\frac{n \cdot (n-1) \cdot (2n+5)}{18}\right)^{0.5}} \quad \text{si } I < 0 \quad (13)$$

Los valores de I_{cri} son obtenidos de una distribución Normal, los cuales son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores I_{cri} para el Test Mann – Kendall (Kendall, 1938).

α	0.01	0.05	0.1
I_{cri}	2.33	1.64	1.28

b) Prueba de Mann Kendall modificada.

La prueba Mann Kendall modificada para series auto correlacionadas propuesta por Hamed y Rao (1998) está basada en la corrección de la varianza de S en función del número efectivo de observaciones N_S . La varianza modificada (sobre la cual posteriormente se realiza el mismo test de Mann Kendall para verificar la estacionariedad) es:

$$V^*(S) = Var(S) \cdot \frac{N}{N_S} \quad (14)$$

Para calcular la relación entre N y N_S , se utiliza la siguiente formula:

$$\frac{N}{N_S} = 1 + \frac{2}{N \cdot (N-1) \cdot (N-2)} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) \cdot (N-i-1) \cdot (N-i-2) \cdot \rho_S(i) \quad (15)$$

Donde N es el número total de observaciones y $\rho_S(i)$ son los valores significativos de la función de auto correlación de la serie de los órdenes de las observaciones, calculados después de remover la tendencia estimada por algún método no-paramétrico robusto (Sen, 1968).

c) Técnica de pre-blanqueo.

El procedimiento de pre-blanqueo propuesto por Yue et al. (2002b) para eliminar el efecto de la correlación serial en la aplicación de la prueba Mann Kendall es denominado pre-blanqueo libre de tendencia. Esta técnica propone remover de la serie estandarizada la tendencia, estimada por algún método robusto (Sen, 1968), antes de calcular el coeficiente de auto correlación de retardo de primer orden (ρ_1). De esta forma se resuelve el problema de la influencia de la tendencia en la estimación del coeficiente auto correlación, mientras que la remoción de la tendencia no afecta al proceso auto-regresivo subyacente.

En primer lugar, se asume que la tendencia es lineal y se elimina de la serie según:

$$Y_t = X_t - T_t = X_t - a \cdot t \quad (16)$$

Siendo X_t la serie original ordenada cronológicamente, a la pendiente del ajuste lineal hecho a la serie y t la posición de cada uno de los valores de la serie original ordenada cronológicamente (el primer valor tendrá $t = 0$, el segundo $t = 1$, y así sucesivamente).

Luego se estima el coeficiente de autocorrelación de primer orden (ρ_1) de la serie Y_t y si éste no es significativamente distinto de cero, la serie se considera independiente y la prueba Mann-Kendall se aplica a la serie original para verificar la estacionariedad de la serie. Si ρ_1 es significativamente distinto de cero, la serie Y_t se pre-blanquea como:

$$Y'_t = Y_t - \rho_1 \cdot Y_{t-1} \quad (17)$$

Posteriormente, la tendencia estimada y la serie Y'_t compuesta por residuos que deben ser independientes, se combinan como:

$$Y''_t = Y'_t + T_t = Y'_t + a \cdot t \quad (18)$$

Y la prueba Mann-Kendall se aplica a la serie Y''_t para verificar la estacionariedad de la serie; evitando de esta forma el efecto negativo de la correlación serial.

V. Análisis de estadística descriptiva.

El objetivo de la estadística descriptiva es extraer la información esencial de un conjunto de datos, describiendo una muestra de datos con un conjunto pequeño de parámetros.

Los principales parámetros estadísticos que se calculan para cada serie histórica son el máximo, el mínimo, la media, el desvío, la varianza, el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis.

VI. Análisis de estadística inferencial.

En la naturaleza, la mayoría de los fenómenos hidrológicos constituyen procesos aleatorios y dado que la planificación y el diseño están basados en eventos futuros, cuya magnitud y tiempo de ocurrencia no pueden predecirse, se debe recurrir al estudio de las probabilidades o frecuencias con que un determinado evento puede ser igualado o excedido.

La estadística inferencial estima las características estadísticas de una población a partir del análisis estadístico de una muestra. La estimación de las características de la población se realiza a partir de la determinación o ajuste de la función de distribución de probabilidad por métodos empíricos y/o teóricos.

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante un ajuste de una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información estadística de la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados.

Una vez definida la función de distribución de probabilidad óptima para caracterizar la población, se estiman los valores de las variables para distintas probabilidades de ocurrencia o períodos de retorno.

Análisis inferencial de series estacionarias

Cuando se realiza estadística inferencial sobre una serie estacionaria, se relaciona la variable analizada con una recurrencia dada; es decir para cada tiempo de retorno el análisis arroja el valor de la variable con su respectivo intervalo de confianza. Para ello es que se ajustan funciones de distribución de probabilidad sobre la serie analizada (ya sean empíricas o teóricas). A continuación, se muestra, de manera gráfica, un ejemplo de este caso:

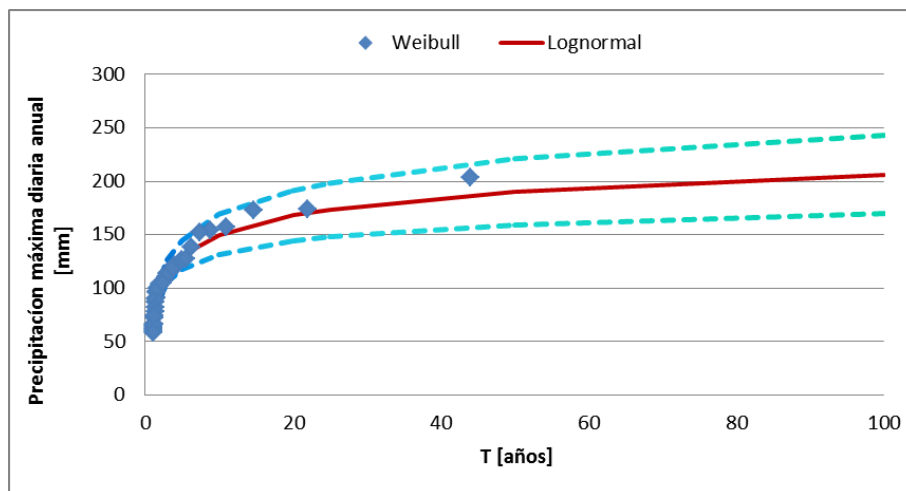


Figura 8: Ejemplo de análisis inferencial de una serie estacionaria de precipitaciones máximas diarias anuales.

Para este análisis el software utilizado se denomina FACETA y fue desarrollado por el equipo de trabajo del Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la Universidad Nacional de Córdoba.

- a) Funciones de distribución de probabilidad empírica.

Los valores extremos son independientes entre sí, y es necesario asignar un valor de probabilidad empírica a cada dato. Para ello se ordenan los N registros históricos de forma decreciente sin importar la fecha de ocurrencia, y a cada uno de estos registros se le asigna una probabilidad en función del orden m en la lista ordenada.

Existen varias funciones de distribución de probabilidad empíricas históricamente utilizadas; y una de ellas es la de Weibull (1951), que estableció una función de distribución de probabilidad empírica en el que la probabilidad de ocurrencia (porcentaje de veces durante el cual un determinado evento es igual o mayor a la cantidad indicada) de un evento dado se corresponde con la siguiente expresión:

$$p = \frac{m}{(N+1)} \quad (19)$$

Donde N corresponde al número total de datos de una serie (años de registro) y m representa el número de orden de la serie ordenada en forma creciente. Si analizamos la ecuación anteriormente mostrada, se observa que la función empírica de Weibull asigna una probabilidad de ocurrencia igual a $1/(N + 1)$ al mayor de los datos históricos y $N/(N + 1)$ al menor. Por otra parte, se llama probabilidad de no excedencia o no ocurrencia a $1 - p$.

b) Funciones de distribución de probabilidad teórica

Después de realizar el ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad empírica, se ajusta cada serie hidrológica histórica a diferentes funciones de distribución de probabilidad teóricas. Luego se evalúa cuál es la más adecuada para que represente a la población de las distintas variables analizadas de cada estación pluviométrica. Algunas de las funciones que se pueden ajustar son: Valores extremos generalizada -GEV- (por el método de momentos y/o de máxima verosimilitud), Gumbel (por el método de momentos y/o de máxima verosimilitud), Lognormal (por el método de máxima verosimilitud) y Log Pearson III (por el método de momentos).

Análisis inferencial de series no estacionarias

A diferencia del caso anterior, cuando se realiza estadística inferencial sobre una serie no estacionaria, se obtienen para diferentes horizontes de tiempo distintas relaciones entre la variable analizada y el período de retorno. Es decir, el análisis arroja para un tiempo de retorno, el valor de la variable con su respectivo intervalo de confianza, pero esta relación es cambiante para distintos horizontes de tiempo, lo que implica, que la recurrencia de un evento ya no es estática en el tiempo, sino que es una variable dinámica.

Para este análisis el software utilizado se denomina Non-Stationary Extreme Value Analysis (NEVA) (Cheng y Kouchak - University of California, Irvine - 2014). Si bien sirve tanto para series estacionarias como no estacionarias, el programa solo fue utilizado

para estos últimos casos. La función de distribución de probabilidad teórica que el software ajusta a las series es la función de Valores Extremos Generalizada (GEV).

La distribución GEV es flexible para modelar diferentes comportamientos de extremos con tres parámetros de distribución $\theta = (\mu, \sigma, \xi)$: (1) el parámetro de ubicación (μ) especifica el centro de la distribución; (2) el parámetro de escala (σ) determina el tamaño de las desviaciones alrededor del parámetro de ubicación; y (3) el parámetro de forma (ξ) gobierna el comportamiento de la cola de la distribución GEV.

En NEVA, se supone que el parámetro de ubicación es una función lineal del tiempo para dar cuenta de la no estacionariedad (20), mientras se mantienen constantes los parámetros de escala y forma.

$$\mu(t) = \mu_1 \cdot t + \mu_0 \quad (20)$$

Donde t es el tiempo (en años), y μ_1 y μ_0 , son los parámetros. Mientras que NEVA permite σ y ξ no estacionarios ($\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_0$; $\xi(t) = \xi_1(t) + \xi_0$), en este estudio, solo se discute la no estacionariedad con respecto a μ . La razón principal es que el modelado de cambios temporales en σ y ξ requiere de observaciones a largo plazo que a menudo no están disponibles para aplicaciones prácticas.

Como se mencionó anteriormente, al aplicar análisis de frecuencia a una serie no estacionaria se obtiene una relación variable-período de retorno que varía para distintos horizontes de tiempo, un ejemplo de esto se muestra gráficamente en la Figura 9.

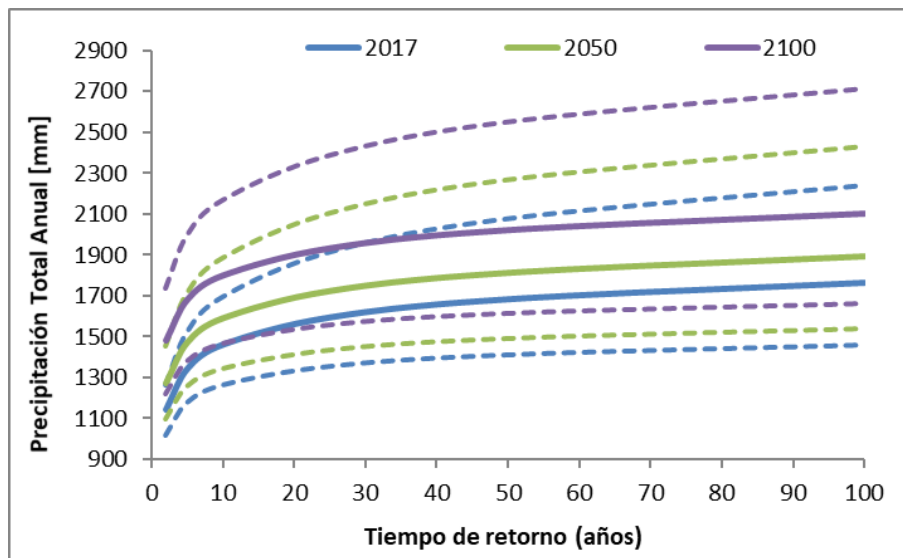


Figura 9: Ejemplo de la variación de la relación variable-período de retorno para distintos horizontes de tiempo.

Lo anterior implica que el período de retorno correspondiente a un determinado valor de la variable analizada cambia a medida que pasa el tiempo (aumentando o disminuyendo según la tendencia de la serie sea decreciente o creciente respectivamente). Un ejemplo de lo aquí explicado se muestra en la Figura 10.

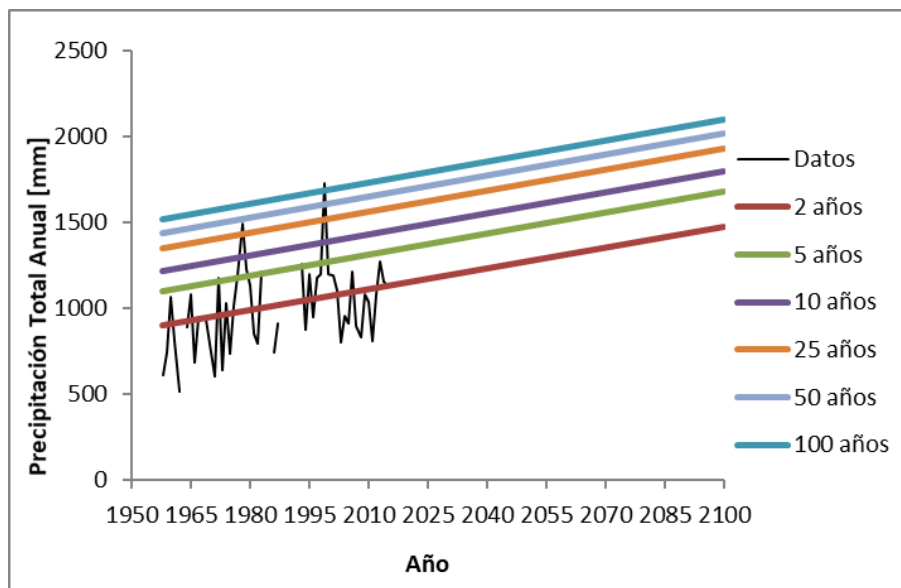


Figura 10: Ejemplo de análisis inferencial de una serie no estacionaria de precipitaciones totales anuales.

Se puede ver con una línea negra como la serie se comporta a lo largo del tiempo durante el registro muestreado. Además, se ve cómo se va modificando el valor medio de la variable para diferentes períodos de retorno a medida que pasa el tiempo. Por ejemplo, un valor de 15 días lluviosos al mes tenía un período de retorno de 5 años en el año 1960, mientras que en el año 1995 el período de retorno de este valor bajó a 2 años.

The top half of the page is decorated with various blue circular elements. There are several thin blue circles of different sizes scattered across the area. Overlaid on these are several thick blue rings of varying diameters. Some of these rings are interconnected, forming a complex, overlapping pattern that resembles a molecular structure or a network of connections. The colors range from light sky blue to a slightly darker, muted blue.

Información pluviométrica analizada

3. Capítulo 3: Información pluviométrica analizada.

3.1. Descripción de los datos pluviométricos analizados.

A continuación, se describen los datos pluviométricos analizados en este trabajo en cuanto a su localización espacial y su longitud de registro.

Cabe destacar que las estaciones recopiladas en este trabajo forman parte de una muestra. Se buscaron fuentes de fácil acceso que contaran con series de longitudes importantes y que estén distribuidas (en lo posible) por toda la superficie de la provincia de Córdoba.

3.1.1. Localización espacial de las estaciones pluviométricas.

Inicialmente, se recopilaron de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación 44 estaciones. De estas 44 estaciones, 22 permanecen activas mientras que el resto no. Por otro lado, de los 22 puestos activos, 5 de ellos no contaban con datos de pluviometría, por lo tanto, de esta fuente, se extrajo información de 17 puestos pluviométricos.

De estas 17 estaciones, sólo 8 contaban con información pluviométrica actualizada (al año 2016). Debido a esta poca cantidad es que se decidió llevar a cabo el análisis sobre todas (17) las estaciones recopiladas. Estas estaciones se mencionan en la siguiente tabla (Tabla 3).

Tabla 3: Estaciones pluviométricas recopiladas de la Base de Datos Hidrológica Integrada de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

	Estación	Latitud	Longitud	Años de registro	
				Inicio	Fin
1	El Cajón - Pto. Pereyra	-31.443	-64.809	1992	2006
2	Icho Cruz - Copina	-31.575	-64.712	1992	2010
3	Malambo - El Galpón	-31.508	-64.820	1992	2013
4	San Antonio - Barrio El Canal	-31.447	-64.487	1992	2010
5	San Antonio - Confluencia Icho Cruz - El Cajón	-31.490	-64.639	1992	2010
6	El Cajón – Pto. Garay	-31.415	-64.735	1992	2010
7	Icho Cruz - Confluencia ríos Icho Cruz y Malambo	-31.491	-64.679	1992	2010
8	San Antonio - El Cóndor	-31.581	-64.789	1992	2013
9	El Cajón - Sin Denominación	-31.450	-64.692	1992	2010
10	Las Tapias - Las Tapias	-32.850	-64.950	1993	2016
11	Grande - Cerro Blanco	-32.133	-64.917	1993	2016
12	Grande - El Manzano	-32.367	-64.883	1989	2016

Estación		Latitud	Longitud	Años de registro	
				Inicio	Fin
13	Grande - La Puente	-32.333	-64.783	1974	2016
14	Grande - Lutti	-32.300	-64.733	1984	2016
15	Grande - Pampichuela	-32.133	-64.817	1977	2016
16	Grande - Yacanto	-32.100	-64.750	1990	2016
17	El Durazno - La Florida	-32.233	-64.783	1958	2016

Por otro lado, se recopiló información de 8 estaciones pertenecientes a la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional con información actualizada al año 2016. Las mismas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Estaciones pluviométricas recopiladas de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional.

Estación		Latitud	Longitud	Años de registro												
				Inicio	Inicio											
18	Córdoba Observatorio	-31.421	-64.199	1956	2016											
19	Villa de María del Rio Seco	-29.905	-63.722	1956	2016											
20	Villa Dolores	-31.933	-65.200	1956	2016											
21	Córdoba Aeropuerto	-31.310	-64.208	1956	2016											
22	Pilar	-31.683	-63.900	1956	2016											
23	Rio Cuarto	-33.080	-64.270	1956 </tr <tr> <td>24</td> <td>Marcos Juárez</td> <td>-32.700</td> <td>-62.170</td> <td>1956</td> <td>2016</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>Laboulaye</td> <td>-34.130</td> <td>-63.330</td> <td>1956</td> <td>2016</td> </tr>	24	Marcos Juárez	-32.700	-62.170	1956	2016	25	Laboulaye	-34.130	-63.330	1956	2016
24	Marcos Juárez	-32.700	-62.170	1956	2016											
25	Laboulaye	-34.130	-63.330	1956	2016											

La localización de cada una de las estaciones pluviométricas analizadas se puede ver en la Figura 11.

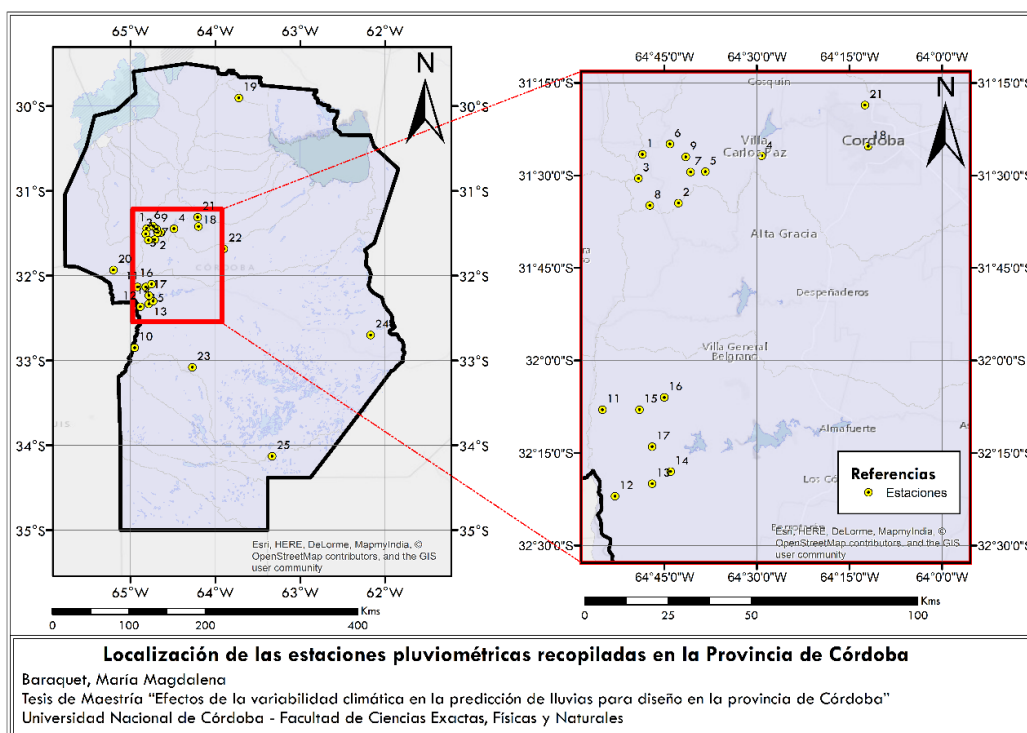


Figura 11: Localización de las estaciones pluviométricas recopiladas en la Provincia de Córdoba.

Lo que se observa es que la mayor cantidad de las estaciones pluviométricas se concentra en la zona central oeste de la provincia, donde se encuentra el cordón serrano. Entre estas estaciones se pueden distinguir dos grupos principales: uno de ellos ubicado hacia el norte y el otro en la zona sur de las sierras.

Por otro lado, 3 de los puestos pluviométricos se encuentran en los extremos y el centro del río cuarto, siendo estos los puestos ubicados más hacia el sur de la provincia.

En cuanto a la zona norte de la provincia, se logró recopilar información sólo de una estación pluviométrica (estación 19). Lo mismo ocurre para la zona este del área de estudio, en la cual se recopiló información sólo de la estación 24.

3.1.2. Longitud de los registros pluviométricos históricos recopilados.

La longitud de los registros pluviométricos históricos se representa de manera gráfica en la Figura 12.

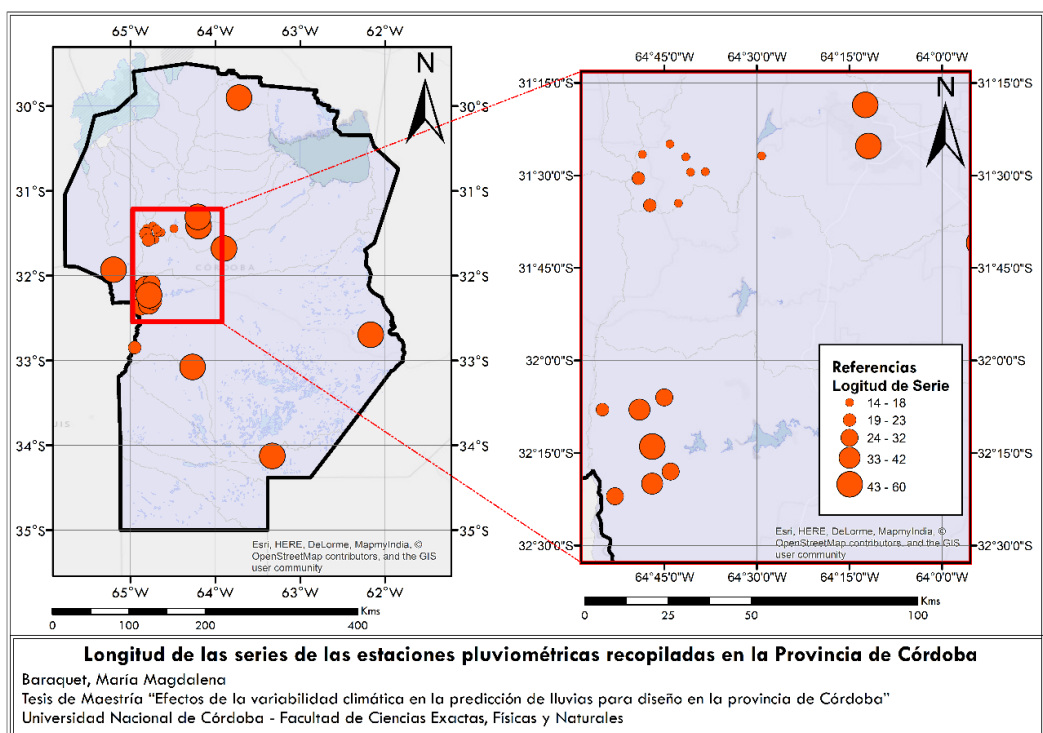


Figura 12: Longitud de las series de las estaciones pluviométricas recopiladas en la Provincia de Córdoba.

Como puede verse, la longitud de los registros pluviométricos históricos en la provincia de Córdoba varía desde 14 hasta 60 años.

Por otro lado, la longitud de cada una de las series históricas recopiladas, así como los años en que se iniciaron y finalizaron los registros, y los períodos donde existe faltante de datos puede verse en la Figura 13.

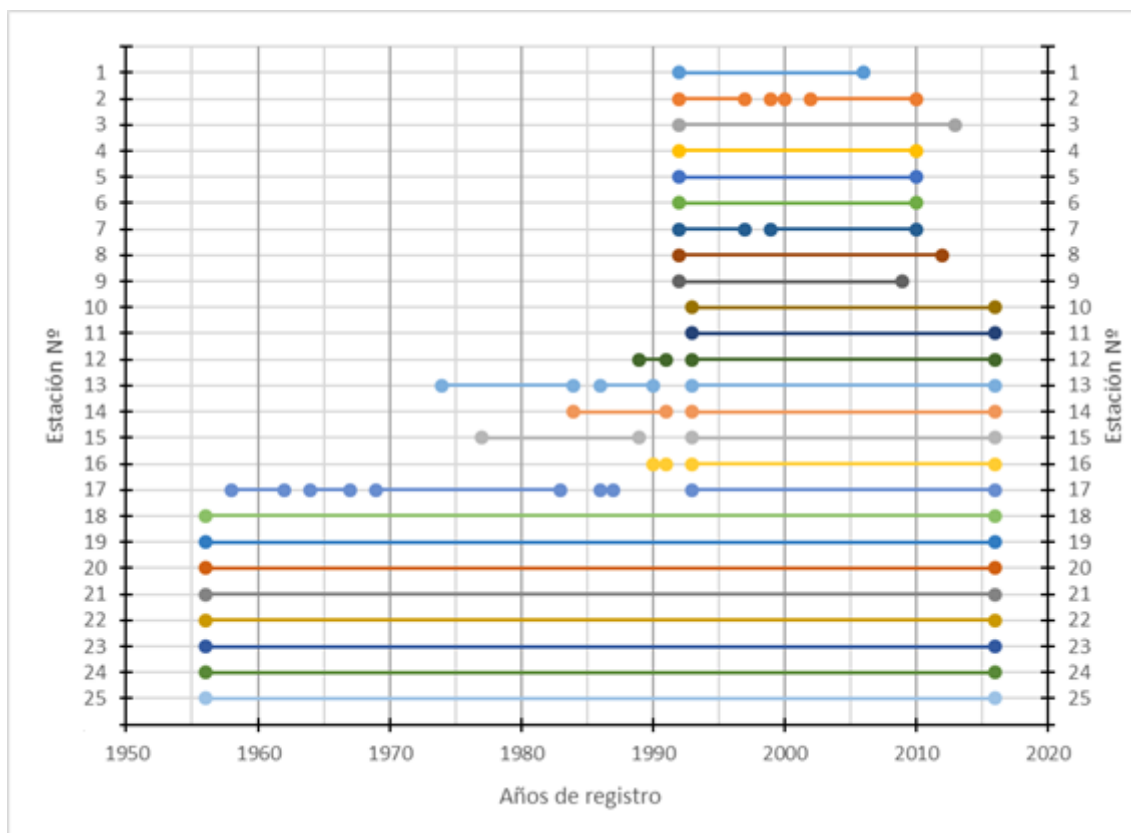


Figura 13: Año de registro de las estaciones pluviométricas analizadas.

Como se observa, las series más extensas son las pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional, que cuentan con datos desde 1956 hasta 2016 (estaciones desde la 18 hasta la 25 inclusive); por otro lado, la serie más corta pertenece a la estación 1 de la Base de Datos Hidrológica Integrada, que cuenta con datos desde 1992 hasta 2006.

3.2. Variables analizadas mediante análisis estadístico

De cada estación recopilada se cuenta con el registro pluviométrico histórico de datos; hay estaciones en las que la serie está incompleta, es decir, con períodos intermedios en los que no se cuenta con datos, mientras que otras series se encuentran completas.

Se analizan cinco variables climáticas relacionadas con la precipitación diaria, las cuales son:

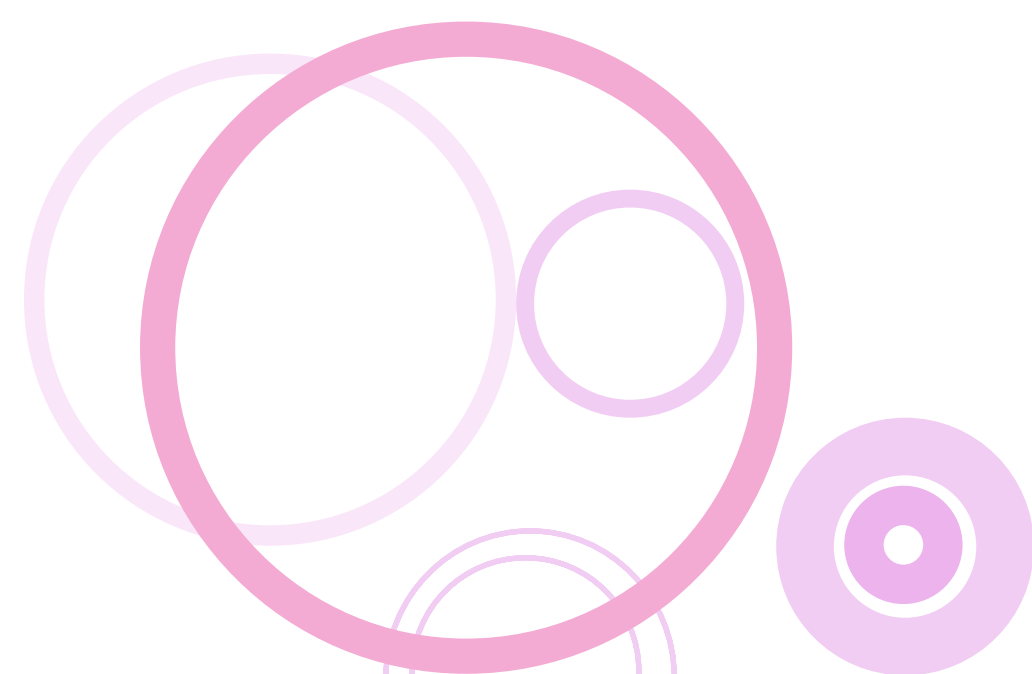
- 1) **Precipitación máxima diaria anual (PMDA):** se busca el máximo registro de precipitación diaria por cada año hidrológico de la serie.

- 2) **Precipitación total anual (PTA)**: se suman las precipitaciones diarias para cada año hidrológico.
- 3) **Días lluviosos al año (DLLA)**: se suman los días en que hubo precipitaciones para cada año hidrológico.
- 4) **Días lluviosos al mes (DLLM)**: se suman los días en que hubo precipitaciones para cada mes, luego para cada año hidrológico, se busca el valor máximo de días lluviosos al mes que se tuvo en ese respectivo año.
- 5) **Días consecutivos con lluvia (DCcLL)**: se cuenta para cada mes la cantidad de días consecutivos con lluvia, luego para cada año hidrológico, se toma el valor máximo de días consecutivos con lluvia que se tuvo para ese respectivo año.

Teniendo en cuenta que se analizarán 5 variables por estación, y que se recopilaron 25 estaciones, se contará, entonces, con 125 series a analizar.



Aplicación y nuevos avances en el análisis estadístico recomendado



4. Capítulo 4: Aplicación y nuevos avances en el análisis estadístico recomendado

A continuación, se desarrolla el análisis estadístico recomendado en el punto 2.2 sobre la zona de estudio y se presentan avances realizados dentro de este campo. La metodología aplicada se enumera a continuación:

I. Recopilación de la información meteorológica histórica

Se recopiló información histórica de lámina de lluvia diaria en estaciones pluviométricas instaladas en la provincia de Córdoba (ver Figura 11) de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación y del Servicio Meteorológico Nacional.

II. Determinación del año hidrológico

En este trabajo se definió, a priori, el año hidrológico como el período que transcurre desde el 1 de julio de un año al 30 de junio del año siguiente. Luego se verificó que el período de máximos se encuentre centrado en el año hidrológico definido en todas las estaciones pluviométricas analizadas.

III. Generación de las series hidrológicas

Luego de definir el año hidrológico se procedió a elaborar las series hidrológicas a ser analizadas (variables definidas previamente en el punto 3.2). Ante la ausencia de registros en un determinado período del año se adoptó que si entre los meses de octubre y abril inclusive, no se contaba con algún dato se prescindiría de ese año hidrológico en la confección de las series, dado que en esos meses podría hallarse la lluvia máxima diaria anual.

IV. Verificación de hipótesis estadísticas básicas

Longitud de serie mínima.

A continuación, se incorpora un análisis complementario a los realizados por Caamaño y Dasso, (2003); Catalini et al., (2011) y Guillén (2014) para definir el criterio de longitud mínima de serie.

Lo que se busca determinar es la incertidumbre asociada a una estimación realizada para una determinada recurrencia y su variación respecto a la longitud de la serie hidrológica. Para ello, se utilizaron series sintéticas de N valores con una distribución de probabilidad lognormal. Se decidió aplicar esta distribución de probabilidad, dado que ya se ha demostrado que la incertidumbre debido al tamaño de la muestra es más significativa que la incertidumbre generada por el modelo probabilístico utilizado (Guillén, 2014).

La metodología aplicada se resume a continuación:

1. En primer lugar, se generó una serie sintética de 10 000 valores con una distribución de probabilidad lognormal aleatoria con media igual a 100 y desvío 35, ya que de estudios antecedentes (Guillén, 2018) se ha demostrado que en la Argentina la mayoría de las estaciones pluviométricas utilizadas para diseño hidrológico poseen un coeficiente de variación (relación entre el desvío y la media) de la serie de máximos anuales muy cercano a 0.35.
2. Se aplicó estadística descriptiva a la serie de 10 000 valores calculándose los siguientes parámetros: máximo, mínimo, media, desvío, varianza, coeficiente de asimetría y curtosis.
3. A partir de los parámetros estadísticos de la serie previamente estimados se calcularon los valores (Y_T) asociados a diferentes períodos de retorno entre 2 y 10 000 años utilizando la siguiente expresión definida por Chow (1951):

$$Y_T = \mu + \varphi_T \cdot \sigma \quad (21)$$

Donde μ y σ son la media y el desvío, respectivamente, de los logaritmos de la serie sintética de 10 000 valores; y φ_T es el factor de frecuencia de la distribución de probabilidad utilizada, la cual en este caso es lognormal y se define según la expresión 22 (Caamaño Nelli y García, 1997).

$$\varphi_T = 2.58 \cdot \log T^{3/8} - 2.25 \quad (22)$$

Debido a la extensión de la serie aleatoria generada (10 000 valores), es que se considera que los valores asociados a las diferentes recurrencias (Y_T) son la población de la variable de análisis; por lo que dichas estimaciones poseen incertidumbre despreciable. Para asegurar esta hipótesis es que se ha repetido 1000 veces el mismo análisis y para cada una de las veces los valores de Y_T calculados variaron menos de un 1%.

A continuación, en la Figura 14 se grafican los valores estimados Y_T asociados a los diferentes tiempos de retorno de entre 2 y 10 000 años.

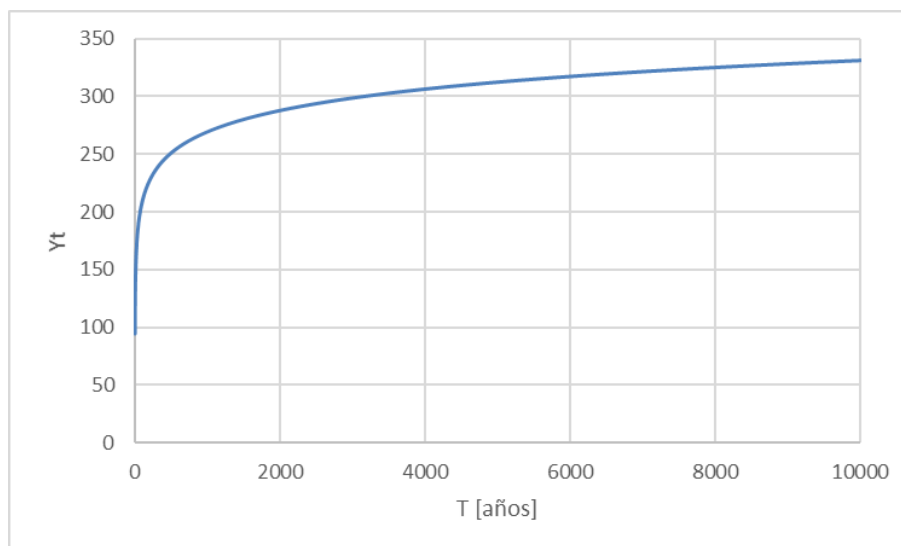


Figura 14: Valores estimados (Y_T) asociados a los diferentes tiempos de retorno (T).

4. Luego se generaron 1000 series de 5000 valores y para cada una de estas series se determinó μ , σ y $\varphi_{100} = 2.33$ (factor de frecuencia de la distribución de probabilidad lognormal asociado a un período de retorno de 100 años calculado con la expresión (21)). Con estos parámetros se estimó, para cada una de las 1000 series, el valor asociado a un período de retorno de 100 años aplicando la fórmula (20). De esta manera se generaron 1000 estimaciones asociadas a un período de retorno de 100 años (Y_{100}).

5. Para cada una de las 1000 estimaciones asociadas a un período de retorno de 100 años (Y_{100}), se calculó el tiempo de retorno real (T_{real}) a partir de la relación presentada en la Figura 14 (realizada a partir del análisis de la población).

6. Los dos pasos anteriores se repitieron para 1000 series con 10, 15, 20, 30, 50, 100, 200, 500, 1000 y 2000 valores.

7. Para adimensionalizar los resultados alcanzados se definieron las siguientes variables: N/T y T_{real}/T , donde T es el periodo de retorno donde se quiere estimar una determinada variable, en el trabajo aquí desarrollado es igual a 100 años.

A continuación, en la Tabla 5 y en la Figura 15 se presentan los principales resultados alcanzados. Para cada una de las longitudes de las series analizadas se presentan las 1000 estimaciones realizadas, su valor más probable (moda) y los percentiles 5, 50 (mediana) y 95%.

Tabla 5: Relación entre N/T y T_{real}/T .

N/T	T_{real}/T			
	Percentil 5%	Percentil 50%	Percentil 95%	Moda
0.10	0.09	0.78	17.97	0.11
0.15	0.15	0.94	14.69	0.22
0.20	0.17	0.87	7.20	0.26

N/T	T_{real}/T			
	Percentil 5%	Percentil 50%	Percentil 95%	Moda
0.30	0.23	0.99	5.31	0.45
0.50	0.32	0.96	3.60	0.66
1	0.45	0.99	2.51	0.72
2	0.55	0.97	1.82	0.81
5	0.69	0.99	1.45	0.91
10	0.76	1.00	1.31	0.95
20	0.83	0.99	1.21	0.96
50	0.88	0.99	1.13	1.01
100	0.92	0.99	1.08	0.97

Lo que se deduce de los resultados logrados es que, tal como se esperaba, a medida que aumenta la longitud de la serie el intervalo de confianza (definido por los percentiles 5 y 95%) se reduce, es decir que las incertidumbres van decreciendo.

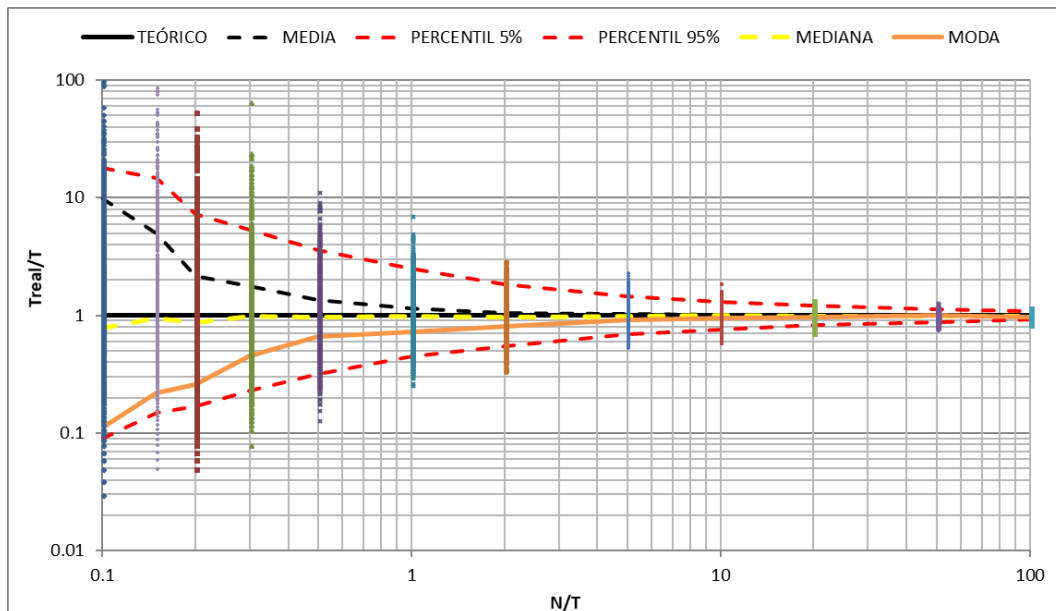


Figura 15: Relación entre N/T y T_{real}/T .

Al analizar los valores más probables obtenidos para las diferentes longitudes de serie (es decir las modas), se observa que cuando se estima una variable asociada a una recurrencia dada, lo más probable es que la recurrencia real de dicha estimación sea menor, lo que llevaría a subdimensionar una infraestructura hídrica dada.

Vale recalcar la importancia del análisis aquí realizado. A partir de ahora, en base a los resultados obtenidos, conociendo la longitud de la serie hidrológica a utilizar, y definiendo el período de retorno para el cual se quiere estimar el valor de la variable hidrológica, se puede determinar la incertidumbre que presenta ese valor asociado a ese tiempo de retorno. A continuación, se presenta una aplicación de la herramienta

desarrollada, mostrando mediante un ejemplo como puede estimarse dicha incertidumbre.

Aplicación de la herramienta desarrollada

Por ejemplo, si para una determinada variable se tiene una serie hidrológica de 30 años y se quiere estimar su valor para un período de retorno de 100 años, la relación N/T resulta igual a 0.3. En base a los resultados obtenidos anteriormente se puede decir que, lo más probable (moda) es que el valor asociado a 100 años de recurrencia estimado corresponda realmente a un período de retorno de 45 años, pero si se tienen en cuenta los percentiles 5 y 95, ese valor podría corresponder a un período de retorno de entre 23 y 531 años.

Si n fuese igual a 30 y se quisiera estimar el valor asociado a un período de retorno de 50 años ($N/T = 0.6$), lo más probable es que el valor estimado para esa recurrencia corresponda realmente a un período de retorno de 48 años, pero esa estimación podría corresponder a un período de retorno de entre 16 y 180 años (intervalo definido por los percentiles 5 y 95 respectivamente).

Presencia de Datos Atípicos.

Del total de las series que fueron sometidas a la prueba de datos atípicos de Chow, nueve no pasaron por esta prueba, por lo que fueron desechadas. Las mismas corresponden a las siguientes estaciones y variables:

- Estación 2: Icho Cruz – Copina, variable Precipitación Total Anual.
- Estación 3: Malambo – El Galpón, variable Días Lluviosos al Año.
- Estación 6: El Cajón – Pto. Garay, variable Días Lluviosos al Mes.
- Estación 8: San Antonio – El Cóndor, variable Precipitación Total Anual.
- Estación 12: Grande – El Manzano, variables Precipitación Máxima Diaria Anual y Días Lluviosos al Mes.
- Estación 14: Grande – Lutti, variables Precipitación Máxima Diaria Anual y Precipitación Total Anual.
- Estación 18: Córdoba – Observatorio, variable Días Lluviosos al Año.

Dicha eliminación representa el 7.2% de las estaciones disponibles.

Prueba de independencia.

Las 116 series de datos que verificaron la presencia de datos atípicos fueron sometidas a la prueba de Independencia de Wald-Wolfowitz. Del total de registros analizados tres no pasaron la prueba, lo cual constituye el 2.6% del total de series en las que se verificaron la presencia de datos atípicos. Las series descartadas corresponden a las siguientes estaciones y variables:

- Estación 13: Grande – La Puente, variable Días Lluviosos al Año.
- Estación 14: Grande – Lutti, variables Días Lluviosos al Año y Días Consecutivos con Lluvia.

Prueba de homogeneidad a escala anual.

Las series restantes (113) fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad de Wilcoxon. Dos series no pasaron esta prueba por lo que fueron removidas. Estas series corresponden a las siguientes estaciones y variables:

- Estación 9: El Cajón – Sin denominación, variable Precipitación Total Anual.
- Estación 15: Grande – Pampichuela, variable Días Lluviosos al Año.

Esta eliminación representa el 1.8% del total de estaciones que pasaron independencia.

Pruebas de estacionariedad.

Las 111 series que pasaron las pruebas anteriores se sometieron a la prueba de estacionariedad de Mann-Kendall. Seis de estas series no pasaron dicha prueba, es decir, presentaron tendencia. Las series que presentaron tendencia corresponden a las siguientes estaciones y variables:

- Estación 11: Grande – Cerro Blanco, variable Días Lluviosos al Año.
- Estación 12: Grande – El Manzano, variables Días Lluviosos al Año y Días Consecutivos con Lluvia.

- Estación 14: Grande – Lutti, variable Días Lluviosos al Mes.
- Estación 17: El Durazno – La Florida, variables Precipitación Total Anual y Días Lluviosos al Mes.

Debido a esto, y según lo explicado en el punto IV del Capítulo 1, estas series fueron sometidas a las pruebas de estacionariedad de Mann-Kendall modificada y la técnica de pre-blanqueo. Estas últimas pruebas tampoco fueron aceptadas, por lo que sobre estas series se realizó análisis de estadística inferencial de series no estacionarias.

V. Análisis de estadística descriptiva.

Los parámetros estadísticos calculados en este trabajo para cada serie histórica analizada fueron el máximo, el mínimo, la media, el desvío, la varianza, el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis.

VI. Análisis de estadística inferencial

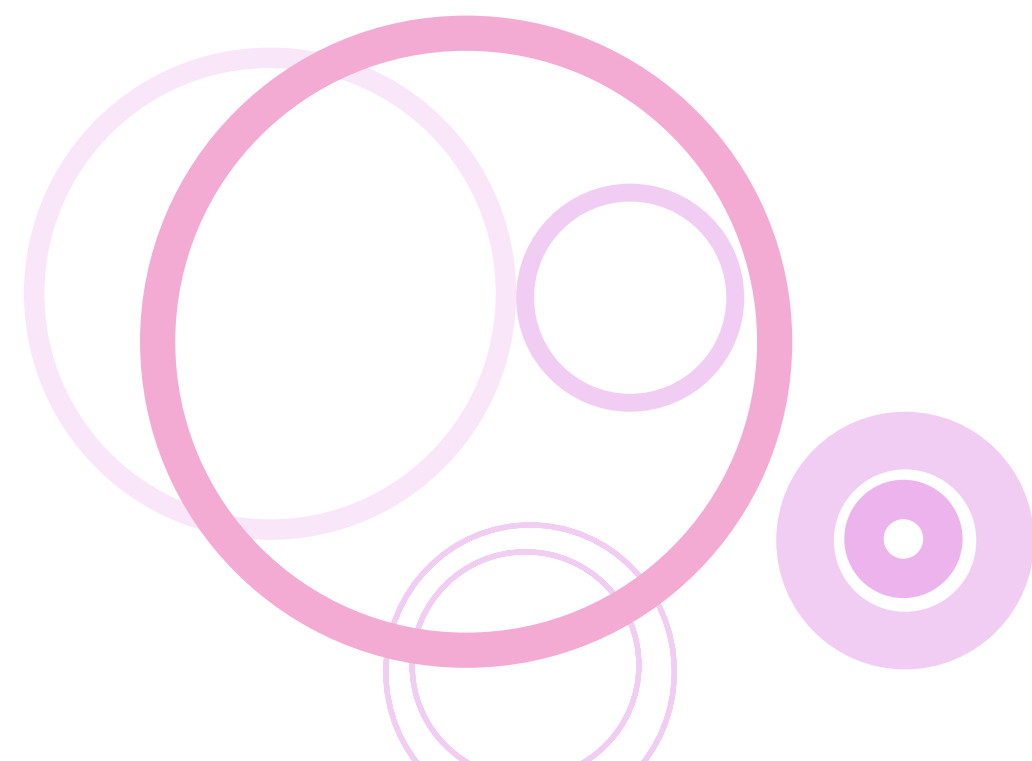
En el caso del análisis de series estacionarias (es decir, las que pasaron el test de estacionariedad de Mann Kendall) a priori se ajustó la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull (1951); y luego se ajustó a cada serie hidrológica histórica analizada las siguientes funciones de distribución de probabilidad: Valores extremos generalizada -GEV- (aplicando el método de momentos y de máxima verosimilitud), Gumbel (aplicando el método de momentos y de máxima verosimilitud), Lognormal (método de máxima verosimilitud) y Log Pearson III (método de momentos). Luego se evaluó cuál es la más adecuada para que represente a la población de las distintas variables analizadas de cada estación pluviométrica. Para este análisis en este trabajo se aplicó el software FACETA desarrollado por el grupo de trabajo del Centro de Estudios y Tecnología del Agua.

Para el análisis de series no estacionarias, en este trabajo se aplicó el software Non-Stationary Extreme Value Analysis (NEVA) (Linyin Cheng, y Amir Agha Kouchak - University of California, Irvine).

A continuación, en el capítulo siguiente se ejemplifica la metodología aplicada mediante el análisis completo de dos de las estaciones recopiladas.



Resultados del análisis estadístico de las series de las estaciones seleccionadas



5. Capítulo 5: Resultados del análisis estadístico de las series de las estaciones seleccionadas.

En los siguientes apartados se mostrará un análisis completo de dos de las estaciones seleccionadas, una en la que no se detectó tendencia en ninguna de las variables analizadas y otra en la que si se detectó tendencias en algunas de las series de las variables estudiadas.

5.1. Análisis de series estacionarias.

A continuación, se muestra el análisis estadístico completo de una de las estaciones seleccionadas en la cual ninguna de las variables analizadas presentó tendencia. La estación analizada en este apartado es "**Córdoba Observatorio**" (estación número 18 en la Tabla 4).

Esta estación cuenta con registros históricos de precipitación diaria desde el año 1956 hasta el año 2015 sin datos faltantes (60 años de datos). A continuación, se presentan cada uno de los análisis realizados sobre las diferentes variables de interés:

1. Precipitación Máxima Diaria Anual.

La serie hidrológica de precipitaciones máximas diarias anuales analizada es la que se muestra en la Figura 16. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 32 mm en el año 1957 y un máximo de 198 mm en el año 2003. El valor promedio de la serie es de 77 mm y posee un desvío estándar de 32 mm.

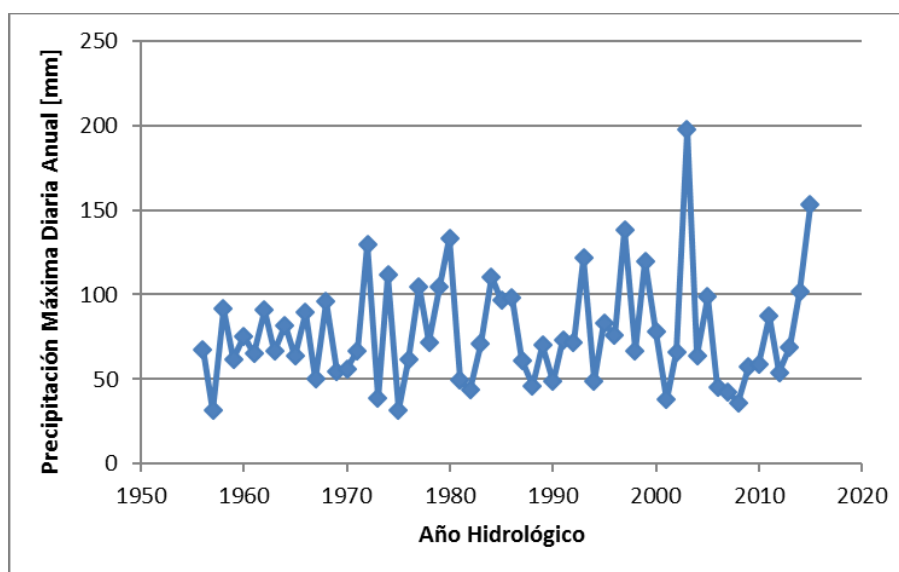


Figura 16: Serie de precipitaciones máximas diarias anuales, Córdoba Observatorio.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la LogNormal. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 17.

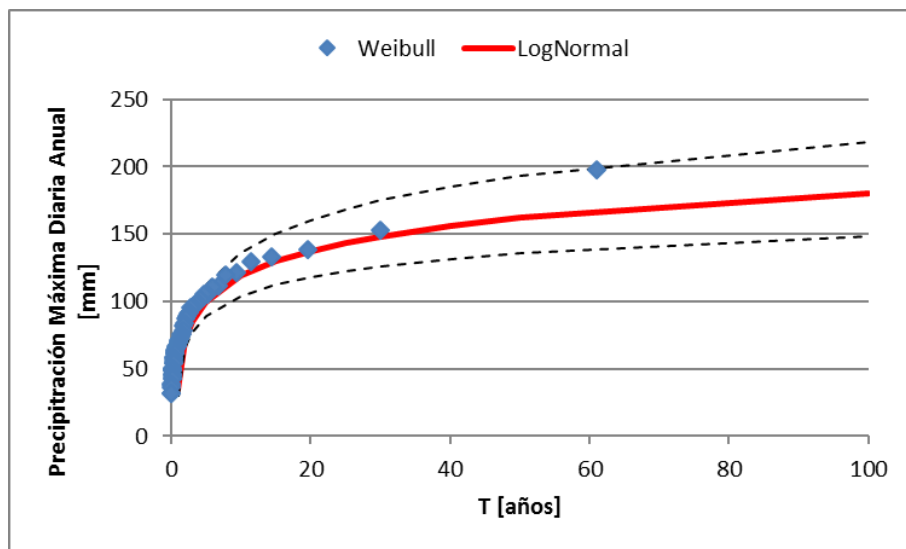


Figura 17: Distribución de probabilidades de precipitación máxima diaria anual, Córdoba Observatorio.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y la precipitación máxima diaria anual puede verse que la FDP Teórica LogNormal ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (198 mm) tiene una recurrencia del orden de 100 años o aún mayor.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 21%, para 50 años es

del 19%, para 25 y 20 años es del 17%, para 10 años es del 15%, para 5 años es del 12% y para 2 años es de 11%.

A continuación, en la Tabla 6, se presentan los valores de precipitación máxima diaria anual obtenidos a partir de la función LogNormal con sus respectivos intervalos de confianza.

Tabla 6: Valores de precipitaciones máximas diarias anuales, Córdoba Observatorio.

T	Intervalo Inferior	Valor Medio	Intervalo Superior
[años]	[mm]		
2	64.7	71.5	79.1
5	88.7	99.7	112.0
10	103.8	118.9	136.1
20	117.8	137.5	160.4
25	122.2	143.4	168.3
50	135.5	161.8	193.1
100	148.5	180.2	218.7

2. Precipitación Total Anual.

La serie hidrológica de precipitaciones totales anuales analizada es la que se muestra en la Figura 18. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 246 mm en el año 1957 y un máximo de 1237 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 786 mm y posee un desvío estándar de 183 mm.

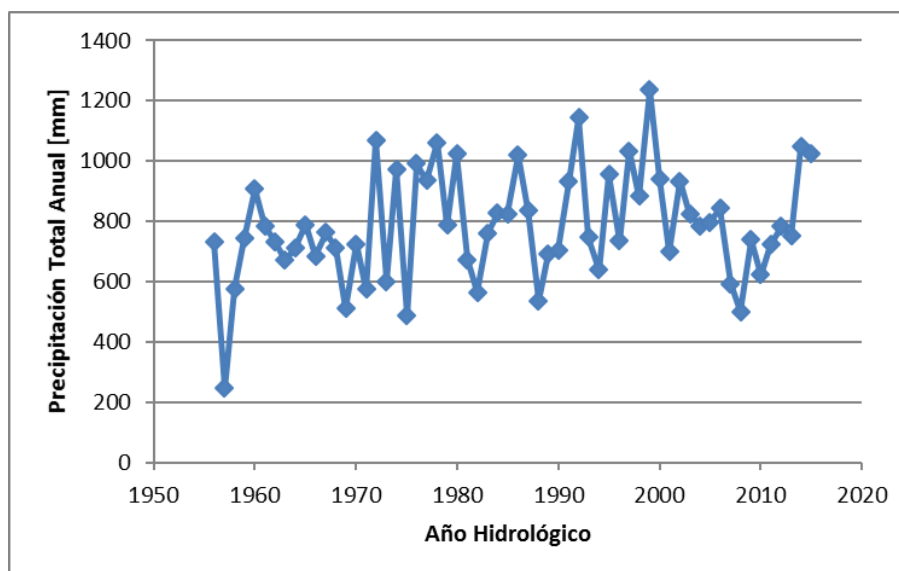


Figura 18: Serie de precipitaciones totales anuales, Córdoba Observatorio.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie se encontró un dato atípico correspondiente a 246 mm en el año 1957. Este último dato fue eliminado de la serie y se aplicó nuevamente el test el cual no arrojó ningún otro dato atípico. En base a esto último, la serie que finalmente fue analizada contaba 59 datos, con un mínimo de 486 mm en el año 1975, y un máximo de 1237 en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 795 mm y posee un desvío estándar de 170 mm. Por otro lado, se verificaron las

hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la LogNormal.

Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 19.

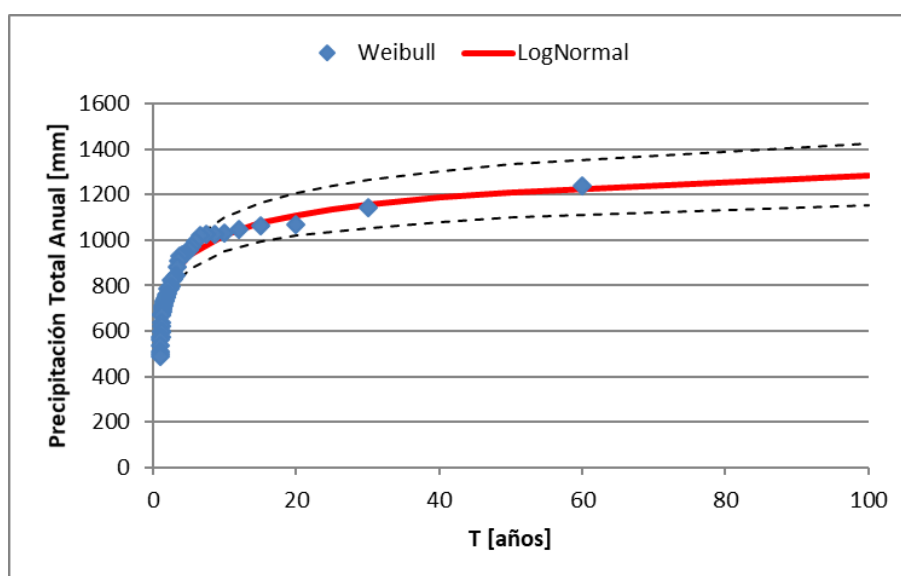


Figura 19: Distribución de probabilidades de precipitación total anual, Córdoba Observatorio.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y la precipitación total anual se puede ver que la FDP Teórica LogNormal ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (1237 mm) tiene una recurrencia del orden de los 60 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 11%, para 50 años es del 10%, para 25 y 20 años es del 9%, para 10 años es del 8%, para 5 años es del 7% y para 2 años es de 6%.

A continuación, en la Tabla 7, se presentan los valores de precipitación total anual obtenidos a partir de la función LogNormal con sus respectivos intervalos de confianza.

Tabla 7: Valores de precipitaciones totales anuales, Córdoba Observatorio.

T	Intervalo Inferior	Valor Medio	Intervalo Superior
[años]	[mm]		
2	735.7	777.2	821.1
5	873.1	930.6	992.0
10	950.8	1024.0	1102.8
20	1018.4	1108.0	1205.5
25	1038.7	1133.7	1237.4
50	1098.5	1210.4	1333.7
100	1154.5	1283.4	1426.7

3. Días Lluviosos al año.

La serie hidrológica de días lluviosos al año analizada es la que se muestra en la Figura 20. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 39 días lluviosos en el año 1957 y un máximo de 114 días lluviosos en el año 1997. El valor promedio de la serie es de 87 días lluviosos al año y posee un desvío estándar de 14 días.

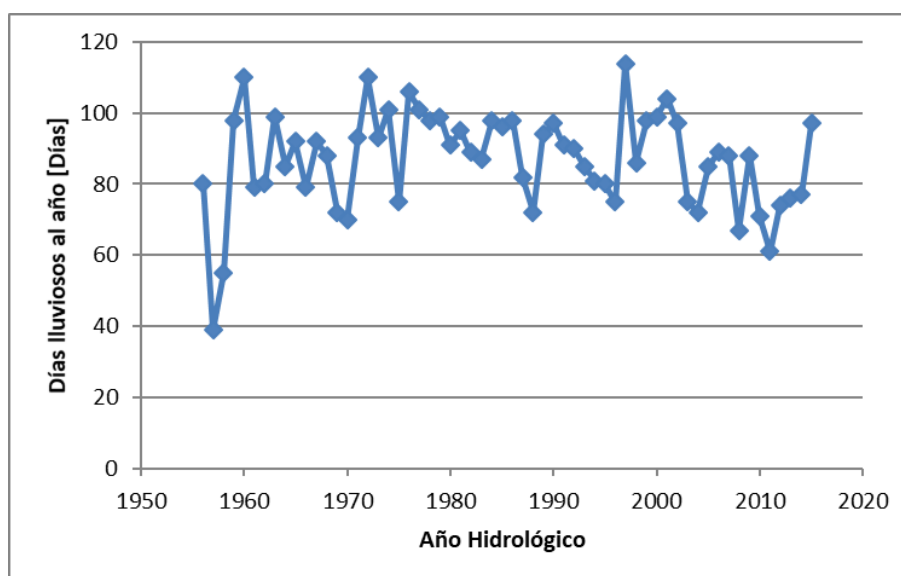


Figura 20: Serie de días lluvioso al año, Córdoba Observatorio.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie se encontró un dato atípico correspondiente a 39 días en el año 1957. Este último dato fue eliminado de la serie y se aplicó nuevamente el test el cual arrojó un nuevo dato atípico (55 días en el año 1958), por lo tanto, esta serie se descartó y no se llevó a cabo el análisis.

4. Días Lluviosos al mes.

La serie hidrológica de días lluviosos al mes analizada es la que se muestra en la Figura 21. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 10 días lluviosos al mes en el

año 2012 y un máximo de 21 días lluviosos al mes en el año 1977. El valor promedio de la serie es de 15 días lluviosos al mes y posee un desvío estándar de 2 días.

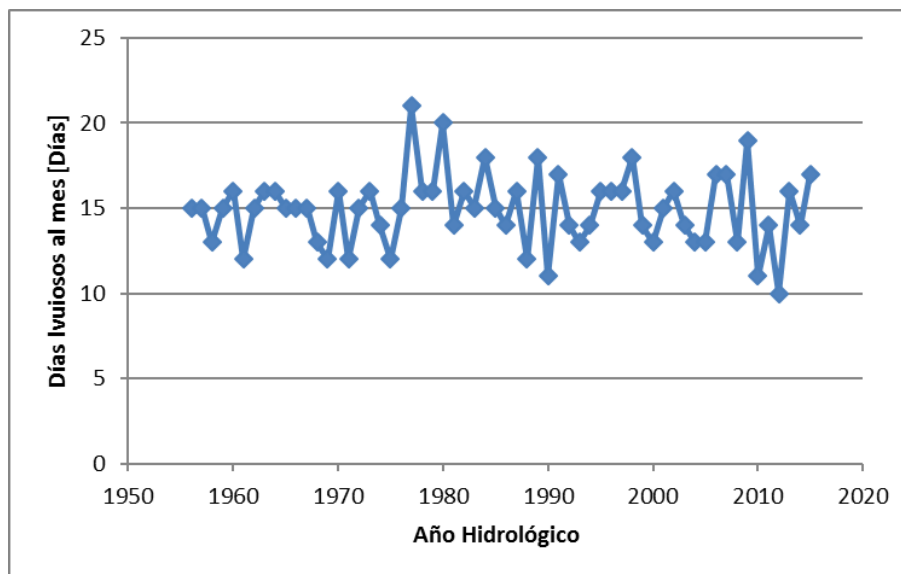


Figura 21: Serie de días lluvioso al mes, Córdoba Observatorio.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la LogNormal. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 22.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y los días lluviosos al mes se puede ver que la FDP Teórica LogNormal ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (21 días) tiene una recurrencia del orden de los 60 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 y 50 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del

intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 7%, para 25 y 20 años es del 6%, para 10 años es del 5%, para 5 y 2 años es del 4%.

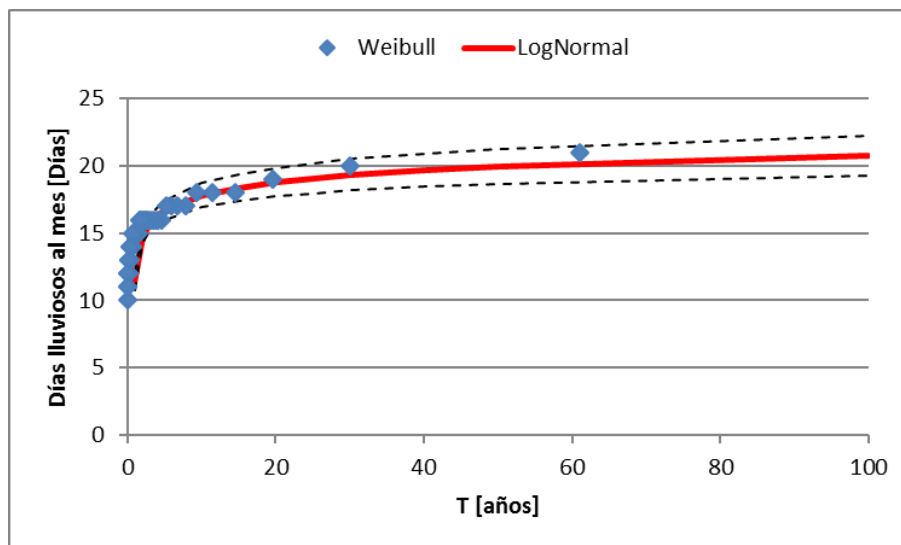


Figura 22: Distribución de probabilidades de días lluviosos al mes, Córdoba Observatorio.

A continuación, en la Tabla 8, se presentan los valores de días lluviosos al mes obtenidos a partir de la función LogNormal con sus respectivos intervalos de confianza.

Tabla 8: Valores de días lluviosos al mes, Córdoba Observatorio.

T	Intervalo Inferior	Valor Medio	Intervalo Superior
[años]	[días]		
2	-	15	-
5	-	17	-
10	17	18	19
20	18	19	20
25	18	19	20
50	19	20	21
100	19	21	22

5. Días consecutivos con lluvia.

La serie hidrológica de días consecutivos con lluvia analizada es la que se muestra en la Figura 23. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 4 días consecutivos con lluvia en los años 1958, 1967, 1988, 1993, 1994 y 1996, y un máximo de 14 días consecutivos con lluvia en el año 1977. El valor promedio de la serie es de 6 días consecutivos con lluvia y posee un desvío estándar de 2 días.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie se encontró un dato atípico correspondiente a 14 días en el año 1957. Este último dato fue eliminado de la serie y se aplicó nuevamente el test el cual no arrojó ningún otro dato atípico. En base a esto último, la serie que finalmente fue analizada contaba 59 datos, con un mínimo de 4 días en los años 1958, 1967, 1988, 1993, 1994 y 1996, y un máximo de 10 días en el año 2002. El valor promedio de la serie es de 6 días y posee un desvío estándar de 1

día. Por otro lado, se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

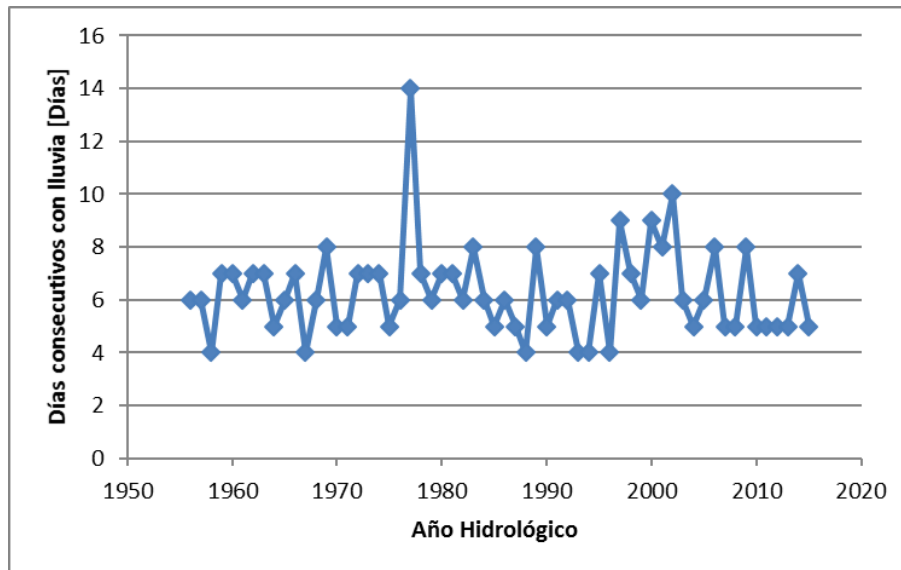


Figura 23: Serie de días consecutivos con lluvia, Córdoba Observatorio.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la LogNormal. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 24.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y los días consecutivos con lluvia puede verse que la FDP Teórica LogNormal ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (10 días) tiene una recurrencia del orden de 60 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 12%, para 50 años es del 11%, para 25 años es del 10%, para 20 años es del 9%, para 10 años es del 8%, para 5 años es del 7% y para 2 años es de 6%.

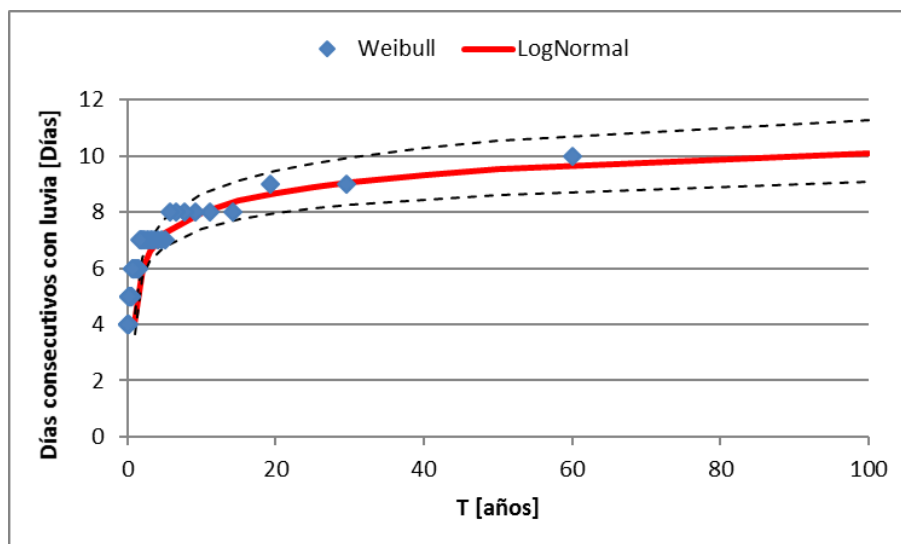


Figura 24: Distribución de probabilidades de días consecutivos con lluvia, Córdoba Observatorio.

A continuación, en la Tabla 9, se presentan los valores de días consecutivos con lluvia obtenidos a partir de la función LogNormal con sus respectivos intervalos de confianza en forma de tabla.

Tabla 9: Valores de días consecutivos con lluvia, Córdoba Observatorio.

T	Intervalo Inferior	Valor Medio	Intervalo Superior
[años]	[días]		
2	-	6	-
5	-	7	-
10	7	8	9
20	8	9	10
25	8	9	10
50	9	10	11
100	9	10	11

5.2. Análisis de series no estacionarias.

A continuación, se muestra el análisis estadístico completo de una de las estaciones seleccionadas en la cual algunas de las variables analizadas presentaron tendencia. La estación analizada en este apartado es “**El Durazno - La Florida**” (estación número 17 en la Tabla 3).

Esta estación cuenta con registros históricos de precipitación diaria desde el año 1958 hasta el año 2015 con datos faltantes en los años 1963, 1968, 1984, 1985, 1988, 1989, 1990, 1991 y 1992 (49 años de datos).

A continuación, se presentan cada uno de los análisis realizados sobre las diferentes variables de interés.

1. Precipitación Máxima Diaria Anual.

La serie hidrológica de precipitaciones máximas diarias anuales analizada es la que se muestra en la Figura 25. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 34 mm en el año 2004 y un máximo de 178 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 89 mm y posee un desvío estándar de 33 mm.

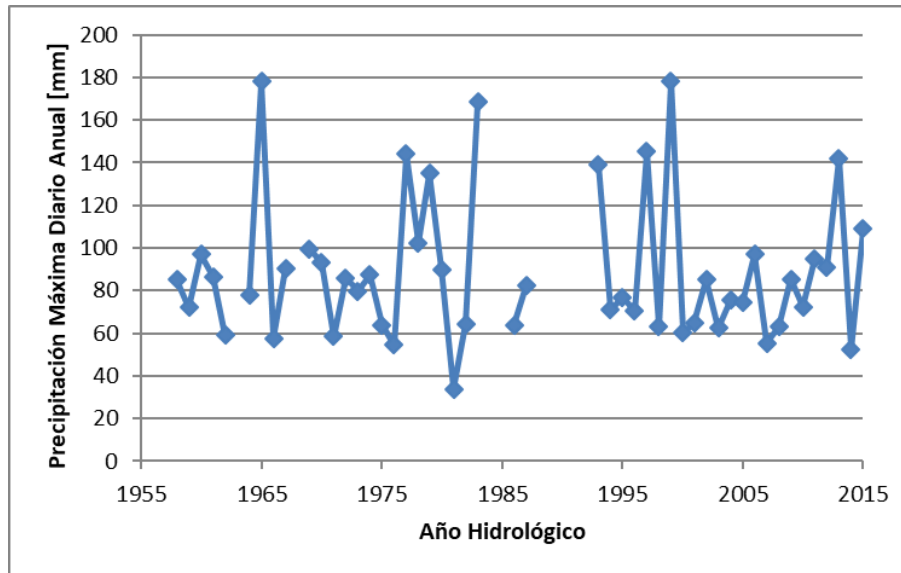


Figura 25: Serie de precipitaciones máximas diarias anuales, El Durazno-La Florida.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la Gumbel por el método de Máxima Verosimilitud. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 26.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y la precipitación máxima diaria anual se puede ver que la FDP Teórica GEV por el Método de Máxima Verosimilitud ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (178 mm) tiene una recurrencia del orden de los 50 años.

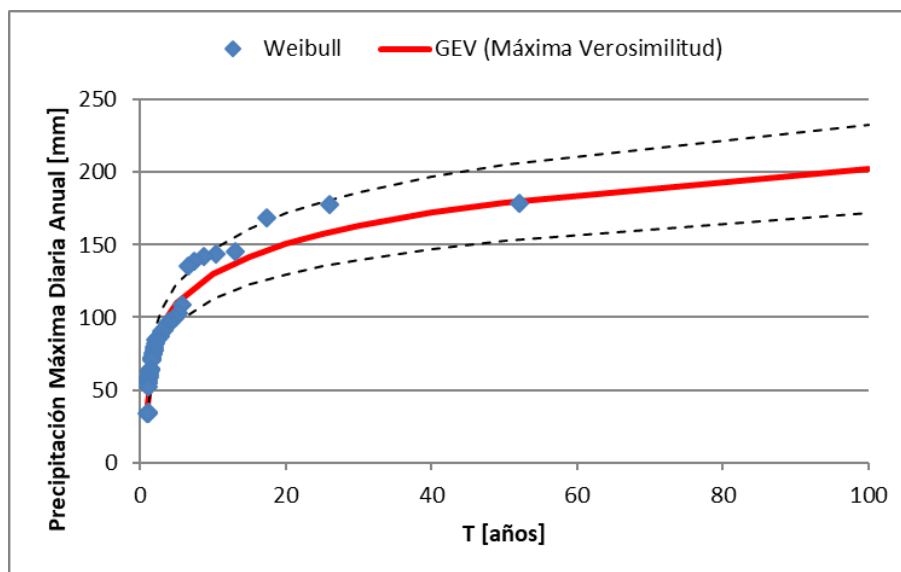


Figura 26: Distribución de probabilidades de precipitación máxima diaria anual, El Durazno-La Florida.

Además, se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 18%, para 50 años es del 17%, para 25 es del 16%, para 20 años es del 15%, para 10 años es del 14%, para 5 años es del 12% y para 2 años es de 9%.

A continuación, en la Tabla 10, se presentan los valores de precipitación máxima diaria anual obtenidos a partir de la función Gumbel por el método de Máxima Verosimilitud con sus respectivos intervalos de confianza.

Tabla 10: Valores de precipitaciones máximas diarias anuales, El Durazno-La Florida.

T	Intervalo Inferior	Valor Medio	Intervalo Superior
[años]	[días]		
2	73.0	81.7	90.4
5	96.4	109.8	123.2
10	112.7	129.9	147.1
20	129.5	150.5	171.6
25	135.1	157.3	179.6
50	153.0	179.2	205.4
100	172.2	202.2	232.3

2. Precipitación Total Anual.

La serie hidrológica de precipitaciones totales anuales analizada es la que se muestra en la Figura 27. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 517 mm en el año 1962 y un máximo de 1727 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 998 mm y posee un desvío estándar de 238 mm.

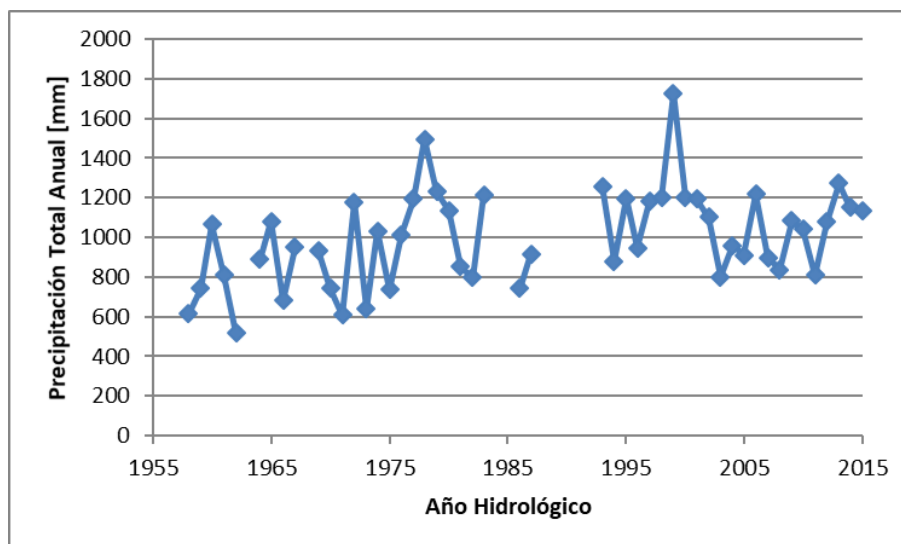


Figura 27: Serie de precipitaciones totales anuales, El Durazno-La Florida.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia y homogeneidad, pero no se verificó la hipótesis de estacionariedad.

Luego de que la serie rechazó el test de Mann-Kendall, se sometió a la misma a la prueba de Mann-Kendall modificada y a la técnica de pre-blanqueo de manera tal de verificar si la no estacionariedad arrojada por Mann-Kendall era correcta. La prueba de Mann-Kendall modificada arrojó como resultado que no existe una tendencia en la serie, caso contrario ocurrió con la técnica de pre-blanqueo que indicó que existe una tendencia en la serie analizada, por lo tanto, se procedió a realizar el análisis de serie no estacionaria mediante la utilización del Software NEVA.

En la Figura 28 se muestra la variación del valor medio de la variable para diferentes períodos de retorno a medida que pasa el tiempo, resultado que se obtiene al realizar el análisis no estacionario de la serie.

Se puede ver con línea negra como la serie de precipitación total anual se comporta a lo largo del tiempo, desde el año 1958 hasta el año 2015 (registro muestreado). Además, se ve cómo se va modificando el valor medio de la variable para diferentes períodos de retorno a medida que pasa el tiempo. Por ejemplo, un valor de 1500 mm tenía un período de retorno de 50 años en el año 1975, mientras que en el año 2002 el período de retorno de este valor bajó a 25 años.

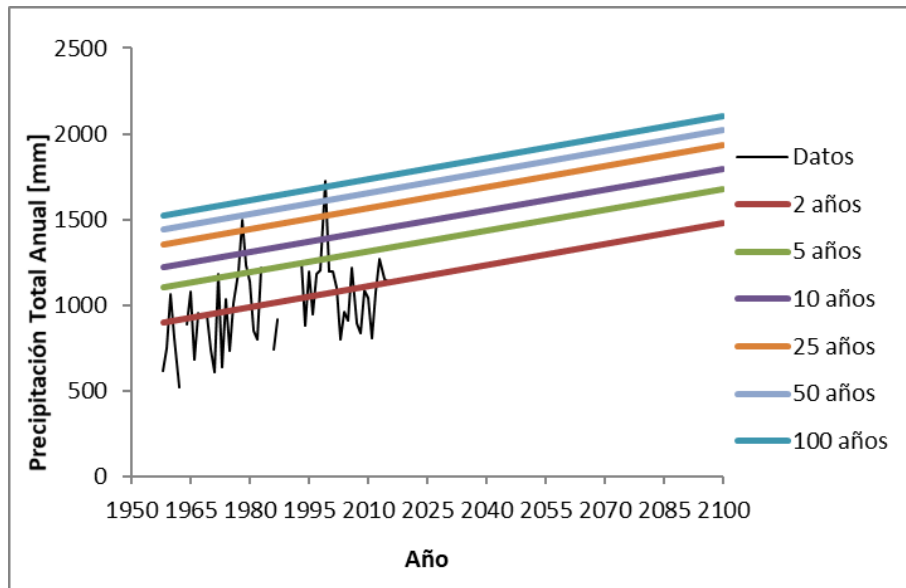


Figura 28: Relación entre precipitación total anual y período de retorno a lo largo del tiempo, El Durazno-La Florida.

A continuación, en la Figura 29 se muestran para 3 horizontes de tiempo dado como varía la relación entre la variable y el tiempo de retorno con su respectivo intervalo de confianza.

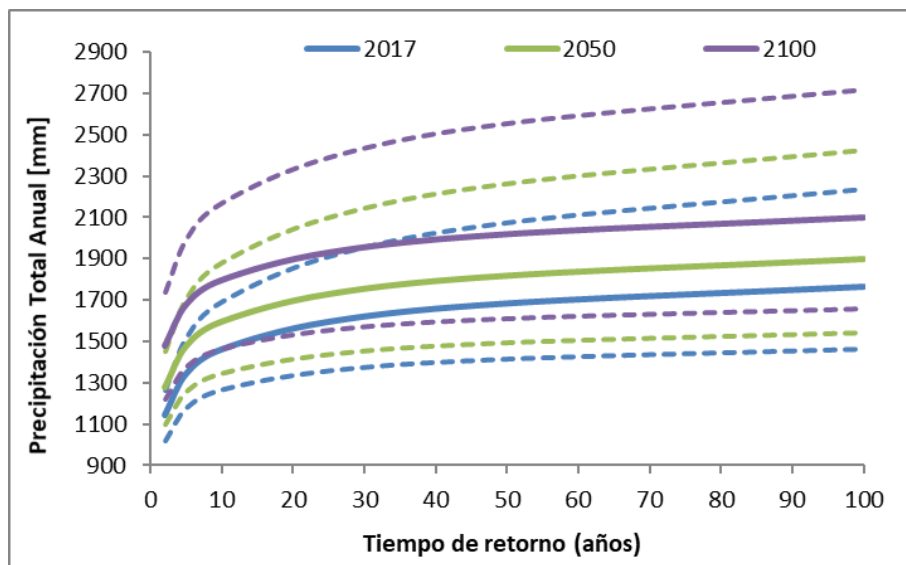


Figura 29: Relación entre precipitación total anual y período de retorno para diferentes horizontes de tiempo, El Durazno-La Florida.

Lo que se puede ver es que en la actualidad (año 2017) para un período de retorno de 50 años se asocia un valor de 1680 mm, mientras que para el año 2050 se espera que este valor aumente a 1815 mm y para el año 2100 llegue a 2020 mm. Es decir, para un mismo período de retorno el valor de precipitación total anual aumenta.

3. Días lluviosos al año.

La serie hidrológica de días lluviosos al año analizada es la que se muestra en la Figura 30. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 22 días lluviosos en el año 1962

y un máximo de 90 días lluviosos en el año 1974. El valor promedio de la serie es de 59 días lluviosos al año y posee un desvío estándar de 14 días.

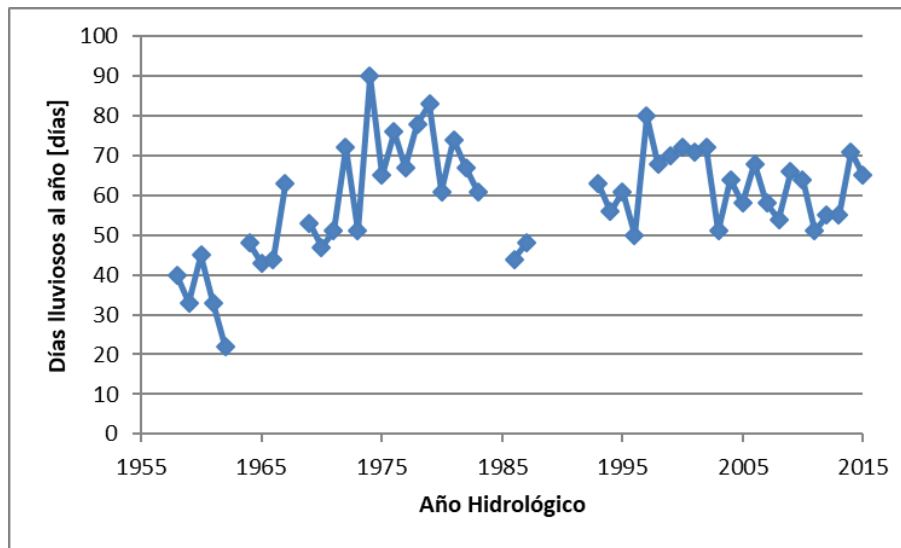


Figura 30: Serie de días lluvioso al año, El Durazno-La Florida.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie se encontró un dato atípico correspondiente a 22 días en el año 1962. Este último dato fue eliminado de la serie y se aplicó nuevamente el test el cual no arrojó ningún otro dato atípico. En base a esto último, la serie que finalmente fue analizada contaba 48 datos, con un mínimo de 33 días en el año 1959, y un máximo de 90 días en el año 1974. El valor promedio de la serie es de 60 días y posee un desvío estándar de 13 días. Por otro lado, se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la GEV por el método de Máxima Verosimilitud. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 31.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y los días lluviosos al año se puede ver que la FDP Teórica GEV por el Método de Máxima Verosimilitud ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (90 días) tiene una recurrencia del orden de los 100 años.

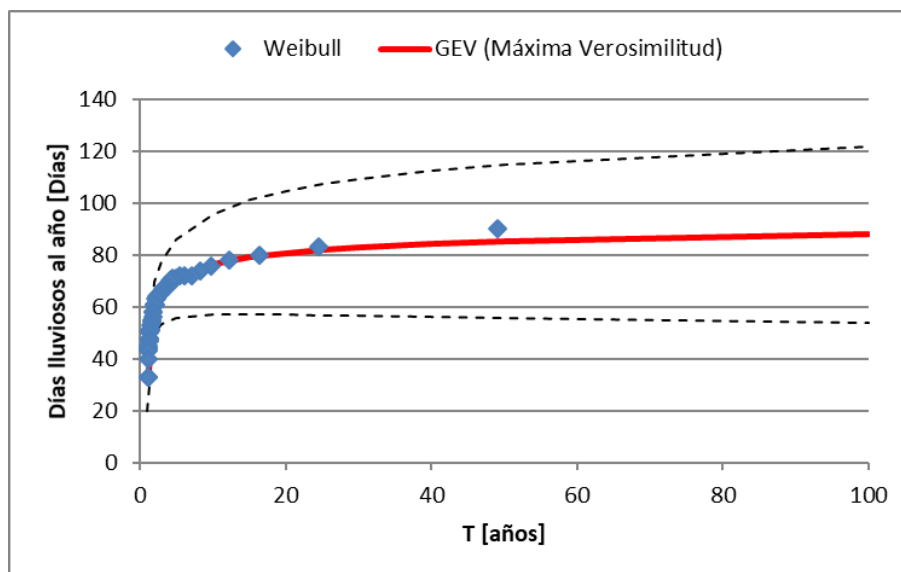


Figura 31: Distribución de probabilidades de días lluviosos al año, El Durazno-La Florida.

Además, se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 63%, para 50 años es del 53%, para 25 años es del 44%, para 20 años es del 42%, para 10 años es del 34%, para 5 años es del 27% y para 2 años es de 20%.

A continuación, en la Tabla 11, se presentan los valores de días lluviosos al año obtenidos a partir de la función GEV por el método de Máxima Verosimilitud con sus respectivos intervalos de confianza.

Tabla 11: Valores de días lluviosos al año, El Durazno-La Florida.

T	Intervalo Inferior	Valor Medio	Intervalo Superior
[años]	[días]		
2	50	60	70
5	56	71	86
10	57	77	96
20	57	81	105
25	57	82	107
50	56	85	115
100	54	88	122

4. Días Lluviosos al mes.

La serie hidrológica de días lluviosos al mes analizada es la que se muestra en la Figura 32. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 6 días lluviosos al mes en el año 1962, y un máximo de 16 días lluviosos al mes en los años 1979 y 1980. El valor

promedio de la serie es de 11 días lluviosos al mes y posee un desvío estándar de 2 días.

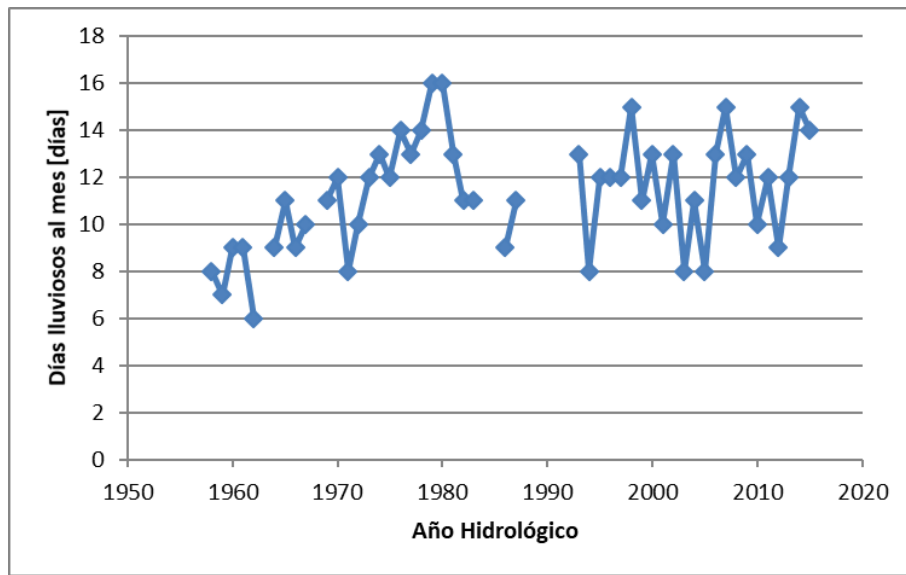


Figura 32: Serie de días lluvioso al mes, El Durazno-La Florida.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia y homogeneidad, pero no se verificó la hipótesis de estacionariedad.

Luego de que la serie rechazó el test de Mann-Kendall, se sometió a la misma a la prueba de Mann-Kendall modificada y a la técnica de pre-blanqueo de manera tal de verificar si la no estacionariedad arrojada por Mann-Kendall era correcta. La prueba de Mann-Kendall modificada arrojó como resultado que no existe una tendencia en la serie, caso contrario ocurrió con la técnica de pre-blanqueo que indicó que existe una tendencia en la serie analizada, por lo tanto, se procedió a realizar el análisis de serie no estacionaria mediante la utilización del Software NEVA.

En la Figura 33 se muestra la variación del valor medio de la variable para diferentes períodos de retorno a medida que pasa el tiempo, resultado que se obtiene al realizar el análisis no estacionario de la serie.

Se puede ver con una línea negra como la serie de días lluviosos al año se comporta a lo largo del tiempo, desde el año 1958 hasta el año 2015 (registro muestreado). Además, se ve cómo se va modificando el valor medio de la variable para diferentes períodos de retorno a medida que pasa el tiempo. Por ejemplo, un valor de 15 días lluvioso al mes tenía un período de retorno de 50 años en el año 1960, mientras que en el año 2010 el período de retorno de este valor bajó a 5 años.

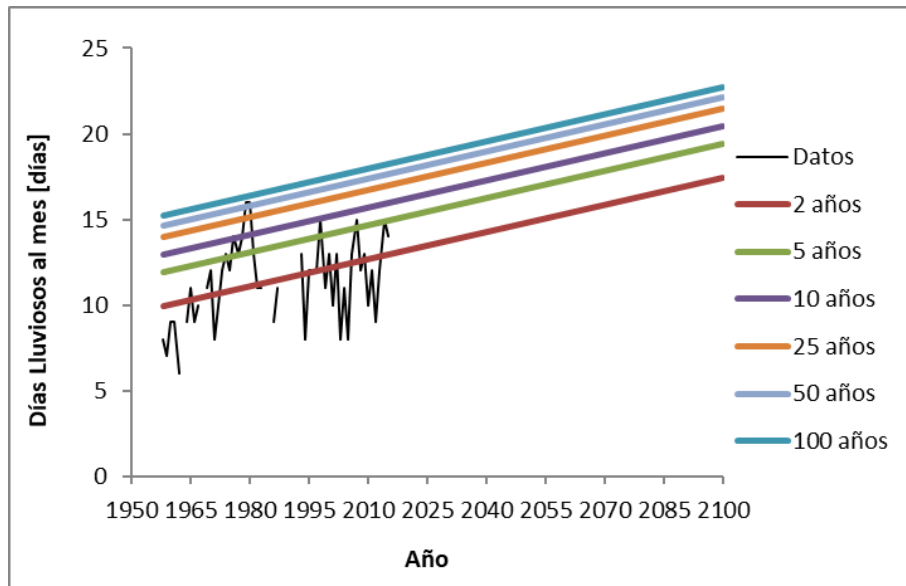


Figura 33: Relación entre días lluviosos al mes y período de retorno a lo largo del tiempo, El Durazno-La Florida.

A continuación, en la Figura 34 se muestran para 3 horizontes de tiempo dado como varía la relación entre la variable y el tiempo de retorno con su respectivo intervalo de confianza.

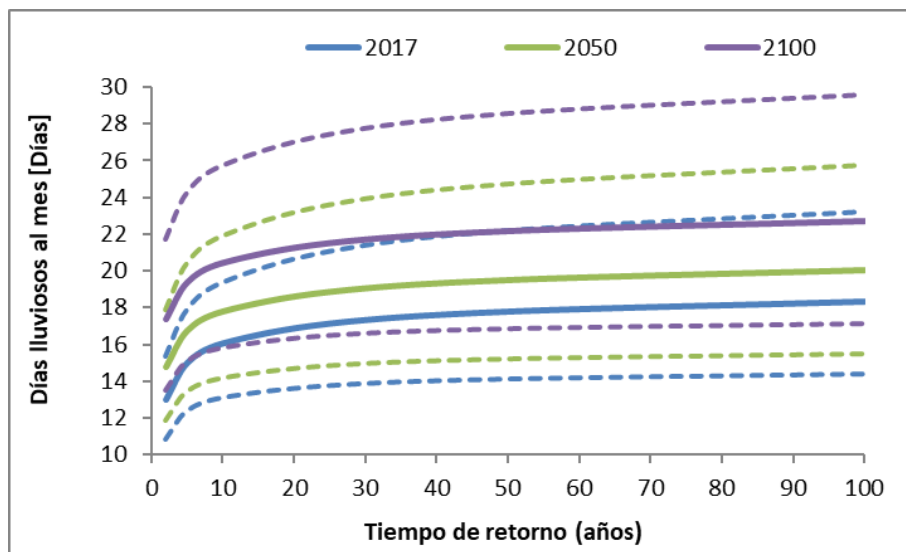


Figura 34: Relación entre días lluviosos al mes y período de retorno para diferentes horizontes de tiempo, El Durazno-La Florida.

Lo que se puede ver es que en la actualidad (año 2017) para un período de retorno de 50 años se asocia un valor de 18 días lluviosos al mes, mientras que para el año 2050 se espera que este valor aumente a 20 días lluviosos al mes y para el año 2100 llegue a 22 días lluviosos al mes. Es decir, para un mismo período de retorno el valor de días lluviosos al mes aumenta.

5. Días consecutivos con lluvia.

La serie hidrológica de días consecutivos con lluvia analizada es la que se muestra en la Figura 35. Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 2 días consecutivos con lluvia en los años 1959, 1962, 1968 y 1988, y un máximo de 8 días consecutivos con lluvia en el año 2002. El valor promedio de la serie es de 4 días consecutivos con lluvia y posee un desvío estándar de 1 día.

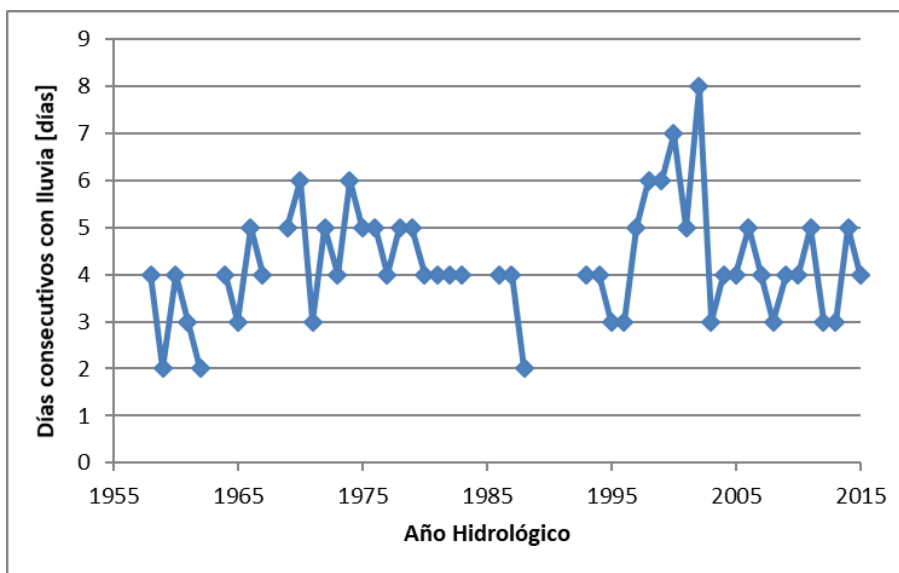


Figura 35: Serie de días consecutivos con lluvia, El Durazno-La Florida.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la LogNormal. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 36.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y los días consecutivos con lluvia se puede ver que la FDP Teórica LogNormal ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (8 días) tiene una recurrencia del orden de los 100 años.

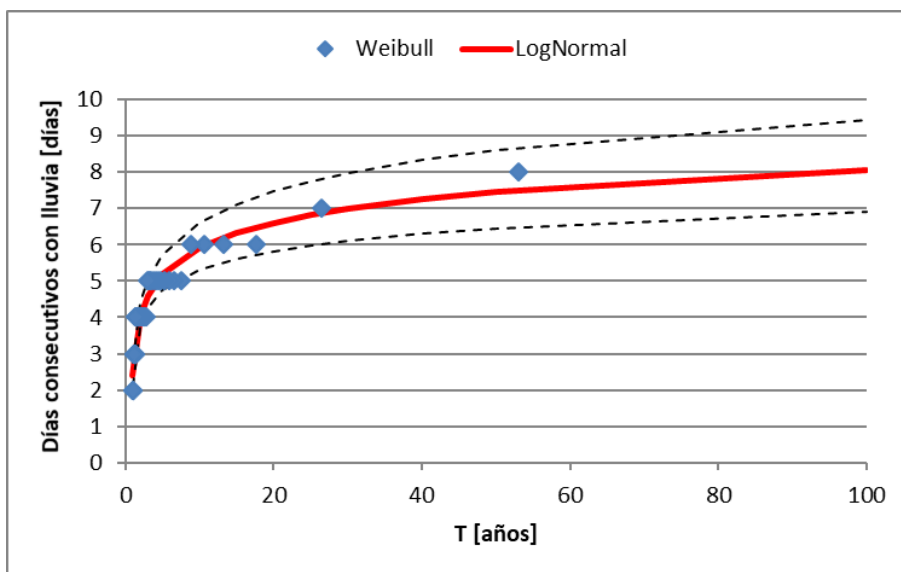


Figura 36: Distribución de probabilidades de días consecutivos con lluvia, El Durazno-La Florida.

Además, se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 17%, para 50 años es del 15%, para 25 años es del 14%, para 20 años es del 13%, para 10 años es del 12%, para 5 años es del 10% y para 2 años es de 8%.

A continuación, en la Tabla 12, se presentan los valores de días consecutivos con lluvia obtenidos a partir de la función la Gumbel por el método de Máxima Verosimilitud con sus respectivos intervalos de confianza.

Tabla 12: Valores de días consecutivos con lluvia, El Durazno-La Florida.

T	Intervalo Inferior	Valor Medio	Intervalo Superior
[años]	[días]		
2	4	4	4
5	5	5	6
10	5	6	7
20	6	7	7
25	6	7	8
50	6	7	9
100	7	8	9

5.3. Resumen de resultados obtenidos.

A continuación, en la Tabla 13, se presenta un resumen de los resultados de las pruebas estadísticas arrojados por las distintas estaciones, para cada una de las variables analizadas.

Tabla 13: Resumen de los resultados de los test estadísticos sobre cada una de las series analizadas.

Estación	PMDA [mm]	PTA [mm]	DLLA [días]	DLLM [días]	DCcLL [días]	
1	El Cajón - Pto. Pereyra	V	V	V	V	V
2	Icho Cruz - Copina	V	DA	V	V	V
3	Malambo - El Galpón	V	V	DA	V	V
4	San Antonio - Barrio El Canal	V	V	V	V	V
5	San Antonio - Confluencia Icho Cruz - El Cajón	V	V	V	V	V
6	El Cajón - Pto. Garay	V	V	V	DA	V
7	Icho Cruz - Confluencia ríos Icho Cruz y Malambo	V	V	V	V	V
8	San Antonio - El Cóndor	V	DA	V	V	V
9	El cajón - Sin denominación	V	H	V	V	V
10	Las Tapias - Las Tapias	V	V	V	V	V
11	Grande - Cerro Blanco	V	V	NVE (↓)	V	V
12	Grande - El Manzano	DA	V	NVE (↓)	DA	NVE (↓)
13	Grande - La Puente	V	V	I	V	V
14	Grande - Lutti	DA	DA	X	NVE (↑)	X
15	Grande - Pampichuela	V	V	H	V	V
16	Grande - Yacanto	V	V	V	V	V
17	El Durazno - La Florida	V	NVE (↑)	V	NVE (↑)	V
18	Córdoba Observatorio	V	V	DA	V	V
19	Villa de María del Río Seco	V	V	V	V	V
20	Villa Dolores	V	V	V	V	V
21	Córdoba Aeropuerto	V	V	V	V	V
22	Pilar	V	V	V	V	V
23	Río Cuarto	V	V	V	V	V
24	Marcos Juárez	V	V	V	V	V
25	Laboulaye	V	V	V	V	V

Donde:

PMDA: Precipitación Máxima Diaria Anual.

PTA: Precipitación Total Anual

DLLA: Días Lluviosos al Año.

DLLM: Días Lluviosos al Mes.

DCcLL: Días Consecutivos con Lluvia.

V: verifica independencia, homogeneidad y estacionariedad.

X: no verifica independencia, homogeneidad ni estacionariedad.

DA: no pasa la prueba de datos atípicos.

I: no verifica el test de independencia.

H: no verifica el test de homogeneidad.

NVE: no verifica el test de Estacionariedad:

(↑) Presenta tendencia creciente.

(↓) Presenta tendencia decreciente.

Al analizar la variable *Precipitación Máxima Diaria Anual*, de las 25 estaciones analizadas, dos series se rechazaron por la presencia de datos atípicos (estaciones 12 y 14); los 23 restantes pasaron todas las pruebas estadísticas que se definieron en el punto IV. Esto puede verse de manera gráfica en la Figura 37.

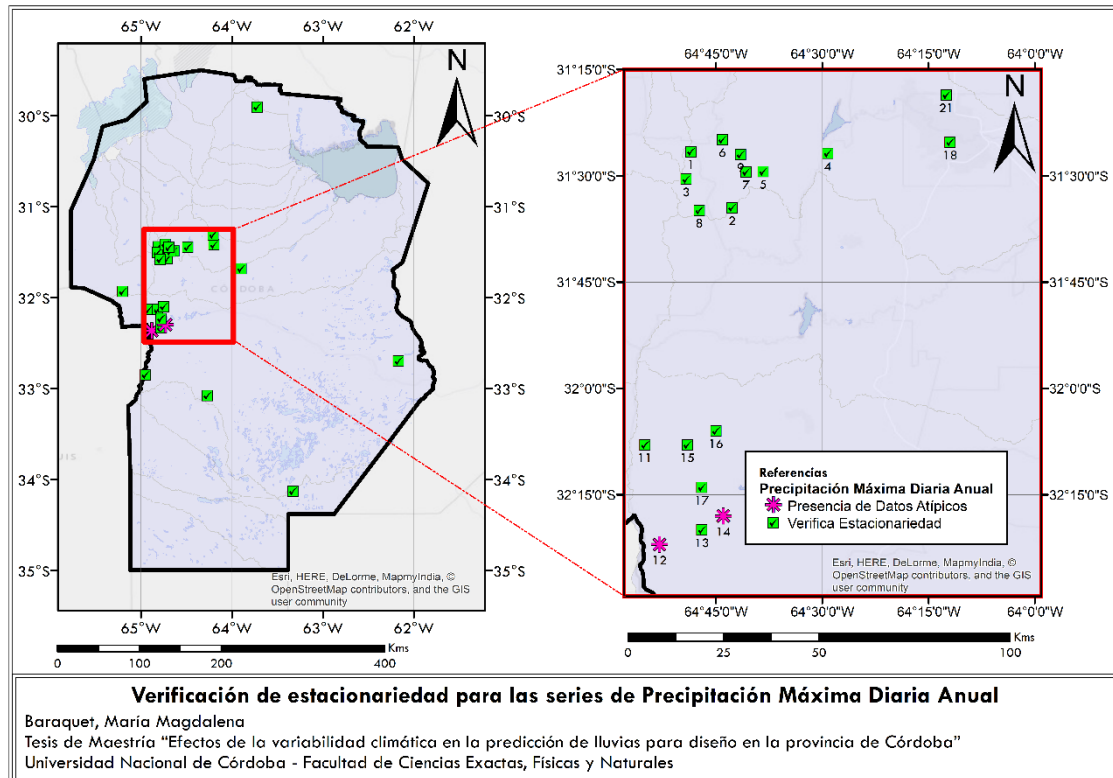


Figura 37: Verificación de estacionariedad para las series de PMDA.

Se observa la localización de las 2 estaciones en las cuales no se verificó la prueba de datos atípicos. Ambas se encuentran en la parte sur de la cuenca alta del Rio Tercero. En el caso de la estación 12 los datos atípicos fueron valores máximos, mientras que en la estación 14 estos datos fueron valores mínimos.

Para la variable *Precipitación Total Anual*, tres de las series de las 25 estaciones analizadas se rechazaron por presencia de datos atípicos (estaciones 2, 8 y 14); una de las series no verificó la prueba de homogeneidad (estación 9) y otra no verificó la prueba de estacionariedad (estación 17). El resto de las series verificaron todas las pruebas. La localización de estas estaciones puede verse en la Figura 38.

Se observa que las 5 series en las que se detectó alguna anomalía se encuentran en la zona centro oeste de la provincia de Córdoba. En la estación 14 los datos atípicos que se presentaron fueron valores mínimos, al igual que en la estación 2. Mientras que en la serie correspondiente a la estación 8 se encontraron datos mínimos y máximos que resultaron atípicos. Con respecto a la estación 7, la cual no verificó la prueba de homogeneidad, se puede ver en la serie analizada un salto en el año 1998 dado que en el mismo hay faltante de datos. Por último, la serie analizada de la estación 17

presentó tendencia positiva, esto implica que aumentaría la precipitación total anual en ese punto.

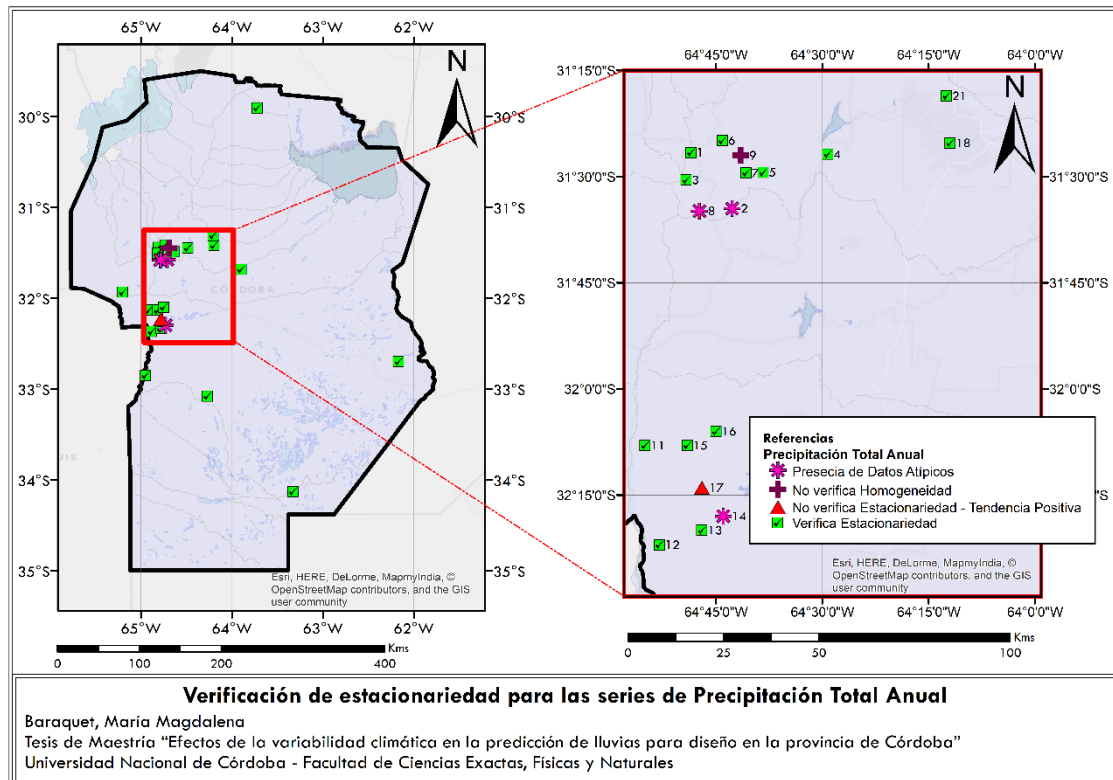


Figura 38: Verificación de estacionariedad para las series de PTA.

Para el caso de la variable *Días Lluviosos al Año*, se debieron descartar 5 series, 2 por presentar datos atípicos (estación 3 y estación 18), otra por no verificar el test de independencia (estación 13), la estación 14 no verificó ninguna de las pruebas estadísticas (independencia, homogeneidad y estacionariedad), y la última (estación 15) no verificó la prueba de homogeneidad. De las 20 series restantes hubo 2 que no verificaron la prueba de estacionariedad (estaciones 11 y 12). El resto de las series pasaron todas las pruebas estadísticas. Lo mismo se muestra en la Figura 39.

Puede verse que la estación 3, en la cual se detectaron datos atípicos, se ubica en la zona centro oeste de la provincia. El resto de las estaciones en las que no se verificó alguna prueba se encuentran hacia sur del cordón serrano. Los datos atípicos encontrados en la serie hidrológica de la estación 3 fueron valores mínimos. Con respecto a la estación 15, la cual no verificó la prueba de homogeneidad, se puede ver en la serie analizada un salto entre los años 1990 y 1992 en los cuales existe faltante de datos. Las estaciones 11 y 12 presentaron tendencia negativa en las series analizadas, es decir, que la cantidad de días lluviosos al año disminuiría en esos puntos.

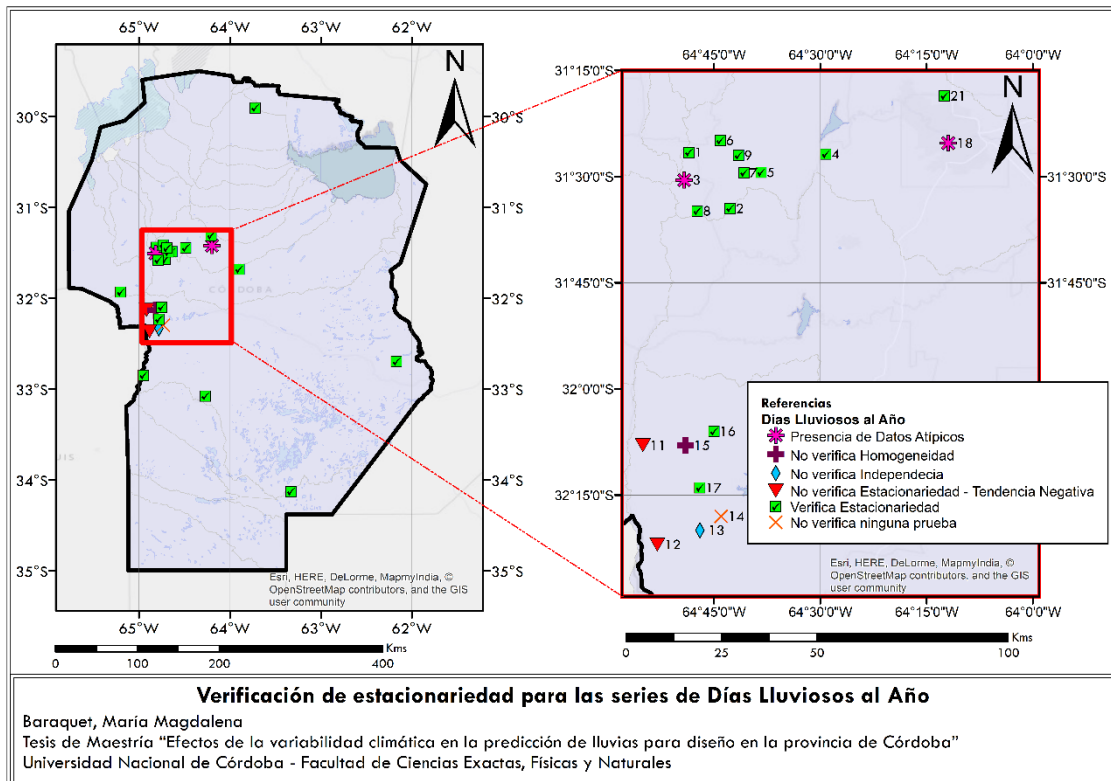


Figura 39: Verificación de estacionariedad para las series de DLLA.

Al analizar la variable *Días Lluviosos al Mes*, de las 25 series analizadas, 2 se rechazaron por la presencia de datos atípicos, otras 2 no verificaron el test de estacionariedad. El resto de las series pasaron las pruebas estadísticas. (Ver localización en Figura 40)

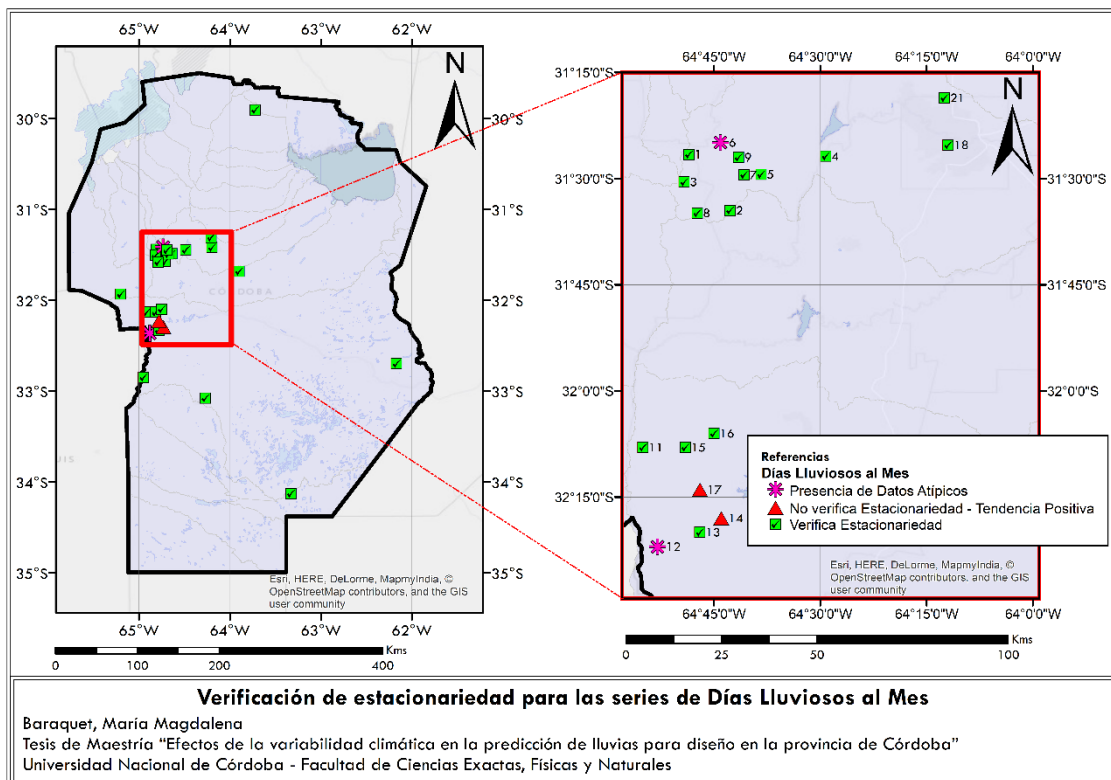


Figura 40: Verificación de estacionariedad para las series de DLLM.

Se observa que, de las dos series en las que se encontraron datos atípicos, se encuentran en la zona centro oeste de la provincia, una más hacia el norte (estación 6) y la otra más hacia el sur (estación 12). En ambas series, los datos atípicos correspondían a 1 valor mínimo y 1 un valor máximo.

Con respecto a las estaciones en las cuales las series no verificaron el test de homogeneidad, se puede ver que ambas se encuentran al sur del cordón serrano. Además, para los dos casos se detectó una tendencia positiva, lo que implica un aumento de la cantidad de días lluvioso al mes en esas localizaciones.

Por último, en el análisis de *Días Consecutivos con Lluvia* se debió descartar una serie por no verificar ninguna de las pruebas estadísticas (estación 14). De las 24 series restantes, una no verificó el test de estacionariedad (estación 12). El resto de las series verificaron todas las pruebas estadísticas que se aplicaron.

En la Figura 41 se puede ver que las 2 estaciones que presentan alguna anomalía se encuentran hacia el sur de la zona central oeste de la provincia.

Con respecto a la estación 12, en la cual la serie no verificó el test de estacionariedad, se observó una tendencia negativa, es decir, una disminución de la cantidad de días consecutivos con lluvia en esa estación.

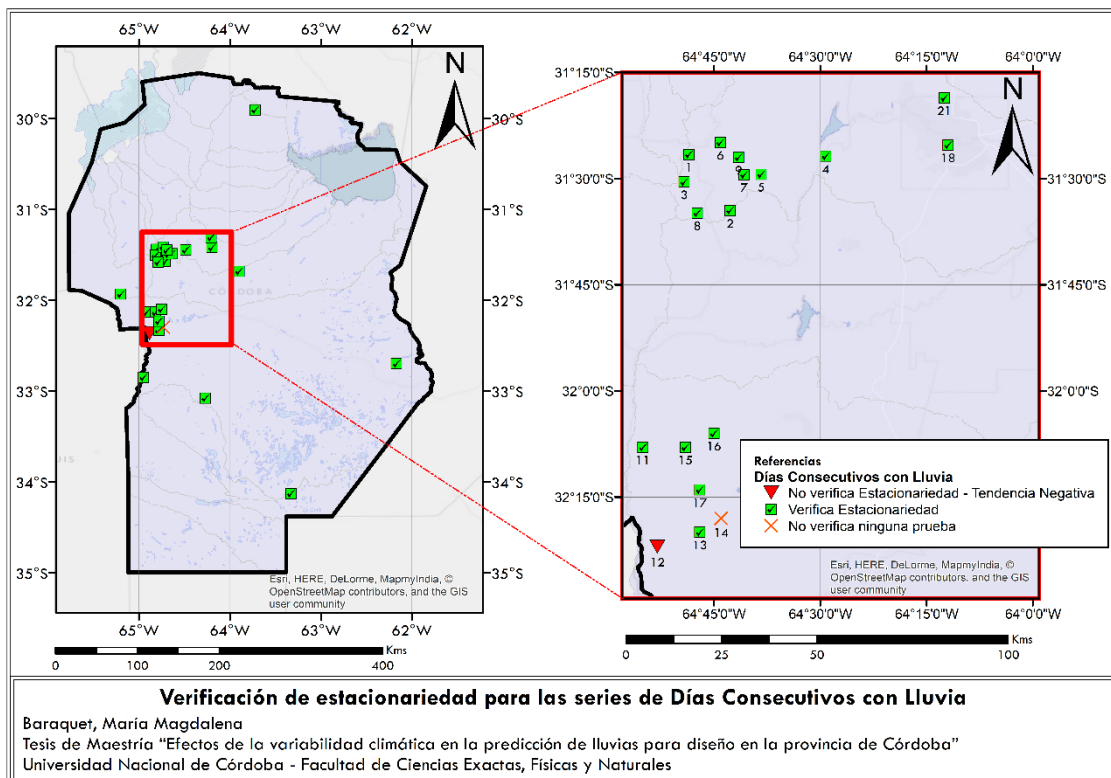
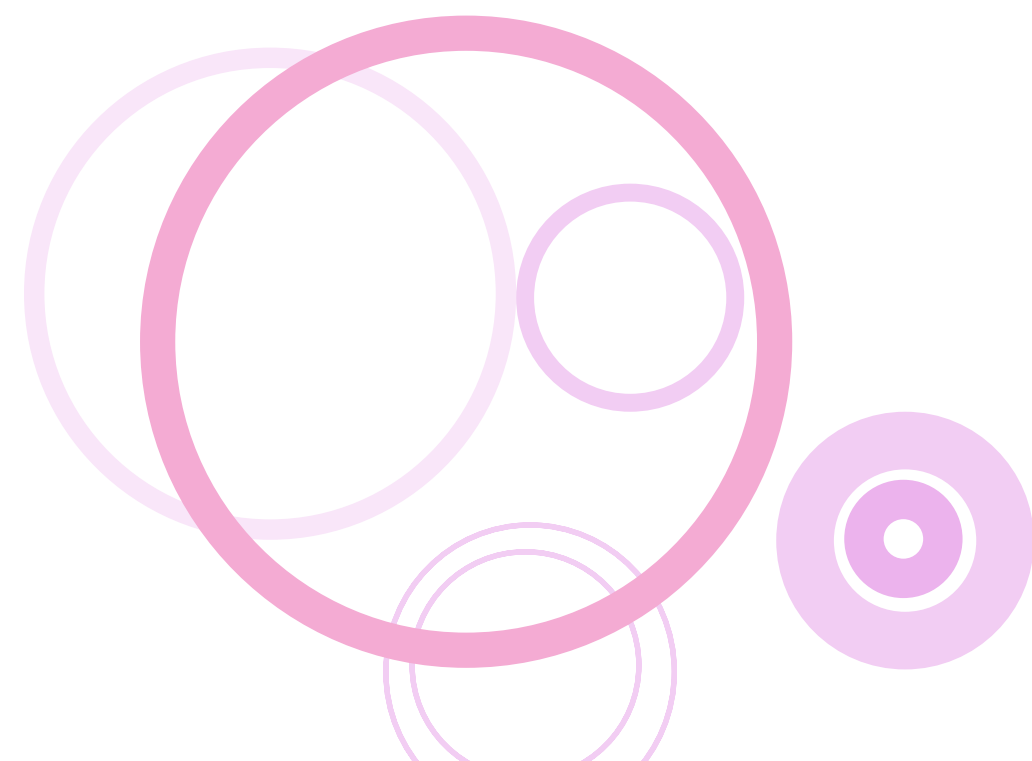


Figura 41: Verificación de estacionariedad para las series de DCCLL.



Aplicaciones recomendadas al diseño hidrológico



6. Capítulo 6: Aplicaciones recomendadas al diseño hidrológico.

En este apartado se presentan dos metodologías propuestas para el diseño hidrológico de medidas estructurales y no estructurales para mitigar el riesgo hídrico; una para el caso que se cuente con series históricas de variables hidrológicas *estacionarias* y otra para cuando se presenten series históricas de variables hidrológicas *no estacionarias*.

6.1. Diseño hidrológico para series estacionarias (DHSE).

A continuación, se presenta en forma sintética la metodología propuesta a aplicar para el caso de diseño hidrológico mediante un modelo de transformación lluvia caudal cuando se cuenta con series *estacionarias* de Precipitación Máxima Diaria Anual.

- I. *Delimitación de cuenca*: a través de un modelo digital de terreno (DEM) obtenido de información satelital y/o topografía de detalle relevada in situ se procede a delimitar la cuenca y subcuencas.
En función del tipo de dato con que se cuente, será la exactitud de la delimitación de cuenca resultante. Aunque la naturaleza digital y simbólica de los DEM permite una elevada precisión en la descripción de los procesos, no garantiza la exactitud de los resultados, principalmente en zonas de llanura. Generalmente los DEM funcionan adecuadamente en cuencas de pendientes medias del orden de 1%, no pasa lo mismo en cuencas de llanura. En este último caso, para la delimitación de las cuencas es necesario conocer otra información (tal como rutas existentes, vados, imágenes satelitales) la cual ayudará a conocer las posibles divisorias de aguas y/o escurrimientos hídricos.
- II. *Determinación de parámetros morfométricos de la cuenca*: se definen áreas, pendientes de las cuencas; longitudes y pendientes de cauces principales; tipos de suelo y vegetación, etc.
- III. *Determinación de parámetros hidrológicos del modelo*: en base a información recopilada en el lugar de estudio se definen abstracciones iniciales, tiempos de concentración, tiempos de retardo, métodos de tránsito, y parámetros de pérdidas de cada subcuenca.
- IV. *Calibración de parámetros hidrológicos*: se calibran los parámetros del modelo en función de información de precipitaciones y caudales observados que se tenga disponible en la zona de estudio.
- V. *Lluvia de diseño*: se definen aquí las lluvias de diseño que serán incorporadas al modelo de transformación lluvia - caudal. Se analiza tanto la magnitud de la lámina como su distribución temporal y espacial.

- VI. *Simulación hidrológica*: se modela la cuenca de interés con los parámetros antes definidos para obtener los caudales de diseño.
- VII. *Resultados de la simulación*: se presentan los hidrogramas obtenidos para diferentes tiempos de retorno en la cuenca modelada.
- VIII. *Conclusiones y recomendaciones*: en base a los resultados obtenidos se elaboran conclusiones y recomendaciones.

I. *Delimitación de cuenca*.

En primera instancia, para delimitar la cuenca de estudio es necesario contar con datos topográficos en la zona de interés; los cuales se pueden obtener, ya sea, de un modelo digital de terreno (DEM) obtenido de información satelital y/o topografía de detalle relevada in situ. En el caso del ejemplo de aplicación que aquí se presenta, el DEM implementado fue el SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), el cual presenta datos topográficos del terreno con una discretización espacial de 30 metros y una precisión vertical de 3 metros.

A partir del DEM de la zona de estudio, se realizó la delimitación de la cuenca y la misma se presenta en la Figura 42.

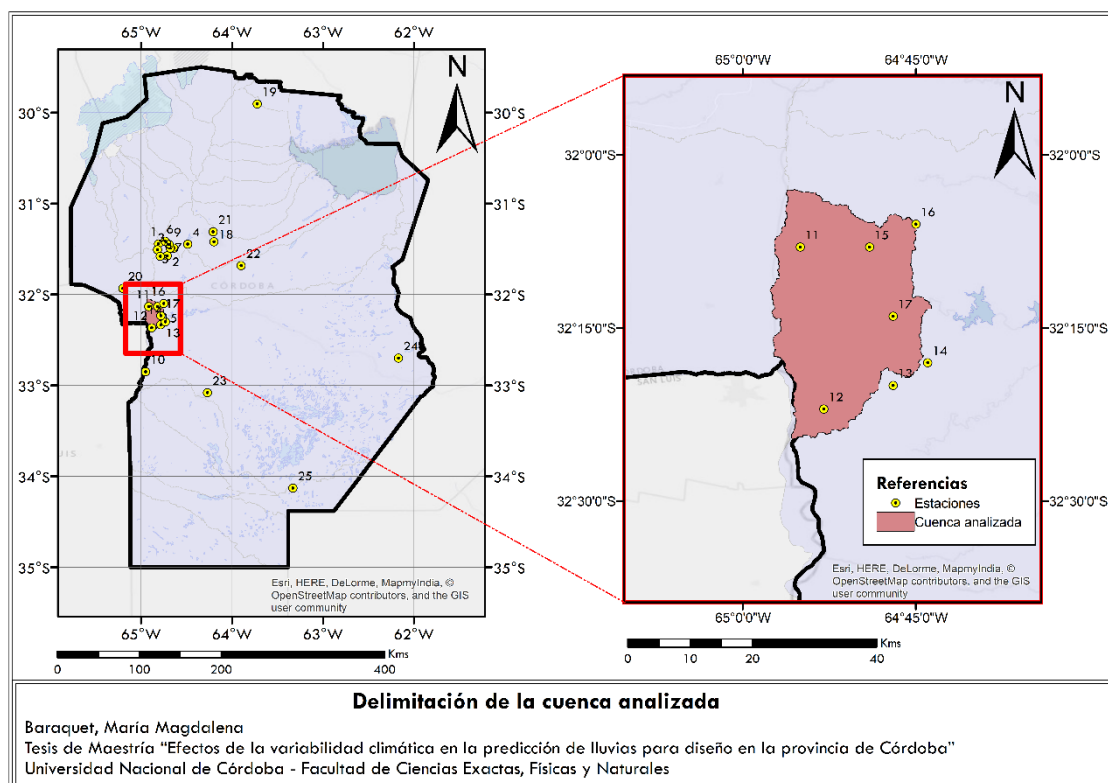


Figura 42: Delimitación de la cuenca analizada para el caso de DHSE.

A continuación, en la Figura 43, se muestran cada una de las subcuencas definidas en la cuenca analizada.

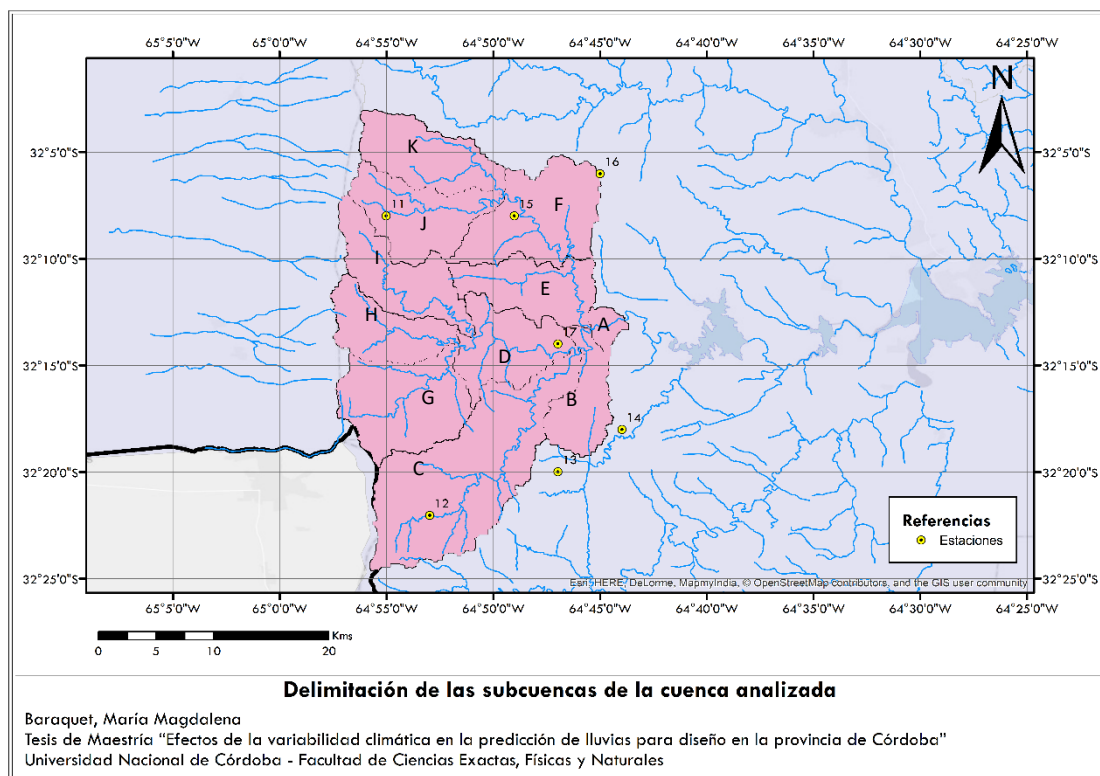


Figura 43: Delimitación de las subcuencas de la cuenca analizada para el caso de DHSE.

II. Determinación de parámetros morfométricos de la cuenca

Luego de la delimitación de las subcuencas se procedió a calcular cada uno de los parámetros presentados en la Tabla 14. Donde: A es el área de la subcuenca en Km^2 , L es la longitud de los tramos por donde el agua escurre en forma de cauce y en forma de lámina en m ; S es la pendiente de los tramos definidos en L en m/m .

Tabla 14: Parámetros morfométricos de cada una de las subcuencas de la cuenca analizada para el caso de DHSE.

Subcuencas	A (Km^2)	L (Km)		S (m/m)
		Flujo en cauce	Flujo en lámina	
A	7.28	Flujo en cauce	2.81	0.005
		Flujo en lámina	2.06	0.086
B	33.52	Flujo en cauce	12.94	0.027
		Flujo en lámina	2.20	0.065
C	132.98	Flujo en cauce	28.58	0.041
		Flujo en lámina	4.30	0.056
D	46.24	Flujo en cauce	13.50	0.036
		Flujo en lámina	6.24	0.056
E	46.25	Flujo en cauce	7.43	0.011
		Flujo en lámina	3.70	0.018
F	67.80	Flujo en cauce	10.02	0.025
		Flujo en lámina	3.60	0.049
G	69.01	Flujo en cauce	13.60	0.062
		Flujo en lámina	7.60	0.069

Subcuencas	A (Km ²)	L (Km)		S (m/m)
		Flujo en cauce		
H	39.26	Flujo en cauce	11.00	0.068
		Flujo en lámina	4.30	0.097
I	49.75	Flujo en cauce	16.78	0.060
		Flujo en lámina	2.60	0.091
J	52.60	Flujo en cauce	13.71	0.098
		Flujo en lámina	4.00	0.080
K	49.46	Flujo en cauce	12.45	0.110
		Flujo en lámina	5.00	0.084

Luego se determinó el área de la cuenca en su conjunto, se identificó el cauce principal de la misma y a partir de este se definieron longitudes y pendientes.

III. Determinación de parámetros hidrológicos del modelo

Para la determinación de las pérdidas en cada una de las subcuencas se aplica el método de las abstracciones del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) (USDA Soil Conservation Service, 1972), el cual permite diferenciar la porción de lluvia que se convierte en escorrentía directa y las pérdidas iniciales y por infiltración. Para la transformación de la lluvia efectiva en caudales se utiliza el método del Hidrograma Unitario Sintético (HU) del SCS (USDA Soil Conservation Service, 1972), cuya implementación requiere los parámetros hidrológicos de tiempos de concentración (t_c), tiempos de retardo (t_r) y el factor de pico (PRF, por sus siglas en inglés). Para el tránsito de los hidrogramas en los cauces se aplicará el método de Muskingum (Chow et al, 1993).

Método de las abstracciones del Servicio de Conservación de Suelos (SCS)

Ante un evento de precipitación, la altura de la lámina de exceso de precipitación, o precipitación efectiva (P_e) es siempre menor o igual a la altura de la lámina de precipitación total (P); de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca (F_a) es menor o igual a alguna retención potencial máxima (S). Existe una cierta cantidad de precipitación (I_a), definida como la abstracción inicial antes del encharcamiento, para la cual no ocurrirá escorrentía. Vale aclarar que, en este estudio, el término precipitación hace referencia únicamente a lluvia, es decir a la caída de agua.

Para determinar la lámina de precipitación escurrida (P_e) se requiere:

- Precipitación media sobre cada una de las cuencas o subcuencas (P).
- Numero de Curva (CN); parámetro requerido para calcular:
 - Infiltración inicial (I_a)

- Retención potencial máxima (S).

Finalmente, la precipitación escurrida (P_e) se calcula como sigue:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (23)$$

$$I_a = 0.2 \cdot S \quad (24)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad [mm] \quad (25)$$

El CN contempla varios factores que afectan el porcentaje de lluvia que escurrirá directamente:

- Condición antecedente de humedad del suelo al momento de la lluvia de diseño.

La precipitación efectiva está afectada por la humedad que tenga el suelo al momento de recibir la precipitación. El método de la SCS para determinar las abstracciones tiene en cuenta este factor al establecer condiciones antecedentes de humedad (AMC) basado en la precipitación total en los 5 días anteriores al evento. El método considera tres tipologías de condición de humedad antecedente: seca (I), normal (II) y húmeda (III) y los clasifica según la estación y período del año en la que se esté realizando el estudio hidrológico. En la Tabla 15 se presenta a modo de resumen cada una de las tipologías y la fórmula de cálculo.

Tabla 15: Tipologías y formas de cálculo para el Número de Curva (CN).

Tipología		Lámina de lluvia caída durante los 5 días previos [mm]		Forma de cálculo
		Estación inactiva	Estación de crecimiento	
Seca	I	Menor que 12.7	Menor que 35.56	$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(II)}{10 - 0.058 \cdot CN(II)}$
	II	Entre 12.7 y 27.94	Entre 35.56 y 53.34	Tabla
Húmeda	III	Mayor que 27.94	Mayor que 53.34	$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)}$

- Tipo de suelo.

Para el tipo de suelo, el SCS distingue, en su método, cuatro tipos o grupos hidrológicos de suelos, a continuación, se caracteriza cada uno de ellos (“Urban Hydrology for Small Watersheds”):

- Grupo A: tienen un bajo potencial de escorrentía y altas tasas de infiltración incluso cuando están completamente mojados. Consisten principalmente en arena o grava profunda, bien excesivamente drenada, y tienen una alta tasa de transmisión de agua (más de 0.30 in/h).

- Grupo B: tienen tasas de infiltración moderadas cuando están completamente mojados y consisten principalmente en suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien a bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua (0.15-0.30 in/h).
- Grupo C: tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados y consisten principalmente en suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua y con textura moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una tasa baja de transmisión de agua (0.05-0.15 in/hr).
- Grupo D: tienen un alto potencial de escurrimiento. Poseen tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente mojados y consisten principalmente en suelos arcillosos con un alto potencial de expansión, con una capa freática alta permanente, con una capa de arcilla en la superficie o cerca de ella y son suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión de agua (0-0.05 in/hr).

En este caso de estudio, para definir los tipos de suelo se utilizaron los mapas de suelo del INTA. En la Figura 44 se presentan los tipos de suelo en la zona de estudio.

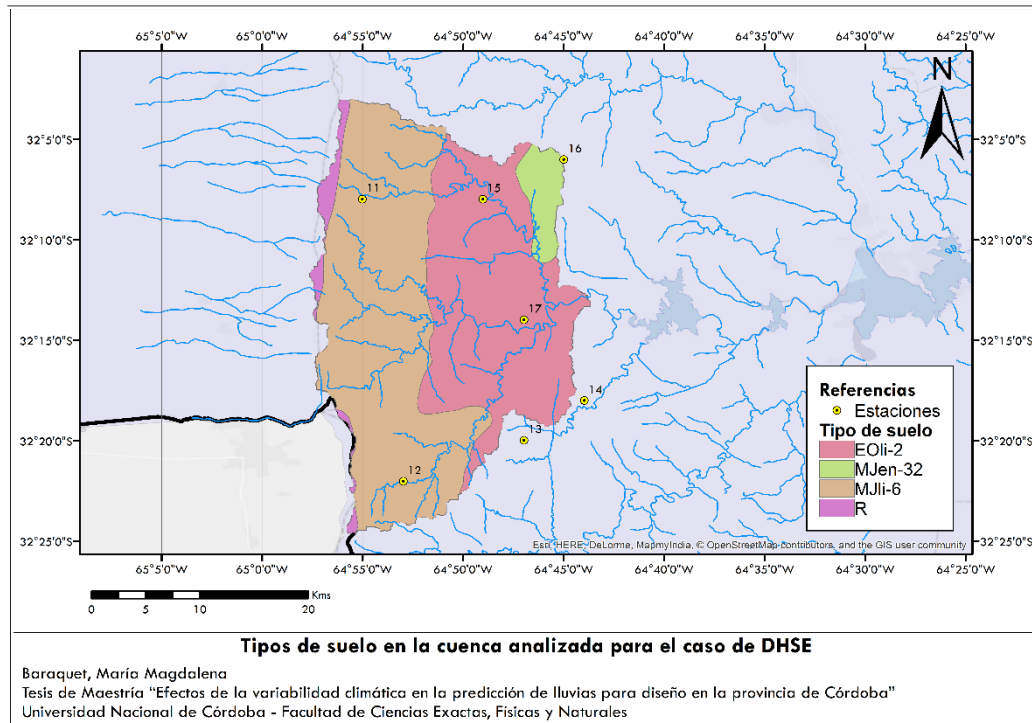


Figura 44: Tipos de suelo en la cuenca analizada para el caso de DHSE.

De la última figura se observa que los principales tipos de suelo en la zona son MJli-6 en la parte alta de la cuenca y EOLI-2 en la parte baja, cuyas características son:

- MJli-6: excesivamente drenado, somero, franco arenoso en superficie, franco arenoso en el subsuelo, bien provisto de materia orgánica, moderada capacidad de intercambio, muy fuertemente inclinado o colinado, muy pedregoso, alta susceptibilidad a la erosión hídrica. En base a esto se adoptó el *tipo de suelo B*.
- EOLI-2: excesivamente drenado, algo somero, areno franco en superficie, areno franco en el subsuelo, moderadamente pobre en materia orgánica, moderada capacidad de intercambio, muy fuertemente inclinado o colinado, alta susceptibilidad a la erosión hídrica. En base a esto se adoptó el *tipo de suelo B*.

➤ Uso de suelo.

Para el uso del suelo se realizó un análisis de imágenes satelitales del terreno (Fuente: Esri, Digital Globe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS UserCommunity). En la Figura 45 se presentan los usos de suelo en la zona de estudio.

Al analizar esta figura, se observa en la cuenca dos tipos principales de usos de suelo: Combinación de bosque con césped (medio) y Pastizales (medio), en las zonas bajas y altas de la cuenca respectivamente.

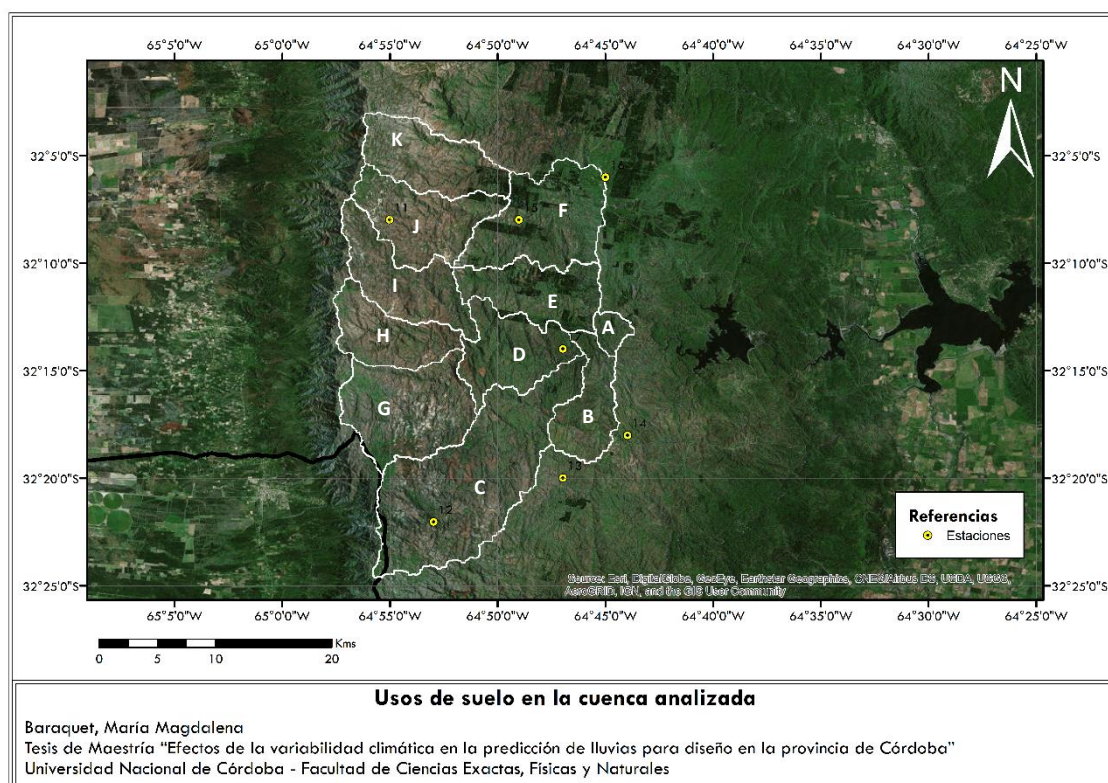


Figura 45: Usos de suelo en la cuenca analizada para el caso de DHSE.

A partir del uso y tipo de suelo, los valores estimados de CN de cada una de las subcuencas se presentan en la Tabla 16. Vale aclarar que, a priori, las subcuencas se modelaron con condición de humedad antecedente intermedia.

Tabla 16: Valores del Número de Curva (CN) de las subcuencas pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSE.

Subcuencas	Uso de suelo	Tipo de suelo	CN
A	Combinación de bosque con césped (medio)	B	65
B	Pastizales (medio)	B	70
C	Pastizales (medio)	B	70
D	Pastizales (medio)	B	70
E	Combinación de bosque con césped (medio)	B	65
F	Combinación de bosque con césped (medio)	B	65
G	Pastizales (medio)	B	70
H	Pastizales (medio)	B	70
I	Pastizales (medio)	B	70
J	Pastizales (medio)	B	70
K	Pastizales (medio)	B	70

Es importante destacar que las modificaciones en el uso del suelo, principalmente las realizadas por el hombre (incremento de la urbanización, uso de materiales modernos de construcción, tala de bosques, creación de zonas cultivadas donde no las había, etc.) son uno de los factores más importantes que generan cambios en las abstracciones iniciales, debido a que estas últimas dependen del tipo y del uso de suelo que se tenga en la zona analizada, lo que significa que dependen de los valores CN que se definan para la zona. Por lo tanto, es importante verificar los usos de suelo, y, en consecuencia, los valores de CN antes de volver a utilizar el modelo calibrado.

Modelo de transformación lluvia-caudal

Como se mencionó anteriormente, para la transformación de la lluvia efectiva en caudales se utiliza el hidrograma unitario adimensional del SCS, el cual se define por la siguiente relación:

$$Q_p = PRF \cdot A \cdot \frac{Q}{t_p} \quad (26)$$

Donde Q_p es el caudal pico del hidrograma unitario en ft^3/s .; PRF es el porcentaje del volumen que escurre antes de alcanzar el caudal pico; A es el área de la cuenca en mi^2 ; Q es el volumen escurrido en pulgadas y t_p es el tiempo al pico del hidrograma unitario en horas.

El porcentaje del volumen que escurre antes de alcanzar el caudal pico (PRF por sus siglas en inglés) no es uniforme en todas las cuencas debido a que depende de la longitud del cauce principal, cobertura del suelo y otras propiedades de la cuenca. Haciendo variar este factor, se pueden obtener diferentes hidrogramas unitarios adimensionales del SCS. Se ha encontrado que las cuencas de llanura poseen factores PRF más bajos (del orden de 100 a 300); mientras que cuencas con mayores pendientes poseen PRF más altos (del orden de 400 a más de 600) (Sheridan et al, 2002).

Para el caso analizado los valores estimados fueron: del orden de 600 a 800 en la parte alta de cuenca (subcuencas C, G, H, I, J y K), y entre 300 a 550 en la zona baja de la cuenca (subcuencas A, B, D, E y F).

Luego, el tiempo de retardo (t_{lag}) de la cuenca se calcula como el 60% del tiempo de concentración de la cuenca (T_c), es decir:

$$t_{lag} = 0.6 \cdot T_c \quad (27)$$

Es necesario entonces, determinar en primer lugar el tiempo de concentración de cada una de las subcuencas.

Roussel et al. 2005 concluye que generalmente la ecuación de Kirpich, y en particular la ecuación de Kerby-Kirpich para estimar el tiempo de concentración de una cuenca es adecuada. Esta ecuación produce estimaciones de tiempo de concentración consistentes con valores obtenidos en cuencas que fueron calculados a partir de tormentas reales e hidrogramas de esorrentía. Al aplicar este método para el cálculo de T_c , el tiempo total de concentración se obtiene sumando el tiempo de flujo superficial t_o (Kerby) y el tiempo de flujo en canal t_c (Kirpich) (“Hydraulic Design Manual”, 2016):

$$T_c = t_o + t_c \quad (28)$$

Donde:

$$t_o = K_o(L_o \cdot N)^{0.467} S_o^{-0.235} \quad (29)$$

$$t_c = K_c L_c^{0.77} S_c^{-0.385} \quad (30)$$

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

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

L_o : Longitud del flujo superficial (o flujo en láminas) en m .

L_c : Longitud del flujo en canal en m .

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

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

N : Coeficiente de retardo del flujo (adimensional). Su valor se obtiene de la Tabla 17.

Tabla 17: Coeficiente de retardo del flujo para la determinación del tiempo de flujo superficial (t_o).
(Fuente: "Hydraulic Design Manual", 2016)

Descripción generalizada del terreno	Coeficiente de retardo adimensional
Pavimento.	0.02
Suelo compacto, desnudo, llano.	0.1
Vegetación pobre, cultivos en hilera cultivados, o superficies moderadamente rugosas.	0.2
Pasto, vegetación media.	0.4
Bosque caducifolio	0.6
Vegetación densa, bosque de coníferas, o bosque caducifolio con hojarasca profunda	0.8

Finalmente, para el caso analizado los valores de T_c y t_p estimados se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18: Tiempos de concentración y tiempos de retardo para cada una de las subcuencas pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSE.

Subcuencas	T_c (min)	t_{lag} (min)
A	125	75
B	180	108
C	272	163
D	216	130
E	217	130
F	185	111
G	169	102
H	130	78

Subcuencas	T_c (min)	t_{lag} (min)
I	150	90
J	132	79
K	130	78

Para definir el tiempo de concentración de la cuenca en su conjunto, se realizó el mismo procedimiento que para cada una de las subcuencas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Tiempos de concentración y tiempos de retardo para la cuenca analizada para el caso de DHSE.

Cuenca	T_c (min)	t_{lag} (min)
	284	170

Modelo de tránsito

Los parámetros necesarios para aplicar el método de Muskingum son K y X . K puede asimilarse al tiempo de recorrido de la onda cinemática de un extremo al otro del tramo estudiado y X es una constante que vale entre 0 y 0.5 (tomando generalmente valores de entre 0.2 y 0.3); a mayor valor de X menor es la amortiguación del hidrograma a lo largo del tramo del cauce. Se adoptó un valor de X de 0.3 debido al bajo nivel de almacenamiento existente en estas cuencas de montaña. Para definir el parámetro K se adoptó la siguiente metodología: conociendo la longitud de cada uno de los tránsitos y las pendientes de esos tramos se calculó no solo la distancia que debe recorrer el flujo en cada uno de ellos sino también la velocidad del flujo cuando escurren los caudales de diseño aplicando la ecuación de Manning estimando el tirante del río y a partir de dichos datos se estimó el tiempo de tránsito en cada tramo.

Tabla 20: Parámetros del método de Muskingum para cada uno de los tránsitos pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSE.

Tránsito	K (hr)	X
R1	0.34	0.3
R2	0.48	0.3
R3	0.31	0.3
R4	0.35	0.3
R5	0.06	0.3
R6	0.28	0.3

IV. Calibración de parámetros hidrológicos.

Para calibrar el modelo se utilizaron lluvias y caudales registrados en la cuenca de estudio entre el 28/02 y el 01/03 del año 2015. A continuación, en la Figura 46 se presenta el hietograma registrado y en la Figura 47 algunos caudales aforados durante dicho evento.

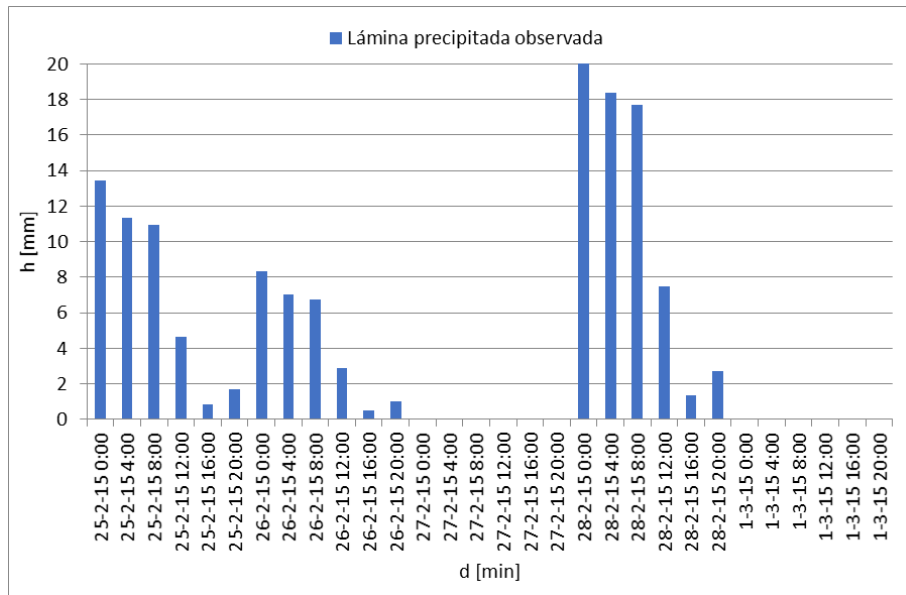


Figura 46: Hietograma observado en el punto de cierre de la cuenca durante el evento de calibración.

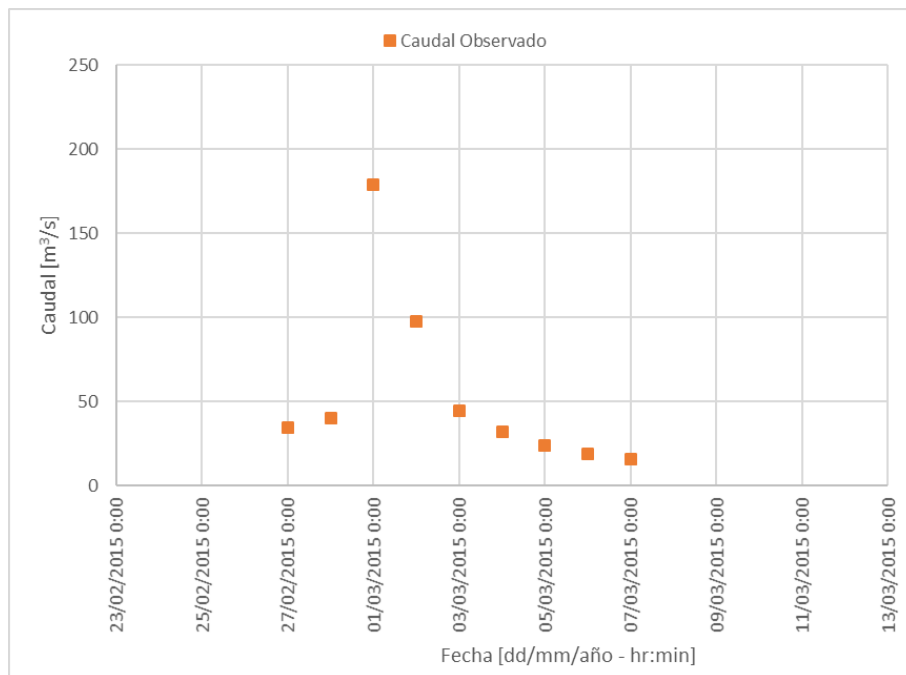


Figura 47: Caudales medidos en el punto de cierre de la cuenca durante el evento de calibración.

Para lograr la calibración se fueron variando cada uno de los parámetros del modelo hasta obtener un buen ajuste entre los caudales estimados y los simulados. En la Figura 48 se grafican estos caudales. Vale aclarar que el flujo base en la simulación fue modelado.

Lograr un buen ajuste implica que los valores de CN propuestos en el punto III fueron bien estimados.

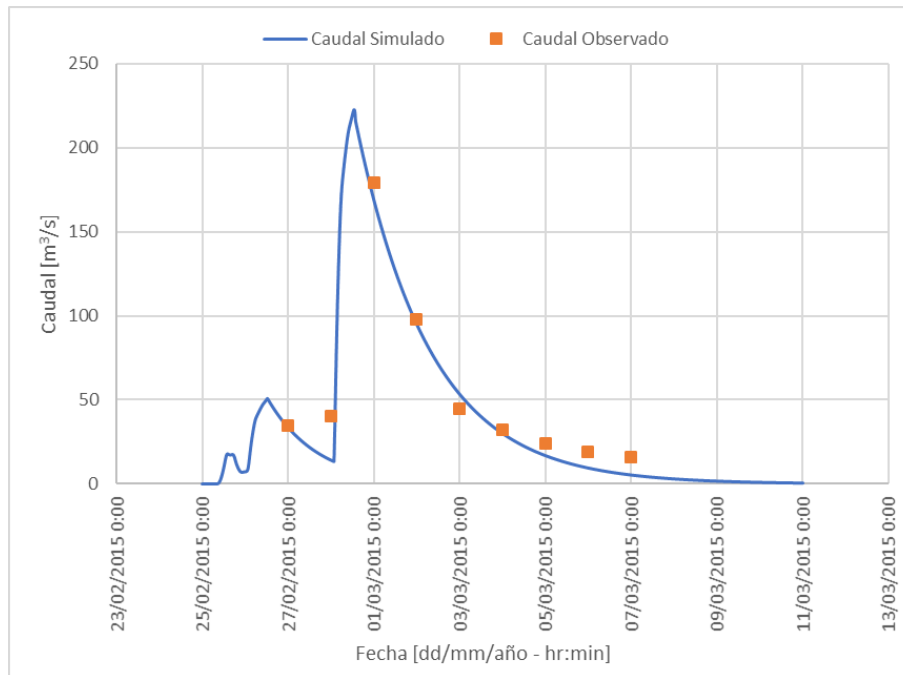


Figura 48: Comparación entre hidrograma obtenido de la simulación del evento de calibración y los caudales registrados para el caso de DHSE.

V. Lluvia de diseño.

Cálculo de la duración de la tormenta crítica sobre la cuenca

La duración crítica de la tormenta puede definirse como aquella duración para la cual se genera la respuesta más desfavorable de la cuenca. Para calcular esta duración, en primer lugar, se construyó la llamada *Curva S*, para la cual se considera una lluvia constante en el tiempo y sin pérdidas, de manera tal que llega un momento para el cual el caudal de salida permanece constante, ese tiempo se considera como la duración crítica. De la Figura 49 se puede observar que la duración crítica es de aproximadamente 6 horas.

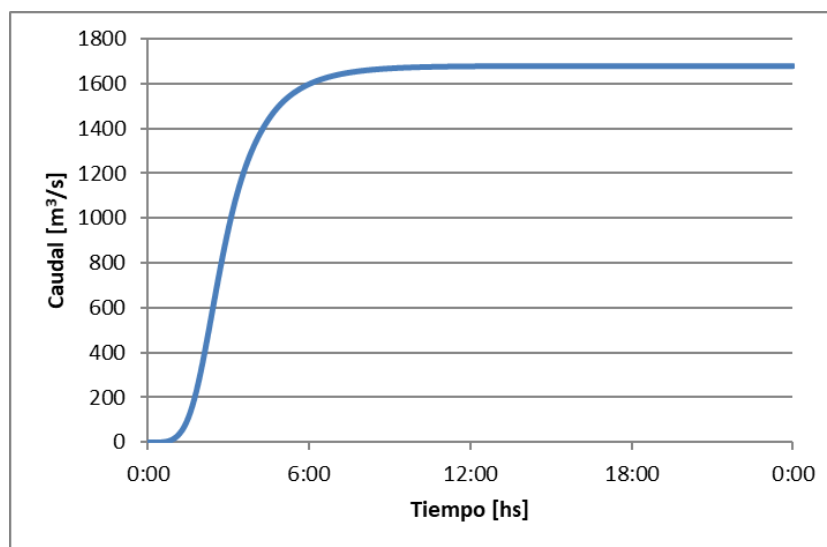


Figura 49: Curva S para una lluvia constante en el tiempo y sin pérdidas para el caso de DHSE.

Luego, se decidió analizar la relación entre los caudales picos y las duraciones de diferentes lluvias, para poder encontrar cual es la duración que genera el máximo escurrimiento en la cuenca. Se analizaron duraciones de lluvia de 3, 6, 9 y 12 horas para una recurrencia de 50 años, utilizando para cada una de las subcuencas la serie de valores de CN que se definió anteriormente.

El método de distribución temporal elegido para realizar este último análisis fue el de distribución patrón de Huff con pico en el 2º cuartil. En este tipo de distribución temporal, el hietograma tipo se representa con un patrón adimensional discreto, dividido en percentiles, generalmente cuartiles (Huff, 1967, 1970) o sextiles, cuya forma, en especial la posición de la moda, es determinante en la de la consecuente crecida. (Caamaño y Daaso, 2003).

En la Figura 50 se muestran las distribuciones patrón definidas por Huff en 1970. Se grafica el porcentaje de la duración en abscisas (duración de la tormenta en relación con la duración total del evento) y el porcentaje de precipitación en ordenadas (lámina caída hasta ese momento en relación a lámina caída total). En este gráfico se presentan cuatro curvas según en cuál de los cuartiles se ubique el pico de la tormenta.

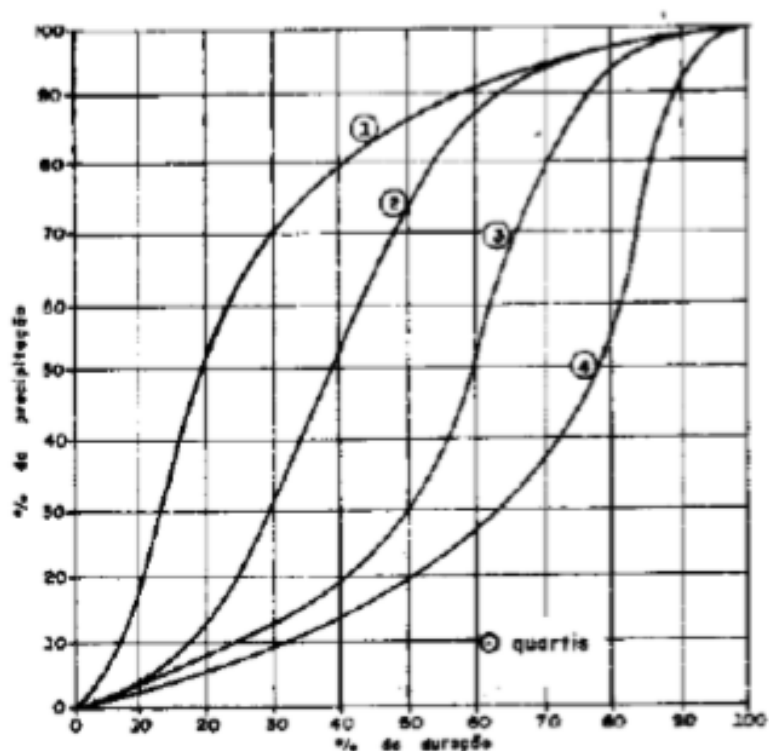


Figura 50: Distribución temporal patrón de Huff (1970) para diferentes tipologías de lluvia.

Al graficar los hidrogramas generados se obtienen los resultados mostrados en la Figura 51.

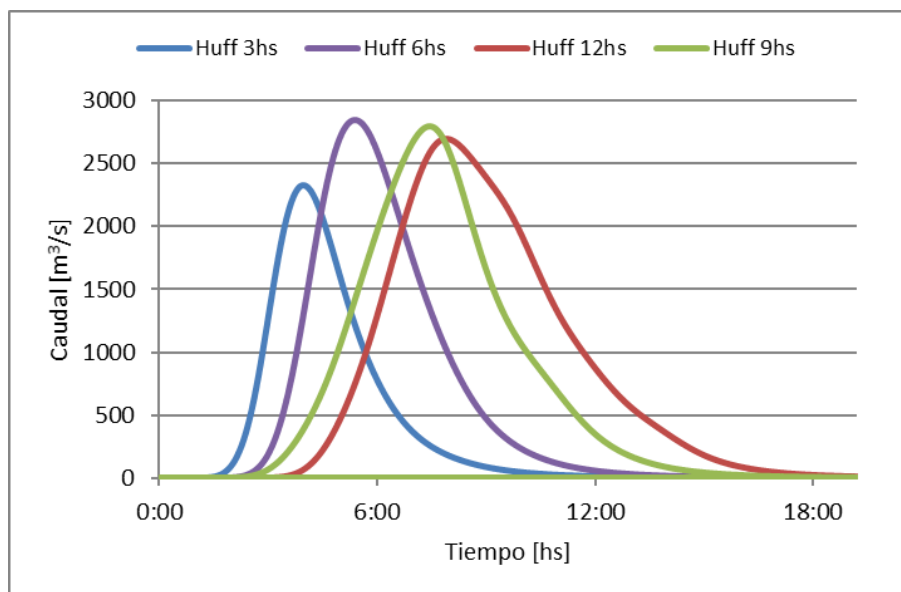


Figura 51: Hidrogramas generados para diferentes duraciones de lluvia para el caso de DHSE.

Al realizar este análisis, se observa que inicialmente al ir aumentando la duración de la lluvia aumenta también el caudal pico; pero llega un momento en el que los caudales comienzan a disminuir. La duración para la cual se genera el máximo escurrimiento en la cuenca es la duración de la tormenta crítica. Lo que de estas simulaciones se deduce es que la duración crítica es de 6 horas. Por lo tanto, finalmente se adopta como *duración crítica 6 horas*. Este valor resultó similar al tiempo de concentración de la cuenca, el cual es de aproximadamente 5 horas (284 minutos).

Cálculo de la curva IDT

Para poder aplicar el modelo de transformación lluvia - caudal es necesario conocer la precipitación media areal en la cuenca; más específicamente es necesario contar con la relación intensidad – duración – período de retorno (curva idT) de la cuenca.

Para lograr este objetivo, en primer lugar, es necesaria la relación idT en el punto de cierre de la cuenca en estudio y luego realizar la atenuación espacial de la lámina de lluvia.

En la Figura 52 se muestra el punto de cierre de la cuenca, el cual coincide con la estación de aforos de caudales Ume Pay.

Debido a que esta estación no cuenta con información pluviográfica ni pluviométrica (y es por ello por lo que no se tuvo en cuenta en el análisis del capítulo anterior); es necesario aplicar algún método de transposición para obtener la idT en esta posición. En este trabajo se aplica el modelo DIT.

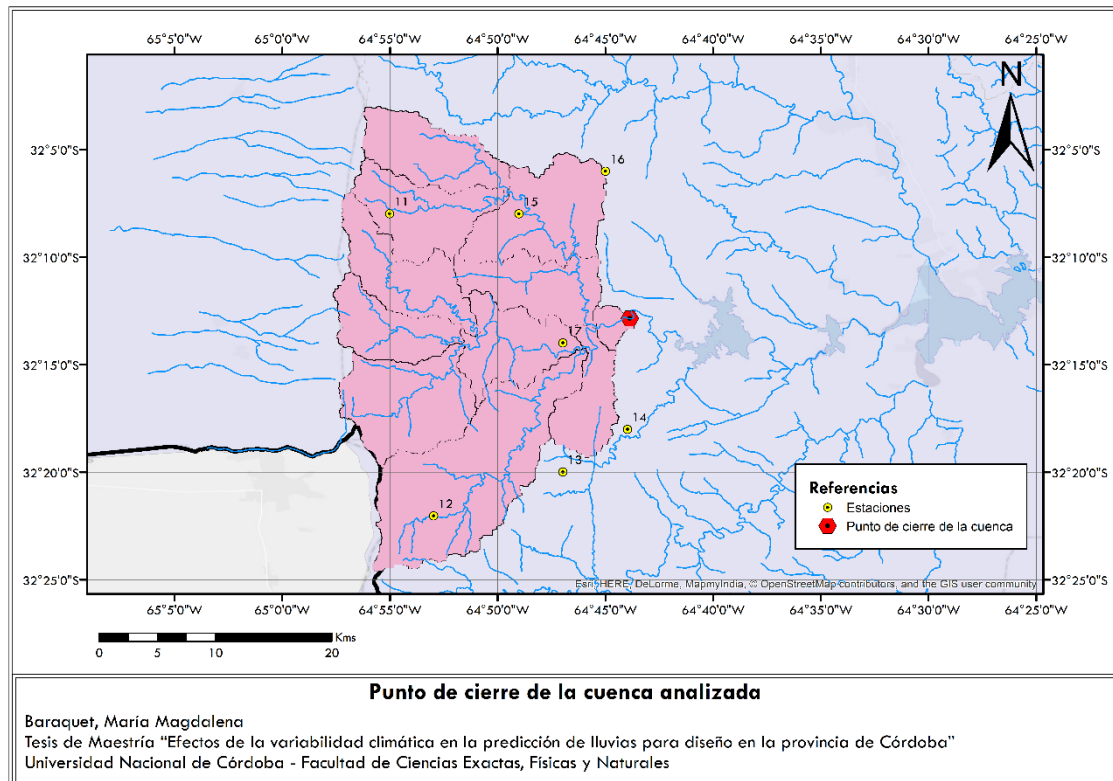


Figura 52: Punto de cierre de la cuenca de estudio para el caso de DHSE.

La estación pluviográfica de La Suela se seleccionó debido a que la cuenca de estudio se encuentra dentro de la zona de influencia de este pluviógrafo (Caamaño y Daaso; 2003).

Para la selección de la estación pluviométrica satélite, en primer lugar, en la Figura 52 se observa que las estaciones que forman parte de la zona de estudio son las siguientes:

- Estación 11: Grande – Cerro Blanco
- Estación 12: Grande – El Manzano
- Estación 13: Grande – La Puente
- Estación 14: Grande – Lutti
- Estación 15: Grande – Pampichuela
- Estación 16: Grande – Yacanto
- Estación 17: El Durazno – La Florida

Si bien las estaciones 13 y 14 no se encuentran dentro de la cuenca, se toman como parte de la zona de estudio por su proximidad a la misma. De estas 7 estaciones, 3 no presentaron tendencia en ninguna de las variables analizadas (estaciones 13, 15 y 16). De estas tres, la más cercana al punto de cierre es la estación 15, pero debido a que la que cuenta con mayor longitud de serie es la estación 13 se decidió elegir esta estación para aplicar el Modelo DIT.

A continuación, en la Tabla 21 se muestra la idT estimada.

Tabla 21: Curva idT para la cuenca analizada para el caso de DHSE.

T [años]	2	5	10	20	25	50	100
d [min]	i [mm/h]						
5	132.06	162.76	181.86	199.30	204.67	220.82	236.34
10	103.26	127.27	142.20	155.83	160.03	172.66	184.80
15	87.13	107.38	119.98	131.49	135.03	145.69	155.92
20	76.40	94.16	105.21	115.29	118.40	127.74	136.72
30	62.55	77.09	86.14	94.40	96.94	104.59	111.94
45	50.37	62.09	69.37	76.02	78.07	84.23	90.15
60	42.78	52.73	58.92	64.57	66.31	71.54	76.57
120	27.96	34.46	38.50	42.20	43.33	46.75	50.04
180	21.37	26.33	29.42	32.24	33.11	35.73	38.24
240	17.50	21.57	24.10	26.41	27.12	29.26	31.32
300	14.92	18.38	20.54	22.51	23.12	24.94	26.70
360	13.05	16.08	17.97	19.70	20.23	21.82	23.36
420	11.63	14.34	16.02	17.55	18.03	19.45	20.82
540	9.60	11.83	13.22	14.49	14.88	16.05	17.18
720	7.66	9.44	10.54	11.55	11.87	12.80	13.70
1440	4.32	5.33	5.95	6.52	6.70	7.22	7.73

Atenuación espacial de la lámina de lluvia

Luego de obtener la idT en el punto de cierre de la cuenca en estudio debe realizarse la atenuación espacial de la lámina de lluvia para obtener la precipitación media areal de la cuenca. Para realizar esto se utilizó el algoritmo de atenuación espacial denominado CoDA, el cual fue desarrollado y calibrado (García et al., 2000; Catalini et al., 2002; Catalini y Caamaño Nelli, 2003) en la cuenca serrana del Río San Antonio de 500 Km², tras el ensayo de distintos tipos de funciones que ligan el coeficiente de decaimiento areal, con el área y la duración de la lluvia.

Si se denomina P_0 a la lámina de lluvia futura en la estación núcleo (predicha con la función idT), \widehat{CDA} indica la porción genérica de P_0 a emplear como Precipitación Media Areal estimada \widehat{PMA} , al predecir la creciente de proyecto. De donde resulta:

$$\widehat{PMA} = P_0 \times \widehat{CDA} \quad (31)$$

Luego:

$$CDA = 100 \cdot \left[25^{2.1438 \cdot d^{-0.4774}} \cdot A^{-2.1438 \cdot d^{-0.4774}} \right] \quad (32)$$

Distribución temporal de la lámina de lluvia

La intensidad de la lluvia presenta gran variabilidad durante la secuencia temporal de una tormenta. Conocer esa distribución en tormentas intensas es muy importante en

temas hidrológicos tales como escorrentía potencial, erosión de los suelos y física de las lluvias. Constituye, además, el dato esencial de entrada a los modelos lluvia escorrentía. Como la distribución temporal de la lámina de lluvia cambia de una tormenta a otra, para caracterizarla se requiere gran cantidad de registros pluviográficos, de donde se puedan deducir patrones de comportamiento que permitan su análisis o su uso posterior. La representación gráfica, continua o discreta, de cada uno de esos patrones, se denomina hietograma tipo. (Caamaño y Daaso, 2003).

Los métodos que se utilizan para determinar hietogramas tipo pueden partir de distribuciones patrón, de la función idT o de series históricas de lluvias intensas. Este último caso, involucra una serie de decisiones y acciones metodológicas, antes y durante la síntesis de los eventos.

En este caso se adoptó el método de Bloque Alternado para obtener la distribución temporal de la lluvia. En este método es necesario definir previamente la posición del pico, esto se obtuvo de un estudio realizado para la localidad de La Suela (Catalini et al, 2011) en el que se compararon distribuciones temporales realizadas a partir de series históricas de lluvias intensas (Método de Pilgrim y Método de Huff)

En este último estudio se observó (Figura 53) que el pico de las tormentas para una duración crítica igual a 6 horas como es en este caso ocurría en el segundo (Método de Huff) o en el tercer (Método de Pilgrim) sextil. Teniendo en cuenta que el error absoluto es menor al aplicar el método de Huff (Tabla 22) se adoptó un coeficiente de avance igual a 0.33.

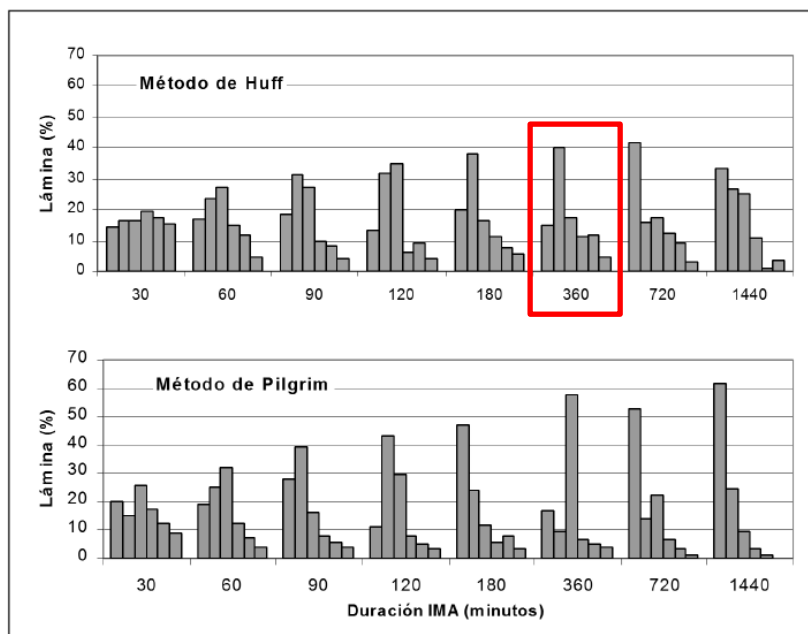


Figura 53: Hietogramas tipo para intervalos de IMA en La Suela.

Tabla 22: Errores entre los picos de las distribuciones.

Evento Severo	Técnica de Huff			Técnica de Pilgrim		
	Sextil pico	% de lámina en el pico	Error absoluto	Sextil pico	% de lámina en el pico	Error absoluto
IMA 0.5 h	4	19.6		3	26	
TI 0.5 a 1 h	4	26.5	-2.95	2	33	-3.95
IMA 1 h	3	27.5		3	32.1	
TI 1 a 2 h	2	36	-4.75	2	48	-10.5
IMA 2 h	3	35		2	42.9	
TI 2 a 3 h	3	24.5	12.15	1	50	-5
IMA 3 h	2	38.3		1	47.1	
TI 3 a 6 h	1	38	1.15	1	48	4.4
IMA 6 h	2	40		3	57.7	
TI > a 6 h	2	33.3	7.55	3	43	12.3
IMA 12 h	1	41.7		1	52.9	
TI > a 6 h	2	33.3	0.9	3	43	14.25
IMA 24 h	2	26.7		1	61.6	

VI. Simulación hidrológica.

A continuación, en la Figura 54 se muestra la cuenca modelada en HEC-HMS.

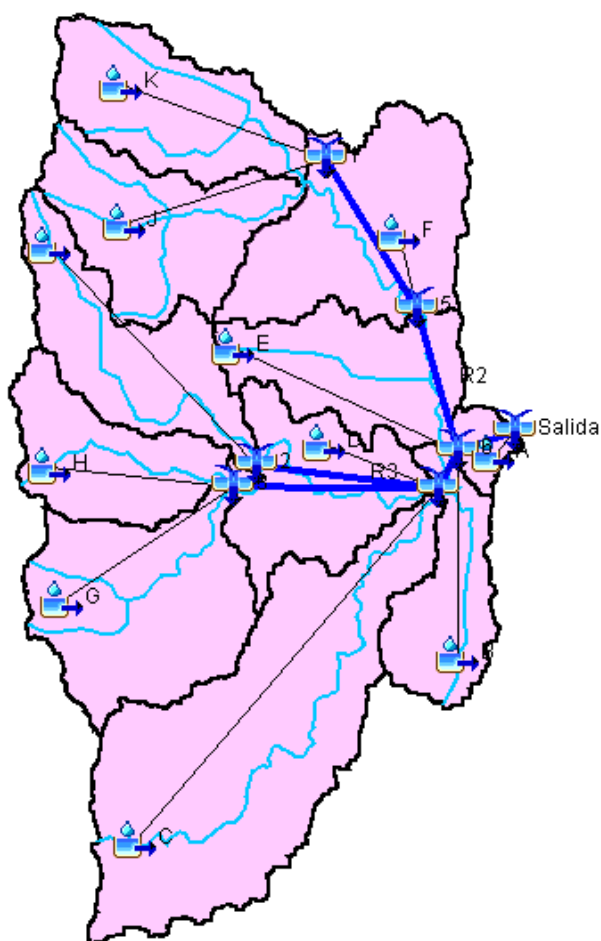


Figura 54: Cuenca modelada en HEC-HMS.

VII. Resultados de la simulación

Una vez calibrado el modelo se procedió a simular eventos de diseño para una duración igual a la duración crítica de la lluvia y para diferentes períodos de retorno, obtenidos a través de la curva idT definida en el punto V. Los hidrogramas resultantes para los diferentes períodos de retorno se muestran en la Figura 55.

Cabe aclarar que, en este caso, al existir una serie histórica de caudales máximos instantáneos en el punto de cierre de la cuenca no sería necesario definir lluvias de diseño, y podrían obtenerse los caudales para los diferentes períodos de retorno mediante la aplicación del análisis de frecuencia a la serie histórica de Caudales Máximos Instantáneos (QMI). A pesar de esto, se decidió implementar la metodología completa dado que en la mayoría de los casos no se cuenta con información histórica de caudales.

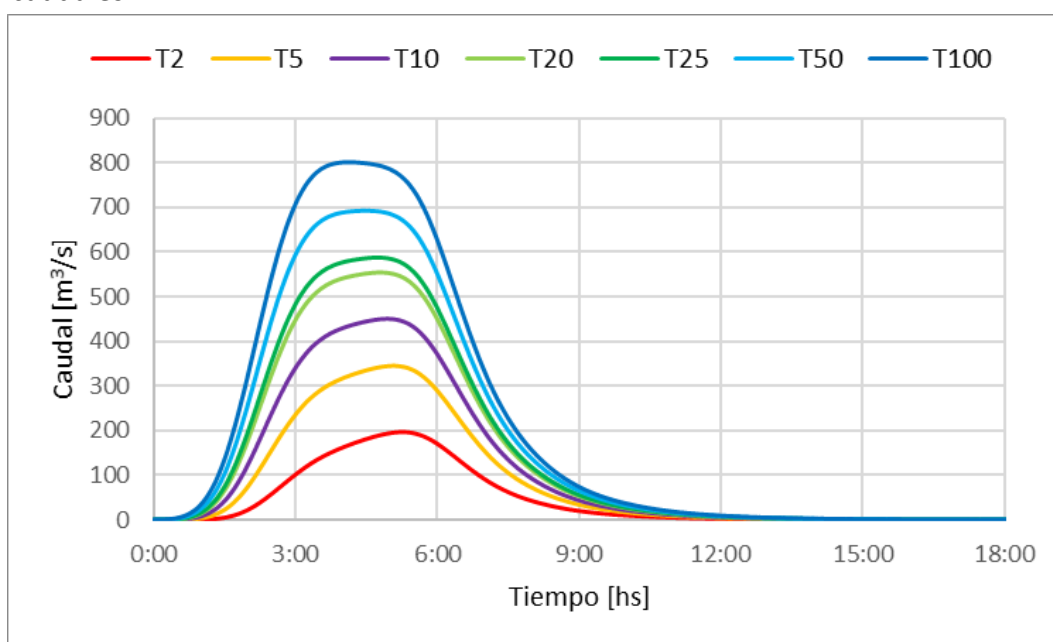


Figura 55: Hidrogramas obtenidos de la modelación hidrológica para diferentes períodos de retorno para el caso de DHSE.

VIII. Conclusiones y recomendaciones

Siempre que se cuente con información histórica de Caudales Máximos Instantáneos (QMI) en el punto de cierre de la cuenca la metodología a aplicar sería realizar un análisis de frecuencia sobre esa serie de caudales de manera tal de obtener como resultado curvas Caudal Vs. Período de retorno (Q-T). A su vez, si se contara con información histórica de QMI en una cuenca homogénea a la cuenca de estudio podría aplicarse una regionalización de caudales que permita obtener información en el punto de cierre de la cuenca en estudio.

En muchos puntos de nuestro país, la información de QMI no existe o es escasa; por lo que la metodología a aplicar es la de generar un modelo de transformación lluvia

caudal; en los cuales es fundamental definir eventos hipotéticos denominados “Lluvias de diseño” de manera tal de aplicar dicho modelo y que permita obtener como resultado valores de caudal para diferentes períodos de retorno. Esta es la metodología que se aplicó anteriormente.

6.2. Diseño hidrológico para series no estacionarias (DHSNE).

A continuación, se presenta en forma sintética la metodología propuesta a aplicar para el caso de diseño hidrológico mediante un modelo de transformación lluvia caudal cuando se cuenta con series *no estacionarias* de Precipitación Máxima Diaria Anual y/o Días Lluviosos al Mes, Días Lluviosos al Año y/o Días Consecutivos con Lluvia.

6.2.1. Caso de Precipitación Máxima Diaria Anual con tendencia.

En las estaciones analizadas para la provincia de Córdoba no se encontraron casos de series de Precipitación Máxima Diaria Anual con tendencia, por lo tanto, para analizar este caso, se tomó una estación de la provincia de Salta (Rudolf, 2017) en la que se detectó una tendencia positiva. La estación seleccionada corresponde a Iruya-Poscaya (Latitud: -22.46; Longitud: -65.08) cuya localización se muestra en la Figura 56.

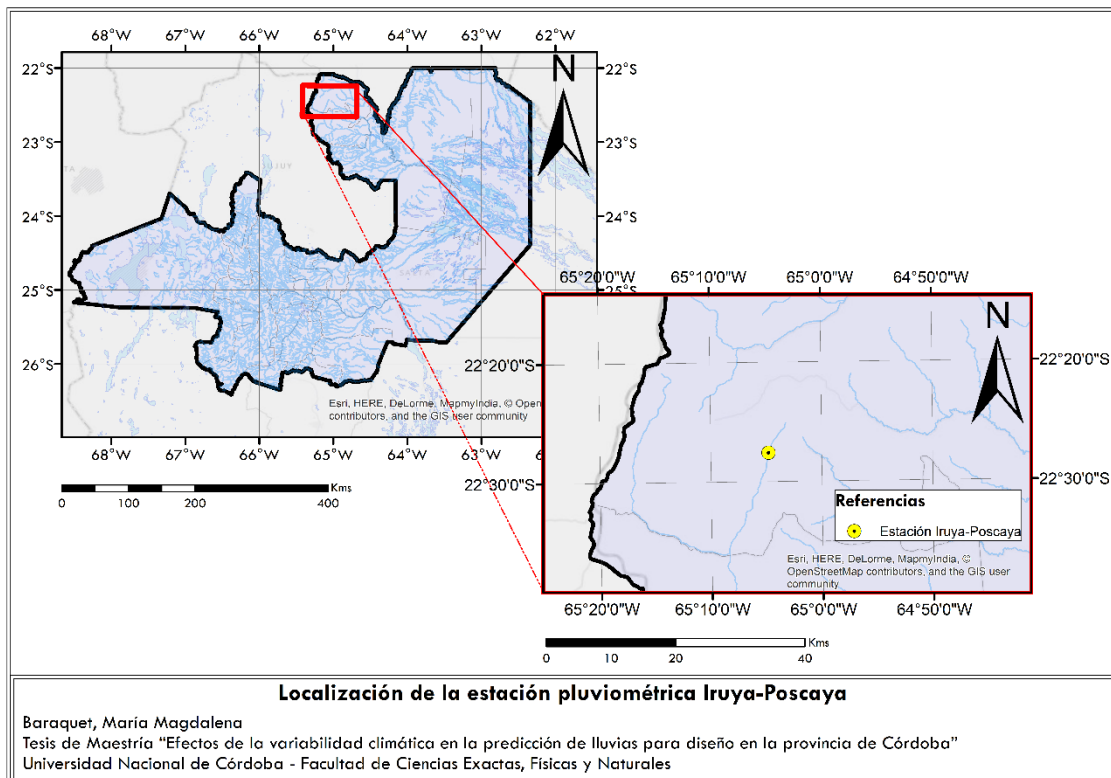


Figura 56: Localización de la estación pluviométrica Iruya-Poscaya.

La serie hidrológica de precipitaciones máximas diarias anuales analizada es la que se muestra en la Figura 57.

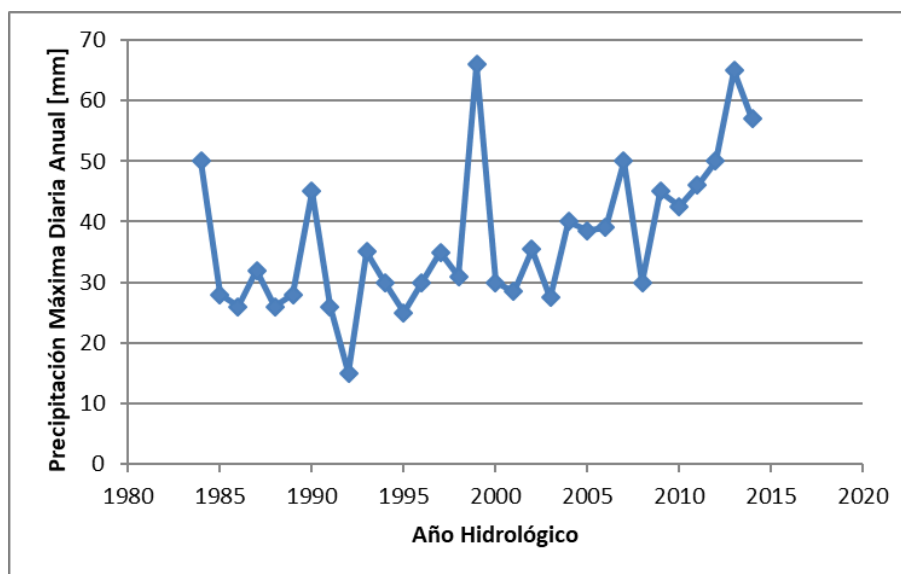


Figura 57: Serie de precipitaciones máximas diarias anuales, Iruya Poscaya.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 15 en el año 1992 y un máximo de 66 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 37 mm y posee un desvío estándar de 12 mm.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie se encontró un dato atípico correspondiente a 15 mm en el año 1992. Este último dato fue eliminado de la serie y se aplicó nuevamente el test el cual no arrojó ningún otro dato atípico. En base a esto último, la serie que finalmente fue analizada contaba 30 datos, con un mínimo de 25 mm en el año 1995 y un máximo de 66 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 38 mm y posee un desvío estándar de 12 mm. Por otro lado, se verificó la hipótesis de independencia, pero no se verificaron las hipótesis de estacionariedad y homogeneidad.

Luego de que la serie rechazara el test de Mann-Kendall, se sometió a la misma a la prueba de Mann-Kendall modificada y a la técnica de pre-blanqueo de manera tal de verificar si la no estacionariedad arrojada por Mann-Kendall era correcta. Tanto la prueba de Mann-Kendall modificada como la técnica de pre-blanqueo indicaron que existe una tendencia en la serie analizada, por lo tanto, se procedió a realizar el análisis de serie no estacionaria mediante la utilización del Software NEVA.

En la Figura 58 se muestra la variación del valor medio de la variable para diferentes períodos de retorno a medida que pasa el tiempo, resultado que se obtiene al realizar el análisis no estacionario de la serie.

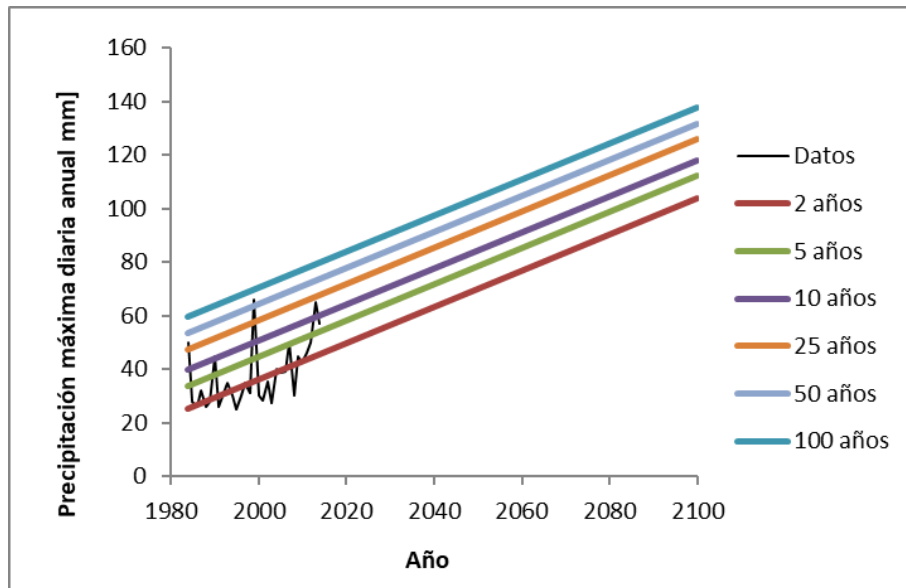


Figura 58: Valores de probabilidad para series no estacionarias de la precipitación máxima diaria anual, Iruya Poscaya.

En la Figura 58 se observa con una línea negra la serie de precipitaciones máximas diarias anuales desde el año 1984 hasta el año 2014 (registro muestreado). Además, se presenta la variación temporal del valor medio asociado a diferentes períodos de retorno para los diferentes horizontes de tiempo. Por ejemplo, un valor de 50 mm tenía un período de retorno de 25 años en el año 1985; mientras que en el año 2010 la recurrencia de este valor bajó a 5 años.

A continuación, en la Figura 59 se muestra para 3 horizontes de tiempo fijos (2017, 2057 y 2100) la relación entre la variable analizada y el tiempo de retorno con su respectivo intervalo de confianza en cada uno de los casos.

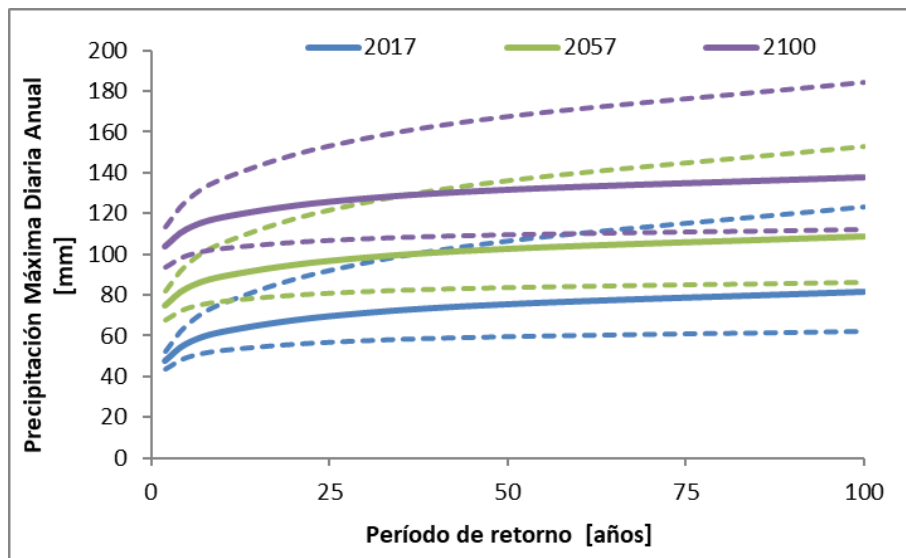


Figura 59: Comparación de periodos de retorno de la precipitación máxima diaria anual, Iruya Poscaya.

De la última figura se puede ver que en la actualidad (año 2017) para un período de retorno de 50 años se asocia un valor de precipitación máxima diaria anual medio de 76 mm, mientras que para el año 2057 se espera que este valor aumente a 103 mm y para el año 2100 llegue a 132 mm. Es decir, para un mismo período de retorno el valor de precipitación máxima diaria anual aumenta a medida que el horizonte de tiempo crece.

A continuación, se presenta la metodología propuesta a aplicar para el caso de diseño hidrológico con series no estacionarias de precipitaciones máximas registradas. Se plantea una metodología similar al caso al caso de series estacionarias, con una modificación en lo relativo a la definición de las lluvias de diseño.

- I. *Delimitación de cuenca.*
- II. *Determinación de parámetros morfométricos de la cuenca.*
- III. *Determinación de parámetros hidrológicos del modelo.*
- IV. *Calibración de parámetros hidrológicos.*
- V. *Lluvia de diseño:* en este caso se definirán dos lluvias de diseño, una para dimensionar la obra y otra para verificarla. La diferencia con el caso de series estacionarias es que se define una lluvia de diseño asociada a la recurrencia establecida según el tipo de obra para el horizonte de tiempo actual ($h_{d,T-2017}$) y otra asociada a la misma recurrencia, pero para un horizonte de tiempo igual al año en que finaliza la vida útil de la obra ($h_{d,T-2017+n}$). El objetivo de lo propuesto es usar $h_{d,T-2017}$ como valor de diseño y $h_{d,T-2017+n}$ como valor de verificación de la obra. De esa manera se verificaría el funcionamiento de esta durante toda su vida útil.
- VI. *Simulación hidrológica.*
- VII. *Resultados de la simulación.*
- VIII. *Conclusiones y recomendaciones.*

Para detallar la metodología propuesta se presenta un ejemplo correspondiente a la estación Iruya - Poscaya presentada anteriormente.

I. *Delimitación de cuencas.*

La delimitación de la cuenca se realizó utilizando las mismas herramientas que para el caso de Diseño hidrológico para series estacionarias (DHSE). La cuenca de aporte se presenta en la Figura 60.

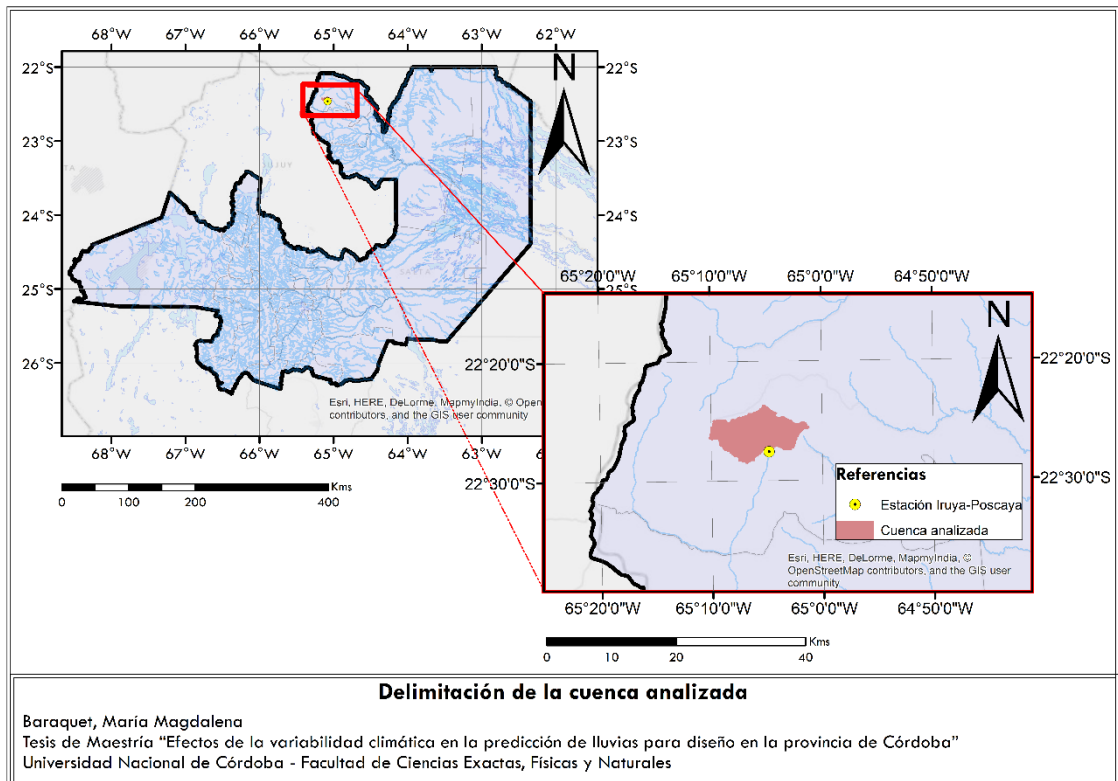


Figura 60: Localización de la cuenca analizada para el caso de DHSNE.

A continuación, en la Figura 61, se muestran cada una de las subcuencas definidas en la cuenca analizada.

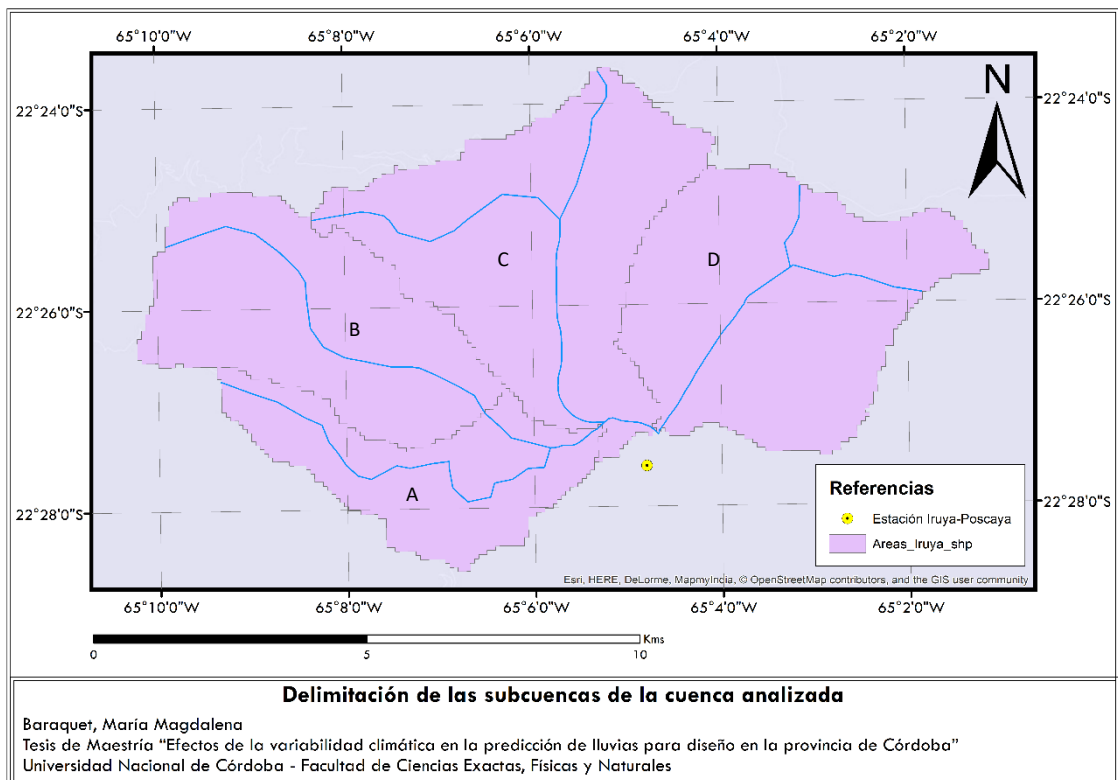


Figura 61: Delimitación de las subcuencas de la cuenca analizada para el caso de DHSNE.

II. Determinación de parámetros morfométricos

En este punto también se utilizaron las mismas herramientas que para el caso de Diseño hidrológico para series estacionarias (DHSE). Los parámetros principales de las subcuencas se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23: Parámetros morfométricos de cada una de las subcuencas de la cuenca analizada y de la cuenca en su conjunto para el caso de DHSNE.

Subcuencas	Área (Km ²)	Longitudes (Km)		S (m/m)
		Flujo en cauce	Flujo en lámina	
A	11.86	Flujo en cauce	6.90	0.142
		Flujo en lámina	2.10	0.138
B	18.22	Flujo en cauce	6.32	0.138
		Flujo en lámina	1.29	0.232
C	24.45	Flujo en cauce	9.59	0.122
		Flujo en lámina	0.98	0.262
D	23.00	Flujo en cauce	4.99	0.182
		Flujo en lámina	1.47	0.201

III. Determinación de parámetros hidrológicos.

Los parámetros hidrológicos se determinaron siguiendo la misma metodología que para el caso de Diseño hidrológico para series estacionarias (DHSE). A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este caso.

Método de las abstracciones del Servicio de Conservación de Suelos (SCS)

➤ Tipo de suelo.

Al igual que en la cuenca analizada anteriormente, para definir los tipos de suelo se utilizaron los mapas de suelo del INTA. En la Figura 63 se presentan los tipos de suelo en la zona de estudio.

Se observa que el principal tipo de suelo en la zona es ENli-6, cuyas características son: suelo desnudo en más del 50%, signos de erosión y vegetación degradada por sobreuso. Textura gruesa, baja retención de agua y baja fertilidad natural.

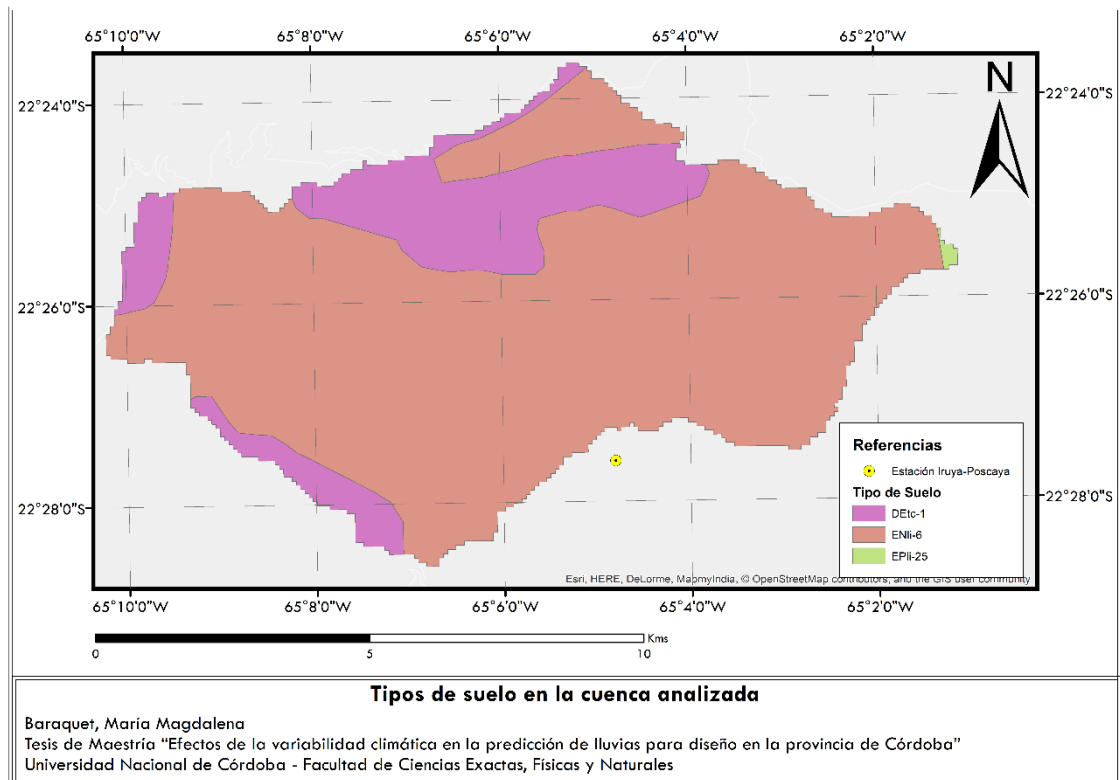


Figura 62: Tipos de suelo en la cuenca analizada para el caso de DHSNE.

➤ Uso de suelo.

Para el uso del suelo se realizó un análisis de imágenes satelitales del terreno. En la Figura 63 se presentan los usos de suelo en la zona de estudio.

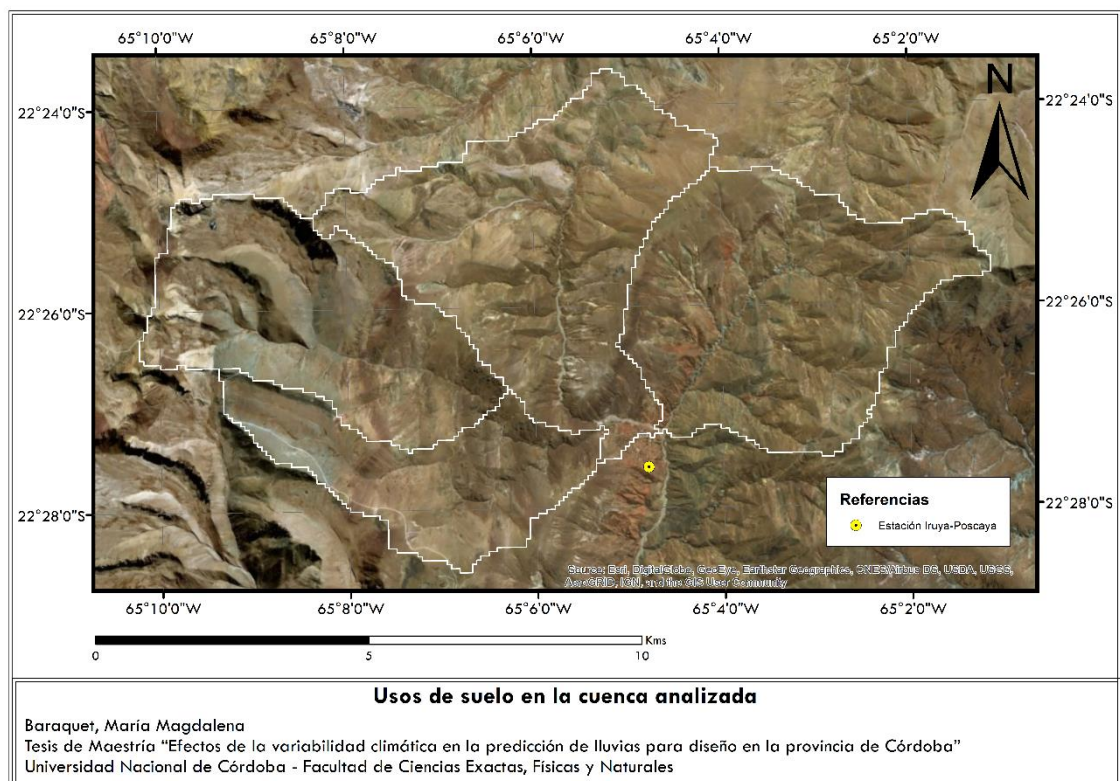


Figura 63: Usos de suelo en la cuenca analizada para el caso de DHSNE.

Al analizar la figura, se observa en la cuenca principalmente un solo uso de suelo: Pastizales (medio).

A partir del uso y tipo de suelo, los valores estimados de CN de cada una de las subcuencas se presentan en la Tabla 24. Vale aclarar que, a priori, las subcuencas se modelaron con condición de humedad antecedente intermedia.

Tabla 24: Valores del Número de Curva (CN) de las subcuencas pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSNE.

Subcuencas	Uso de suelo	Tipo de suelo	Tipo de suelo
A	Combinación de bosque con césped (medio)	B	70
B	Pastizales (medio)	B	70
C	Pastizales (medio)	B	70
D	Pastizales (medio)	B	70

Modelo de transformación lluvia-caudal

Para el caso analizado los valores de PRF estimados fueron del orden de 800 para todas las subcuencas.

Por otro lado, los valores estimados de T_c y t_p se presentan en la Tabla 25 y en la Tabla 26.

Tabla 25: Tiempos de concentración y tiempos de retardo para cada una de las subcuencas pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSNE.

Subcuencas	T_c (min)	t_p (min)
A	91	54
B	73	44
C	83	50
D	68	41

Tabla 26: Tiempos de concentración y tiempos de retardo para la cuenca analizada para el caso de DHSNE.

Cuenca	T_c (min)	t_{lag} (min)
	116	69

Modelo de tránsito

Los parámetros utilizados para la aplicación de método de Muskingum se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27: Parámetros del método de Muskingum para cada uno de los tránsitos pertenecientes a la cuenca analizada para el caso de DHSNE.

Tránsito	K (hr)	X
R1	0.083	0.3
R2	0.050	0.3

IV. Calibración de parámetros hidrológicos.

Debido a que no se contaba con información de caudales en el punto de cierre de la cuenca, los valores de CN se estimaron en base al uso y al tipo de suelo presente en la cuenca como se muestra en el punto anterior.

V. Lluvia de diseño.

Cálculo de la duración de la tormenta crítica sobre la cuenca

En primer lugar, como en el caso de Diseño hidrológico para series estacionarias, se construyó la Curva S. De la Figura 64 se puede observar que la duración crítica está, aproximadamente, entre 2 y 3 horas.

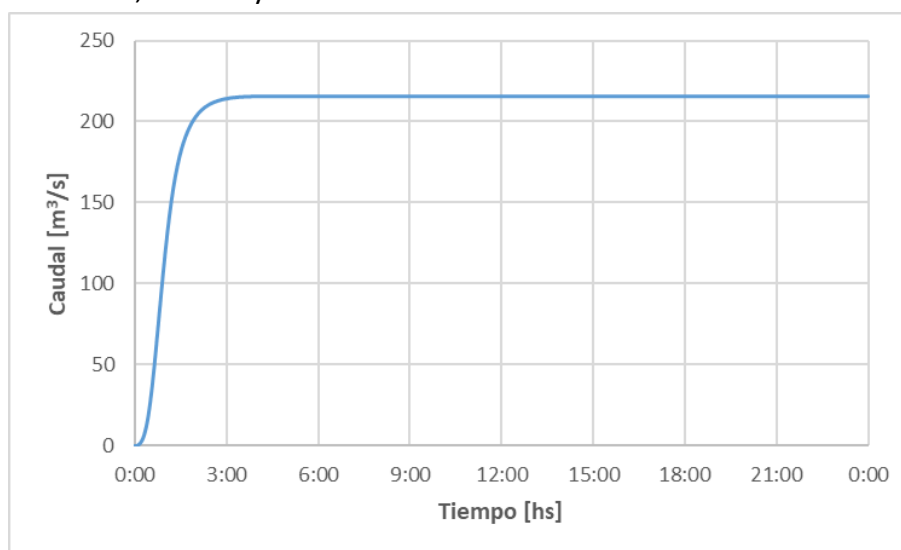


Figura 64: Curva S para una lluvia constante en el tiempo y sin pérdidas para el caso de DHSNE.

Luego, al igual que en el Diseño hidrológico para series estacionarias, se analizó la relación entre los caudales picos y las duraciones de diferentes lluvias, para poder encontrar cual es la duración que genera el máximo escurrimiento en la cuenca. Para poder analizar esto, se definió una distribución temporal de a partir de la distribución patrón de Huff con pico en el 2º cuartil. En este caso se analizaron duraciones de lluvia de 1, 2, 3 y 4 horas para una recurrencia de 50 años, utilizando para cada una de las subcuencas la serie de valores de CN que se definió anteriormente.

Al graficar los hidrogramas generados se obtienen los resultados mostrados en la **Figura 65**.

La duración para la cual se genera el máximo escurrimiento en la cuenca es la duración de la tormenta crítica. Lo que de estas simulaciones se deduce es que la duración crítica es de 2 horas. Por lo tanto, finalmente se adopta como *duración crítica 2 horas*. Este valor resultó similar al tiempo de concentración de la cuenca, el cual es de aproximadamente 116 minutos (2 horas).

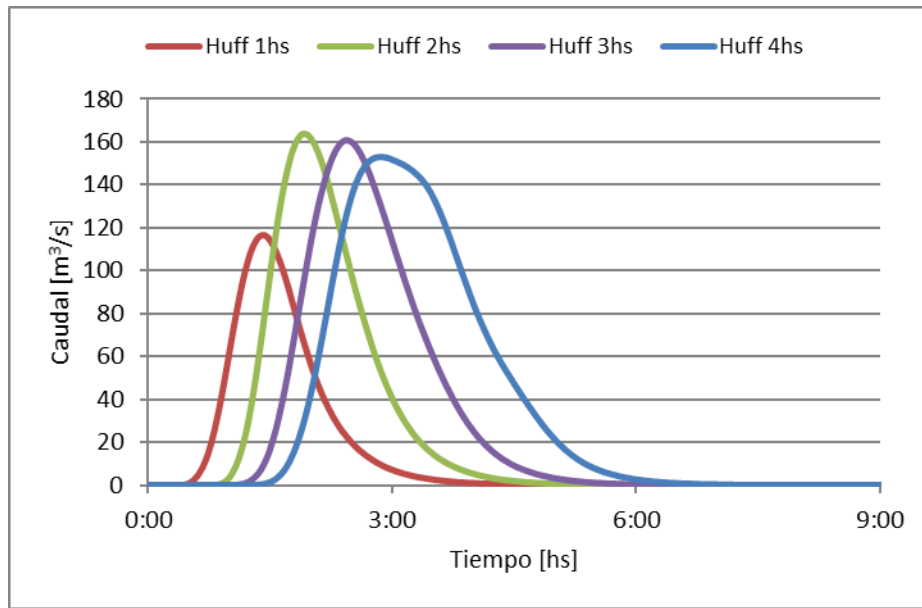


Figura 65: Hidrogramas generados para diferentes duraciones de lluvia para el caso de DHSNE.

Cálculo de la curva IDT

Para la definición de la curva idT se utilizó la metodología basada en la relación entre láminas, en la cual:

$$h_{d,T} = R \cdot r_{d,T} \cdot h_{1día,T} \quad (33)$$

Donde $h_{d,T}$ es la lámina de lluvia caída en una duración d ; R es la relación entre la lámina de lluvia caída en 24 horas consecutivas respecto a la diaria (medida con pluviómetro); $r_{d,T}$ es la relación entre la lámina de lluvia caída en una duración d respecto a la de 24 horas consecutivas; y $h_{1día,T}$ es la lámina de lluvia diaria (medida con pluviómetro) para una recurrencia de T años.

Aplicando las relaciones entre láminas (R y $r_{d,T}$) estimadas para la zona de estudio (Guillén, 2015) y teniendo en cuenta que la lámina de lluvia para una recurrencia dada cambiará en función del horizonte de tiempo (Figura 59), se plantea la siguiente metodología para la estimación de la lluvia de diseño:

1. En primer lugar, se define el valor de la vida útil de la obra (n) y el período de retorno asociado al tipo de obra que se quiere diseñar (T). En este caso ejemplo se adopta $n = 40$ años y $T = 50$ años.
2. De la Figura 59 se obtiene la lámina de lluvia asociada a la recurrencia buscada (50 años en este caso) para el horizonte de tiempo actual (año 2017) y la lámina de lluvia asociada a la misma recurrencia, pero para un horizonte de tiempo

igual al año en que finaliza la vida útil de la obra (año 2057, en este caso). Los valores de las mismas resultaron de 76 y 103 mm respectivamente.

- Para obtener la lámina de lluvia asociada al tiempo de concentración de la cuenca (120 minutos) se utiliza la metodología de relación entre láminas explicada anteriormente, de la cual se obtiene una lámina de 62 mm para el horizonte de tiempo actual y de 83 mm para el horizonte de tiempo igual al año en que finaliza la vida útil de la obra.

Atenuación espacial de la lámina de lluvia

Luego de obtener las láminas de lluvia asociadas a una duración y período de retorno para los dos horizontes de tiempo planteados, debe realizarse la atenuación espacial de la misma para obtener la precipitación media areal de la cuenca. Para realizar esto se aplicó la misma metodología que en el caso de Diseño hidrológico para series estacionarias utilizando el CDA propuesto por Catalini.

$$CDA = 100 \cdot [25^{2.1438 \cdot d^{-0.4774}} \cdot A^{-2.1438 \cdot d^{-0.4774}}] \quad (34)$$

Los resultados que se obtienen se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28: Lámina de lluvia diaria asociada al período de retorno de la obra en cuestión para la actualidad y para el final de la vida útil de dicha obra.

Lamina atenuada (mm)			
2017	47.7	2057	64.7

Distribución temporal de la lámina de lluvia

En cuanto a la distribución temporal de la lámina de lluvia se adoptó el método de Bloque Alternado con pico al 33%. Se adoptó este coeficiente de avance dado que para Salta se realizó un análisis de datos pluviográficos y se obtuvo un coeficiente de avance de 33% (Guillén, 2015). Los hietogramas obtenidos se muestran en la Figura 66.

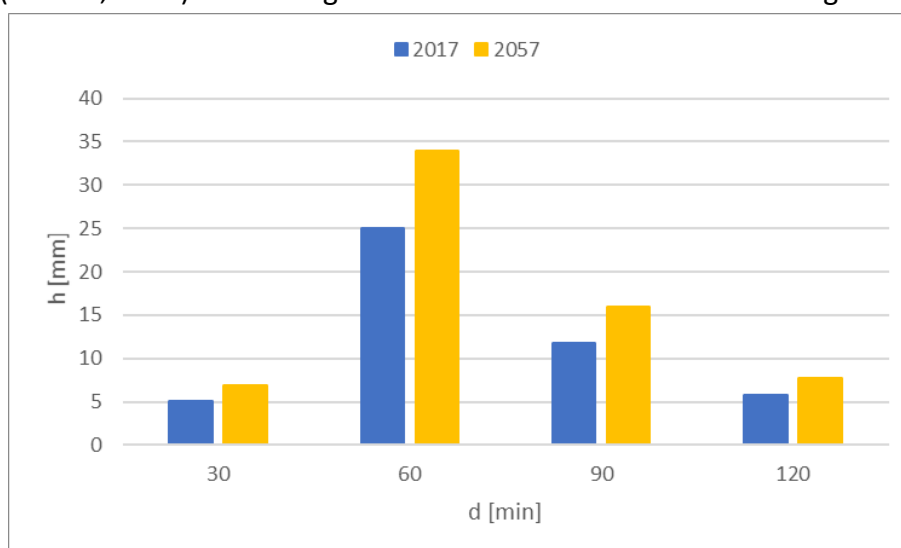


Figura 66: Hietogramas obtenidos para las lluvias de diseño definidas para los años 2017 y 2057.

VI. Simulación hidrológica

A continuación, en la Figura 67, se muestra la cuenca modelada en HEC-HMS.

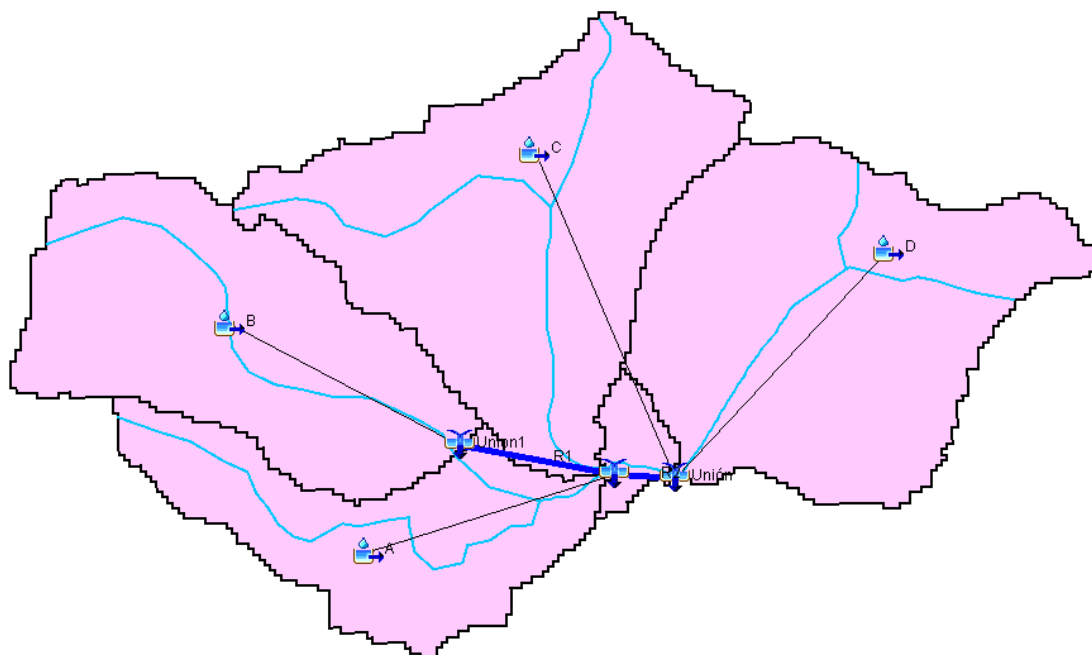


Figura 67: Cuenca modelada en HEC-HMS para el caso de DHSNE.

VII. Resultados de la simulación

Lo hidrogramas obtenidos para las láminas de lluvia asociadas a un período de retorno de 50 años para la actualidad (año 2017) y para el final de la vida útil de la obra se muestra en la Figura 68.

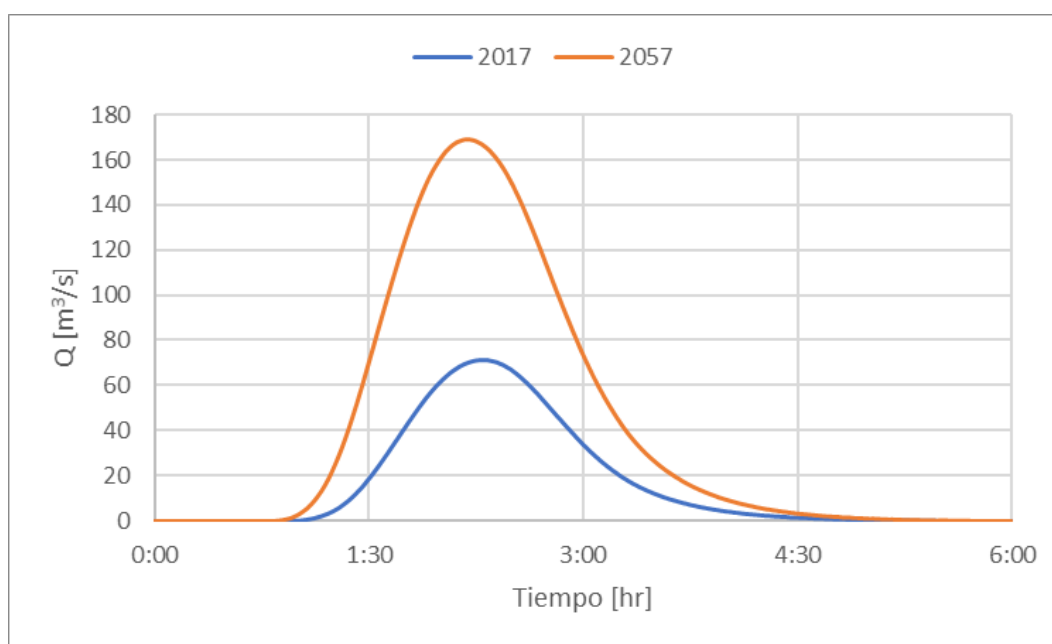


Figura 68: Comparación entre los resultados de las simulaciones para el horizonte de tiempo actual y el futuro.

El pico del hidrograma obtenido para el año 2017 es de $71 \text{ m}^3/\text{s}$ y se produce aproximadamente a las dos horas de iniciada la lluvia, además el volumen del hidrograma resulta de $359\,200 \text{ m}^3$. Por otro lado, para el año 2057 el pico del hidrograma es de $169 \text{ m}^3/\text{s}$ y se produce, al igual que el caso anterior, aproximadamente a las dos horas de iniciada la lluvia, en cuanto al volumen del hidrograma el mismo resultó ser de $893\,300 \text{ m}^3$.

Comparando los dos hidrogramas obtenidos, puede verse que el caudal aumenta en el orden de un 140% y el volumen escurrido en un 150%, pero el tiempo al pico se mantiene en dos horas desde iniciada la lluvia.

En síntesis, debería dimensionarse la obra en cuestión para un caudal de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ y verificarse la misma para $170 \text{ m}^3/\text{s}$. En caso de ser necesaria una obra de regulación de volúmenes excedentes (por ejemplo, una laguna de retención), la misma debería dimensionarse no sólo con el caudal pico sino también con el hidrograma completo actual (2017) y verificarse con el obtenido para el año 2057.

VIII. Conclusiones y recomendaciones.

La metodología empleada para este caso se presenta como una propuesta sujeta a las modificaciones que se crean necesarias.

Es necesario remarcar que sería de suma importancia contar con algún dato de caudal observado de manera tal de verificar los valores de CN estimados en base al uso y al tipo de suelo.

Finalmente, se propone, para el caso que el dimensionamiento de la obra no verifique a futuro, realizar un análisis económico en relación a cuándo debería realizarse la ampliación de la obra, es decir, si resulta conveniente construirla en un principio con el diseño a futuro, o si resulta mejor realizar una ampliación parcial de la misma a medida que transcurre el tiempo.

6.2.2. Caso de días lluviosos al mes, días lluviosos al año y/o días consecutivos con lluvia con tendencia.

En las estaciones analizadas para la provincia de Córdoba se encontraron 5 casos (ver Tabla 13) en los que se observaba tendencia en alguna de las siguientes variables: días lluviosos al mes, días lluviosos al año y días consecutivos con lluvia. En los casos en que se detecte tendencia en alguna de estas variables se propone la siguiente metodología para llevar a cabo el diseño hidrológico.

Si en la serie analizada (ya sea de días lluviosos al mes, días lluviosos al año y/o días consecutivos con lluvia) se verifica la existencia de tendencia se procede a analizar los valores máximos de la serie de Precipitaciones Máximas Diarias Anuales (dado que son los que influyen en el diseño hidrológico) de la siguiente manera: *se determina la cantidad de días lluviosos que hubo antes de uno de esos eventos máximos y cuánto fue la lámina caída en esos días previos, de manera tal de evaluar la condición de humedad antecedente del suelo.*

Del análisis de los eventos máximos previamente planteado, habría que preguntarse las siguientes cuestiones:

- De esos máximos, *¿cuántos ocurrieron en los últimos años?, de esos últimos eventos, ¿en cuántos de ellos han precipitado más de 40 mm en los 5 días previos al evento (condición de humedad antecedente III)?*
- En los últimos años, *¿se acrecentó la probabilidad de que antes de que ocurra un evento máximo lluevan en los 5 días previos más de 40 mm?*

En el caso en que en los últimos años hayan ocurrido los máximos eventos de la serie, que en ellos hayan precipitado más de 40 mm y que se haya incrementado la probabilidad de que antes de que ocurra un evento máximo lluevan más de 40 mm en los 5 días previos, se propone diseñar considerando *condición de humedad antecedente húmeda (III – ver Tabla 15).*

De las 5 estaciones que presentaron tendencia en alguna de las variables analizadas se adoptó como ejemplo la estación 17, El Durazno-La Florida (Latitud: -32.23; Longitud: -64.78 – ver Figura 11, Tabla 3), en la cual existe tendencia en la cantidad de días lluviosos al mes.

El análisis de esta estación se realizó en el punto 5.2. Los resultados obtenidos para la serie de días lluviosos al mes se muestran en la Figura 33 y en la Figura 34.

Según la metodología propuesta anteriormente, de la serie de Precipitaciones Máximas Diarias Anuales se analizaron 10 eventos máximos: cuándo ocurrieron, cuántos días previos llovió (analizando los 5 días antes de que ocurra el evento) y que altura de lámina precipitó. En función de la cantidad de días previos con lluvia y de la lámina caída se definió, en base a lo propuesto por Chow (Tabla 15), la condición de humedad antecedente del suelo. Los resultados se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29: Características de los 10 eventos máximos en la estación El Durazno-La Florida.

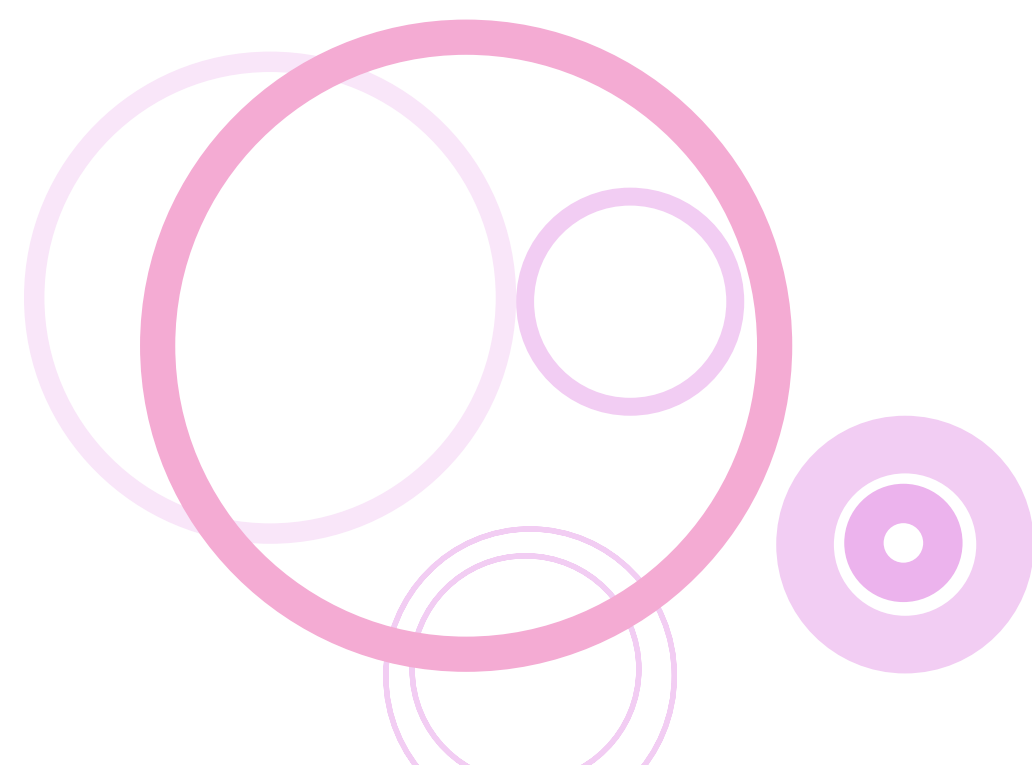
Valor Máximo	¿Cuándo ocurrió?	Cantidad de días previos con lluvia	¿Cuánto llovió? (mm)	T (años)	CN
178.3	01-12-99	0	0	80	I
178	17-02-66	1	8.5	80	I
168.5	06-01-84	1	16.5	50	I
145.1	16-02-98	0	0	20	I
144	28-12-77	1	18.3	20	I
142	14-02-14	1	30.5	18	II
139	10-11-93	0	0	17	I
135	15-02-80	1	3.5	14	I
109	08-03-16	1	17.5	5	I
102.5	15-02-79	2	10.9	4	I

En este análisis se puede ver que, de los 10 eventos analizados, sólo dos ocurrieron en los últimos 5 años (14-02-2014 y 08-03-2016) y en los mismos la condición de humedad antecedente resulta ser II y I respectivamente. Además, para ninguno de los eventos máximos se da condición de humedad antecedente III, por lo tanto, según la metodología plateada, no es necesario modelar la cuenca con CN III.

Si se hubiese dado que, de esos 10 eventos máximos, la mayoría ocurría en los últimos años, y además se verificaba que la condición de humedad antecedente era III, se hubiese propuesto modelar la cuenca con CN III.



Conclusiones



7. Capítulo 7: Conclusiones.

7.1. Aspectos técnicos.

En este trabajo se analizaron 25 estaciones pluviométricas existentes en la provincia de Córdoba y se evaluó la variabilidad climática en el territorio y sus efectos en la predicción de lluvias para diseño en la provincia.

Se logró profundizar en los conceptos de estadística hidrológica, principalmente en el análisis de series no estacionarias, teniendo en cuenta que esta temática resulta, en la actualidad, de gran interés, dado que aún no hay una metodología totalmente desarrollada y segura para estimar el clima futuro.

A partir de la recopilación de una muestra de estaciones pluviométricas en la provincia de Córdoba se consiguió analizar la evolución temporal de diferentes variables: Precipitación máxima diaria anual, Precipitación total anual, Días lluviosos al año, Días lluviosos al mes y Días consecutivos con lluvia, lo que permitió determinar la existencia de patrones que demuestren la presencia o no de variabilidad climática.

Se definió una metodología de análisis para series estacionarias (análisis clásico de datos) y una para series no estacionarias. Cuando se realiza estadística inferencial sobre una serie estacionaria, se relaciona la variable analizada con una recurrencia dada; es decir para cada tiempo de retorno el análisis arroja el valor de la variable con su respectivo intervalo de confianza. A diferencia del caso anterior, cuando se realiza estadística inferencial sobre una serie no estacionaria, se obtienen para diferentes horizontes de tiempo distintas relaciones entre la variable analizada y el período de retorno. Es decir, el análisis arroja para un tiempo de retorno, el valor de la variable con su respectivo intervalo de confianza, pero esta relación es cambiante para distintos horizontes de tiempo, lo que implica, que la recurrencia de un evento ya no es estática en el tiempo, sino que es una variable dinámica.

En total se analizaron 125 series (25 estaciones por 5 variables cada una), de las cuales, 112 fueron sometidas al análisis de estacionariedad (las demás fueron descartadas anteriormente por no haber cumplido con alguna de las otras pruebas estadísticas). De estas 112 series analizadas, sólo en 6 se detectó tendencia, ya sea positiva o negativa, a lo largo del tiempo. De estas 6 series, 2 pertenecen a la estación Grande-El Manzano, 2 a la estación El Durazno-La Florida, 1 a Grande-Cerro Blanco, y la última a Grande-Lutti.

En cuanto a las variables analizadas, de las 6 series en las que se detectó tendencia, 1 corresponde a Precipitación Total Anual (El Durazno-La Florida), 2 a Días Lluviosos al Año (Grande-El Manzano y Grande-Cerro Blanco), 2 a Días Lluviosos al Mes (Grande-Lutti y El Durazno-La Florida) y la última a Días Consecutivos con Lluvia (Grande-El Manzano). *En base a estos resultados, es importante destacar que, al no haberse detectado tendencia en series de Precipitación Máxima Diaria Anual (PMDA) las curvas idT definidas para la provincia de Córdoba siguen siendo válidas, además, la metodología a aplicar en el diseño hidrológico sería, entonces, la propuesta para el caso de series de PMDA estacionarias en el tiempo.*

En la serie de PTA de la estación El Durazno-La Florida se observó una tendencia positiva, es decir, los valores de PTA aumentarán a medida que transcurra el tiempo. Se observa un aumento anual de menos del 1%. Por otro lado, se prevé que el valor de 1680 mm que hoy tiene una recurrencia de 50 años, en el 2050 dicho valor aumente a 1815 mm.

Para la misma estación, en la variable DLLM se observó una tendencia positiva, con aumentos anuales también menores al 1%. Los resultados arrojaron un valor de 18 días lluviosos al mes para un período de retorno de 50 años en la actualidad, el cual aumentará a 20 días lluviosos al mes para el año 2050.

Para las estaciones Grande-El Manzano y Grande-Cerro Blanco se observó tendencia en la variable DLLA. En ambos casos la tendencia resultó negativa, es decir que los valores de DLLA disminuirían a medida que transcurra el tiempo. Se observan disminuciones anuales de entre el 1 y 2%. En la estación Grande-Cerro Blanco se obtuvo un valor de 69 días lluviosos al año para un período de retorno de 50 años, este valor se reduciría a 35 días lluviosos al año para el año 2050 (manteniéndose el período de retorno). Por otro lado, en la estación Grande-El Manzano para un período de retorno de 50 años, actualmente se tiene un valor de 76 días lluviosos al año, el cual se espera que disminuya a 53 días lluviosos al año en el año 2050.

La estación Grande-Lutti (al igual que la estación El Durazno-La Florida) presentó tendencia positiva en la serie de DLLM y también se observan aumentos anuales del orden del 1%.

Finalmente, la estación Grande-El Manzano también presentó tendencia negativa en la serie de DCcLL arrojando disminuciones del orden de entre 1 y 2.5% anual. Para un período de retorno de 50 años se observa una disminución de 7 días consecutivos con lluvia que se tienen actualmente, a 4 días consecutivos con lluvia que se esperan para el año 2050.

En relación al diseño hidrológico para series no estacionarias, lo que aquí se propone es una primera aproximación a una metodología que aún requiere un análisis más profundo y detallado.

7.2. Aspectos personales.

Las series históricas de variables climáticas (caudales, precipitaciones, temperaturas, etc.) son fundamentales para el desarrollo de la infraestructura del País, ya sea, para el diseño de medidas estructurales o no estructurales. Por lo que se destaca la importancia de realizar mediciones, que hoy en día, resultan cada vez menos dificultosas debido al desarrollo tecnológico de nuevas técnicas de medición.

Además, contar con series históricas de variables climáticas permitiría, con mayor precisión, detectar, si existiese, la presencia de efectos que pueden ser originados por cambios y/o variabilidad climática.

Es importante mencionar que en los últimos años en la provincia de Córdoba y en diferentes regiones de Argentina se han instalado numerosas estaciones pluviométricas de alta frecuencia (es decir, registran datos con un intervalo de tiempo corto del orden de minutos). Esto brindará información que permitirá iniciar un análisis para determinar los efectos de la variabilidad climática para duraciones diferentes a la diaria, lo que concederá la posibilidad de evaluar esos efectos en diferentes zonas de nuestro país.

Por último, es importante destacar que, ya sea por el cambio y/o la variabilidad climática o por los cambios globales que contribuyen al calentamiento global (uso de materiales modernos de construcción, incremento de la urbanización, reducción de la superficie de evaporación-transpiración, alteraciones en el uso del suelo, tala de bosques e incremento de la cantidad de brillo solar reflejado, etc.), el período de retorno de un evento ya no es una variable constante en el tiempo.

7.3. Perspectivas a futuro.

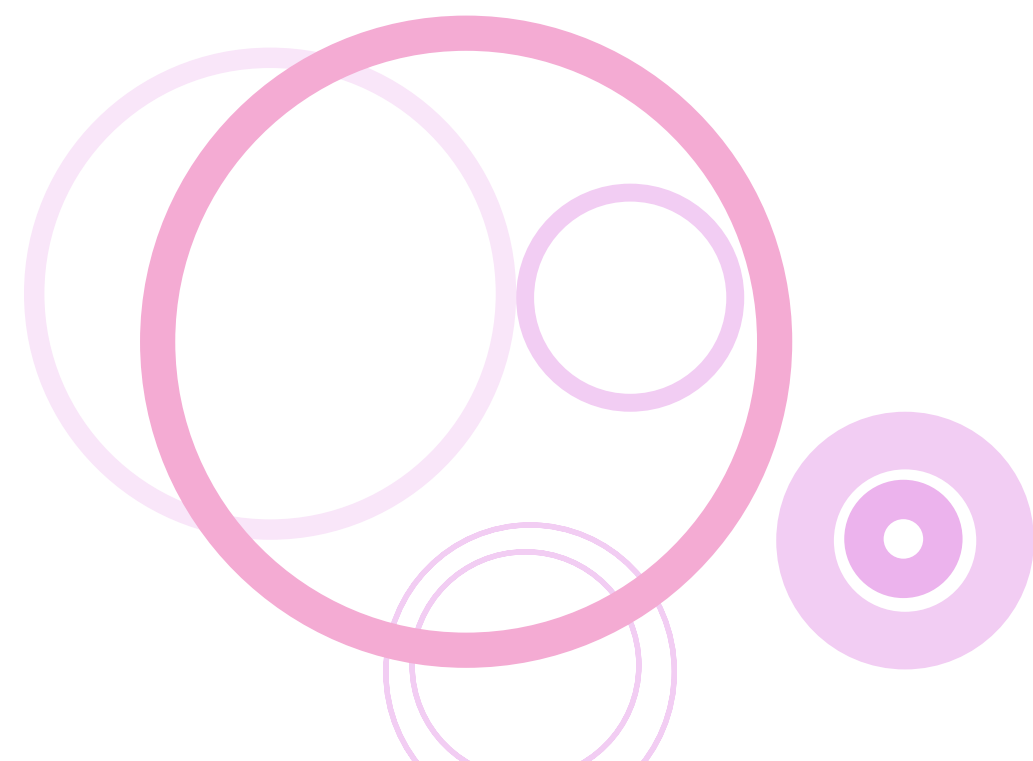
Las metodologías empleadas en este trabajo serán utilizadas en las próximas Prácticas Supervisadas que se desarrollen en el Centro de Estudios y Tecnología del Agua para el análisis de información pluviométrica de otras provincias, con el objetivo de evaluar los efectos de la variabilidad climática sobre el diseño hidrológico de medidas para mitigar el riesgo hídrico en todo el país.

Por otro lado, se realizará un análisis con respecto a los valores máximos de cada una de las series de Precipitación Máxima Diaria Anual analizadas con el objetivo de evaluar si esos valores máximos han ocurrido en los últimos años o no.

El gran desafío para la climatología mundial durante los próximos años será desarrollar los métodos que permitan anticipar el clima de las próximas décadas en el contexto del cambio climático en curso.



Anexos



Anexos.

Anexo 1: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 11: Grande – Cerro Blanco.

Año	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)
1993	102
1994	75.5
1995	170.2
1996	71.5
1997	121
1998	73
1999	166.5
2000	93
2001	93
2002	74
2003	110
2004	90
2005	115
2006	80
2007	72
2008	90
2009	97
2010	92
2011	80
2012	97
2014	75
2015	101

Anexo 2: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 12: Grande – El Manzano.

Año	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)
1989	55
1990	82.5
1991	134.5
1993	120
1994	70
1995	77.5
1996	67
1997	93
1998	70
1999	178
2000	67
2001	98
2002	54
2003	85
2004	97
2005	86
2006	70
2007	68.5
2008	75
2009	84
2010	83
2011	85
2012	75
2014	106
2015	93

Anexo 3: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 13: Grande – La Puente.

Año	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)
1974	73
1975	65
1976	77
1977	113
1978	115
1979	95
1980	74
1981	54
1982	78
1983	64
1984	180
1986	91
1987	90
1988	60
1989	90
1990	95
1993	103
1994	57.5
1995	78
1996	58.5
1997	105
1998	141
1999	180.5
2000	64
2001	96
2002	57
2003	90
2004	61
2005	70
2006	85
2007	61
2008	64
2009	110
2010	98
2011	100
2012	62
2014	68
2015	75

Anexo 4: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 14: Grande – Lutti.

Año	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)
1984	122
1985	200
1986	112
1987	108
1988	53
1989	40
1991	17
1993	99
1994	60
1995	73
1996	53.5
1997	90
1998	74
1999	176.3
2000	61
2001	62.5
2002	59
2003	60
2004	68
2005	77
2006	69
2007	63
2008	37
2009	101
2010	54
2011	123.5
2012	59
2013	230
2014	51
2015	70

Anexo 5: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 15: Grande – Pampichuela.

Año	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)
1977	120
1978	120
1979	187
1980	176
1981	67
1982	181
1983	180
1984	103
1985	140
1986	88
1987	120
1988	92
1989	132
1993	135
1994	74
1995	83
1996	62
1997	113
1998	71
1999	171.5
2000	70
2001	88
2002	80
2003	90
2004	93
2005	84
2006	109
2007	77
2008	56
2009	115
2010	95
2011	100
2012	83
2013	155
2014	85
2015	119

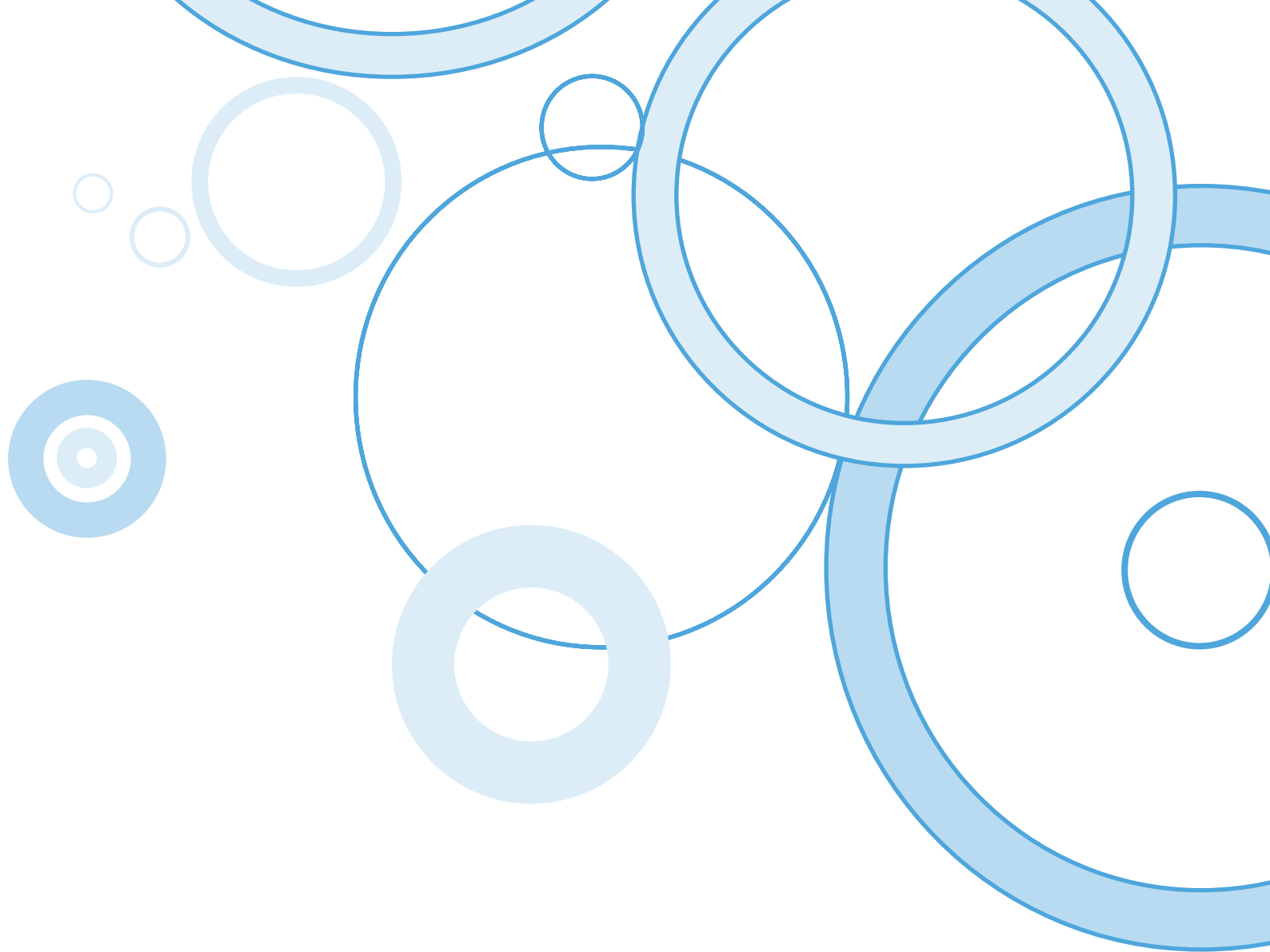
Anexo 6: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 16: Grande – Yacanto.

Año	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)
1990	83
1991	118
1993	125
1994	68
1995	80
1996	76
1997	123
1998	80
1999	168
2000	103
2001	100
2002	87
2003	85
2004	52
2005	86
2006	110
2007	75
2008	69
2009	123
2010	80
2011	59
2012	83
2013	169
2014	63
2015	100

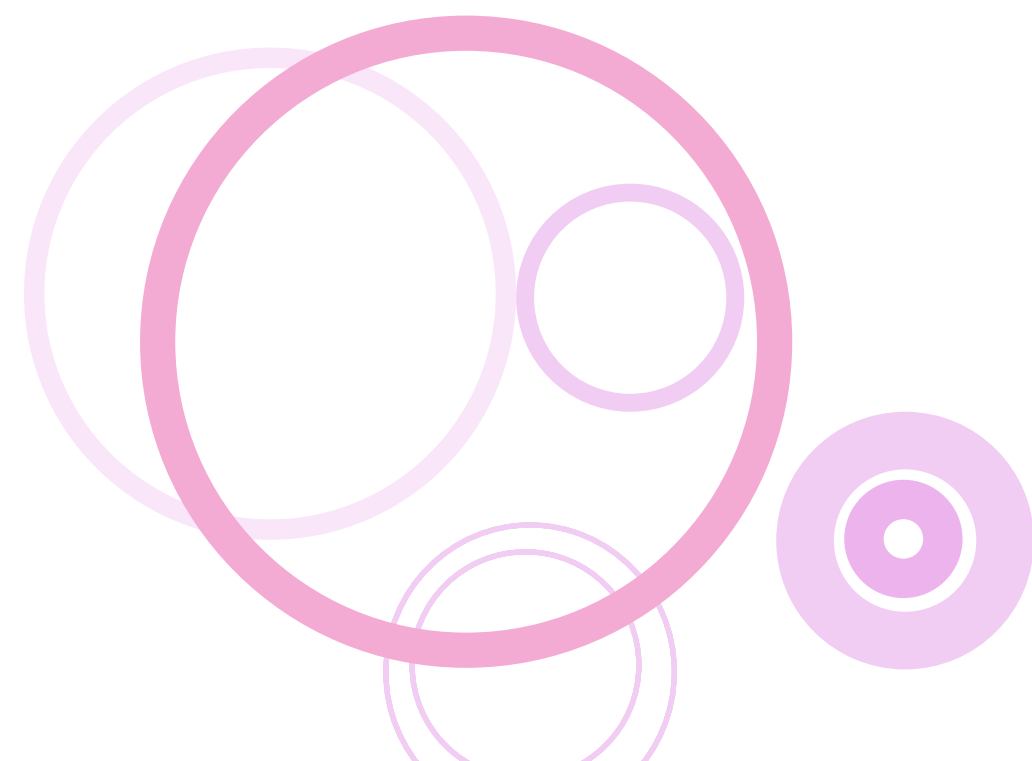
Anexo 7: Serie de Precipitación Máxima Diaria Anual de la Estación 17: El Durazno – La Florida.

Año	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)
1958	85
1959	72
1960	97
1961	86.5
1962	59
1964	78
1965	178
1966	57.5
1967	90.5
1969	99.6
1970	93.2
1971	58.5
1972	85.9
1973	79.8
1974	87.5
1975	63.9
1976	54.5
1977	144
1978	102.5
1979	135
1980	90
1981	33.7
1982	64.5
1983	168.5
1986	63.9
1987	82.4
1993	139
1994	70.9
1995	77
1996	70.5
1997	145.1
1998	63
1999	178.3
2000	60.2
2001	65
2002	85
2003	62.5
2004	75.5
2005	74.5

Año	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)
2006	97
2007	55.5
2008	63
2009	85.5
2010	72.5
2011	95
2012	91
2013	142
2014	52.5
2015	109



Bibliografía y referencias



Bibliografía y Referencias.

Amador, A. J.; Alfaro, E. J. (2009). "Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático". Revista Iberoamericana de Economía Ecológica Vol. 11: 39-52.

Barros, V.; Clarke, R.; Silva Días, P. (2006). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. "El cambio climático en la cuenca del Plata". Proyecto: "Tendencias en el ciclo hidrológico de la cuenca del Plata: Creando conciencia y nuevas herramientas para el manejo de los recursos hídricos".

Caamaño Nelli, G.; Dasso C. (2003). "Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias". Editorial Universitas. 222 páginas. ISBN: 9879406-43-5. Córdoba, Argentina.

Caamaño Nelli, G.; Garcia, C. M. (1997). "Estimación de Máximos en Hidrología: Factores de Frecuencia Normal y Lognormal". Cuadernos del CURIHAM, Año 3, Nº 3, 1-17. UNR. Rosario, Argentina.

Campos Aranda, D. F. (2016). "Modelo probabilístico simple para análisis de frecuencias en registros hidrológicos extremos con tendencia". Tecnología y ciencias del agua. Versión On-line ISSN 2007-2422. Vol.7, No.3.

Carvajal, Y.; Restrepo Tarquino, I.; Tucci, C. (2005). "El Cambio climático y las estrategias de desarrollo para América Latina". En Memorias de la Conferencia Internacional Agua 2005 (De la acción local a las metas globales), Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Catalini, C.G. y G. Caamaño Nelli. (2003). Lámina de lluvia Local a escala de Cuenca para Intervalos de Máxima Anual. Capítulo 10. pp 125-137. En Lluvias de Diseño. Conceptos, Técnicas y Experiencias (Caamaño Nelli, G. y Dasso, C.M.) Edit. Universitas. Córdoba, Argentina.

Catalini, C. G.; G. E. Caamaño Nelli; C. M. García (2002) "Efectos Fisiográficos y Climáticos sobre las Curvas de Reducción Areal de Lluvias de Diseño". XIX Congreso Nacional del Agua, 7-8. Trabajo en CDROM. CPCNA. Villa Carlos Paz, Argentina.

Catalini, C. G.; Caamaño Nelli, G.; Dasso, C. (2011). "Desarrollo y Aplicaciones sobre Lluvias de Diseño en Argentina". 284 páginas. ISBN13: 978-3-8454-9722-8. Edit. Acad. Española (Lap Lambert Publishing GMBH & Co. KG). Saarbrücken, Deutschland.

Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*: New York, McGraw-Hill, 680 p.

Chow, V. T.; Maidment D. R.; Mays, L. W. (1993). “Hidrología Aplicada”. McGraw-Hill, 580 pp.

García, C. M.; C. G. Catalini; G. E. Caamaño Nelli; (2000) “Distribución Espacial de la Lámina de Diseño en una Cuenca de Montaña.”. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II, 309-318. AIH. Córdoba, Argentina.

García González, Martha L.; Carvajal Escobar, Yesid; Jiménez Escobar, Henry. (2007). “La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático”. *Ingeniería y competitividad*, Vol. 9, No 1, p. 19-29. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Guillén, N. F. (2014). “Estudios Avanzados para el Diseño Hidrológico e Hidráulico de Infraestructura Hídrica”. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba.

Guillén, N. F.; Botelli, M. C.; García, C. M.; Flores, K. (2015). “Estimación de la relación IDT en Salta Capital”. V Taller sobre Diseño Hidrológico, Salta, Argentina.

Guillén, N. F.; García, C. M.; Catalini, C. G.; Botelli, M. C. (2018). “Estimación de láminas de lluvias máximas diarias y sus parámetros estadísticos en Argentina”, XXVIII Congreso Latinoamericano De Hidráulica, Buenos Aires, Argentina.

Hamed, K. H.; Rao, A. R. (1998) “A modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data”. *Journal of Hydrology* 204, pp. 182-196.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001b). “Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change.” McCarthy, J.J.; Canziani, O.F.; Leary, N.A.; Dokken, D.J.; White, K.S. (editors). Cambridge University Press, United Kingdom.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001a). “Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change”. Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J.; Noguer, M.; Van Der Linden, P.J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C.A. (editors). Cambridge University Press, United Kingdom.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2013): Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G. K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

López, P. M.; Seoane, Rafael S.; Fornero, Luis A.; Rodríguez, José L.; Nuñez, Marta S. (2007). “Análisis de tendencia en series autocorrelacionadas”.

National Assesment Synthesis Team. (2002). Water sector from the overview of climate change impacts on the US: the potential consequences of climate variability and change. US Global Change Research Program. <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/Library/nationalasssessment/16WA.pdf>

Non-Stationary Extreme Value Analysis (NEVA) (Cheng y Kouchak - University of California, Irvine - 2014)

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2003). “Declaración de la OMM sobre la situación del clima mundial en 2003. 2003: El tercer año más caliente”. Ginebra, Suiza.

Roussel M.C., Thompson D.B., Fang X., Cleveland T.G., Garcia C.A. (2005). “Time-Parameter Estimation for Applicable Texas Watersheds”. Research Report 0-4696-2. Lamar University. SHA 2005. Application of Hydrologic Methods in Maryland. U.S. State Highway Administration.

Rudolf, J. E. (2017). “Análisis de información pluviométrica y estudio de variabilidad climática en la provincia de Salta”. Práctica Supervisada de la carrera de grado Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba.

Sen, P. K. (1968). “Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau”. Journal of the American Statistical Association, 63, pp. 1379-1389.

Sheridan, J. M.; Merkel, W. H.; Bosch D. D. (2002). “Peak Rate Factors for Flatland Watersheds”. Applied Engineering in Agriculture, Vol. 18(1): 65-69. American Society of Agricultural Engineers ISSN 0883-8542.

Texas Department of Transportation (2016), “Hydraulic Design Manual”. 512 pp. Copyright 463-8630 all rights reserved.

USDA Soil Conservation Service (1972) National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. USDA Soil Conservation Service, Washington DC.

Weibull, W. (1951), "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mech.-Trans. ASME 18 (3): 293–297.

Yue, S.; Pilon, P.; Phinney B.; Cavadias, G. (2002b). "The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series". Hydrological Processes 16, pp. 1807–1829.