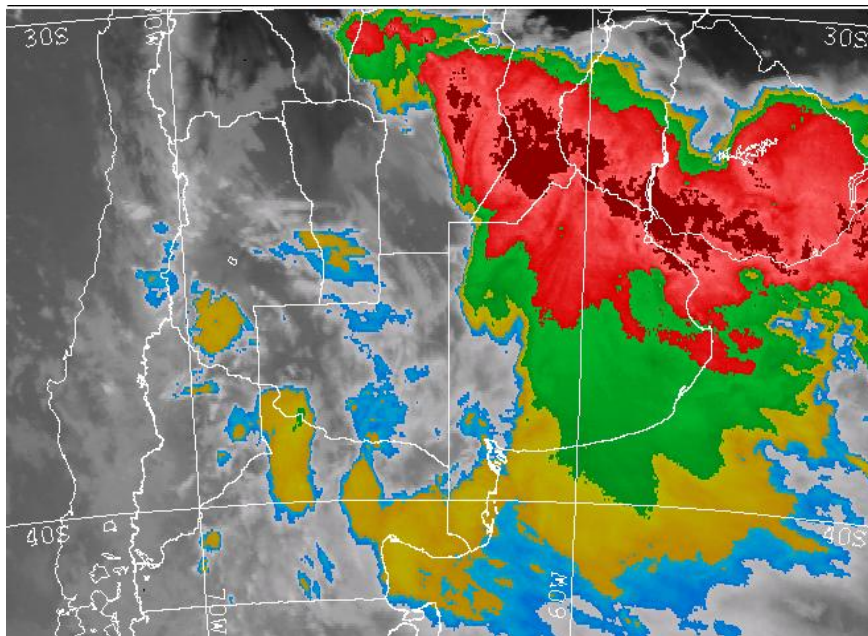




### **III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas**



**Editores:** Gerardo Riccardi, Hernán Stenta, Carlos Scuderi,  
Pedro Basile y Erik Zimmermann

*Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil y CURIHAM  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.  
Universidad Nacional de Rosario.*



PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DEL

**“III TALLER SOBRE REGIONALIZACIÓN  
DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS”**

***Editores:***

Gerardo A. Riccardi  
Hernán R. Stenta  
Carlos M. Scuderi  
Pedro A. Basile  
Erik D. Zimmermann

*Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil y CURIHAM  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.  
Universidad Nacional de Rosario.  
Riobamba 245 bis Rosario, Santa Fe, Argentina*

ABRIL, 2012  
ROSARIO, SANTA FE, ARGENTINA

III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas / edición literaria a cargo de Gerardo A. Riccardi; Hernán R Stenta; Carlos M Scuderi; Pedro A Basile; Erik D. Zimmermann - 1a ed. - Rosario: UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario, 2012. CD-ROM.

ISBN 978-950-673-954-6

1. Precipitaciones Hídricas. I. Riccardi, Gerardo A., ed. lit. II. Stenta, Hernán R. ed. lit. III. Scuderi, Carlos M. ed. lit. IV. Basile, Pedro A. ed. lit. V. Zimmermann, Erik D. ed. lit

CDD 551.577

**Editores:**

Gerardo A. Riccardi  
Hernán R. Stenta  
Carlos M. Scuderi  
Pedro A. Basile  
Erik D. Zimmermann

**Autores:**

María Teresa Altamirano  
María Ambrosoni  
Alejandra Arbuet  
Daniel Barrera  
Pedro Basile  
Flavia Bazzano  
Virginia Belli  
Bernabé Bianchiotti  
Federico Bizzotto  
Martín Burgues  
Gabriel Caamaño Nelli  
Carlos Catalini  
Laura Colladon  
Jorge Collins  
Agustín Cueto  
Clarita Dasso  
Carlos Alberto Depettris  
Mariano Diez  
Nicolás Failache  
Alejandro Felizia  
Vanina Ferrero  
María Eugenia Garat  
Carlos M. García Rodríguez  
Patricia Gómez  
Sebastián Gómez Gómez  
Carolina González Morinigo  
María Lorena Guglielmone  
Alfonso Gutiérrez  
Manuel Irigoyen  
Eliana Jorquera  
Carlos Lacunza  
Gustavo Larenze  
Tito Lasanta  
Roberto Lazarte Sfer  
Luis Lenzi  
Gastón Lérica  
Daniela Lovera  
José Macor

Florencia Manduca  
Rosana Mazzon  
Guillermo Mendez  
Martín Miguez Ruiz  
Luis G. Müller  
Raúl Navarro  
Liliana Núñez  
Gerardo Ogdon  
Carlos Paoli  
Hugo Paz  
Raúl Pedraza  
Flavia Pelizardi  
Martín Pérez  
Germán Pinasco  
Jorge Pilar  
Margarita Portapila  
Gerardo Riccardi  
Andrea Rico  
Alejandro Ruberto  
Ezequiel Sánchez  
Carlos Scuderi  
Hernán Stenta  
María Josefina Tito  
Emilce Vaccarino  
Alberto Vich  
Adolfo Villanueva  
Juan Weber  
Eduardo Zamanillo  
Erik Zimmermann

**Colaboradores:**

Pablo Bussi  
Emilio Caporicci  
Eugenia Chiarito  
Marina García  
Adelma Mancinelli  
Pablo Mangiameli  
Jovita Soledad Méndez Zacarías  
Maria Pesci  
Gabriel Policardo  
Estefanía Stagnitta

## Prólogo

El evento “III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas” se llevó a cabo los días 1 y 2 de diciembre de 2011 en dependencias de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, de la ciudad de Rosario, provincia de Santa Fe, Argentina, donde expertos de diferentes regiones de nuestro país expusieron y debatieron sobre la temática en cuestión. El taller contó con la participación en calidad de autores y expositores de 65 especialistas, quienes llevaron adelante la ponencia de 25 trabajos científico-técnicos. Asimismo se contó con la participación en calidad de asistentes de 50 profesionales, alumnos y público en general, interesados en los diferentes abordajes del análisis de precipitaciones intensas y su extensión hacia el diseño hidrológico. El taller se enmarca en la continuidad de aquellos que se realizaron en Concordia y Córdoba en 2007 y 2009 respectivamente.

El taller fue organizado por del Departamento de Hidráulica y el Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales y contó con el auspicio de la Escuela de Ingeniería Civil, la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, la Universidad Nacional de Rosario y el Instituto Nacional del Agua.

Las instituciones que se hicieron presente por medio de los autores y expositores fueron: Centro de Estudios y Tecnología del Agua. (FCEFyN-UNC); Centro de la Región Semiárida. (INA); Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas. (CIFASIS-CONICET); Centro Regional Litoral. (INA); Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. (CURIHAM-FCEIA-UNR); Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. Represa de Salto Grande. Uruguay-Argentina; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; Departamento de Hidráulica. (FCEIA-UNR); Departamento de Hidráulica. (FI-UNNE); Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra. (FA. UBA); Facultad de Ciencias de la Administración y Alimentación. (UNER); Facultad de Ingeniería. (UBA); Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (UNL); Facultad Regional Concordia. (UTN); Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales. (IANIGLA-CONICET); Instituto de Estudios del Ambiente y Recursos Naturales. (FFyL-UNCUYO); Instituto de Hidrología de Llanuras. (UNICEN); Laboratorio de Construcciones Hidráulicas (FCEyT-UNT); Laboratorio de Hidráulica. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba. (UTN); Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y Universidad Católica de Córdoba.

La Comisión Organizadora del taller estuvo conformada por: Dr. Ing. Civil Gerardo Riccardi; Dr. Ing. Civil Hernán Stenta; MSc. Ing. Civil Carlos Scuderi; Dr. Ing. Civil Pedro Basile y Dr. Ing. Civil Erik Zimmermann, todos miembros del Departamento de Hidráulica y CURIHAM (FCEIA, UNR).

Durante el taller se abordaron diferentes tópicos involucrando: técnicas multiespectrales para la estimación de precipitación, diseño y construcción de base de datos de precipitaciones; derivación, parametrización y regionalización de curvas IDF (o IDT); determinación de potencial erosivo de lluvias; análisis de precipitaciones máximas diarias, precipitaciones de larga duración, precipitaciones máximas probables y precipitaciones máximas mensuales; análisis, desempeño y aplicaciones del modelo DIT (y sus variantes) para predicción de lluvias máximas; regionalización de láminas máximas diarias; análisis dinámico de tormentas extremas; variabilidad de extremos por efectos orográficos; análisis de frecuencia en cuencas andinas; aplicaciones del modelo SQRT-ETmax para máximos diarios y criterios de diseño para sistemas de reservorios-estaciones elevadoras. Como tema asociado al diseño hidrológico se abordó también la problemática de la planificación en cuencas con fuertes procesos de urbanización. Asimismo fue presentado el proyecto IFI-LAC en Latinoamérica del PHI-UNESCO que aborda la problemática de inundaciones como así también fue presentado el sistema nacional de radarización meteorológica (SINARAME).

Por último se elaboró una síntesis final y se consensuó la sede del próximo taller resultando la ciudad de San Miguel de Tucumán en el año 2014.

Dado que la presente publicación tiene un carácter científico y además documental, se presenta el lenguaje, estructura, organización, calidad de edición y alcance original de cada artículo.



## Índice

Diseño y construcción de una base de datos pluviométricos diarios, apta para una rápida captura del campo de precipitación de una tormenta. <i>Martín Burgues, Daniel Barrera y Margarita Portapila</i> .....	01
Regionalización de IDF para las Provincias de Chaco y Formosa. <i>Guillermo J. Mendez, Alejandro R. Ruberto, Carlos A. Depettris y Jorge V. Pilar</i> .....	09
Máximos “mensuales” de precipitación según los métodos MovNd y MovN*N. <i>Liliana Núñez, E. Carolina González Morinigo, Vanina L. Ferrero y Gerardo Ogdon</i> .....	25
Explosión urbanística y planificación de drenajes en el Gran Rosario <i>Raúl Alberto Navarro</i> .....	35
Análisis de precipitaciones intensas diarias puntuales y de grilla en algunas regiones de la Pcia. de Buenos Aires. <i>Adolfo Villanueva y Flavia Pelizardi</i> .....	45
Sobre el desempeño numérico del modelo DIT. <i>Gabriel Caamaño Nelli, Laura Colladon, Clarita M. Dasso y Andrea F. Rico</i> .....	59
El modelo DIT 3p para predicción de lluvias máximas. <i>Gabriel Caamaño Nelli, Andrea F. Rico y Clarita M. Dasso</i> .....	71
Lluvia de diseño sin atenuación de datos locales para una cuenca. <i>Gabriel Caamaño Nelli, Eliana Jorquera, Carlos G. Catalini y Laura Colladon</i> .....	83
Implementación de una técnica de regionalización de láminas máximas diarias y curvas i-d-t en las Provincias de Córdoba y Santa Fe. <i>Carlos G. Catalini, Carlos M. García Rodríguez, Gabriel Caamaño Nelli, Erik Zimmermann, Virginia Belli, Bernabé Bianchiotti, Agustín Cueto, Gastón Lérica, Daniela Lovera, Germán Pinasco, Ezequiel Sánchez y Martín Miguez Ruiz</i> .....	95
Análisis dinámico de tormentas extremas en el Gran San Miguel de Tucumán. <i>Hugo Roger Paz, Roberto R. Lazarte Sfer y Flavia Bazzano</i> .....	115
Variabilidad de extremos de precipitación puntual por efectos orográficos en el Gran S. M. de Tucumán. <i>Roberto R. Lazarte Sfer y Hugo Roger Paz</i> .....	127
Aplicación del análisis de frecuencia regional en cuencas andinas de Argentina. <i>Alberto J. Vich, Florencia Manduca, Federico Bizzotto y Emilce Vaccarino</i> .....	143
Caracterización de lluvias máximas de 5 días de duración en la pampa húmeda <i>Gerardo Riccardi, Erik Zimmermann, Pedro Basile, Hernán Stenta y Carlos Scuderi</i> .....	159
Caracterización de las precipitaciones máximas en la cuenca inmediata al embalse de Salto Grande. <i>María Ambrosoni, Manuel Irigoyen, Eduardo Zamanillo y Nicolás Failache</i> .....	181
Aplicación del modelo SQRT-ETMAX en la estimación de precipitaciones máximas diarias de la Provincia de Entre Ríos. <i>María Josefina Tito, Martín M. Pérez y María Lorena Guglielmone</i> .....	195
Caracterización de precipitaciones máximas para la cuenca del arroyo Feliciano. <i>Eduardo A. Zamanillo, María Josefina Tito, María Eugenia Garat y Patricia C. Gómez</i> .....	207

Derivación y parametrización de curvas IDR para Rosario, Casilda y Zavalla (Santa Fe, Argentina) <i>Pedro A. Basile, Gerardo Riccardi y Hernán Stenta</i> .....	217
Criterios de diseño hidrológico aplicados para las obras de los sistemas de reservorios - estaciones de bombeo de la cuenca oeste de las ciudades de Santa Fe y Recreo. <i>Raúl Pedraza, Alejandro Felizia, José Macor, Rosana Mazzon, Jorge Collins, Luis Lenzi, Alejandra Arbuet y Mariano Díez</i> .....	227
Desempeño del modelo DIT ante distintas distribuciones teóricas de probabilidad: caso IDT de la ciudad de la Rioja. <i>Juan Weber</i> .....	243
Validación de modelos de aproximación estadística para la estimación de parámetros de lluvia en el área metropolitana de Buenos Aires. <i>Tito I. Lasanta</i> .....	255
A new Goes multispectral technique for operational precipitation estimation. Preliminary results over Southern South America. (Resumen). <i>Daniel Barrera y Sebastián Gómez Gómez</i> .....	265
Evaluación del potencial erosivo de lluvia en la región limítrofe entre las provincias de Córdoba y Santa Fe, Argentina. (Resumen). <i>Carlos García, Gabriel Caamaño Nelli, Carlos Catalini, María Teresa Altamirano y Luis Müller</i> .....	266
Estudios actuales sobre precipitación máxima probable en la provincia de Córdoba. (Resumen). <i>Carlos García, Gabriel Caamaño Nelli, Carlos Catalini y Bernabé Bianchiotti</i> .....	267
Iniciativa Internacional sobre Inundaciones, IFI Programa Hidrológico Internacional, PHI UNESCO. (Presentación) <i>Carlos Paoli</i> .....	268
Plan de Radarización Hidrometeorológica de la República Argentina. (Presentación). <i>Carlos Lacunza</i> .....	282



## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BASE DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS DIARIOS, APTA PARA UNA RÁPIDA CAPTURA DEL CAMPO DE PRECIPITACIÓN DE UNA TORMENTA**

***Martín Burgues<sup>1,3</sup>, Daniel Barrera<sup>2</sup> y Margarita Portapila<sup>1,3</sup>***

<sup>1</sup>*CIFASIS, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Blvd. 27 de Febrero  
201 bis Rosario, Argentina. email: LCCMartin@gmail.com*

<sup>2</sup>*CONICET / Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra (FA-UBA). Av. San Martín 4453, (1417)  
Buenos Aires, Argentina.*

<sup>3</sup>*CURIHAM, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. FCEIA-UNR, Rosario, Argentina.*

**RESUMEN:** Se presentan los resultados del diseño y construcción de una base de datos pluviométricos diarios, realizada con el fin de tener un rápido acceso a los mismos en forma georreferenciada y poder así visualizar la estructura espacial del campo de precipitación de una tormenta dada. Se diseñaron los algoritmos de cálculo y se escribieron los respectivos programas computacionales en PYTHON por ser un lenguaje de script de alto nivel y fácil adaptación, con el fin de almacenar y recuperar datos diarios de puestos pluviométricos ubicados en Argentina. Al presente la base cuenta con aproximadamente 500 estaciones, la mayor parte de ellos en la pampa húmeda y región litoral. La base está diseñada para ser ampliada sin cambiar su estructura. El primer programa lee el archivo de las localidades, con las posiciones geográficas y lo inserta en la base de datos. El segundo programa lee directamente de los archivos en planilla electrónica provistos por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGPyA), los cuales están disponibles en internet en forma de listados semanales de precipitaciones diarias, organizados por provincia y partido o distrito. El tercer programa hace una consulta a la base de datos pidiendo los datos que interesa recuperar y los escribe en pantalla o en un archivo. Al leer los datos de la base, el programa permite clasificar y ordenar según diferentes campos, tales como fecha, ciudad, provincia, latitud o longitud. Los archivos semanales de la SAGPyA tienen una columna con el nombre de la localidad, el cual no siempre está escrito exactamente con los mismos caracteres. A los efectos de reconocer las localidades por el nombre que figura en dichos archivos y asociarlas con las del archivo de referencia georreferenciado, se procedió a armar un diccionario que dado un par "irreconocible" (provincia, localidad) devuelve el que corresponde a la base de datos. El diccionario continúa completándose mientras haya datos que no estén escritos correctamente. El diseño permite incorporar datos provenientes de otras fuentes, lo cual está previsto a fin de que la base de datos sea lo más completa posible.

**PALABRAS CLAVE:** Base de datos; rápido acceso; precipitación diaria

## INTRODUCCIÓN

### Utilidad y necesidad de una base de datos pluviométricos georreferenciados

Las estaciones pluviométricas que reportan las mediciones al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) inmediatamente después de efectuadas las observaciones, son muy pocas en comparación con la extensión del territorio argentino. Sin embargo, los datos provenientes de dichas estaciones son los únicos disponibles que están consistidos y georreferenciados, y que pueden eventualmente utilizarse en aplicaciones operativas (al menos en el SMN), tales como el pronóstico hidrológico en cuencas hidrográficas, el seguimiento de la humedad del suelo y el nivel de la superficie freática mediante técnicas de balance hídrico, y la validación de modelos que estiman precipitación. La baja densidad espacial de dicha red de estaciones pluviométricas y su irregular distribución espacial hace que esta sea totalmente inadecuada para capturar el campo de precipitación con todas sus variaciones. Además, se torna compleja la comparación del campo generado a partir de datos puntuales con el generado mediante la técnica satelital Hidroestimador (Vicente *et al.*, 1998; Rozumalski, 2000; Vicente *et al.*, 2002; Scofield y Kuligowski, 2003) implementada en el SMN (Barrera *et al.*, 2001; Barrera, 2007), la cual captura variaciones de menor escala espacial.

Adicionalmente, la baja densidad de la red pluviométrica operativa influye fuertemente en la ubicación de los centros de máxima precipitación, que en el caso de los datos puntuales se ubican siempre sobre las estaciones con mayores valores medidos; sin embargo, la ubicación real de dichos centros raramente coincide con las coordenadas de las estaciones. Además, existen en el país muchos puestos pluviométricos que no reportan al SMN. Muchos de ellos están siendo incorporados a la base de datos de la SAGPyA. Otros son reunidos por otras entidades, tales como el INTA, las agencias provinciales de recursos hídricos y las corporaciones de acopiadores de cereales.

### Valores puntuales y areales de precipitación. Relación con las características de la red pluviométrica.

La nubosidad convectiva presenta una alta variabilidad espacial (Houze, 1982 y 1993), y los campos de precipitación generados por tormentas en lapsos menores que un día reflejan dicha variabilidad (Huff, 1970). Por lo tanto las redes pluviométricas convencionales, con interdistancias típicas entre pluviómetros de decenas o aún cientos de kilómetros, son inadecuadas para trazar el mapa de isohietas (Lebel *et al.*, 1987); en particular, resulta imposible a partir de dichas redes ubicar las áreas y centros de máxima precipitación y conocer los valores de estos centros (ver, por ejemplo, Rozumalski, 2000; Barrera, 2005). Este hecho ha llevado al desarrollo de algoritmos de estimación de campos de precipitación (intensidad y total acumulado) a partir de sensores remotos montados en satélites, los cuales realizan mediciones espacialmente continuas con una extensión tal que permite captar los sistemas nubosos y sus características, propias de la mesoescala del movimiento atmosférico.

Las técnicas basadas en imágenes de satélites geoestacionarios generan estimaciones de lluvia areal media sobre aéreas que abarcan al menos la dimensión de un pixel de la imagen en el infrarrojo térmico: 4 km de lado, o sea 16 km<sup>2</sup>. Por otra parte, los valores pluviométricos pueden considerarse “puntuales” aunque en realidad se trata de valores integrados espacialmente sobre la superficie de la boca del pluviómetro; dicho valor puntual no es representativo de la lluvia areal media ocurrida en el pixel que lo contiene debido a la alta variabilidad espacial de la lluvia. La gran limitación para efectuar la validación de las estimaciones satelitales es que no se realizan mediciones de precipitación media areal sobre superficies de esas dimensiones, careciéndose por lo tanto no solo del valor verdadero sino también del observado correspondiente a áreas del tamaño del pixel. La diferencia que se observa al comparar una medición puntual con una estimación sobre un área que contiene al punto en cuestión, es debida en una proporción muy pequeña a los errores de la

medición (Mueller *et al.*, 1972), a los errores propios de la estimación, y también, en gran medida, a la variabilidad espacial de la precipitación (Huff, 1970), la cual produce fluctuaciones alrededor de la media areal en los valores de lluvia en los distintos puntos del área del pixel (Valdés *et al.*, 1994). Por ello, el error que se comete en la determinación de la precipitación media areal a partir de varios datos puntuales (Horton, 1923) podría disminuirse usando una red más densa de pluviómetros o pluviógrafos (Lebel *et al.*, 1987) de tal forma que la precipitación en cualquier punto de la región esté correlacionada por encima de cierto valor umbral (p. ej. 0.8) con la medida en una estación pluviométrica (Barrera y Basualdo, 1997). Esto es lo que se persigue con el presente trabajo. Justamente, la carencia en el país de una base de datos pluviométricos con suficiente densidad espacial ha llevado a validar las estimaciones del Hidroestimador (versión UBA) en el sur de Brasil, sobre el límite del área de trabajo y fuera del área de calibración (Saldanha *et al.*, 2007).

La utilización de los servicios on line con rápido acceso a los datos es una de las características fundamentales de los sistemas de información de los últimos tiempos. En el caso que se menciona en este trabajo, la obtención del campo de precipitaciones para una zona dada del país se requiere con suficiente dinamismo como para que la implementación de este tipo de mecanismos sea relevante. Los datos levantados de campo son recopilados por la SAGPyA y entregados en una planilla electrónica de Excel, la cual detalla las precipitaciones semanales en milímetros, desagregadas diariamente, en los pluviómetros las cuales son observadas a las 9:00 de cada día pluviométrico.

Siendo el proyecto presentado un proyecto preliminar de recopilación, se optó por la utilización de un lenguaje de muy alto nivel apropiado para maquetación de sistemas en el cual se pueden realizar scripts de prueba con facilidad. Para maximizar la utilidad de la recopilación de los datos se utilizó una base de datos relacional. Este tipo de bases de datos son las más comunes y ampliamente reconocidas como soportes de datos relacionados, por su facilidad de interpretación y manejo de las consultas resultantes.

Por otra parte, los datos obtenidos de las planillas no son siempre confeccionados de la misma manera, de modo que en el proceso de interpretación de los datos para agregarlos en la base de datos se requirió de un mecanismo de adaptación para que los mismos sean reconocidos como los pluviómetros ya registrados.

El problema fundamental que resuelve este tipo de metodología es la rápida obtención de resultados de series de precipitaciones en un área específica, o para una ventana de tiempo dada, o ambas cosas al mismo tiempo, consultas que de otro modo llevan horas de trabajo recopilando la información de las cientos de planillas originales con los datos crudos. La base de datos está diseñada de tal forma que permite la incorporación de datos recopilados por otros organismos o entidades comerciales, que obviamente almacenan los datos con distintos formatos y soportes informáticos.

A manera de ejemplo, se muestra en la Figura 1 el sector ( $71^{\circ}\text{O} - 56^{\circ}\text{O}$ ;  $41^{\circ}\text{S} - 20^{\circ}\text{S}$ ) en el cual se dispuso, para un trabajo de validación (Barrera, 2005), de datos pluviométricos de cuatro redes. Se muestran con distintos colores las estaciones con información proveniente de distintas fuentes: Rojo (SMN); azul (SAGPyA); marrón (INTA Anguil); verde (Federación de Acopiadores de Cereales). Los datos puntuales corresponden al "día pluviométrico" (de las 9 de la mañana a la misma hora del día siguiente).

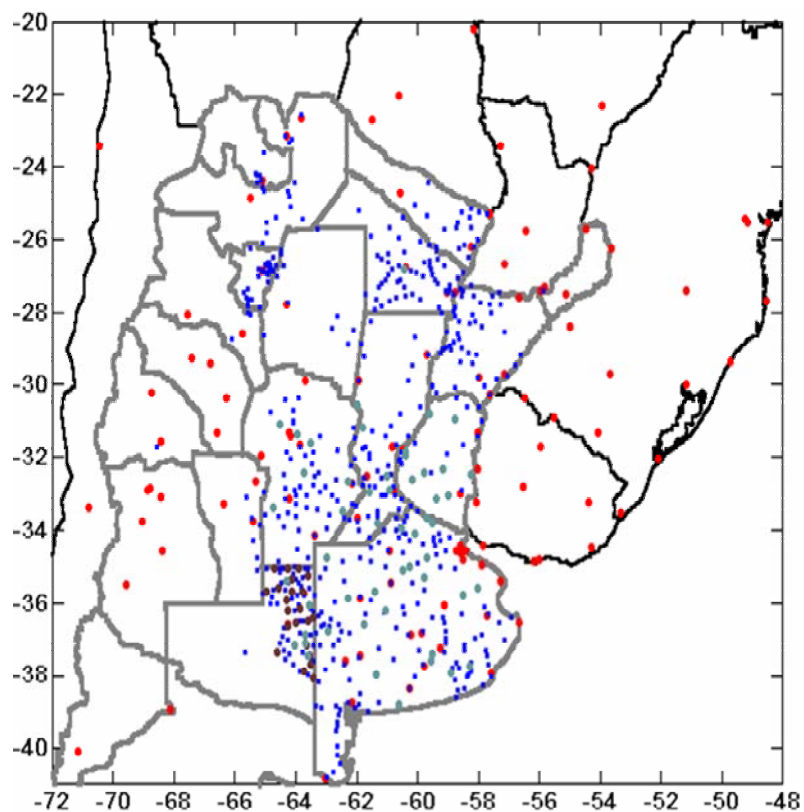


Figura 1.- Las 4 redes pluviométricas disponibles en el sector 1.

## AREA DE ESTUDIO

La zona en la que fue realizado el relevamiento es la comprendida por el área de mayor producción agrícola de la República Argentina. En la Figura 2 se muestra la ubicación de los 500 pluviómetros activos que recopila la SAGPyA que fueron incorporados a la base de datos.

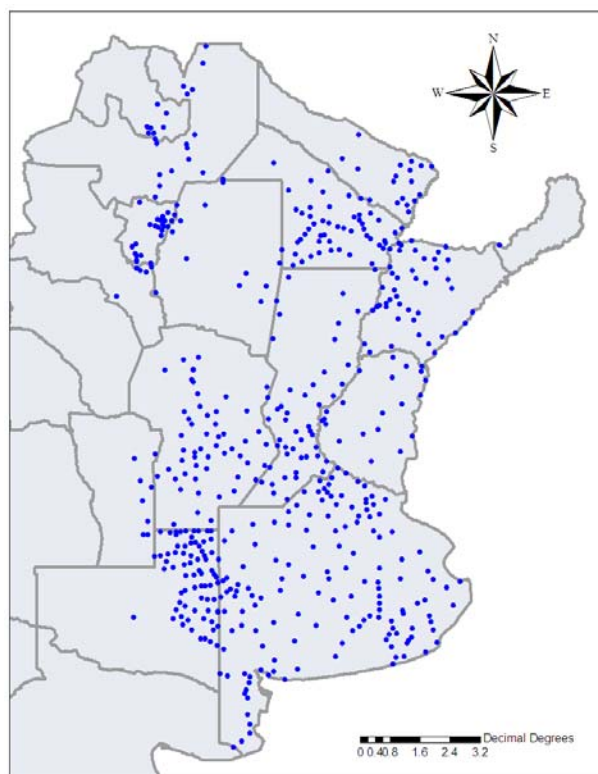


Figura 2.- Distribución de pluviómetros

## SOFTWARE UTILIZADO

La aplicación se basa principalmente en un sistema de base de datos relacional que soporta como lenguaje de consulta SQL o Structured Query Language (ANSI, 1992) que como su nombre lo indica se trata de un lenguaje estandarizado que permite hacer consulta de forma programática de manera estándar a cualquier base de datos.

El motor de base de datos utilizado es el SQLite (Sqlite, 2011), este motor fue elegido por su facilidad de uso, es de código abierto y libre, no necesita servicios adicionales corriendo en la computadora para su utilización, y la base de datos se concentra en un único archivo fácilmente reconocible.

El lenguaje de programación utilizado para la realización de los scripts es PYTHON 2.7 (Python, 2011) apoyándose en el alto nivel de abstracción que proporciona para la implementación de tareas como las requeridas en este trabajo. Este lenguaje fue creado por Guido Van Rosum a principio de los años 90 como un lenguaje similar a Perl pero con una sintaxis mucho más limpia y legible. Es un lenguaje interpretado, de scripts con tipado dinámico, fuertemente tipado, multiplataforma, orientado a objetos y con algunas características de la programación funcional (González Duque, 2011).

La interface usada como mediador entre el motor de base de datos y la aplicación es un Object Relational Mapping ORM (Ambler, 2002) también llamados motores de persistencia, estos modelos permiten abstraerse de la base de datos permitiendo utilizar las técnicas de programación más avanzadas existentes en el lenguaje de programación como herencia y polimorfismo. El ORM se encarga de producir las sentencias SQL necesarias para administrar, insertar, borrar y actualizar la base de datos consiguiendo que los datos que se encuentran en memoria sean persistentes en la base de datos. En este trabajo el ORM elegido es el SQLAlchemy (Sqlalchemy, 2011), la razón de la elección es que este ORM genera código para Python y tiene abstracciones para relacionarse con varias bases de datos entre las cuales se encuentra SQLite.

Otra pieza de software fundamental para la realización de esta aplicación es el objeto encargado de leer correctamente las planillas de datos Excel para procesarlas y luego insertar sus registros en la base de datos. Para ello, se optó por el paquete pyExcelerator (Pyexcelerator, 2011) que resuelve todos estos procesos de forma efectiva.

## DISEÑO DE LA BASE DE DATOS

La base de datos se confeccionó con base en las entidades que debía representar. Para nuestro propósito inicial, se utilizaron 2 entidades principales: Localidad y Precipitación. La relación que une las dos entidades es una relación de *uno a muchos* en la cual muchas instancias de precipitación están ligadas a una instancia de Localidad. El Diagrama de Entidad Relación basado en el modelo de entidad relación propuesto por Chen (Chen, 1976) se muestra en la Figura 3 donde también se pueden ver los atributos de cada entidad que luego se transforman en clases dentro de la aplicación. Como se aprecia, en la tabla Localidad hay un código de identificación único que es clave principal de la tabla, todos los demás atributos dependen unívocamente de este. Por otro lado la tabla Precipitación tiene un Id, identificador único de cada instancia que se transforma en clave primaria de la tabla y una clave foránea que la relaciona con la tabla Localidad plasmando la relación de que muchas precipitaciones pertenecen a una localidad.

El diseño está basado en las formas normales de diseño de base de datos, y cumple con las reglas de normalización hasta la tercera forma normal 3FN (Maier, 1983). La primera forma normal la cumple ya que cumple con las siguientes propiedades:

- todos los atributos de la base son indivisibles,
- cada tabla tiene una clave primaria única que no contiene valores nulos,
- todos los registros tienen la misma cantidad de columnas,
- hay una dependencia funcional de todos los atributos con la clave principal de la tabla a la que pertenecen,
- hay una independencia de los registros entre sí.

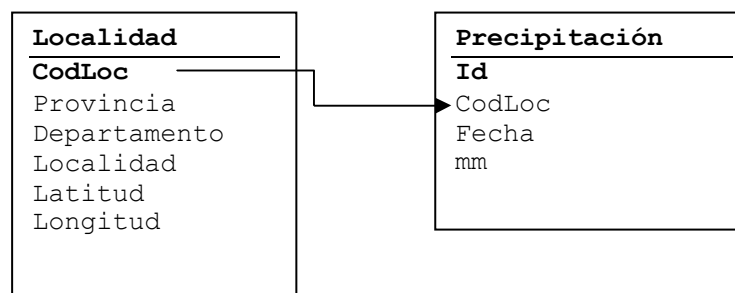
Por otro lado el diseño cumple con la segunda forma normal, ya que cumple con lo siguiente:

- el diseño está en primera forma normal,
- la dependencia funcional de los atributos con la clave principal son de forma completa.

Y por último el diseño está en la tercera forma normal ya que cumple con lo siguiente:

- el diseño está en segunda forma normal,
- no existen dependencias funcionales de los atributos en forma transitiva, todos los atributos dependen directamente de la clave.

Este diseño de la base de datos garantiza la integridad de los datos y que no existan datos redundantes, y además facilita la actualización.



**Figura 3.-** Diagrama Entidad Relación

Este diagrama de Entidades relacionadas se transforma en un esquema base para las clases implementadas en el modelo del ORM.

## ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN

La aplicación está estructurada en varios scripts con una finalidad específica para cada uno, a continuación se detallan sus componentes.

El primer script `ReadLoc.py` es el encargado de leer los datos de la tabla de localidades georreferenciadas para llenar en la base de datos la tabla Localidades. Con esta tabla completa, cualquier resultado de consulta que involucre la tabla localidades podrá obtener también la latitud y longitud del dato, por lo tanto es factible representarlo en un sistema de información geográfica GIS como dato georreferenciado.

El segundo script `ReadSAGPyA.py` utiliza una instancia del objeto `pyExcelerator` mencionado anteriormente para leer uno a uno todas las planillas de la SAGPyA. Este script tiene una parte importante del trabajo ya que las planillas de la SAGPyA son llenadas por su personal manualmente y no tienen el código de localidad ni están normalizados los nombres de las localidades, dificultando en gran medida la tarea de reconocimiento de la localidad a la que pertenece cada registro. Aquí se implementó una solución de dos pasos, el primero es normalizar lo máximo posible los nombres, eliminando acentos y caracteres extraños, reescribirlos completamente en una capitalización estándar y reemplazando abreviaciones frecuentes. Con este paso se reconocen la mayoría de las localidades. Con el resto de los registros que no se reconocen se generan pares de valores (localidad, provincia) que se insertan en un diccionario. El diccionario contiene *{(localidad, provincia) no reconocido, (localidad, provincia) correspondiente}*, éste diccionario se va completando manualmente a medida que aparecen pares irreconocibles. Con este mecanismo el diccionario se va agrandando y el sistema va “aprendiendo” las distintas formas en que llegan las localidades para ser correctamente insertadas en las próximas planillas.

El tercer Script `Consultar.py` es el que extrae los datos de la base de datos, este contiene la sentencia SQL que representa nuestra consulta devolviendo los resultados por pantalla, o en un archivo de texto de salida. Las consultas son escritas directamente en el lenguaje SQL. Por ejemplo, para pedir las precipitaciones del pluviómetro de la localidad de Soldini de los días 1 y 31 de Octubre de 2007 se escribe una consulta como la de la Figura 4.

```
SELECT      localidad,
           latitud,
           longitud,
           p.fecha,
           p.mm
FROM localidad AS l INNER JOIN precipitacion AS p ON l.codLoc = p.codLoc
WHERE l.localidad = 'Soldini'
      AND p.fecha BETWEEN '2007-10-01' AND '2007-10-31'
```

**Figura 4.-** Ejemplo de código de consulta

Devolviendo la lista de los campos pedidos (localidad, latitud, longitud, fecha y mm), para su posterior utilización, incluyendo su utilización en GIS ya que son datos georreferenciados válidos para realizar mapas en WGS1984.

## CONCLUSIONES

Este trabajo permitió concentrar los esfuerzos de las recopilaciones de datos realizadas por la SAGPyA en una completa base de datos pluviométricos que pueden ser consultados empleando múltiples criterios y obteniendo los resultados de la consulta casi instantáneamente. Se utilizó PYTHON como lenguaje de programación dado que es un lenguaje de alto nivel que cuenta con paquetes de objetos de software para manejo de diferentes motores de base de datos, ORM y extracción de información de planillas Excel. El lenguaje tiene además, un adecuado manejo de cadenas de texto necesarias para la normalización de los datos de entrada. El motor de base de datos utilizado fue SQLite por su sencillez y portabilidad. Asimismo, como la base de datos contiene la información pluviométrica y las coordenadas geográficas de las estaciones, se pueden realizar consultas que devuelvan tablas con registros georreferenciados, de tal modo que pueden ser utilizados directamente en un sistema de información geográfica para su posterior análisis.

La utilidad de esta base de datos aumentara a medida que se vayan incorporando mas estaciones pluviométricas, provenientes tanto de la SAGPyA como de otras fuentes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambler, S.W.** (2002). Mapping objects to relational databases What you need to know and why <http://www-106.ibm.com/developerworks/library/mapping-to-rdb>
- ANSI X3.135-1992** (1992). American National Standard for Information Systems Database Language SQL, November, 1992
- Barrera, D. y A.B. Basualdo** (1997). “Aplicación de un modelo de correlación espacial del campo de precipitación de la provincia de buenos aires al diseño de redes pluviométricas”. *Revista de la Facultad de Agronomía*, (17)1, 31-36.
- Barrera, D., E. Marcuzzi y G. Naumann** (2001). “Desarrollo del software de un Sistema Operativo de estimación de precipitación a partir de imágenes GOES”. *Actas del IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina.
- Barrera, D.** (2005). “Análisis comparativo de los mapas de precipitación obtenidos a partir de datos pluviométricos y de estimaciones satelitales”. *Actas do IX Congreso Nacional de Meteorología*, Buenos Aires.
- Barrera, D.** (2007). “The generation of synthetic brightness temperature images to improve rainfall estimation from GOES satellite”. *Predictions in Ungauged Basins*. PUB Kick-off. IAHS Publication 309, No 13, 113-120. Eds. Daniel Schertzer, Pierre Hubert, Sergio Koide & Kuni Takeuchi.
- Chen P.** (1976). “The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data”. *ACM Transactions on Database Systems*
- González Duque, R** (2011). Python para todos, <http://mundogeek.net/tutorial-python/>
- Horton, R. E.** (1923). “Accuracy of areal rainfall estimates”. *Monthly Weather Review*, (51), 348-353.
- Houze, R. A. and P.V. Hobbs** (1982). “Organization and structure of precipitating cloud systems”. *Advances in Geophysics*, 24, 225-315.
- Houze, R. A.** (1993). “Cloud Dynamics”. *Academic Press*, New York, Estados Unidos de América
- Huff, F. A.** (1970). “Spatial distribution of rainfall rates”. *Water Resources Research*, 6(1), 254-260.
- Lebel, T., G. Bastin, C. Obled, and J. D. Creutin** (1987). “On the accuracy of areal rainfall estimation: A case study”. *Water Resources Research*, 23(11).
- Maier, D.** (1983). “The Theory of Relational Databases”. *Computer Science Press*
- Mueller, C. C. and E. H. Kidder** (1972). “Rain Gage catch variation due to airflow disturbance around a standard rain gage”. *Water Resources Research*, (8)4, 1077-1082.
- Pyexclerator** (2011). *PyExclerator* <http://sourceforge.net/projects/pyexclerator/>
- Python** (2011). *Python Programming Language - Official Website* <http://www.python.org>
- Rozumalski, R. A.** (2000). “A quantitative assessment of the NESDIS Auto-Estimator”. *Weather and Forecasting*, (15), 397-415.
- Saldanha C. B., A. Rolim da Paz, D. Allasia, W. Collischonn y D. Barrera** (2007). “Avaliação da chuva do Hidroestimador para modelagem hidrológica na região da bacia do Rio Grande”. *VIII Simposio de Hidraulica e Recursos Hidricos dos paises de lingua oficial portuguesa*. San Pablo, Brasil 25-29 de noviembre de 2007. Código del trabajo PAP0696
- Scofield, R., and R. Kuligowski** (2003). “Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme events”. *Weather And Forecasting*, (18)6, 1037-1051.
- Sqlalchemy** (2011). *The database toolkit for Python* <http://www.sqlalchemy.org>
- Sqlite** (2011). *SQLite Home page* <http://www.sqlite.org>
- Valdés, J. B.; E. Ha; C. Yoo and G. Noth** (1994). “Stochastic characterization of space-time precipitation: implications for remote sensing”. *Advances in Water Resources*, (17), 47-59.
- Vicente, G., R. Scofield, and P. Menzel** (1998). “The operational GOES infrared rainfall estimation technique”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 1883-1898.
- Vicente, G., J. C. Davenport and R. A. Scofield** (2002). “The role of orographic and paralax corrections on real time high resolution satellite rainfall rate distribution”. *Internatíknal Journal of Remote Sensing*, (23)2, pp. 221-230.



## REGIONALIZACIÓN DE IDF PARA LAS PROVINCIAS DE CHACO Y FORMOSA

**Guillermo José Mendez<sup>(\*)</sup>, Alejandro Ricardo Ruberto<sup>(\*)</sup>, Carlos Alberto Depettris<sup>(\*)</sup> y Jorge Víctor Pilar<sup>(\*)</sup>**

*Departamento de Hidráulica – Facultad de Ingeniería - UNNE*

*<sup>(\*)</sup> Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica*

*Av. Las Heras 727 (CPA H3500COI). TE (03722) - 427006. Interno 142*

*email: guillemendez79@gmail.com; aruberto@ing.unne.edu.ar; cdepettris@ing.unne.edu.ar; jpilar@ing.unne.edu.ar*

**RESUMEN:** El presente documento resume el trabajo de regionalización de curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) para las provincias de Chaco y Formosa. La metodología se basa en el uso de información de puestos pluviométricos en la región y la utilización de curvas IDF de una estación en un lugar con comportamiento hidrológico semejante a la zona de estudio. Como datos, se utilizaron mapas de regionalización de precipitaciones máximas de un día de duración de 2,33 años de recurrencia de las provincias de Chaco y Formosa y la curva probabilidades regional ajustada mediante el índice de precipitaciones para misma región de estudio. Además se contó con curvas IDF de estaciones pluviográficas de las ciudades de Resistencia (provincia del Chaco), Presidencia Roque Sáenz Peña (provincia del Chaco), El Colorado (provincia de Formosa) y Asunción (República del Paraguay). Considerando que la proporcionalidad entre precipitaciones de distintas duraciones de una estación pluviográfica es válida para toda la región de estudio, se utilizó el método de la relación entre duraciones para definir curvas IDF en cualquier sitio de análisis. Se enfatiza que la metodología plantea la utilización de un solo puesto pluviográfico, por lo que se eligió las curvas IDF de una estación a ser utilizadas en el proceso de regionalización. La elección se realizó a partir de un análisis de variabilidad de las curvas regionales IDF. Como resultado, se sugiere al futuro usuario de la regionalización, las curvas IDF de Resistencia para determinar sus homólogas en sitios sin datos pluviográficos.

**PALABRAS CLAVE:** Regionalización de IDF, método de relación entre duraciones, pluviografía de llanuras.

## INTRODUCCIÓN

En obras hidráulicas en las que se requiere de un diseño hidrológico, específicamente en obras de drenaje pluvial, se recurre al uso de curvas intensidad – duración - frecuencia (IDF) para estimar una tormenta asociada a un tiempo de recurrencia y calcular el caudal pico mediante simulación del proceso lluvia-escorrentía.

Sin embargo, en muchas regiones existe una carencia de datos pluviográficos que permitan confeccionar las relaciones IDF. Por lo que se recurre a la regionalización a fin de cubrir estos vacíos de información, basándose en la hipótesis de la similitud estadística regional.

Unos de los métodos de extrapolación de curvas IDF es el denominado “de relación entre duraciones” cuya principal hipótesis considera que los eventos de lluvias de gran intensidad y corta duración obedecen a procesos atmosféricos similares, que aparentemente son independientes de la región de estudio. Para ello utiliza datos pluviométricos de distintas estaciones en la zona, que son relativamente más fáciles de obtener que los pluviográficos (Farias y Olmos, 2007).

Este artículo resume el trabajo de regionalización de curvas IDF para las provincias de Chaco y Formosa, mediante el método de relación entre duraciones. Como datos pluviométricos se usó el trabajo de regionalización de precipitaciones máximas diarias realizados por Mendez *et al.* (2011) y se analizaron las IDF de cuatro estaciones, a fin de determinar cuál era la más conveniente a utilizar para determinar sus homólogas en sitios sin datos pluviográficos.

Las provincias de Chaco y Formosa tienen un clima subtropical con estación seca y generalmente en verano se producen las mayores y más intensas precipitaciones; siendo que la frecuencia de las mismas y el total precipitado anual presentan un gradiente negativo de este a oeste.

La estación cálida es la más propicia para a la producción de lluvias; ello se debe más a la calidad del aire, que interviene en las perturbaciones que a la frecuencia de los procesos frontales. En verano la distribución de la humedad relativa presenta una franja de valores altos en los valles aluvionales de los ríos Paraná y Paraguay y los frentes calientes tienen mayor representación que en el invierno, ya que la actividad ciclónica pasa por un mínimo. Estas condiciones atmosféricas del período cálido son potencialmente las más propicias para la producción de altas precipitaciones y aún cuando la frecuencia de empujes polares pasa por un mínimo, cuando ellos se producen, el contraste con el aire húmedo es tan marcado que se generan procesos pluviales violentos. Así el más frecuente de los tipos pluviales del verano es el chaparrón intenso y la frecuencia de precipitaciones superiores a 10mm y 50mm muestra un eje de altos valores que es coincidente con la línea de inestabilidad Formosa - Pehuajó (Bruniard, 1981).

Se han encontrado señales de aumento de lluvia en esta zona durante los años de El Niño (Aceituno, 1988 apud Marengo, 2004). En tanto que Rapelewski y Harpert (1987; 1989) identificaron lluvias más abundantes durante la primavera del año anterior al pico de El Niño, mientras que en el verano del año pico de El Niño hay tendencia a lluvias más deficientes. También sugieren, que estos cambios, se dan principalmente con un aumento de eventos extremos.

## METODOLOGÍA

Para la regionalización de curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF) se utilizó el método de relación entre duraciones. Se utilizó una curva regional de probabilidades y la curva IDF de una estación pluviográfica que presentó un comportamiento hidrológico semejante al de la región de análisis.

La metodología consta de tres etapas (Bravo *et al.*, 2008): (1) ajuste de una curva regional de probabilidades de precipitaciones diarias máximas anuales; (2) obtención de la relación entre duraciones de eventos extremos de precipitación y (3) determinación de las curvas IDF en la región de estudio.

Se enfatiza que la metodología plantea la utilización de un solo puesto pluviográfico. Sin embargo, del relevamiento de datos realizados para la zona de estudio, se encontraron cuatro curvas IDF, mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1.-** Curvas IDF en la región de estudio.

Estación pluviográfica	Periodo de análisis	Autores
Asunción (Rep. del Paraguay)	1970 a 1994	Monte Domecq (1995)
El Colorado (prov. de Formosa)	1993 a 1999	
Presidencia Roque Sáenz Peña (prov. Del Chaco)	1978 a 2008	Valiente (2000) y Ruberto y Gómez (2009)
Resistencia (prov. del Chaco)	1960 a 2005	Depettris y Pilar (2001) y Ruberto <i>et al.</i> (2007)

Entonces, a la metodología presentada por Bravo *et al.* (2008), se anexa la elección de las curvas IDF a utilizar en la regionalización. Para ello se evaluaron los periodos de datos con que se ajustaron cada una de las curvas IDF y se analizaron las divergencias que mostraron cada una de las cuatro estaciones pluviográficas.

### Ajuste de una curva regional de probabilidades

Se usó la curva regional de probabilidades, elaborada por Mendez *et al.* (2011), para precipitaciones de un día de duración, para la que se utilizaron datos de precipitaciones diarias de 44 estaciones del Chaco, 54 estaciones de Formosa, 4 estaciones de Santa Fe y 1 estación de Salta. La metodología de regionalización elegida en esa oportunidad fue el Índice de Precipitaciones. Como resultado final se presentaron las isohietas de precipitaciones para un tiempo de recurrencia de 2,33 años (Figura 1) y la curva de probabilidades regional a partir de la variable reducida de la distribución de Gumbel, expresada en función del tiempo del retorno, ecuación [1].

$$I_{TR} = a - b \cdot \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{TR} \right) \right] \quad [1]$$

Donde:

$I_{TR}$ : Índice de Precipitaciones regional para un tiempo de recurrencia (TR);

a: parámetro de ajuste = 0,799

b: parámetro de ajuste = 0,325

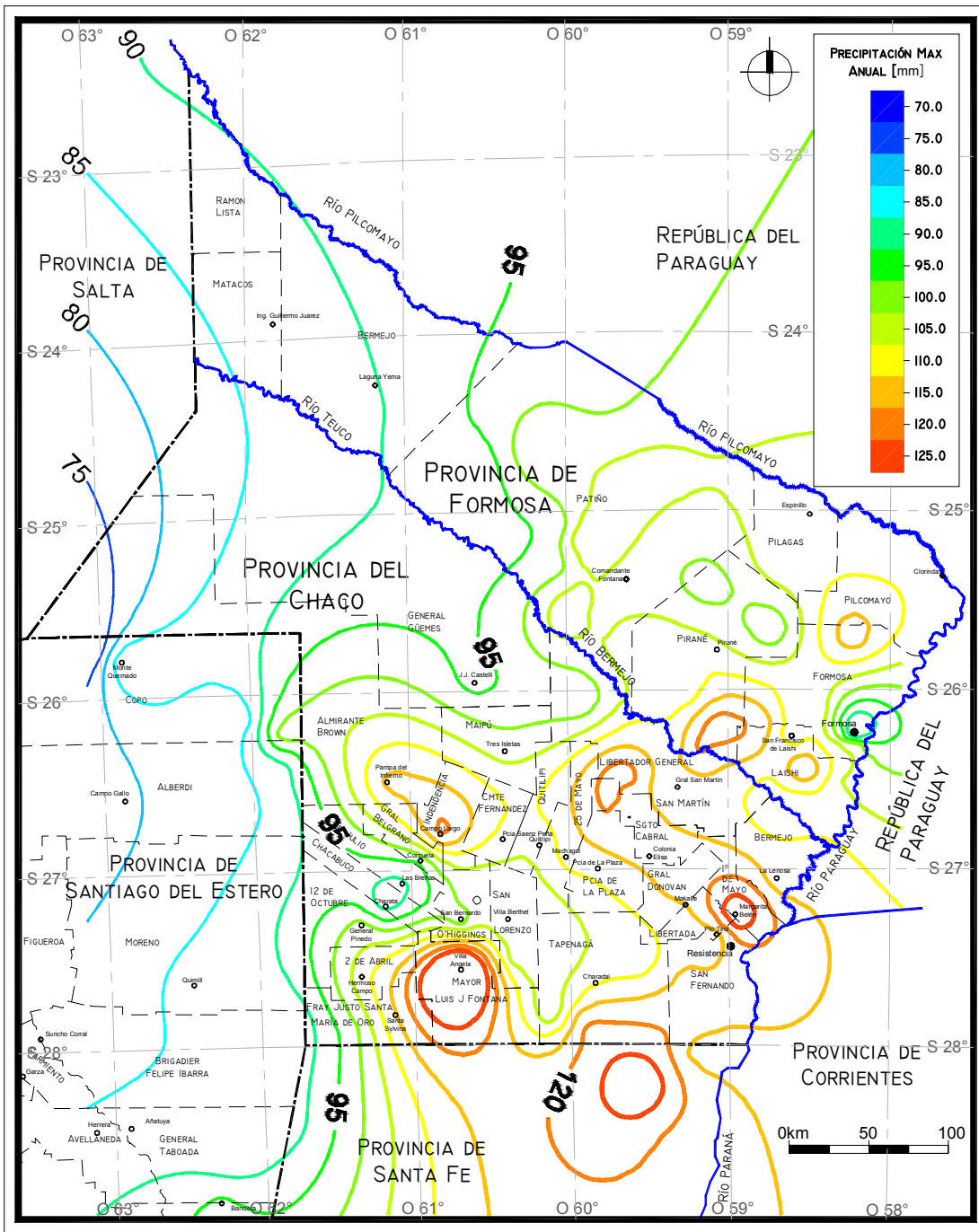


Figura 1.- Mapa de precipitaciones máximas anuales acumuladas de 1 día y 2,33 años de TR (Mendez *et al.*, 2011).

### Determinación de la precipitación máxima diaria en la región de estudio

Considerando que existe una proporcionalidad entre precipitaciones de diferentes duraciones (Bell 1969), es posible estimar las curvas IDF, en puestos donde no existen datos pluviográficos, a partir de datos de precipitaciones diarias.

En efecto, a partir de una ecuación genérica del tipo Sherman (Tucci, 2001), como la expresada en la ecuación [2] y calculando la relación entre precipitaciones de duraciones  $t_1$  y  $t_2$ , se obtiene una constante (ecuación [3], que varía con el tiempo de retorno.

$$I = \frac{aT^b}{(t+c)^d} \quad [2]$$

Donde:

I: Intensidad de precipitación (mm/h);

t: duración de la precipitación (min);

T: Tiempo de recurrencia (años);

a, b, c, d: parámetros de ajuste de la ecuación.

$$\frac{P_{t_1}}{P_{t_2}} = \frac{(t_2 + c)^d \cdot t_1}{(t_1 + c)^d \cdot t_2} \quad [3]$$

Obsérvese que la proporcionalidad planteada por Bell es válida para ecuaciones de IDF del tipo Talbot (ecuación [4]).

$$I = \frac{A}{(t + B)^C} \quad [4]$$

Donde A, B, C son parámetros a ser ajustados.

### Determinación de las curvas IDF de la región

A partir de la ecuación [5], y considerando el principio de proporcionalidad planteado anteriormente, se puede obtener las intensidades de precipitación en cualquier lugar sin datos pluviográficos, para cualquier duración y tiempo de retorno.

$$I_{t,TR} = P_{1\text{día},TR} \cdot \frac{P_{24\text{hs},TR}}{P_{1\text{día},TR}} \cdot \frac{1}{t} \cdot \underbrace{\frac{P_{t,TR}}{P_{24\text{hs},TR}}}_1 \quad [5]$$

Donde

$P_{1\text{día},TR}$ : precipitación diaria máxima anual de un tiempo de retorno TR;

$P_{24\text{hs},TR}$ : precipitación de 24hs de duración y tiempo de retorno TR;

$P_{t,TR}$ : precipitación de duración “t” y tiempo de retorno TR;

El valor de  $P_{1\text{día},TR}$  puede obtenerse del trabajo de regionalización realizado por Mendez *et al.* (2011), es decir mediante las isohietas de la Figura 1 (con las que se obtiene la precipitación diaria máxima anual de 2,33años) y la ecuación. [1], con la que se obtiene la precipitación diaria máxima anual para cualquier tiempo de recurrencia.

En tanto que la relación indicada como “1” de la ecuación. [5] puede remplazarse por el segundo término de la ecuación [3].

La relación  $P_{24\text{hs},TR} / P_{1\text{día},TR}$  puede definirse como  $R_{24\text{hs}/1\text{D}}$ . Esta relación es fundamental para la regionalización de IDF, dado que, la precipitación diaria corresponde a la altura precipitada entre dos observaciones pluviométrica diarias consecutivas (que se realizan a la misma hora), en tanto que la precipitación de 24 hs es el mayor valor de precipitación correspondiente a un periodo de 24 hs (Tucci, 2001).

El numerador de esta relación puede obtenerse de las curvas IDF del puesto pluviográfico, en tanto que el denominador se obtiene del ajuste regional de precipitaciones diarias para el mismo lugar, por lo que la ecuación [5] puede describirse como sigue (ecuación [6]):

$$I_{t,TR} = P_{1\text{día},TR} \cdot R_{24\text{hs}/1\text{día}} \cdot \frac{(24h + c)^d}{(t + c)^d \cdot 24h} \quad [6]$$

## ANÁLISIS DE LAS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS

En el análisis de las estaciones pluviográficas con las que se trazaron las curvas IDF se evaluó el registro de precipitaciones diarias de las mismas, en particular se estudió la variación del total anual precipitado, la precipitación máxima diaria y el coeficiente de asimetría (ecuación [7]).

$$g = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{(N-1) \cdot (N-2) \cdot S^3} \quad [7]$$

Donde:

g: coeficiente de asimetría de la muestra;

N: número de datos de la muestra;

S: desvío estándar de la muestra

Como el registro de precipitaciones diarias es más extenso que el registro pluviográfico, el análisis del primero permite conocer si la extensión de datos pluviográficos, con los que se ajustaron las curvas IDF, no cubren algunos años húmedos o precipitaciones extremas.

También, se compararon los regímenes de precipitaciones de las estaciones pluviométricas utilizadas. Eso se realizó cotejando, además de las variables y parámetros muestrales mencionados, el número de días por año que excedían los 100mm de altura precipitada.

### Asunción

En el caso de la ciudad de Asunción no se contó con los datos de precipitaciones diarias de esta ciudad, por lo que se recurrió al registro de la localidad de Clorinda, ubicada a 10km al oeste de la capital de la República del Paraguay. En tal sentido, el registro utilizado de precipitaciones diarias de Clorinda se extiende desde el año 1967 al 2010.

En la Figura 2 puede observarse que las precipitaciones máximas diarias guardan correlación con el total anual precipitado y que las líneas que indican las medias móviles de 10 años de ambas variables muestran cierto paralelismo. En la Figura 2, con líneas verticales verdes se limita el período de datos utilizados para el trazado de las curvas IDF.

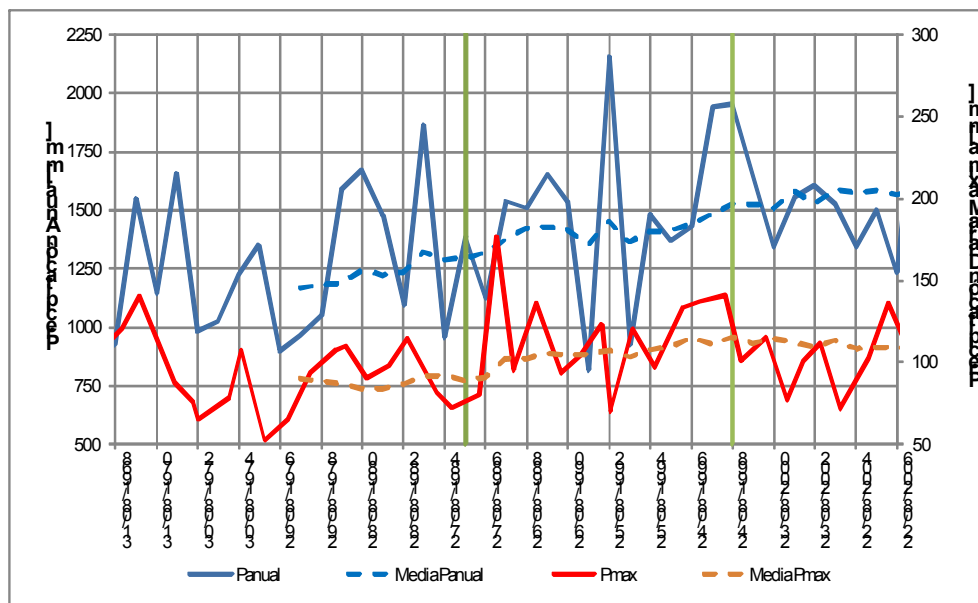


Figura 2.- Precipitaciones anuales y máximas diarias de Clorinda.

En la Figura 3 se ve que al aumentar la precipitación anual, aumenta el coeficiente de asimetría, indicando que en años húmedos aumenta la presencia de precipitaciones diarias altas. Aunque esta tendencia cambia a partir del año 2000, donde se registran coeficientes de asimetría bajos.

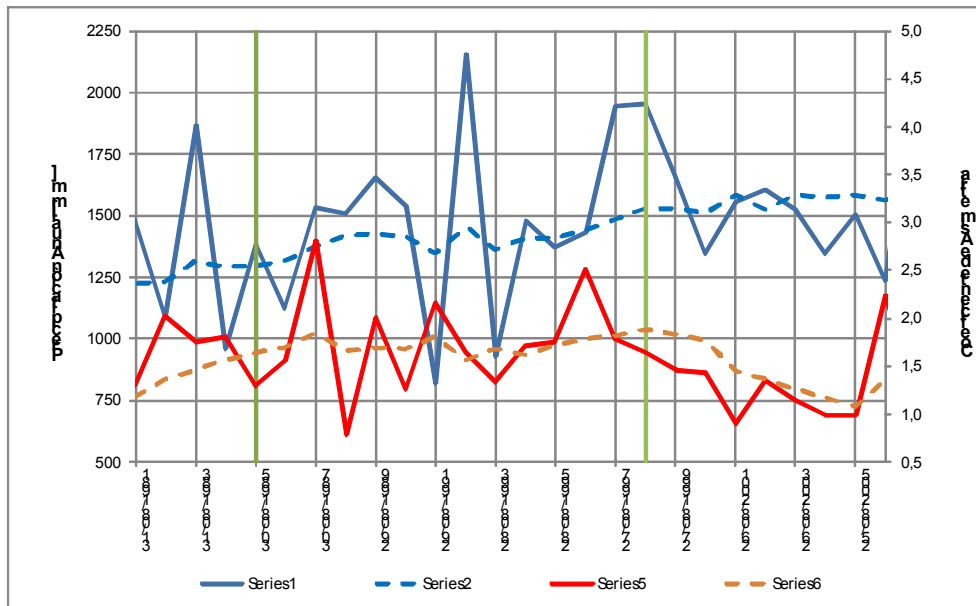


Figura 3.- Precipitaciones anuales y coeficiente de asimetría de Clorinda.

### El Colorado

El registro utilizado de precipitaciones diarias de El Colorado se extiende del año 1967 al 2007. En la Figura 4 puede observarse que las precipitaciones máximas diarias guardan correlación con el total anual precipitado y que las líneas que indican las medias móviles de 10 años de ambas variables se mantienen bastante paralelas. Con líneas verticales verdes se limita el período de datos utilizados para el trazado de las curvas IDF. Obsérvese que el mismo no incluye años 1982/1983 y 1985/1986, que presentan los valores observados más altos de precipitaciones anuales y máximas diarias.

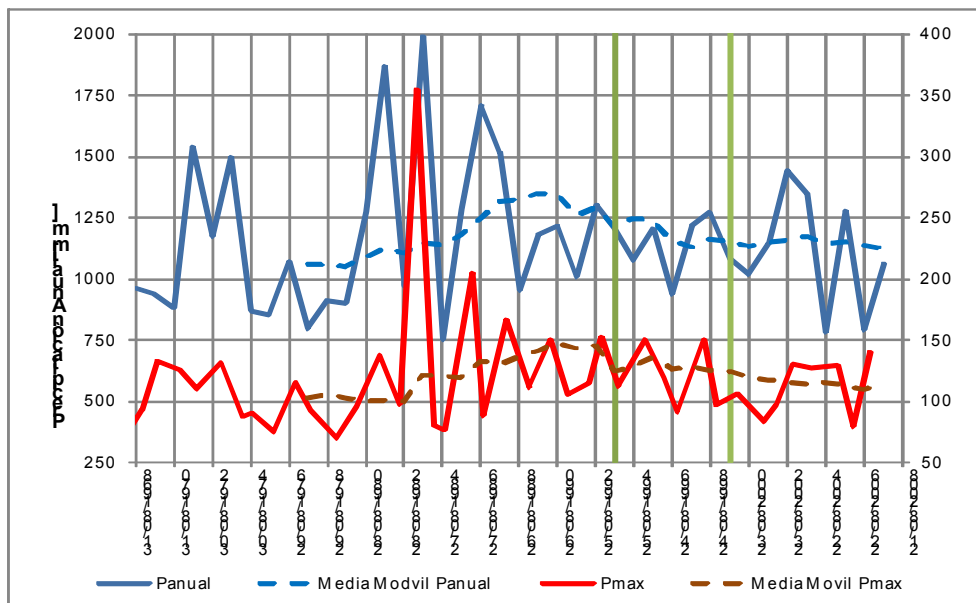


Figura 4.- Precipitaciones anuales y máximas diarias de El Colorado.

La Figura 5 indica que, al igual que en Clorinda, al aumentar la precipitación anual, aumenta el coeficiente de asimetría, indicando que en años húmedos aumenta la presencia de precipitaciones diarias altas.

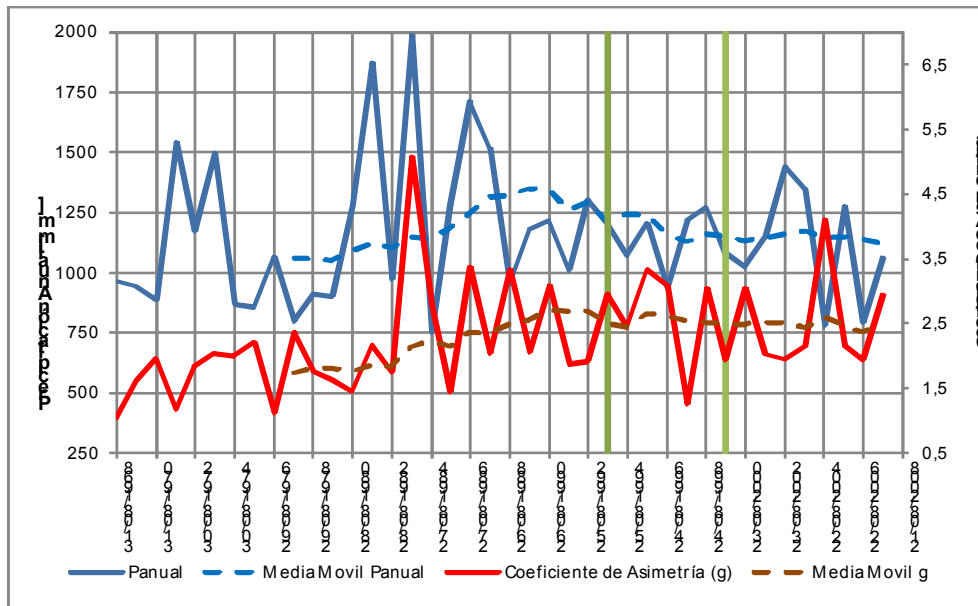


Figura 5.- Precipitaciones anuales y coeficiente de asimetría El Colorado.

### Presidencia Roque Sáenz Peña

El registro utilizado de precipitaciones diarias de Pcia. Roque Sáenz Peña se extiende del año 1961 a 2010. En la Figura 6 puede observarse que las precipitaciones máximas diarias guardan correlación con el total anual precipitado.

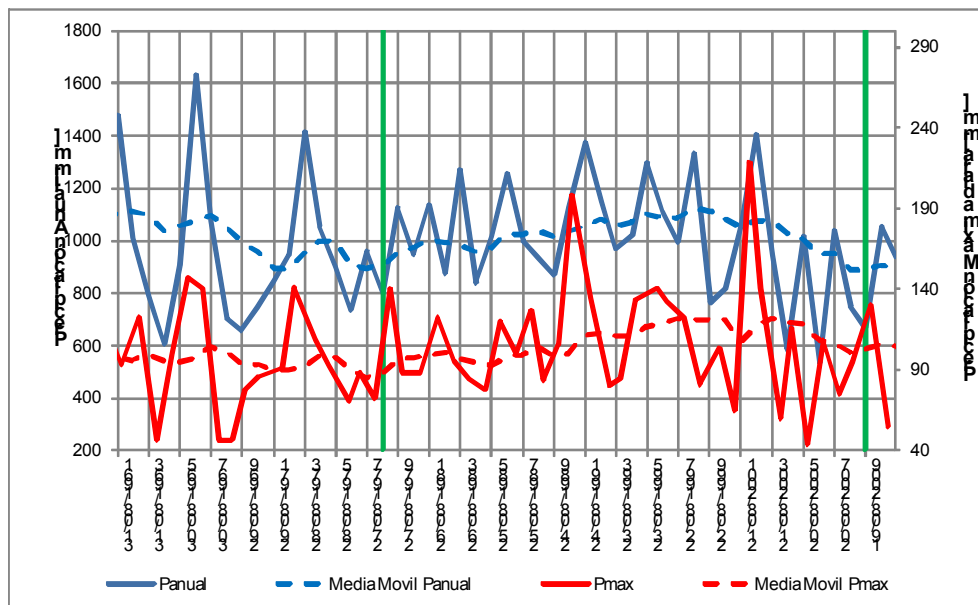


Figura 6.- Precipitaciones anuales y máximas diarias de Pcia Saenz Peña.

En la Figura 6 se observa que en esta estación, a diferencia de Clorinda y El Colorado, no hay una marcada relación entre las precipitaciones anuales y el coeficiente de asimetría. Esta variabilidad se acentúa a partir del 2000/01, donde se presentan años con precipitaciones anuales bajas y con coeficiente de asimetría alto, indicando una fuerte incidencia de precipitaciones diarias altas en el total anual precipitado.



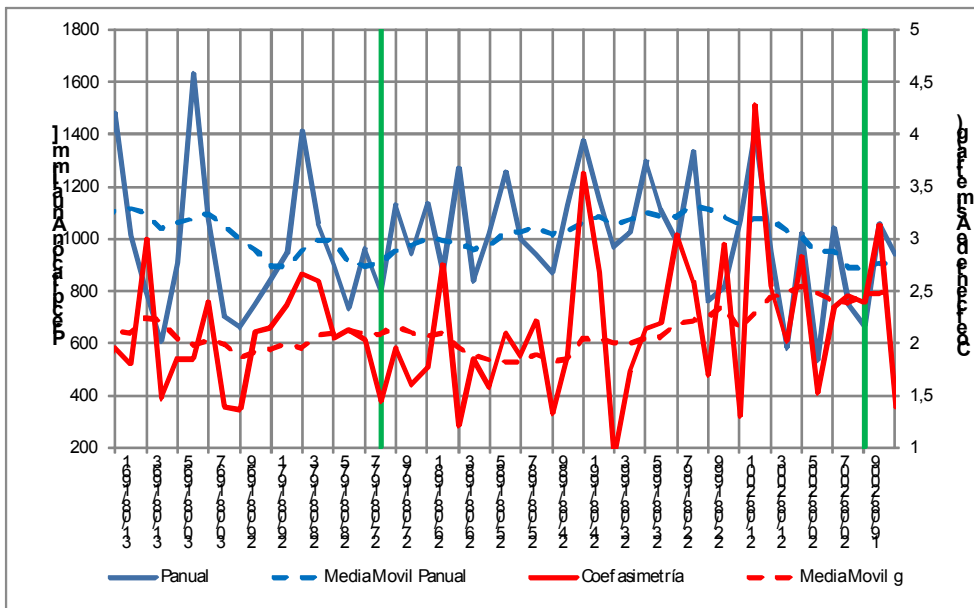


Figura 7.- Precipitaciones anuales y coeficiente de asimetría Pcia Saenz Peña.

### Resistencia

El registro utilizado de precipitaciones diarias de Resistencia se extiende del año 1955 al 2010. Se destaca que, si bien las curvas IDF de Resistencia fueron ajustadas en un periodo de 1960 a 2005, en el período que va de 1984 a 1995 no se contó con datos de intervalos de tiempo menores a 60min. En la Figura 8 puede observarse que las precipitaciones máximas diarias guardan correlación con el total anual precipitado. También se puede constatar que para el periodo 1984 a 1995 se registraron dos de las tres precipitaciones diarias máximas anuales más importantes del registro.

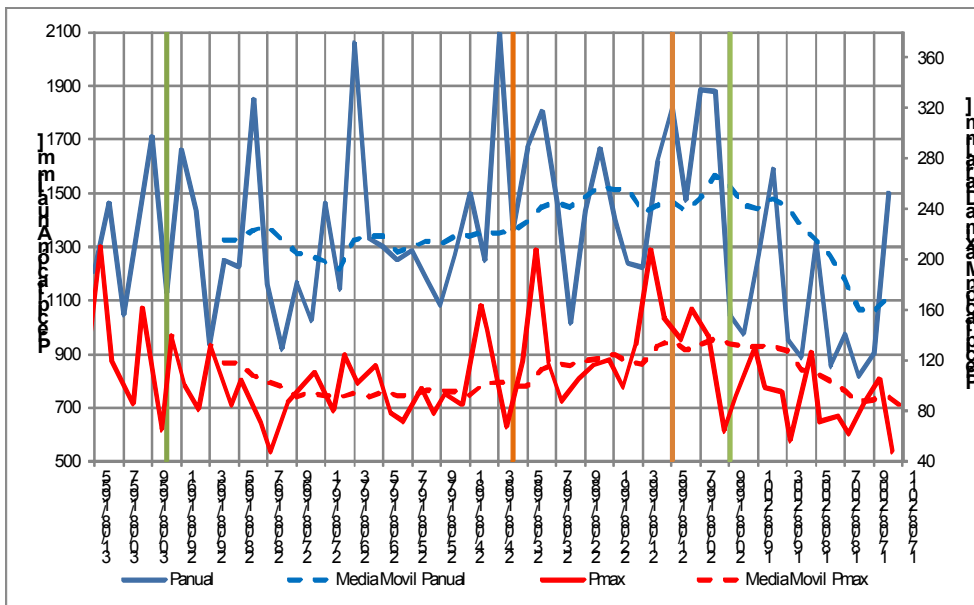


Figura 8.- Precipitaciones anuales y máximas diarias de Resistencia.

La Figura 9 indica que, al igual que en Clorinda y El Colorado, al aumentar la precipitación anual aumenta el coeficiente de asimetría, indicando que en años húmedos aumenta la presencia de precipitaciones diarias altas.

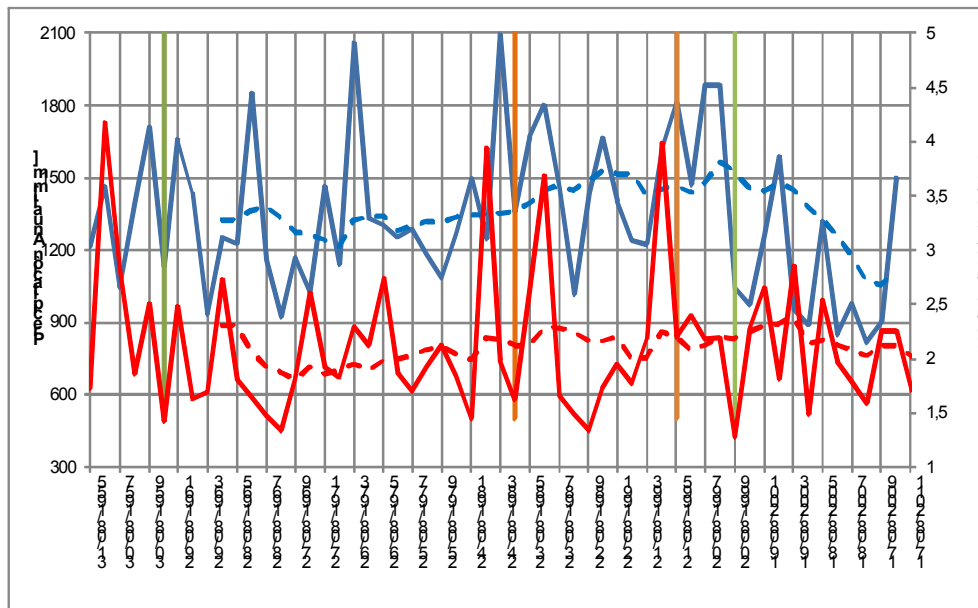


Figura 9.- Precipitaciones anuales y coeficiente de asimetría de Resistencia.

**Análisis comparativo entre estaciones**

En las Figuras 10, 11 y 12 se puede observar la variación de la media móvil de 10 años de precipitación anual, la precipitación máxima diaria, el coeficiente de asimetría respectivamente. En la Figura 10 se puede constatar que Resistencia presenta precipitaciones anuales mayores a las demás estaciones hasta el año 1999, donde es superada por los valores de Clorinda.

Las medias móviles de las precipitaciones máximas diarias son más variables. De esta última variable se destaca que Resistencia presenta valores mayores a Pcia. Roque Sáenz Peña; sin embargo esta tendencia se revierte a partir de 2003. En contraste con las precipitaciones anuales, Clorinda presenta los valores más bajos de precipitaciones máximas diarias del conjunto de estaciones analizadas.

Además, en la Figura 12 se puede constatar que El Colorado presenta valores de media móvil del coeficiente de asimetría mayores a los de las demás estaciones y que Resistencia y Pcia. R. Sáenz Peña presentan valores similares, excepto en el periodo que va desde 1981 a 1991, donde Resistencia presenta valores marcadamente superiores. Sin embargo, esto último se revierte a partir del año 2003, presentando Pcia. R. Sáenz Peña valores de coeficiente de asimetría superiores a los de Resistencia. Se destaca que Clorinda presente valores de coeficiente de asimetría ostensiblemente menores al resto de las estaciones.

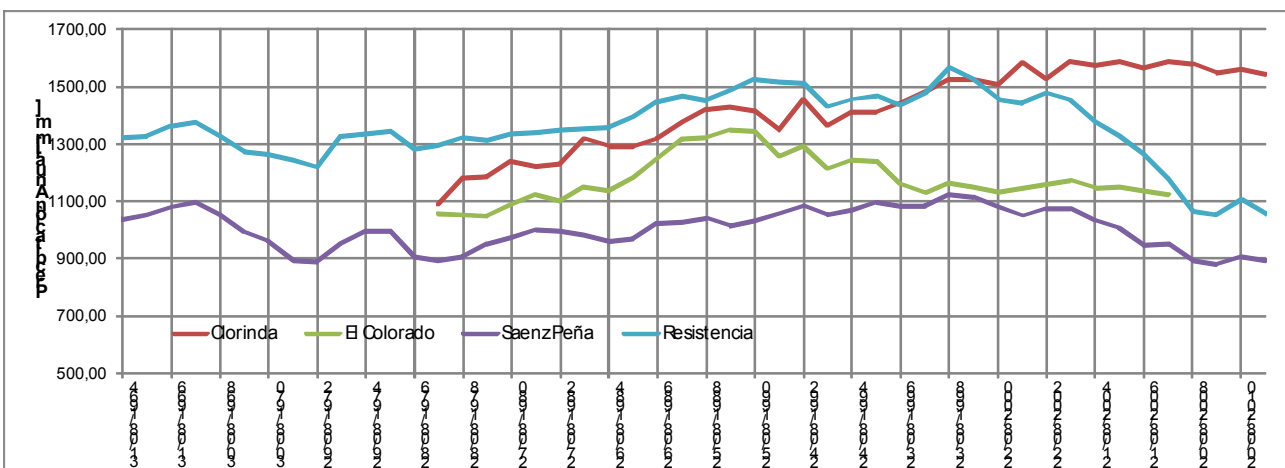


Figura 10.- Media móvil de 10 años de la precipitación anual.

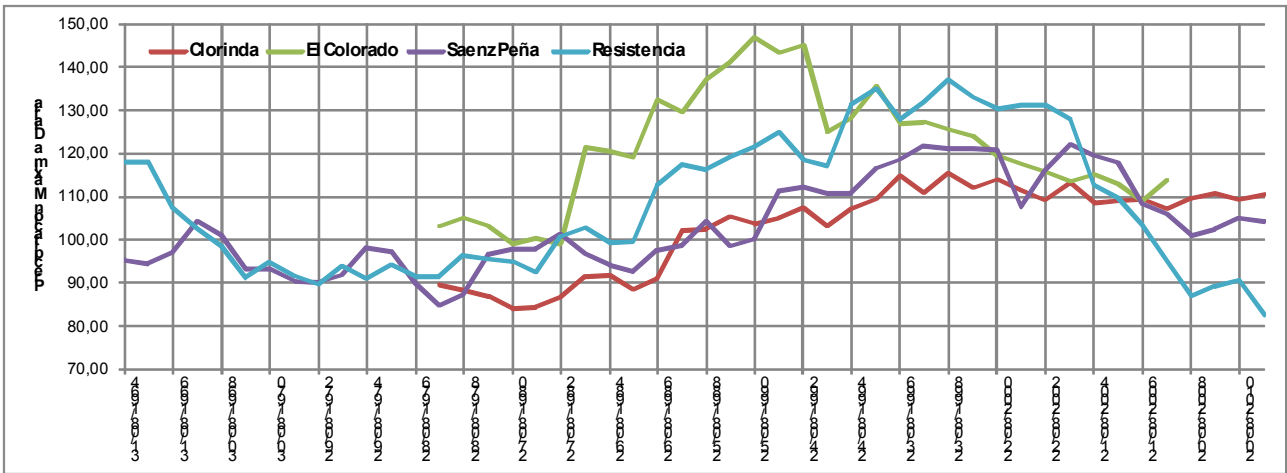


Figura 11.- Media móvil de 10 años de la precipitación máxima diaria.

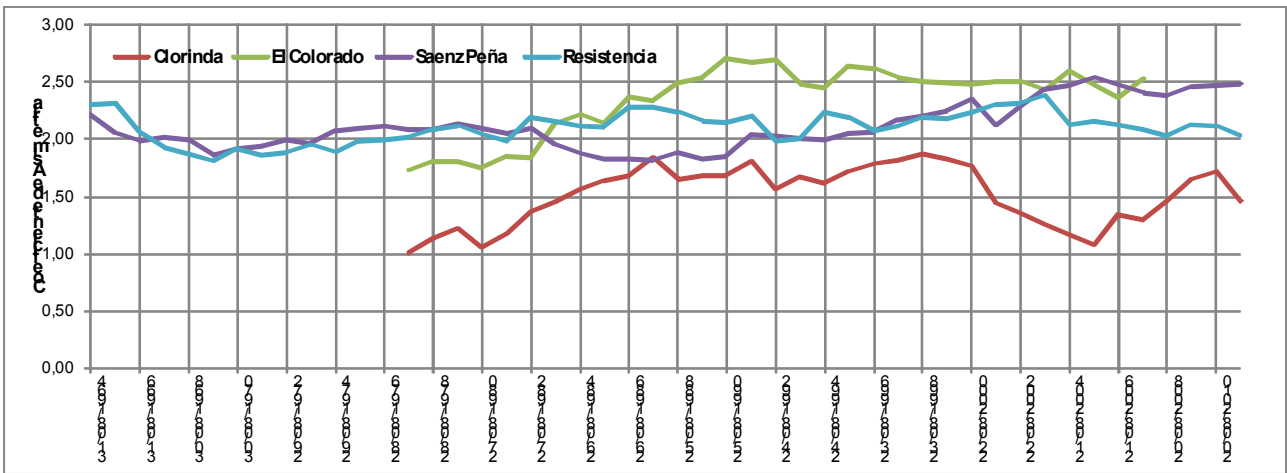


Figura 12.- Media móvil de 10 años del coeficiente de asimetría.

Este cambio de tendencia a partir del año 2003 se debe a que Resistencia ha registrado una marcada reducción del número de precipitaciones diarias de más de 100mm a partir de 1999, no siendo así en Pcia Roque Sáenz Peña (Figura 13).

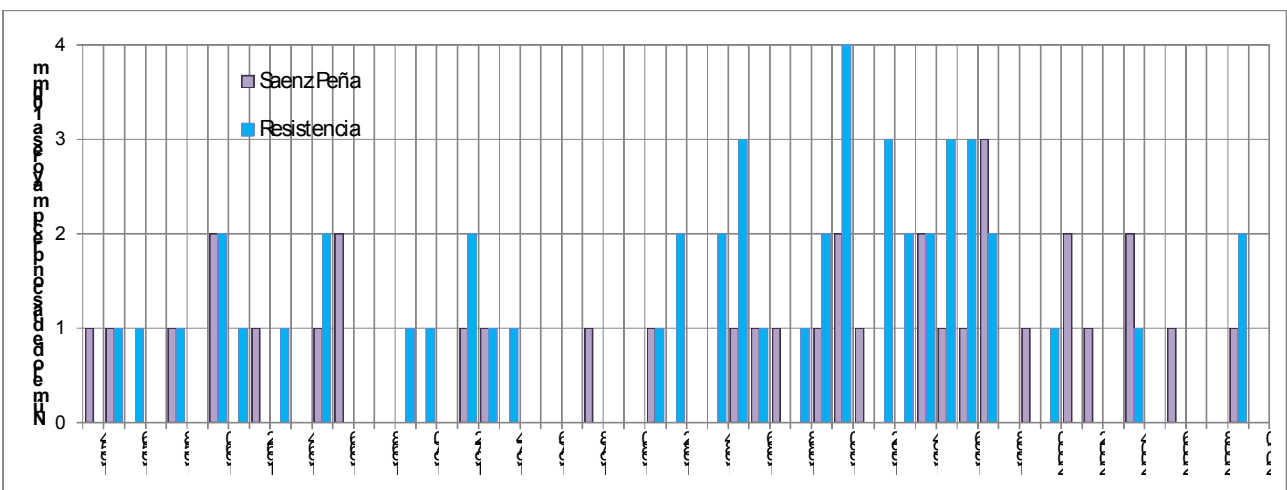


Figura 13.- Número de días con precipitaciones de más de 100mm.

## ELECCIÓN DE LA ESTACIÓN PLUVIOGRÁFICAS

Para la elección de las curvas IDF a utilizar en la regionalización se analizó la variabilidad que tendrían las curvas IDF regionales de utilizarse cualquiera de las cuatro estaciones en cuestión.

### Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó a partir de la variabilidad de la ecuación [6] para cada una de las cuatro estaciones con curvas IDF. Para ello, a los parámetros de la ecuación [6] que son dependientes de la curva a utilizar se los agrupó según lo mostrado en la ecuación [8].

$$X = P_{día;TR} \cdot R_{24hs/1día} \cdot \frac{(24h + c)^d}{(t + c)^d \cdot 24h} \quad [8]$$

En la Tabla 2 se indican los factores utilizados para el análisis de variabilidad de cada una de las curvas IDF.

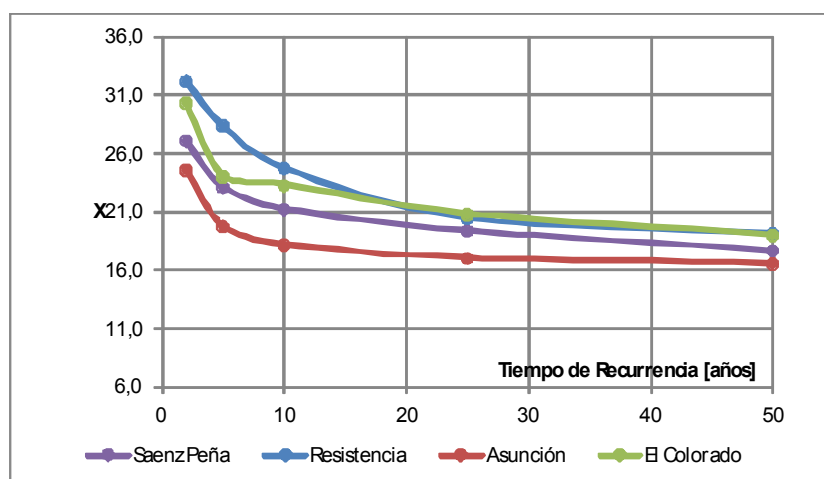
**Tabla 2.-** Parámetros utilizados para realizar el análisis de sensibilidad.

TR (años)	Asunción			El Colorado			Pcia. R. Sáenz Peña			Resistencia		
	R <sub>24/1d</sub>	C	d	R <sub>24/1d</sub>	C	d	R <sub>24/1d</sub>	C	d	R <sub>24/1d</sub>	C	d
2	0,800	34	0,9	1,526	9,7	0,7	0,839	32,0	0,9	1,636	8,1	0,6
5	0,643	34	0,9	1,335	17,6	0,7	0,957	30,9	0,9	1,306	11,1	0,7
10	0,591	34	0,9	1,637	11,0	0,6	1,055	28,1	0,8	1,191	16,0	0,7
25	0,554	34	0,9	1,789	14,7	0,6	1,169	27,4	0,7	1,115	24,5	0,7
50	0,539	34	0,9	1,820	23,4	0,6	1,314	27,4	0,7	1,179	24,0	0,7

Asunción presenta valores de R<sub>24/1día</sub> menores a 1. Ello puede deberse a que se utilizaron extensiones distintas de registro de datos para el ajuste de la curva de probabilidades regional de precipitaciones máximas diarias y las curvas IDF de esa ciudad.

También Pcia. R. Sáenz Peña presenta valores de R<sub>24/1día</sub> inferiores a 1 para tiempos de recurrencia de 2 y 5 años. Ello puede deberse a errores en el ajuste de los modelos estadísticos usados para realizar la regionalización de precipitaciones máximas diarias y las curvas IDF.

A partir de lo expuesto se evaluó la variabilidad del valor de X (ecuación [7]) para distintos tiempos de recurrencia (TR) y duraciones de tormenta de 5, 15, 30 y 60min (Figuras 14, 15, 16 y 17 respectivamente).



**Figura 14.-** Variación de X para duración de 5min.

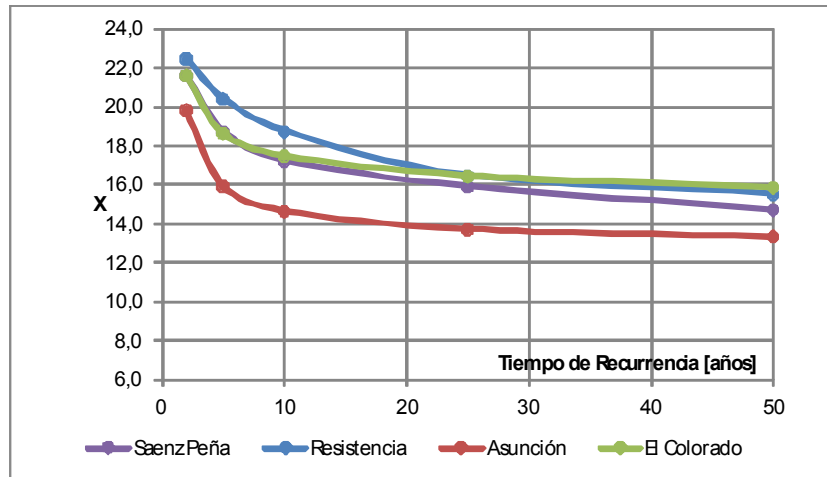


Figura 15.- Variación de X para duración de 15min.

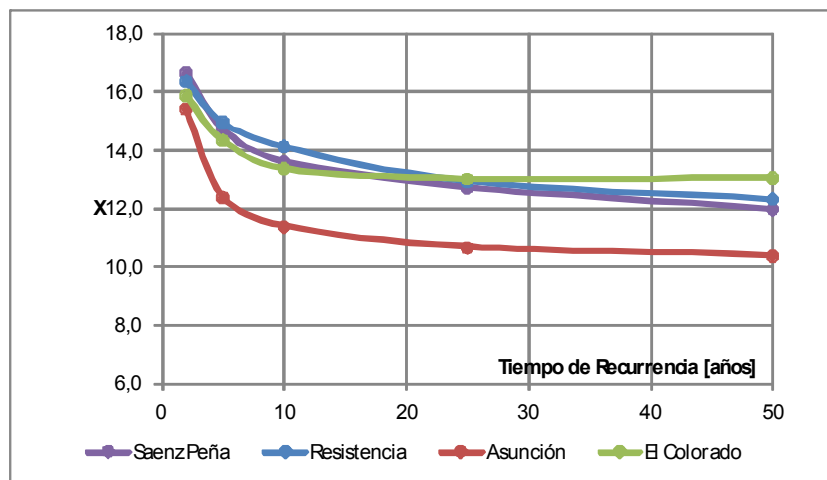


Figura 16.- Variación de X para duración de 30min.

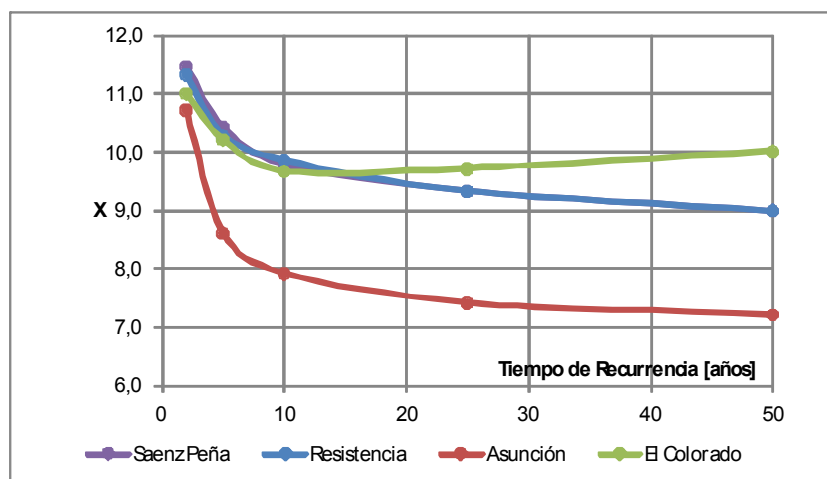


Figura 17.- Variación de X para duración de 60min.

De la observación de las Figuras 14 a 17 se puede constatar que, de utilizarse las curvas IDF de Asunción para la regionalización de sus homónimas en las provincias de Chaco y Formosa, se obtendrían valores siempre inferiores a los obtenidos en caso de utilizarse las otras estaciones analizadas. Es posible que esta diferencia esté relacionada a la diferencia significativa que presentan los valores de coeficientes de asimetría de Clorinda (estación cercana a Asunción) respecto de las demás estaciones. Esto indica que Asunción y sus zonas aledañas presentan una menor frecuencia de precipitaciones intensas respecto al conjunto analizado.

En tanto, Resistencia presenta valores de X mayores de que Pcia. Roque Sáenz Peña, pero estas diferencias tiende a reducirse a medida que aumenta la duración de la tormenta. Por último, El Colorado presenta divergencias respecto a los valores de X de Resistencia y Pcia. R. Sáenz Peña a medida que aumenta la duración t. Se enfatiza que las curvas IDF de El Colorado fueron ajustadas con 8 años de registro que no incluye años húmedos, como por ejemplo 1983/84 (Figuras 4 y 5).

### ERRORES DE LA REGIONALIZACIÓN DE CURVAS IDF

Utilizando las curvas de IDF de Resistencia se trazaron las curvas homólogas para Asunción, El Colorado y Pcia. R. Sáenz Peña, y se determinaron las diferencias con los resultados de las curvas IDF de esos puestos (Figuras 18, 19 y 20).

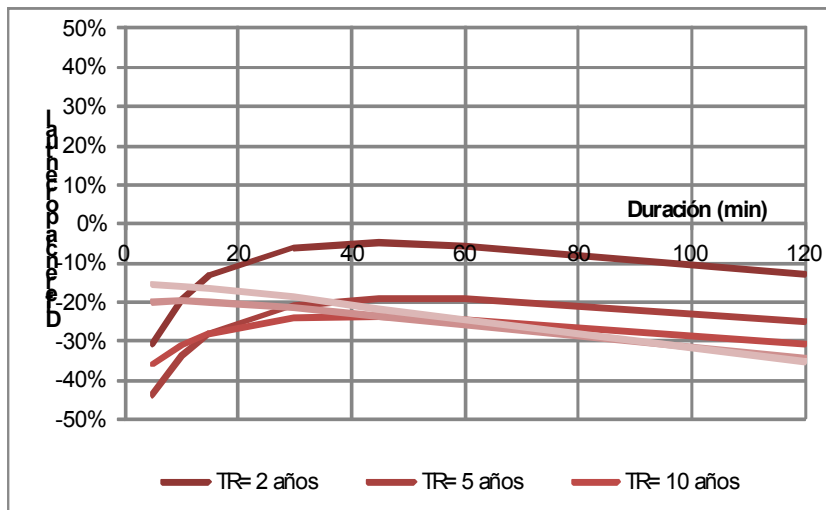


Figura 18.- Diferencias porcentuales con las curvas IDF de Asunción.

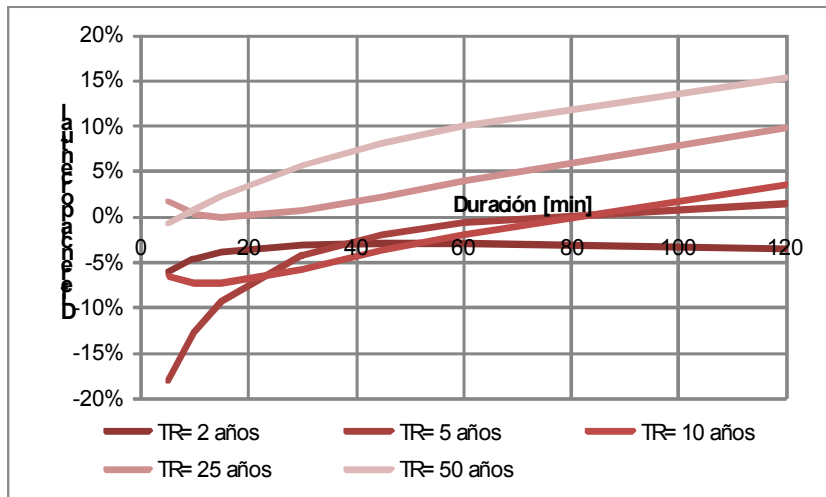


Figura 19.- Diferencias porcentuales con las curvas IDF de El Colorado.

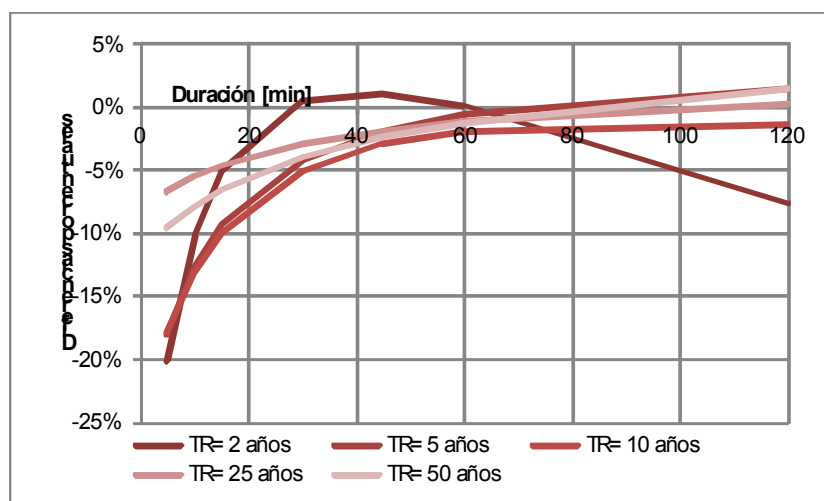


Figura 20.- Diferencias porcentuales con las curvas IDF de Sáenz Peña

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como fue mencionado, se pudo constatar que de utilizarse las curvas IDF de Asunción para la regionalización de sus homónimas en las provincias de Chaco y Formosa, se obtendrían valores siempre inferiores a los de utilizarse las otras estaciones analizadas, por lo que se descartó las curvas IDF de Asunción para el ajuste regional.

De utilizarse las curvas IDF de El Colorado se obtendrían divergencias respecto a los valores de Resistencia y Pcia. R. Sáenz Peña a medida que aumenta la duración; además el período de datos utilizados para el trazado de las curvas IDF no incluye años 1982/1983 o 1985/1986, que presentan los valores más altos de precipitaciones anuales y máximas diarias registradas en El Colorado.

Se recomienda la utilización de las curvas IDF de Resistencia, dado que presenta valores levemente superiores a los de Pcia. R. Sáenz Peña, considerando el criterio de máxima (criterio precautorio), usualmente elegido para el dimensionamiento de obras hidráulicas.

De la comparación de los datos pluviométricos de las cuatro estaciones analizadas se observa un cambio de tendencia a partir del año 2003. En efecto, Resistencia ha registrado una marcada reducción del número de precipitaciones diarias de más de 100mm a partir de 1999, no siendo así para Pcia. Roque Sáenz Peña.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceituno, P.** (1988). "On the Functioning of the South American Sector" *Part I Surface Climate. Mon. Wea. Rev.* n116, pp 505-524. In: **Marengo, J.A.** (2004). "Caracterización y Evaluación de Métodos de Predicción de Eventos Extremos de Clima y de la Hidrología en la Cuenca del Plata" Programa Marco para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata en Relación con los Efectos Hidrológicos de la Variabilidad del Cambio Climático.
- Bell, F.C.** (1969). "Generalized rainfall duration frequency relationships". *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 95, n1.
- Bravo, J.M.; C.E.M. Tucci; R. Tassi y D. Allasia** (2008). "Regionalização de Curvas Intensidade, Duração e Freqüencia de Precipitação: Aplicação ao Distrito Federal". *II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Bruniard, E.D.** (1981). "El Clima de las Planicies del Norte Argentino (Ensayo metodológico de geografía de los climas)" *Tesis de Doctorado en Geografía de la Facultad de Humanidades de la Universidad Nacional del Nordeste*.

- Depettris, C. y J. Pilar** (2001). “Estudio de curvas IDF para el Área Metropolitana del Gran Resistencia”. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, UNNE, Campus Libertad, Corrientes.
- Fariás, H.D. y L.A. Olmos** (2007). “Estudio Regional de las Lluvias Máximas Diarias. Aplicación a la Llanura Chaqueña Argentina”. *XXI Congreso Nacional Del Agua*, San Miguel de Tucumán, provincia de Tucumán.
- Mendez, G.J.; A.R. Ruberto; J.V. Pilar y C.A. Depettris** (2011). “Regionalización de Precipitaciones Máximas Acumuladas de 7, 15 Y 30 Días para las Provincias de Chaco y Formosa”. *Revista ASAGAI* n26.
- Monte Domecq, R.** (1995). “Elaboración de curvas IDF: intensidad–duración – frecuencia a nivel regional”. *Informe del proyecto de Investigación*. Universidad Nacional de Asunción.
- Pilar, J.V.; A.R. Ruberto; C.A. Depettris; S.E. Gabazza y E.J. Kutnich** (2007). “Actualización y Análisis de las Curvas IDF en el Área Metropolitana del Gran Resistencia [AMGR]”. *XXI Congreso Nacional del Agua*, San Miguel de Tucumán, provincia de Tucumán.
- Ropelewski, C. y M. Harper** (1987). “Global and regional scale precipitation patterns and connections with the southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* n 115, pp 1606-1626. In: **Marengo, J.A.** (2004). “Caracterización y Evaluación de Métodos de Predicción de Eventos Extremos de Clima y de la Hidrología en la Cuenca del Plata” Programa Marco para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata en Relación con los Efectos Hidrológicos de la Variabilidad del Cambio Climático.
- Ropelewski, C. y M. Harper** (1989). “Precipitation patterns associated with the high index phase of the southern oscillation. *Journal of Climate*. Pp 268 – 284. In: **Marengo, J.A.** (2004). “Caracterización y Evaluación de Métodos de Predicción de Eventos Extremos de Clima y de la Hidrología en la Cuenca del Plata” Programa Marco para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata en Relación con los Efectos Hidrológicos de la Variabilidad del Cambio Climático.
- Ruberto, A.R. y M.J.M. Gómez** (2009). “Análisis de las Curvas IDF de Presidencia Roque Sáenz Peña [Chaco]”. *XXII Congreso Nacional del Agua*, Trelew, provincia de Chubut.
- Tucci, C.E.M.** (2001). “*Hidrologia: ciência e aplicação*”. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 943 pp.
- Valiente, M.** (2000). “Relaciones Intensidad – Duración - Frecuencia para la región de Presidencia Roque Sáenz Peña, Chaco”. *Curso de posgrado de Hidrología Urbana*, Dpto. de Hidráulica. FI-UNNE.



## MÁXIMOS “MENSUALES” DE PRECIPITACIÓN SEGÚN LOS MÉTODOS MovNd y MovN\*N

*Liliana Núñez, E. Carolina González Morinigo, Vanina L. Ferrero, Gerardo Ogdon*  
*Servicio Meteorológico Nacional, Argentina. email: lnunez@smn.gov.ar*

**RESUMEN:** Los procesos que afectan al tiempo y al clima, y estos mismos, no coinciden con el ciclo calendario. En particular, los ciclos de las variables meteorológicas, como la precipitación, no coinciden rigurosamente con ellos. El problema que se plantea abarca a la totalidad de las variables temporales, pero para ejemplificarlo se utilizará a la precipitación, parte del ciclo hidrológico, fuente del agua dulce, base de la vida en el planeta. La variabilidad de la precipitación es una de las principales causas de incertidumbre y riesgo para las actividades productivas del país, la precipitaciones extremas, aquellas que ocurren fuera de las condiciones promedio y de la típica variabilidad de sus promedios, pueden afectar severamente a la economía de un país o región. Emplear únicamente los valores mensuales calendario para la precipitación a los fines de uso efectivo del agua, ya sea para los sistemas hidrológicos, los suelos, y todas las actividades dependientes de ella, puede llevar a la toma de decisiones erróneas que pueden acarrear enormes pérdidas. En este trabajo se describen los métodos MovNd y MovN\*N, para analizar series temporales, en todas las escalas de tiempo. Aplicados a la precipitación han sido utilizados, desde el año 2005, en el departamento Agrometeorología del Servicio Meteorológico Nacional para la identificación de la extensión e intensidad de períodos secos y húmedos. La metodología MovNd permite tener un mejor conocimiento de las características climáticas de las series en estudio, conocer las singularidades registradas entre los límites de los períodos en que se las está analizando y la MovN\*N las integra o resume. En este trabajo, a partir de estos dos métodos, se evalúa la precipitación extrema mensual Mov31\*31d del período 1971-2000 y se la compara con la extrema Mov31d (mensual) calendario de igual período, mostrándose las importantes diferencias existentes entre ambas, diferencias que pueden llevar a errores a la hora de la toma de decisiones.

**PALABRAS CLAVES:** características climáticas, extremos, precipitación

## INTRODUCCIÓN

Todos los procesos temporales, sea de la índole que sean, están regidos por leyes que rara vez presentan ciclos estrictos (Núñez, 2005; Núñez y Podestá, 2006).

Los procesos que afectan al tiempo y al clima son tanto exógenos como endógenos. Numerosos procesos externos a la Tierra, debidos a la interacción entre todos los cuerpos del sistema solar, como los cambios en la atracción gravitacional entre todos los cuerpos del mismo sistema, cambios en las distancias orbitales, cambios en las tasas de rotación de los planetas alrededor del Sol, cambios en la velocidad de rotación de estos cuerpos alrededor de sus ejes de rotación, cambios en la actividad solar, en las manchas solares, en la radiación solar al tope de la atmósfera, en el viento Solar y en los rayos cósmicos, afectan al tiempo y al clima del planeta con procesos en escalas de tiempo que van desde segundos hasta millones de años. Numerosos procesos endógenos en los que interviene la estructura de la Tierra, los cambios del geode con procesos centro-manto, cambios en el radio de la Tierra debidos a torques viscosos del corazón, acoplamiento electromagnético, unión electromagnética entre el centro y el manto, cambio en la distribución de las placas tectónicas, terremotos, cambio en la distribución de masa, distribución tierra/mar, cambio del nivel del mar - carga del nivel del mar y cambios en sus circulación, cambios en la distribución del hielo por derretimiento del mismo y cambios en el volumen glaciario, cambio en la distribución del agua en la tierra, cambios en la superficie de la tierra, variación de las superficies equipotenciales en la atmósfera, carga de la atmósfera, vientos fricción superficial, presión en montañas, cambios en los aerosoles, cambios en la producción de  $^{14}\text{C}$ , en la composición química atmosférica, cambios de la gravedad, cambios en el geomagnetismo, cambios de la rotación terrestre (duración del día) afectarán al tiempo y al clima del planeta con procesos en variadas escalas de tiempo que van desde segundos hasta millones de años (Mörner, 1984 a y b).

Por esto, los procesos que afectan al tiempo y al clima, y estos mismos, no coinciden con el ciclo calendario, en particular, los ciclos de las variables meteorológicas, como la precipitación, no coinciden rigurosamente con los períodos calendarios. A pesar de esto, en la mayoría de las ramas de las ciencias se los estudia a partir de períodos de 1 año, 10, 30 años, 1, 2, 3, 6, 9, 12 meses, y a los meses se les da la longitud calendario, una longitud variable que en general no tiene que ver con los procesos que se están estudiando.

La precipitación es parte del ciclo hidrológico, fuente del agua dulce, base de la vida en el planeta. La variabilidad de la precipitación es una de las principales causas de incertidumbre y riesgo para las actividades productivas del país, las precipitaciones extremas, aquellas que ocurren fuera de las condiciones promedio y de la típica variabilidad de sus promedios, pueden afectar severamente a la economía de un país o región. Por este motivo, en este trabajo se eligió a la precipitación para describir y ejemplificar el método que se presenta.

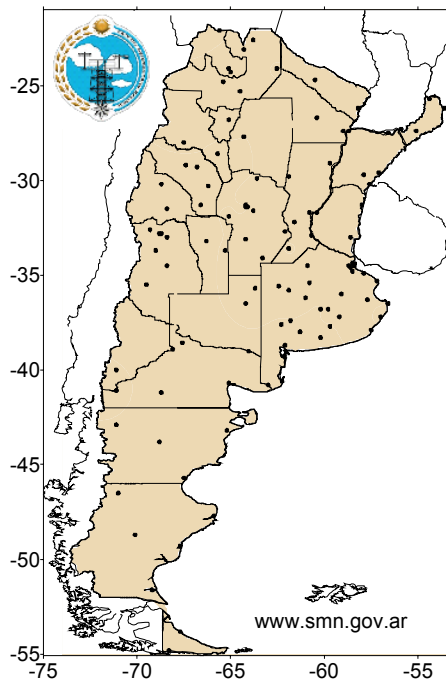
## DATOS UTILIZADOS, PERÍODO y ÁREA DE ESTUDIO

Se han utilizado los datos diarios de precipitación de estaciones sinópticas de superficie, actualmente operativas, del Servicio Meteorológico Nacional. Ellos fueron provistos por el Banco Nacional de Datos de esta institución, por este motivo, para este trabajo, no les fue realizado ningún tipo de consistencia ya que ésta ha sido realizada en varias oportunidades por la Institución, un detalle de la misma fue presentada por Marino (2007).

En los últimos años, se han registrado grandes variaciones en la precipitación, aumentos o disminuciones han sido observadas en distintos lugares del planeta, por este motivo y para este estudio se ha elegido al período 1971-2000, por ser el último de igual longitud al “normal”

actualmente en vigencia, para el cual el trabajo de control y consistencia de los datos ha sido totalmente finalizado.

La ubicación de las estaciones empleadas en el análisis se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.-** Estaciones de la red sinóptica del Servicio Meteorológico nacional utilizadas en este trabajo.

## METODOLOGIA

### Método MovN

La forma de analizar a la precipitación, muy usada en numerosas investigaciones, es a partir de la precipitación acumulada hasta el último día del período de estudio, precipitación mensual, trimestral, anual, etc, este análisis es global y desconoce lo que ha ocurrido durante ese intervalo de tiempo. Para tener un mejor conocimiento, del comportamiento de las distintas variables, en todas las escalas temporales, se propuso (Núñez, 2005) una metodología de acumulación en períodos móviles de N días (MovNd), la cual se ha estado utilizando en el Departamento Agrometeorología del SMN, desde el año 2005, para la identificación de la extensión e intensidad de los períodos secos y húmedos (Núñez y Podestá, 2006).

Si lo que se estudia es la precipitación mensual a lo largo del año, entonces se evalúa la precipitación acumulada en 31 días para enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre y diciembre, en 30 días para abril, junio, septiembre y noviembre, y en 29 ó 28 días para febrero según si el año es bisiesto o no (ecuación [1]). Se obtienen así 12 datos, que son el resultado de la acumulación de la precipitación de una distinta cantidad de días según cuál es el mes.

$$PP\_mensual(j) = \sum_{df-n}^{df} p(i) \quad [1]$$

Donde  $PP\_mensual(j)$  es la precipitación del mes  $j$ ,  $df$  el día final del mes,  $n$  la longitud del mes menos 1 y  $p(i)$  es la precipitación diaria.

Para la precipitación MovNd “mensual” N es igual a 31 días (ecuación [2]). Se eligió este N ya que está es la longitud de 7 de los 12 meses del año. Para cada uno de los días del año, se acumula la precipitación diaria del día para el que se calcula el Mov31d más la de los 30 días previos. Así se obtienen 365 datos, que son el resultado de la acumulación de una igual cantidad de días.

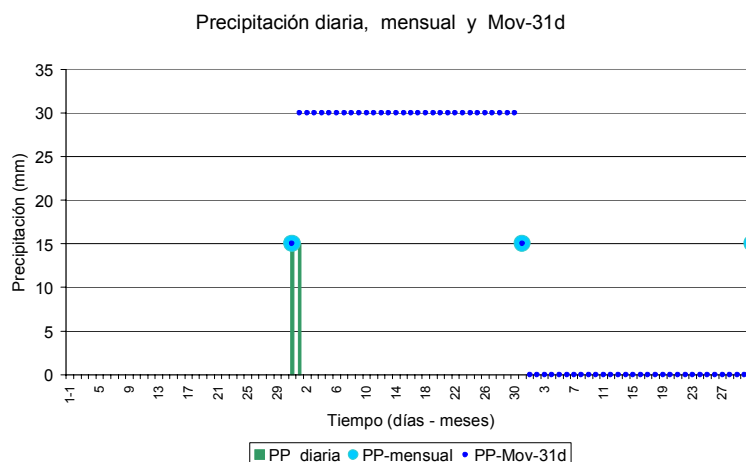
$$PP\_Mov31d(j) = \sum_{df-30}^{df} p(i) \quad [2]$$

Donde  $PP\_Mov31d(j)$  es la precipitación Mov31d para el día j, df el día final del “mes” y p(i) es la precipitación diaria.

Se aplicará esta metodología a una serie ficticia de datos para mostrar la diferencia entre ambos métodos. Los datos representan un caso extremo de precipitación ocurrida en tres períodos consecutivos de igual cantidad de días, en este caso de 31 días cada uno (Figura 2).

El primer período acumuló 15 mm, los 15mm se registraron en el último día del “mes-1”. El segundo período acumuló 15mm, los 15mm se registraron en el primer día del “mes-2”. El tercer período acumuló 15mm, los 15mm se registraron nuevamente en el último día del “mes-3”.

Aplicando la metodología MovNd con N= 31 días, el Mov31d del día 31 del primer “mes” es 15 mm, para el día 01 del segundo “mes” la precipitación acumulada es 30 mm este valor se repite hasta el Mov31d del día 30, el día 31 acumula 15 mm y a partir del día 01 del tercer “mes” y hasta el día 30 la acumulada Mov31d es cero, para el día 31 volver a acumular 15 (Figura 2).



**Figura 2.-** Precipitación acumulada durante el mes-1, mes-2, mes-3 y el Mov31d de todo el período (Núñez, 2010 a y b).

Comparando los valores obtenidos con los datos “mensuales” y de Mov31d se puede ver que con el primer método los tres “meses” acumularon la misma precipitación, mientras que con el segundo se identifica un período de 30 días en que la acumulada fue de 30mm, un período húmedo, un máximo, y uno de 30 días en que la precipitación fue 0 mm, un período seco, un mínimo, extremos que no se pueden identificar con la metodología convencional.

La precipitación mensual es la misma pero el efecto en el suelo, los cultivos, praderas, las lagunas y ríos, etc., puede ser muy distinto.

Considerando solamente la información acumulada en forma mensual, estacional, anual, etc. se puede desconocer la existencia de períodos secos y húmedos, valores extremos que podrían afectar considerablemente las distintas actividades productivas de una región o país (Núñez, 2010 a y b).

Por lo expresado y para tener un mejor conocimiento de las características climáticas de la precipitación y de los extremos “mensuales” de la misma, en este trabajo, se considerarán las series de precipitación acumulada en 31 días móviles (Mov31d), a lo largo de todo el período de estudio. En lugar de considerar los 12 meses del año se considerarán los 365 períodos de 31 días consecutivos que hay en un año (Mov31d), cuya necesidad de empleo ya se había mostrado en Núñez (2005, 2010 a y b) y Núñez y Podestá (2006).

Esta metodología es de gran importancia para el estudio de la marcha anual de las distintas variables, ya que al considerar todos los períodos de igual longitud elimina el error que se comete al considerar la precipitación acumulada a lo largo de distintos períodos de tiempo tal como son las distintas longitudes de los meses calendario (Núñez, 2005, 2010 a y b).

### **Método MovN\*Nd**

Con Mov31\*31d, para cada día, se obtiene un valor que resume las características de la serie Mov31d en un intervalo de 31 días. Los 31 días incluyen el día para el cual se quiere obtener el valor, más los 15 días previos, más los 15 posteriores. El valor que se puede obtener es la mediana, el promedio, el mínimo, etc. En este trabajo se obtiene el máximo valor del entorno de 31 días (ecuación [3]).

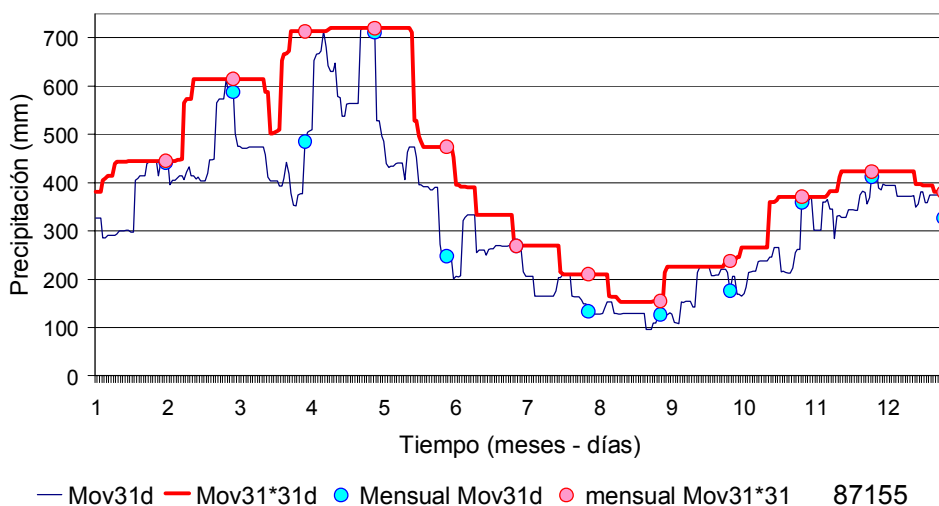
$$\max \text{Mov31*31d}(i) = \max \{ \text{Mov31d}(i) : i-15 < i < i+15 \} \quad [3]$$

Donde  $i$  es el día para el cual se calcula el valor máximo,  $\max \text{Mov31*31d}(i)$  es el máximo valor de los Mov31d del período comprendido entre los días  $i-15$  y  $i+15$ .

Resumiendo, mediante la metodología MovNd, para cada día de los 30 años del período 1971-2000, se acumula la precipitación en 31 días móviles. A partir de ellos, se obtiene, para cada día del año, la precipitación máxima Mov31d de los 30 años, 365 valores máximos, el valor del máximo Mov31d del último día de cada mes calendario, es la precipitación máxima mensual Mov31d; y el Mov31x31d toma de esta serie, para cada día el máximo valor de un entorno de 31 días.

Por ejemplo, de la máxima precipitación de enero 1971-00, el Mov31\*31d es el máximo de la precipitación Mov31d entre el 15 de enero y el 15 de febrero,  $\pm 15$  días del 31 de enero. Se obtiene así un valor máximo de toda la información de la precipitación registrada alrededor de un día, a partir de 930 datos,  $30*31$  datos, 30 corresponden a los años tenidos en cuenta y 31 a los considerados en el Mov31\*31d, mientras que con la metodología convencional sólo se consideran 30 datos, uno por año.

En la Figura 3, se presenta para la precipitación 1971-2000 de Resistencia su marcha anual máxima Mov31d, máxima Mov31\*31d, el valor máximo mensual Mov31d y el máximo mensual Mov31\*31d.



**Figura 3.-** Resistencia. Marcha anual de la precipitación máxima Mov31d, máxima Mov31\*31d, el valor máximo mensual Mov31d y el máximo mensual Mov31\*31d.

Con Mov31\*31d se puede resumir los 365 máximos de Mov31d en 12 valores sin perder por ello a ningún valor extremo, que con la metodología convencional, trabajando sólo con datos mensuales sí se pierde (Figura 3).

### Longitud: 31 días

Para MovN y MovN\*N se eligió la longitud de 31 días por las siguientes razones:

- 31 días es la longitud más frecuente de los meses, 7 de ellos tienen esa longitud (enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre, diciembre), contra los 30 que solamente lo tienen 4 meses (abril, junio, septiembre, noviembre) y los 28 ó 29 días en febrero según sea o no bisiesto.
- de considerar 30 días, en los 7 meses que poseen 31 días el primer día no sería considerado con lo cual se perdería la información que ellos poseen.

## RESULTADOS

Se calcularon los Mov31d y los Mov31\*31d, y para el último día de cada mes se establecieron los máximos valores Mov31d y Mov31\*31d, desde ahora los máximos mensuales Mov31d y Mov31\*31d.

En la Figura 4 se presenta el campo resultante de los Mov31d máximos mensuales, en él, el máximo valor se registra en Resistencia (Chaco), siendo éste 710.8 mm, y el mínimo en San Juan, 81.7 mm.

Los Mov31\*31d máximos mensuales se muestran en la Figura 5, en este caso las precipitaciones máximas se encontraron en Oberá (Misiones), 720.7 mm, y el mínimo nuevamente en San Juan, 88.7 mm.

En la Figura 6 se presenta la diferencia entre los dos campos anteriores. Todo el país presenta una diferencia superior a los 20 mm, siendo muy extensa la zona en la cual ella supera los 200 mm. La máxima diferencia llega a 410.5 mm (Figura 6), en Tinogasta (Catamarca). Pero no es solamente esta localidad en la que la diferencia entre los Mov31\*31d y los Mov31d mensuales superaron los 400 mm. En la Tabla 1 se presenta la diferencia entre Mov31d mensual y Mov31\*31d mensual, ordenada en forma decreciente, para las estaciones donde ésta supera los 200 mm.

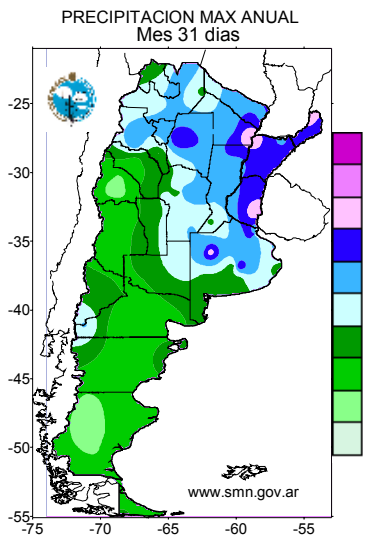


Figura 4.- Mov31d máximos mensuales.

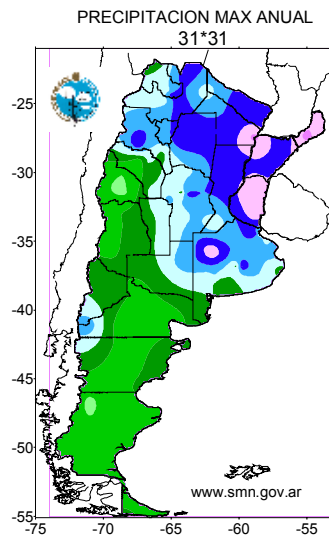


Figura 5.- Mov31\*31d máximos mensuales.

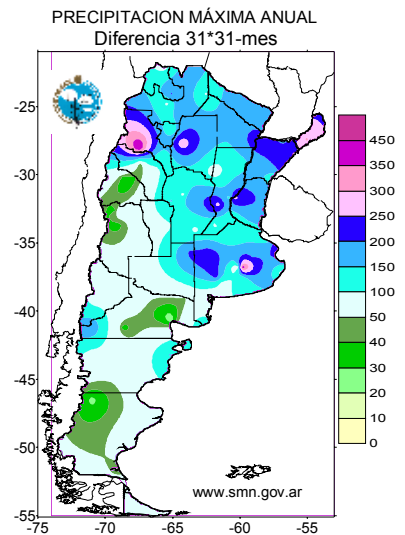


Figura 6.- Diferencia entre Mov31\*31d y Mov31d (Figura 5 menos Figura 4)

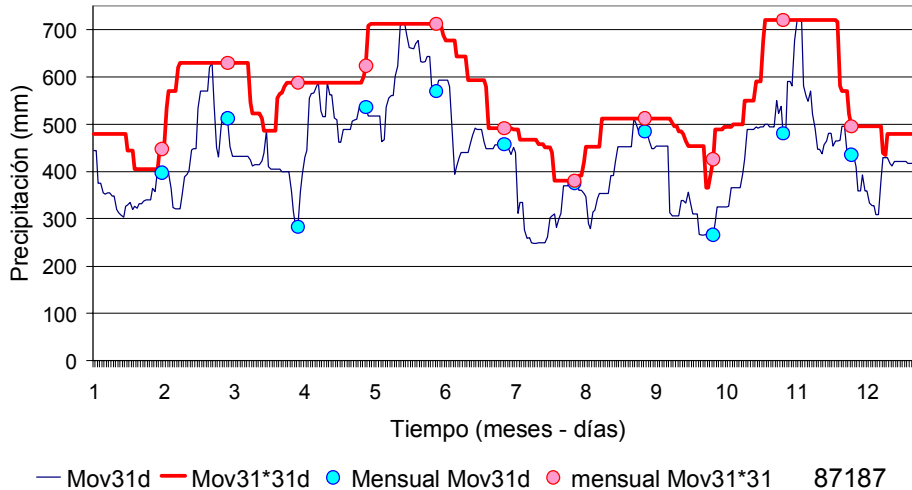
Tabla 1.- Diferencia entre Mov31d mensual y Mov31\*31d mensual, para las estaciones donde esta supera los 200 mm.

ESTACIÓN	PROVINCIA	Máxima diferencia anual 31*31-mes
TINOGASTA	Catamarca	410.5
AZUL	Buenos Aires	383.2
OBERA	Misiones	304.8
SANTIAGO DEL ESTERO	Santiago del Estero	288.3
PARANÁ	Entre Ríos	265.6
EL TRÉBOL	Santa Fe	265.5
PUNTA INDIO	Buenos Aires	253.5
IGUAZU	Misiones	246.5
CORRIENTES	Corrientes	245.6
BERNARDO DE IRIGOYEN	Misiones	238.7
POSADAS	Misiones	238.1
CORONEL SUÁREZ	Buenos Aires	228.5
RESISTENCIA	Chaco	228.4
TANDIL	Buenos Aires	228.2
TRENQUE LAUQUEN	Buenos Aires	213.8
PEHUAJÓ	Buenos Aires	213.6
PASO DE LOS LIBRES	Corrientes	210.9
MARCOS JUÁREZ	Córdoba	208.0
GENERAL PICO	La Pampa	207.9
JUJUY UN	Jujuy	203.9
BARILOCHE	Río Negro	200.6

En Resistencia (Figura 3) se registró el máximo valor mensual, este fue 710.8 mm y se observó en abril, mientras que el máximo Mov31\*31d fue 719.8 mm, 9.0 mm superior al valor mensual, y se

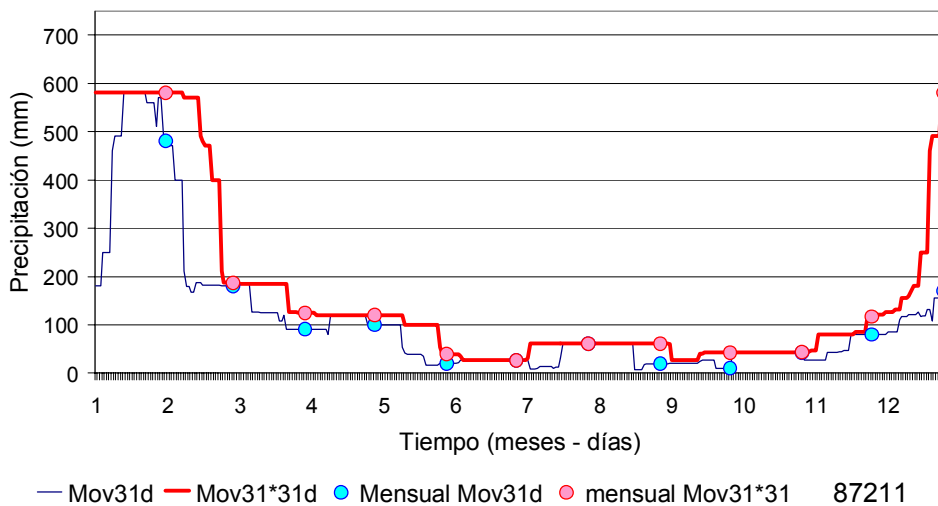
registró entre el 25 y el 29 de ese mes. Se puede observar la gran diferencia existente, en muchos meses, entre el máximo mensual y el máximo Mov31d\*31d.

La precipitación máxima Mov31\*31d se registró en Oberá (87187) siendo ésta 720.7 mm (Figura 7), se registró el 06 y 07 de noviembre por lo cual es el valor del Mov31\*31 que le corresponde a octubre, mes cuyo Mov31d acumuló 480.5 mm, la diferencia entre ambos es 240.2 mm. Nuevamente pueden apreciarse las importantes diferencias que existen entre los valores máximos Mov31\*31d y los valores mensuales.



**Figura 7.-** Oberá. Marcha anual de la precipitación máxima Mov31d, máxima Mov31\*31d, el valor máximo mensual Mov31d y el máximo mensual Mov31\*31d.

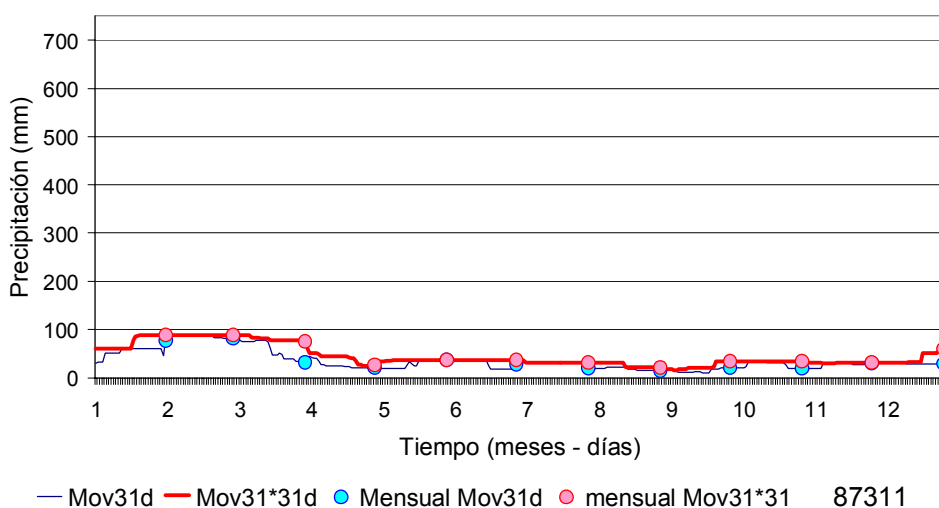
En Tinogasta se registró la máxima diferencia entre Mov31\*31d y Mov31d, siendo esta 410.5 mm (Figura 8), la cual es el resultado de la diferencia entre la precipitación de diciembre, 170.0 mm, y el Mov31\*31d, 580.5 mm, resultante del Mov31\*31d registrado entre el 30 de diciembre y el 7 de febrero.



**Figura 8.-** Tinogasta. Marcha anual de la precipitación máxima Mov31d, máxima Mov31\*31d, el valor máximo mensual Mov31d y el máximo mensual Mov31\*31d.

En San Juan se registraron los mínimos valores de los Mov31d máximos, 81.7 mm, como del Mov31\*31d máximo, 88.7 mm. La marcha anual de ambas series y la mensual se presenta en la Figura 9. En ella puede observarse que las diferencias entre los Mov31d y los Mov31\*31d son de menor magnitud a las de las estaciones anteriores, esto se debe a que el monto de las precipitaciones es muy inferior a la de la mayoría de las estaciones.





**Figura 9:** San Juan. Marcha anual de la precipitación máxima Mov31d, máxima Mov31\*31d, el valor máximo mensual Mov31d y el máximo mensual Mov31\*31d.

## CONCLUSIONES

- La metodología convencional no permite detectar las singularidades de la precipitación registradas entre los límites de los períodos en que se está analizando, cuando Mov31d sí lo permite.
- La metodología convencional, a lo largo del año sólo puede identificar 12 valores extremos, mientras que la Mov31d identifica 365 valores máximos/mínimos, uno para cada día del año.
- La metodología convencional sólo puede identificar los máximos y mínimos ocurridos en los datos mensuales calendario, 12 valores en el año, mientras que el máximo/mínimo Mov31\*31d mensual permite identificar los valores máximos/mínimos ocurridos en un entorno de 15 días del último día del mes (31 datos), mostrando los extremos absolutos de cada uno de esos períodos.
- La precipitación máxima mensual Mov31\*31d supera a la máxima mensual en todo el país en más de 20 mm, la zona en la cual la supera en 200 mm es muy extensa, y la máxima diferencia llega a superar los 400 mm.
- Considerar solamente la información máxima mensual puede llevar a errores a la hora de la toma de decisiones en todas las actividades dependientes del agua.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Mörner, N.** (1984a). "Planetary, Climatic changes on yearly to millennial basis. Concluding remarks". Climatic Changes on a Yearly to Millennial Basis. Geological, Historical and Instrumental Records. Sweden.
- Mörner, N.** (1984b). "Planetary, Solar, atmosphere, hydrospheric and endogene processes as origin of climatic changes on the earth". Climatic Changes on a Yearly to Millennial Basis. Geological, Historical and Instrumental Records. Sweden.
- Núñez, L.N.** (2005). *Períodos móviles*. Informe Departamento Agrometeorología. Servicio Meteorológico Nacional.
- Núñez L.N. y G.P. Podestá** (2006). "Precipitación anual, estacional y mensual vs períodos móviles". XI Reunión Argentina de Agrometeorología: La Agrometeorología y el desarrollo local. pp. 169-170. La Plata, Argentina.
- Núñez, L.N.** (2010a). Argentine National Meteorological Service. World Meteorological Organization. Agricultural Meteorology Programme (AGM). Fifteenth session of the CAgM. Belo Horizonte, Brazil - 15 to 21 July 2010. Presentations from the Open Forum. En

<[http://www.wamis.org/agm/meetings/cagm15/OF\\_Nunez\\_Argentina.pdf](http://www.wamis.org/agm/meetings/cagm15/OF_Nunez_Argentina.pdf)>

**Núñez, L.N.** (2010b). *Drought and the Argentine National Meteorological Service*. National Integrated Drought Information System, U.S. Drought Portal. North American Drought Monitor Forum and Global Drought Assessment Workshop Presentations. Asheville, NC, USA. Thursday, April 22nd, Nacional Meteorological Service – Argentina. En

<[http://www.drought.gov/portal/server.pt/community/drought.gov/202/2010\\_NADM\\_Workshop\\_Presentations](http://www.drought.gov/portal/server.pt/community/drought.gov/202/2010_NADM_Workshop_Presentations)>

## **EXPLOSIÓN URBANÍSTICA Y PLANIFICACIÓN DE DRENAJES EN EL GRAN ROSARIO**

***Raúl Alberto Navarro***

*Departamento de Hidráulica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis. 2000. Rosario. Argentina  
email: rnavarro@sceia.unr.edu.ar*

**RESUMEN:** Se presenta el estado de situación del Área del Gran Rosario respecto a los desarrollos urbanísticos tanto abiertos como cerrados encarados desde el año 2008 hasta el presente en los Distritos Rosario, Ibarlucea, Ricardone, Luis Palacios, Roldán, Funes, Zavalla y Soldini. Se plantean las problemáticas principales desde el punto de vista hidrológico – hidráulico que deben resolverse al momento de realizar los proyectos de drenaje pluvial y las afectaciones al sistema hidrológico al cual pertenecen.

**PALABRAS CLAVE:** hidrología, urbanizaciones, planificación.

## INTRODUCCIÓN

El trabajo presente está desarrollado sobre estudios del proceso urbanizador en el Área Gran Rosario de la Provincia de Santa Fe, República Argentina. Esta área se constituye por las ciudades y pueblos satélites de la Ciudad de Rosario y específicamente sobre aquellas que forman parte de la cuenca de aportes del Arroyo Ludueña, ubicado al norte y al oeste de dicha ciudad.

Durante los últimos cuatro años se ha venido registrando un aumento de las actividades urbanizadoras principalmente en las localidades periféricas a la ciudad de Rosario.

Los primeros accionares en esta temática se produjeron durante la década del 90 con emprendimientos cerrados, o sea barrios construidos dentro de límites físicos que impiden el libre acceso de aquellas personas que no habitan en ellos, diseñados tal vez como reflejo de los numerosos que existen en los alrededores de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

En el camino quedaron, después de los acontecimientos ocurridos en la República Argentina a fines de 2001, otros emprendimientos del mismo tipo que se toparon con unas nuevas condiciones económicas que llevaron a los emprendedores a paralizar las obras.

A partir de 2008 se comenzaron a detectar nuevos movimientos urbanizadores pero esta vez repartidos entre barrios cerrados y abiertos, estos últimos de libre acceso lo cual implica la apertura de calles en predios antes utilizados para las actividades agrícola-ganaderas sin la instalación de cercos perimetrales, con requerimientos del mercado que aumentaban exponencialmente unidos a una presión creciente, por parte de los Emprendedores, de resolver las problemáticas inherentes al propio desarrollo, cada vez con más rapidez.

Cabe aclarar que los barrios abiertos son desarrollados por los emprendedores pero en algún momento pasan a depender, respecto a las tareas de mantenimiento, de las respectivas Comunas o Municipios. Esto es porque en esta tipología de urbanización los trazados de calles se realizan acorde a las existentes y son de libre acceso, según se dijo.

El presente trabajo intenta plantear la problemática y desarrollar algunos de los puntos que se relacionan con los proyectos de desagües pluviales de estos emprendimientos.

Las Comunas y Municipalidades son las denominadas Autoridades de Aplicación en todas las temáticas atinentes a una urbanización ya que cada una de ellas tiene sus particularidades e intereses que deben cuidar. En muchos casos, estas organizaciones de gobierno no tienen el equipo técnico necesario para evaluar estas temáticas y recurren a las Reparticiones Provinciales en busca del asesoramiento correspondiente que les permita satisfacer las demandas propias y de los habitantes. Es así que se comenzó a tener un conocimiento más general de lo que estaba ocurriendo en la zona.

Como condimento adicional se debe mencionar el fenómeno meteorológico ocurrido en marzo de 2007, de una recurrencia inusual, y que generó tal malestar social por los desbordes producidos en la cuenca baja del Arroyo Ludueña que condujo a un cambio de mentalidad de las autoridades respecto a los niveles de seguridad a proporcionar a la población en estos temas y a una profundización en las normativas a seguir y en el control de las acciones realizadas.

## ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS ÁREAS URBANIZADAS

En base a la información de los distintos emprendimientos urbanísticos que se fueron generando en los últimos años, aportada por la Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones (DPPUCI) de la Secretaría de Aguas del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (MASPYMA) de la Provincia de Santa Fe más las observaciones sobre las imágenes satelitales existentes en la base de datos gerenciada por Google Earth (**Google Earth 6.1.0.5001**, 2011), se procedieron a confeccionar figuras representativas de las variaciones anuales de la superficie que en un futuro pasarán a ser urbanizadas.

La Figura 1 se confeccionó con la superficie aproximada urbanizada antes de 2008.



**Figura 1.-** Áreas Urbanizadas antes de 2008.

En la Figura 1 se incluyen emprendimientos que ya se venían gestando los cuales pueden observarse en forma separada en la Figura 2.



**Figura 2.-** Emprendimientos antes de 2008.

Durante 2008 se presentaron en la DPPUCI cinco emprendimientos con superficies entre 5 y 82 hectáreas. Cuatro fueron barrios cerrados. En la Figura 3 se puede observar la implantación de los mismos.



**Figura 3.-** Emprendimientos durante 2008.

Durante 2009 se presentaron doce emprendimientos con superficies entre 4 y 350 hectáreas. De éstos, siete fueron barrios abiertos. En la Figura 4 se puede observar la implantación de los mismos.

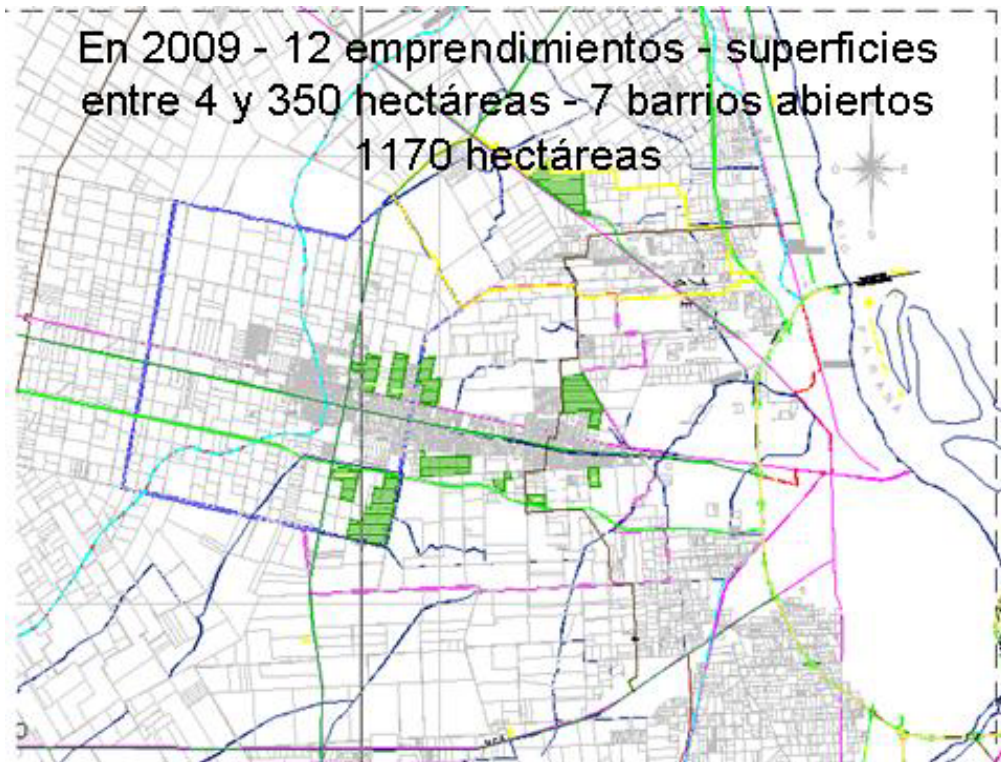


Figura 4.- Emprendimientos durante 2009.

Durante 2010 se presentaron diez emprendimientos con superficies entre 3 y 745 hectáreas. De éstos, cinco fueron barrios abiertos. En la Figura 5 se puede observar la implantación de los mismos.

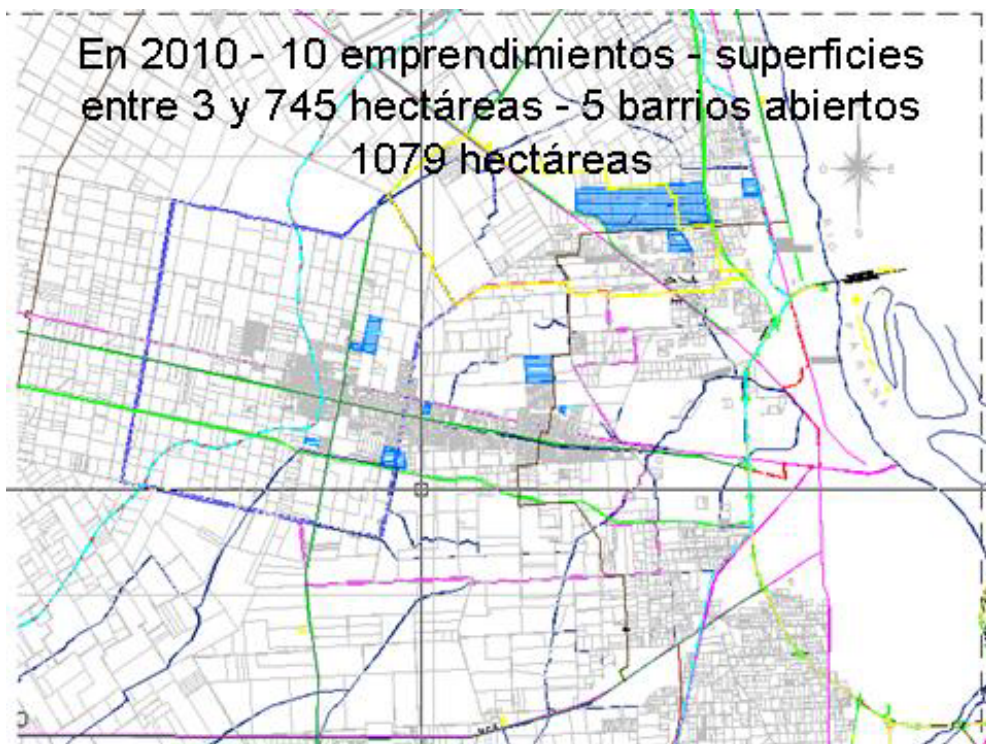


Figura 5.- Emprendimientos durante 2010.

Finalmente, durante 2011 se presentaron catorce emprendimientos con superficies entre 6 y 400 hectáreas. De éstos, ocho fueron barrios abiertos, uno parque industrial y del total, siete ya no pertenecían a la cuenca del Arroyo Ludueña. En la imagen 4 se puede observar la implantación de los mismos.



Figura 6.- Emprendimientos durante 2011.

Se obtuvo información sobre otras consultas realizadas al MASPOMA sobre emprendimientos que hasta 2011 no efectivizaron las tramitaciones los cuales se presentan en la Figura 7.

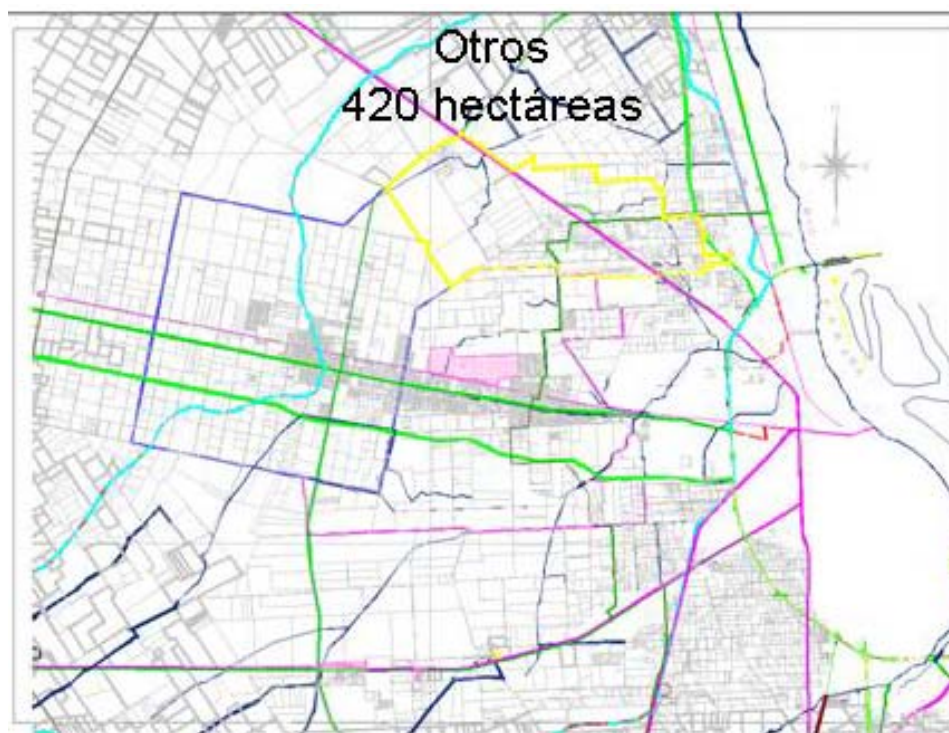
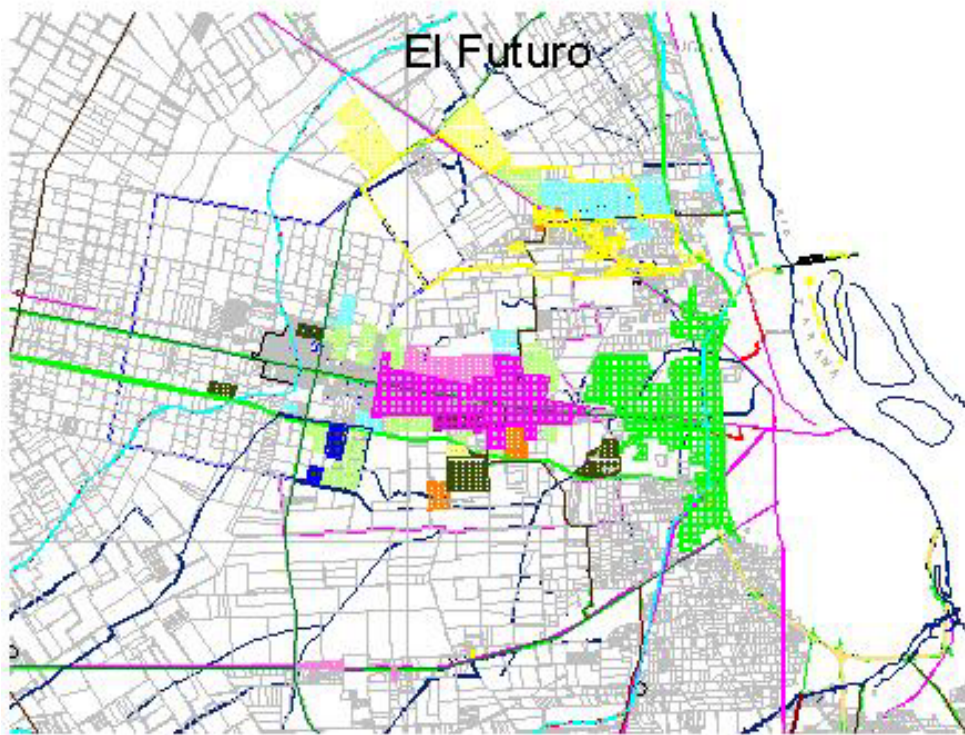


Figura 7.- Otros emprendimientos detectados.

Concentrando toda la información obtenida en una sola imagen se obtiene la Figura 8, la cual es un límite inferior de la situación de urbanización a futuro ya que se detectaron otros emprendimientos que no tienen un tratamiento oficial y no han sido considerados en este estudio.





**Figura 8.-** Áreas Urbanizadas A Futuro

Si se analiza el incremento de la superficie a futuro urbanizada año a año del inicio del emprendimiento, la información puede resumirse según lo presentado en la Tabla 1 (Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones, 2008-2011).

**Tabla 1.-** Evolución de las Solicitudes de Urbanización en Superficie a Urbanizar.

<b>AÑO</b>	<b>SUPERFICIE</b>	<b>SUPERFICIE ACUMULADA</b>
2008	206	206
2009	1170	1376
2010	1079	2455
2011	840	3295
OTROS	420	3715

Si se compara esta superficie futura a urbanizar con la actualmente urbanizada en la cuenca que es de 4920 hectáreas resulta que se está planteando un incremento para el Gran Rosario de un mínimo de 76% en el mediano plazo.

## LA URBANIZACIÓN Y LA HIDROLOGÍA

El evento hidrológico extremo producido en marzo de 2007 mostró una vulnerabilidad de la cuenca del Arroyo Ludueña, en su estado actual, a los eventos extremos meteorológicos, hecho que puso en una situación absolutamente inadmisibles al libre desarrollo de estos emprendimientos urbanizadores. Fue por ello que surgió la necesidad de trazar lineamientos y normativas para guiar y encuadrar los proyectos de desagües de los barrios nuevos así como prestar una especial atención a los posibles efectos que tales desarrollos podrían causar sobre su área de influencia, tanto hacia aguas arriba como hacia aguas debajo del sistema hídrico al cual pertenecen, frente a la ocurrencia de un nuevo evento extremo.

Anteriormente los pocos casos que solicitaban autorizaciones tanto para urbanizaciones como para desarrollos industriales o edificios públicos eran analizados desde el punto de vista de las condiciones de inundabilidad del predio en cuestión, refiriéndose a la ubicación en proximidades de cursos de agua o canales o en zonas deprimidas sin posibilidades de buen drenaje, pero por su poca significancia respecto a la afectación en el funcionamiento del sistema hidrológico al cual pertenecían, no se realizaban evaluaciones exhaustivas de efectos generados por eventos extremos.

Al surgir esta necesidad de estudios más detallados hidrológicos-hidráulicos comenzaron a aparecer diferentes problemáticas que condicionaban las acciones a realizar por los emprendimientos en pos de reducir los efectos negativos sobre el entorno.

## **PROBLEMÁTICAS PRINCIPALES HIDROLÓGICAS – HIDRÁULICAS EN EL DISEÑO DE LOS DRENAJES**

Así se fue determinando que se había alcanzado una situación en la cuenca del Arroyo Ludueña en la cual las nuevas acciones de drenaje de las cuencas altas no encontraban una salida liberada aguas abajo sino que se estaba en presencia de cuellos de botella a cada paso.

Más aún, el empleo de áreas destinadas al uso agrícola o ganadero para urbanizarlas incorporó una nueva limitante respecto a los puntos de salida de los escurrimientos en los predios. Con el uso actual, en muchos casos, los escurrimientos pasan de lote a lote de manera mantiforme entre distintos propietarios. En muchas oportunidades se da la situación indebida que algún propietario no acepta los escurrimientos del vecino y levanta un bordo, hecho no permitido por el Código Civil.

También ocurre que si el bajo natural corta un extremo de un lote se lo desvía por la cuneta de la calle favoreciendo dicho camino con bordos. Si a esto se le suma que, al desarrollar una urbanización, indefectiblemente los caudales se concentran en mayor o menor forma, los conflictos se acrecientan.

Una práctica común, cuando los aportes naturales son de lote a lote ha sido desviarlos hacia las vías de comunicación públicas tanto vehiculares como ferroviarias. Esto implica tomar por el camino más sencillo. La negociación entre vecinos es ardua y muchas veces no se rige por cuestiones técnicas. Nadie quiere recibir aportes desde aguas arriba como si los mismos proviniesen de algún fenómeno de una galaxia ajena a la propia. Como si cada uno no colaborase, en menor o mayor medida, en la transferencia hacia aguas debajo de los problemas de las inundaciones. La solidaridad no es una moneda corriente y el trasladar el problema a otro ámbito, si es posible público, parece la solución más adecuada (fácil).

Esto implica que, cuando el Estado toma conocimiento de estos hechos, luego de haberse producido algún tipo de inconveniente a la población, debe salir a corregir la situación realizando, en general, obras que implican inversiones de dinero mayores a las que hubiesen sido necesarias si se hubiese actuado con anticipación y que tal vez, en ese momento, no esté disponible o que de estarlo sería más beneficioso aplicarlo para resolver otras problemáticas más urgentes.

Estas situaciones también se dan entre actividades de estamentos públicos diferentes como ser Municipales, Provinciales o Nacionales o de Empresas Concesionadas donde las acciones de interconsulta no están aceptadas ni son moneda corriente. Dada la complejidad de los ámbitos jurisdiccionales que pueden estar involucrados ante cualquier obra civil, muchas veces, en aras

de la celeridad y el pragmatismo, no se realizan las consultas entre los distintos actores involucrados, las cuales deberían ser metodología cotidiana.

Así es que se llega a situaciones en las cuáles los estamentos gubernamentales más altos no quieren hacerse cargo de los problemas no resueltos en los estamentos inferiores. O también, los ámbitos de mayor autoridad no consideran necesario hacer partícipe e involucrar a los de menor ámbito de autoridad, quienes seguramente se verán afectados por las acciones llevadas a cabo, más allá que las motivaciones de una determinada obra apunten a un bien común mayor.

Como ejemplo se puede mencionar que la Dirección Nacional de Vialidad no fomenta el empleo de sus zonas de camino como partes constitutivas de obras destinadas a resolver problemas de drenajes externos a ellos. Es decir, sostienen que las obras viales deben resolver los desagües de la zona de camino y todo aquel aporte externo que atraviese la facilidad, deberá resolverse de modo que entre y salga de la zona de obra sin usarla de medio de transporte. Esto sería deseable de no ser que toda obra vial, por su propia constitución, cambia la dinámica hídrica del área que atraviesa y porque la transparencia total de la traza es altamente improbable por motivos económicos. Más aún, a la hora de hacer una inversión en una obra vial, que muchas veces es de montos muy importantes, sería deseable aprovechar la coyuntura para resolver, desde una visión integral, la mayor cantidad de problemáticas relacionadas con dicha obra.

## **AFECTACIONES DE LAS INTERVENCIONES AL SISTEMA HIDROLÓGICO**

Otra problemática usual se presenta cuando en la zona de afectación hidrológica de una nueva urbanización o emprendimiento, el sistema hídrico a intervenir posee características diferentes a aquellas consideradas técnicamente adecuadas. En otras palabras, en muchos casos los sistemas de drenaje están constituidos por elementos diseñados para recurrencias varias y generalmente menores a las empleadas por los distintos organismos oficiales que manejan o regulan las vías de comunicación de material rodante o las distintas partes que constituyen un sistema de desagüe pluvial. Por ejemplo, es común que una vía de comunicación genere aguas arriba almacenamientos temporarios debido a la pequeña dimensión de la obra hidráulica de paso, la cual generalmente es de pequeñas dimensiones por cuestiones económicas.

Llegado a este punto, la pregunta inevitable es: se corrige el problema hidrológico que viene de muy larga data?

Otro planteo necesario, considerando que los emprendimientos son negocios, puede resumirse en las siguientes preguntas: no es injusto el beneficio de algunos contra el perjuicio de otros? No sería más equitativo mirar desde más lejos y buscar una situación intermedia?

Estos planteos deben ser debatidos en el ámbito del Estado como gestor del bien común y con el fin de marcar el camino futuro y formar conciencias sociales que contrarresten el exceso de individualismo que marca el tiempo presente. Como ocurre en todos los ámbitos de estudio, el conocimiento más profundo de las cosas permite detectar más variables en el problema y accionar sobre ellas por anticipado.

Otro objetivo deseable de alcanzar sería crear conciencia pública que los recursos hídricos no escapan a las pautas básicas de diseño en ingeniería. Las estructuras se diseñan para cargas que nunca ocurrieron pero podrían ocurrir. Es muy poco probable que un balcón de un departamento esté sometido a una muchedumbre pero puede ocurrir en un caso fortuito y así debe calcularse su estructura. Nadie plantearía a un estructuralista: “diseñe este balcón para soportar dos personas, nunca habrá más que eso aquí”. Este planteo lo podría realizar alguien que debe

accionar sobre un recurso hídrico y gusta de tentar a la probabilidad. Los sistemas hidráulicos deben diseñarse para situaciones no ocurridas y de baja probabilidad de ocurrencia si los daños posibles involucran la vida humana. Las recurrencias podrían reducirse si el riesgo, asociado a una determinada obra, lo corren bienes materiales y si se han realizado evaluaciones costo – beneficio del caso.

## **CONCLUSIONES**

Es muy importante trabajar fuertemente y conjuntamente con todos los actores en la planificación integral del recurso hídrico frente a la presencia y auge de la necesidad urbanizadora.

La presión ejercida por los distintos emprendimientos y los eventos hidrológicos extremos registrados en las últimas décadas han dejado al descubierto nuevas problemáticas hidráulicas y de desarrollo urbano sobre las cuáles se debe legislar.

Se impone un cuidadoso análisis de situaciones relacionadas con grandes intervenciones urbanísticas las cuáles pueden generar grandes perjuicios a distancia en espacio y tiempo.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones** (2008-2011). Secretaría de Aguas, MASPyMA, Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina.

**Google Earth 6.1.0.5001** (2011). *Google Inc.*, USA.

## **ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES INTENSAS DIARIAS PUNTUALES Y DE GRILLA EN ALGUNAS REGIONES DE LA PCIA. DE BUENOS AIRES**

*Adolfo Villanueva y Flavia Pelizardi*

*IHLLA-UNCPBA, Azul, Bs.As, Argentina., email: aonvilla@gmail.com*

**RESUMEN:** Actualmente el uso de grillas de precipitación diaria, con definiciones entre 50 km y 250 km es cada vez mas frecuente. Esas grillas tienen dos orígenes principales, las bases de datos espaciales de lluvia generadas por diversos autores e instituciones (e. g. Liebman & Allured, 2005) y los modelos de circulación atmosférica, globales y/o regionales. Otro factor importante es la caída, principalmente en la década del '90, del número de estaciones pluviométricas y pluviográficas operativas. En la Pcia. de Buenos Aires entre 1990 y 2008 el número de estaciones paso de 473 a 52; el número de estaciones con 50 años o mas de datos actualizados pasó de 143 a 34. El análisis de los datos muestra además que hay interrupciones de hasta 10 años en el interior de esos registros. Además, cuestiones como variabilidad interdecadal y cambio climático hacen aun más necesario contar con series largas y actualizadas, los datos de la red de alta densidad interrumpida van rápidamente perdiendo vigencia. En ese contexto, las grillas de datos tipo L&A podrían complementar las estaciones puntuales para extender (en espacio y tiempo) y actualizar las series de datos. En general, también resultan más adecuadas para comparación con las simulaciones de modelos globales y regionales, cuyos resultados son generados sobre una grilla. En función de esas cuestiones es importante avanzar en la comprensión de la relación entre precipitaciones “puntuales” y grillas de precipitaciones. Este trabajo presenta un análisis preliminar de la relación entre las precipitaciones máximas diarias estimadas a partir de datos de algunas estaciones de la provincia de Bs As y las resultantes de la grilla de L&A para la misma área. Como elemento adicional de comparación se tomaron las curvas I-D-F areales elaboradas para el Plan Maestro Integral de la Cuenca del Río Salado (Halcrow, 1999). Fueron también realizadas comparaciones con los valores de precipitación. Los resultados obtenidos hasta el presente sugieren que las precipitaciones de grilla pueden funcionar como complemento de las lluvias medidas puntualmente. Como era de esperar, tienen a escala diaria una reducción en relación a los valores puntuales. Parece haber también una reducción en las precipitaciones anuales.

**PALABRAS CLAVE:** grilla de precipitación, lluvia areal, lluvia diaria, lluvia de proyecto

## INTRODUCCIÓN

Este es un trabajo exploratorio, desarrollado como parte del proceso de análisis de datos meteorológicos de lluvia en la provincia de Buenos Aires, para comparación de lluvias observadas con resultados de modelos climáticos globales (GCM). El objetivo general del trabajo “marco” es estudiar el impacto del cambio climático sobre las lluvias máximas diarias. Como parte de ese proceso es necesario analizar la capacidad de los GCM y de los procesos de downscaling para representar lluvias diarias. Ese análisis consiste básicamente en comparar los resultados de las simulaciones de las condiciones climáticas ya ocurridas (“escenario siglo XX”) y de procesos de downscaling de esas simulaciones con series históricas observadas.

Como datos observados en la Pcia. de Buenos Aires se dispone de la información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de las grillas de precipitaciones diarias generadas por Liebman y Allured (2005) en base a la información del SMN y otras fuentes. Cabe mencionar que los resultados de los GCM y de los downscalings de esos resultados son precipitaciones areales, y por lo tanto las comparaciones deben ser hechas teniendo en cuenta la diferencia/relación entre lluvia puntual y lluvia areal. En ese sentido, la grilla de Liebman y Allured (u otra semejante) ya provee datos de lluvia areal calculados a partir de la información puntual de las estaciones pluviométricas y pluviográficas.

En relación a lluvias intensas en la pcia. de Buenos Aires puede ser citado el trabajo de Mauriño (2004) sobre generalización de curvas IDF y el de Varela et al. (2005) que calculan IDF para la región de Azul. En el trabajo de Mauriño (2004) es mencionado un opúsculo de la Dirección de Hidráulica de la pcia. de BsAs con curvas IDF para la provincia; se busco ese trabajo pero no fue posible conseguir un ejemplar.

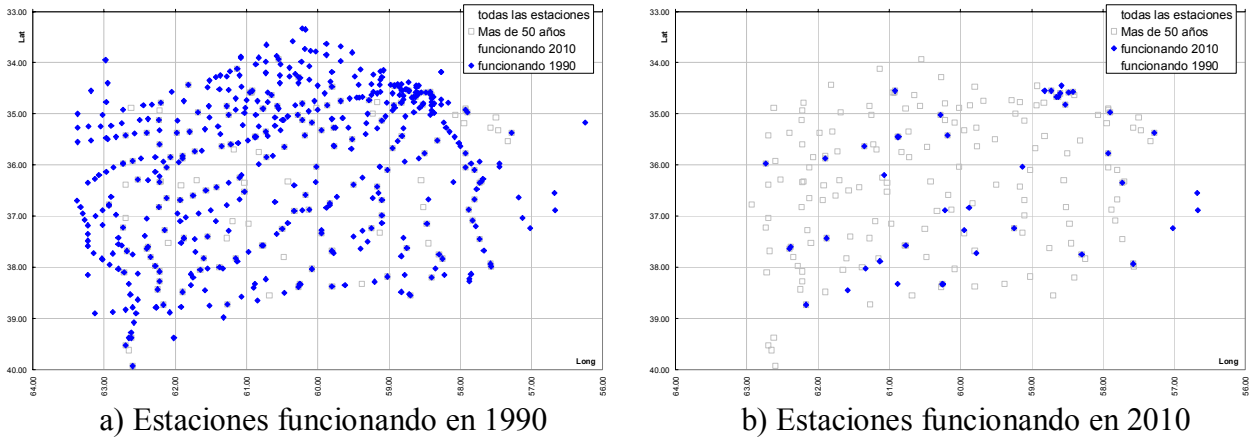
Grillas de precipitación en general se usan para datos mensuales y/o anuales, y diversos análisis comentan que a partir de esa escala temporal los datos puntuales y de grilla tienen tendencias semejantes (Klein Tank et al., 2002, apud Ensor y Robeson, 2008). En el caso de precipitaciones diarias las diferencias tienden a ser mayores (Ensor y Robeson, 2008). Los resultados de este análisis preliminar no han sido coincidentes con esa experiencia.

La grilla de Liebman y Allured está disponible con 1 grado de resolución (~100x100 km) y con 2,5 grados (~250x250 km); al presente se ha trabajado solo con la grilla de 1 grado (probablemente mas representativa para lluvias diarias). A futuro serán realizados análisis con la grilla de 2,5 grados, entre otros motivos porque esa es aproximadamente la resolución de los GCM sin downscaling.

Una cuestión que apareció cuando se comenzaron a analizar los datos del SMN fue la evolución de la red de estaciones de lluvia en la pcia. de Bs. As. Entre la década del '90 y el comienzo de los 2000 el número de estaciones pasó de 473 a 52; el número de estaciones con 50 o más años de datos actualizados pasó de 143 a 34. La Figura 1 muestra la situación en 1990 y en 2010. Dado que la posible ocurrencia de un proceso de cambio climático hace que la hipótesis de estacionariedad de la serie deje de ser valida (el pasado no es más representativo del futuro), los datos antiguos van perdiendo representatividad, y no se generan datos nuevos que los reemplacen. La disponibilidad de series de longitud razonable (50 años o más) va cayendo sistemáticamente. Es posible que el uso de grillas como la analizada en este trabajo pueda contribuir a paliar esa situación.

## COMENTARIOS METODOLÓGICOS

La metodología de comparación sigue en líneas generales la utilizada en Enson y Robeson (2008), comparando puntos de la grilla con estaciones según un criterio de proximidad (nearest-neighboring). En la Tabla 1 se presenta la correspondencia entre puntos de la grilla y estaciones meteorológicas. Adicionalmente se utilizaron para comparación las curvas IDF areales calculadas para la cuenca del río Salado (mitad norte de la pcia. de Buenos Aires) por Halcrow (1999).



**Figura 1.-** Estaciones de lluvia en la Pcia. de Buenos Aires. Los cuadrados grises representan las estaciones con más de 50 años de datos, independientemente del periodo de funcionamiento.

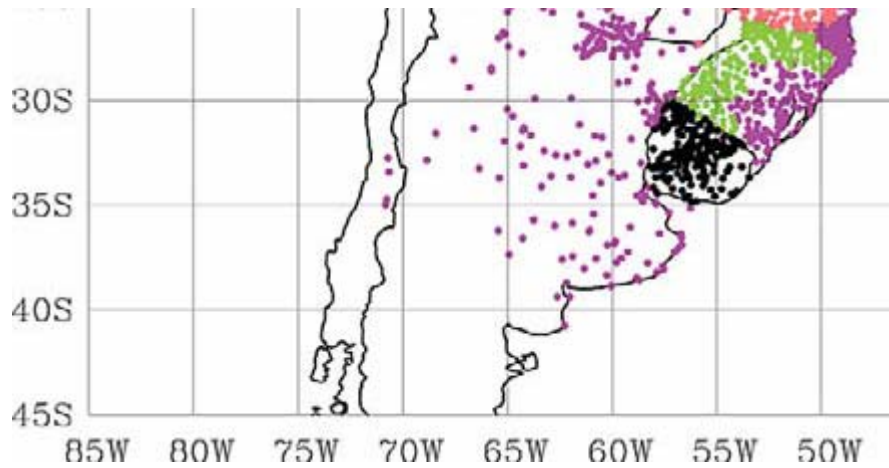
**Tabla 1.-** Correspondencia entre estaciones SMN y puntos de la grilla Liebman y Allured 1 grado.

Estación SMN	Pto. LyA 1 grado	Dist. Estación-Pto.
Azul	60W-37S	31.7 km
Tres Arroyos	60W-38S	42.9 km
Tandil	59W-37S	33.6 km

Las grillas de precipitación diaria de L&A (1 grado y 2,5 grados) pueden ser descargadas de internet, en formato NetCDF, el mismo utilizado como standard para los archivos de resultados de los GCM (Russell et al., 2009, <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>). Hay un archivo para una de las dos resoluciones de grilla, y esos archivos contienen, para cada punto de la grilla, la precipitación diaria entre 1940 y el presente, teóricamente. En realidad, el inicio efectivo de la serie de cada punto depende de la disponibilidad de datos en el entorno del punto; para la región analizada en este trabajo la mayoría de los puntos tiene información a partir de 1960, aproximadamente. El año final de la serie depende de la actualización de la grilla, que es realizada periódicamente; los datos de este estudio llegan teóricamente hasta 2009, dependiendo de la disponibilidad de datos.

Se analizaron lluvias máximas anuales de 1, 2 y 3 días; en general, de trabajos anteriores (Villanueva et al., 2007), se ha identificado 2 días como la “duración crítica” de lluvias máximas en la región. En otras palabras, en tormentas de 3 o 4 días de duración la mayor parte de la lluvia se da en dos días corridos, por lo que los análisis se concentraron en esa duración. Adicionalmente, se hizo un análisis somero de las lluvias anuales de los mismos puestos utilizados para lluvias diarias.

Para este primer análisis exploratorio se adoptó *a priori* la GEV como distribución teórica de probabilidades, con chequeo de que el ajuste fuera aceptable en todos los casos. Los motivos para eso fueron dos, por un lado la GEV suele ser una distribución adecuada para lluvias máximas en la región en estudio y otras regiones próximas (Halcrow, 1999, Zamanillo et al., 2008). Para el procesamiento de las series de P max fue usado el programa AFMULTI (Paoli et al., 1996). Además, algunos resultados del análisis de Halcrow, 1999 fueron utilizados para comparación en este trabajo, por lo que era conveniente utilizar la misma distribución de probabilidades.



**Figura 2.-** Estaciones utilizadas para generar las grillas de precipitación de Liebman y Allured (de Liebman y Allured, 2005).

Se compararon algunas estaciones (Azul, TsAs y Tandil) con puntos de la grilla de L&A próximos a ellas y con algunas IDF areales calculadas por Halcrow (1999). En el caso de Azul existe un conjunto de curvas IDF, pero no fueron utilizadas por ser de duraciones de 24 horas o menores y la serie temporal es de 10 (1995-2004) años, lo que limita muchas las posibilidades de comparación (Varela et al., 2005). El trabajo de Halcrow (1999) hace referencia a “precipitaciones máximas de 24 h, 48 h ...”; sin embargo, no hay ninguna mención al coeficiente de transformación entre lluvia de 1 día y lluvia de 24 horas, o de 2 días en 48 h, etc. En función de eso se consideró que probablemente era solo una cuestión de vocabulario, y se tomaron como lluvias de 1 día, 2 días, etc.

Dado que el trabajo de Halcrow (1999) utilizó la serie 1911-1995, se hizo una comparación, para la estación Azul del SMN, entre las IDF de las series 1911-1995 (Halcrow), 1966-2005 (grilla L&A) y 1911-2005 (disponible SMN).

En la introducción fue mencionada la severa disminución del número de estaciones a partir de la década del '90. En términos de la grilla de precipitaciones eso se traduce en una fuerte caída (e. g. de 12 a 2) del número de estaciones disponibles (conteo de estaciones) para calcular la precipitación de un día determinado, en cada punto de la grilla. Sobre el final de este artículo hay un breve comentario al respecto.

## ALGUNOS RESULTADOS

En función del objetivo temático de este artículo, serán presentados primero los resultados referidos a las IDF, para Azul, Tres Arroyos y Tandil, y a continuación de eso algunos resultados sobre la lluvia anual. En el caso de las IDF, para evitar una “saturación de números”, la presentación se concentrará principalmente en las lluvias máximas de dos días.

### Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

#### *Azul*

Para el caso de la región de Azul la comparación fue realizada para la estación SMN 10196 (Azul Aero), el punto 60W-37S y la subcuenca AZU1410 de Halcrow (1999).

Las series de lluvias máximas analizadas para la región de Azul corresponden a periodos temporales diferentes, Halcrow utilizó 1911-1995, y solo se dispone del resultado del análisis; en Liebman y Allured la serie disponible es 1966-2005). En función de eso se hizo la comparación estadística de las series de Pmax 2 días de los periodos 1911-1995, 1966-2005 y 1911-2005. La

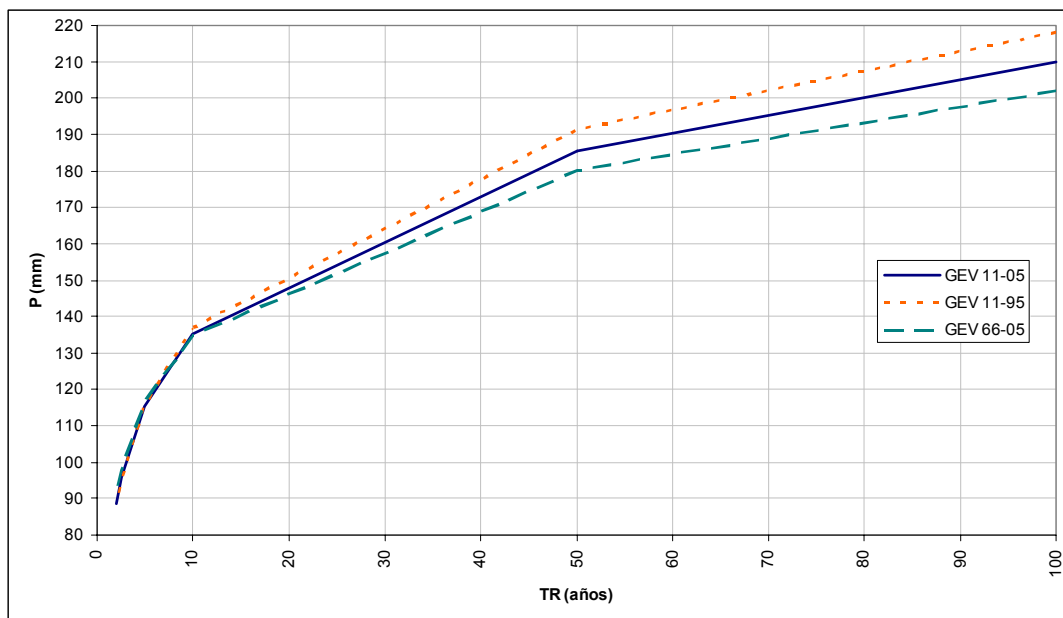


Tabla 2 muestra los estadísticos de las tres series (método de los momentos); como se puede ver, las diferencias son en general mínimas, excepto la curtosis, que para 1966-2005 es casi el doble que para las otras series.

**Tabla 2.-** Estadísticos de las series de Pmax 2 días  
1911-1995, 1966-2005 y 1911-2005

	p2d 11-05	p2d 11-95	p2d 66-05
Media	95.8	96.2	97.9
Mediana	88.2	88.1	94.9
Desv. standard	32.0	33.3	32.4
Curtosis	6.6	6.0	13.7
Asimetría	2.0	1.9	3.0
Rango	204.3	204.3	199.3
Mínimo	50.7	50.7	55.7
Máximo	255.0	255.0	255.0

En la Figura 3 se muestran las frecuencias teóricas (como TR), obtenidas de la GEV para las tres series. Puede notarse la similitud de las tres curvas, siendo que la diferencia máxima es del orden del 10 % (20 mm en 200 mm). Ese 10 % puede ser considerado una estimación del "error" introducido al comparar series con periodos no coincidentes. La Tabla 3 muestra la diferencia entre los valores de Pmax de 2 días para el punto considerado de la grilla LyA y para la subcuenca Azu1410 de Halcrow, 1999. La diferencia entre los valores de las dos series es muy semejante a la diferencia resultante de utilizar los diferentes periodos (1911-2005 y 1966-2005), lo que sugiere que buena parte de la diferencia entre las IDF areales presentadas en Halcrow, 1999 y las de la grilla LyA probablemente resulten de la diferencia de periodos de análisis. Parece razonable asumir que, a los efectos de la comparación exploratoria presentada en este trabajo, la diferencia de periodos de las series utilizadas no es un factor crítico.

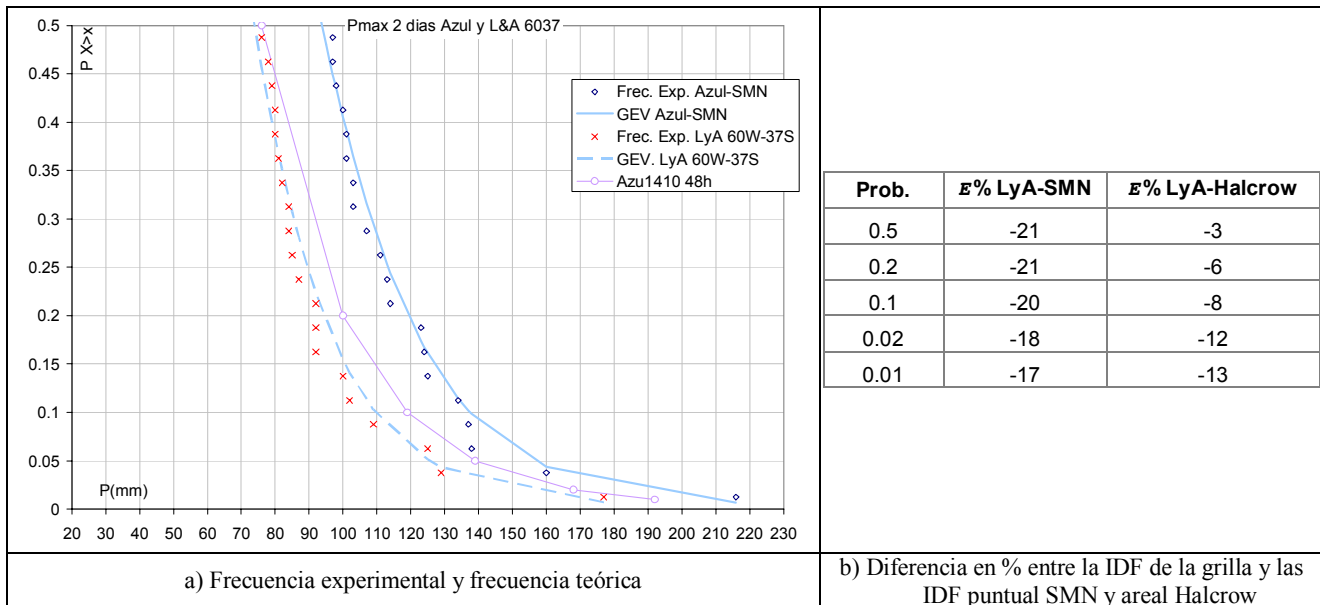


**Figura 3.-** Distribución de probabilidades para las P máximas de dos días de las series 1911-1995, 1966-2005 y 1911-2005

**Tabla 3.-** Diferencia para la IDF de 2 días con las series 1911-1995, 1966-2005 y 1911-2005

Tr (años)	GEV 11-05	GEV 11-95	GEV 66-05	E% 66_05-11_95	Azul: E% LyA-Halcrow
100	209.7	218.3	201.8	-8	-13
50	185.3	191.3	180.3	-6	-12
10	135.1	137.0	134.9	-2	-8
5	115.4	116.2	116.7	0	-6
2	88.8	88.5	91.6	4	-3

La Figura 4 muestra la IDF de 2 días para las 3 series consideradas en la región de Azul y las diferencias entre ellas. Como era esperable, los valores de la grilla son menores que los puntuales. La diferencia es del orden del 20 %, en general menor (menos reducción por área) que la mencionada en la literatura (e. g. Sivapalan y Blöschl, 1998 y Stewart, 1989) para áreas de esa orden ( $10^3 \text{ km}^2$ ). La diferencia es un poco mayor para las lluvias de 1 día, y un poco menor para las de 3 días, pero muy poco. En relación a las IDF areales de Halcrow (1999), la diferencia es menor (como esperable), del orden del 10 %, y del mismo orden que el error introducido por la diferencia de periodo de análisis, como comentado en los párrafos anteriores.



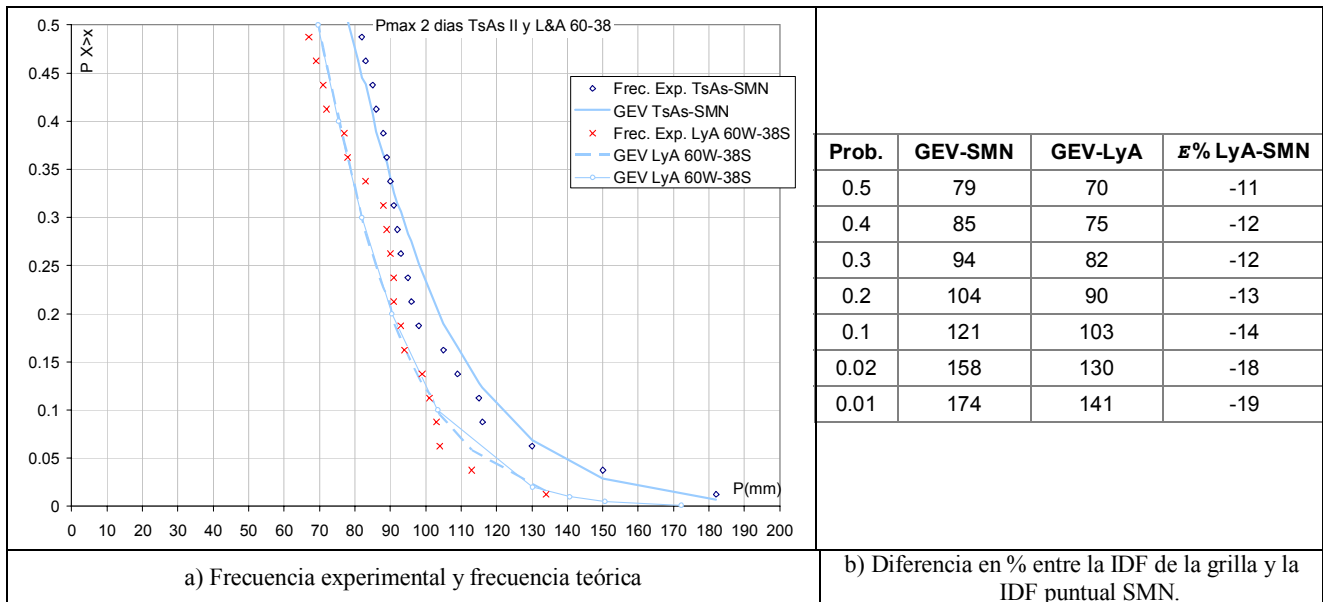
**Figura 4.-** IDF de 2 días para la región de Azul. Series SMN-Azul Aero, LyA 60W-37S y Azu1410 de Halcrow, 1999.

**Tres Arroyos**

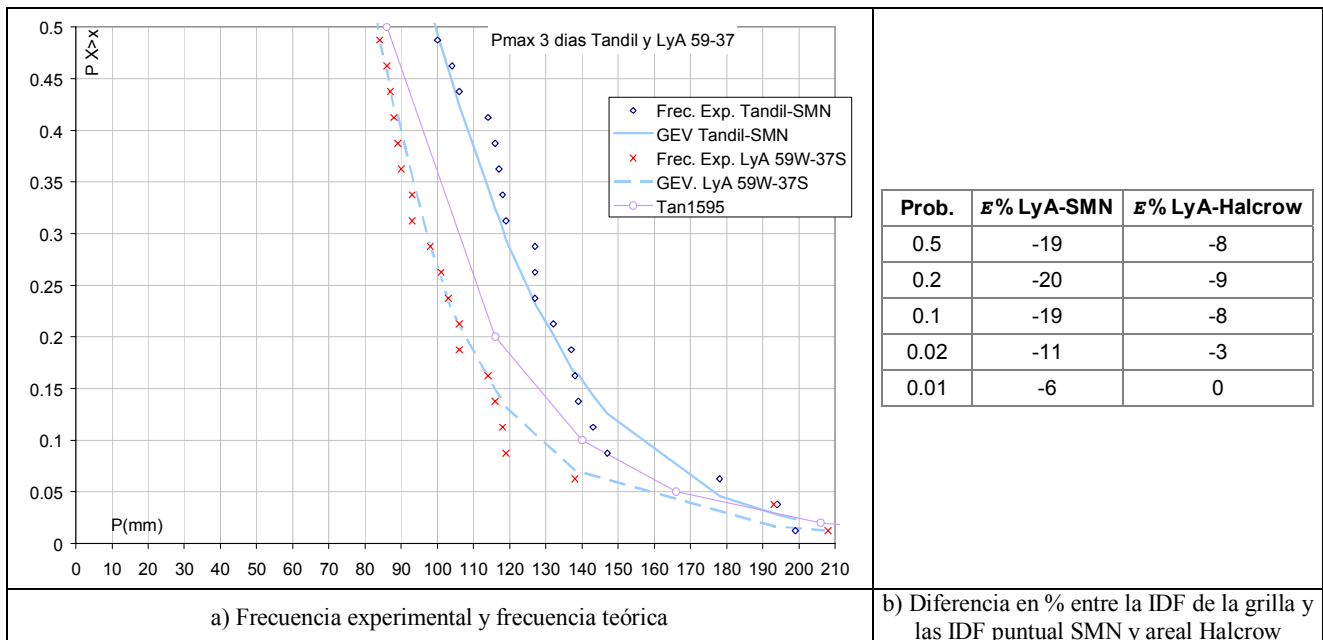
En el caso de la localidad de Tres Arroyos (sur de la pcia. de Buenos Aires, área triguera y sede de la principal maltería Quilmes) se compararon los valores puntuales correspondientes al SMN con los del punto de la grilla 60W-38S (el trabajo de Halcrow, 1999 no abarca esa región). Los resultados (Figura 5) son semejantes a los de Azul.

**Tandil**

Para la región de Tandil se aplicó el mismo proceso de comparación seguido en la región de Azul, se comparó una estación SMN 10311 (Tandil Aero), el punto 59W-37S y las IDF areales de la subcuenca Tan1595 de Halcrow, 1999. La Figura 6 presenta los resultados de la comparación para la IDF de 2 días. La relación entre la IDF puntual y la de la grilla es semejante al caso de Azul, los errores son del orden del 20 %, apenas menores en este caso que en Azul. En la comparación con la IDF areal de Halcrow, si bien los valores de la diferencia son del mismo orden que en Azul (10 %), el comportamiento es diferente, en Azul la diferencia crece con el tiempo de retorno, en Tandil la diferencia disminuye con el TR.



**Figura 5.-** IDF de 2 días para la región de Tres Arroyos. Series SMN-Tres Arroyos y LyA 60W-38S.



**Figura 6.-** IDF de 2 días para la región de Tandil. Series SMN-Tandil, LyA 59W-37S y Tan1595 de Halcrow, 1999.

### Comparación del punto LyA 61W-37S con cuencas aledañas del Salado

Además de comparar las precipitaciones extremas de dos puntos de la grilla (60W-37S y 59W-37S) con las IDF areales del Plan Maestro del Salado de subcuencas próximas, se hizo la comparación de la IDF de 2 días para un punto de la grilla (61W-37S) con las IDF de 4 subcuencas aledañas. En la Figura 7 se muestra la discretización de la cuenca del río Salado (de Halcrow, 1999), el punto elegido, y una tabla con los nombres y áreas de las subcuencas incluidas en la comparación.

En esta comparación, la IDF de la grilla que las IDF areales para 3 de las 4 subcuencas comparadas, como puede ser visto en la Figura 8 y en la Tabla 4. En las comparaciones presentadas anteriormente (Azul y Tandil), los valores de la IDF de Halcrow eran mayores que los valores de la IDF de la grilla. También para 3 de las 4 cuencas (otras 3 de 4), las diferencias porcentuales fueron menores (del orden de 10 %) que las obtenidas en los dos casos anteriores (20 %).

### Lluvia total anual y conteo de estaciones

La comparación entre las lluvias anuales era, básicamente, *pro forma*; se esperaba simplemente confirmar un grado alto de coincidencia, como mencionado por diversos autores (e. g. Enson y Robeson, 2008). Sobre el conteo de estaciones, se esperaba que reflejase la disminución del número general de estaciones disponibles en la región, pero no estaba claro cual podría ser el efecto sobre la relación entre las lluvias puntuales y las de la grilla, más allá de una cierta convergencia en los valores de lluvia.

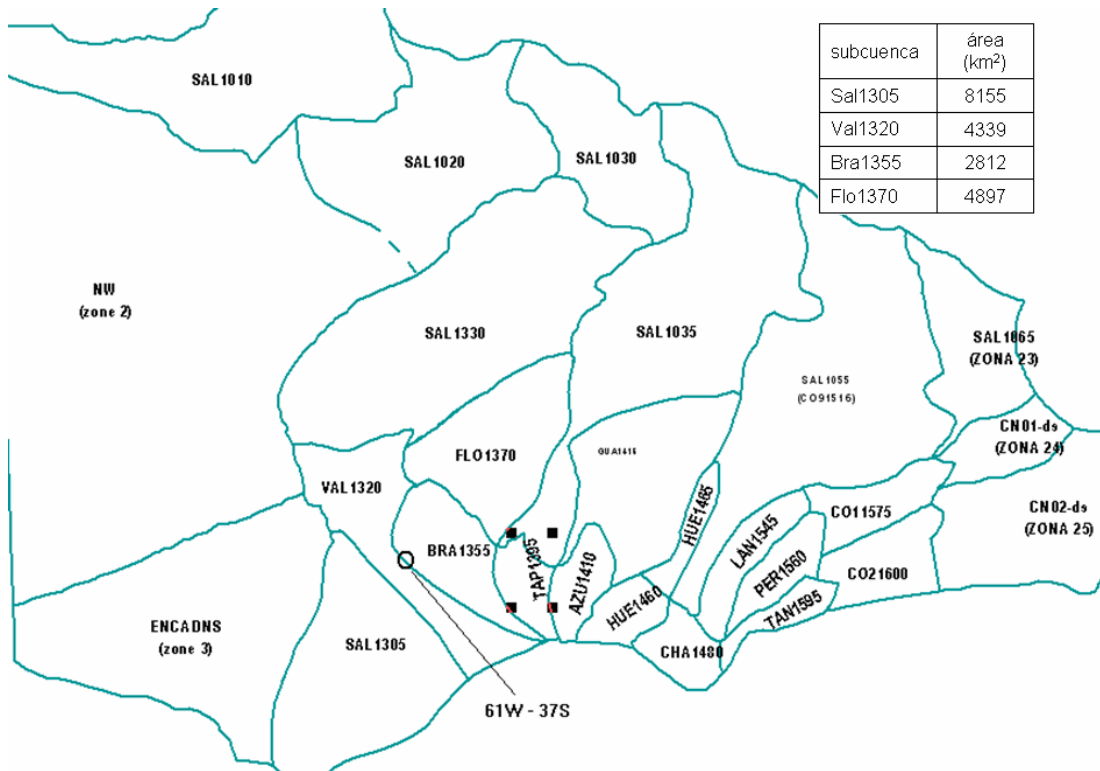


Figura 7.- Subcuencas del río Salado y punto de la grilla utilizados en la comparación.

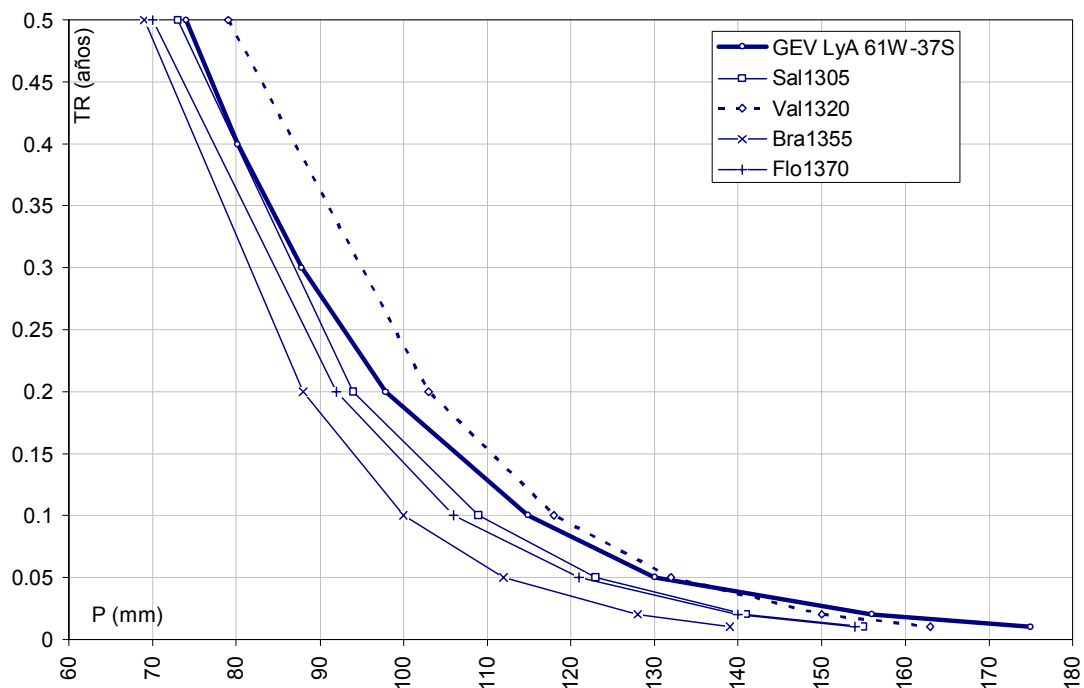


Figura 8.- Comparación entre la IDF del punto 61W-37S de LyA y las IDF areales de 4 subcuencas aledañas de Halcrow (1999), lluvia de 2 días.

**Tabla 4.-** Diferencia (%) entre la IDF de 2 días del punto 61W-37 y las IDF areales de las cuencas aledañas de Halcrow (1999).

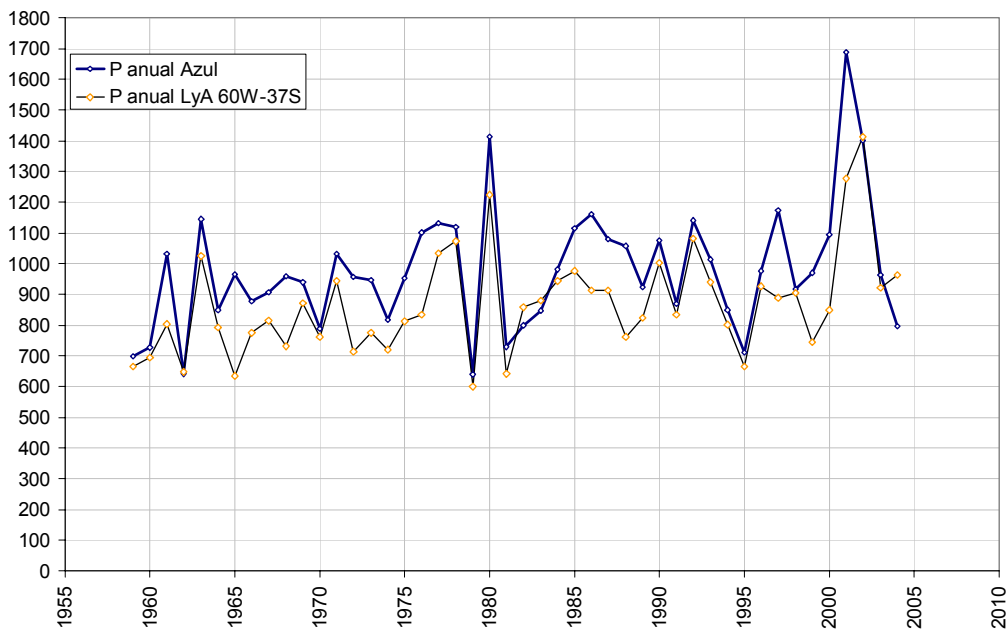
Prob	E% 61W37S-Sal1305	E% 61W37S-Val1320	E% 61W37S-Bra1355	E% 61W37S-Flo1370
0.5	1	-6	7	6
0.2	4	-5	11	6
0.1	5	-3	15	8
0.02	11	4	22	11
0.01	13	7	26	14

Las Figuras 9 a 17 presentan los valores de lluvia anual, razón Pgrilla/Ppunto y conteo de estaciones (agrupados de esa manera) para los tres casos tratados anteriormente (Azul, Tres Arroyos y Tandil).

En relación a los valores de lluvia total anual, la coincidencia esperada entre los valores puntuales y los de grilla no aconteció. Eso se ve en las figuras de lluvia anual (Figuras 9, 12 y 15), y en la razón Pgrilla/Ppunto (Figuras 10 a 16); esa razón oscila con una amplitud del orden del 20 %, y en algunos casos (notadamente Azul) presentan periodos largos arriba o abajo de 1. En esos gráficos (y en las series temporales de lluvias máximas) parece haber indicios de convergencia por disminución del número de estaciones, pero nada muy sólido, excepto el caso de Tandil, en que el conteo se reduce a uno (una estación en un círculo de 75 km de radio).

Aun así, en el caso de Tandil, cuando el conteo se reduce a uno se esperaba que las lluvias máximas diarias de la estación SMN y las del punto correspondiente de la grilla coincidieran. No fue así, y ante eso se realizó una inspección visual de los datos de precipitación diaria de las dos series. Lo que se observó fue que en el caso de lluvias de varios días corridos, el total de lluvia caído coincidía, pero los totales diarios diferían; el interior de la tormenta era diferente. Una causa posible para eso sería que, después que los datos fueron entregados a Liebman y Allured, hayan tenido tratamientos (consistencia, correcciones, etc.) diferentes, ya sea por Liebman y Allured, por la fuente de los datos, o por ambos.

Azul



**Figura 9.-** Precipitación anual de la estación SMN Azul-Aero y del punto 60W-37S de LyA.

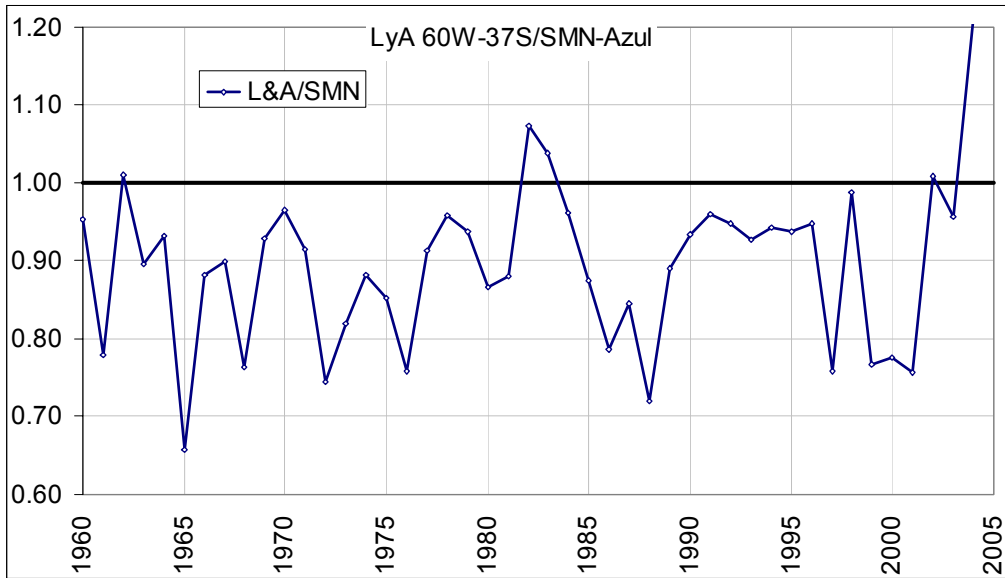


Figura 10.- Cociente de precipitación anual LyA 60W-37S dividido SMN Azul-Aero.

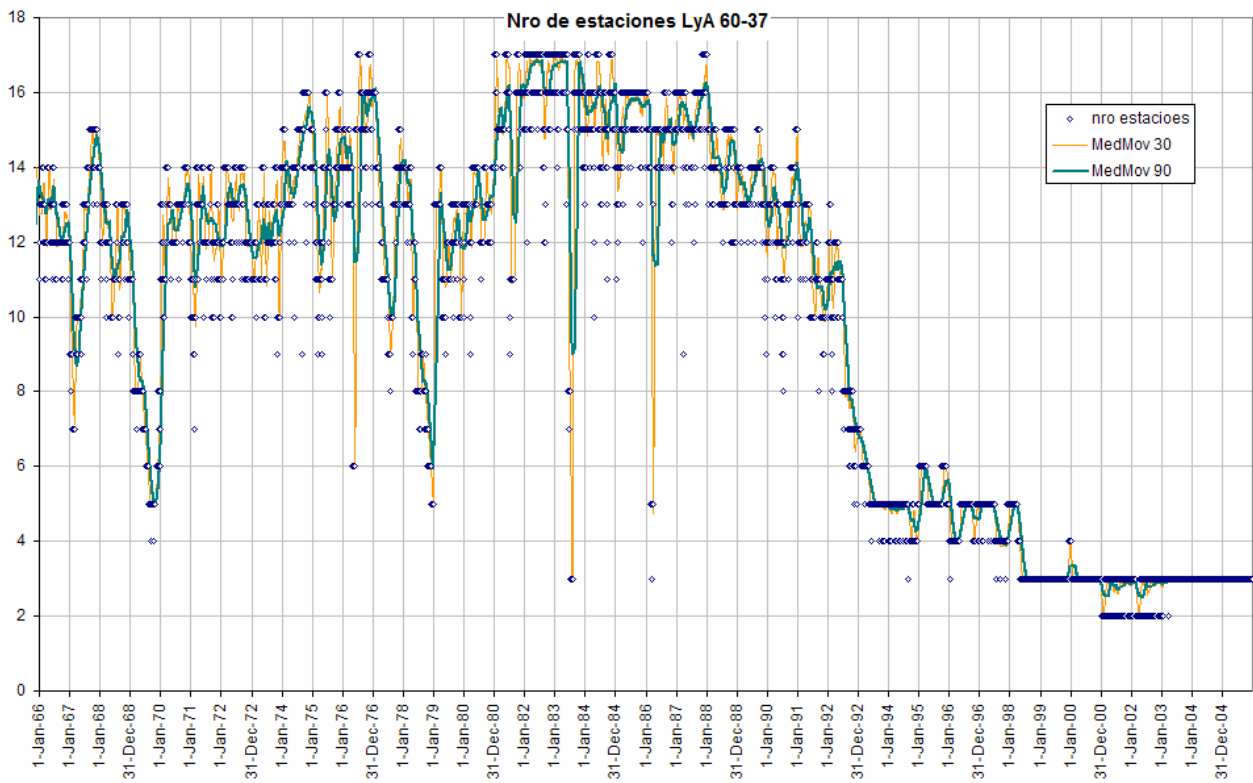


Figura 11.- Conteo de estaciones disponibles para el punto LyA 60W-37S (Azul).

Tres Arroyos

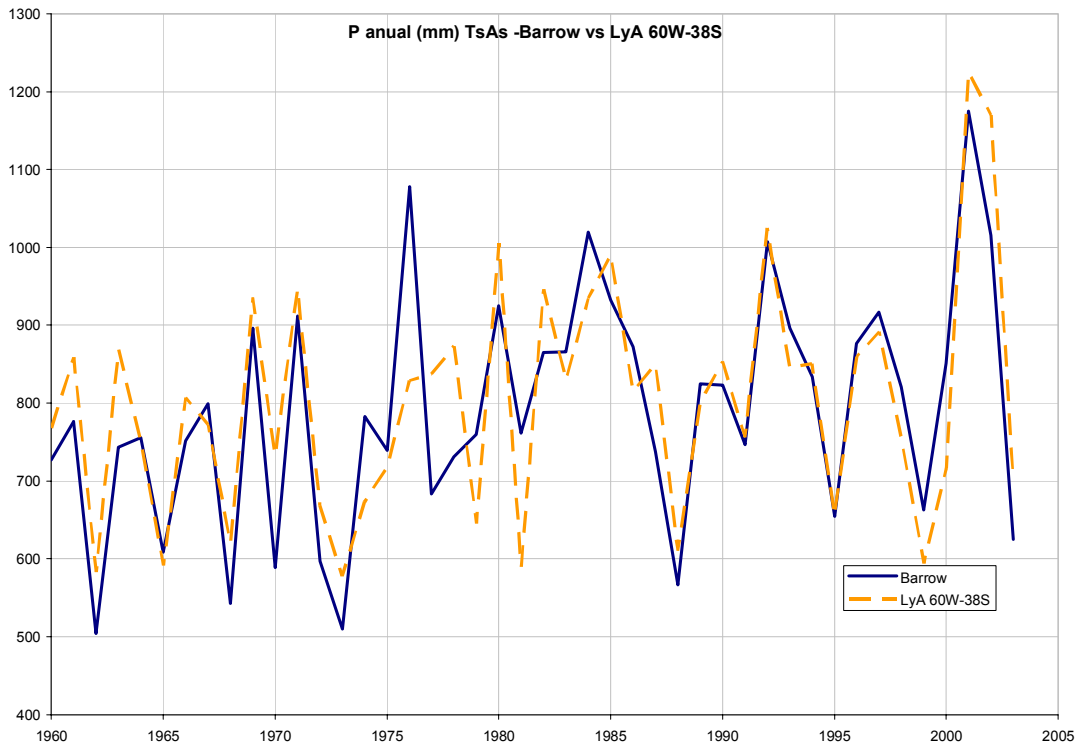


Figura 12.- Precipitación anual de la estación SMN-Barrow y del punto 60W-38S de LyA (Tres Arroyos).

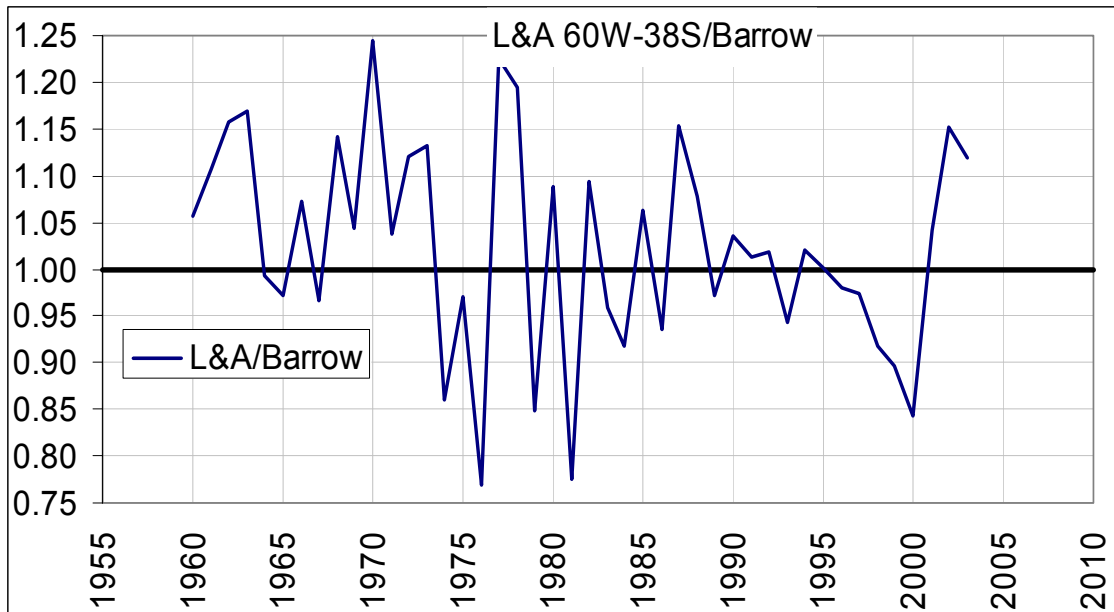


Figura 13.- Cociente de precipitación anual LyA 60W-38S dividido SMN-Barrow (Tres Arroyos).

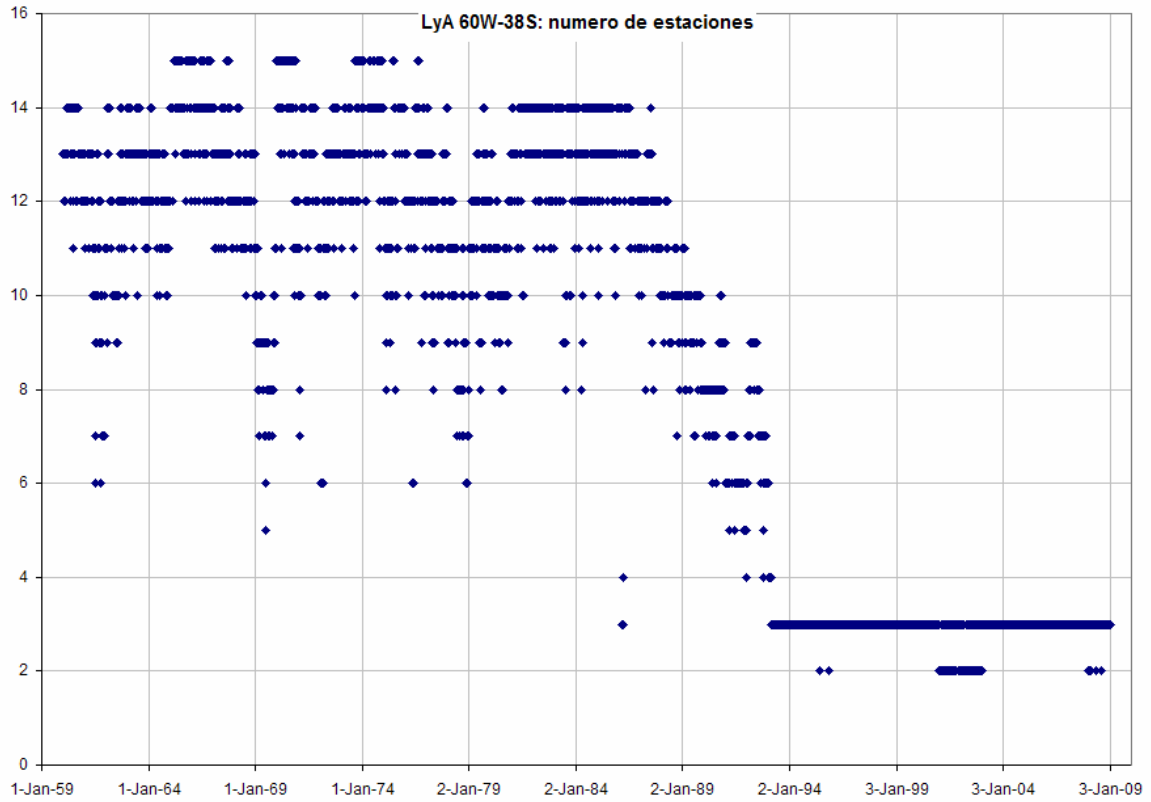


Figura 14.- Conteo de estaciones disponibles para el punto LyA 60W-38S (Tres Arroyos).

Tandil

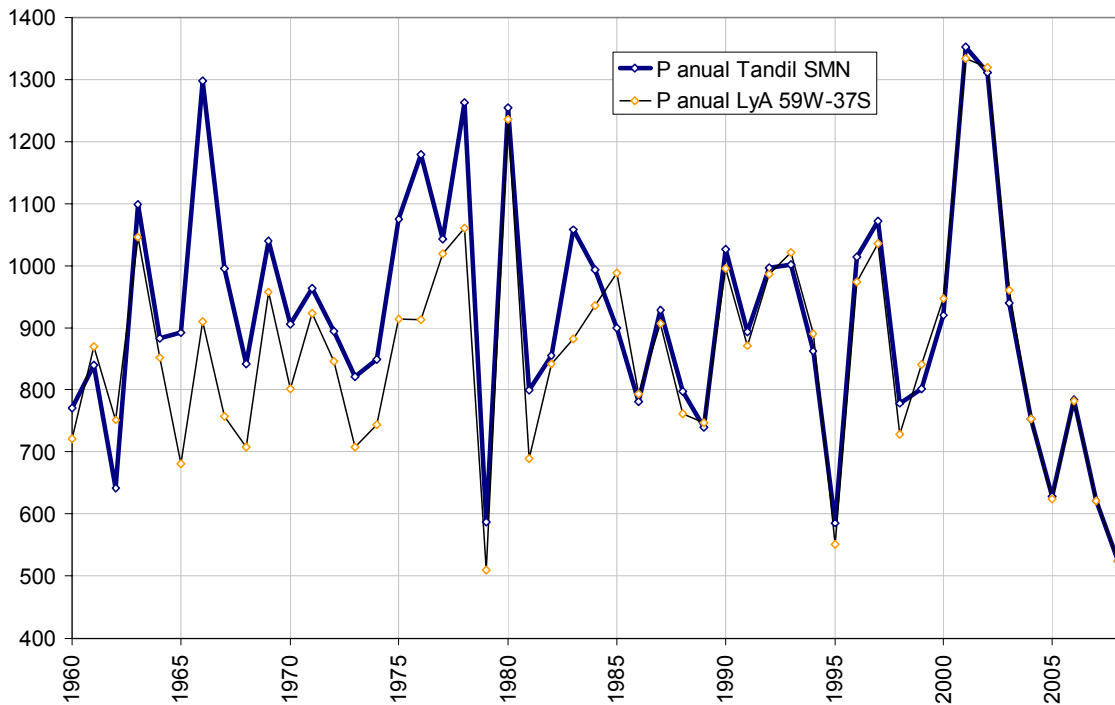


Figura 15.- Precipitación anual de la estación SMN-Tandil Aero y del punto 59W-37S de LyA.



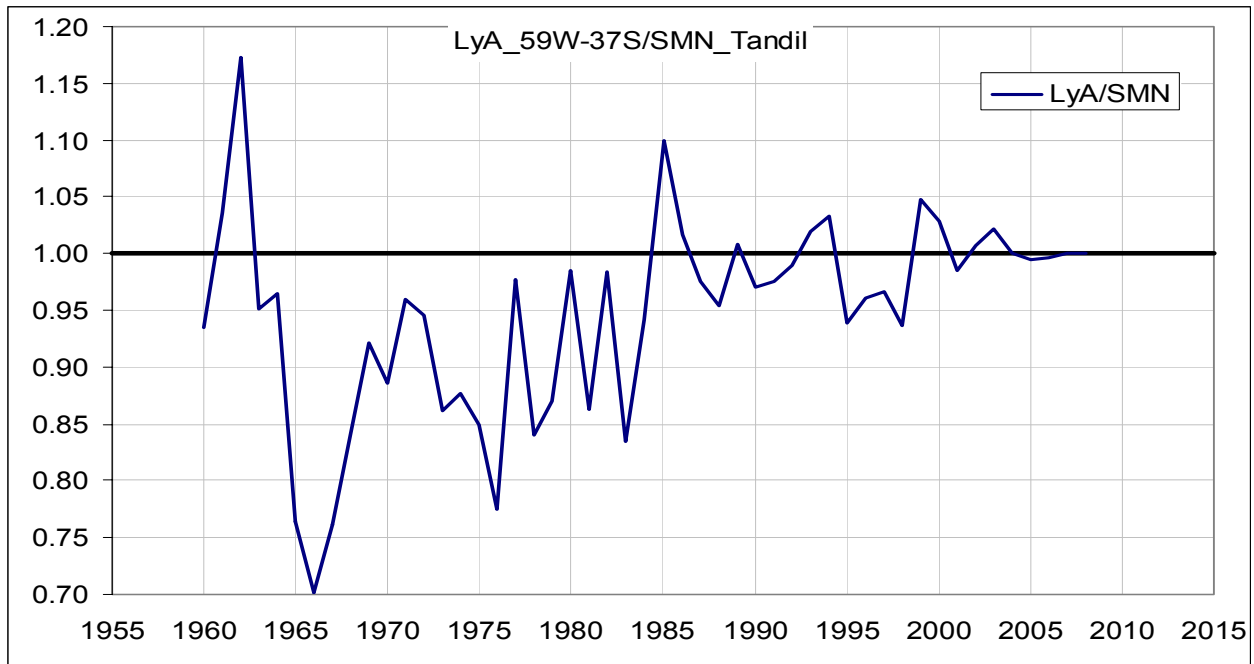


Figura 16.- Cociente de precipitación anual LyA 59W-37S dividido SMN-Tandil Aero.

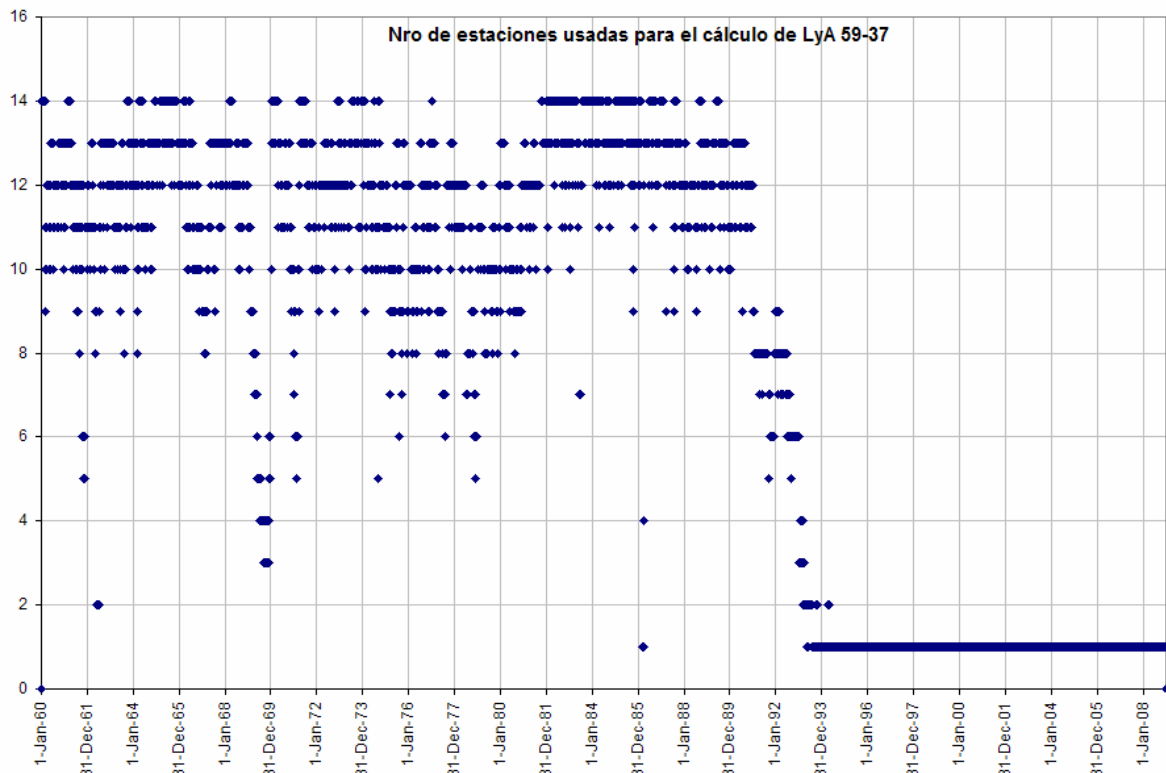


Figura 17.- Conteo de estaciones disponibles para el punto LyA 59W-37S (Tandil).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Fueron detectadas diversas inconsistencias en las series de lluvia, mas allá de lo que era esperado y/o usual (por lo menos para la experiencia de los autores). Por ejemplo, fueron detectadas inconsistencias entre la “misma” serie, cuando recibida de fuentes diferentes, o diferencias en la precipitación diaria siendo que el total anual era coincidente entre la grilla y una estación (única utilizada para el cálculo).

Si bien el análisis de los datos de lluvia anual fue muy somero, alcanzó para levantar varios alertas en relación a la necesidad de validar caso a caso la suposición frecuente de que cuanto mas largo el intervalo de tiempo (mes, año), mayor la coincidencia entre precipitaciones puntuales y de grilla.

En relación a las lluvias extremas diarias, estos resultados preliminares fueron “alentadores”. La relación entre lluvias puntuales y de grilla se mantuvo dentro de los límites encontrados en la literatura para factores de reducción por área. Cuando la comparación se hizo con IDF areales los resultados fueron buenos.

En términos generales, los resultados de este primer análisis exploratorio fueron contrarios a los esperados, mejores para lluvias diarias y peores para lluvias anuales. Para lluvias extremas los resultados estarían dentro de los márgenes de error aceptables de trabajo; para lluvias anuales estarían por arriba de esos márgenes de error.

En resumen, sobre el área analizada, la grilla de precipitaciones diarias de Liebman y Allured de un grado de definición parece una herramienta útil e interesante, pero debe ser utilizada con cuidado, verificando su representatividad para cada caso en estudio.

Además de ampliar el proceso de análisis presentado en este trabajo, también sería interesante extender el estudio a la grilla de 2,5 grados de definición y hacer comparación con regionalizaciones como la presentada por Zamanillo et al. (2008).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con fondos de la ANPCyT - PID 35765. Al Servicio Meteorológico Nacional, por la cortesía en el trato y la eficiencia en la entrega de la información. Flavia Pelizardi ha sido becaria CIC durante el desarrollo de este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ensor, L.A. and Scott M. Robeson** (2008). “Statistical Characteristics of Daily Precipitation: Comparisons of Gridded and Point Datasets”. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 47, September.
- Halcrow** (1999). *Plan Maestro Integral Cuenca del Río Salado*. Informe Final. Argentina. 198 p. Sir William Halcrow & Partners Ltd.
- Mauriño, M. F.** (2004). “Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships: Applicability in Different Climatic Regions of Argentina”. *Journal of Hydrologic Engineering*. 9, 269.
- Paoli, C.U.; J.E.A. Bolzico, y P. Cacik** (1996). *Análisis de Frecuencia de Variables Hidrológicas*. Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.
- Russell, R.; G. Davis; S. Emmerson and D. Harvey** (2009). *Unidata Program Center. The NetCDF Fortran 77 Interface Guide NetCDF Version 4.0.1*
- Sivapalan, M. and G. Blöschl** (1998). “Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves”. *Journal of Hydrolog*. 204 (1998) 150-167
- Stewart, E.J.** (1989). “New Directions for Surface Water Modeling”. *Proceedings of the Baltimore Symposium*. IAHS Publ.no. 181,1989
- Varela, C.; M. Varni e I. Extraigas** (2005). “Curvas intensidad-duración-recurrencia para diez años de datos pluviográficos en la ciudad de Azul, centro de la provincia de Buenos Aires”. *Revista Argentina de Agrometeorología* 3-4, Ed. Asociación Argentina de Meteorólogos, SIN 1666-017X, pp. 67-70.
- Villanueva, A. O. N.; C. Scioli; L. Vives; y F. Gil** (2007). *Hidrología Superficial del Partido de Tres Arroyos*, Provincia de Buenos Aires (Parte II).IHLLA-UNCPBA.
- Zamanillo, E. A.; G. R. Larenze; M. J. Tito; M.M. Pérez y M.E. Garat** (2008) *Tormentas de Diseño para la Provincia de Entre Ríos*, Primera Edición, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

## **SOBRE EL DESEMPEÑO NUMÉRICO DEL MODELO DIT**

**Gabriel Caamaño Nelli<sup>1,2,3</sup>, Laura Colladon<sup>1,3</sup>, Clarita María Dasso<sup>1,2,3</sup>, Andrea Fabiana Rico<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Nacional del Agua - Centro de la Región Semiárida    <sup>2</sup> Consejo Nac. de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>3</sup> Universidad Católica de Córdoba - Grupo de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobrementemente Aforadas

Medrano 235, (5152) Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina. Teléfono: 03541-422347 Email: lauracolladon@gmail.com

**RESUMEN:** DIT es un modelo desarrollado para representar la relación entre la intensidad, la duración y el período de retorno de lluvias máximas anuales. A la par de las virtudes conceptuales y operativas que le confiere su deducción analítica, a la hora de evaluar la conveniencia de utilizarlo corresponde cotejar con otras opciones su aproximación a la función probabilística supuestamente óptima. Este tipo de ensayo se realizó ya cuando se presentó el modelo, sobre las series de los siete pluviógrafos que se emplean en la provincia de Córdoba para estimar lluvias de diseño, comprobándose en general la conveniencia de emplear el DIT. Hoy, sin embargo, parece razonable efectuar comparaciones adicionales por dos motivos: la disponibilidad de cifras de otras estaciones, que ampliaría la base de información para ratificar o rectificar esa conclusión, y el desarrollo de una versión más parsimoniosa del DIT, con un parámetro menos, lo cual previsiblemente afectaría su desempeño numérico. Este examen está hoy en ejecución, utilizando datos de cuatro puntos diferentes a los del ensayo original: La Rioja, Rosario, Rafaela y Buenos Aires. La metodología es básicamente la misma que en dicho experimento:

- Asignar frecuencia empírica a los datos;
- Elegir la función objetivo, ponderando el ajuste general con el de la cola de la distribución;
- Determinar, de acuerdo a ella, la función “óptima” de distribución;
- Ajustar los modelos de función i-d-T, Sherman y DIT de 3 y 4 parámetros;
- Contrastar las estimaciones de los modelos, considerando errores sistemáticos y aleatorios.

**PALABRAS CLAVE:** Lluvias máximas; modelo DIT; fórmula de Sherman

## INTRODUCCIÓN

Quienes asumen la responsabilidad de planificar el uso de riberas anegadizas o de dimensionar las construcciones que en ellas se emplazan, se enfrentan cotidianamente a calibrar racionalmente el fenómeno que su proyecto deberá afrontar, sea en términos de caudal o de nivel de agua.

Esa elección sólo puede sustentarse en lo que se sepa de la conducta hidrológica previa del sistema, en la admisión de que ese funcionamiento se mantendrá en adelante y en técnicas para transferir dicho conocimiento del pasado al porvenir.

Existen pericias bastante objetivas para juzgar la permanencia del comportamiento general de procesos hidrológicos y procedimientos estadísticos con los cuales sintetizarlo para uso futuro. La cuestión pasa a ser, entonces, qué se conoce del régimen histórico.

En el contexto nacional y en el de países como el nuestro, la respuesta suele ser desalentadora, pues no es habitual que haya series de descarga o de altura hidrométrica estadísticamente aptas.

Esto lleva a emplear la intensidad pluvial como magnitud sucedánea de las anteriores. En concreto, el análisis se centra en deducir la *lluvia de diseño* que, transformación mediante, originaría el *caudal de proyecto*.

La lluvia de diseño es el evento hipotético de duración  $d$ , que tiene la mayor intensidad media  $i$ , con una recurrencia anual  $T$ . Las propiedades físicas de la cuenca de aporte determinan la duración a utilizar, en tanto que el período de retorno se estipula en función de las características del proyecto.

Para establecer la intensidad de la lluvia, que constituye la incógnita del problema, es necesario entonces conocer el algoritmo que vincula las tres variables, es decir, la función  $i-d-T$ .

Las tácticas convencionales para plantear esa relación son de dos tipos: estadísticas o empíricas. El método que se adopte es clave al extrapolar la  $i-d-T$  a recurrencias mayores, porque habitualmente los guarismos estimados de una y otra manera difieren mucho entre sí.

Las técnicas estadísticas ligan intensidad y retorno mediante una **FDA** (función de distribución de probabilidad acumulada) por separado para cada duración adoptada. Esto permite que las curvas (aunque respondan a una función genérica) se intersequen al extrapolarlas, con el resultado ilógico que intensidad y duración crecen a la par. La forma integral de las FDA impide el manejo algebraico e implica estimación numérica y uso de tablas. Además, no proveen estimaciones de intensidad para duraciones intermedias de las elegidas.

Las ventajas de los modelos empíricos son, justamente, operatividad analítica e incluir las tres variables en una única ecuación. Sin embargo carecen de soporte argumental, imposibilitando la interpretación física de los parámetros. Una ecuación con muchos parámetros incorpora en exceso rasgos muestrales (no poblacionales) al calibrar por mínimos cuadrados, dando una falsa impresión de superioridad, por ajustarse mejor a una serie aleatoria. Pero la confiabilidad de estimación decae hacia los extremos del intervalo de ajuste, tornando objetable la extrapolación de la función.

Como sus falencias son de distinta índole, combinar ambos enfoques mejora las perspectivas. Si los pares de datos intensidad-recurrencia (requeridos para calibrar una ecuación empírica) se extraen de la función de distribución de probabilidad óptima para la estación (en vez de tomarlos de la posición de gráfica) se aplica un control indirecto a los valores extrapolados, ya que es admisible usar la FDA por encima del rango observado. Como conserva la practicidad de los modelos empíricos,

aunque desdibuje el sustento teórico, esta alternativa se utilizó durante décadas como superadora de sus antecesoras.

A fines del siglo pasado, el problema se abordó con otro criterio: idear una aproximación algebraica de la función probabilística regional dominante (relación i-T) e incorporar la duración de lluvia en forma analítica, para expresar la función i-d-T como una superficie tridimensional continua.

Este proceder otorga significado conceptual a los parámetros del algoritmo resultante, denominado **DIT** (Caamaño Nelli y García, 1999), identificando sus componentes locales y zonales.

De ello resulta una manera objetiva y simple de reformular la expresión matemática al transponerla, del pluviógrafo en que se derivó a cada nodo de la red pluviométrica, dentro de su zona homogénea, importante cualidad que ninguna de las propuestas anteriores presenta (Caamaño Nelli, García y Dasso, 1998).

En otro aspecto, un requisito primordial impuesto a este modelo racional fue no superar la cantidad de constantes de calibración del estimador estadístico-empírico con el que se cotejaría su aptitud, para evitar que la flexibilidad que ello le otorgaría favoreciese su bondad de ajuste.

El DIT, en efecto, cumplió esa exigencia, al tener cuatro parámetros como su rival. Al presentarlo (Caamaño Nelli y García, 1998), se advirtió que incluso uno de ellos podría ser redundante, pero se carecía de suficiente evidencia al respecto. Estudios posteriores ratificaron esa hipótesis (Caamaño Nelli, Rico, Dasso y García, 2011).

Ahora bien, más allá de su soporte lógico, de su solvencia para transposición y de su parsimonia paramétrica, se pretende que un modelo matemático aproxime acertadamente los datos medidos.

En tal sentido, los ensayos originales convalidaron al DIT, que, en líneas generales, mostró mayor eficacia para emular las FDA óptimas locales de los siete pluviógrafos adoptados para representar las relaciones i-d-T de la provincia de Córdoba.

Hoy, sin embargo, parece conveniente efectuar comparaciones adicionales por dos motivos: la disponibilidad de cifras de otras estaciones, que ampliaría la base de información para ratificar o rectificar esa conclusión, y el desarrollo de una versión más parsimoniosa del DIT, con un parámetro menos, lo cual previsiblemente afectaría su desempeño numérico.

## DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

### Estimador estadístico-empírico: Fórmula de Sherman

La fórmula empírica planteada por Sherman (1931) para Boston es hoy utilizada mayoritariamente, por la flexibilidad que le otorgan sus cuatro parámetros:

$$i_{d,T} = \frac{K \cdot T^m}{(d + c)^n} \quad [1]$$

donde  $i_{d,T}$  es la intensidad de la mayor lluvia de duración  $d$  que se daría al menos una vez en  $T$  años.

Los parámetros  $K$ ,  $m$ ,  $n$  se determinan por regresión lineal múltiple, con la versión logarítmica de la función. El restante,  $c$ , que evidencia la falta de sentido físico de la relación, es un término de corrección, obtenido por aproximaciones sucesivas hasta optimizar el coeficiente de determinación.

En el presente caso, la fórmula se emplea como un estimador estadístico-empírico, ya que, como se dijo, los pares intensidad-recurrencia para calibrarla se extrajeron de FDA del tipo elegido para cada estación, buscando convalidar la extrapolación a recurrencias mayores.

Esta aplicación de Sherman sobre valores de distribuciones se abreviara en adelante **S/FDA**.

### Estimador estadístico-deductivo: Modelo DIT

En el rastreo de un mecanismo racional para extrapolar el vínculo  $i$ - $d$ - $T$  dentro de zonas homogéneas de la provincia de Córdoba, Caamaño Nelli y García (1998) desarrollaron el DIT, algoritmo que parametriza el rol de la lluvia diaria en esa relación y permite transponerla como una superficie tridimensional continua. El modelo asume distribución probabilística lognormal de las láminas máximas anuales de cualquier duración y se basa en la ecuación [2]:

$$\ln i_{d,T} = A \cdot \Phi_y - B \cdot \delta_y + C \quad [2]$$

donde  $\Phi_y$  es el *factor de frecuencia normal* y  $\delta_y$  el *factor de persistencia*, que dependen a su vez de las variables independientes, es decir, la recurrencia y la duración de la lluvia. La aproximación algebraica del primero es

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

en tanto que

$$\delta_y = (\ln d)^q \quad [4]$$

En principio, DIT tiene 4 parámetros: el exponente  $q$  de la ecuación [4],  $B$ ,  $C$  y  $A$ . Los dos últimos fueron deducidos como sumas, entre cuyos términos se cuentan, respectivamente,  $\mu$  y  $\sigma$ , la media y el desvío estándar de los logaritmos de la serie de láminas diarias máximas anuales.

Para los pluviómetros, la información local sobre lluvias máximas está contenida en esa serie y se expresa a través de sus estadísticos en la función. Esa propiedad permite transponer la  $i$ - $d$ - $T$  a cada puesto, sustituyendo los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  para incorporar sus rasgos locales específicos.

Estudios recientes (Caamaño Nelli, Rico, Dasso y García, 2011) mostraron que es razonable asignar a  $q$  un valor constante, al menos para la mayor parte del territorio argentino, lo cual lo convierte en superfluo para la calibración.

En adelante, la formulación original del DIT, que se sirve de la igualdad [4], se denominará **DIT4p**, designando **DIT3p** a la versión de tres parámetros (que deriva de negar a  $q$  tal condición), en la cual el factor de persistencia se define así:

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

## METODOLOGÍA

En el ensayo que se plantea, la metodología es básicamente la misma que en el examen original. En esencia, contempla dos etapas: identificar la FDA “óptima” para cada estación y emplearla para juzgar la idoneidad comparativa de los modelos i-d-T. Los pasos del proceso son los siguientes:

### A) Asignar frecuencia empírica a los datos

Los datos de partida son mediciones de intensidad anual máxima, para un conjunto de duraciones de lluvia elegidas, que en este estudio fueron 5, 10, 15 y 30 minutos y 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas, siempre y cuando se dispusiera de las series respectivas.

Estos registros carecen de valoración probabilística, siendo necesario atribuirles *a priori* una frecuencia empírica. Para ello se recurrió a la posición de graficación propuesta por Weibull, que es la de mejor sustento estadístico. Siendo  $n$  el total de valores a graficar y  $m$  la posición de un valor  $x_m$  en una lista ordenada de mayor a menor, esta fórmula da la probabilidad  $P_g$ , de exceder  $x_m$ :

$$P_g = (X \geq x_m) = \frac{m}{n + 1} \quad [6]$$

La frecuencia así asignada a las mediciones fue empleada para calificar las estimaciones provistas por funciones de distribución escogidas e identificar la óptima, mediante una función objetivo, **FO**.

### B) Elegir la función objetivo

Dado que se asume que las series locales de lluvia máxima anual, de distintas duraciones, son mejor representadas por determinada función probabilística, se requiere una norma para evaluar cuál es la FDA supuestamente óptima en cada estación. Habida cuenta de que cualquier criterio para tal fin es subjetivo, se adopta la regla ya utilizada por Caamaño Nelli y García (1994) por las razones dadas entonces, que apunta a ponderar el ajuste general con el de la cola de la distribución.

Combina dos pruebas, Kolmogorov-Smirnov y error cuadrático, cuyos respectivos índices (desvío máximo,  $k$ , y suma en los últimos 5 puntos, por cien) decaen a medida que mejora el ajuste. De allí que el producto de ambos se utilice como Función Objetivo, **FO<sub>d</sub>**, a minimizar para cada duración  $d$  y la suma de estas **FO<sub>d</sub>**, para definir la distribución óptima local. Es decir, siendo **Pt** la probabilidad teórica, provista por la función de distribución de probabilidad acumulada bajo análisis, se define:

$$FO_d = k \cdot 100 \cdot \sum_1^5 (Pt - P_g)^2 \quad [7]$$

### C) Determinar la función “óptima” de distribución

La selección se limitó a cuatro funciones de distribución acumulada: Gumbel, Lognormal, Gamma y Pearson III, usuales para describir el comportamiento probabilístico de valores máximos.

Una vez calibradas con los registros de campo, se dedujeron las probabilidades que estipula cada una para esos datos y se evaluó cuan bien se ajustan a las frecuencias empíricas provistas por la fórmula de Weibull. La que arrojó el menor valor para la suma de las **FO<sub>d</sub>**, se consideró la FDA “óptima” de la estación.

### **D) Ajustar los modelos de función i-d-T**

En cada estación se tomaron intensidades de recurrencia 2, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 130, 150, 180 y 200 años de las diez FDA óptimas de distintas duraciones. Esos 200 valores se usaron para ajustar el modelo estadístico-empírico S/FDA.

Lo mismo se hizo con las 10 lognormales de cada puesto, ya que la versión original del DIT asume dicha distribución de la intensidad de lluvia y, por lo tanto, se calibra siempre sobre ternas i-d-T extraídas de tal tipo de FDA.

Con las matrices i-d-T resultantes se estimaron parámetros de los algoritmos S/FDA, DIT4p y DIT3p por regresión lineal múltiple, iterando hasta optimizar por prueba y error en los dos primeros y de una vez en el último, que admite una formulación totalmente lineal.

### **E) Contrastar las estimaciones de los modelos**

Con los tres modelos se generaron sendas matrices de 200 puntos por estación, correspondientes a los del paso anterior, y se confrontaron utilizando como patrón los vectores por duración que responden a la FDA óptima de cada estación. Los errores sistemáticos se valoraron a través del sesgo porcentual,  $S\%$ , en tanto que los aleatorios fueron ponderados mediante el coeficiente de determinación,  $r^2$ .

Corresponde señalar que la actuación del S/FDA está siendo conceptuada con los mismos valores con que se lo calibró, de modo que lo que se está juzgando es la distorsión que sufre la predicción debido a la estructura incorrecta del modelo.

En cambio, en el caso del DIT, lo que se considera es su aptitud para representar la FDA óptima, sea esta lognormal, como supone el modelo, o no. Para la versión DIT3p se califica además la pérdida de precisión, causada por la eliminación de un parámetro en aras de mayor parsimonia.

## **ÁREA DE ENSAYO**

La Figura 1 muestra la banda central de Argentina, aproximadamente entre los paralelos 27° y 35° de latitud sur. En ella se indican, en rojo, las siete estaciones base con las que probó el DIT en un comienzo, que sirvieron para generar funciones locales intensidad-duración-recurrencia y transponerlas a 141 puntos de la provincia de Córdoba. Ellas son: Villa Dolores, La Suela CIRSA, Ceres (Santa Fe), Córdoba Observatorio, Río Cuarto, Marcos Juárez y Laboulaye.

En azul se señalan los cuatro pluviógrafos con cuyos datos se ejecutó el presente ensayo: La Rioja Aero, Rosario Aero, Rafaela y Villa Ortúzar (Observatorio Central, de la Capital Federal). La Tabla 1 indica las coordenadas de estos puestos, su precipitación media anual y el período de registro, en el cual se extrajeron las intensidades máximas de cada año, para las duraciones seleccionadas.



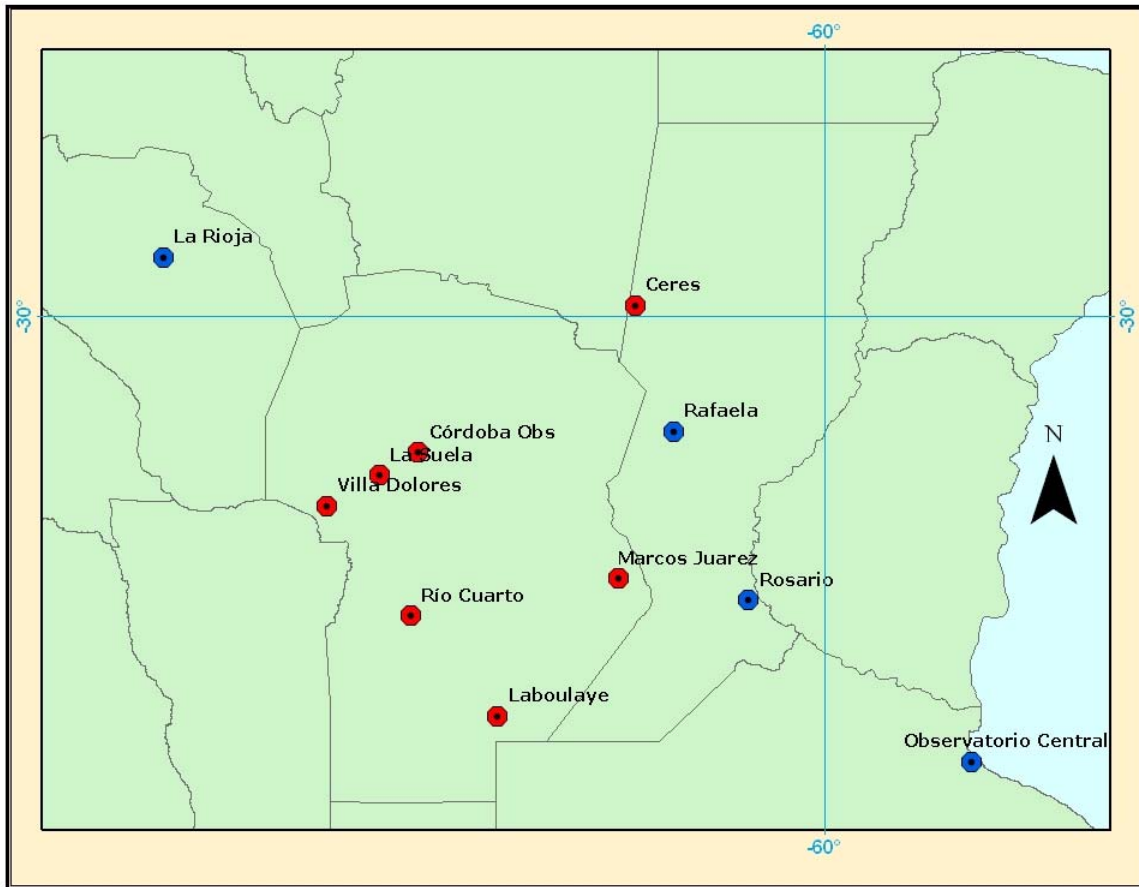


Figura 1.- Ubicación de las estaciones del estudio inicial del DIT (rojo) y del presente ensayo (azul)

Tabla 1.- Caracterización de las estaciones y de las series pluviográficas empleadas en este ensayo

Estación pluviográfica	Unidad política	Latitud sur	Longitud oeste	Altitud s.n.m.	PMA (mm)	Período (años)	Años de serie de cada duración											
							5'	10'	15'	30'	1 h	2 h	3 h	6 h	12h	24h		
La Rioja	La Rioja	29° 23'	66° 49'	429 m	410	1961-1999	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	
Villa Ortúzar	Cap. Fed.	34° 35'	58° 29'	25 m	1.145	1961-1999	×	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	
Rafaela	Santa Fe	31° 11'	61° 33'	99 m	951	1970-2006	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	
Rosario	Santa Fe	32° 55'	60° 47'	25 m	928	1942-1997	26	×	25	35	35	×	49	49	50	50		

## RESULTADOS

Como se puede apreciar en la Tabla 2, la función objetivo óptima no muestra una preponderancia de determinada FDA en todas las estaciones: en La Rioja, las series de la mitad de las duraciones se ajustan mejor a una Gamma; en Rafaela y Villa Ortúzar se distribuyen principalmente según una lognormal y Rosario presenta la misma cantidad de logros de esta función y de la Gumbel.

Tabla 2.- Cantidad de casos en que la FOD óptima corresponde a cada función de distribución.

Estación pluviográfica	DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA				TOTAL
	Log N	Gamma	Gumbel	Pearson	
La Rioja	3	5	1	1	10
Villa Ortúzar	4	1	2	2	9
Rafaela	7	0	3	0	10
Rosario	4	0	4	0	8
<b>TOTAL</b>	18	6	10	3	37

Aun cuando en el total de casos se impone la distribución lognormal, la suma de las  $FO_d$  de cada estación favorece a la Gumbel, que obtiene el menor valor en todos los puestos, como muestran la Figura 2 y la Tabla 3. En consecuencia, el conjunto de FDA Gumbel, de las duraciones empleadas, constituye el patrón a emular por los tres modelos, en cada localidad.

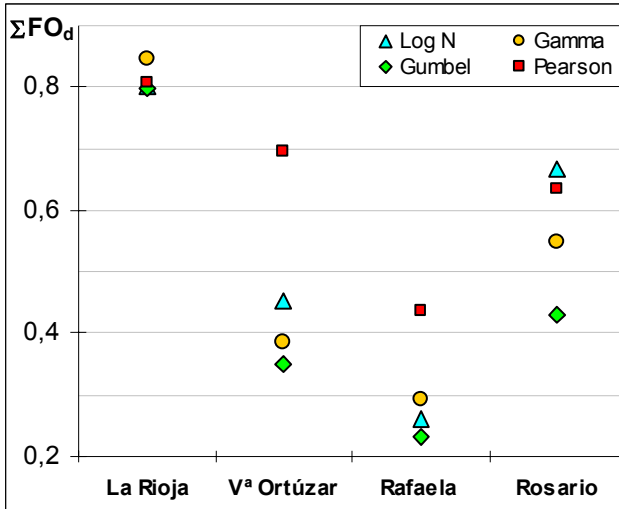


Figura 2.- Sumatoria por estación de los valores de las funciones objetivo de cada

Tabla 3.- Sumatoria por estación de los valores de las funciones objetivo de cada

Estación pluviográfica	DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA			
	Log N	Gamma	Gumbel	Pearson
La Rioja Aero	0,800	0,846	0,797	0,806
Villa Ortúzar	0,453	0,386	0,351	0,695
Rafaela	0,262	0,294	0,233	0,436
Rosario Aero	0,665	0,548	0,431	0,634
<b>TOTAL</b>	<b>2,180</b>	<b>2,074</b>	<b>1,812</b>	<b>2,572</b>

El hecho de que la elección recaiga en Gumbel ratifica que para la fórmula de Sherman se evalúa la estructura en sí del modelo (beneficiado al ajustarse sobre valores extraídos de distribuciones de ese tipo), mientras que para el DIT se juzga su capacidad de aproximar FDA distintas a las lognormales que asume (teniendo a su favor una configuración deducida analíticamente).

Definidas, entonces, las series de valores a utilizar, se ajustaron a ellas los tres modelos analizados: Sherman, DIT4p y DIT3p. La calibración se efectuó por regresión lineal múltiple, con las ecuaciones (1) (llevada a forma logarítmica) y (2). Para esta última, las versiones de cuatro y de tres parámetros del DIT difirieron en la definición del factor de persistencia, según las expresiones (4) y (5), respectivamente. La Tabla 4 da cuenta de los resultados obtenidos.

Tabla 4.- Parámetros y coeficientes de determinación obtenidos en los ajustes de los tres modelos

Estación pluviográfica	PARÁMETROS SHERMAN				r <sup>2</sup>
	K	m	n	c	
La Rioja	769	0,1944	0,8453	14,6	0,99021
Villa Ortúzar	849	0,1559	0,7384	14,9	0,99760
Rafaela	930	0,1587	0,7185	13,7	0,99802
Rosario	1.040	0,1499	0,7488	14,4	0,99687
Estación pluviográfica	PARÁMETROS DIT4p				r <sup>2</sup>
	A	B	C	q	
La Rioja	0,3886	0,1564	4,5591	1,65	0,99155
Villa Ortúzar	0,2971	0,1221	4,9107	1,70	0,99802
Rafaela	0,3074	0,1160	5,0159	1,70	0,99656
Rosario	0,2683	0,1053	5,0149	1,77	0,99570
Estación pluviográfica	PARÁMETROS DIT3p			r <sup>2</sup>	
	A	B	C		
La Rioja	0,3886	0,1509	4,5437	0,99153	
Villa Ortúzar	0,2971	0,1313	4,9412	0,99800	
Rafaela	0,3074	0,1245	5,0405	0,99653	
Rosario	0,2683	0,1312	5,0935	0,99533	

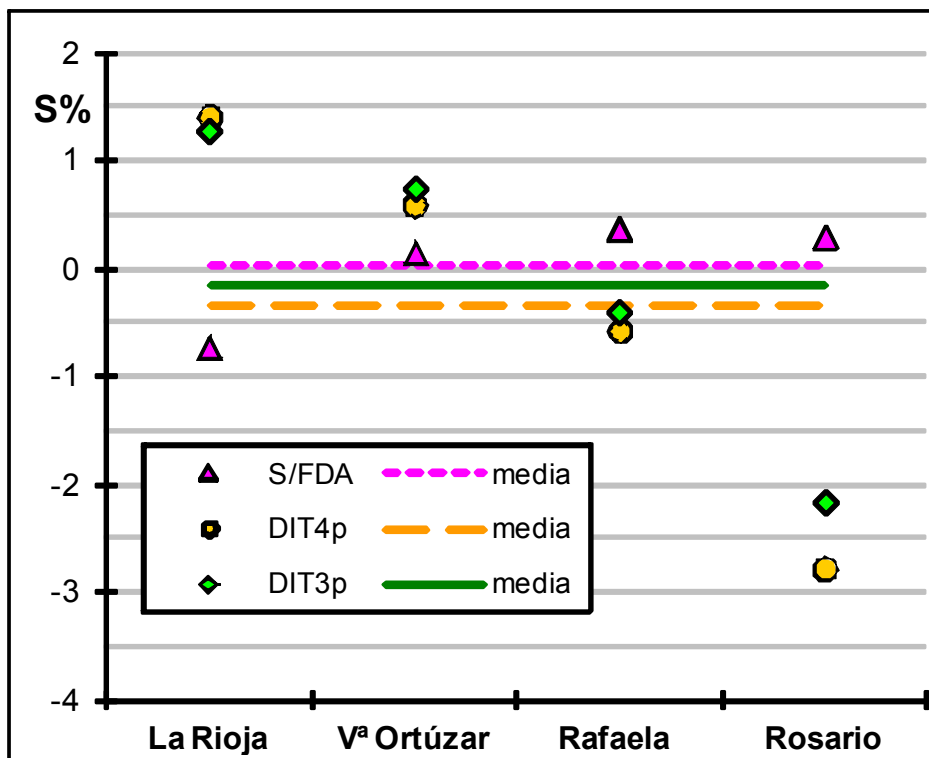
Una vez ajustados los modelos, se generaron con ellos sendas matrices de 200 intensidades de lluvia para cada estación (10 duraciones por 20 recurrencias) y se cotejaron con las correspondientes de las distribuciones Gumbel adoptadas como patrón, para aquellas duraciones que contasen con datos.

Esto se realizó mediante el sesgo porcentual, S%, y el coeficiente de determinación de la predicción,  $R^2$ , arrojado por la regresión lineal simple entre ambos conjuntos de valores.

El contraste de aptitud entre los modelos se presentan en la Tabla 5 y las Ffiguras (3) y (4).

**Tabla 5.-** Desempeño de los modelos en la predicción de intensidades de lluvia con distribuciones Gumbel

Estación pluviográfica	COEFICIENTE $R^2$			SESGO PORCENTUAL		
	S/FDA	DIT4p	DIT3p	S/FDA	DIT4p	DIT3p
La Rioja	0,95774	0,98280	0,97711	-0,74	1,40	1,26
Villa Ortúzar	0,99247	0,99704	0,99691	0,14	0,58	0,73
Rafaela	0,99710	0,99683	0,99503	0,37	-0,58	-0,42
Rosario	0,99066	0,98670	0,98244	0,29	-2,78	-2,17
PROMEDIO	0,98449	0,99084	0,98787	0,02	-0,34	-0,15



**Figura 3.-** Sesgo porcentual de las predicciones frente a intensidades de lluvia con distribuciones Gumbel

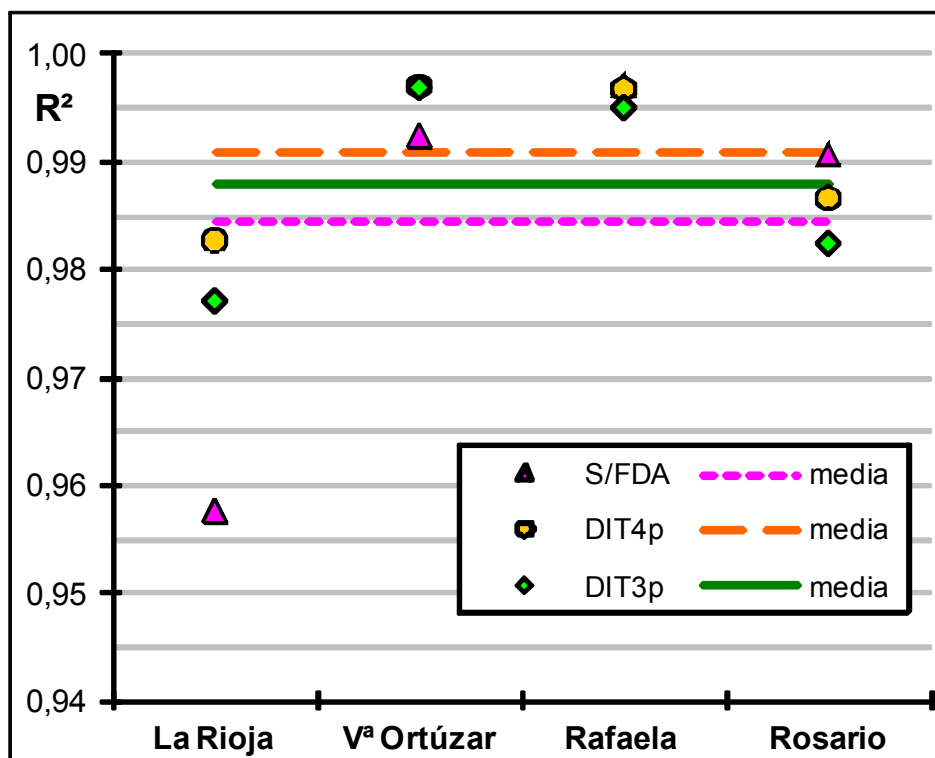


Figura 4.- Coeficiente de determinación de las predicciones versus intensidades con distribuciones Gumbel

## ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Lo expuesto en adelante debe verse a la luz de lo limitado de una muestra de cuatro estaciones que, si bien impide generalizar las conclusiones, cobra fuerza por su concordancia con estudios previos.

En primera instancia, según se desprende de la Tabla 4, los parámetros de los tres modelos presentan valores acordes con los deducidos en otros lugares del país.

Pero lo atrayente de dicha tabla es que esos algoritmos ajustan en forma excepcional a los *datos*, pues el coeficiente de determinación de la calibración supera siempre 0,99. Al respecto, se debe tener en cuenta que se atribuyeron probabilidades a tales *datos* siguiendo una distribución teórica (Gumbel en un caso y lognormal en los demás), lo cual suaviza notablemente la irregularidad de la frecuencia empírica, asignada inicialmente con la fórmula de Weibull.

No obstante, la aclaración de que los tres contendientes reflejan muy bien las probabilidades dadas por una FDA teórica es una noticia positiva, porque precisamente eso era lo que pretendían.

Para predecir intensidades de lluvia que tienen distribuciones Gumbel, los tres modelos mantienen excelente eficacia, ya que el sesgo no llega a 3 % en valor absoluto y que el coeficiente  $R^2$  de la predicción supera 0,95, sin salvedades, como se puede constatar en la Tabla 5 y las figuras (3) y (4).

Es interesante señalar que, a diferencia de lo reportado en el artículo de referencia (Caamaño Nelli y García, 1998), la aproximación de las FDA tipo Gumbel con modelos de base lognormal (como las versiones del DIT que aquí se examinan) no produjo casos con error sistemático (S%) elevado.

Yendo al meollo de la cuestión, que es el análisis comparativo de los 3 arquetipos de relación i-d-T, se observa que el error sistemático de la aproximación de Sherman no es relevante y su promedio es casi nulo. En todas las estaciones es muy inferior a los causados por las dos opciones del DIT.

La razón de ello es que estas últimas son incapaces de revertir el efecto producido por una distribución que no es la óptima. Como la adopción de la FDA no constituye un condicionamiento necesario del DIT, sino un compromiso circunstancial para acomodarse a determinado régimen local (Caamaño Nelli y García, 1999), dicho efecto deja buenas perspectivas para desarrollar ecuaciones similares a la (3), correspondientes a factores de frecuencia diferentes del normal.

Un aspecto llamativo de estas observaciones es el DIT3p ocasiona errores inferiores en tres de las estaciones y menos de la mitad de sesgo promedio que la versión de cuatro parámetros.

En cuanto a errores aleatorios, medidos por el  $R^2$ , la fórmula empírica muestra el valor local y el promedio más bajos, indicando que para este ensayo su falencia estructural predomina.

De esta comparación resulta sugestivo que incluso el DIT3p supere el desempeño del algoritmo de Sherman, dado que se trata de un esquema menos flexible por incluir un parámetro menos.

En síntesis:

- En general, los resultados concuerdan con los obtenidos en los trabajos previos para Córdoba.
- Los tres modelos analizados reflejan muy bien las probabilidades dadas por una FDA teórica.
- Las opciones de 4 parámetros tienen desempeños de calidad comparable, destacándose la propuesta de Sherman por exiguos errores sistemáticos y el DIT por pequeños errores aleatorios.
- La menor correlación que luce Sherman es insalvable, porque se debe a la estructura del modelo
- Los mayores sesgos dados por el DIT los causa el uso sistemático de la distribución lognormal, no óptima para estas estaciones. Esta limitación no es intrínseca del modelo y abre perspectivas promisorias al desarrollo de ecuaciones correspondientes a otro tipo de factores de frecuencia.
- La que sale más airosa del contraste es la versión DIT de tres parámetros, ya que muestra sesgos inferiores que la de cuatro y mayores correlaciones que Sherman, pese a darles una constante de ventaja en aras de mayor parsimonia. Se ratifica así que el DIT es un modelo de tres parámetros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caamaño Nelli, G. y C. M. Dasso, coordinadores** (2003) *Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias*. Editorial Universitas. 222 páginas. ISBN: 987-9406-43-5. Córdoba, Argentina.
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García** (1994) “El Vínculo entre Pluviometría Máxima y su Recurrencia a Escala Regional”. *XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. AIIH. Santiago, Chile.
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García** (1997) “Estimación de Máximos en Hidrología: Factores de Frecuencia Normal y Lognormal”. *Cuadernos CURIHAM* (ISSN 1514-2906). Año 3, N° 3, 1-17. Rosario, Argentina.
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García** (1998) “Estimación de la Función i-d-T a Escala Regional mediante el Factor de Frecuencia Normal”. *II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. CPCNA. Vol. 2, 157-167. Santa Fe, Argentina.
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García** (1999) “Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal”. *Ingeniería Hidráulica en México* (ISSN 0186-4076). Vol. XIV. N° 3, septiembre-diciembre. 37-44. D. F., México.
- Caamaño Nelli, G.; C. M. García y C. M. Dasso** (1998) “Zonalización de Tormentas de Diseño para la Provincia de Córdoba, Argentina”. *II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Vol. 2, 168-178. CPCNA. Santa Fe, Argentina.
- Caamaño Nelli, G.; C. M. García y E. Zamanillo** (1994) “Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias para la Provincia de Córdoba”. *XV Congreso Nacional del Agua*. CPCNA. La Plata, Argentina.
- Caamaño Nelli, G.; A. F. Rico; C. M. Dasso y C. M. García** (2011) “Relación intensidad-duración-recurrencia de lluvias máximas: Una versión simplificada del modelo DIT”. *XXIII Congreso Nacional del Agua*. CPCNA. Resistencia.
- Chow, Ven Te** (1951) “A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis”. *Transactions American Geophysical Union*. Vol. 32.

**García, C. M.; G. Caamaño Nelli y C. M. Dasso** (1998) “Relaciones entre Lluvias Máximas de Igual Recurrencia y Distintas Duraciones para la Región Central de Argentina”. *XVII Congreso Nacional del Agua*. CPCNA. Vol. 2, 179-188. Santa Fe, Argentina.

**García, C. M.; G. Caamaño Nelli y C. M. Dasso** (2001) “Estimación de Láminas Máximas de Lluvia a partir de Información Pluviométrica Diaria”. *Ingeniería del Agua* (ISSN 1134-2196), Vol. 8, N° 2, jun., 179-190. Córdoba, España.

**Pfaffetter, O.** (1957). *Chuvas intensas no Brasil*. DNOS. 419 p. Río de Janeiro.

**Rico, A.; C. M. Dasso; G. Caamaño Nelli y C. M. García** (2010) “Regionalización de Parámetros de un Modelo para Predicción de Lluvias Máximas”. *Primer Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. IHLla. Azul, Argentina.

**Sherman, C. W.** (1931). “Frequency and Intensity of Excessive Rainfalls at Boston”, *Mass. Transactions American Society of Civil Engineers*. 95, 951.

## EL MODELO DIT 3p PARA PREDICCIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS

**Gabriel Caamaño Nelli**<sup>1,2</sup>, **Andrea F. Rico**, **Clarita M. Dasso**<sup>1,2,3</sup>,

*Instituto Nacional del Agua (INA) - Centro de la Región Semiárida (CIRSA)*

<sup>1</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*

<sup>2</sup> *Universidad Nacional de Córdoba –*

<sup>3</sup> *Universidad Católica de Córdoba.*

*Medrano 235, (5152) Villa Carlos Paz, Córdoba. Teléfono y fax: 03541-422347.*

*E-mail: [an\\_rico@yahoo.com.ar](mailto:an_rico@yahoo.com.ar); [cdasso@ina.gov.ar](mailto:cdasso@ina.gov.ar)*

**RESUMEN:** El modelo **DIT 3p**, es una versión superadora del modelo de predicción de lluvias máximas DIT (Caamaño Nelli y García, 1999). Sus 4 parámetros originales dependen, A y C de características locales de la lluvia y de aspectos zonales el exponente q y B, dándole a dicho algoritmo sustento conceptual y simpleza en la transposición de la relación idT a estaciones con datos pluviométricos. Sin embargo, cuando la aplicación del modelo pretende abarcar áreas muy extensas, resulta difícil reunir información pluviográfica para la calibración o conseguir series pluviométricas para la transposición, obligando a recurrir a la regionalización de los parámetros para predecir lluvias en zonas sin mediciones. Estudios antecedentes sobre la distribución espacial de los 4 parámetros de DIT en gran parte del territorio argentino (Rico *et al.* 2010, 2011), evidenciaron cierta relación inversa entre los parámetros B y q, lo cual permitió plantear la hipótesis de que, fijando **q**, se estrecharía el rango de **B** y suavizaría su distribución espacial y en consecuencia se simplificaría la calibración del modelo. La metodología consistió en efectuar regresiones intensidad-duración-recurrencia en casi 30 estaciones pluviográficas con funciones idt de la región central de Argentina. Mediante procedimientos iterativos se determinó el valor constante de q elaborando mapas de isolíneas de los parámetros de DIT 4p y DIT 3p y contrastando los resultados. Los resultados demostraron que, aunque el valor de **q** no sea el óptimo local en cada estación analizada, la correlación i-d-T sigue siendo alta, pues **B** compensa la rigidez impuesta a **q**. Se confirma, de ésta manera, la suposición inicial del modelo original, de que q podría ser considerado constante. A pesar de la diversidad en la naturaleza de la información de partida, las pruebas convalidan la hipótesis de partida, permitiendo concluir que, aún con tres parámetros, el DIT se perfila como un algoritmo muy apto para describir y transponer la relación i-d-T.

**PALABRAS CLAVES:** Lluvias de diseño, relación idT, modelo DIT, regionalización.

## INTRODUCCIÓN

La *lluvia de diseño* es un acontecimiento ficticio futuro, cuya intensidad media  $i$  es la máxima esperable para una duración  $d$  y una recurrencia o período de retorno,  $T$  preestablecidas. El principal uso de esta abstracción es evaluar el *caudal de proyecto* de una obra (o una acción) asociada a riesgo hídrico, cuando esto no es posible a partir de registros de descarga. Para arribar a esa intensidad crítica es necesario, entonces, conocer la relación de dependencia que ella tiene con la duración y el período de retorno de la lluvia. Dicha relación  $i$ - $d$ - $T$  puede responder a fundamentos teóricos o empíricos y se han planteado algoritmos diversos para describirla. Uno de éstos es el DIT (Caamaño Nelli y García, 1999), conveniente por sustento conceptual, expresión analítica continua y lo sencillo que es adaptarlo a condiciones locales cuando se lo transpone.

El DIT exhibe una flexibilidad equivalente a la de las mejores alternativas empíricas, debido a que, al igual que éstas, fue planteado como un modelo de cuatro parámetros. Sin embargo, existen motivos para pensar que uno de ellos podría encubrir un valor invariable, con lo cual perdería su función de elemento de ajuste del modelo. Si, en efecto, uno de los parámetros es redundante, y si asignarle una cuantía fija no va en desmedro de su representatividad, se simplificaría no sólo la calibración sino el propio algoritmo. Y la distribución espacial de los restantes parámetros, que interesa para evaluar lluvias de diseño en zonas sin mediciones, probablemente mejor.

Con base en este planteo, los objetivos de este estudio son analizar la aptitud del DIT con un parámetro menos y mejorar la distribución regional de los restantes.

## ANTECEDENTES E HIPÓTESIS

DIT es un modelo cuasi conceptual de relación  $i$ - $d$ - $T$ , que plantea el logaritmo de la intensidad como una función lineal del *factor de frecuencia*  $\Phi$  (Chow, 1951) y de un *factor de persistencia*  $\delta$  (Caamaño Nelli y García, 1998), vinculados mediante dos parámetros locales, propios de la estación de medición,  $A$  y  $C$ , y uno zonal,  $B$

$$\ln i = A \cdot \Phi - B \cdot \delta + C \quad [1]$$

Con base en la hipótesis de distribución probabilística lognormal de los máximos de lluvia anual, el factor de frecuencia tiene una relación biunívoca con el período de retorno,  $T$ ,

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

El factor  $\delta$ , en tanto, depende de la duración de la lluvia, mediante un cuarto parámetro  $q$ , zonal

$$\delta = (\ln d)^q \quad [3]$$

Al definir el DIT, sus autores dejaron abierta la posibilidad de que el parámetro  $q$  se considere constante, dado lo reducido de su rango de valores. Sin embargo, admitieron que la evidencia al respecto no era suficiente. Ello se debió a que emplearon un conjunto de solamente siete estaciones pluviográficas y a que la región representada, que corresponde a la Provincia de Córdoba, fue limitada: 165.321 km<sup>2</sup>.

Recientemente, Rico (2010) y Rico *et al.* (2010) estudiaron la distribución espacial de los parámetros del DIT, donde contemplaron información de 27 estaciones, abarcando un área diez veces superior a la de Córdoba. Éstos no llegaron a una configuración regional satisfactoria para  $B$



y  $q$ , los parámetros vinculados con la duración, pero detectaron tendencias de variación espacial contrarias entre ambos, de modo tal que, cuando el valor de  $B$  aumenta, el de  $q$  disminuye y viceversa.

Tales antecedentes llevan a plantear las siguientes hipótesis para este ensayo. Si  $B$  crece cuando  $q$  se reduce, fijar el valor de  $q$  estrecharía la gama de valores de  $B$  y suavizaría su distribución espacial, tornándola más conveniente para interpolar. Aunque el  $q$  fijado no sea el óptimo local, la correlación entre intensidad, duración y recurrencia que plantea el DIT será alta, pues  $B$  compensa en parte la rigidez impuesta a  $q$ .

## REGIÓN E INFORMACIÓN DE ENSAYO

El área experimental de este estudio abarca el centro y el norte de Argentina. La ubicación de las 28 estaciones con función idT recopiladas utilizadas como base se exhibe en la Figura 1. Al elaborar relaciones intensidad-duración-recurrencia para dichas localidades, la multiplicidad de necesidades y criterios que los respectivos autores tomaron en consideración repercutieron en una diversidad de productos, en cuanto al tipo de función adoptada (Sherman, Bell, DIT) y a los rangos e intervalos de las variables independientes. Así, las duraciones pueden llegar a máximos tan dispares como 2 horas y 1 día, mientras que las mayores recurrencias contempladas alcanzan entre 50 y 500 años (Tabla 1).

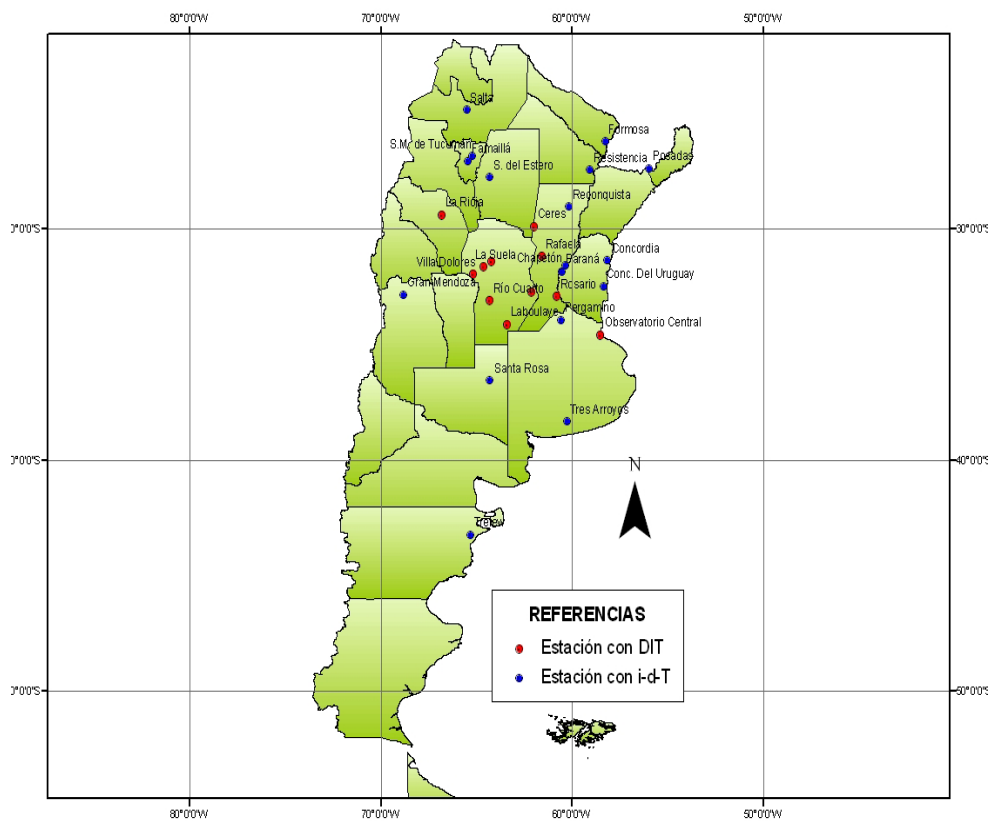


Figura 1.- Región de ensayo y estaciones con función intensidad-duración-recurrencia

**Tabla 1.-** Tipo de función idT con máximas recurrencias y duración para cada estación

N°	ESTACIÓN	FUENTE	TIPO DE FUNCIÓN	MÁXIMOS	
				T (años)	d (min)
1	Villa Dolores	Caamaño Nelli y García (1999)	DIT	200	1440
2	La Suela			200	1440
3	Ceres			200	1440
4	Córdoba Obs.			200	1440
5	Río Cuarto			200	1440
6	Marcos Juárez			200	1440
7	Laboulaye			200	1440
8	La Rioja		DIT	200	720
9	Villa Ortuzar SMN			200	1440
10	Rafaela			200	1440
11	Rosario			200	1440
12	Santa Rosa	Farias, Olmos e Ibáñez (2009)	Sherman	500	180
13	Pergamino			500	180
14	Tres Arroyos			500	180
15	Posadas			500	180
16	Chapetón			500	180
17	Famaillá	Farías y Olmos (2007)	Sherman	500	180
18	Resistencia			500	180
19	Salta			500	180
20	Formosa			500	180
21	S. del Estero			500	180
22	S.M. Tucumán			500	180
23	Gran Mendoza	López y Maza (2009)	Sherman	200	120
24	Concordia	Zamanillo y otros (2008)	Sherman	50	1440
25	C. del Uruguay			50	1440
26	Paraná			50	1440
27	Trelew	Serra y Chachero (2009)	Bernard	500	1440
28	Reconquista	Verano (2008)	2 parám.	50	360

## METODOLOGÍA

Debido a la diversidad de la información de base, se seleccionaron tres conjuntos de estaciones: **1)** las empleadas para el desarrollo del DIT en la Provincia de Córdoba (siete primeras de la Tabla 1); **2)** aquellas otras donde fue posible calibrar directamente el DIT (8 a 11 de la Tabla) y **3)** las 17 restantes, de las que se tuvo únicamente un modelo diferente de i-d-T.

Para las estaciones del conjunto **3** se extrajeron valores de intensidad, usando el modelo y la retícula duración-recurrencia planteados en la literatura para cada caso. Con las ternas resultantes se calibraron los parámetros del DIT por regresión lineal múltiple. Los efectos de esta estrategia fueron evaluados por Caamaño *et al.* (2010 y 2011).

Luego, en todos los puestos, se calcularon con el DIT intensidades para 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 360, 720 y 1440 minutos de duración y recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, siempre que las combinaciones cayeran en los rangos de ajuste primigenios.

Con las ternas **i**, **d**, **T** de los puestos del conjunto 1 como pertenecientes a una sola estación, se recalibró el DIT. Esto condujo a establecer cuál sería el valor óptimo para el parámetro **q**, asumiendo que fuese constante en la provincia de Córdoba, como intuyeron los autores del modelo. Permitted también definir una relación biunívoca entre el factor de persistencia **δ** y la duración de la lluvia, a través de la ecuación [3], con lo cual el DIT se convirtió en un modelo de 3 parámetros, explícitos en la ecuación [1]: **A**, **B** y **C**. Un ensayo similar se realizó para el conjunto 2.

Para cada estación se efectuó una regresión lineal múltiple con el  $q$  fijado y se examinó si, a pesar de esta restricción, la correlación resulta aceptable, teniendo como requisito para ello que el coeficiente de determinación  $r^2$  superase 0,9.

Se verificó si el rango del parámetro  $B$  se redujo, como conjetura la hipótesis, y se analizaron las eventuales variaciones en  $A$  y  $C$ , con respecto a la versión primitiva del DIT.

El trazado de isolíneas de los tres parámetros se valió de un sistema de información geográfica (Arc GIS 9.2), asumiendo el axioma de mínima curvatura (*spline*), inspirado por el comportamiento de las reglas flexibles. Este método fue el elegido por Rico (2010 a) para reflejar la variante original de cuatro parámetros. Dicha elección surgió tras numerosas pruebas, que permitieron descartar la interpolación geoestadística (*kriging*) por diferencias notorias entre la estimación y el dato en los puntos de control, así como la ponderación inversa a la distancia (IDW), que aportó campos demasiado abruptos para el objetivo.

Los mapas homólogos de las opciones de 3 y 4 parámetros del DIT se compararon entre sí para identificar las disidencias e interpretar posibles anomalías de las distribuciones.

## RESULTADOS

La Tabla 2 resume los resultados de aplicar el DIT en su versión original de 4 parámetros, **DIT 4p**. Presenta los valores de éstos ajustados con datos medidos por los pluviógrafos, para los conjuntos 1 y 2, y con ternas extraídas de los modelos de i-d-T disponibles, para el conjunto 3, así como los coeficientes de determinación,  $r^2$ , obtenidos en cada caso.

La regresión sobre las ternas de los siete puestos del conjunto **1**, agrupados en una muestra única, arrojó para  $q$  el valor óptimo de  $5/3$ , con coeficiente  $r^2 = 0,97946$ . Suponiendo que esa constante fuese válida para todo el territorio estudiado, la ecuación [3] resultaría generalizable en la forma (Caamaño *et al.*, 2010 y 2011)

$$\delta = (\ln d)^{5/3} \quad [4]$$

Esta hipótesis fue evaluada con un ensayo equivalente, sobre los datos del conjunto 2. En esta prueba el valor de  $q$  fue 1,66.

La aplicación del modelo reducido de 3 parámetros, **DIT 3p**, en las 28 estaciones produjo los juegos de parámetros y los  $r^2$  que expone la Tabla 3.

La Tabla 4 muestra los estadísticos de los parámetros y los coeficientes de determinación para ambas versiones. Por su parte, las figuras 2 y 3 representan la evolución espacial de los parámetros  $A$  y  $C$ , para DIT 3p, en tanto que las figuras 4 y 5 exhiben el comportamiento de  $B$  para DIT 3p y DIT 4p.

**Tabla 2.- Ajuste del DIT, versión 4 p**

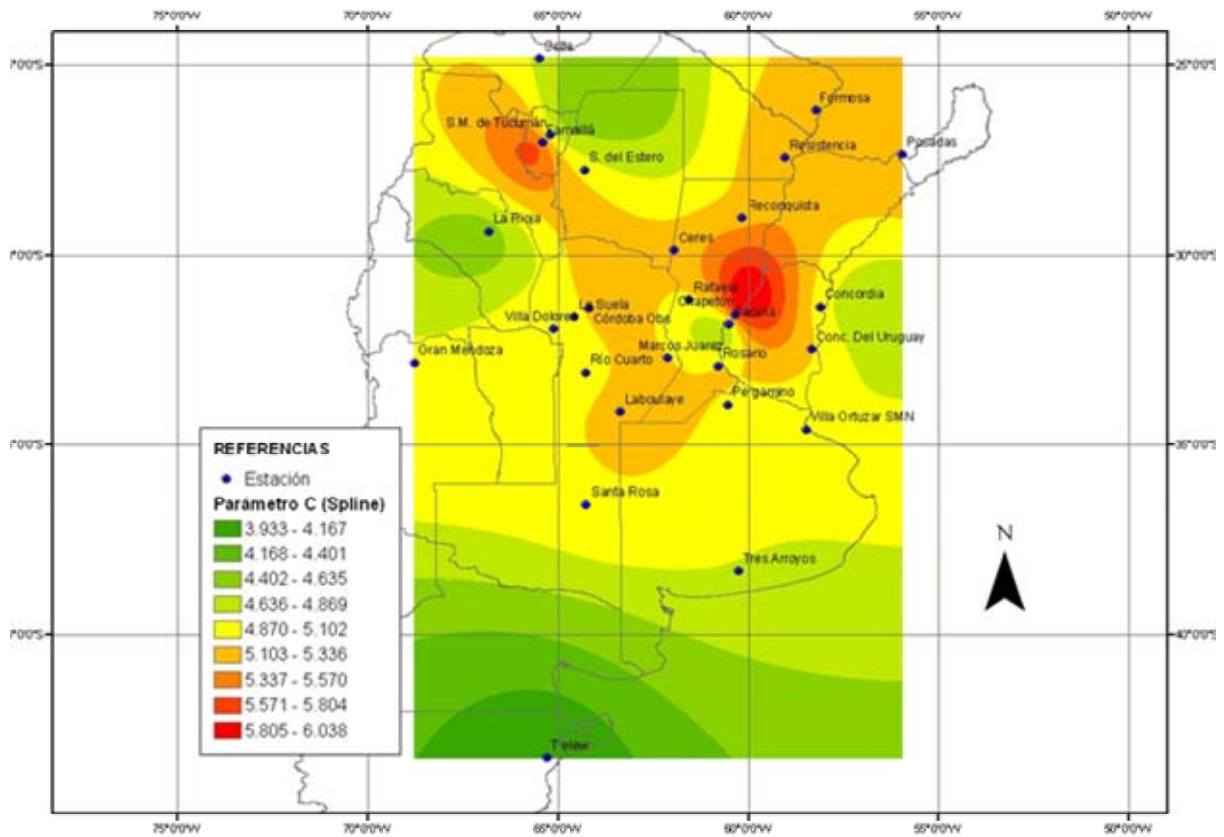
Nº	ESTACIÓN	PARÁMETROS DEL DIT				r <sup>2</sup>
		A	B	C	q	
1	Villa Dolores	0,318	0,291	5,361	1,42	0,99922
2	La Suela	0,365	0,051	4,655	2,14	0,99697
3	Ceres	0,291	0,170	5,282	1,59	0,99869
4	Córdoba Obs.	0,337	0,158	5,190	1,67	0,99727
5	Río Cuarto	0,356	0,089	4,814	1,91	0,99825
6	Marcos Juárez	0,410	0,156	5,132	1,64	0,99702
7	Laboulaye	0,394	0,241	5,426	1,48	0,99873
8	La Rioja	0,363	0,207	4,701	1,500	0,98082
9	Villa Ortuzar SMN	0,297	0,124	4,917	1,695	0,99808
10	Rafaela	0,309	0,114	5,012	1,710	0,99682
11	Rosario	0,270	0,109	5,021	1,750	0,99581
12	Santa Rosa	0,604	0,315	5,290	1,34	0,99161
13	Pergamino	0,352	0,580	5,779	1,00	0,99582
14	Tres Arroyos	0,352	0,570	5,561	1,00	0,99569
15	Posadas	0,269	0,073	5,137	1,99	0,99455
16	Chapetón	0,269	0,436	6,163	1,22	0,99809
17	Famailá	0,352	0,039	5,144	2,39	0,99495
18	Resistencia	0,252	0,066	5,109	2,01	0,99633
19	Salta	0,336	0,054	4,593	2,16	0,99475
20	Formosa	0,269	0,040	4,909	2,29	0,99586
21	Sgo.del Estero	0,369	0,019	4,643	2,78	0,99432
22	S.M. Tucumán	0,336	0,189	5,087	1,42	0,99399
23	Gran Mendoza	0,439	0,060	4,700	2,18	0,99961
24	Concordia	0,402	0,213	5,421	1,50	0,99690
25	C. del Uruguay	0,294	0,129	5,338	1,76	0,99808
26	Paraná	0,355	0,173	5,235	1,58	0,99720
27	Trelew	0,624	0,379	4,559	1,23	0,98925
28	Reconquista	0,352	0,633	6,075	1,00	0,99210

**Tabla 3.- Ajuste del DIT, versión 3 p**

Nº	ESTACIÓN	PARÁMETROS DEL DIT			r <sup>2</sup>
		A	B	C	
1	Villa Dolores	0,318	0,171	5,059	0,99814
2	La Suela	0,365	0,136	4,955	0,99428
3	Ceres	0,291	0,144	5,211	0,99983
4	Córdoba Obs.	0,337	0,159	5,193	1,00000
5	Río Cuarto	0,356	0,148	5,003	0,99839
6	Marcos Juárez	0,410	0,147	5,108	0,99998
7	Laboulaye	0,394	0,161	5,219	0,99897
8	La Rioja	0,363	0,146	4,543	0,98015
9	Villa Ortuzar SMN	0,297	0,131	4,943	0,99806
10	Rafaela	0,309	0,125	5,044	0,99675
11	Rosario	0,270	0,131	5,085	0,99560
12	Santa Rosa	0,604	0,169	5,002	0,99000
13	Pergamino	0,352	0,153	5,057	0,98719
14	Tres Arroyos	0,352	0,150	4,852	0,98711
15	Posadas	0,269	0,131	5,284	0,99452
16	Chapetón	0,269	0,184	5,690	0,99396
17	Famailá	0,352	0,140	5,433	0,98675
18	Resistencia	0,252	0,123	5,253	0,99425
19	Salta	0,336	0,130	4,797	0,99077
20	Formosa	0,269	0,121	5,134	0,98940
21	Sgo.del Estero	0,369	0,133	5,007	0,97662
22	S.M. Tucumán	0,336	0,118	4,943	0,99298
23	Gran Mendoza	0,439	0,147	4,926	0,99610
24	Concordia	0,404	0,133	4,976	0,97217
25	C. del Uruguay	0,295	0,138	5,120	0,98107
26	Paraná	0,358	0,127	4,883	0,97486
27	Trelew	0,624	0,140	3,934	0,98595
28	Reconquista	0,352	0,159	5,247	0,98042

**Tabla 4.-** Estadísticos de los parámetros y de los coeficientes de determinación para las versiones del DIT, de 4 y 3 parámetros

	VERSIÓN DIT DE 4 PARÁMETROS					VERSIÓN DIT DE 3 PARÁMETROS			
	A	B	C	q	r <sup>2</sup>	A	B	C	r <sup>2</sup>
Rango	0,373	0,614	1,604	1,78	0,01879	0,373	0,065	1,756	0,02783
Mínimo	0,252	0,019	4,559	1,00	0,98082	0,252	0,118	3,934	0,97217
Máximo	0,624	0,633	6,163	2,78	0,99961	0,624	0,184	5,690	1,00000
Media	0,355	0,203	5,152	1,69		0,355	0,143	5,032	
Desvío Est.	0,087	0,173	0,411	0,44		0,087	0,016	0,302	
Cv	0,246	0,852	0,080	0,26		0,245	0,114	0,060	



**Figura 2.-** Regionalización del parámetro A del DIT 3p

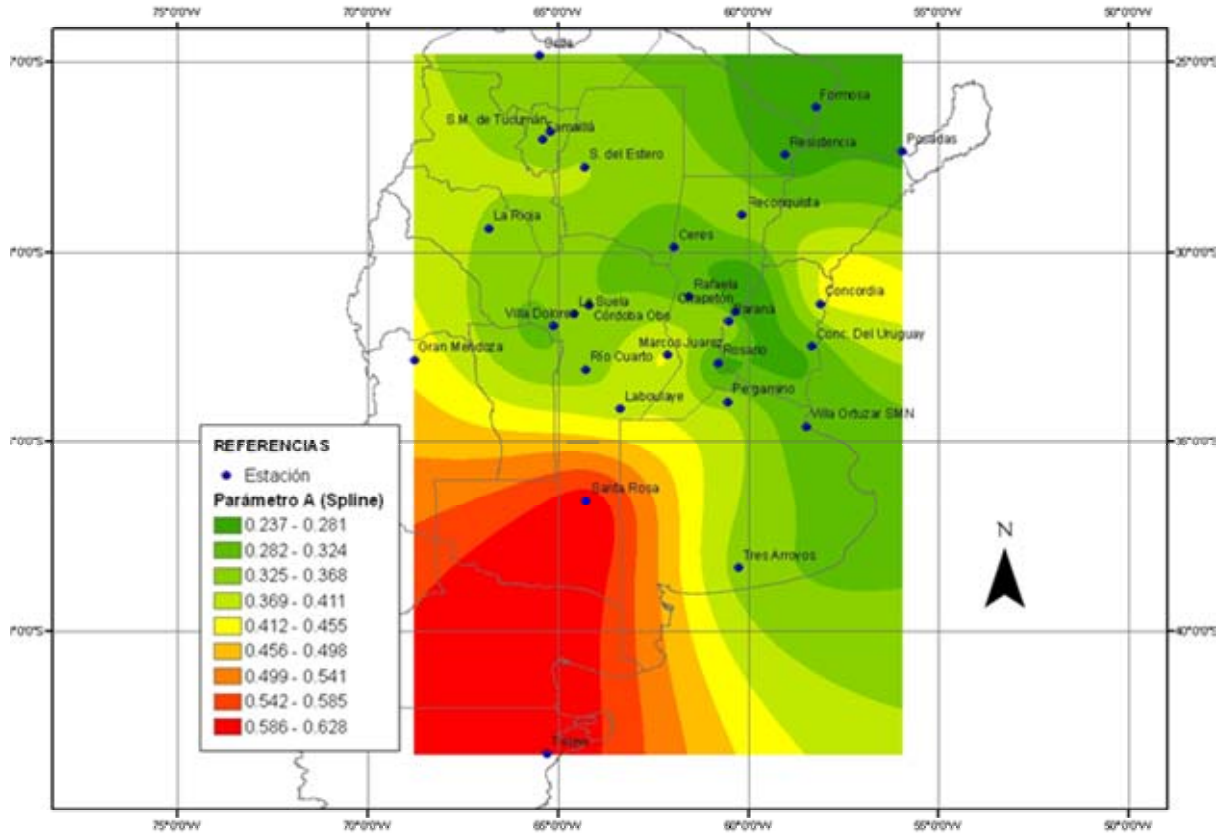


Figura 3.- Regionalización del parámetro C del DIT 3p

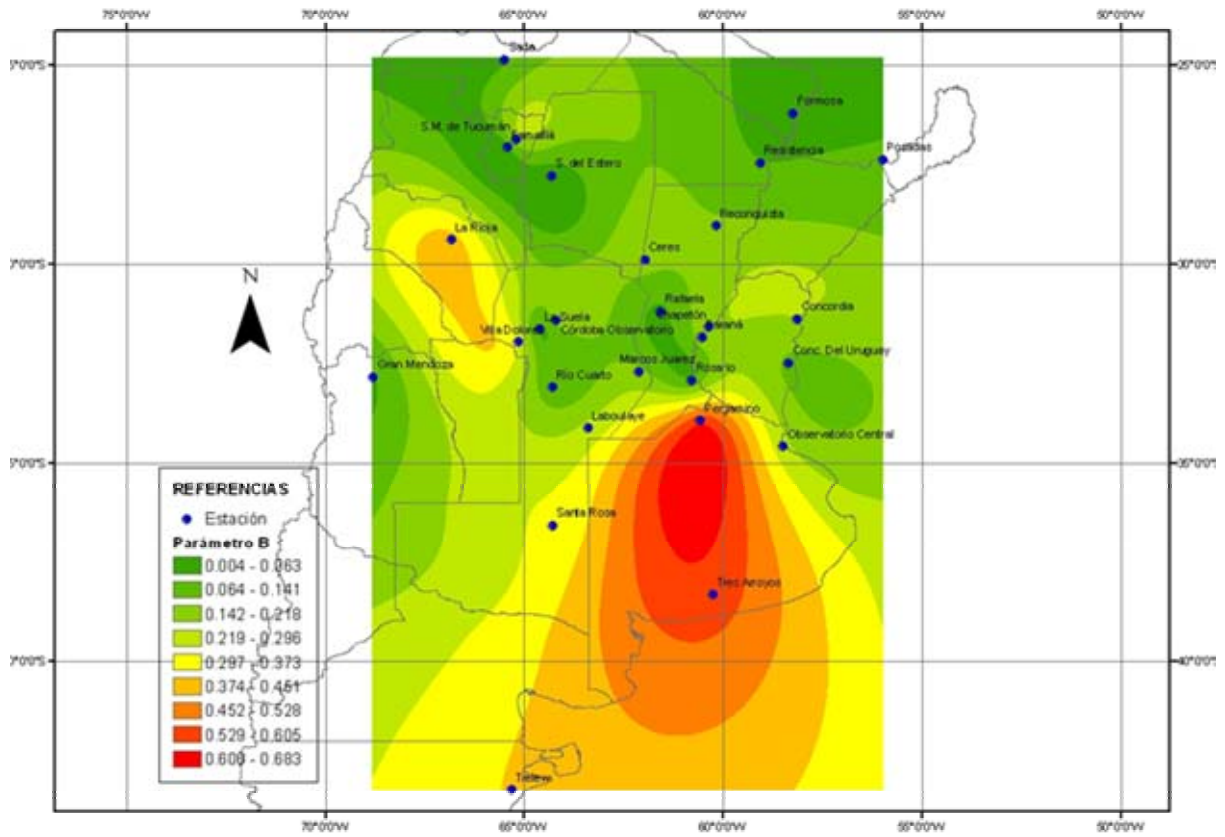


Figura 4.- Regionalización del parámetro B del DIT 3p

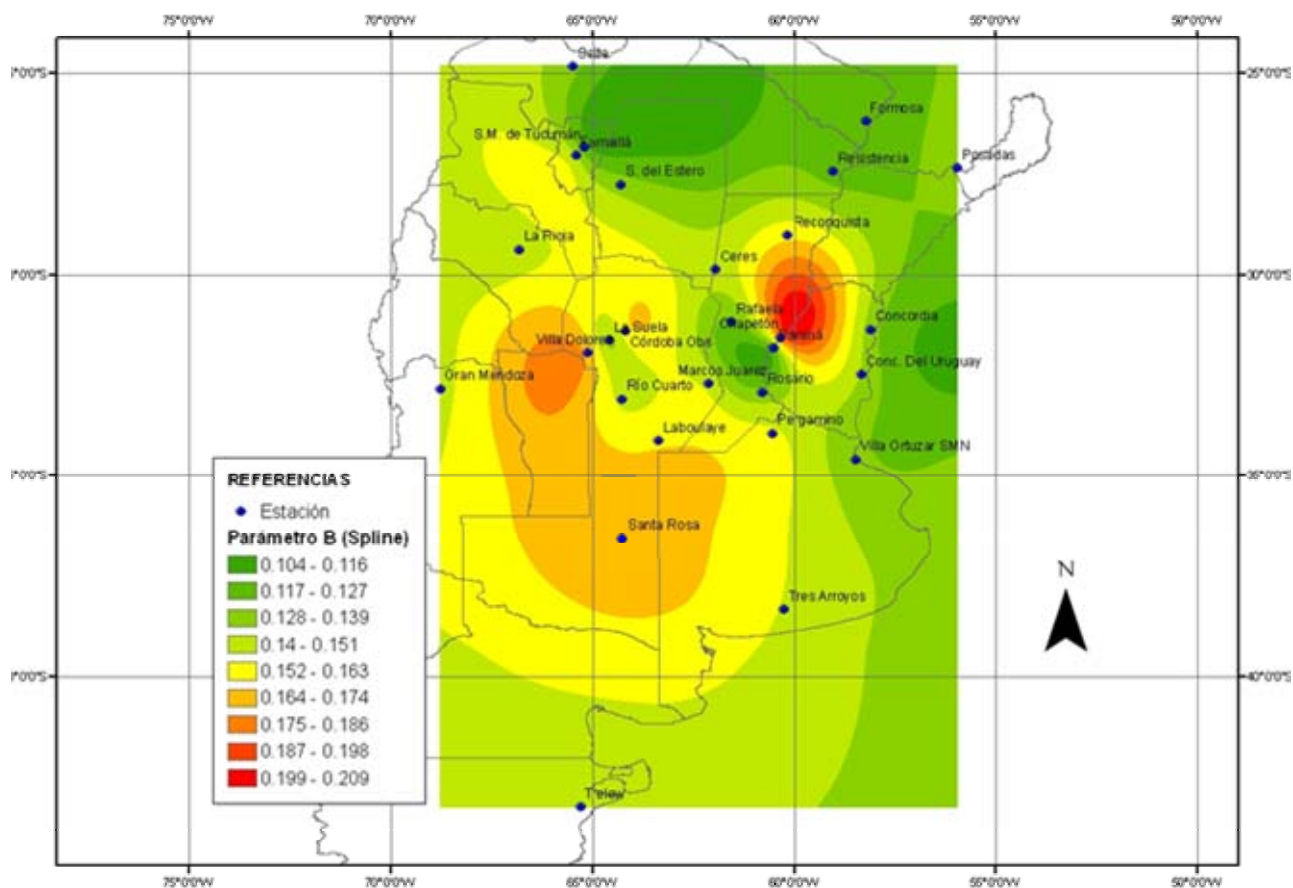


Figura 5.- Regionalización del parámetro B del DIT 4p

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La primera observación que surge de los resultados presentados es el excelente ajuste del modelo en su versión original, bajo las condiciones experimentales adoptadas. Según expone la Tabla 2, el coeficiente de determinación supera 0,9 en la totalidad de los casos. Es más,  $r^2$  está por encima de 0,98.

Otro hecho asociado a la calibración del DIT 4p es la variabilidad de los parámetros obtenidos. El más estable es el término independiente  $C$ , que tiene coeficiente de variación  $C_v = 0,080$ , y en el extremo opuesto se encuentra el coeficiente  $B$ , con  $C_v = 0,852$  (Tabla 4).

Cuando se pasa a la versión DIT 3p, es decir, al definir  $\delta$  usando la ecuación [4] en vez de la [3], cabe esperar un decaimiento de la calidad de ajuste en todas partes, a causa de la pérdida de flexibilidad por emplear un parámetro menos. La Tabla 3 evidencia que eso sucede en la mayoría de los casos, comprendiendo todos los de los conjuntos 2 y 3.

En las estaciones del conjunto 1, el algoritmo calibrado en primera instancia fue precisamente el DIT. En consecuencia, las ternas de valores  $i$ - $d$ - $T$ , con las que se reguló el DIT 3p, provinieron del mismo modelo. Por eso, los valores usados en el segundo ajuste tuvieron menores desvíos que los datos medidos. Este efecto de filtrado, debido a la primera calibración, es el que eleva  $r^2$ , creando una sensación de mejora engañosa.

Para la mayoría de las estaciones del conjunto 1, el coeficiente de determinación ascendió y, donde el valor impuesto al parámetro  $q$  coincide con el óptimo dado por la regresión del DIT 4p (Córdoba Observatorio), el valor de  $r^2$  es 1. Sin embargo, si el valor de  $q$  se aleja mucho de  $5/3$  (por exceso o

por defecto), como en las dos primeras estaciones de la Tabla 3, el filtrado no alcanza a compensar ese desfase y  $r^2$  desciende, igual que sucede en las estaciones del conjunto 2.

En el análisis global, la bondad de ajuste efectivamente disminuye al emplear tres parámetros, ya que en estas circunstancias el coeficiente de determinación no llega a 0,98 en tres de los lugares considerados. No obstante ello, en todas las estaciones se cumple que  $r^2$  es mayor que 0,9, que fue la condición exigida para considerar que DIT 3p representa de manera verosímil la correlación entre la recurrencia, la duración y la intensidad de las lluvias máximas anuales.

Esto ratifica una de las hipótesis planteada, ya que dicha correlación es alta, aun si el valor de  $q$  fijado no es el óptimo local, pues  $B$  compensa en parte la rigidez impuesta a  $q$ .

Con respecto a la otra hipótesis, si  $B$  crece cuando  $q$  se reduce, fijar  $q$  concentra los valores de  $B$ . De hecho, esto acontece, puesto que su coeficiente de variación pasa de 0,852 para DIT 4p a 0,114 para el DIT 3p (Tabla 4).

En cuanto a los otros parámetros, la variabilidad de  $A$  casi no se altera (el  $C_v$  pasa de 0,246 a 0,245), lo cual es razonable, ya que este factor da peso a la recurrencia y, siendo esta variable independiente de la duración, su participación en la ecuación [1] no se ve afectada por lo que ocurra en el segundo término, donde  $B$  y  $q$  han sido modificados.

La variación de  $C$  es aún menor que en DIT 4p ( $C_v = 0,060$ ), ya que el término independiente absorbe el residuo de la mutación, que  $B$  no compensó plenamente.

Queda por ver si la concentración de valores de  $B$  suaviza su distribución espacial, tornándola más conveniente para interpolar. Esto se aprecia al comparar las figuras 4 y 5. Podría parecer que la irregularidad no es mucho menor en la Figura 4, pero se debe considerar que en ella el rango de valores representado es un orden de magnitud menor que en la última. Si se hubiera empleado en la Figura 4 la partición de la 5, todos los valores quedarían comprendidos en tan sólo dos intervalos, lo cual no es lo ideal para los fines prácticos.

Habida cuenta de ello, lo que en realidad muestra la Figura 4 es una fluctuación más leve, que permite identificar las variaciones con mucho mayor detalle. Esto, en definitiva, facilita la estimación en lugares sin mediciones, que es lo que se buscaba probar.

Se puede ver también que el promontorio más destacado de la Figura 5, cuyo ápice se encuentra en Pergamino, ha desaparecido en la Figura 4, lo cual contribuye a la mejora de la distribución espacial antes mencionada. Los datos de los que disponen los autores, no permiten explicar las variaciones residuales en la tendencia general del campo.

Una cuestión que se planteó sobre el final de este ensayo fue cuál hubiera sido el valor a fijar para  $q$ , si en vez de estimarlo con las siete primeras estaciones de la lista se hubieran empleado los datos disponibles de todas.

Esto condujo a una última prueba: calibrar el DIT 4p haciendo de cuenta que los datos de los veintiocho puestos provinieran de uno solo. Se obtuvo así el valor “óptimo” de  $q$  para la región completa. La valoración del parámetro fue 1,63 muy similar también a la obtenida para la Provincia de Córdoba (5/3) con buen ajuste:  $r^2 = 0,93$ .

Más allá de que tan ceñida semejanza pueda ser meramente casual, la coincidencia de resultados, a partir de datos provenientes de muy diversas fuentes y sujetos a tan dispares tratamientos, no puede



menos que reforzar el aval que los ensayos anteriores dieron a la versión de 3 parámetros del modelo DIT.

## CONCLUSIONES

El modelo DIT, en su versión original, ha logrado expresar el vínculo esencial entre las variables que importan para predecir láminas máximas de lluvia anual. El colofón de este ensayo es que, gracias a ello, se puede apelar a una versión reducida del algoritmo, con 3 parámetros, sin que su representatividad se vea invalidada.

La estimación del parámetro presuntamente redundante,  $q=5/3$ , obtenida con datos de una parte del área de estudio (Córdoba), se ve respaldada al aplicarla a cuatro estaciones distantes entre sí. La regresión sobre todas las estaciones también convalida el valor propuesto.

Lógicamente, la bondad de ajuste decae por perder flexibilidad, pero, como sigue siendo muy buena, la mejora en la parsimonia del modelo justifica suprimir un parámetro. Tal simplificación atenúa la irregularidad del parámetro de conducta más compleja, **B**, lo cual mejora su distribución espacial a los fines de interpolar para lugares sin registros.

El condicionamiento de este epílogo se debe a la naturaleza de los valores con los que se realizaron las regresiones, ya que para la mayoría de las estaciones provinieron de otros modelos de función i-d-T, no de series de máximos anuales observados. Esto, que puede encubrir errores serios, da pie a la recomendación final, que es insistir en la búsqueda de series de máximos medidos, para ratificar o rectificar las deducciones primarias de este ensayo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bertoni, J. C.; F. Ganancias; J. P. Brarda; O. Tibaldo; C. Rudolf y L. Verga** (2009) “Actualización de Curvas idF de la Ciudad de Rafaela (Pcia de Santa Fe, Argentina)”. *II Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas* (UCC, UNC, UTN, INA) Córdoba, Argentina.
- Caamaño Nelli, G.; C. M. Dasso; A. Rico y L. Colladon** (2010) “Una aproximación de tres parámetros a la relación intensidad-duración-recurrencia de lluvias máximas”. *III Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua*. Fundación ProDTI (Sevilla, España) y Politécnico Jaime Isaza Cadavid (Medellín, Colombia). Córdoba, RA.
- Caamaño Nelli, G.; C. M. Dasso; A. Rico y C.M. García** (2011) “Relación intensidad-duración-recurrencia de lluvias máximas: una versión simplificada del Modelo DIT”. *CONAGUA 2011*. Resistencia, Chaco.
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García** (1998) “Estimación de la Función i-d-T a Escala Regional mediante el Factor de Frecuencia Normal”. *II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Vol.2, 157-167. Santa Fe, Argentina.
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García** (1999) “Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal”. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XIV, N° 3, septiembre-diciembre, pp. 37-44. D.F., México.
- Chow, V. T.** (1951) “A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis”. *Transactions American Geophysical Union*. Vol. 32, N° 2, pp. 231-237. USA.
- Farias, H. D. y L. A. Olmos** (2007) “Validación de Relaciones IDF Generalizadas a Nivel Regional en el Norte Argentino”. *XXI Congreso Nacional del Agua*. Conagua 2007. Tucumán
- Farias, H. D.; L. A. Olmos y J. Ibañez** (2009) “Análisis de Formulas Generalizadas para Lluvias Intensas con aplicaciones en Regiones de Sudamérica”. *II Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas* (UCC, UNC, UTN, INA). Córdoba, Argentina.
- López, P. y J. Maza** (2009). “Tormenta de Proyecto para el Gran Mendoza”. *IIº Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas* (UCC, UNC, UTN, INA). Córdoba, Argentina.
- Mauriño, M. F.** (2004) “Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships: Applicability in Different Climatic Regions of Argentina”. *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE,1084-0699 (2004) 9:4 (269).

- Rico, A. F.** (2010) “*Distribución Espacial de los Parámetros del Modelo de Predicción DIT*”. Práctica Supervisada de Ingeniería Civil. Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC. Córdoba, Argentina.
- Rico, A.; C. Dasso; G. Caamaño Nelli y M. García** (2010) “Regionalización de parámetros de un Modelo para Predicción de Lluvias Máximas”. *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. IHLLA, Azul, Buenos Aires Argentina.
- Serra, J. y M. J. Chachero** (2009) “El Análisis estadístico de Precipitaciones y Tormenta de Diseño aplicados a la región del Valle Inferior del Río Chubut”. *IIº Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas* (UCC, UNC, UTN, INA) Córdoba, Argentina
- Verano, A. M.** (2008) *Plan Director de Drenaje Urbano de Avellaneda*. Informa 90 días CFI. Buenos Aires, RA.
- Weber, J. F.** (2009) “Determinación de la relación intensidad – duración – recurrencia para la ciudad de La Rioja”. *II Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas*. (UCC, UNC, UTN, INA) Córdoba, Argentina.
- Zamanillo, E.; G. Larenze; M. J. Tito; M. Pérez; M. E. Garat y P. Gómez** (2008) “Regionalización de Precipitaciones Máximas para la Prov. de Entre Ríos”. *Memorias II Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua* (ISBN 978 987 1253 44 9), Córdoba, Argentina.

## LLUVIA DE DISEÑO SIN ATENUACIÓN DE DATOS LOCALES PARA UNA CUENCA

**Gabriel Caamaño Nelli<sup>1,2</sup>, Eliana Jorquera<sup>1</sup>, Carlos G. Catalini<sup>3</sup>, Laura Colladon<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> INA-Centro de la Región Semiárida <sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>3</sup> UCC - Grupo de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobrementemente Aforadas

Medrano 235, (5152) V<sup>a</sup> Carlos Paz, Córdoba. Tel.y fax: 03541-422347 Email: eorquera@civil.frc.utn.edu.ar

### RESUMEN

Predecir el caudal de proyecto basándose en la lluvia de diseño requiere establecer el valor medio de ésta (**PS**) sobre la superficie de aporte. Estimar la lluvia media sobre una cuenca implica gran extrapolación, porque los registros puntuales son muestras en extremo limitadas de la variable. Además, en cuencas afectables en su totalidad por un evento pluvial, tener un puesto pluviográfico es una circunstancia muy favorable. Esto explica en parte el menor desarrollo del análisis de frecuencia areal con respecto al de lluvia puntual y la necesidad de transponer la lluvia de diseño. Se admite que las láminas locales, extraídas de una función intensidad-duración-recurrencia (**i-d-T**), representan la lluvia sobre áreas reducidas en torno al pluviógrafo, dependientes de características climáticas y topográficas de la región. Para superficies mayores, como el máximo no se producirá simultáneamente en todo el sistema, la PS difiere del dato puntual y deberá ser inferida partiendo de este valor, que es el único con estimación futura. Es habitual evaluar la PS en torno de una **estación núcleo**, asumida como foco del evento, usando un algoritmo de atenuación, función del área de aporte y de la duración de lluvia. Esta técnica es objetable: al calibrar ese algoritmo, la estación adoptada puede no ser el centro de todos los eventos, los máximos areales no coinciden necesariamente con los locales y el proceso meteorológico que produce éstos puede diferir del causante de las grandes crecidas, que en definitiva interesan. En el sistema del Río San Antonio, al suroeste de la Ciudad de Córdoba, se detectaron dichos inconvenientes, generando un enfoque diferente: si se elabora una relación i-d-T donde la intensidad no sea ya la máxima local, sino la máxima PS, no se requerirá atenuación. Por cierto, esto demandaría alta calidad y densidad de registros, condición que respalda la elección de dicha cuenca como caso de estudio. El artículo compara los resultados de ambos procedimientos y explica las desviaciones del comportamiento esperable que produce la metodología convencional. Y también resuelve las limitaciones que inicialmente presenta la nueva propuesta.

### PALABRAS CLAVE:

Lluvia de diseño, reducción areal, intensidad-duración-recurrencia.

## INTRODUCCIÓN

La habitual carencia de información de descarga, local o regional, es el motivo por el cual la crecida de proyecto se estima a partir de la lluvia de diseño. Esta estimación requiere evaluar la precipitación media sobre la superficie de aporte (**PS**).

La medición local de lluvia debería efectuarse en un pluviógrafo, cuyos datos permitan deducir la relación intensidad-duración-recurrencia (**i-d-T**) y, de ella, la lámina de diseño. En cuencas pequeñas y medianas, afectables en su totalidad por un evento pluvial, tener un pluviógrafo es una circunstancia muy favorable, siendo necesario en general transponer la lluvia de diseño. Eso explica en parte el menor desarrollo del análisis de frecuencia areal con respecto al de lluvia puntual.

Aun si se dispone de curvas i-d-T de varias estaciones, no se deben usar para predecir máximos simultáneos, porque, al haber sido ajustadas independientemente, no prevén la probabilidad de eventos conjuntos. De modo que, establecida localmente o transpuesta, la información normal de partida se refiere de un único punto de la cuenca, denominado *estación núcleo*.

Se asume que la lámina local representa la lluvia sobre áreas reducidas en torno a ese punto, dependientes de las características climáticas y topográficas de la región. Para superficies mayores, la PS difiere del máximo puntual de lluvia y deberá ser inferida, mediante algoritmos de atenuación, a partir de este valor, que es el único con estimación futura. La lámina puntual es una muestra en extremo limitada de la lluvia en la cuenca, de modo que su conversión en una media areal implica una gran extrapolación (García, Catalini y Caamaño Nelli, 2002).

La porción de lámina a utilizar dependería de la persistencia de las lluvias, ya que las que más duran localmente (por mecanismo de precipitación, superior cobertura areal o desplazamiento más lento) tienen mayor probabilidad de superponerse en el tiempo con otras en su entorno. Por otra parte, investigaciones sobre lluvias extremas en diferentes puntos de la tierra (Occhipinti, 1989) muestran que la altura pluviométrica máxima varía con la inversa del cuadrado del área afectada.

Los ábacos de atenuación son gráficos con curvas para varias duraciones, que indican el porcentaje de lluvia local a tomar como promedio sobre la cuenca. El U.S. Weather Bureau (1958) dedujo un algoritmo de este tipo para cuencas situadas al este del río Mississippi, que se popularizó al publicarla la WMO (1983). Leclerc y Schaake (Valdés, 1981) ajustaron una ecuación polinómica a esas curvas. En varios lugares del mundo se elaboraron luego representaciones de este tipo (Catalini, Caamaño Nelli y García, 2002).

Estos ábacos se plantearon inicialmente para tormentas intensas, lo que hace objetable su uso para diseño, ya que la lámina a atenuar, extraída de la relación i-d-T, corresponde a un *intervalo de máxima anual (IMA)* de intensidad de lluvia. Al basarse en rasgos de tormentas severas, se asume una equivalencia infundada entre eventos de distinta índole. En efecto, no hay razón para que los IMA coincidan en duración con tormentas reales, pudiendo cubrir una pequeña porción de ellas, englobarlas junto a un período sin lluvia o agrupar más de una, y se han comprobado marcadas diferencias en los patrones espaciales respectivos (Caamaño Nelli, García y Dasso, 1999). Catalini (2001) desarrolló una relación decaimiento-área-duración para IMA, similar a las de tormentas, para la cuenca que aquí se emplea como sistema experimental.

Ahora bien, al margen de su utilidad, el esquema convencional descrito para evaluar la PS de diseño, consistente en la predicción local de la lámina (mediante la *i-d-T*) y su atenuación con un ábaco (en función del área de aporte y la duración de lluvia) tiene varios inconvenientes. La estación adoptada como núcleo de decaimiento puede no ser el centro de todos los eventos (aun cuando se la haya elegido por la alta probabilidad de que lo sea), de modo que no siempre el coeficiente de reducción es monótono decreciente con el área (Catalini y Caamaño Nelli, 2003). Las máximas PS no coinciden necesariamente con las locales de la estación que cuenta con función *i-d-T*. Y el proceso meteorológico que produce éstas puede diferir del causante de las grandes crecidas, que son lo que en definitiva interesa (Caamaño Nelli et al., 2001).

En el sistema del Río San Antonio, sito al suroeste de la Ciudad de Córdoba, se detectaron inconvenientes de esa índole, dejando la sensación de que la lluvia media evaluada por esta vía subestima el valor real (Rodríguez, 2004; Caamaño Nelli, Colladon y Dasso, 2007). Esto motivó un abordaje diferente: si se elabora una relación *i-d-T* donde la intensidad no sea ya la máxima local, sino la máxima PS, no se requerirá atenuación. Este es el enfoque que aquí se desarrolla y se compara con el procedimiento convencional.

## SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema hidrológico donde se realizó el ensayo es la Cuenca Alta del Río San Antonio (Figura 1), hasta la Estación 700, elegida por la calidad y densidad de sus registros pluviométricos.



**Figura 1.-** Cuenca del Río San Antonio, Cuenca Alta y estaciones de la Red Telemétrica

La cuenca del Río San Antonio, de 500 km<sup>2</sup>, se encuentra próxima al centro continental de la República Argentina, en las sierras de la Provincia de Córdoba, al sur del Valle de Punilla, entre los 64° 29' 21" y 64° 51' 17" de longitud oeste y entre los 31° 26' 51" y 31° 23' 23" de latitud sur. Su altitud decae 1.675 m en menos de 30 km, desde los 2.350 m snm del Cerro Los Gigantes, al NW, hasta 675 m snm en la estación de aforos de salida. Tres ríos principales conforman su estructura de avenamiento: Malambo, Cajón e Ichu Cruz. La confluencia de estos últimos, a 1.000 m s.n.m., delimita la Cuenca Alta, de 333 km<sup>2</sup>.

En esta cuenca, el Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua instaló y opera una red telemétrica de 10 estaciones remotas automáticas, con sendos pluviómetros de alta frecuencia (una emisión por mm) y más de 30 sensores para otras variables, que transmiten por vía radial, de VHF, en tiempo real. La red, montada con fines de investigación, se emplea hoy además para alerta de crecidas.

## INFORMACIÓN EMPLEADA

En la cuenca del Río San Antonio no hay series suficientemente extensas de pluviógrafo o de pluviómetro de alta frecuencia de registro. De manera que, para materializar el procedimiento convencional, la función *i-d-T* se debió transponer a la estación núcleo (donde se estimará la lámina local, que luego se reducirá para hallar la media areal).

Tal estación fue la 1200 de la red telemétrica. La elección de esa estación se basó en dos requisitos: Representar las lluvias críticas sobre la cuenca y responder a una función *i-d-T* conocida, de la cual extraer la lámina local (García, Catalini y Caamaño Nelli, 2002).

Como la técnica de transporte empleada demanda contar con una serie diaria en la estación núcleo, el segundo requisito hizo necesario componer una para la 1200. En realidad, los registros nacen con la estación El Cóndor (enero 1972) de la red piloto del Río de La Suela.

A fines de 1979, llamándola Las Ensenadas, es desplazada unos 2' al W y otro tanto al N, donde opera entre uno y seis años después. Allí, con equipo electrónico, pasa a ser la Estación 1200 de la red telemétrica CIRSA en marzo de 1986. En 2001, tras constatar la homogeneidad temporal de la serie recuperada, se la empleó para transponer la *i-d-T* (Catalini y Caamaño Nelli, 2003).

Para el presente trabajo, la serie se actualizó, adicionándole los últimos 9 años hidrológicos (septiembre-agosto), y con los nuevos parámetros estadísticos se efectuó un nuevo transporte. La estación pluviográfica desde la que se transpuso la relación *i-d-T* en ambos casos fue la 2800, La Suela, de la red telemétrica, base de la Zona Sierras, una de las 7 en las que se dividió la provincia de Córdoba para el análisis de lluvias de diseño (Caamaño Nelli, García y Dasso, 1998).

Para el procedimiento alternativo propuesto también se transportó la *i-d-T* desde La Suela, pero no a la estación 1200, sino a la Cuenca Alta, cuya serie es la de lluvia media areal. La PS se estimó para 22 años del período 1986/87-2009/10 (exceptuados 1989/90 y 1991/92). Al comienzo de la serie, la cantidad de estaciones fue baja: una en los dos primeros años, 2 en el tercero y 4 en 1990/91. A partir de entonces se promediaron 5 a 9 series locales para identificar las máximas PS anuales.

## METODOLOGÍA

El proceso estándar para estimar la magnitud de la lluvia de diseño consta de dos pasos: **1)** transponer la función *i-d-T*, desde el pluviógrafo base (La Suela) a la estación que se asumirá como núcleo del evento (1200), donde *i* es la intensidad de precipitación local, de duración *d* y período de retorno *T*, y **2)** atenuar esa intensidad para hacerla representativa de la lluvia media sobre la cuenca.

La táctica alternativa se limita al paso **1)**, pero en él está implícito el **2)**, pues la alteración de la *i-d-T*, efectuada al transponer, no se basa en características de la serie local de máximos anuales, si no en las de los máximos de la PS de la Cuenca Alta. De modo que *i* es ahora la intensidad anual media areal de lluvia y no requiere atenuación.

### **Función intensidad-duración-recurrencia**

La relación i-d-T fue generada calibrando el algoritmo DIT (Caamaño Nelli y García, 1999) con datos pluviográficos de la estación base La Suela. El modelo DIT plantea el logaritmo natural de la intensidad como una función lineal del *factor de frecuencia*  $\Phi$  (Chow, 1951) y de un *factor de persistencia*  $\delta$ , vinculados mediante dos parámetros locales, propios de la estación de medición, **A** y **C**, y uno zonal, **B**, ecuación [1]:

$$\ln i = A \cdot \Phi - B \cdot \delta + C \quad [1]$$

Con base en la hipótesis de distribución probabilística lognormal de los máximos de lluvia anual, el factor de frecuencia tiene una relación biunívoca con el período de retorno, **T**, ecuación [2]:

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

El factor  $\delta$ , en tanto, depende de la duración de la lluvia, mediante un cuarto parámetro **q**, zonal, ecuación [3]:

$$\delta = (\ln d)^q \quad [3]$$

Más allá de su carácter conceptual y su buen desempeño numérico, la gran ventaja del DIT es la forma explícita en que los parámetros locales **C** y **A** se transforman en **C'** y **A'**, al transponer la función i-d-T de un pluviógrafo (La Suela, en este caso) a un pluviómetro (Estación 1200), dentro de una zona meteorológicamente homogénea, donde **B** y **q** son constantes (Caamaño Nelli, García y Dasso, 1998). Basta con sustituir la media,  $\mu$ , y el desvío estándar,  $\sigma$ , de los logaritmos de la serie pluviográfica diaria, por los homólogos de la pluviométrica,  $\mu'$  y  $\sigma'$ , según las ecuaciones [4] y [5]:

$$C' = C - \mu + \mu' \quad [4]$$

$$A' = A - \sigma + \sigma' \quad [5]$$

En el caso del procedimiento alternativo que aquí se analiza, la esencia de la transposición se preserva, puesto que los estadísticos  $\mu'$  y  $\sigma'$  y los parámetros **C'** y **A'** del DIT se consideran propios de un pluviómetro ficticio, que registra la precipitación media areal sobre la cuenca.

### **Atenuación de la intensidad local**

En el procedimiento convencional, para rectificar la intensidad predicha en la estación 1200, de modo que refleje la precipitación media areal en la Cuenca Alta del río San Antonio, se partió del ábaco usual (Catalini y Zimmermann, 2003). Éste presenta en forma gráfica el coeficiente de decaimiento areal en función del área de la cuenca, con una curva para cada duración de lluvia.

En este caso, se dispuso de una expresión analítica decaimiento-área-duración para IMA, similar a las de tormentas, el modelo CoDA, desarrollado por Catalini (2001) para el sistema que aquí se estudia. Los parámetros corresponden a la recalibración efectuada por Caamaño Nelli, Rodríguez y López (2004), con una batería de 10 pluviómetros de la Red Telemétrica INA-CIRSA.

CoDA asume que la lámina local caracteriza un área de 25 km<sup>2</sup> en torno al pluviómetro. Más allá, el coeficiente de decaimiento areal, **D**, depende de la superficie de la cuenca, **S**, de acuerdo a la ecuación [6]:

$$D = 25^{-k} \cdot S^k \quad [6]$$

$k$  es el parámetro del modelo, función de la duración de la lluvia, según la ecuación [7]:

$$-k = 2,1438 \cdot d^{-0,4774} \quad [7]$$

La Figura 2 muestra las curvas generadas con las funciones potenciales [6] y [7] y la forma de utilizarlas para el área de la Cuenca Alta y una duración de 3 horas.

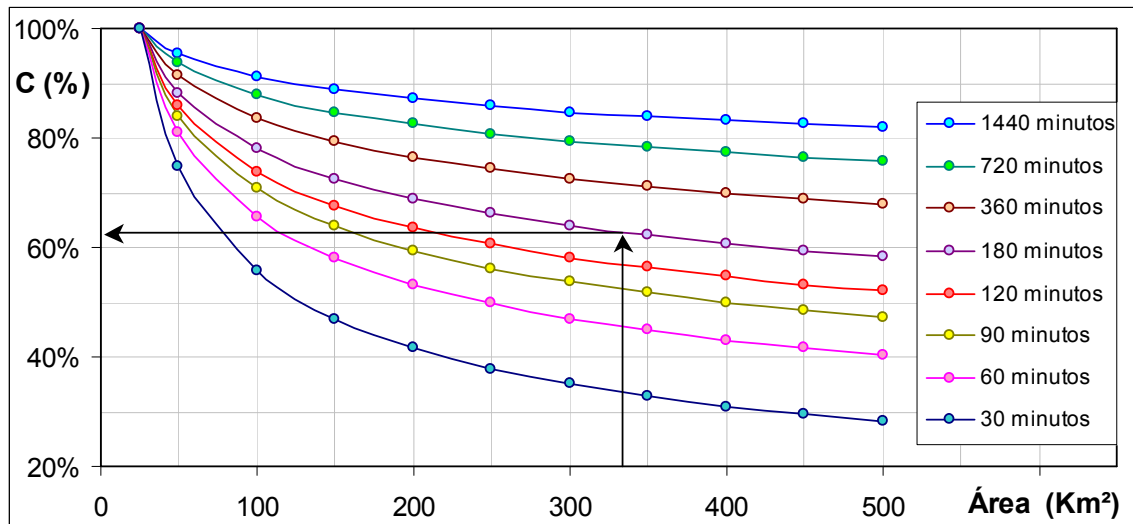


Figura 2.- Ábaco del modelo CoDA y caso de atenuación para 3 horas de lluvia en la Cuenca Alta

En la práctica, las ecuaciones del DIT (transpuesta a la estación 1200) y del CoDA (de cada duración de lluvia de interés) se combinaron analíticamente para elaborar una i-d-T de la Cuenca Alta, comparable con la resultante de la técnica alternativa.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La Figura 3 expone las curvas i-d-T transpuestas desde La Suela a la Estación 1200, primer paso del método tradicional para estimar máximos de lluvia media areal en la Cuenca Alta. El rango de duración va de 5 a 1440 minutos (1 día), pero la gráfica se ha cortado en 180 minutos (3 horas), para poder ampliar la escala del eje de ordenadas y apreciar las intensidades de lluvias prolongadas.

Se ve que la traza para 200 años de recurrencia parte de una intensidad de 196 mm/h, pasa a 40 mm/h para 3 horas y termina con 6,5 mm/h, en tanto que los guarismos respectivos en la de 5 años son 114, 23 y 3,8 mm/h, todos valores puntuales razonables para la zona.

La Figura 4 muestra el efecto que producen, sobre la representación anterior, los coeficientes de atenuación de la Figura 2, para el área de la Cuenca Alta y para cada duración de lluvia elegida.



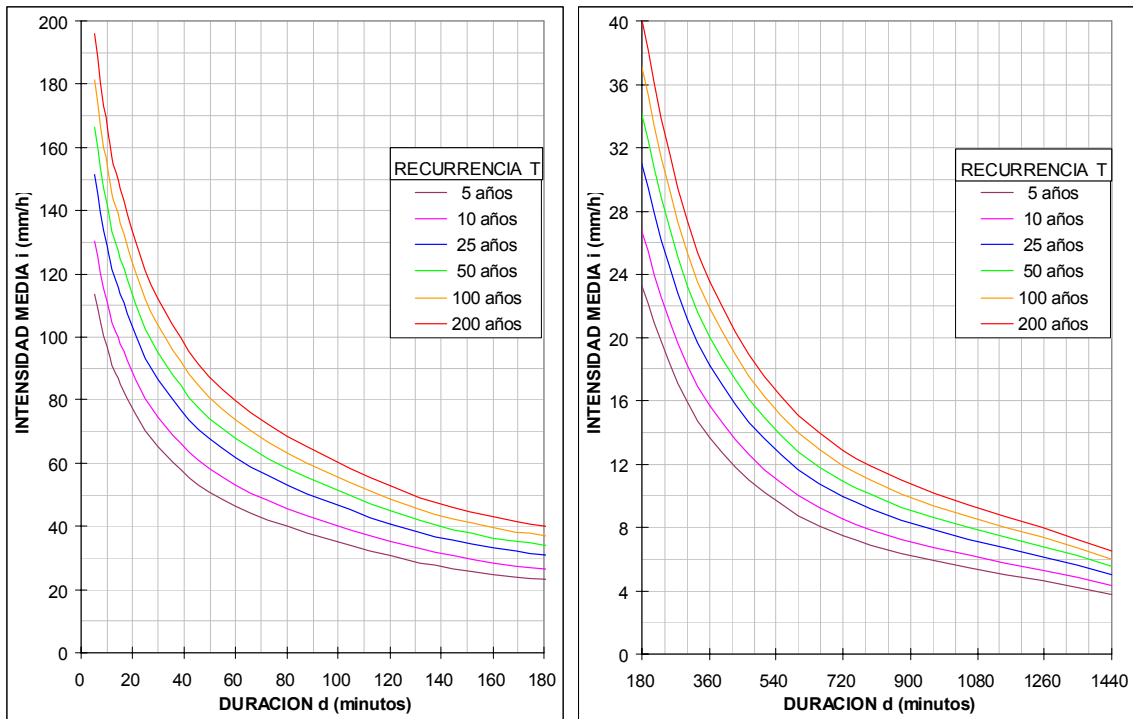


Figura 3.- Función intensidad-duración-recurrencia transpuesta a la Estación 1200, Las Ensenadas

Se advierte la notoria alteración que han sufrido los valores y hasta la propia forma de las curvas, que ya no son monótonas decrecientes, sino que presentan máximos a los 37 minutos de duración y puntos de inflexión para 77 minutos en la rama descendente. Esto se debe a que los decaimientos indicados por el CoDA son muy fuertes para duraciones bajas, llegando a 7,6 % para 5 minutos, lo cual hace más que contrarrestar el empinamiento clásico de las i-d-T. Esta distorsión no condice con el comportamiento conocido de la variable, que indica que, para lluvias de igual recurrencia, la intensidad decae sistemáticamente al crecer la duración.

La Figura 5 muestra los resultados del procedimiento alternativo, que no realiza atenuación.

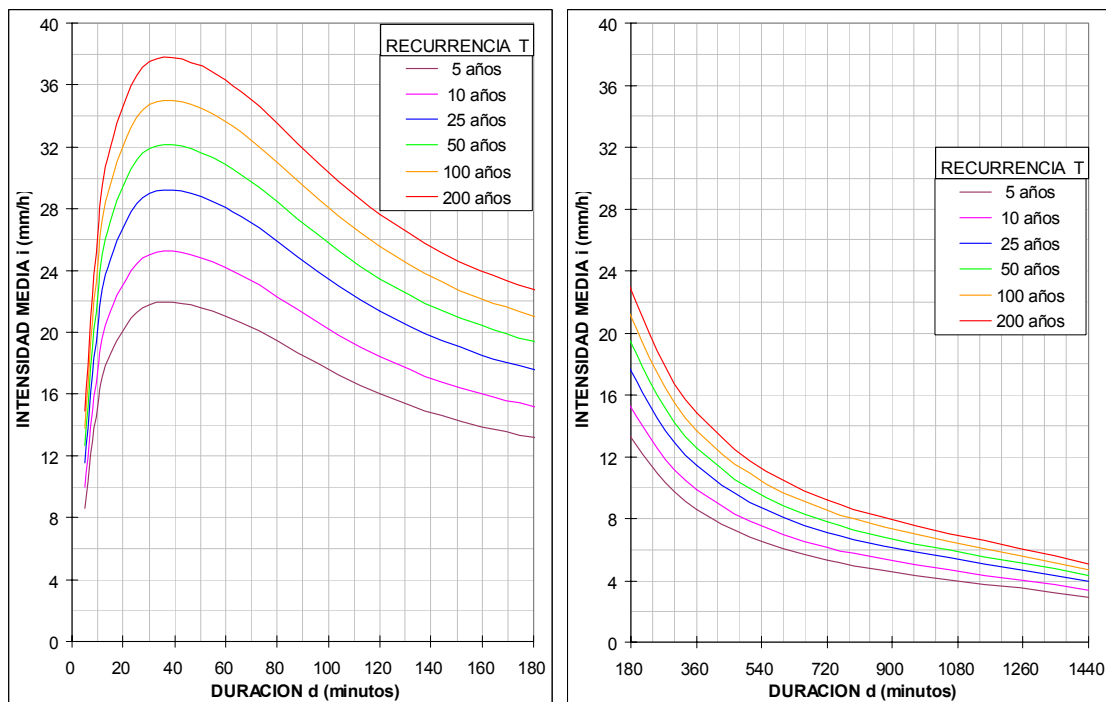
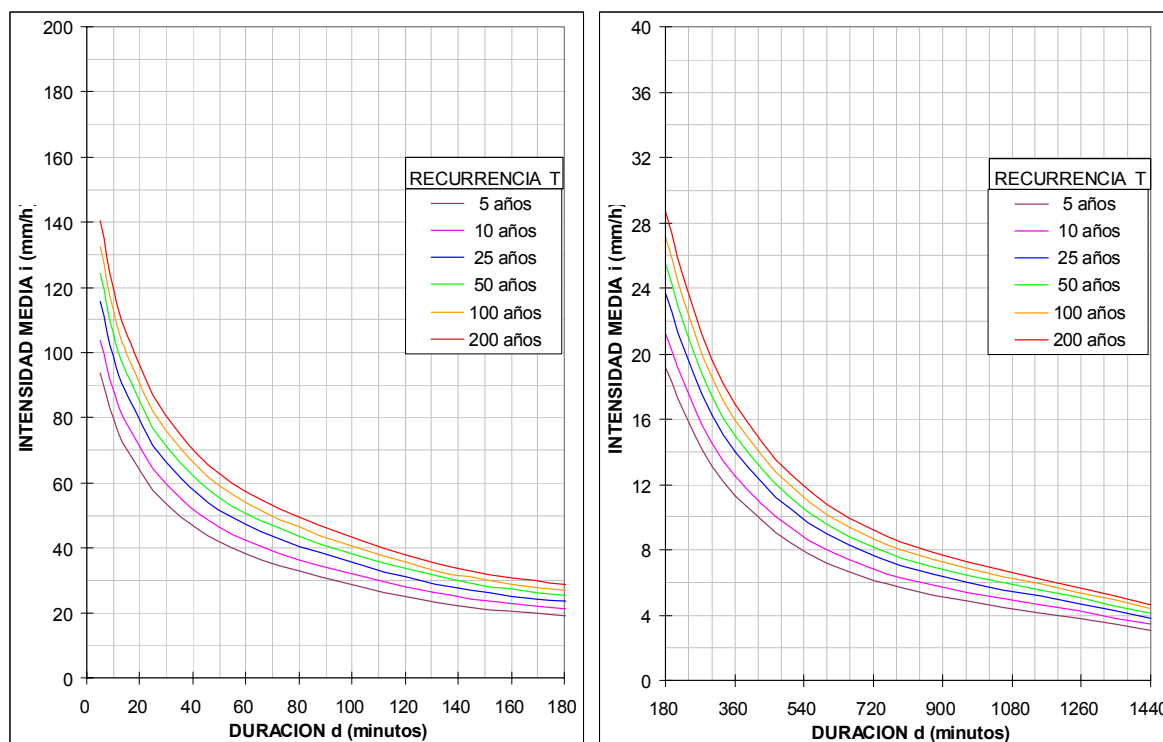


Figura 4.- Función intensidad-duración-recurrencia atenuada para la Cuenca Alta del San Antonio

La Figura 5 sí tiene la forma característica de las funciones i-d-T, lo cual es lógico, porque la intensidad media areal se comporta de la misma manera que las intensidades locales que sintetiza.



**Figura 5.-** Función intensidad-duración-recurrencia transpuesta directamente a la Cuenca Alta

Por otra parte, es evidente que el procedimiento alternativo es el correcto, dado que opera con la variable que realmente interesa, que es la PS. El decaimiento de un valor puntual, en tanto, es un camino forzado por la ausencia de información territorialmente distribuida.

Asumido esto, cabe evaluar qué errores se cometen con el método tradicional de atenuación. Como se nota a simple vista, al comparar las figuras 4 y 5, la divergencia se incrementa a medida que la duración baja. El punto crítico ocurre, pues, para las lluvias más breves consideradas, que son las de 5 minutos. Para esta abscisa, las intensidades predichas por la técnica correcta van de 94 a 140 mm/hora, al pasar de 5 a 200 años de recurrencia, en tanto que el método convencional da 8,7 a 14,9 mm/hora en iguales circunstancias, prácticamente un orden de magnitud menos.

Al crecer el tiempo de lluvia, como las curvas de la Figura 4 ascienden y las de la 5 descenden, las diferencias se reducen relativamente rápido. Así, cuando las trazas de la táctica usual alcanzan su máximo, representan entre un 45 % (5 años) y un 52 % (200 años) de los valores alternativos.

En el punto de inflexión, las proporciones respectivas pasan a ser 60 % y 70 %. A partir de allí, la concavidad en las dos figuras coincide, pero es más rápido el decrecimiento de las trazas del método alternativo. Como consecuencia de ello, convergen las intensidades predichas por ambas vías, aunque de manera desigual. Para 720 minutos, coinciden con una recurrencia de 200 años y para 1 día, con 13 años. Para 200 años y 1 día, el procedimiento usual estima con un exceso de 10 %.

Si se admite este porcentaje de error, en más o en menos, la técnica tradicional es aceptable desde 12 horas y más de 10 años de recurrencia. Esto la recusa para una cuenca como la que se analiza, donde la duración de lluvia que interesa es de alrededor de 3 horas.

Sin embargo, eso no implica que el enfoque de trabajo habitual sea intrínsecamente malo. Su falla principal, en especial para lluvias breves, es que la atenuación se evalúa a partir de máximos

puntuales, porque éstos se deben muchas veces a fenómenos convectivos típicos que, al abarcar porciones reducidas, conducen a decaimientos desmesurados al considerar el área total del sistema.

Los intervalos de máxima anual que interesan son los de la PS, porque dan lugar a las mayores crecidas. Éstos pueden provenir de lluvias frontales o, con mayor probabilidad, de procesos convectivos de mesoescala, que cubren sectores grandes o la totalidad de la cuenca con intensidades semejantes, lo cual hace que el abatimiento real sea considerablemente menor.

La técnica alternativa también merece reparos. Exige buena cobertura pluviométrica y series simultáneas largas, situación poco corriente. Y la extrapolación es raramente aplicable, ya que sus resultados dependen del área de la cuenca donde se derivaron, pues la atenuación es función de ésta.

Aunque esta discusión parece conducir a un callejón sin salida, cabe preguntarse si se limita a desnudar los errores de la metodología convencional o indica la ruta hacia una respuesta verosímil y extrapolable. Si se razona que la impugnación está dirigida a la manera de deducir el algoritmo de atenuación y no al concepto en sí del abatimiento, existe un camino de solución satisfactorio.

Puesto que se dispone de una matriz i-d-T local (para la Estación 1200, representada en la Figura 3) y de su equivalente espacial (para la Cuenca Alta, expuesta en la Figura 5), es viable arribar a coeficientes de atenuación areal más plausibles, dividiendo ésta por aquella. Aceptando la relación esencial del modelo CoDA (ecuación [6]), dicha división produce resultados llamativos, en cuanto a que el parámetro **k** no depende de la duración de la lluvia, sino de su recurrencia.

La explicación de este hecho es simple: las dos transposiciones de la i-d-T, a la Estación 1200 y a la Cuenca Alta, se efectuaron desde el pluviógrafo base de La Suela, por estar dentro de su zona meteorológicamente homogénea. Y como en estas zonas los parámetros del DIT asociados a la duración (**B** y **q**) son constantes al transponer, el término correspondiente (ecuación [1]) es igual en las dos i-d-T y la razón entre ambas resulta independiente de la duración de lluvia considerada.

La variación de **k** se puede plantear en función de la recurrencia o del factor de frecuencia normal (por su relación biunívoca de la ecuación [2]), según las gráficas A y B respectivas de la Figura 6. Se puede demostrar que la segunda opción responde exactamente a la ecuación lineal [8]:

$$-k = 0,03115 \cdot \Phi + 0,04824 \quad [8]$$

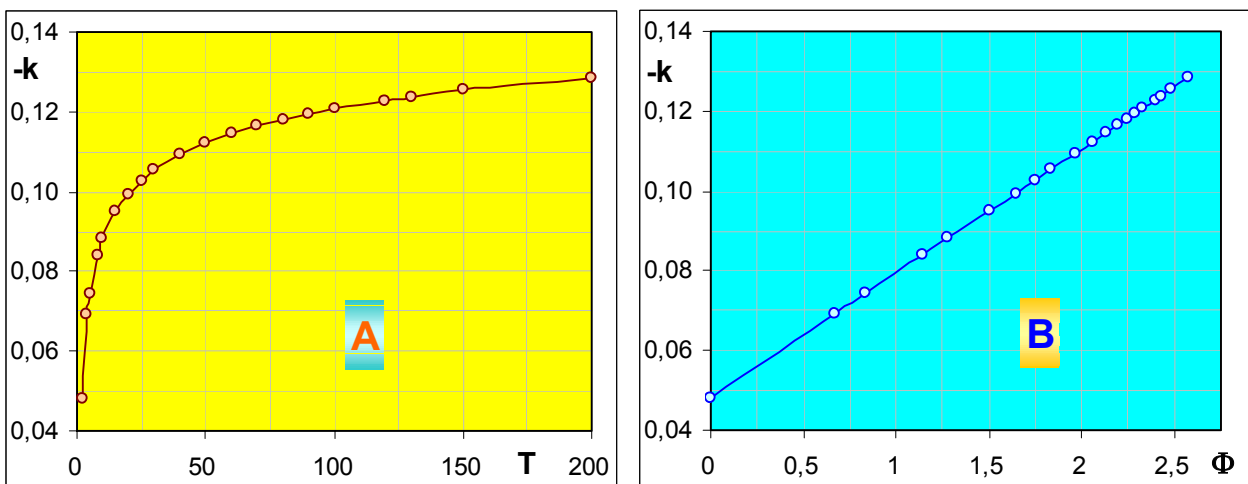
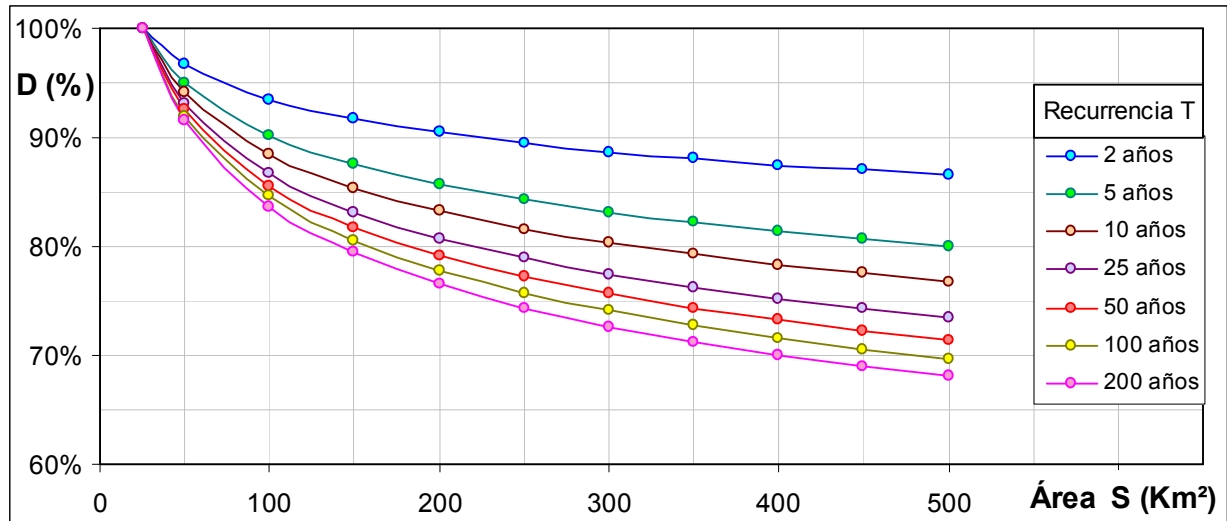


Figura 6.- Dependencia del parámetro k respecto a la recurrencia y al factor de frecuencia normal

La división de la *i-d-T* de la Cuenca Alta sobre la de la Estación 1200 no soluciona de por sí el problema del método alternativo, porque los resultados siguen asociados al área y no se pueden hacer extensivos a cuencas de otras dimensiones. Pero, conociendo ya los valores del parámetro *k* en el rango de interés, la resolución de la ecuación [6] del CoDA aporta los del coeficiente de decaimiento *D*, que finalmente depende del área *S* y de la recurrencia *T*, como exhibe la Figura 7.



**Figura 7.-** Función decaimiento-área-recurrencia (D-S-T) para la cuenca del Río San Antonio

Aunque no es estrictamente comparable a la Figura 2, con la que tiene el mismo propósito y semejanza de forma, la Figura 7 pone en evidencia que los porcentajes de atenuación a emplear son mucho menos drásticos que los provenientes del procedimiento indirecto.

Por ejemplo, para la mayor área representada, 500 Km<sup>2</sup>, la técnica directa indica entre 68 y 86 %, mientras que la tradicional va de 28 a 82 % y esto sólo para las duraciones trazadas, ya que con 5 minutos el valor es 5 %. Como se puede ver, el método habitual exagera los decaimientos, a menos que se trate de lluvias espacialmente muy concentradas, como son los eventos convectivos.

## SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

El método estándar para predecir intensidad media de lluvia sobre una cuenca es deducir la función *i-d-T* en el presunto centro del evento (o transponerla hasta allí desde un pluviógrafo) y reducir el valor que esa función indique con un algoritmo de atenuación areal. El decaimiento de la intensidad local es un recurso forzado por la ausencia de información territorialmente distribuida.

Un procedimiento alternativo se limita a derivar o transponer la *i-d-T*, no a un pluviómetro real, si no a uno ficticio, que registra la precipitación media areal sobre la cuenca. Esta vía directa es la correcta, puesto que opera siempre con la variable que interesa, que es la intensidad media areal. El contraste de resultados de ambos métodos expone los errores de la técnica habitual, sobre todo para lluvias breves, en los valores finales de la intensidad y en cómo varía ésta con la duración.

La falla radica en que los máximos puntuales se deben muchas veces a procesos convectivos típicos, que abarcan porciones reducidas del sistema y conducen a decaimientos desmesurados para el área total. Los máximos anuales de intensidad media areal, importantes por originar grandes crecidas, suelen provenir de fenómenos convectivos de mesoescala, que cubren

amplios sectores de la cuenca con intensidades semejantes, haciendo que el abatimiento territorial sea muy inferior.

La técnica directa también trae problemas, pues exige la combinación poco común de buena cobertura pluviométrica con series simultáneas largas. La extrapolación a otra cuenca es raramente aplicable, pues los resultados están atados al área de aquella en que se dedujeron.

Sin embargo, un replanteo de la atenuación con otro enfoque conduce a una metodología extrapolable regionalmente, que aporta valores de reducción más creíbles. El coeficiente de decaimiento resulta finalmente función de la superficie de la cuenca y de la recurrencia de la lluvia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caamaño Nelli, G. E.; L. Colladon y C. M. Dasso** (2007) “Recurrencia de la lluvia en la mayor creciente medida en el Río San Antonio, Argentina.”. Art.181 en CD-Rom *XXI Congreso Nacional del Agua*. CPCNA. Tucumán, Argentina.
- Caamaño Nelli, G.; L. E. Colladon; C. M. Dasso y R. I. Pazos** (2001) “Predicción de Crecientes Severas en Villa Carlos Paz, Cuenca del Río San Antonio, Argentina”. *Seminario Internac. s/ Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas* (SIMICH), 84. CURIHAM. Rosario, RA.
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García** (1999) “Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal”. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XIV, N° 3, septiembre-diciembre, pp. 37-44. D.F., México.
- Caamaño Nelli, G.; C. M. García y C. M. Dasso** (1998) “Zonalización de Tormentas de Diseño para la Provincia de Córdoba, Argentina”. *XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. CPCNA Vol.2, 168-178. Santa Fe, RA.
- Caamaño Nelli, G.; C. M. García y C. M. Dasso** (1999) “Hietograma Puntual de Diseño: Correspondencia entre la Estimación y la Distribución de la Altura de Lluvia”. *XIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Memorias, Vol. N° 1, 157-168. Santiago, Chile.
- Caamaño Nelli, G.; R. M. Rodríguez y F. López** (2004) “Predictores de Niveles Inundables: Comparación en el Río San Antonio, Argentina”. *XXI Congr. Latinoam.de Hidráulica*. IAHR-AIPH. Artículo CD B342. Libro Resúmenes (ISBN 85-904853-1-5) P.83. São Pedro, Brasil.
- Catalini, C.G.** (2001) *Altura Areal de Lluvia para Diseño en la Cuenca del Río San Antonio*. Trabajo Final de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UCC. Córdoba, RA.
- Catalini, C. G. y G. Caamaño Nelli** (2003) *Lámina de Lluvia a Escala de Cuenca para Intervalos de Máxima Anual*. Capítulo 10 en *Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias*, ISBN 987-9406-43-5, pp. 125-136. Editorial Universitas. Córdoba, RA.
- Catalini, C. G.; G. Caamaño Nelli y C. M. García** (2002) “Curvas de Decaimiento Areal de Lluvias de Diseño: Efectos de la Topografía y el Clima sobre su Forma”. *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. IARH. La Habana, Cuba.
- Catalini, C. G. y E. D. Zimmermann** (2003) *Reducción Areal de Tormentas Severas. Efectos Fisiográficos y Climáticos*. Capítulo 11 en *Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias*, ISBN 987-9406-43-5, pp. 125-136. Editorial Universitas. Córdoba, RA.
- Chow, V. T.** (1951) “A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis”. *Transactions American Geophysical Union*. Vol. 32, N° 2, pp. 231-237. USA.
- García, C. M.; C. G. Catalini y G. Caamaño Nelli** (2000) “Distribución Espacial de la Lluvia de Diseño en una Cuenca de Montaña”. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Tomo II, 309-318. IARH. Córdoba, RA.
- Occhipinti, A. G.** (1989) *Hidrometeorología en Engenharia Hidrológica*. ABRH-UFRJ. Río de Janeiro, Brasil.
- Rodríguez, R. M.** (2004) *Estimación de Umbrales de Inundación a partir de las Lluvias de Diseño. Desarrollo Metodológico y Aplicación en el Río San Antonio*. Trabajo Final de Ingeniería Civil, FCEFYN, UNC. Córdoba, RA.
- U. S. Weather Bureau** (1958) “Rainfall-intensity-frequency regime.” *Technical Paper 29, Part 2*, Southeastern United States. Washington, USA.

- Valdez, J. B.** (1981) “Distribución Espacial y Temporal de la Precipitación”. *Seminario Interno de Actualización en Modelos Matemáticos*. CIHRSA. Inédito. Villa Carlos Paz, Argentina.
- WMO** (1983) *Guide to Hydrological Practices*, Vol. II, Analysis, Forecasting and Other Applications. World Meteorological Organization, N° 168, Geneva, Schweiz.

## IMPLEMENTACION DE UNA TECNICA DE REGIONALIZACION DE LÁMINAS MÁXIMAS DIARIAS Y CURVAS I-D-T EN LAS PROVINCIAS DE CÓRDOBA Y SANTA FE

*Carlos G. Catalini<sup>(1)</sup>, Carlos M. García Rodríguez<sup>(1y2)</sup>, Gabriel E. Caamaño Nelli<sup>(2)</sup>, Erik Zimmermann<sup>(3)</sup>, Virginia Belli<sup>(1)</sup>, Bernabé Bianchiotti<sup>(1)</sup>, Agustín Cueto<sup>(1)</sup>, Gastón Lérica<sup>(1)</sup>, Daniela Lovera<sup>(1)</sup>, Germán Pinasco<sup>(1)</sup>, Ezequiel Sánchez<sup>(1)</sup>, Martín Miguez Ruiz<sup>(1)</sup>*

<sup>(1)</sup> *Universidad Católica de Córdoba - Grupo de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobrementemente Aforadas (UCC - EHCPA)*

<sup>(2)</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua*

<sup>(3)</sup> *Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Fac. de Cs. Ex., Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.*

*Dirección: Camino a Alta Gracia km 7 ½, (X5016DHY), Córdoba República Argentina.*

*Tel (0351) 493-8080 E-mail: [cgcatalini@ucc.edu.ar](mailto:cgcatalini@ucc.edu.ar); [cgcatalini@hotmail.com](mailto:cgcatalini@hotmail.com)*

**RESUMEN:** Las relaciones intensidad de lluvia-duración-Recurrencia (i-d-T) y el patrón de distribución temporal de las lluvias, requeridos para estimar crecientes de proyecto, solo se pueden extraer de extensos registros de alta frecuencia, normalmente fajas pluviográficas, elemento en general no disponible en Argentina. En cambio, es habitual disponer de otro dato de lluvia provisto por pluviómetros: la lámina diaria total, ante ello se ha elaborado un Sistema de Información Geografía (SIG) que comprende a las provincias de Córdoba y Santa Fe el cual contienen toda la información disponible, referida a la variable lluvia, tanto a nivel pluviográfica como pluviométrico, es decir las lluvias máximas diarias anuales, sus parámetros estadísticos descriptivos como son la media ( $\mu$ ) y desvío estándar ( $\sigma$ ) de las series históricas y sus correspondientes logaritmos, entre otros datos. Para ello, en primer lugar se seleccionaron 482 estaciones pluviométricas (150 en Córdoba y 332 en Santa Fe) en base a la longitud de las series de registros y la verificación de las hipótesis estadísticas básicas (datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad). Luego se realizó el análisis de estadística inferencial sobre las series de lluvias máximas diarias registradas en los puestos seleccionados, determinando además los intervalos de confianza (95%) asociados a su estimación. Generándose mapas digitales de isohietas de lámina de lluvia máxima diaria, asociados a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50 y 100 años. Por otra parte, en la región antes descrita, existe información de relaciones i-d-T para trece estaciones pluviográficas, insuficientes para lograr una buena cobertura espacial de todo el territorio, pero contemplando la información pluviométrica (más densa espacialmente) se han regionalizado las ternas i-d-T, utilizando una técnica que contempla el uso del modelo predictivo DIT, conformando así mapas digitales (grillas con resolución espacial de 25 km<sup>2</sup>) que permiten caracterizar el comportamiento estadístico de la variable lluvia máxima diaria, los cuales aportan las características locales a las curvas i-d-T, provenientes de las estaciones pluviográficas base.

**PALABRAS CLAVE:** Lluvias Máximas Diarias, i-d-T, Sistemas de Información Geográfica,

## INTRODUCCIÓN

Los eventos pluviométricos extremos son episodios lluviosos de gran intensidad, capaces de desencadenar procesos geomorfológicos e hidrológicos de gran magnitud e importantes consecuencias tanto en pérdidas de vidas humanas como en consecuencia sociales y económicas. Además de su intensidad, estos episodios se caracterizan por su baja frecuencia y por presentar una distribución espacial aparentemente errática.

La determinación de zonas inundables y el diseño de obras de infraestructura hidráulica, requiere de la estimación previa de los caudales máximos que pueden transitar por el cauce de un río o región con una determinada probabilidad de ocurrencia, dada la escasa disponibilidad de mediciones de esta variable, es frecuente el cálculo de los mismos mediante la transformación de la variable lluvia en caudal (P-Q).

Las relaciones intensidad-duración-recurrencia (i-d-T) y el patrón de distribución temporal de las lluvias, requeridos para estimar Crecientes de Proyecto, solo se pueden extraer de extensos registros de alta frecuencia, normalmente fajas pluviográficas, elemento en general no disponible. En cambio, es habitual otro dato de lluvia provisto por pluviómetros: la lámina diaria total. Es así, que normalmente los técnicos y proyectistas proceden a la estimación (mediante un análisis de estadística inferencial) de las láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno, a partir de las series de datos pluviométricos registrados en cada emplazamiento (Catalini et al, 2010).

En el caso particular de la región central Argentina, existe información de relaciones i-d-T para al menos 13 estaciones pluviográficas, insuficientes para lograr una buena cobertura espacial de todo el territorio Provincial. En este trabajo, se presenta una metodología que permite regionalizar las láminas máximas diarias con recurrencia asociada y ternas i-d-T, utilizando para tal fin, herramientas de interpolación y análisis tendencial provenientes de un Sistema de Información Geográfica (SIG), contemplando para ello el empleo del modelo predictivo DIT (Caamaño Nelli y García, 1999) e información pluviométrica más densa espacialmente (Catalini et al, 2011).

## OBJETIVOS

El objetivo general del presente artículo se centra en la confección de mapas digitales georeferenciados, más precisamente grillas con resolución espacial de 25 km<sup>2</sup>, de láminas máximas diarias con Recurrencia asociada y parámetros estadísticos provenientes de información pluviométrica histórica para las provincias de Córdoba y Santa Fe. En base a los cuales, se regionaliza la relación i-d-T desde las estaciones pluviográficas base, con la resolución espacial antes indicada.

Para ello, se recurre al análisis de dos parámetros propios de la estadística descriptiva, como son la media y el desvío estándar de los logaritmos de las series de láminas de lluvias máximas diarias anuales de 482 estaciones pluviométricas, incorporando a través de ellos características locales a las estaciones pluviográficas base. Toda la información procesada y los mapas elaborados se encontraran conformados en un Sistemas de Información Geográfica (Idrisi Andes®) ó SIG.

Entre los objetivos específicos se pueden enunciar:

- Selección de estaciones pluviométricas en las provincias de Córdoba y Santa Fe, en base a la longitud de las serie de registros y la verificación de las hipótesis estadísticas básicas (independencia, estacionalidad y homogeneidad), para lo cual se emplearon los test de Wald-



Wolfowitz, Kendall y Wilcoxon (Catalini, Maidah, et al., 2010) y detección de datos atípicos, de acuerdo a la metodología propuesta por el Water Resources Council (1981).

- Realización del análisis de estadística descriptiva sobre las series de lluvias máximas diarias registradas en los puestos pluviométricos seleccionados y sobre los logaritmos de estas.
- Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas, que superaron los test anteriores, y sus respectivos parámetros.
- Realización del análisis de estadística inferencial sobre las series de lluvias máximas diarias registradas en los puestos pluviométricos seleccionados. Ajuste de la función de distribución de frecuencia Lognormal mediante el método de Máxima Verosimilitud, evaluando la bondad de ajuste mediante las pruebas Chi-cuadrado y Shaprio-Wilk. Determinación de los valores de láminas de lluvias máximas diarias de distintos periodos de retorno y los intervalos de confianza asociados a su estimación (con un intervalo de confianza del 95%).
- Elaboración de mapas digitales de isohietas de lámina de lluvia máxima diaria, asociados a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50 y 100 años.
- Interpolación de la información puntual, generación de mapas de interpolación y análisis tendencial de las variables provenientes de la estadística descriptiva.
- Implementación del Modelo DIT para la regionalización de las curvas i-d-T.
- Validación de los resultados.

## SISTEMA DE ESTUDIO

Las Provincias de Córdoba y Santa Fe son dos de las más importantes de las 24 jurisdicciones en que se divide políticamente el territorio de la República Argentina. La mismas se caracteriza por su condición mediterránea, aunque en el caso de Santa Fe con una salida franca al Océano Atlántico a través del Río Paraná, La zona de estudio se encuentra comprendida aproximadamente entre los 27° 30' y 35° 00' de latitud Sur, los 58° 00' y 65° 50' de longitud Oeste, a 480 km del Océano Atlántico y 520 km del Océano Pacífico (Keegan y Keegan, 1993). Abarcando una superficie aproximada 300.000 km<sup>2</sup>, los cuales las convierten en la quinta provincia en el caso de Córdoba más extensa del territorio Nacional y decima para el caso de Santa Fe, ocupando en conjunto más del 10,0% de la superficie total del territorio continental de la República, con una población conjunta mayor a los 6.500.000 habitantes.

Es de destacar, que las condiciones climáticas dentro son variables según las distintas regiones, pudiéndose caracterizar de la siguiente manera, la porción oriental de la provincia de Córdoba y Santa Fe ofrece un clima templado pampeano al sur y subtropical, con estación seca al norte (Chaqueño). Por su parte, la porción occidental de la provincia Córdoba se encuentra enmarcada por el cordón de las sierras de los Comechingones, presenta un clima subtropical serrano muy semejante al clima mediterráneo. Las laderas orientales de la sierra son generalmente más húmedas al producirse lluvias de tipo convectivas favorecidas por la orográfica (Catalini, et al. 2002) sobre todo durante los meses de verano, mientras que en los faldeos occidentales el clima es más árido, con escasas precipitaciones y vientos secos.

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 son abundantes. Las temperaturas suelen oscilar entre los 10°C y los 30°C, y las precipitaciones varían de Oeste a Este alcanzando valores medios anuales de entre los 800 mm y 1.100 mm anuales.

## INFORMACIÓN DE BASE

La información base utilizada para llevar a cabo el presente estudio corresponde a dos tipología, a saber; información pluviográfica, caracterizada por su alta frecuencia de medición pero escasa distribución espacial e información pluviométrica de paso diario pero con una mejor distribución espacial.

Sobre la primera de ellas, Caamaño Nelli, et al., 2003 y Rico, et al. 2011, identificaron unos treinta pluviógrafos de los cuales, solo 13 de ellos se pueden constituir en estaciones base, para la región de interés, dividiendo a ambas Provincias en sendas zonas las cuales determinan su influencia sobre los pluviómetros o estaciones satélites a estos puestos pluviográficos (Tabla 1).

**Tabla 1.-** Zonas pluviográficas consideradas para la Provincia de Córdoba y Santa Fe. Estaciones Base.

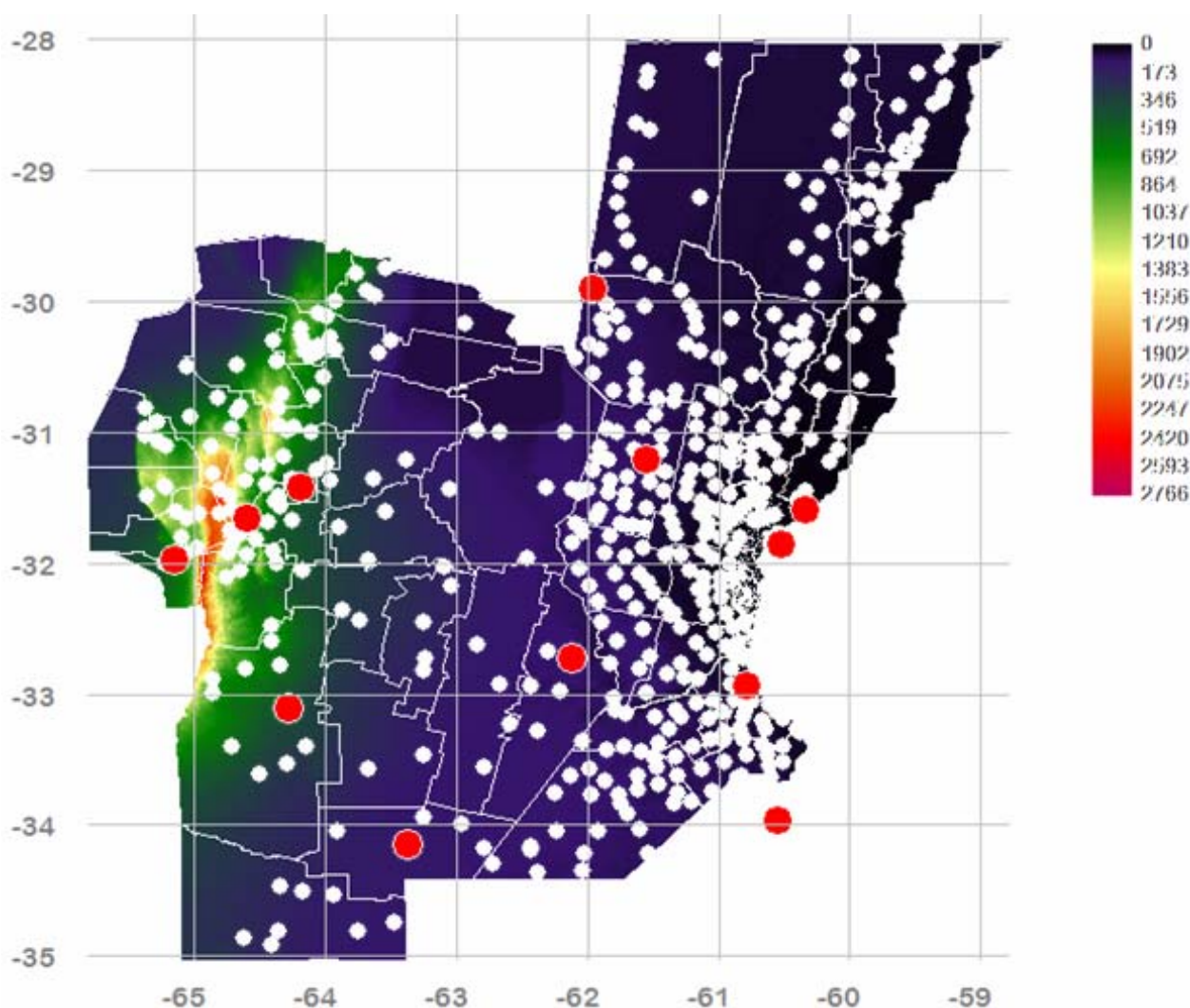
ID	Emplazamiento	Provincia	Abr.	Latitud	Longitud	Altitud [m snm]
1	Ceres	Santa Fe	CS	-29.8833	-61.9500	88
2	Laboulaye	Córdoba	LA	-34.1167	-63.3667	137
3	Marcos Juárez	Córdoba	MJ	-32.7000	-62.1167	110
4	Córdoba Observatorio	Córdoba	OC	-31.4000	-64.1833	425
5	Río Cuarto	Córdoba	RC	-33.0833	-64.2667	436
6	La Suela	Córdoba	SU	-31.6333	-64.5833	892
7	Villa Dolores	Córdoba	VD	-31.9500	-65.1333	569
8	Rafaela	Santa Fe	RA	-31.1833	-61.5500	95
9	Rosario	Santa Fe	RO	-32.9167	-60.7833	25
10	Pergamino	Bs. As.	PE	-33.9333	-60.5550	70
11	Chapetón	Entre Ríos	CH	-31.5667	-60.3333	20
12	Resistencia	Chaco	RE	-27.4167	-58.9333	54
13	Paraná	Entre Ríos	PA	-31.8333	-60.5167	110

En lo referente a los datos pluviométricos los mismos fueron inicialmente recopilados por García (1994), quien constituyo una base de datos constituida por registros de 141 estaciones pluviométricas pertenecientes a distintos organismos nacionales y provinciales que operaron y/u operan en la Provincia de Córdoba, luego ampliada y actualizada hasta la actualidad.

Por otra parte, se dispusieron de datos provenientes de la Dirección General de Comunicaciones de la Provincia de Santa Fe, los cuales se complementaron con datos históricos provenientes de diversas fuentes totalizando 397 estaciones dentro del territorio santafesino. En total la base de datos conformada luego de los análisis y validaciones que se detallaran en el presente trabajo, conformaron para ambas provincias una red de 486 estaciones (143 emplazadas en la provincia de Córdoba y 343 en la Provincia de Santa Fe), los mismos se encuentran en planillas mensuales de registros diarios. De ellas, menos de la mitad de las emplazadas dentro del territorio de Córdoba, cubren el mínimo estadístico de 20 años de registro, la situación se revierte al considerar las estaciones de Santa Fe, debido principalmente a su mejor distribución y cantidad de años de registros.

La Figura 1, permite apreciar que la situación más crítica en lo concerniente a la cantidad de estaciones seda en la provincia de Córdoba sobre todo en el noreste y sur provincial, la densidad de puestos pluviométricos es relativamente baja, en comparación con la región central, la cual coincide con la región montañosa, en donde la densidad de estaciones es sensiblemente mayor al resto de la Provincia, en lo referente a la provincia de Santa Fe la distribución espacial es mucho mayor,

aunque existen importantes claros, sobre todo en la región Norte en coincidencia con los Bajos Meridionales. Por último, en esta figura se han resaltado los trece puestos pluviográficos base.



**Figura 1.-** División Política del territorio y ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas. Se resalta el emplazamiento de las siete Estaciones Base (Pluviográficas)

## SELECCIÓN FINAL DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

Al momento de seleccionar las estaciones pluviométricas, se procedió como primera medida, a plasmar la localización georeferenciada de las mismas recurriéndose al empleo de un SIG. Obteniéndose así una base de datos georeferenciada para las 484 estaciones pluviométricas. Una vez finalizada esta primera instancia se procedió al análisis de datos atípicos, de acuerdo a la metodología propuesta por el Water Resources Council (1981).

Estos “datos atípicos” son puntos que se alejan significativamente de la tendencia que se observa en el resto de la información disponible (suponiendo que se encuentran normalmente distribuidos). La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos, especialmente en muestras pequeñas, tal es el caso bajo estudio. Este condicionante quedó demostrado en varias estaciones, dos ejemplos de ello que pueden ser indicados como representativos son Aguas de Ramón y San Buenaventura, las cuales, si se hubieran mantenido los datos atípicos dentro de la serie histórica no superarían las pruebas de estacionalidad, homogeneidad e independencia por lo que deberían ser desechadas, ante la imposibilidad de

determinar si los mismos se debieron a un evento real u errores en el proceso de adquisición de los datos.

En total se detectaron 39 estaciones con datos atípicos para la provincia de Córdoba, mientras que otras 69 lo hicieron para la provincia de Santa Fe, representando menos del 1% del total de la información pluviométrica anual disponible. Adicionalmente se fijaron en un principio dos criterios de selección de estaciones pluviométricas para su posterior tratamiento estadístico, a saber:

### Pruebas no paramétricas

Se efectuó la verificación de hipótesis estadísticas básicas sobre las series de precipitaciones máximas diarias anuales, es decir; Independencia (Wald-Wolfowitz), Estacionalidad (Kendall) y Homogeneidad a escala anual (Wilcoxon).

A tal fin, se definió como criterio de selección inicial la aceptación para todas las pruebas, de la hipótesis (H0) a un nivel de significancia del 5%. Sin embargo, para poder abarcar en forma más eficaz el territorio sin ir en desmedro de la densidad espacial, se adopta finalmente como criterio de aceptación la hipótesis (H0) con un nivel de significancia del 1%. La Tabla 2, muestra la cantidad de puestos pluviométricos cuyos registros no verificaron alguna de las hipótesis estadísticas. En total no significan más del 3 % de las de estaciones pluviométricas analizadas, las cuales cubren en su totalidad el territorio de ambas Provincias.

**Tabla 2.-** Resumen de estaciones pluviométricas cuyos registros no superaron las hipótesis y fueron descartadas.

Prueba	Cantidad
Independencia (Wald-Wolfowitz)	4
Estacionalidad (Kendall)	8
Homogeneidad (Wilcoxon)	9

### Longitud de la serie histórica

Este criterio de selección consistió en fijar 20 años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar. Pero este criterio resulto demasiado restrictivo, para la provincia de Córdoba, dado que implicaría rechazar 57 de los 150 puestos pluviométricos originales, lo que equivale a un 38 %, de esta manera se pierde cobertura espacial en gran parte de la Provincia, principalmente en las zonas Noreste, Centro y Sur.

Por lo que, de considerar los criterios de pruebas no paramétricas y longitud de registro de las series en manera conjunta sólo se podría disponer de una red de 86 puestos pluviométricos, emplazados sobre todo en la región montañosa, razón por la cual se decidió solo la utilización de la primera restricción y la remoción de los datos atípicos, mientras que la influencia de la longitud de la serie se verá reflejada de manera indirecta en los intervalos de confianza de los ajustes estadísticos (Catalini, Maidah, et al 2010).

Está misma consideración sobre la longitud de la serie a emplear se utilizó a las estaciones de la Provincia de Santa Fe como lo indicado en la Tabla 3, en los guarismos no se incluyeron 49 estaciones que presentan menos de 14 años de registros lo que equivale a un 12% de las estaciones disponibles. Haciendo está salvedad, se refleja que el 54.9 % de las estaciones tienen registros inferiores a 20 años, pero solo el 9.5 % posee el umbral mínimo de 14 años en ambas provincias. Es de destacar que 14 estaciones superan los 50 años de registros, en donde tanto la ciudad de Córdoba Capital como Santa Fe Capital superan los 100 años de registros históricos.



del factor de frecuencia normal e incorpora la duración de la lluvia en forma analítica, dándole sentido conceptual a sus parámetros y permite su transposición a estaciones pluviométricas.

A fin de transponer las familias de curvas i-d-T, el modelo DIT utiliza una técnica de zonalización desarrollada por Caamaño Nelli et al., 1998, esta combina una división zonal con transferencia paramétrica dentro de cada zona. De esta manera al transponer la función i-d-T, desde la estación base (pluviográfica) a las estaciones satélites (pluviométricas) incógnitas de la zona, los parámetros se alteran según los rasgos climáticos locales de cada pluviómetro donde el área de influencia de cada uno de ellos fue definida a través de polígonos de Thiessen (Figura 3).

La relación i-d-T, basada en el modelo DIT es definida como:

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

En donde  $i_{d,T}$  es la intensidad media máxima de lluvia de duración  $d$ , esperable en el período de retorno  $T$ , y  $\Phi_y$  es el factor de frecuencia normal, dado por: (Caamaño Nelli y Dasso, 2003)

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

mientras que  $\delta_y$  es el factor de persistencia, definido como

$$\delta_y = (\ln d)^q \quad [3]$$

Es de resaltar que la ecuación [1] presenta tres términos independientes entre sí, lo que proviene de la hipótesis de independencia entre duración, explicitada mediante  $\delta_y$  y recurrencia, incluida en la fórmula de  $\Phi_y$ . Finalmente el algoritmo resultante para DIT presenta cuatro parámetros: A, B, C y q, el exponente de la ecuación [3].

La estimación del exponente q en las estaciones pluviográficas que se utilizaron para calibrar el modelo (Caamaño Nelli y Dasso, 2003 y Rico, et al 2010), arrojó valores próximos a 5/3, razón por la cual se consideró que la evidencia empírica permitía asignar un valor fijo a q y el modelo DIT se asume como un modelo de 3 parámetros. A y C son parámetros que incorporan las características de la lluvia local, mientras que B, es un parámetro zonales proveniente de las estaciones pluviográficas base.

Una vez que DIT ha sido calibrado para un pluviógrafo, la extrapolación a las estaciones pluviométricas asociadas consiste en sustituir dos estadísticos (de los logaritmos de láminas diarias máximas), la media ( $\mu$ ) y el desvío estándar ( $\sigma$ ) de la serie pluviográfica de la estación base, que son términos de los parámetros C y A respectivamente, por los correspondientes de la serie de la estación pluviométrica.

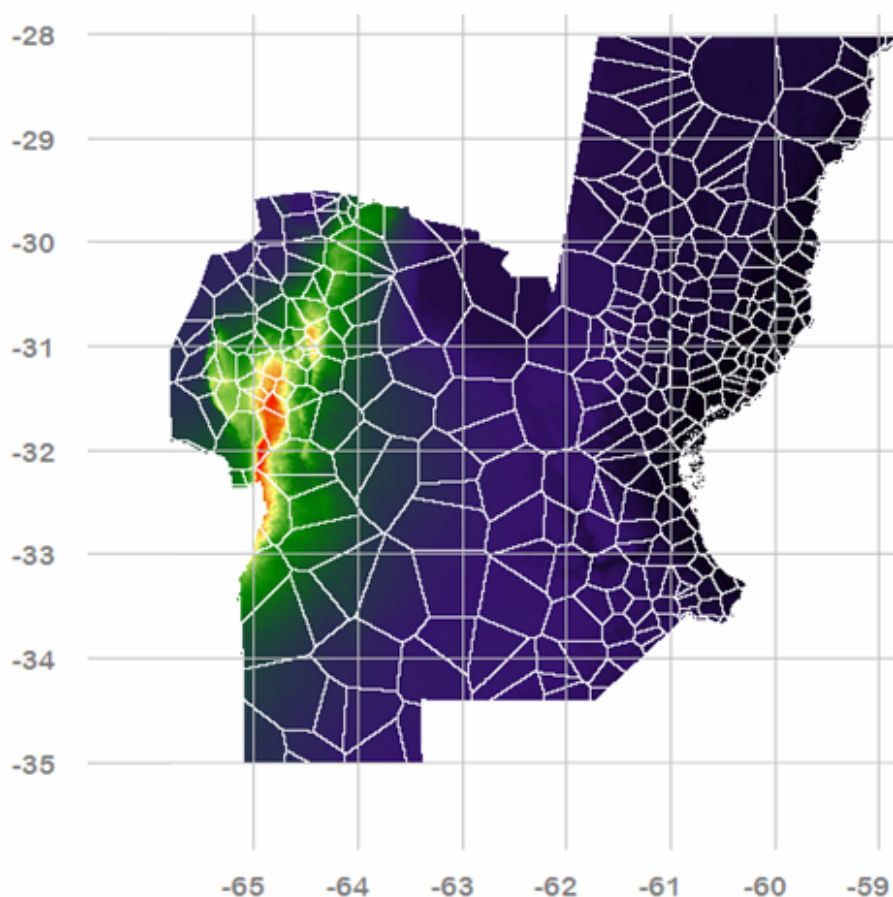


Figura 3.- Distribución de polígonos de Thiessen, para las 483 estaciones.

## INTERPOLACIÓN DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Una vez que el modelo DIT ha sido calibrado para un pluviógrafo, la extrapolación a las estaciones pluviométricas asociadas consiste en sustituir dos estadísticos (de los logaritmos de láminas máximas diarias), la media ( $\mu$ ) y el desvío estándar ( $\sigma$ ) de la serie pluviográfica de la estación base, que son términos de los parámetros C y A respectivamente, por los correspondientes a la serie de la estación pluviométrica. En este trabajo, se propone avanzar en la regionalización de estos parámetros estadísticos a toda la superficie bajo análisis, recurriéndose al empleo del paquete computacional IDRISI Andes®, fue posible generar un archivo vectorial georeferenciado, el cual, contiene además de otras informaciones, los valores provenientes de la estadística descriptiva, es decir, la media ( $\mu$ ) y el desvío estándar ( $\sigma$ ) de las series pluviométricas seleccionadas.

A diferencia de la metodología propuesta originalmente por Caamaño Nelli, et al., 1998, en donde, se empleaba una técnica de extrapolación sobre el área de influencia de las distintas estaciones satélite (Figura 3). Aquí se plantea, implementar diversas metodologías para interpolar regionalmente la información contenida en forma puntual, de esta manera es posible obtener mapas temáticos de tipo raster. Los cuales, basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los distintos objetos geográficos.

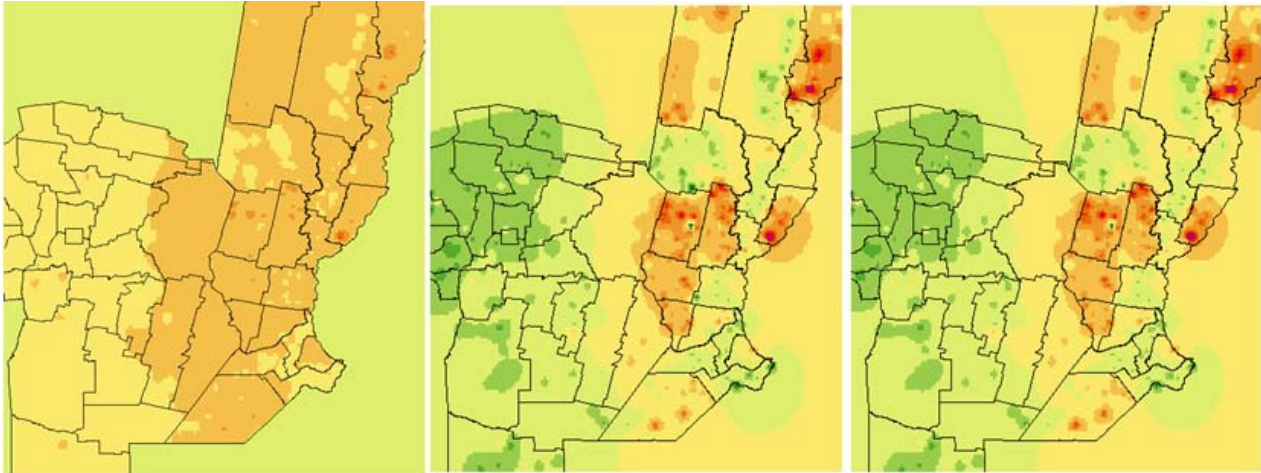
Su forma de proceder consiste en dividir la zona de afección de la base de datos puntuales (archivo vectorial) en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (a las que se denomina usualmente como “pixels”) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático.

En el presente estudio se aplicaron dos técnicas de extrapolación regional las cuales se han evaluado en trabajos previos y demostrado su conveniencia para este tipo de planteo (Catalini, Maidah et al. 2010, Catalini, et al., 2011) a continuación se resumirán brevemente estas técnicas y el análisis realizado.

### Interpolación ponderada

Esta técnica, permite interpolar una superficie de acuerdo a un promedio de la distancia ponderada sobre la base de un archivo vectorial representativo de las estaciones pluviométricas y los valores de la variable de interés para dichos puntos. Esta metodología preserva los valores de los datos muestrales y por ello es considerada una técnica de interpolación exacta.

La Figura 4, muestra los mapas temáticos interpolados para los ajustes de distribución lognormal sobre las series máximas diarias para recurrencias de 20, 50 y 100 años, es de resaltar, que esta metodología presenta dos condicionantes importantes; el primero el no permitir interpolar los valores fuera del área de cobertura, además al ser una técnica de interpolación exacta, los mapas generados presentaran ineludiblemente los conocidos “ojos de buey”, que denotan el carácter puntual de la información de base.



**Figura 4.-** Raster interpolada por medio del método de Interpolación Ponderada, Pluviométrica Máxima Diaria Recurrencias 20, 50 y 100 años.

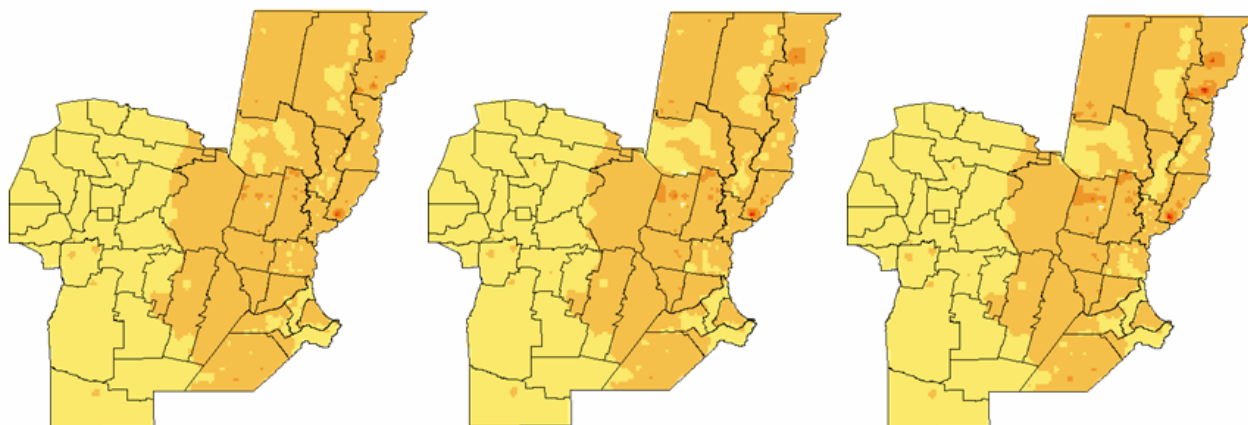
### Interpolación mediante el método de Kriging

En los fenómenos que varían continuamente, como es el caso de la lluvia, es más probable que los lugares que se encuentran más próximos entre sí, tengan valores similares en vez de que aquellos que se encuentran alejados, el método de Kriging trata de contemplar esta situación. Por lo que la primera tarea al usar las técnicas geoestadísticas para crear superficies es describir de manera tan completa como sea posible, la naturaleza de la variabilidad espacial presente en los datos de muestra. Esta variabilidad espacial es determinada en términos de distancia y dirección.

Mediante esta metodología, el análisis se realiza en pares de puntos muestrales, cada punto de datos es colocado en pares con cada uno de los otros puntos de datos. Cada par puede ser caracterizado por su distancia de separación (la distancia euclidiana entre los dos puntos) y su dirección de separación (el azimut en grados de la dirección de un punto al otro).

La Figura 5 presenta los mapas temáticos interpolados para las variables de interés, es de resaltar, que esta metodología subsana uno de los condicionantes mencionados en el apartado anterior (la extrapolación a zonas sin datos), pero los mapas generados presentan aun los “ojos de buey”.





**Figura 5.-** Raster interpolado por el método de Kriging, Pluviométrica Máxima Diaria Recurrencias 20, 50 y 100 años.

### Selección de la técnica de interpolación

Al analizar las dos técnicas utilizadas el método de Kriging presenta como ventaja fundamental, la posibilidad de aprovechar directamente la información sobre la correlación espacial existente entre los propios datos, la cual, queda reflejada en el denominado variograma muestral. Además, esta técnica es capaz de representar los cambios en la dependencia espacial dentro del área de estudio.

La dependencia espacial es simplemente la idea de que los puntos que se encuentran más juntos poseen valores más similares que los puntos más alejados. Kriging reconoce esta tendencia y que la misma no está limitada a una relación de distancia euclidiana y puede exhibir muchos patrones diferentes generando, además de la superficie interpolada, una segunda imagen de varianza. Esta imagen provee, para cada píxel, información acerca de cuán próximo es el ajuste del valor interpolado al modelo general definido.

La imagen de varianza, fue utilizada como una herramienta de diagnóstico para perfeccionar el modelo, la meta es desarrollar un modelo con una distribución pareja de la varianza que sea tan cercana a cero como sea posible, esta condición, favorece la hipótesis de ajuste de este método que establece que la variable aleatoria a estimar sigue una distribución normal (o lognormal tal cual lo supuesto por Garcia, 1996 y Maidah, 2010). Por estos motivos la técnica de interpolación adoptada para generar las superficies de interpolación se basó en el método de Kriging.

### Mapas Tendenciales

Como fuera mencionado cualquiera fuera la técnica adoptada, los mapas temáticos que se obtienen (Figura 4 y Figura 5) presentan marcadas crestas o células conocidas como “Ojos de Buey”, las cuales denotan el origen puntual de la información de base.

Es por ello, que para salvar este inconveniente, basados en los resultados presentados por Catalini et al., 2010, donde se propone una metodología de generación de superficies tendenciales, a partir de la regionalización de valores de lámina de lluvia máxima diaria para distintas recurrencias. Debido a que la superficie resultante mediante el empleo del análisis tendencial es un modelo matemático ideal, es muy suave y está libre de detalles locales (células). Por lo que es una técnica de interpolación global ya que calcula una superficie que ofrece el mejor ajuste, para todo el grupo de datos conocidos, sin embargo los datos tendenciales se caracterizan por ser un interpolador inexacto.

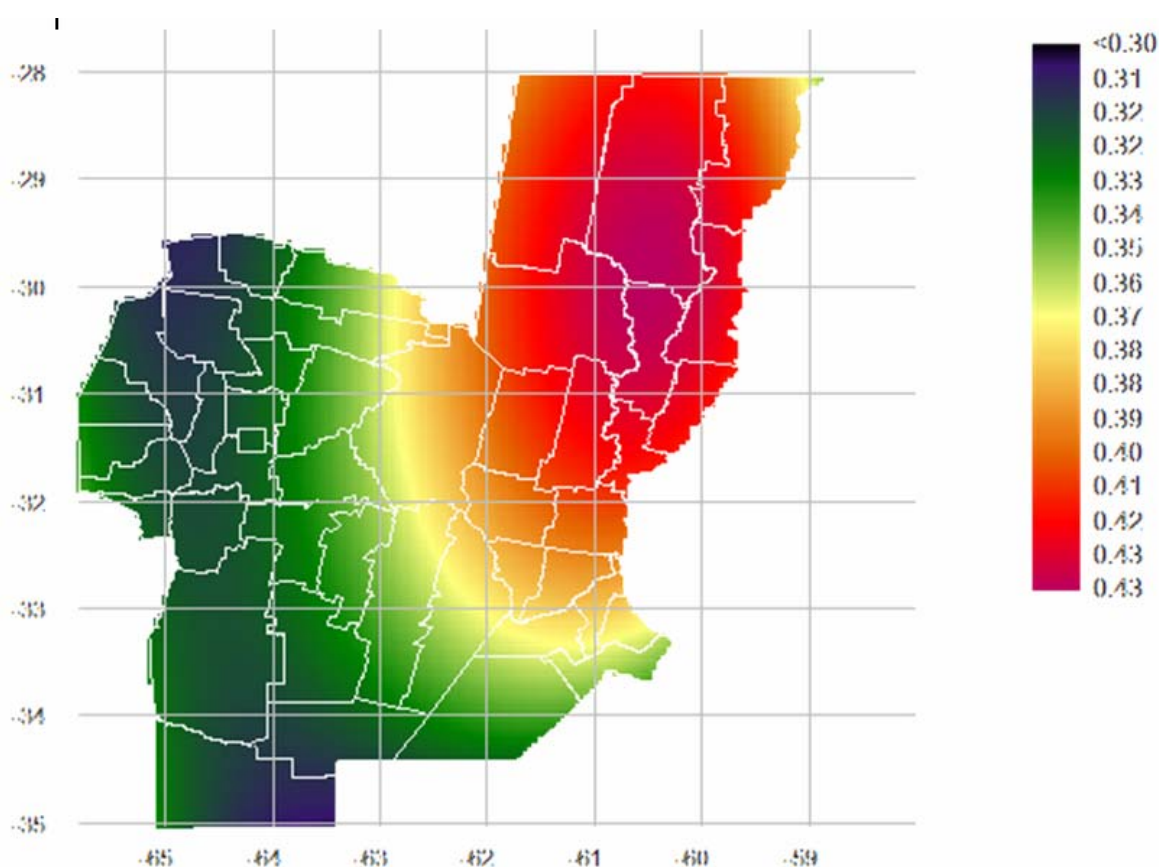
La hipótesis que se emplea en el trabajo de referencia es aceptar como validos desde el punto de vista estadístico a los valores puntuales de la superficie tendencial, que se encuentren contenidos

dentro del intervalo de confianza (rango esperable de posibles valores) de la variable de interés. De esta manera, la superficie tendencial óptima es aquella que presenta el mayor porcentual de valores contenidos dentro del intervalo de confianza, obtenido en el análisis de estadística inferencial, lo cual validaría estadísticamente su adopción. Basados en los resultados obtenidos previamente, se adoptó el modelo de superficie tendencial cúbica para las variables de interés (Figura 6, Figura 7 y Figura 8).

## IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DIT PARA LA INTERPOLACIÓN DE CURVAS I-D-T

Si bien la metodología aquí propuesta permitiría determinar mediante el algoritmo DIT u otro similar, las familias de curvas i-d-T para cualquier punto del territorio de las provincias de Córdoba y Santa Fe con una resolución espacial de 25 km<sup>2</sup>, a los fines de la implementación y validación de los resultados se procedió a seleccionar 15 de las 134 estaciones pluviométricas utilizadas, esto representa más del 10% de la información base disponible (Figura 9). En estas estaciones en particular es viable contrastar los resultados obtenidos por la propuesta aquí presentada versus la metodología original propuesta por Caamaño Nelli, García y Dasso (1998), dado que se cuenta tanto con la información puntual como la proveniente de los mapas temáticos.

Entonces una vez definidas las estaciones a analizar y partiendo de sus coordenadas geográficas, es posible extraer los valores interpolados de las variables de interés, los cuales son resumidos en la Tabla 4, es decir, aquellos parámetros provenientes de los logaritmos de los máximos diarios de la serie histórica, y los regionalizados provenientes los mapas temáticos de medias ( $\mu$ ) y desvíos ( $\sigma$ ) (Figura 6 y Figura 7).



**Figura 6.-** Mapa tendencial de los desvíos estándar de los logaritmos de las series pluviométricas máximas diarias.

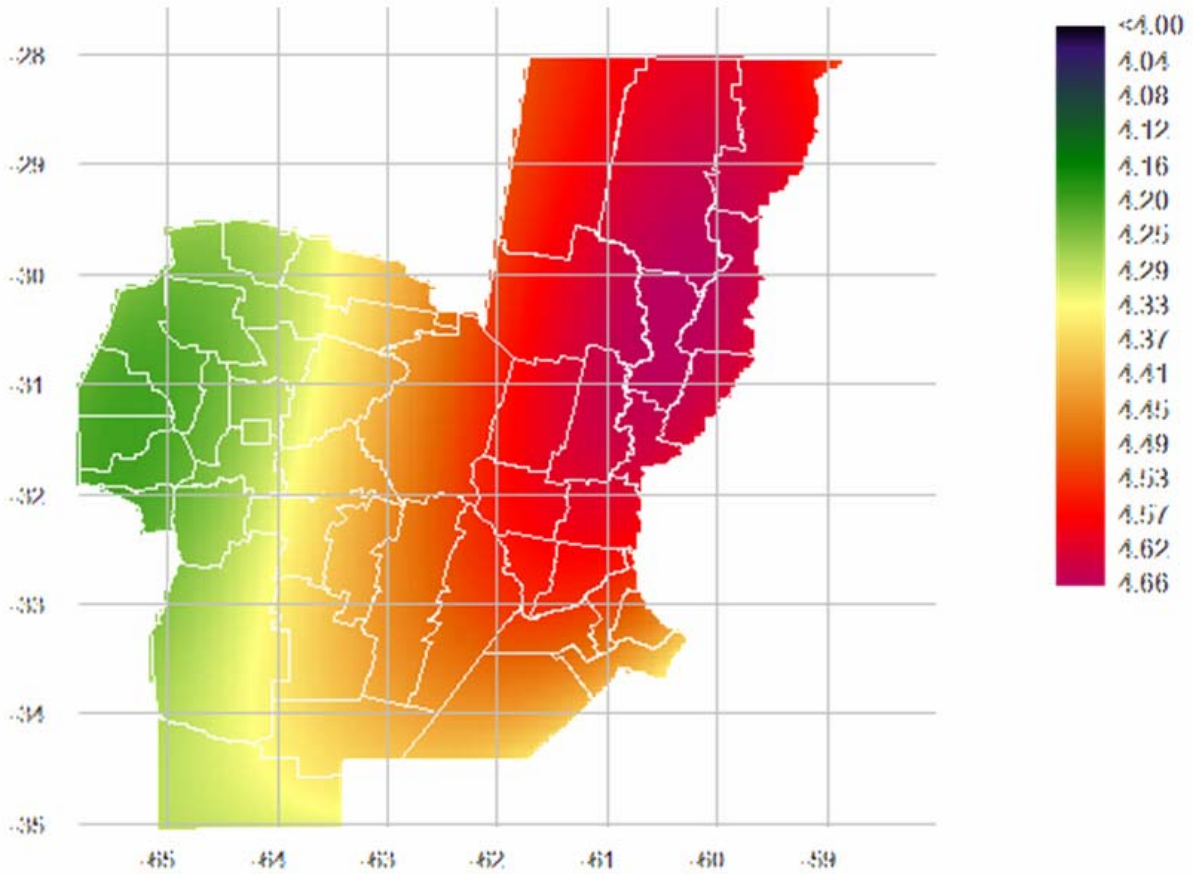


Figura 7.- Mapa tendencial de las medias de los logaritmos de las series pluviométricas máximas diarias

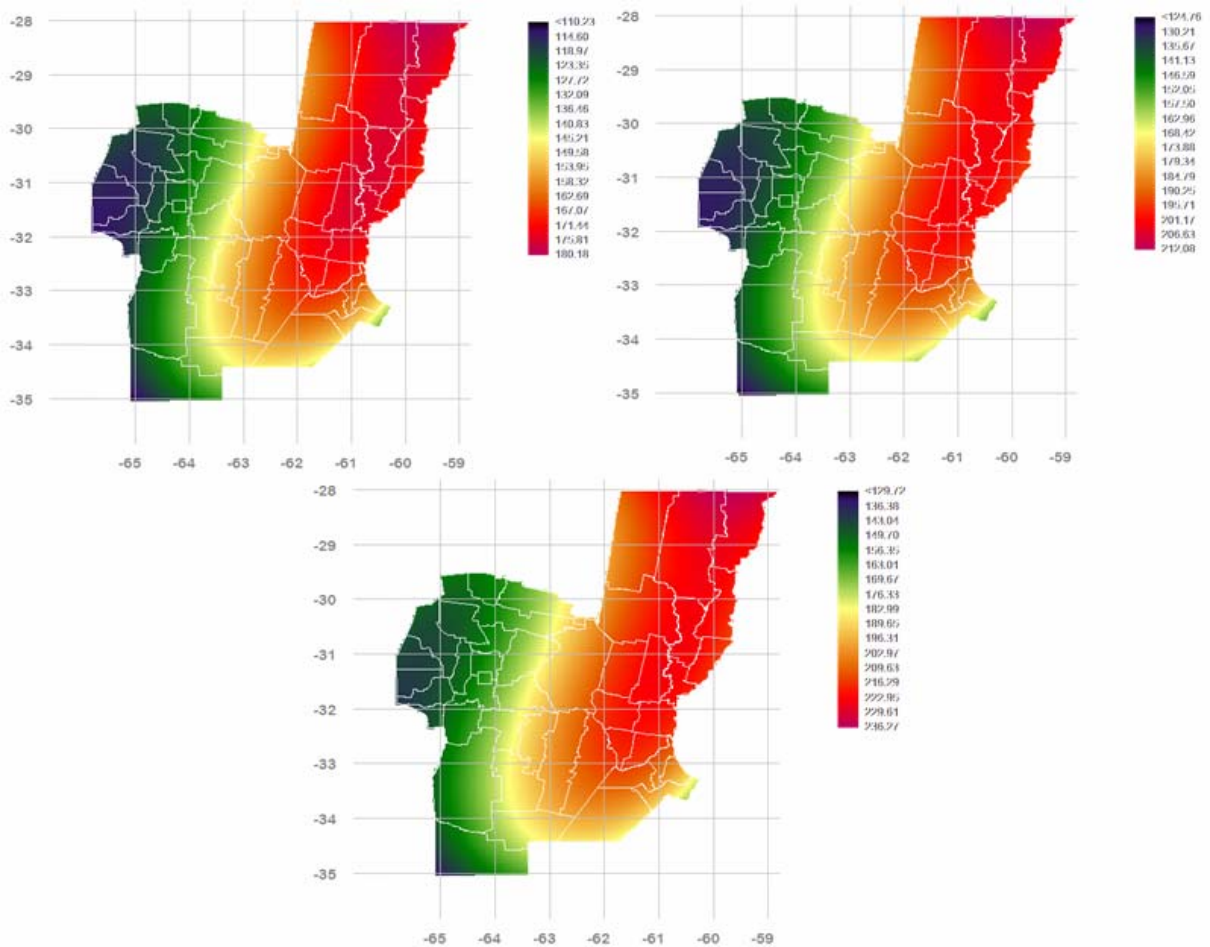
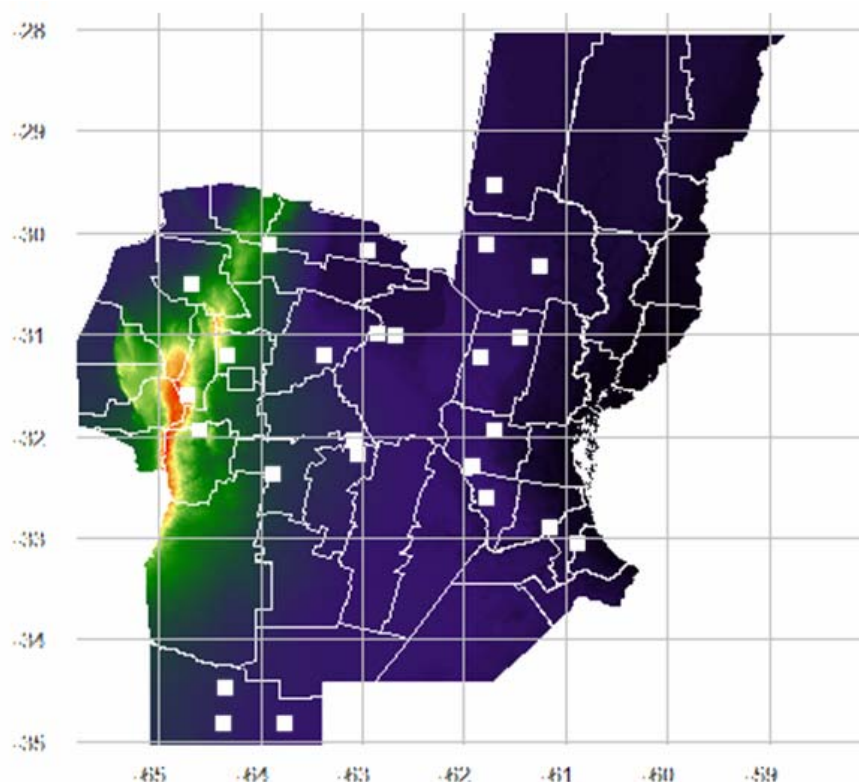


Figura 8.-Mapas tendencias de lluvias máximas diarias para recurrencias de 20, 50 y 100 años



**Figura 9.-** Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas seleccionadas para la interpolación de curvas i-d-T

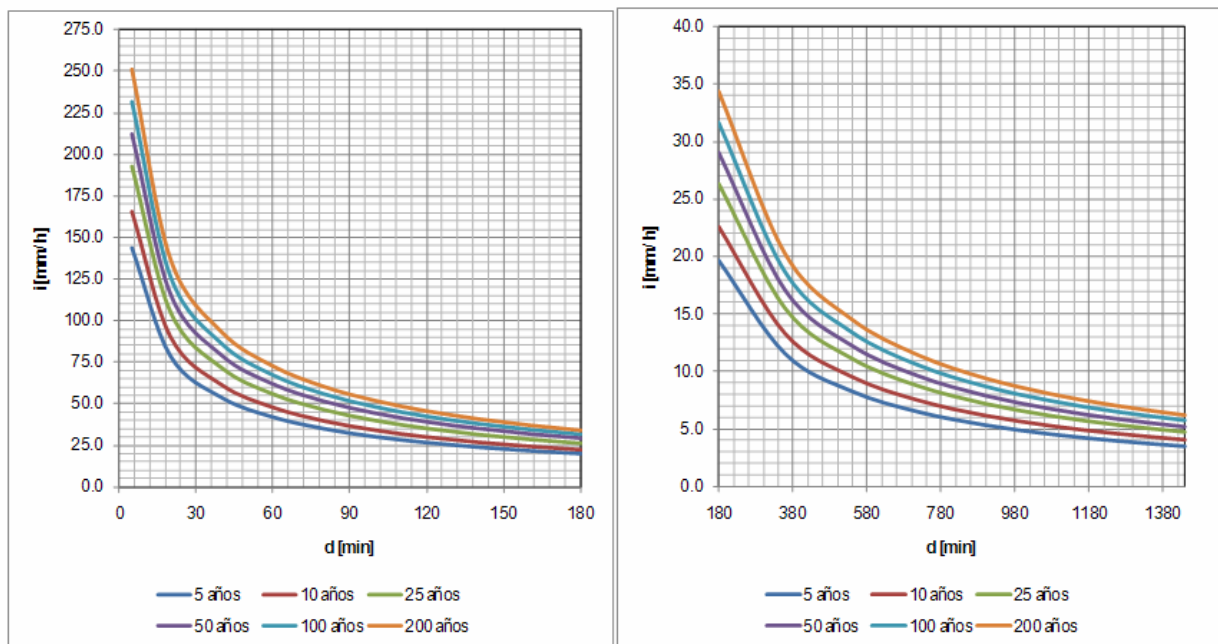
**Tabla 4.-** Estaciones pluviométricas seleccionadas, para determinar y contrastar las i-d-T obtenidas por el modelo DIT de transposición y el DIT regionalizado mediante interpolación.

ID	Estación	Valores Puntuales		Valores Regionalizados		Latitud	Longitud	Altitud [m snm]	Cantidad de Años Hidro.	Pluviógrafo Base
		□	□	□	□					
8	Cerro Colorado	4.283	0.324	4.282	0.328	-30.08	-63.92	651	48	OC
10	La Rinconada	4.473	0.291	4.394	0.362	-30.15	-62.93	150	20	CS
23	Chuñá	4.147	0.341	4.226	0.315	-30.47	-64.67	493	24	VD
39	Marull	4.506	0.376	4.435	0.367	-30.97	-62.83	89	19	CS
40	Balnearía	4.424	0.317	4.468	0.374	-30.98	-62.67	84	18	CS
45	Sta.Rosa deRío 1°	4.379	0.290	4.361	0.344	-31.18	-63.38	170	17	OC
46	Río Ceballos	4.449	0.238	4.251	0.320	-31.17	-64.32	679	28	SU
68	Copina	4.162	0.392	4.230	0.318	-31.57	-64.70	1650	28	SU
82	Los Reartes	4.280	0.328	4.246	0.320	-31.92	-64.58	670	58	SU
90	James Craik	4.337	0.297	4.435	0.353	-32.15	-63.04	245	16	OC
91	S.Antonio d.Litfn	4.352	0.298	4.432	0.351	-32.01	-63.08	117	19	MJ
92	Gral.Fotheringam	4.173	0.375	4.332	0.328	-32.33	-63.87	320	18	RC
124	Nicolás Bruzone	4.388	0.402	4.313	0.316	-34.43	-64.33	200	17	RC
127	L.Perla-H.Renancó	4.235	0.217	4.301	0.314	-34.78	-64.35	188	25	LA
128	Italo	4.380	0.297	4.326	0.309	-34.78	-63.75	139	15	LA
203	Carcaraña	4.496	0.189	4.539	0.382	-32.86	-61.15	60	16	RO
231	Logroño	4.677	0.462	4.541	0.411	-29.51	-61.69	81	20	CS
286	Zavella	4.338	0.459	4.506	0.376	-33.02	-60.88	45	37	RO
299	La Rubia	4.538	0.429	4.548	0.408	-30.09	-61.77	92	18	CS
308	San Cristobal	4.700	0.437	4.612	0.423	-30.31	-61.24	77	19	CS
426	María Susana	4.650	0.420	4.558	0.386	-32.27	-61.91	110	17	MJ
429	San Jorge	4.670	0.370	4.581	0.396	-31.92	-61.70	76	17	MJ
434	Monte de oca	4.603	0.416	4.557	0.383	-32.56	-61.77	120	18	MJ
449	Altaliva	4.725	0.524	4.607	0.415	-31.00	-61.43	94	19	RA
476	Villa	4.638	0.481	4.574	0.402	-31.19	-61.84	103	19	RA

Mediante el empleo de la ecuación [1], la cual define al modelo DIT e incorporando los parámetros estadísticos a los parámetros constitutivos del modelo, es decir, A y C quienes son los parámetros responsables de incluir las características de la lluvia local, mientras que B y q, son parámetros zonales provenientes de las estaciones pluviográficas base, es posible de esta manera trasponer la familia de curvas i-d-T a la estación satélite en caso de emplear la metodología original o regionalizarlas a las coordenadas de interés en el caso de emplear los mapas temáticos. Un ejemplo de las familias de curvas i-d-T obtenidas tanto por trasposición como por regionalización, se presenta en las Figura 10 y Figura 11. En ellas, se puede apreciar que mediante ambas técnicas, las familias de curvas respetan la concepción del modelo DIT, y los valores obtenidos no difieren significativamente entre sí.

La principal diferencia es metodológica, dado que la propuesta aquí presentada, no solo permite independizarse de la ubicación de la estación satélite, sino que incorpora información proveniente de otras estaciones próximas al punto de interés fortaleciendo la incorporación de características locales de la zona de influencia de cada estación.

Por otra parte, se presentan en la Tabla 5, las diferencias porcentuales en función de la recurrencia (T), entre los resultados obtenidos por medio del modelo DIT traspuesto y el Regionalizado, se puede apreciar que la gran mayoría de los valores obtenidos se encuentran dentro de valores razonables, en términos generales, la media de las 25 estaciones no supera el 5% de diferencia entre ellas, aunque el desvío estándar puede alcanzar valores próximos al 20 % aunque solo para recurrencias elevadas, lo cual sería compatible con los intervalos de confianza de la función de ajuste. Es de destacar, que en las estaciones donde se presentan las mayores diferencias, y dado que el modelo DIT aun no cuenta con una determinación de intervalos de confianza e incertidumbre, se realizó el contraste de los valores obtenidos por regionalización versus el intervalo de confianza proveniente de la estadística inferencial para el ajuste de la función Lognormal, este intervalo indicaría la incertidumbre mínima esperable en función de la muestra analizada. En todos los casos considerados los valores obtenidos mediante el empleo del modelo DIT regionalizado estuvieron incluidos en este intervalo, esto validaría inicialmente los resultados obtenidos, además en los casos de mayor diferencia porcentual, ninguno de ellos implicó un cambio en el orden de magnitud de los valores calculados.



**Figura 10.-** Curvas i-d-T, modelo DIT traspuesto. Estación San Antonio de Litín.

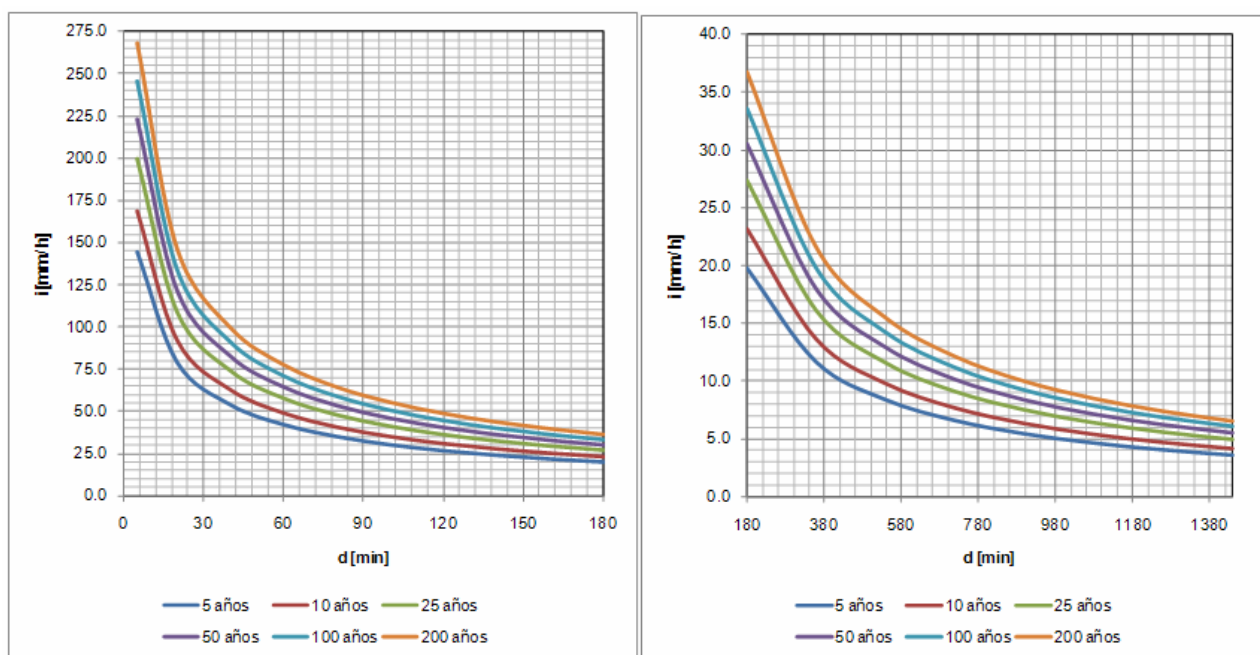


Figura 11.- Modelo i-d-T, modelo DIT Regionalización. Estación San Antonio de Litín

Tabla 5.- Diferencia porcentual entre las relaciones i-d-T transpuesto y Regionalizado de cada estación analizada en función de la recurrencia (T)

ID	Estación	Diferencia Porcentual de i					
		5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	200 años
8	Cerro Colorado	0.2%	0.4%	0.5%	0.6%	0.7%	0.8%
10	La Rinconada	-17.4%	-15.6%	-13.6%	-12.4%	-11.3%	-10.3%
23	Chuña	11.6%	11.1%	10.5%	10.2%	9.8%	9.5%
39	Marull	-8.2%	-8.7%	-9.2%	-9.5%	-9.8%	-10.1%
40	Balnearia	8.7%	11.0%	13.3%	14.8%	16.1%	17.3%
45	Sta.Rosa deRío 1º	2.7%	5.0%	7.5%	9.0%	10.4%	11.6%
46	Río Ceballos	-13.7%	-9.7%	-5.5%	-2.9%	-0.6%	1.4%
68	Copina	0.6%	-2.7%	-6.4%	-8.8%	-11.0%	-13.1%
82	Los Reartes	-4.2%	-4.6%	-5.0%	-5.3%	-5.5%	-5.7%
90	James Craik	13.5%	15.7%	17.9%	19.3%	20.5%	21.6%
91	S.Antonio d.Litín	11.7%	13.8%	15.9%	17.3%	18.5%	19.5%
92	Gral.Fotheringam	11.2%	9.3%	7.3%	5.9%	4.7%	3.6%
124	Nicolás Bruzone	-15.9%	-20.4%	-25.4%	-28.7%	-31.7%	-34.5%
127	L.Perla-H.Renancó	13.7%	17.3%	21.0%	23.3%	25.3%	27.1%
128	Italo	-4.6%	-4.1%	-3.5%	-3.2%	-2.9%	-2.6%
203	Carcaraña	18.5%	25.2%	31.8%	35.7%	39.0%	41.8%
231	Logroño	-19.5%	-22.3%	-25.3%	-27.2%	-29.0%	-30.6%
286	Zavella	9.3%	5.9%	2.1%	-0.4%	-2.7%	-4.8%
299	La Rubia	-0.7%	-1.7%	-2.7%	-3.4%	-4.0%	-4.5%
308	San Cristóbal	-10.5%	-11.1%	-11.8%	-12.3%	-12.7%	-13.1%
426	Maria Susana	-12.9%	-14.6%	-16.4%	-17.7%	-18.8%	-19.8%
429	San Jorge	-7.0%	-5.7%	-4.5%	-3.6%	-2.9%	-2.3%
434	Monte de oca	-7.7%	-9.3%	-11.1%	-12.2%	-13.2%	-14.2%
449	Altaliva	-23.4%	-29.5%	-36.3%	-40.9%	-45.1%	-49.1%
476	Villa	-13.9%	-18.0%	-22.5%	-25.5%	-28.2%	-30.7%
	Promedio	-2.3%	-2.5%	-2.9%	-3.1%	-3.4%	-3.6%
	Desvió Estándar	12.1%	13.9%	16.2%	17.8%	19.3%	20.7%

Frente a los resultados obtenidos, es importante analizar las posibles causas de estas diferencias, la **Tabla 6** presenta la diferencia porcentual existente para cada estación entre la media ( $\mu$ ) y el desvío estándar ( $\sigma$ ) provenientes de los mapas temáticos interpolados y el dato puntual, en ella se han resaltado aquellas que presentaron las mayores diferencias.

Mediante el análisis de la Tabla 6 es posible inferir que las mayores diferencias (que superan el 10%) se producen cuando la diferencia conjunta entre el valor puntual y el interpolado superan el  $\pm 3\%$ , para la  $\mu$  y con  $\pm 5\%$  de variación en  $\sigma$ . Siendo más importante la variación a causa de diferencias más significativas de la variable media de los logaritmos y menor significancia para una diferencia más acentuada en los desvío estándar.

Considerando estos resultados es de destacar que el desvío estándar ( $\sigma$ ) influye directamente sobre el parámetro A de la ecuación [1] el cual está ligado directamente a la recurrencia (T), en contraparte la media ( $\mu$ ) se encuentra ligado al parámetro B de dicha ecuación, siendo este quien incide sobre el factor de persistencia asociado a la duración bajo análisis. De esta manera es posible concluir que este último término posee el mayor peso a la hora de definir la función i-d-T, lo cual justificaría las mayores diferencias observadas.

**Tabla 6.-** Diferencia porcentual entre valores interpolados de  $\mu$  y  $\sigma$  (mapa temático) y valores puntuales proveniente de los pluviómetros satélite analizados.

ID	Estación	Diferencia Porcentual	
		$\mu$	$\sigma$
8	Cerro Colorado	0.0%	1.0%
<b>10</b>	<b>La Rinconada</b>	<b>-1.8%</b>	<b>19.4%</b>
23	Chuña	1.9%	-8.5%
39	Marull	-1.6%	-2.6%
40	Balnearia	1.0%	15.1%
45	Sta.Rosa deRío 1°	-0.4%	15.9%
<b>46</b>	<b>Río Ceballos</b>	<b>-4.7%</b>	<b>25.7%</b>
<b>68</b>	<b>Copina</b>	<b>1.6%</b>	<b>-23.3%</b>
82	Los Reartes	-0.8%	-2.6%
90	James Craik	2.2%	16.1%
91	S.Antonio d.Litín	1.8%	15.1%
92	Gral.Fotheringam	3.7%	-14.4%
<b>124</b>	<b>Nicolás Bruzone</b>	<b>-1.7%</b>	<b>-27.1%</b>
<b>127</b>	<b>L.Perla-H.Renancó</b>	<b>1.5%</b>	<b>30.9%</b>
128	Italo	-1.3%	3.7%
<b>203</b>	<b>Carcaraña</b>	<b>1.0%</b>	<b>50.5%</b>
231	Logroño	-3.0%	-12.4%
<b>286</b>	<b>Zavella</b>	<b>3.7%</b>	<b>-22.1%</b>
299	La Rubia	0.2%	-5.2%
308	San Cristobal	-1.9%	-3.2%
426	Maria Susana	-2.0%	-8.8%
429	San Jorge	-1.9%	6.5%
434	Monte de oca	-1.0%	-8.7%
<b>449</b>	<b>Altaliva</b>	<b>-2.6%</b>	<b>-26.3%</b>
<b>476</b>	<b>Villa</b>	<b>-1.4%</b>	<b>-19.7%</b>

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio se presenta una metodología que considera el comportamiento espacial de los parámetros estadísticos que definen la lluvia máxima diaria, como son la media ( $\mu$ ) y el desvío estándar ( $\sigma$ ) con la finalidad de ampliar la cobertura espacial y poder inferir Lluvias de Diseño a

regiones, en donde no se cuenta con información pluviométrica y/o pluviográfica que permitan su obtención local. Por ende entre las principales conclusiones se pueden enumerar las siguientes:

### **Sobre la Información de base**

En base a trabajos previos se ha desarrollado y ampliado un Sistema de Información Geográfica, SIG, el cual contiene la ubicación espacial de las 486 estaciones pluviométricas estudiadas, sus series históricas de lluvias máximas diarias (1941-2011), sus principales parámetros estadísticos de las series de lluvias máximas diarias: (Mínimo [mm], Máximo [mm], Promedio [mm], Desviación Estándar, Mediana [mm], Coeficiente de Variación, Coeficiente de Asimetría, Coeficiente de Curtosis, etc).

Esta información posee una densidad espacial suficiente para aplicar la metodología planteada, pero no elimina la necesidad de contar con mayor número de estaciones pluviográficas y pluviométricas que permitan encontrar una relación espacial más ajustada. De todas maneras, la información disponible se encuentra depurada y validada estadísticamente en un grado tal que permite interpolarla sobre el territorio de ambas Provincias. Además al estar incluida en única base de datos, permitirá la incorporación de nuevas estaciones o incluir nuevos años de registro a las ya existentes.

### **Sobre la Metodología Empleada**

El análisis de superficies tendenciales empleado para generar mapas temáticos ya ha sido verificado y comprobado en trabajos previos (Catalini, et al., 2010), esta metodología permite salvar el inconveniente típico de la información puntual de base, es decir la existencia de marcadas crestas o células conocidas como “Ojos de Buey”, las cuales denotan el origen puntual de la información de base. De esta manera se cuenta con mapas temáticos de resolución espacial de 25 km<sup>2</sup>, los cuales mediante el empleo del SIG pueden ser fácilmente actualizados con nueva información,

El modelo DIT, originalmente desarrollado para la trasposición en función de una red de polígonos de Thiessen la cual permitía su extrapolación sobre el área de cobertura, fácilmente se adapta a las técnicas de interpolación espacial aquí presentada, potenciándolo como una herramienta de predicción y aplicación directa para el diseño hidrológico en la provincia de Córdoba, al extender su uso a regiones en donde se carezca de información pluviométrica y/o pluviográfica con una adecuada resolución espacial.

### **Sobre los resultados obtenidos**

Mediante, el análisis realizado fue posible inferir que las mayores diferencias observadas en los resultados se originan cuando la misma supera el +/-3%, para la  $\mu$  y +/-5% de variación en  $\sigma$ . Siendo más influyente sobre los resultados la variación de la media de los logaritmos. Esto es debido a la definición del modelo DIT y su forma de considerar los parámetros locales, dado que el desvío estándar ( $\sigma$ ) influye directamente sobre el parámetro A el cual está ligado directamente a la recurrencia (T), en contraparte la media ( $\mu$ ) se encuentra ligado al parámetro C, siendo este quien incide sobre el factor de persistencia asociado a la duración bajo análisis.

De todas maneras, los resultados obtenidos se consideran más que adecuados siendo de destacar que en los 15 puntos analizados la diferencia media para ninguna de las recurrencias consideradas supero el 5% y con un desvío estándar que no supero en términos generales el 15%.



## Sobre la utilidad de los resultados en ingeniería

Este trabajo provee información de base imprescindible para la planificación territorial y para el diseño y operación de obras de infraestructura relacionadas con los recursos hídricos, ya que para cualquier dimensionado de estructuras hidráulicas, resulta necesario cuantificar el tipo de evento hidrológico que la obra deberá soportar y el correspondiente riesgo asociado.

Suele pensarse que la estimación probabilística de las mayores precipitaciones es un tema reservado a estudios pluviográficos, por ser los únicos capaces de proveer hietogramas de proyecto. Sin embargo, si bien es la alternativa ideal, no descarta en modo alguno su uso en zonas que solo cuentan con información más elemental como la pluviométrica, que no son pocas en la provincia ni a nivel nacional.

Los mapas temáticos para Córdoba y Santa Fe, permiten estimar de manera directa y expeditiva las curvas intensidad-duración-Recurrencia (T), mediante el empleo del modelo DIT u otro similar para recurrencias de interés como pueden ser 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50, 100 y/o 200 años, además sobre el mismo SIG, se pueden obtener las estimaciones de lamina de lluvia máxima diaria en lugares en donde no se disponían de registros.

Utilizar esta información, implica mejorar la exactitud de los cálculos y por consiguiente optimizar la inversión en una obra. Los mapas presentados se convierten en un instrumento general y versátil para la estimación de Lluvias de Diseño y, por lo tanto, en una herramienta de empleo asegurado no solo en Hidrología, sino también en Agronomía, Ecología, Diseño de obras y Planeamiento provincial y municipal.

## AGRADECIMIENTOS

Al área de hidrología del INA-CIRSA, por el apoyo brindado.

A la Universidad Católica de Córdoba, por la confianza depositada en el EHCPA.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caamaño Nelli, G y C. Dasso** (2003). *“Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias”*. Editorial Universitas. 222 páginas. ISBN: 987-9406-43-5. Córdoba, Argentina.
- Caamaño Nelli, G. E.; C.M. García y C. Dasso** (1998). “Zonalización de Tormentas de Diseño para la Provincia de Córdoba, Argentina.” *II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur y XVII CNAgua*, Tomo 2, 168-178. Santa Fe, Argentina.
- Caamaño Nelli, G. y C.M. García** (1999). “Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal”. *Ingeniería Hidráulica de México*. Vol. XIV, N°3, 37- 44. D.F., México.
- Catalini, C.G.; G. Caamaño Nelly y C.M. García** (2002). “Curvas de decaimiento areal de lluvias de diseño efectos de la topografía y el clima sobre su forma”. *Anales del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. La Habana, Cuba
- Catalini, C.G; A. Maidah; C.M. García y G. Caamaño Nelly** (2010) “Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba”. *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Azul Provincia de Buenos Aires. Argentina.
- Dirección General de Comunicaciones, Gobierno de Santa Fe**, Datos pluviométricos [www.santa-fe.gov.ar/gbrn/regpluv](http://www.santa-fe.gov.ar/gbrn/regpluv)
- García, C. M.** (1994). *Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias en la Provincia de Córdoba*. Tesis de Grado de la carrera de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Córdoba.
- Keegan, R.A.; J.M. Keegan** (1993) *Atlas de la República Argentina*. ADISA, Agrupación de Diarios del Interior S.A., Graf Editorial, Córdoba.

**Maidah, A.** (2010). *Análisis Espacial de Datos Hidrológicos utilizando Sistemas de Información Geográfica. Aplicación al estudio de Lluvias Diarias*. Tesis de Grado de la carrera de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Córdoba.

**Miatello, R., M. Roque y J. Vazquez** (1979). *Geografía Física de la Provincia de Córdoba*. Editorial Boldt, Buenos Aires.

**Water Resources Council** (1981), *Guidelines for determining flood flow frequency*, bulletin 17B. U.S. Geological Survey. Reston. VA 22092.

## ANÁLISIS DINÁMICO DE TORMENTAS EXTREMAS EN EL GRAN SAN MIGUEL DE TUCUMÁN

*Hugo Roger Paz, Roberto Lazarte Sfer y Flavia Bazzano*

*Laboratorio de Construcciones Hidráulicas – Universidad Nacional de Tucumán*

*Email: hpaz@herrera.unt.edu.ar*

**RESUMEN:** El objetivo del presente trabajo fue obtener información a cerca de la dinámica de las lluvias del gran San Miguel de Tucumán. Se utilizaron los datos provistos por ocho estaciones pluviométricas, correspondientes a los años hidrológicos comprendidos entre el septiembre de 2000 y agosto de 2009. La red cubre un área de aproximadamente 224 Km<sup>2</sup>, con una distancia entre las mismas que oscila entre 1,5 Km y 8,6 Km. Los pluviómetros fueron de tipo electrónico y los datos se obtuvieron según una discretización temporal de 5 minutos, con estaciones con relojes sincronizados. Dichos pluviómetros son tipo cangilón, con vuelcos equivalentes a 0,2 mm de precipitación, por lo tanto el valor mínimo de registro es igual a este valor. Cada lluvia intensa que precipita sobre el área cubierta por la red fue registrada en forma simultánea, con lo que se obtuvo la evolución temporal de las mismas en la ubicación de cada una de las estaciones. A partir de la información pluviométrica se generó una base de datos utilizando un software de análisis geoestadístico, que permite el análisis y correlación de datos de precipitaciones de distintas estaciones llamado sistema de registro pluviométrico. Se seleccionaron para su estudio 63 eventos importantes cuya recurrencia variaba entre uno a dos años. Para el análisis dinámico se recurre a la observación de los desplazamientos de los picos de intensidad a través de las diferentes estaciones pluviométricas. Estos desplazamientos se evidencian a través de las posiciones sucesivas de los máximos a lo largo del registro de cada evento. De esta manera es posible distinguir las diferentes trayectorias que recorre cada una de las lluvias estudiadas. El resultado del trabajo fue la obtención de una clasificación de las tormentas extremas en el Gran San Miguel de Tucumán en base a sus características dinámicas. La información obtenida nos permite caracterizar mejor las tormentas de la zona y obtener patrones de desplazamientos más frecuentes en las lluvias, que constituyen elementos sofisticados para la definición de lluvias de diseño y podrían ser usados en modelos de transformación precipitación escorrentía que tengan en cuenta aspectos de la dinámica de lluvias.

**PALABRAS CLAVES:** Hidrología, Tormentas extremas, Dinámica

## **INTRODUCCIÓN**

Para realizar el diseño de construcciones destinadas a conducir, contener o salvar cursos de agua (canales, acueductos, defensas, presas, puentes, alcantarillas), se utilizan crecidas de proyecto; las que deberían realizarse sobre series de datos históricos de caudal. Esta información es poco frecuente en la mayor parte del mundo por lo que el análisis se hace sobre las precipitaciones pluviales causantes del fenómeno. A partir de este análisis se obtienen lluvias de diseño que reflejan las exigencias a las que se verán sometidas las obras.

En este sentido, se evalúa la importancia del análisis de las precipitaciones, lo que involucra la recopilación de la mayor cantidad de información pluviométrica disponible para la región en estudio y su posterior sistematización, que incluye la generación de una base de datos con la cual realizar estudios que permitan conocer lo mejor posible las tormentas de la zona y definir de esta forma dimensiones de las tormentas, área, dirección mas frecuente del desplazamiento y muchos otros parámetros.

En este proyecto se realiza una clasificación de las tormentas extremas en el Gran San Miguel de Tucumán en base a sus características dinámicas. Esto se realiza partiendo de un análisis de frecuencias de los eventos registrados en 8 estaciones de medición pluviométrica, a lo largo de nueve años hidrológicos.

## **OBJETIVOS**

- Realizar una recopilación de datos pluviométricos provenientes de estaciones distribuidas en el área del Gran San Miguel de Tucumán.
- Sistematizar los datos pluviométricos y elaborar una base de datos que permita el posterior análisis de los mismos.
- Obtener una clasificación de las lluvias en la región en base a sus características dinámicas
- Obtener patrones de desplazamientos en las lluvias, que podrían ser usados en modelos de transformación precipitación escorrentía que tengan en cuenta aspectos de la dinámica de lluvias.

## **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El área en estudio de este proyecto es el área urbana del Gran San Miguel de Tucumán, está constituida por un espacio territorial conformado por una ciudad principal, San Miguel de Tucumán y un conjunto municipios y comunas colindantes que mantienen con ella intensas relaciones de interdependencia. Actualmente la población de este aglomerado alcanza los 700.000 hab. Abarca administrativamente las siguientes municipalidades: San Miguel de Tucumán, Yerba buena, Tafí viejo, Banda del Río Salí, Lules, Alderetes y Las Talitas y 14 Comunas rurales El Cadillal, Luisiana y La florida, Delfín Gallo, La Esperanza, Los Nogales, Cevil Redondo, Manantial, San Pablo y Villa Nougés, San Felipe y Santa bárbara, San Andrés, Lastenia y Colombres, y la vertiente oriental del cerro San Javier.

La inundabilidad de la región ha sido motivo de estudio de diversos proyectos donde se define que el riesgo de inundación puede ser pluvial o fluvial. Están originadas, entre otros motivos, por la intensidad y frecuencia de las precipitaciones en el período estival, que en esta época supera el 50 % de las precipitaciones anuales. Se genera con ello el desborde de los ríos y el anegamiento de aquellas zonas con poca capacidad de infiltración.

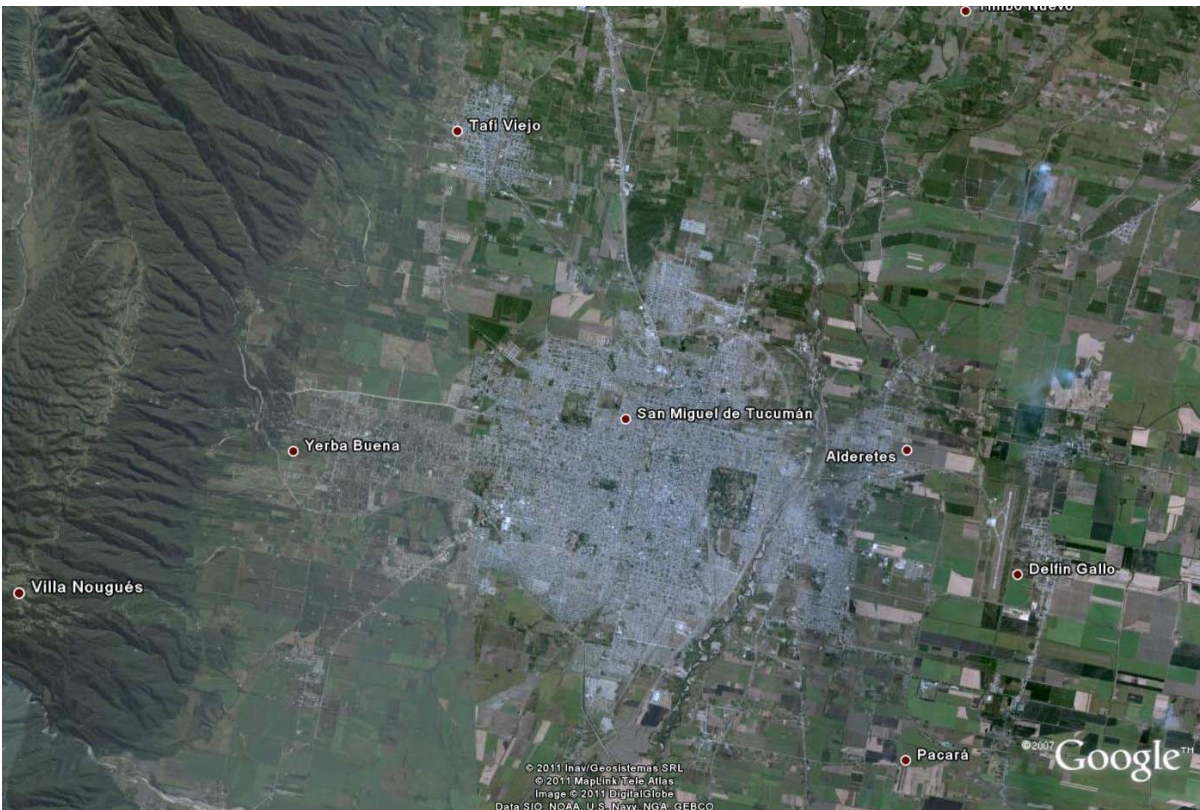


Figura 1.- Area Gran San Miguel de Tucumán

### **Morfología del terreno en el Gran S. M. de Tucumán.**

El Gran San Miguel de Tucumán se emplaza sobre un plano inclinado limitado al oeste por la Sierra de San Javier. Este plano inclinado tiene una variación de aproximadamente 300 m desde el cauce del río Salí al este (cota 410 msnm) hasta el pie de la Sierra de San Javier al este (cota 700 msnm). En esta última se produce una elevación del terreno desde su base (cota 700 msnm) hasta la cumbre (cota 1200 a 1700 msnm).

La pendiente principal del mencionado plano inclinado tiene dirección noroeste-sudeste encontrándose en el mismo la presencia de vaguadas con dirección norte sur. Estas en general son muy suaves y atraviesan la ciudad capital de norte a sur en toda su extensión.

### **El clima y régimen de lluvias del Gran S. M. de Tucumán.**

El clima de San Miguel de Tucumán es cálido subtropical con estación seca en invierno. Posee un régimen de lluvias de tipo monzónica, estacional y torrencial. Hay un período lluvioso y otro seco. Cada uno abarca un semestre. Inviernos y primaveras secas contrastan con veranos y otoños húmedos.

Las lluvias intensas se registran en su totalidad entre los meses de octubre y abril, concentrándose en su mayoría entre los meses de diciembre y marzo.

De acuerdo a Minetti (2005), existen diversos factores que poseen influencia en las características climáticas del Gran San Miguel de Tucumán, entre los factores determinantes, se menciona la depresión continental (BC) la cual tiene una gran importancia en los procesos de transporte-convergencia de humedad hacia el continente y la generación de precipitaciones en el NOA, mientras que otros factores de gran importancia regional son el calentamiento continental y el régimen estacional de presión atmosférica y precipitaciones.

La depresión continental atrae masas de aire cálido y húmedo del sur de Brasil donde se ubica un centro de altas presiones (Anticiclón del Atlántico Sur).

En la región estudiada las lluvias intensas se producen según los siguientes procesos:

- por convección local
- por el ingreso de frentes de aire frío con frecuente influencia de efectos orográficos.
- por combinación de ambos procesos (lluvias convectivas y de frente).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Red de Estaciones Pluviométricas**

Bajo un proyecto de investigaciones del Consejo de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Tucumán (CIUNT) y con apoyo del Laboratorio de Construcciones Hidráulicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología se puso en funcionamiento desde fines de Octubre del año 2000 una red de pluviómetros de registro continuo en el Área Metropolitana de San Miguel de Tucumán. La misma opera con siete estaciones adquiridas por el CIUNT, complementadas con una estación de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC - Organismo Provincial). La red cubre un área de aproximadamente 224 Km<sup>2</sup>, con una distancia entre las mismas que oscila entre 1,5 Km y 8,6 Km. Ello involucra los municipios de S.M. de Tucumán, Alderetes, Las Talitas, Los Nogales, Tafi Viejo y Yerba Buena. Cada lluvia intensa que precipita sobre el área cubierta por la red es registrada en forma simultánea por las ocho estaciones, con lo que se obtiene la evolución temporal de las mismas en la ubicación de cada una de las estaciones. Los registros provenientes de las estaciones del LCH son de tipo electrónico y se obtienen según una discretización temporal de 5 minutos, cuidando que las estaciones tengan sus relojes sincronizados. Esto último se controla semanalmente, con lo cual se logra que no se supere en ningún caso diferencias superiores al minuto entre los relojes de cada estación. Los pluviómetros de estas estaciones son de tipo a cangilón, con vuelcos equivalentes a 0,2 mm de precipitación, de manera que el menor incremento que se registra es igual a este valor.

Los datos provenientes de la estación pertenecientes a la EEAOC se almacenan también en forma electrónica pero con una discretización temporal de 15 minutos. El pluviómetro es de tipo a cangilón, con vuelcos equivalentes a 0,2 mm de precipitación, de manera que el menor incremento que se registra es igual a este valor.

En la Figura 2 se muestran la ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas para este proyecto

### **Software utilizado en la generación de la base de datos**

Se utilizó el programa Microsoft SQL Server 2000, que sirvió de plataforma de bases de datos.

La base de datos se generó a partir de un software de análisis geoestadístico que permite el análisis y correlación de datos de precipitaciones de distintas estaciones llamado Sistema de registro pluviométrico

Para la generación de la base de datos, se define en primer lugar cada una de las estaciones indicando para cada una de ellas su número, denominación, formato, zona, latitud, longitud coordenadas geodésicas, etc.

Luego se agrega los archivos que contienen los datos de precipitación provenientes de cada una de las estaciones ordenados según su año. Durante todo el proceso, se tiene acceso a los archivos incorporados, lo que permite controlarlos y modificarlos.

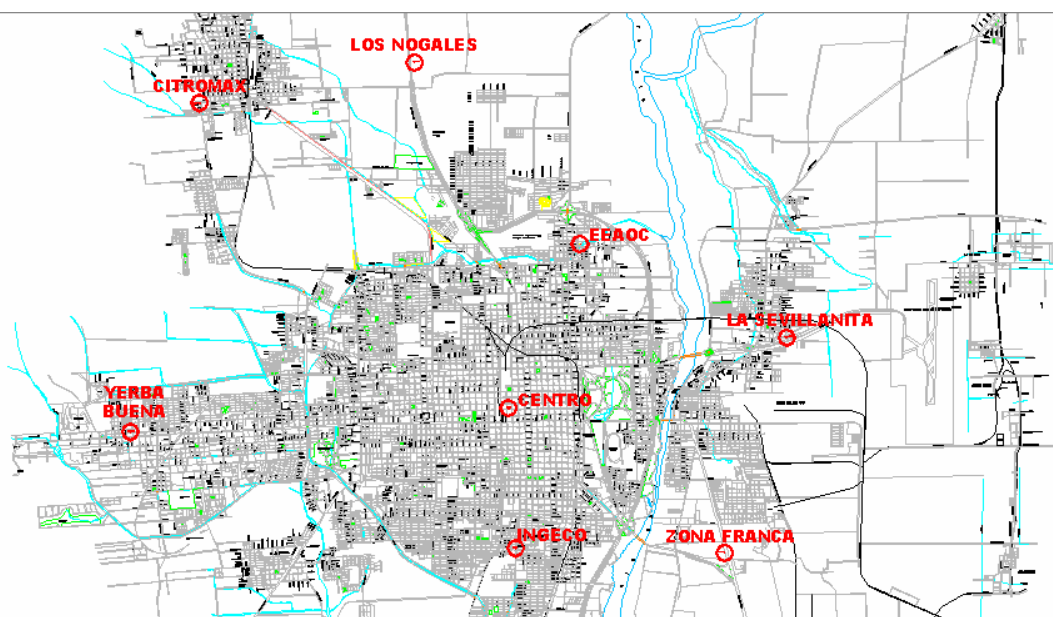


Figura 2.- Ubicación de las Estaciones Pluviométricas

### Procesado de la base de datos

Se procesaron todas las estaciones en conjunto ocurridas en los años hidrológicos comprendidos entre septiembre de 2000 hasta agosto de 2009. Se contempló un intervalo máximo de 180 minutos y una duración mínima de 10 minutos.

Se obtuvo un listado de 1498 eventos. Esta extensa lista de precipitaciones incluye eventos que son despreciables para el análisis por lo que es importante la realización de un filtrado que dejará como resultado las lluvias importantes a considerar para su estudio.

Para realizar el filtrado se define en primer lugar las duraciones de lluvias que interesan para el análisis. El concepto de duración es el de un intervalo de tiempo dentro de la duración total real de una lluvia en el cual se produce un valor de intensidad extremo. Las duraciones seleccionadas para el análisis son: 10 min., 30 min., 60 min., 90 min., 120 min., 150 min., y 180 min. El valor máximo de duración a estudiar se adoptó atendiendo a la caracterización de la duración total de lluvias en San Miguel de Tucumán que se obtuvo a partir de un análisis de frecuencia de la duración de eventos de gran intensidad seleccionados de la Estación Aeropuerto S.M. de Tucumán, (período 1960-1981). Lazarte Sfer (2001)

En el mismo se indica que:

- El 90% de las lluvias intensas analizadas tiene duraciones inferiores a 90 min.
- Los mayores valores de frecuencia se ubican en una meseta con duraciones entre los 25 y 60 minutos.
- El 100% de las lluvias analizadas tiene duraciones inferiores a 180 min.
- Lazarte Sfer (2008)

El programa compara los datos de intensidad de precipitación para cada una de las duraciones fijadas por los multiplicadores descriptos anteriormente correspondientes a cada una de las tormentas analizadas con una curva definida por la IDR de la región en estudio.

Esta curva viene dada por la expresión

$$y = r \left( \frac{x}{a + b \cdot c - c \cdot x^2} \right) \quad [1]$$

donde:

y=intensidad

x=duración

r depende de la recurrencia adoptada

a, b y c son parámetros obtenidos mediante regresión.

Se utilizan como parámetros de la función los correspondientes a la regresión de la IDR actualizada para San Miguel de Tucumán (Paz 1994).

Para este proyecto no se utilizó una recurrencia fija, si no que se buscó que el número de eventos seleccionados para cada año no fuera mayor a 15. Esto llevó a tomar diferentes valores de recurrencia que oscilaban entre 1 y 2 años.

Si la intensidad de precipitación sobrepasa el valor dado por la IDR, para cualquiera de las duraciones, entonces la considera para el análisis, en caso contrario la descarta.

Una vez obtenido el resultado del filtrado, se eliminaron algunos eventos por considerarlos despreciables o por que se trataban de un error de medición.

Para este proyecto se obtuvo el listado que se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1.-** Eventos seleccionados para el análisis.

AÑO 2000 – 2001				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
1	10/11/2000	20:30:00	11/11/2000	0:00:00
2	28/11/2000	14:55:00	29/11/2000	10:45:00
3	14/12/2000	17:35:00	14/12/2000	19:10:00
4	04/01/2001	21:25:00	05/01/2001	3:30:00
5	10/01/2001	10:10:00	10/01/2001	20:05:00
6	15/01/2001	17:55:00	15/01/2001	20:45:00
7	22/01/2001	17:40:00	23/01/2001	0:55:00
8	12/02/2001	0:00:00	12/02/2001	13:15:00
9	15/02/2001	14:15:00	15/02/2001	17:00:00
10	25/02/2001	1:45:00	25/02/2001	7:25:00
11	25/02/2001	18:30:00	25/02/2001	22:50:00
12	04/03/2001	23:00:00	05/03/2001	3:00:00
13	18/03/2001	21:15:00	19/03/2001	9:45:00
14	14/04/2001	17:25:00	15/04/2001	13:45:00
AÑO 2001 – 2002				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
1	11/09/2001	11:55:00	11/09/2001	13:00:00
2	12/09/2001	12:10:00	12/09/2001	13:00:00
3	12/12/2001	12:10:00	12/12/2001	14:15:00
4	16/02/2002	12:00:00	16/02/2002	12:40:00
5	28/02/2002	16:30:00	01/03/2002	6:50:00



**Tabla 1.- Eventos seleccionados para el análisis (continuación).**

AÑO 2002 – 2003				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
1	20/11/2002	10:50:00	20/11/2002	14:05:00
2	17/01/2003	23:15:00	18/01/2003	13:00:00
3	04/02/2003	21:00:00	05/02/2003	2:45:00
4	28/02/2003	21:50:00	01/03/2003	1:50:00
5	11/03/2003	9:05:00	11/03/2003	10:10:00
6	21/01/2003	7:15:00	21/01/2003	12:15:00
AÑO 2003 – 2004				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
1	15/12/2003	9:05:00	16/12/2003	7:35:00
2	27/12/2003	10:55:00	27/12/2003	14:25:00
3	23/01/2004	3:00:00	23/01/2004	11:45:00
AÑO 2004 – 2005				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
1	26/11/2004	19:45:00	27/11/2004	10:30:00
2	08/12/2004	2:10:00	08/12/2004	15:05:00
3	16/12/2004	0:35:00	16/12/2004	10:40:00
4	01/01/2005	19:50:00	02/01/2005	1:15:00
5	09/01/2005	16:10:00	10/01/2005	5:35:00
6	09/02/2005	17:00:00	09/02/2005	19:25:00
7	28/02/2005	9:55:00	28/02/2005	14:55:00
AÑO 2005 – 2006				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
1	02/01/2006	18:35:00	03/01/2006	8:25:00
2	12/01/2006	23:25:00	13/01/2006	11:20:00
3	16/01/2006	7:45:00	16/01/2006	18:30:00
4	07/02/2006	20:40:00	08/02/2006	12:50:00
5	25/04/2006	18:35:00	25/04/2006	23:45:00
6	29/04/2006	15:30:00	29/04/2006	19:25:00
AÑO 2006 – 2007				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
1	10/01/2007	21:35:00	11/01/2007	10:00:00
2	31/01/2007	20:40:00	01/02/2007	2:55:00
3	09/03/2007	4:35:00	10/03/2007	9:15:00
4	14/03/2007	16:50:00	15/03/2007	4:30:00
AÑO 2007 – 2008				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
1	05/10/2007	23:45:00	06/10/2007	20:15:00
2	19/11/2007	1:40:00	19/11/2007	10:45:00
3	02/12/2007	3:00:00	02/12/2007	9:05:00
4	10/12/2007	16:40:00	10/12/2007	18:15:00
5	23/12/2007	23:25:00	24/12/2007	9:05:00
6	03/01/2008	16:55:00	04/01/2008	5:20:00
7	30/01/2008	6:55:00	30/01/2008	10:30:00
8	10/02/2008	5:15:00	10/02/2008	9:15:00
9	16/02/2008	23:50:00	17/02/2008	3:00:00
10	18/02/2008	18:35:00	19/02/2008	4:25:00
11	20/02/2008	17:05:00	20/02/2008	23:50:00
12	21/02/2008	17:55:00	22/02/2008	2:30:00
13	05/03/2008	23:10:00	06/03/2008	5:25:00
14	06/03/2008	0:25:00	06/03/2008	5:25:00
15	22/03/2008	8:50:00	23/03/2008	11:20:00
16	27/03/2008	16:20:00	30/03/2008	10:20:00

**Tabla 1.- Eventos seleccionados para el análisis (continuación).**

AÑO 2008-2009				
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin
2	16/09/2008	19:15:00	16/09/2008	19:25:00
3	18/09/2008	15:20:00	18/09/2008	15:30:00
4	05/11/2008	20:30:00	06/11/2008	2:55:00
5	26/11/2008	17:15:00	26/11/2008	18:50:00
6	28/11/2008	18:15:00	29/11/2008	13:25:00
7	10/12/2008	6:40:00	10/12/2008	13:00:00
8	21/12/2008	16:40:00	22/12/2008	12:20:00

## ANÁLISIS DINÁMICO DE LLUVIAS

Para la realización de un análisis hidrológico es necesario admitir que la casualidad o el azar forman parte de su naturaleza por lo que se pueden interpretar y explicar solo en sentido probabilístico.

Por necesidad o conveniencia, la mayoría de los procesos hidrológicos se pueden interpretar y explicar solo en sentido probabilística, lo cual produce una dificultad básica en la programación de las actividades humanas, ya que están vinculadas a sus efectos. Esto es especialmente serio en diseño y planeamiento de obras hidráulicas siempre relacionadas con eventos hidrológicos futuros.

Es por esto que se habrá de recurrir a la probabilidad y a la estadística, disciplinas que establecen elementos para la aleatoriedad, ya que proveen vías para sintetizar los datos observados a información precisa y significativa, para determinar las características subyacentes del fenómeno observado y para hacer predicciones sobre su comportamiento futuro. Camaño Nelli, Dasso (2003)

Una vez seleccionados los eventos, se comienza el análisis determinando en cada una de las precipitaciones el período temporal con mayor intensidad. Esto es así porque el programa incluye dentro del evento un período demasiado extenso en el que se observa que la altura de lámina no es considerable a los fines de este trabajo.

En ciertos eventos es notable el período con mayor intensidad, en el que se observa la presencia de picos al graficar su correspondiente hietograma incremental. En otros eventos, no es tan evidente la definición de esta intensidad predominante, el hietograma presenta la existencia de máximos seguidos por zonas de escasa a nula precipitación, de donde surgen nuevos picos en la altura de lámina.

Se conoce las coordenadas geodésicas de cada una de las estaciones, lo que facilita su ubicación en un plano de la zona de estudio que se puede ver en la Figura 2.

Para el análisis dinámico se recurre a la observación de los desplazamientos de los picos de intensidad a través de las diferentes estaciones pluviométricas, que se manifiestan a lo largo de sus registros. Se esquematiza los desplazamientos de los picos de los eventos seleccionados a través de las estaciones ya ubicadas según sus coordenadas en un plano.

Para cada uno de estos eventos se grafica en un plano, marcando la ubicación de la estación que haya registrado la intensidad máxima cada 5 minutos, que es la discretización temporal con la que se contaba para cada una de las estaciones. A medida que se suceden las diferentes posiciones de estos máximos es posible distinguir las diferentes trayectorias que estos recorren.

Se observa mediante este análisis múltiples situaciones, que se pueden agrupar en cuatro categorías descriptivas:

- Sin desplazamiento: la precipitación máxima se registra siempre en la misma estación, es decir que esta no sufre desplazamiento alguno.
- Desplazamiento aleatorio: Los diferentes picos de intensidad se suceden unos a otros sin que sea posible definir trayectoria alguna.
- Trayectoria definida: Se puede distinguir claramente un sentido de avance de la precipitación.
- Sin categoría: existen precipitaciones que no pueden ser enmarcadas dentro de ninguna de estas categorías por tener alguna característica especial que dificultan su análisis con los datos con que se cuenta.

Para el análisis realizado en este proyecto se define como variable discreta el número de ocurrencias de cada categoría (puntual, desplazamiento aleatorio, trayectoria definida y sin categoría) que se asigna a cada uno de los eventos seleccionados. Es una variable discreta porque solo puede tomar valores enteros.

A partir de los esquemas correspondientes a cada uno de los eventos se arriba al resultado que se detalla en la Tabla 2:

**Tabla 2.- Resultados de la clasificación de eventos**

AÑO 2000 – 2001					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	RESULTADO
1	10/11/2000	20:30:00	11/11/2000	0:00:00	TRAYECTORIA
2	28/11/2000	14:55:00	29/11/2000	10:45:00	ALEATORIO
3	14/12/2000	17:35:00	14/12/2000	19:10:00	TRAYECTORIA
4	04/01/2001	21:25:00	05/01/2001	3:30:00	ALEATORIO
5	10/01/2001	10:10:00	10/01/2001	20:05:00	ALEATORIO
6	15/01/2001	17:55:00	15/01/2001	20:45:00	PUNTUAL
7	22/01/2001	17:40:00	23/01/2001	0:55:00	ALEATORIO
8	12/02/2001	0:00:00	12/02/2001	13:15:00	ALEATORIO
9	15/02/2001	14:15:00	15/02/2001	17:00:00	ALEATORIO
10	25/02/2001	1:45:00	25/02/2001	7:25:00	ALEATORIO
11	25/02/2001	18:30:00	25/02/2001	22:50:00	ALEATORIO
12	04/03/2001	23:00:00	05/03/2001	3:00:00	ALEATORIO
13	18/03/2001	21:15:00	19/03/2001	9:45:00	TRAYECTORIA
14	14/04/2001	17:25:00	15/04/2001	13:45:00	TRAYECTORIA
AÑO 2001 – 2002					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	
1	11/09/2001	11:55:00	11/09/2001	13:00:00	PUNTUAL
2	12/09/2001	12:10:00	12/09/2001	13:00:00	PUNTUAL
3	12/12/2001	12:10:00	12/12/2001	14:15:00	ALEATORIO
4	16/02/2002	12:00:00	16/02/2002	12:40:00	PUNTUAL
5	28/02/2002	16:30:00	01/03/2002	6:50:00	ALEATORIO
AÑO 2002 – 2003					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	
1	20/11/2002	10:50:00	20/11/2002	14:05:00	PUNTUAL
2	17/01/2003	23:15:00	18/01/2003	13:00:00	ALEATORIO
3	21/01/2003	7:15:00	21/01/2003	12:15:00	TRAYECTORIA
4	04/02/2003	21:00:00	05/02/2003	2:45:00	TRAYECTORIA
5	28/02/2003	21:50:00	01/03/2003	1:50:00	ALEATORIO
6	11/03/2003	9:05:00	11/03/2003	10:10:00	TRAYECTORIA

**Tabla 2.- Resultados de la clasificación de eventos (continuación)**

AÑO 2003 – 2004					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	
1	02/12/2003	23:55:00	04/12/2003	23:50:00	ALEATORIO
2	27/12/2003	10:55:00	27/12/2003	14:25:00	ALEATORIO
3	23/01/2004	3:00:00	23/01/2004	11:45:00	PUNTUAL
AÑO 2004 – 2005					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	
1	26/11/2004	19:45:00	27/11/2004	10:30:00	ALEATORIO
2	08/12/2004	2:10:00	08/12/2004	15:05:00	ESPECIAL
3	16/12/2004	0:35:00	16/12/2004	10:40:00	TRAYECTORIA
4	01/01/2005	19:50:00	02/01/2005	1:15:00	ALEATORIO
5	09/01/2005	16:10:00	10/01/2005	5:35:00	ALEATORIO
6	09/02/2005	17:00:00	09/02/2005	19:25:00	TRAYECTORIA
7	28/02/2005	9:55:00	28/02/2005	14:55:00	ALEATORIO
AÑO 2005 – 2006					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	
1	02/01/2006	18:35:00	03/01/2006	8:25:00	ALEATORIO
2	12/01/2006	23:25:00	13/01/2006	11:20:00	ESPECIAL
3	16/01/2006	7:45:00	16/01/2006	18:30:00	ALEATORIO
4	07/02/2006	20:40:00	08/02/2006	12:50:00	ALEATORIO
5	25/04/2006	18:35:00	25/04/2006	23:45:00	TRAYECTORIA
6	29/04/2006	15:30:00	29/04/2006	19:25:00	TRAYECTORIA
AÑO 2006 – 2007					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	
1	10/01/2007	21:35:00	11/01/2007	10:00:00	ALEATORIO
2	31/01/2007	20:40:00	01/02/2007	2:55:00	TRAYECTORIA
3	09/03/2007	4:35:00	10/03/2007	9:15:00	ALEATORIO
4	14/03/2007	16:50:00	15/03/2007	4:30:00	TRAYECTORIA
AÑO 2007 – 2008					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	
1	05/10/2007	23:45:00	06/10/2007	20:15:00	TRAYECTORIA
2	19/11/2007	1:40:00	19/11/2007	10:45:00	TRAYECTORIA
3	02/12/2007	3:00:00	02/12/2007	9:05:00	ALEATORIO
4	10/12/2007	16:40:00	10/12/2007	18:15:00	TRAYECTORIA
5	23/12/2007	23:25:00	24/12/2007	9:05:00	ALEATORIO
6	03/01/2008	16:55:00	04/01/2008	5:20:00	ALEATORIO
7	30/01/2008	6:55:00	30/01/2008	10:30:00	TRAYECTORIA
8	10/02/2008	5:15:00	10/02/2008	9:15:00	ALEATORIO
9	16/02/2008	23:50:00	17/02/2008	3:00:00	PUNTUAL
10	18/02/2008	18:35:00	19/02/2008	4:25:00	TRAYECTORIA
11	20/02/2008	17:05:00	20/02/2008	23:50:00	TRAYECTORIA
12	21/02/2008	17:55:00	22/02/2008	2:30:00	TRAYECTORIA
13	06/03/2008	0:25:00	06/03/2008	5:25:00	TRAYECTORIA
14	22/03/2008	8:50:00	23/03/2008	11:20:00	ALEATORIO
15	27/03/2008	16:20:00	30/03/2008	10:20:00	ALEATORIO
AÑO 2008 – 2009					
	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	
1	15/09/2008	19:00:00	15/09/2008	19:20:00	PUNTUAL
2	16/09/2008	19:15:00	16/09/2008	19:25:00	PUNTUAL
3	18/09/2008	15:20:00	18/09/2008	15:30:00	PUNTUAL
4	05/11/2008	20:30:00	06/11/2008	2:55:00	PUNTUAL
5	26/11/2008	17:15:00	26/11/2008	18:50:00	ESPECIAL
6	28/11/2008	18:15:00	29/11/2008	13:25:00	ALEATORIO
7	10/12/2008	6:40:00	10/12/2008	13:00:00	ALEATORIO
8	21/12/2008	16:40:00	22/12/2008	12:20:00	ALEATORIO

## RESULTADOS

A partir de los esquemas correspondientes a cada uno de los eventos se puede observar que de el total de la muestra (63 precipitaciones), 34 eventos tienen un desplazamiento aleatorio, 19 tienen una trayectoria definida y 7 constituyen precipitaciones puntuales.

En cuanto a la intensidad de lluvia que presentaron estas tormentas se observa en aquellas que presentan una trayectoria definida, la máxima precipitación registrada es de 21,8 mm en 5 minutos.

El promedio obtenido considerando el total de los eventos de esta categoría es de 12,6 mm para la misma duración. Los valores análogos para las precipitaciones que presentan un desplazamiento aleatorio, registran una máxima precipitación registrada es de 15,8mm para una duración de 5 minutos y el promedio obtenido es de 10,7mm. Por ultimo, las precipitaciones sin desplazamiento presentan una máxima intensidad de 32,6 mm y un promedio de 17,2mm siendo este el mayor de los valores obtenidos.

Otro aspecto a tener en cuenta es la dirección y sentido que posee la trayectoria de aquellas lluvias que poseen una trayectoria definida. En este sentido se analiza cuales son las trayectorias que describen los eventos y cual es la orientación predominante.

Se distinguen entre las trayectorias predominantes, aquellas que tienen un desplazamiento traslacional en el sentido de las aguas del reloj, este grupo representa un 31,58% del total de eventos con trayectoria definida. Otra trayectoria que manifiestan es aquella donde las tormentas presentan un desplazamiento donde la componente principal es de sur a norte y representan el 47,37% de los casos analizados. Se puede estimar que las lluvias que presentan esta trayectoria son lluvias frontales con influencia de factores orogénicos, y se producirían por el ingreso al comienzo de la estación cálida de una masa de aire cálido y húmedo originada en el Anticiclón del océano Atlántico, atraída por la presencia de la depresión continental presente en la región en esa misma temporada. Los vientos ingresan en la región desde el este y sur este, debido a la gran exposición que existe en esta dirección, y al chocar con los relieves serranos, se ven obligados a ascender sufriendo un enfriamiento que provoca la condensación y posterior precipitación. Por ultimo, se observan algunos casos donde se puede ver un desplazamiento contrario al de las agujas del reloj que representan un 21,05%.

Se calcula la velocidad promedio con la que se desplazan estas tormentas tomando la distancia total recorrida desde el instante en que comienza la lluvia hasta el instante donde finaliza, incluyendo aquellos periodos temporales donde no se observaron desplazamientos en la tormenta. El rango de velocidades obtenidos es muy amplio, variando estos valores entre un máximo de 2599,1 m/5min y un mínimo de 188,2 m/5min.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó una recopilación de datos pluviométricos provenientes de 8 estaciones de medición distribuidas en el área del Gran San Miguel de Tucumán.

Se sistematizaron los datos pluviométricos y se elaboró una base de datos que abarca 9 años hidrológicos. Con esta información se puede realizar otros estudios además del expuesto en el presente proyecto.

El software utilizado fue muy útil, aunque solo sirvió para el tratamiento parcial de los datos, o sea para la generación de la base de datos y su posterior filtrado.

La metodología utilizada permitió obtener una clasificación de las lluvias en la región en base a sus características dinámicas y no fue utilizada nunca en esta área de estudio por lo que también se la considera como un aporte al conocimiento.

En cuanto a la aplicabilidad del resultado se considera que la información obtenida a cerca de la dinámica de las lluvias en la región aportaría elementos mas sofisticados para definir lluvias de diseño que podrían ser usados en modelos de transformación precipitación caudal que tengan en cuenta la dinámica de lluvias.

El análisis de los resultados se realizó teniendo siempre presente que los mismos se obtuvieron en base al estudio de solo 63 eventos registrados en nueve años hidrológicos. Ello obliga a indicar que con dichos resultados se marca solo una tendencia.

Se observa que la mayor parte de los eventos no presentan una trayectoria definida. El grupo que presenta una trayectoria definida representa solo un 29,41% del total analizado. La mayor parte de los eventos tienen un desplazamiento aleatorio representando estos el 50% de las tormentas.

Se recomienda para realizar una mejor caracterización de las tormentas extremas contar con datos relativos a la temperatura, presión atmosférica y fotos satelitales de los días pluviométricos, así como en los días previos y posteriores al mismo, que harían posible encuadrar a cada evento dentro de una clasificación dada por su génesis que no es posible realizar solo con los datos de pluviometría.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Camaño Nelli, G.; C. M. Dasso** (2003) *Lluvias de Diseño. Conceptos, técnicas y experiencias*. Universitas. Editorial Científica de Universitaria. Córdoba, Argentina
- Chow, Ven Te; D. R. Maidment y L. W. Mays** (1994) *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Lazarte Sfer, R. R.** (2001) "Distribución Temporal para Lluvias De Diseño En el Gran San Miguel de Tucumán". *Congreso Nacional del Agua 2002*. Mendoza, Argentina.
- Mijares, F. J. A.** (1994) *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa-Wiley, México.
- Minetti, J. L.** (2005) *El clima del Noroeste Argentino (LCS)*. Magna. Tucumán, Argentina.
- Paz, H. R. y R.R. Lazarte Sfer** (1994) "Actualización de la relación I-D-R de precipitaciones para la ciudad de S. M. de Tucumán – Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres". *Congreso Nacional del Agua 2002*. Mendoza, Argentina.

## VARIABILIDAD DE EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN PUNTUAL POR EFECTOS OROGRÁFICOS EN EL GRAN S. M. DE TUCUMÁN

***Roberto Ricardo Lazarte Sfer y Hugo Roger Paz***

*Laboratorio de Construcciones Hidráulicas – Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.*

*rlazartesfer@herrera.unt.edu.ar, hpaz@herrera.unt.edu.ar*

**RESUMEN:** En el caso del área del Gran San Miguel de Tucumán se obtiene la lámina de lluvia puntual a partir de la relación Intensidad-Duración-Recurrencia desarrollada con registros pluviográficos y pluviométricos de la estación meteorológica El Colmenar (EEAOC). Se utiliza dicha I-D-R pues aporta la serie mas larga de registros (1942-1993). Es necesario evaluar si los extremos históricos de El Colmenar son representativos para todo el Gran San Miguel de Tucumán. En particular interesa determinar si existen variaciones importantes con origen en los efectos producidos por la fuerte variación de altura dentro del ámbito de la ciudad y la presencia de una barrera orográfica contigua a la misma como es la sierra de San Javier. El Laboratorio de Construcciones Hidráulicas de la U.N.T. puso en funcionamiento en el año 2000 una red pluviométrica automática en el área del Gran S.M. de Tucumán. Esta abarca unos 224 km<sup>2</sup> de extensión urbana y periurbana y utiliza estaciones pluviométricas de registro continuo automático digital. Con la información registrada por la red se obtuvo series anuales de extremos de precipitación en cada posición de medición y una serie anual correspondiente al conjunto de datos de la red. Se determinaron coeficientes para cada posición de la red como el cociente entre los valores que surgen de las distribuciones ajustadas para cada posición y las del conjunto de datos de la red. Con los coeficientes citados se construyeron mapas de isolíneas en el área del Gran San Miguel de Tucumán que mostraron fuertes efectos orográficos sobre los extremos de precipitación. Ello indica la necesidad de corregir la precipitación puntual obtenida de la relación I-D-R de El Colmenar atendiendo a la posición de los límites de las cuencas modeladas en la ciudad. El desarrollo de mapas de isolíneas permite determinar valores de precipitación puntual en cualquier posición del Gran San Miguel de Tucumán en base a la relación I-D-R de El Colmenar. El resultado del presente proyecto será una herramienta fundamental de diseño hidrológico para el Gran San Miguel de Tucumán, aplicable a todos los proyectos de ingeniería que impliquen la aplicación de modelos precipitación-caudal.

**PALABRAS CLAVE:** precipitación puntual, efectos orográficos, variabilidad espacial

## INTRODUCCION

La relación Intensidad-Duración-Recurrencia que se utiliza para la obtención de las lluvias de diseño en el Gran San Miguel de Tucumán fue desarrollada con registros pluviográficos y pluviométricos de la estación meteorológica El Colmenar (EEAOC). Se utiliza dicha I-D-R pues aporta la serie mas larga de registros (1942-1993).

El área bajo estudio, es decir la ciudad de S. M. de Tucumán y sus ciudades satélites se emplaza sobre un plano inclinado limitado al oeste por la Sierra de San Javier que introduce un fuerte efecto orográfico en la génesis de las lluvias locales. Ello hace necesario estudiar la variabilidad de los extremos de precipitación puntuales asociados a las duraciones consideradas en las lluvias de diseño.

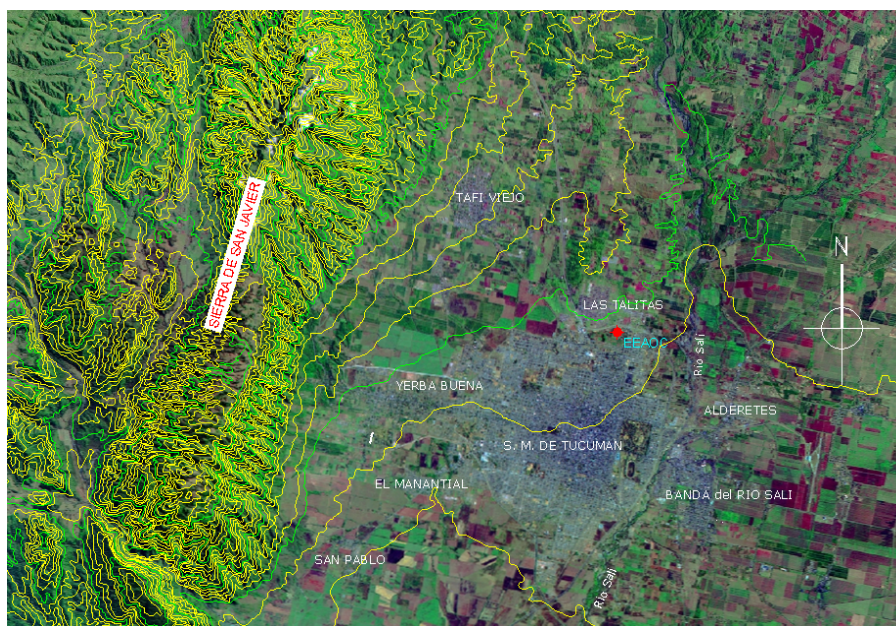
La existencia de una red pluviométrica en el Gran S. M. de Tucumán con 13 posiciones de medición funcionando desde el año 2000, permite realizar un estudio estadístico para cada posición y del conjunto de la red. Ello posibilita determinar relaciones entre las posiciones de medición que exponen la variabilidad geográfica de los extremos puntuales. Estas relaciones permitirán la transposición de la I-D-R de El Colmenar a cualquier posición en el Gran S. M. de Tucumán.

## CARACTERISTICAS GEOMORFOLOGICAS Y CLIMATICAS DE LA CIUDAD

### La morfología del terreno en el Gran S. M. de Tucumán

El área bajo estudio, es decir la ciudad de S. M. de Tucumán y sus ciudades satélites se emplaza sobre un plano inclinado limitado al oeste por la Sierra de San Javier. Este plano inclinado tiene una variación de aproximadamente 300 m desde el cauce del río Salí al este (cota 410 msnm) hasta el pie de la Sierra de San Javier al este (cota 700 msnm) . En esta última se produce una elevación del terreno desde su base (cota 700 msnm) hasta la cumbre (cota 1200 a 1700 msnm).

La pendiente principal del mencionado plano inclinado tiene dirección noroeste-sudeste encontrándose en el mismo la presencia de vaguadas con dirección norte sur. Estas en general son muy suaves y atraviesan la ciudad capital de norte a sur en toda su extensión. La más importante por ser la de mayor profundidad es la que coincide con el denominado Bajo Hondo y se ubica en el sector oeste de la Ciudad Capital muy cerca de los límites con la ciudad de Yerba Buena.



**Figura 1.** Geomorfología Gran S. M. de Tucumán.



## El clima y régimen de lluvias del Gran S. M. de Tucumán

El clima de San Miguel de Tucumán es cálido subtropical con estación seca en invierno. Posee un régimen de lluvias de tipo monzónico, estacional y torrencial. Hay un período lluvioso y otro seco. Cada uno abarca un semestre. Inviernos y primaveras secas contrastan con veranos y otoños húmedos. Durante los meses de octubre a abril se concentra más del 90% de la precipitación anual, la cual usualmente supera los 1000 mm. En Tabla 1 se exponen en su valor normal las variables meteorológicas de mayor relevancia con su variación estacional para el período 1981–1990 medidas en la estación meteorológica del actual emplazamiento del Aeropuerto Benjamín Matienzo.

Las lluvias intensas se registran en su totalidad entre los meses de octubre y abril, concentrándose en su mayoría entre los meses de diciembre y marzo.

**Tabla 1.** Valores normales para S.M. de Tucumán.

Mes	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)	Viento medio (km/h)	Número de días con			Precipitación mensual (mm)
	Máxima media	Media	Mínima media			Cielo claro	Cielo cubierto	Precipitación	
<b>E</b>	31.3	25.3	20.2	75	9.2	4	13	15	196.2
<b>F</b>	30.2	24.2	19.2	77	9.5	2	11	12	158.1
<b>M</b>	27.7	22.2	18.0	83	7.4	5	15	14	161.0
<b>A</b>	24.4	19.1	15.1	84	6.2	4	15	10	67.2
<b>M</b>	21.2	15.5	11.0	81	5.8	8	13	6	14.7
<b>J</b>	18.2	12.2	7.6	80	5.8	9	12	5	14.0
<b>J</b>	19.1	12.1	6.8	74	6.6	12	10	4	11.4
<b>A</b>	22.5	14.7	8.6	66	7.6	12	9	3	12.4
<b>S</b>	24.5	17.1	10.6	63	9.1	11	10	4	13.3
<b>O</b>	29.0	21.6	15.1	62	9.4	9	11	6	47.8
<b>N</b>	29.6	23.2	17.5	70	9.5	5	12	12	69.8
<b>D</b>	30.6	24.9	19.4	73	9.0	4	11	12	200.4

### Características de las lluvias intensas locales

La estacionalidad de las lluvias intensas obedece a la ubicación en el noroeste argentino durante los meses más cálidos de un centro de baja presión atmosférica que atrae masas de aire cálido y húmedo del sur de Brasil donde se ubica un centro de altas presiones (Anticiclón del Atlántico Sur). Con la presencia de esta masa de aire cálido y húmedo las lluvias intensas se producen según los siguientes procesos: por convección local, por el ingreso de frentes de aire frío con frecuente influencia de efectos orográficos, por combinación de ambos procesos (lluvias convectivas y de frente).

### LA RED PLUVIOMETRICA

El Laboratorio de Construcciones Hidráulicas (LCH) de la Universidad Nacional de Tucumán (U.N.T.), puso en funcionamiento desde fines de Octubre del año 2000 una red de pluviómetros de registro continuo en el Área Metropolitana de San Miguel de Tucumán. La misma opera con siete estaciones propiedad del LCH, complementadas con cuatro estaciones del Instituto de Estudios Geográficos (IEG) de la Facultad de Filosofía y Letras de la U.N.T., una estación de la Facultad de Agronomía y Zootecnia (FayZ) de la U.N.T. y una estación de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC - Organismo Provincial). Algunas de las estaciones mencionadas no se encuentran ya en funcionamiento, razón por la cual la red actualmente registra con solo siete estaciones.

Las red cubre un área de aproximadamente 200 Km<sup>2</sup>, con una distancia entre las mismas que oscila entre 1,5 Km y 8,6 Km. Ello involucra los municipios de S.M. de Tucumán, Alderetes, Las Talitas, Los Nogales, Tafi Viejo y Yerba Buena. Cada lluvia intensa que precipita sobre el área cubierta por la red es registrada en forma simultánea por las estaciones que la componen, con lo que se obtiene la evolución temporal de las mismas en la ubicación de cada una de las estaciones. Las estaciones que se encuentran actualmente funcionando son, Adler, Citromax, EEAOC, Flia Cuozzo, La Sevillanita, El Manantial e Ingeco.

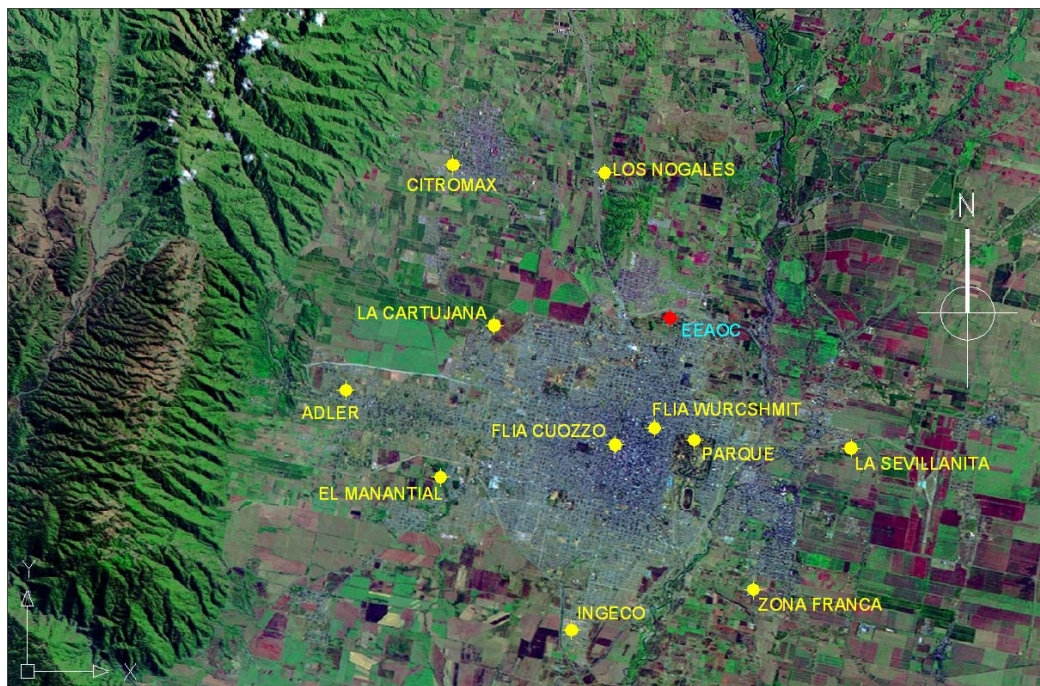


Figura 2. Red Pluviométrica Gran S. M. de Tucumán.

## PROCEDIMIENTO DE ANALISIS

Debido a las limitaciones de extensión del presente documento se expondrá a continuación la metodología del estudio realizado en forma sintética, presentando los elementos de mayor trascendencia en cada etapa, que permitieron el avance hasta su estado actual.

### Obtención de las series anuales

El procedimiento que se siguió es el correspondiente al de obtención de una relación I-D-R con la información registrada por la red pluviométrica. Ello se hizo para siete posiciones de medición, la correspondiente a El Colmenar más otras seis posiciones dentro del Gran San Miguel de Tucumán.

Tabla 2. Ubicación geográfica de estaciones pluviométricas.

ESTACION		LATITUD	LONGITUD	X [m]	Y [m]	COTA [msnm]
Nº Id	Denominación					
1	EEAOC	-26° 47' 16,5"	- 65° 11' 41,0"	7.037.791	3.580.159	507
3	Adler	-26° 48' 37,9"	- 65° 18' 18,5"	7.035.350	3.569.164	535
4	La Sevillanita	-26° 49' 23,7"	- 65° 07' 58,6"	7.033.835	3.586.276	443
5	Ingeco	-26° 53' 0,3"	- 65° 13' 39,7"	7.027.229	3.576.815	428
6	Zona Franca	-26° 52' 14,8"	- 65° 09' 56,9"	7.028.590	3.582.974	446.5
8	Citromax	-26° 44' 29,5"	- 65° 16' 08,5"	7.042.976	3.572.798	626
10	Cuozzo	-26° 49' 36,1"	- 65° 12' 47,5"	7.033.505	3.578.295	468

El concepto de duración de lluvia sigue el concepto definido en el procedimiento usual para obtener la relación Intensidad-Duración-Recurrencia, es decir que es un intervalo de tiempo dentro de la duración total real de una lluvia en el cual se produce un valor de intensidad extremo. Las duraciones seleccionadas para el análisis fueron: 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 150 min y 180 min.

El valor máximo de duración a estudiar se adoptó atendiendo a la caracterización de la duración total de lluvias en S.M de Tucumán. El análisis de frecuencia de las duraciones de eventos de gran intensidad seleccionados de la Estación Aeropuerto S.M. de Tucumán, (período 1960-1981), indica que: el 90% de las lluvias intensas analizadas tiene duraciones inferiores a 90 min, los mayores valores de frecuencia se ubican en una meseta con duraciones entre los 25 y 60 minutos y que el 100% de las lluvias analizadas tiene duraciones inferiores a 180 min.

Para cada duración se determinó una serie anual de precipitación en las siete posiciones de medición correspondientes al período 2000-2001 a 2007-2008. De igual manera se determinó una serie anual correspondiente al mismo período pero con los datos del conjunto de las siete posiciones agregados en una estación ficticia correspondiente a la red.

### Análisis de frecuencia

Con las series anuales se procedió al ajuste de funciones de densidad de probabilidad seleccionando la función Gumbel para la representación de la población correspondiente a todas las posiciones de medición y de la red agregada. Se expone a continuación las relaciones P vs. Tr correspondientes a cada duración analizada (Tabla 3).

**Tabla 3.** Relación P vs. Tr para cada duración P[mm].

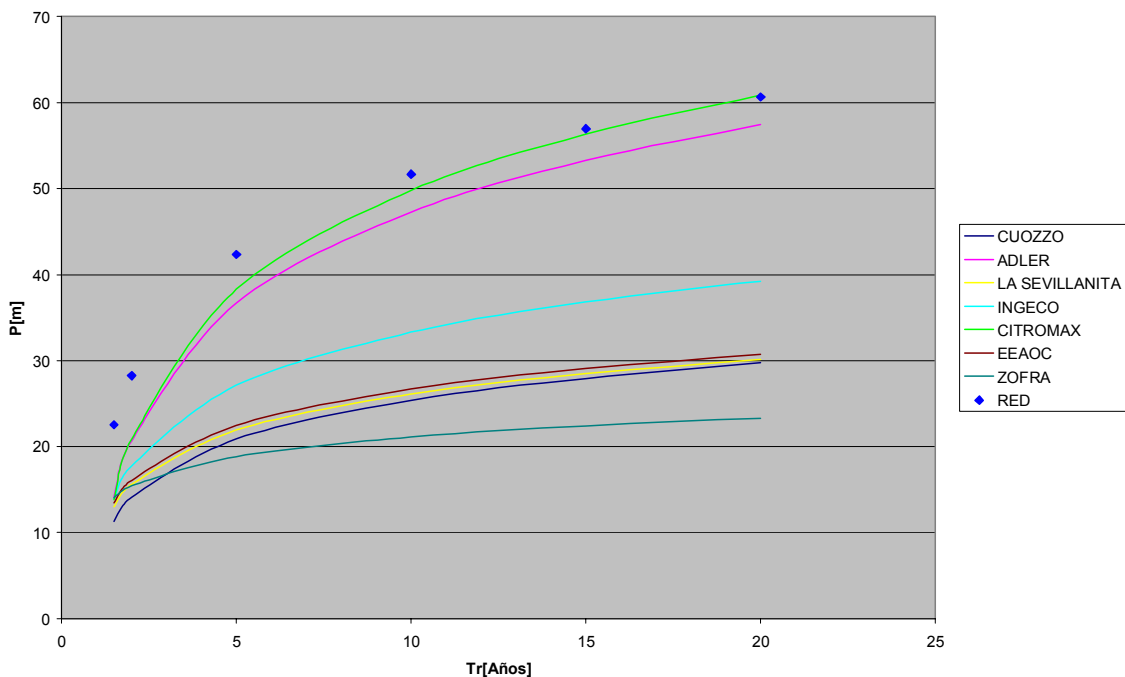
		ESTACION DE MEDICION							
		1	3	4	5	6	8	10	
D [min]	Tr [Años]	EAAOC	ADLER	LA SEVILLANITA	INGECO	ZOFRA	CITROMAX	CUOZZO	RED
10	1.5	13.5	14.2	13.0	14.0	14.1	13.8	11.3	22.5
	2	16.1	20.7	15.6	17.8	15.4	20.9	14.1	28.2
	5	22.5	36.7	21.9	27.1	18.8	38.3	20.9	42.3
	10	26.7	47.3	26.1	33.3	21.1	49.8	25.4	51.7
	15	29.1	53.3	28.5	36.8	22.4	56.3	27.9	56.9
	20	30.7	57.4	30.1	39.2	23.3	60.9	29.7	60.6
30	1.5	18.6	28.1	29.8	28.0	27.0	29.2	21.7	46.3
	2	23.5	41.2	34.4	34.0	29.7	43.1	25.9	56.9
	5	35.4	73.5	45.7	48.6	36.6	77.1	36.3	83.0
	10	43.3	94.9	53.1	58.3	41.1	99.7	43.2	100.3
	15	47.8	106.9	57.3	63.8	43.7	112.4	47.0	110.1
	20	50.9	115.4	60.3	67.6	45.5	121.3	49.8	116.9
60	1.5	22.4	39.2	37.3	35.6	31.6	38.9	26.5	62.8
	2	28.8	56.4	42.3	42.0	37.0	55.6	31.4	76.0
	5	44.4	98.8	54.4	58.0	50.1	96.6	43.4	108.7
	10	54.7	126.8	62.4	68.6	58.8	123.8	51.4	130.4
	15	60.6	142.6	66.9	74.6	63.7	139.2	55.9	142.6
	20	64.7	153.7	70.1	78.7	67.1	149.9	59.0	151.1

**Tabla 3.** Relación P vs. Tr para cada duración P[mm] (continuación).

D [min]	Tr [Años]	ESTACION DE MEDICION							
		1	3	4	5	6	8	10	RED
		EEOC	ADLER	LA SEVILLANITA	INGECO	ZOFRA	CITROMAX	CUOZZO	
90	1.5	23.1	45.9	42.4	39.2	33.3	43.4	29.7	74.2
	2	30.2	67.0	48.0	47.2	40.1	62.3	35.1	90.6
	5	47.6	118.9	61.7	67.1	56.7	108.7	48.2	131.0
	10	59.2	153.2	70.8	80.3	67.7	139.5	57.0	157.8
	15	65.7	172.6	75.9	87.7	73.9	156.8	61.9	172.9
	20	70.2	186.2	79.5	92.9	78.2	168.9	65.3	183.4
150	1.5	25.1	53.0	46.1	41.7	35.5	44.6	41.1	83.5
	2	32.3	76.8	52.2	52.8	41.9	64.9	46.0	102.4
	5	49.9	135.3	67.1	80.1	57.4	114.9	57.9	148.8
	10	61.6	174.1	77.0	98.2	67.5	147.9	65.8	179.6
	15	68.2	196.0	82.6	108.4	73.1	166.6	70.3	196.9
	20	72.8	211.3	86.5	115.5	77.1	179.7	73.4	209.1
180	1.5	26.4	53.4	41.7	43.0	37.0	46.6	43.7	90.1
	2	35.3	79.7	47.4	55.1	43.5	67.7	49.4	109.9
	5	57.0	144.2	61.6	84.8	59.1	119.8	63.3	158.6
	10	71.5	186.9	71.0	104.5	69.3	154.3	72.5	190.9
	15	79.6	211.0	76.3	115.6	75.1	173.8	77.7	209.1
	20	85.3	227.9	80.0	123.4	79.1	187.4	81.3	221.8

Los gráficos de las Figuras 3 a 8 exponen la situación relativa entre las posiciones de medición y la de éstas con la serie agregada de la red. Los mismos exponen la variabilidad de los valores extremos de precipitación dentro del G.S.M.T.

Se observa que las estaciones EEOC, La Sevillanita, Zona Franca y Cuozzo, ubicadas en la zona central y este de la ciudad entregan series anuales con comportamiento similar. No sucede así con las estaciones Ingeco, Adler y Citromax ubicadas hacia el oeste las cuales se diferencian marcadamente.



**Figura 3.** Gráfico P vs Tr para duración D=10 min.

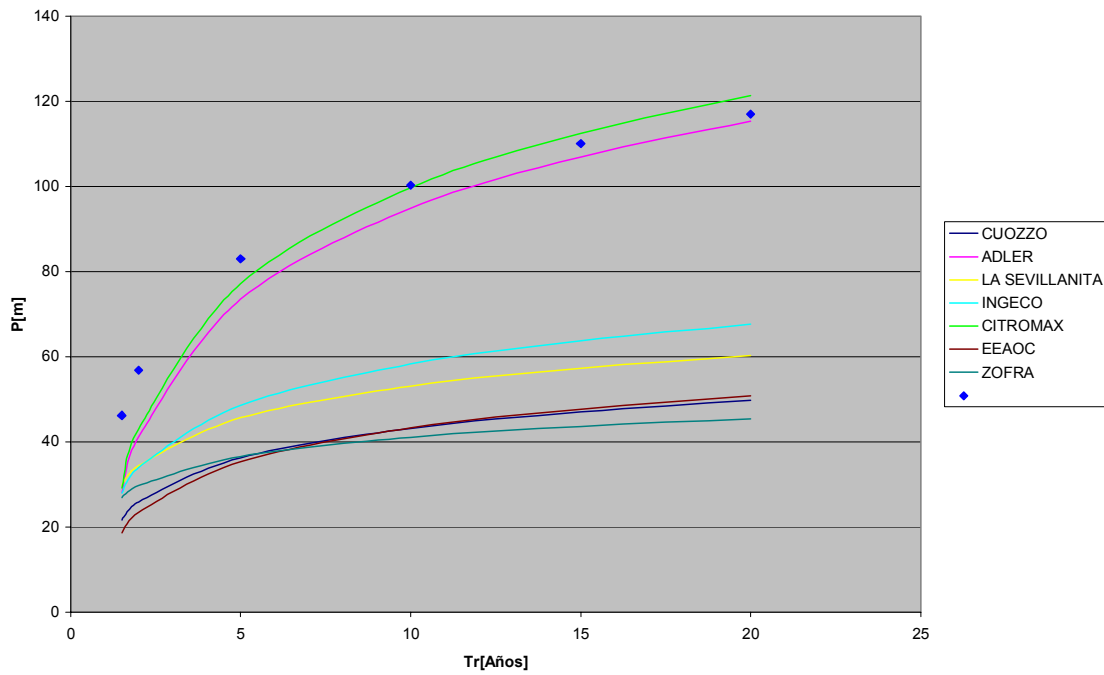


Figura 4. Gráfico P vs Tr para duración D=30 min.

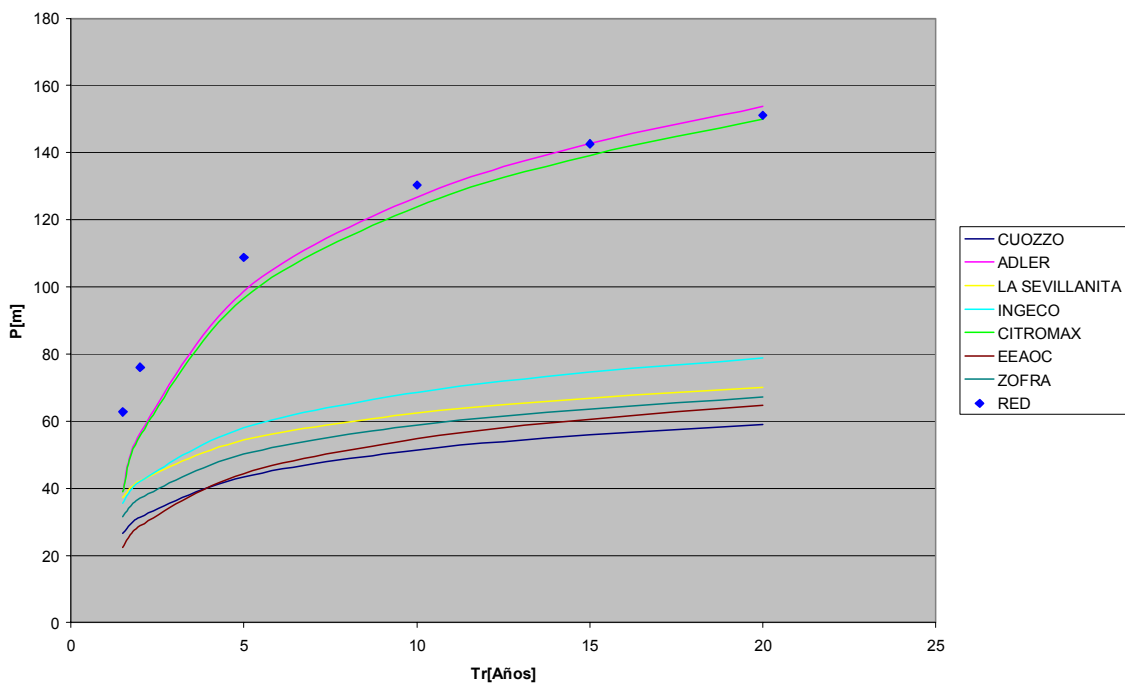
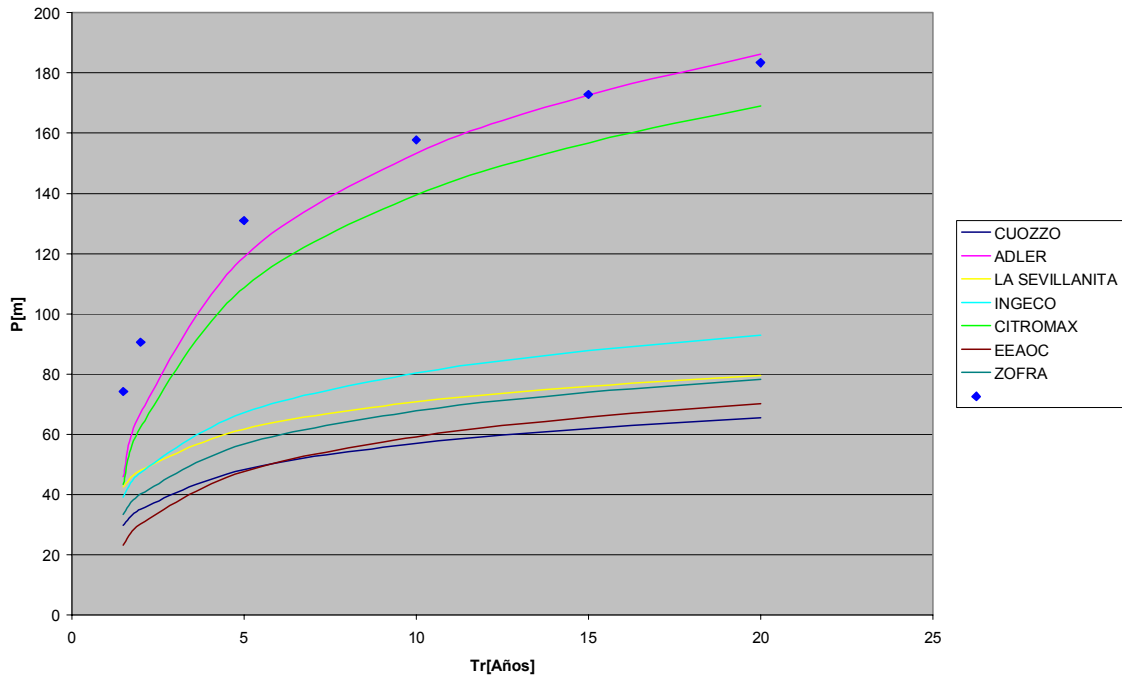
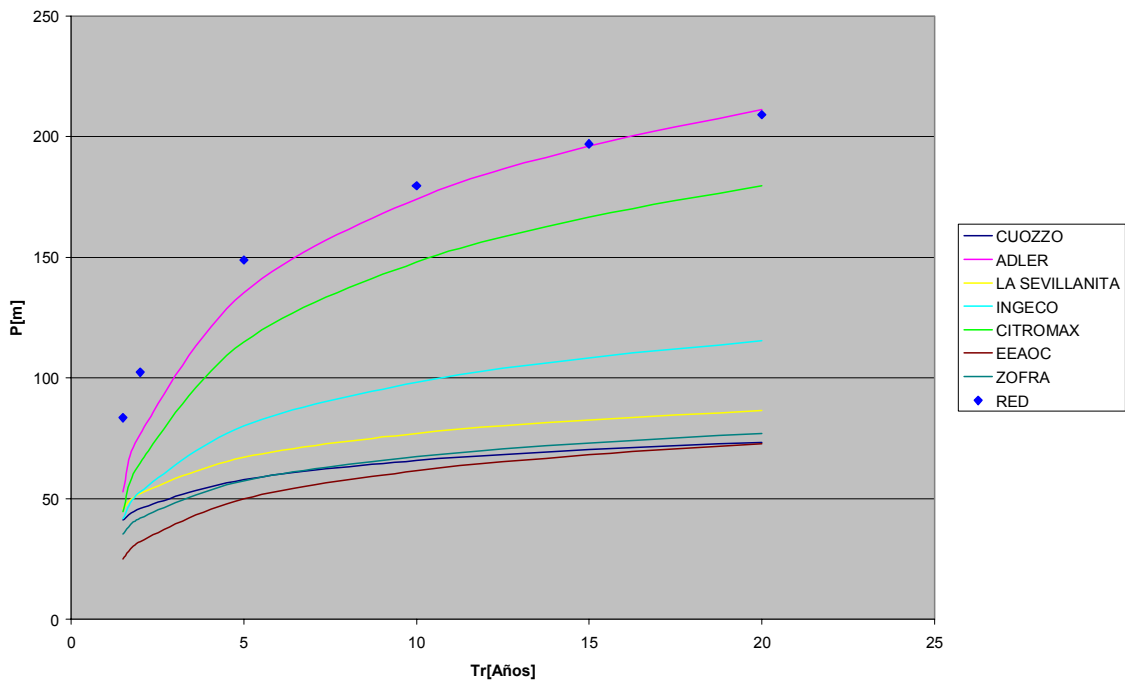


Figura 5. Gráfico P vs Tr para duración D=60 min.

Las estaciones Adler y Citromax dan valores extremos más grandes. Es importante destacar que para las mayores duraciones consideradas, (150 min y 180 min), los valores mas grandes son aportados por la estación Adler ubicada mas al oeste y cercana a la ladera oriental de la sierra de San Javier que las restantes. Para las duraciones menores, (10 min y 30min), los mayores valores son aportados por la estación Citromax ubicada 3,6 Km al este de la de Adler y aproximadamente 91 metros sobre ésta.



**Figura 6.** Gráfico P vs Tr para duración D=90 min.



**Figura 7.** Gráfico P vs Tr para duración D=150 min.

Considerando valores de tiempo de retorno superiores a 10 años las estaciones Adler y Citromax dan valores extremos cercanos a los dados por la serie agregada de la red, por lo que se deduce que los registros de ésta son aportados casi exclusivamente por estas estaciones. No sucede así para tiempos de retornos inferiores a 10 años donde los valores de precipitación extrema obtenidos a partir de la serie agregada de la red no son alcanzados por los valores de ninguna de las posiciones de medición.

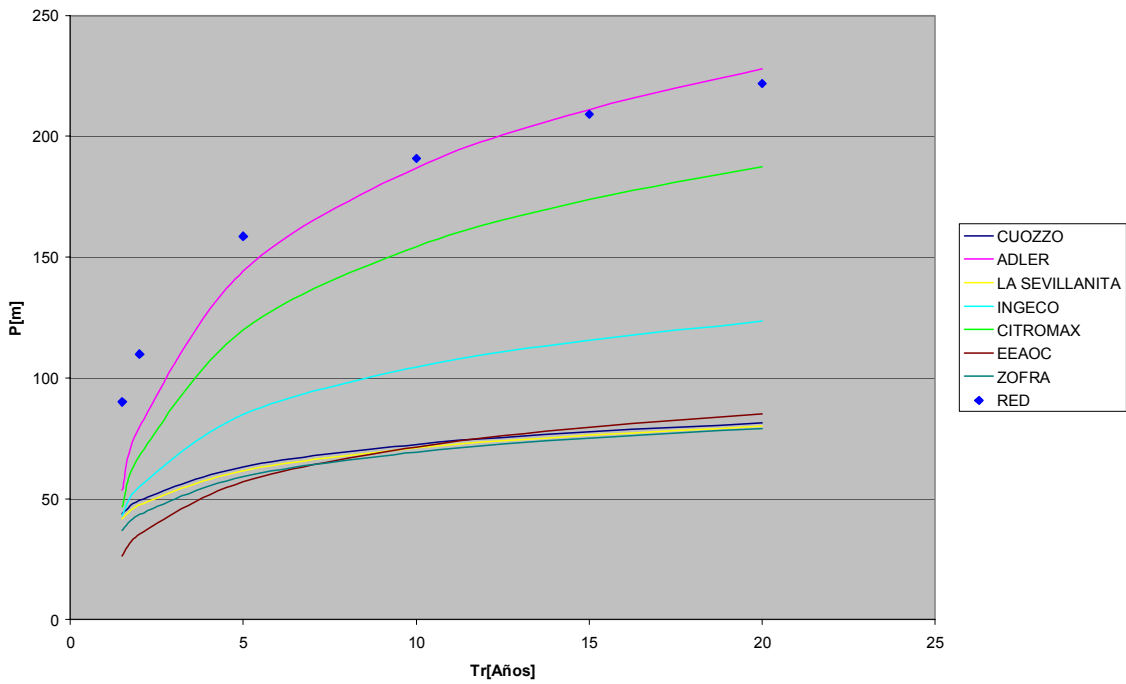


Figura 8. Gráfico P vs Tr para duración D=180 min.

### Relación de los valores extremos entre las posiciones de medición

Resulta interesante hacer un análisis relativo de la situación de los valores extremos en cada posición de medición. Para ello se determinó el cociente de los valores “P” de cada posición con los correspondientes a la red “Pr”. Los gráficos de las Figuras 9 y 10 exponen la variación de estos cocientes con el tiempo de retorno.

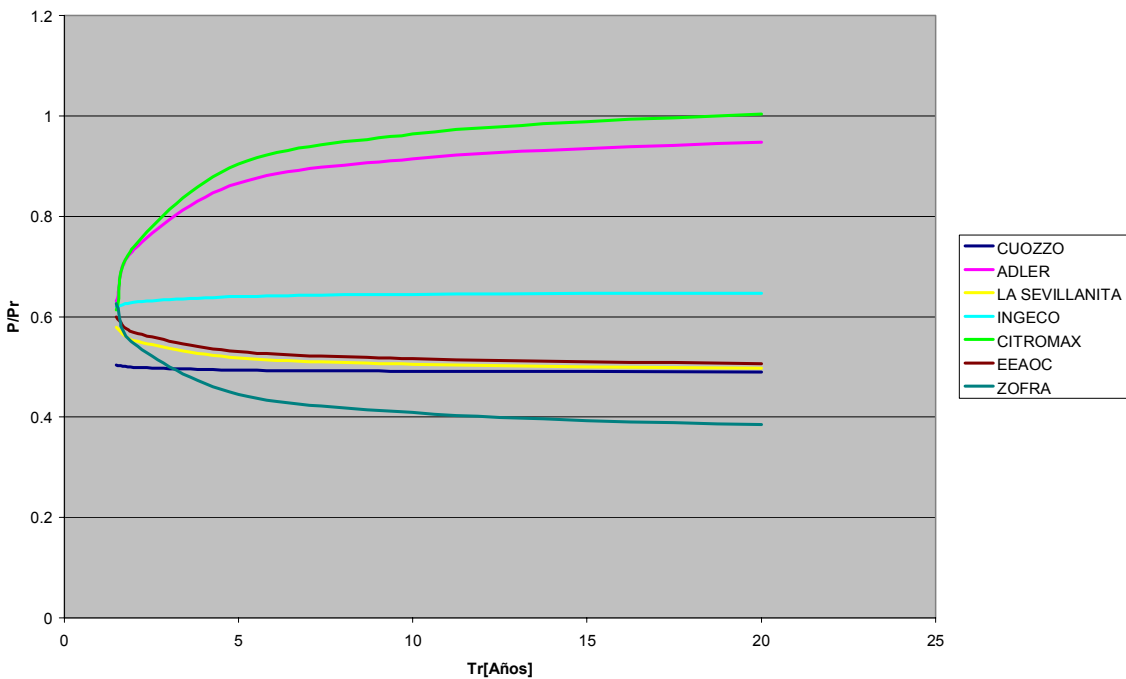
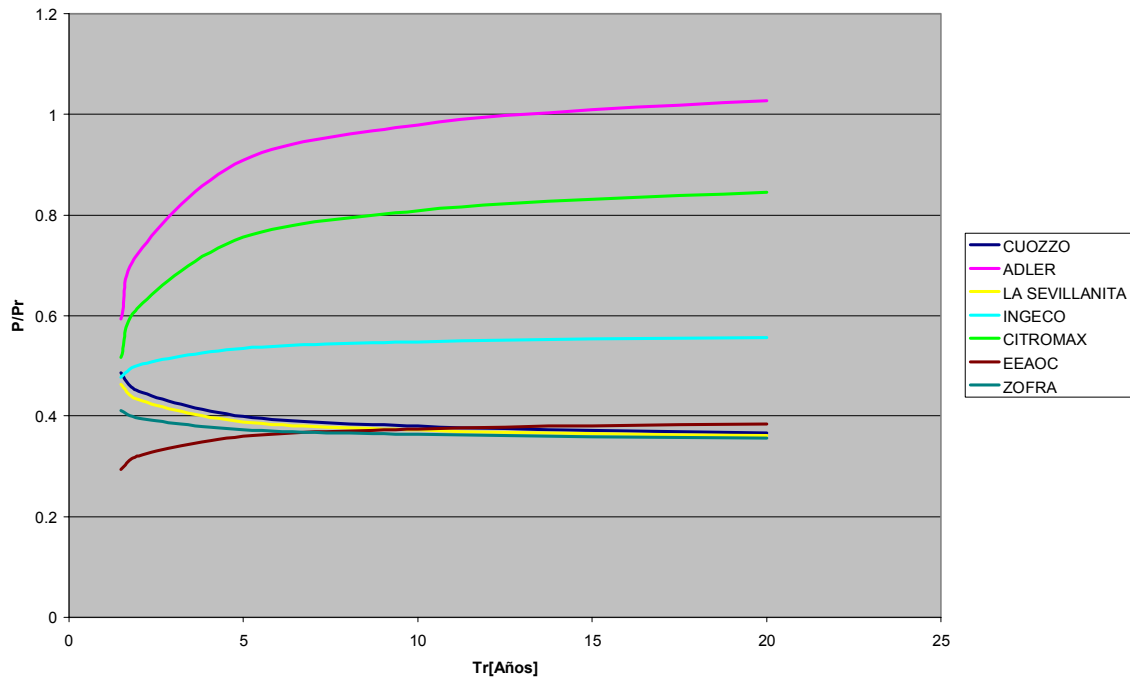


Figura 9. Gráfico P/Pr vs Tr para duración D=10 min.



**Figura 10.** Gráfico P/Pr vs Tr para duración D=180 min.

Los gráficos anteriores muestran que a medida que al acercarse a la barrera orográfica, (Sierra de San Javier), ubicada al oeste los valores extremos crecen. En las dos estaciones mas cercanas a esta barrera el cociente crece con el tiempo de retorno y en las estaciones mas alejadas, ubicadas en la zona central y este de la ciudad, el cociente decrece hasta aproximadamente 5 años de tiempo de retorno para luego mantenerse aproximadamente constante para tiempos de retorno mayores.

Para tiempos de retorno superiores a 10 años ocurre que algunas de las estaciones ubicadas al oeste cerca de la Sierra, (Adler o Citromax), tienen valores del cociente cercanos a 1. Ello es coherente con lo observado en los gráficos de Figuras 3 a 8 para tiempos de retornos superiores a 10 años donde los valores de precipitación extrema obtenidos a partir de la serie agregada de la red son aproximadamente iguales a los dados por algunas de estas posiciones de medición.

Para tiempos de retorno inferiores a 10 años el cociente es inferior a 1 para las estaciones que dan los mayores valores de la red, (Adler o Citromax), ubicadas al oeste. Ello es coherente con lo observado en los gráficos de Figuras 3 a 8 para tiempos de retornos inferiores a 10 años donde los valores de precipitación extrema obtenidos a partir de la serie agregada de la red no son alcanzados por los valores de ninguna de las posiciones de medición.

En el gráfico de Figura 11 se muestra la variación del cociente con la duración para todos los puntos de medición. En este se puede observar la variación del cociente con la duración para la estación del extremo este, (La Sevillanita), la más alejada de la Sierra y para las estaciones del extremo oeste, (Adler y Citromax), la más cercana a la Sierra. En ambos casos los valores corresponden a un tiempo de retorno de 10 años. Se puede observar que hay una tendencia en seis de las estaciones a una disminución del cociente con el aumento de la duración. La estación Adler con la posición contigua al pie de la ladera oriental de la Sierra de San Javier muestra una tendencia opuesta.

En el gráfico de la Figura 11 que corresponde a 10 años de tiempo de retorno los valores del cociente cercanos a 1 provienen de las estaciones cercanas a la Sierra, (Adler o Citromax).



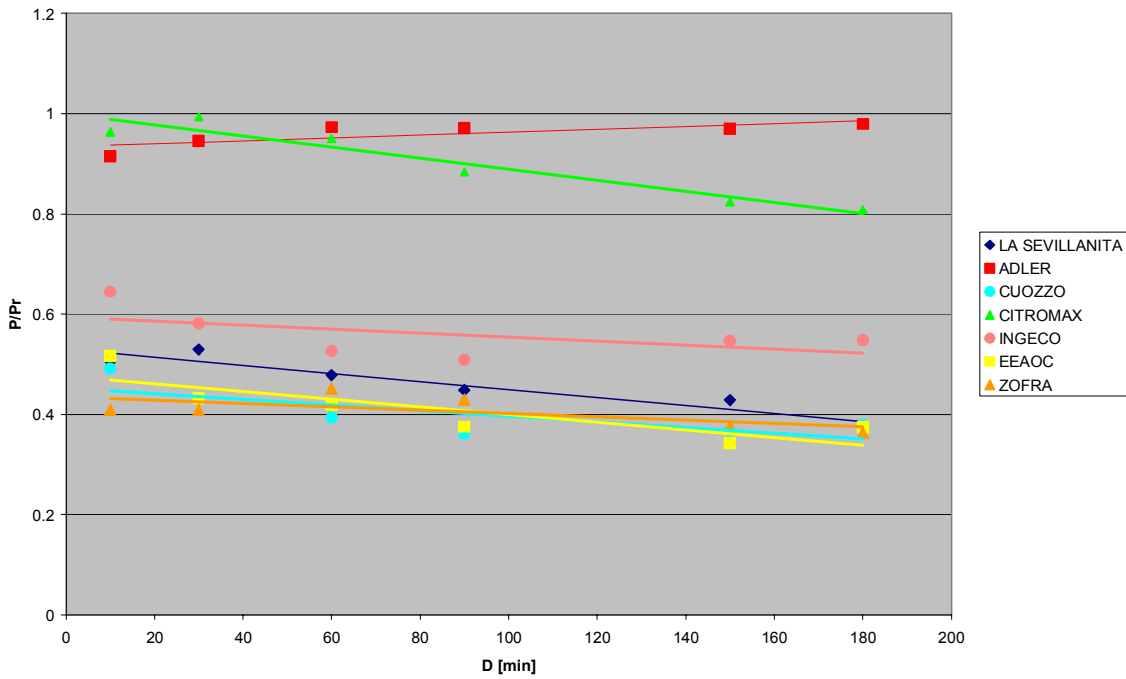


Figura 11. Gráfico P/Pr vs D para Tr=10 años.

En el gráfico de la Figura 13 que corresponde a un tiempo de retorno  $Tr=2$  años los valores del cociente son marcadamente inferiores a 1. Esta situación puede deberse a singularidades del ajuste de las FDP con los extremos mas bajos de las series.

Atendiendo a lo expuesto en los párrafos anteriores es conveniente establecer correlaciones utilizando valores asociados a tiempos de retorno no inferiores a 10 años.

Los gráficos de la Figuras 3 a 12 exponen en forma clara la gran variabilidad de los valores extremos de precipitación en el ámbito de la ciudad con un claro aumento hacia el oeste a medida que la posición es más cercana a la Sierra de San Javier. Si se considera la influencia de la duración existe una tendencia de aumento de la variabilidad con la misma, es decir que es de esperar un mayor aumento al acercarse a la Sierra a medida que aumenta la duración.

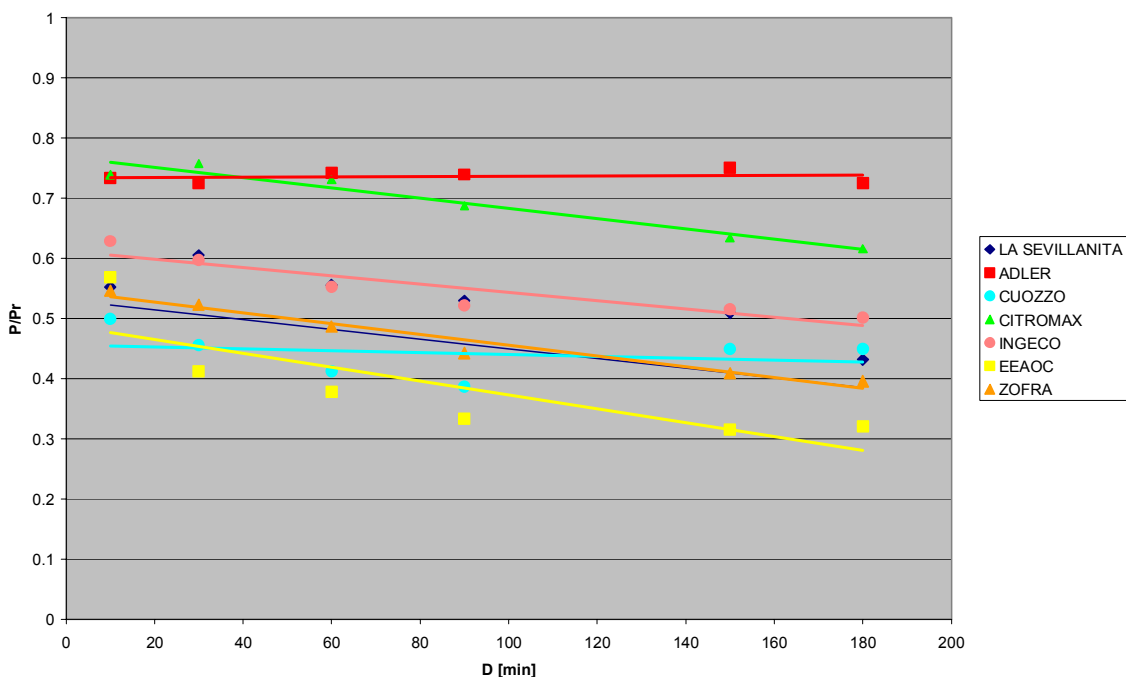


Figura 12. Gráfico P/Pr vs D para Tr=2 años.

### Correlación con la estación con I-D-R, (EEAOC)

Atendiendo a lo expuesto en el párrafo anterior queda establecido que existe una fuerte variación de los valores extremos de precipitación en el ámbito de la ciudad. La necesidad de utilizar la relación I-D-R de El Colmenar, (EEAOC), por ser la única con un registro de longitud competente lleva a la necesidad de transponer la misma a cualquier posición requerida dentro del ámbito cubierto por la red del Gran S. M. de Tucumán. Para ello es necesario estudiar la correlación de la serie anual de la EEAOC con las de las posiciones de registro restantes.

La estación que se establecerá para este análisis como base, (EEAOC), se ubica en la zona centro-este donde los análisis anteriores mostraron poca variación de los extremos. No sucede así cuando se correlaciona con las posiciones del centro-oeste y del oeste de la ciudad que se encuentran más cercanas a la Sierra de San Javier.

Para establecer la correlación se definió el cociente entre el valor extremo en la posición analizada y el de la estación base, ( $P/P_0$ ). En el gráfico de la Figura 13 se muestra como los valores del cociente varían fuertemente hacia el oeste desde una determinada posición que coincide con la de la estación Cuozzo aproximadamente. Las posiciones de medición ubicadas al este de esta estación pueden considerarse que tienen una respuesta aproximadamente igual a la base.

El gráfico muestra que la variación con la altura no sigue una tendencia clara. Se tiene posiciones como la estación Ingeco donde la altura es menor a la de la base y sin embargo el cociente aumenta considerablemente. En las estaciones ubicadas al este de la base con altura inferior el cociente tiende a mantenerse cercano al valor 1. La estación Adler ubicada 91 metros por abajo de la estación Citromax tiene un cociente marcadamente mayor al de esta última.

En el gráfico de la Figura 14 se expone la variación de  $P/P_0$  pero para la duración  $D=10$  min. El comportamiento es similar. La diferencia mas notoria es el valor mas bajo del cociente de la estación Adler con respecto a la estación Citromax ubicada al este de la primera. Esta situación se presenta solo para las duraciones de 10 y 30 min. Para las restantes, 60, 90 y 150 min la situación es la misma de la de 180 min.

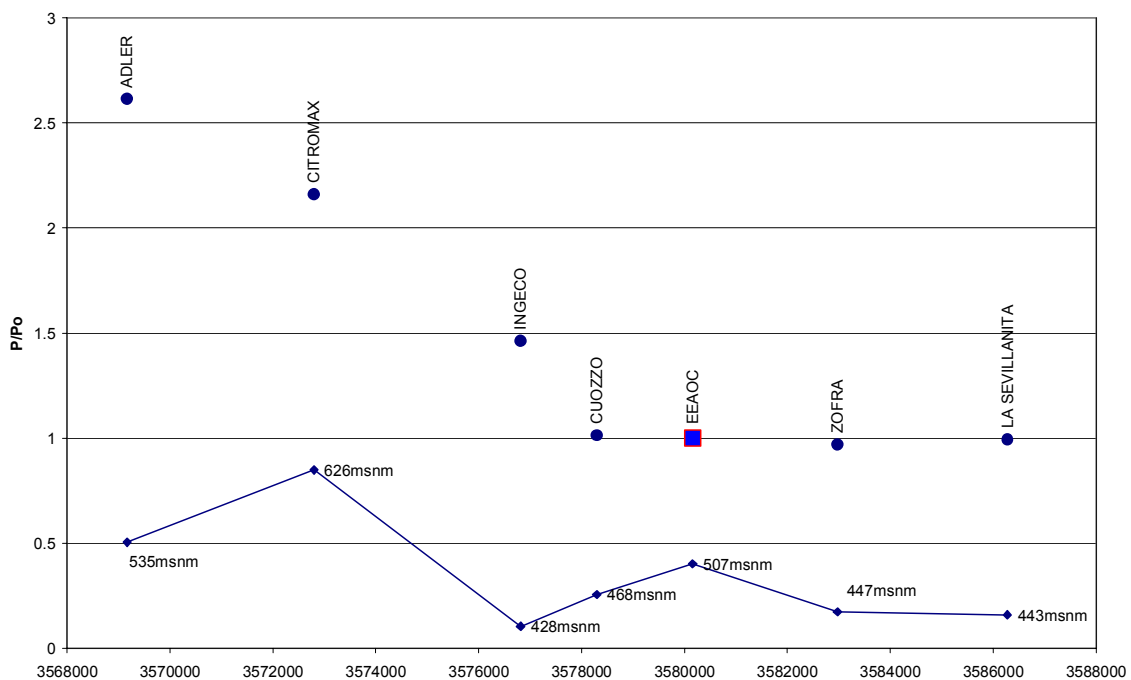


Figura 13. Gráfico variación de  $P/P_0$  y Cota en la dirección este-oeste para  $D=180$  min y  $Tr=10$  años.

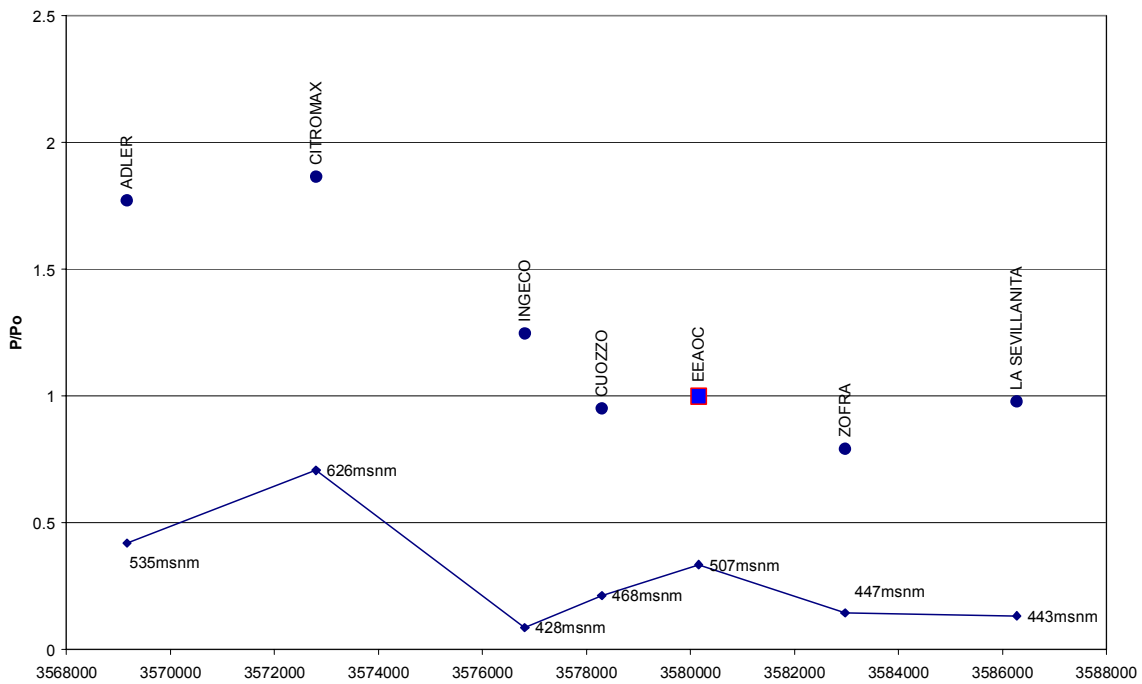


Figura 14. Gráfico variación de  $P/P_0$  y Cota en la dirección este-oeste para  $D=10$  min y  $Tr=10$  años.

Se observa que el cociente tiene un gradiente creciente con la duración, con valores máximos en el extremo oeste de la red que varían para duraciones de 10 a 180min entre 1,9 y 2,6 respectivamente.

### Distribución geográfica de $P/P_0$ . Isolíneas del cociente

Si bien quedó establecido que existe un aumento de los valores extremos hacia el oeste a medida la posición se acerca a la barrera orográfica contigua a la ciudad, (Sierra de San Javier), es necesario conocer la variación del cociente cualquiera sea la dirección considerada para lo cual se recurrió a la obtención de isolíneas del cociente  $P/P_0$ .

Se expone a continuación en las Figuras 15 y 16, a modo de ejemplo, las isolíneas correspondientes a Duraciones de 180 y 10 min respectivamente.

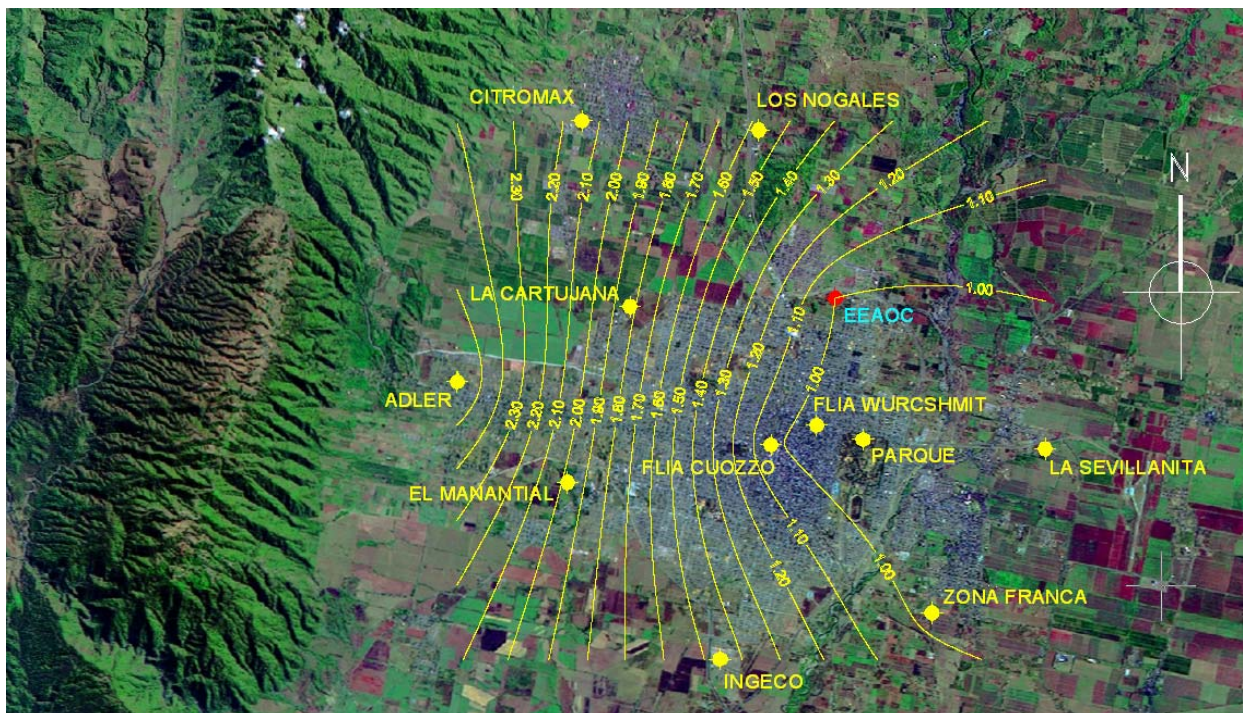


Figura 15. Isolíneas de  $P/P_0$  para  $D=180$  min y  $Tr=10$  años.

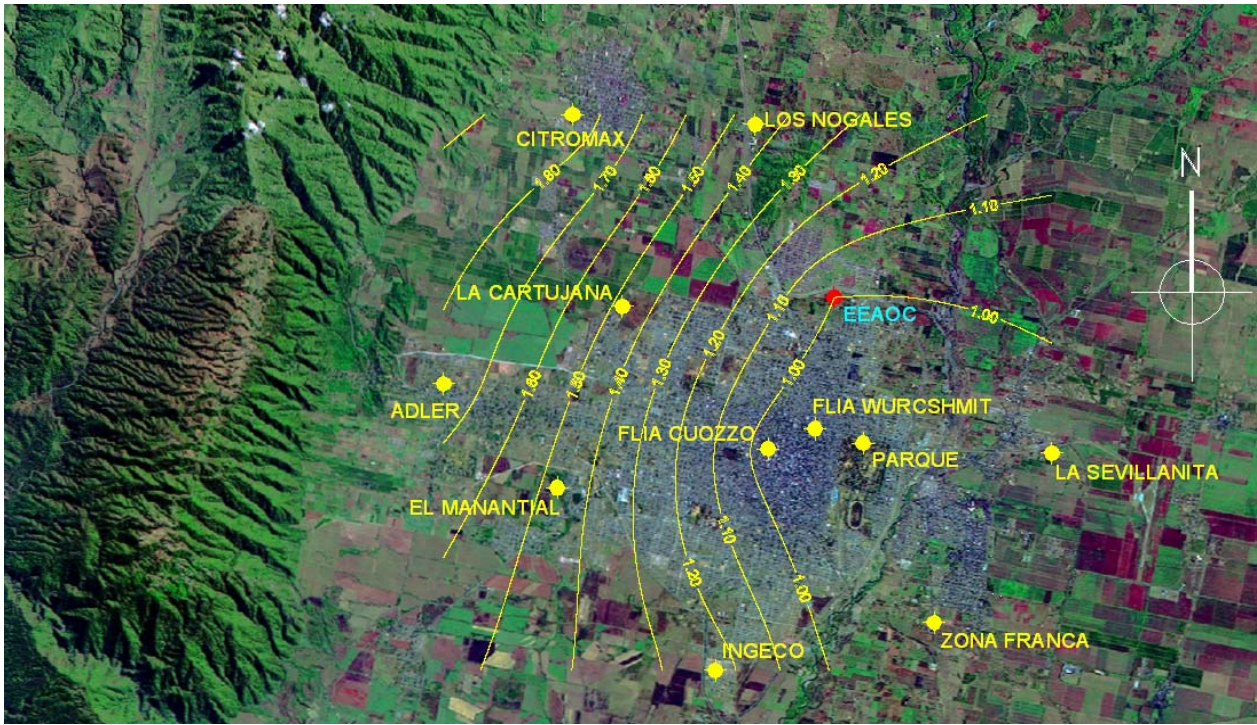


Figura 16. Isocotas de  $P/P_0$  para  $D=10$  min y  $Tr=10$  años.

En ambos campos de isocotas se tiene un sector donde el cociente se mantiene con un valor igual a 1, lo cual indica que en este sector es utilizable en forma directa la I-D-R de El Colmenar. Este toma una parte importante central y este del municipio de S. M. de Tucumán y la totalidad de los municipios de Alderetes y Banda del Río Salí. Hacia el oeste de centro de la ciudad Capital se tiene un aumento mantenido hasta el pie de la ladera de la Sierra de San Javier que varía su gradiente con la duración considerada. En el caso de  $D=10$ min el valor máximo al pie de la ladera es de aproximadamente 1,9. Para  $D=180$ min este máximo es igual a 2,6 aproximadamente. Esta tendencia de aumento del cociente con la duración queda expuesta en el gráfico de la Figura 17.

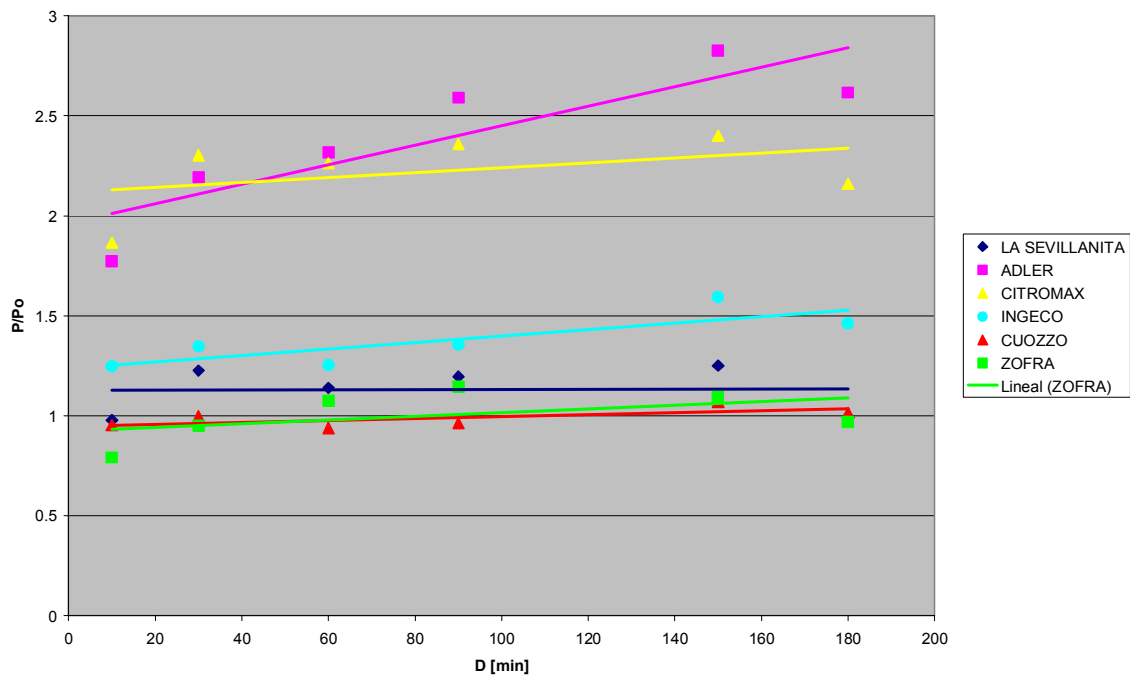


Figura 17. Gráfico  $P/P_0$  vs  $D$  para  $Tr=10$  años.

La dirección del máximo gradiente preponderante es algo variable con la duración. Para  $D=180\text{min}$  las isolíneas medias son preponderantemente paralelas a la Sierras con una traza cercana a dirección norte-sur. En este caso el máximo gradiente tiene una dirección este-oeste aproximadamente. A medida que disminuye la duración las isolíneas se inclinan adquiriendo su traza una dirección sudoeste-noreste. Para la duración  $D=10\text{min}$  el gradiente máximo tiene una dirección preponderante sudeste-noroeste.

## CONCLUSIONES

Atendiendo a los resultados obtenidos del procedimiento descrito en los párrafos anteriores se puede sintetizar los mismos a través de los siguientes conceptos:

- La relación I-D-R de El Colmenar es utilizable sin transposición solo en un ámbito del Gran S. M. de Tucumán ubicado en la zona este del municipio de S. M. de Tucumán y en los municipios localizados al este del río Salí, (Alderetes y Banda del Río Salí). El resto del Gran S. M. de Tucumán requiere un procedimiento de transposición de la mencionada I-D-R.
- La variación de los valores adquiere más importancia a medida que la posición considerada se acerca a la Sierra de San Javier ubicada al oeste de la ciudad. No es recomendable atender a la variación con la altura.
- La variación de los valores de la I-D-R hacia el oeste aumenta con la duración de lluvia considerada.
- No es recomendable corregir los valores puntuales atendiendo solo al avance de la posición hacia el oeste. Las Isolíneas de cocientes de correlación muestran trazas con direcciones cambiantes que no coinciden siempre con la norte-sur, en particular con la disminución de la duración considerada. Para la obtención de la lámina de precipitación puntual a aplicar sobre una cuenca del G. S. M. de Tucumán es conveniente recurrir a las isolíneas.
- Los campos de isolíneas a utilizar deben ser obtenidos para cada una de las duraciones de lluvia empleadas para definir el hietograma de precipitación.
- Los valores utilizados para la obtención de las isolíneas deben estar asociados a tiempos de retorno no inferiores a 10 años.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fernandez, P. C.; S. Fattorelli; S. Rodriguez y L. Fornero** (1999) "Regional Analysis of Convective Storm". Journal of Hydraulics Division. Amer. Society of Civil Engineering. pp. 217-325. October. Vol 4 NO.4. ISSN 1084-0699.
- García, C. M.; C. G. Catalini y G. Caamaño Nelli** (2000) "Distribución Espacial de la lluvia de diseño en una cuenca de montaña". Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba 2000, pp 309-318. Córdoba, R.A.
- Chow, V. T.; D. R. Maidment y L. W. Mays** (1994) *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Zimmermann, E. D.; G. Ricardi; H. Pieroni y M. Arraigada** (2001) "Curvas de Abatimiento Areal de Tormentas Región Pampa Ondulada (santa Fe, Argentina)". Cuadernos del CURIHAM, Volumen 7, N°1, pp 24-27. Rosario, Argentina.
- River Engineering Division, Departamente of Irrigation and Drainage Malaysia** (2001) "Urban Stormwater for Malaysia Management Manual". Apart. 13.2.6 (Areal Reduction Factor).
- Caamaño Nelli, G. y Dasso C. M.** (2003) "Lluvias de Diseño. Conceptos, Técnicas y Experiencias". Editorial Científica Universitaria. Córdoba. Argentina.
- Catalini, C. G.; G. Caamaño Nelli y C. M. García** (2000) "Efectos Fisiográficos y Climáticos sobre Las Curvas de Reducción Areal de Lluvias de Diseño". Memorias del XIX Congreso Nacional del Agua. Villa Carlos Paz. Córdoba. Argentina 2002.

- Paz, H. R.** (1994) “*Determinación de la Relación Intensidad-Duración-Recurrencia para San Miguel de Tucumán*”. Municipalidad de S. M. de Tucumán. Tucumán. Argentina. 1994.
- Lazarte Sfer, R. R.** (2001). “*Distribución Superficial de Lluvias Intensas en Areas Reducidas*”. Memorias de III Jornadas de Saneamiento Pluvial Urbano. Rosario Argentina. Sept. 2001.
- Adler, F.J., Paz,H.R., Lazarte, R.R.** (2005) “*Atlas de Lluvias Intensas en el Area del Gran S.M. de Tucumán - Argentina*”. Memorias del XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina 2005.
- Paz, H. R.** (1994) “Determinación de la Relación Intensidad-Duración-Recurrencia para San Miguel de Tucumán”. Municipalidad de S. M. de Tucumán. Tucumán. Argentina. 1994.
- Fernandez, P. C.; S. Fattorelli** (2011) “Diseño Hidrológico”. Beta Studio. INA-CRA. Associazione Italiana di Idronomia. ISSN 978-987-05-2738-2.

## APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE FRECUENCIA REGIONAL EN CUENCAS ANDINAS DE ARGENTINA

**Alberto I. J. Vich<sup>(1,2)</sup>, Florencia. Manduca<sup>(2)</sup>, Federico Bizzotto<sup>(2)</sup> y Emilce Vaccarino<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET).

Av. Adrián Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, 5500 Mendoza, Argentina, [aijvich@mendoza-conicet.gov.ar](mailto:aijvich@mendoza-conicet.gov.ar)

<sup>(2)</sup>Instituto de Estudios del Ambiente y Recursos Naturales, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, Parque General San Martín, 5500 Mendoza, Argentina.

**RESUMEN:** El análisis de frecuencias de variables hidrológicas (caudal anual y estacional) es un proceso complejo y de apreciable incertidumbre. Con el fin de aumentar la confiabilidad en las estimaciones, se hace uso de la información hidrológica disponible en la región. Se trata de paliar el déficit temporal con la abundancia espacial, mediante la transferencia de información de las diferentes estaciones de la región. El procedimiento fue aplicado en cuencas con nacientes en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, en un amplio gradiente latitudinal que se extiende, al norte, desde la cuenca del río Bermejo hasta la cuenca del río Santa Cruz, en el sector más austral del continente. Se han estimado los cuantiles regionales, usando momentos  $L$  regionalizados a partir de distintos agrupamientos de las 28 estaciones empleadas. Verificado su homogeneidad por medio de pruebas de Discordancia y Heterogeneidad  $H_2$  y la adopción de la distribución de mejor ajuste por medio de la medida  $Z^{DIST}$  y  $PUM_T$ . Las distribuciones empleadas son: General de Valores Extremos (**GVE**), Logística Generalizada (**GLO**), Generalizada Normal (3 parámetros, **GNO**), Normal (**NOR**), Gumbel (**GUM**), Pareto Generalizada (**GPA**, de poco uso en la estimación de caudal anual), exponencial (**EXP**), Pearson III (**PE3**) y Wakeby (**WAK**). En todos los casos, la región homogénea incluye solamente estaciones de Los Andes Centrales sur, desde el río Tunuyan al Colorado. En general, el caudal anual y estacionales (invierno, primavera, verano y otoño) derivado del análisis de frecuencia regional es superior al encontrado en el análisis de frecuencia tradicional para cada sitio. La función Pearson III (**PE3**) y Gumbel (**GUM**), son las que presentan el mejor ajuste

**PALABRAS CLAVE:** cordillera de Los Andes, análisis de frecuencias, caudal

## INTRODUCCION

El comportamiento de las variables hidrológicas se describe con la ayuda de funciones de distribución de probabilidades. Se trata de un proceso complejo y de una apreciable incertidumbre, debido a que los registros de las observaciones de suceso son generalmente cortos para extrapolar con criterio a tiempos de retorno grandes. Sumado a ello, se tiene el inconveniente en la elección del modelo probabilístico que “mejor ajusta”, ya que esto constituye un motivo de controversia entre los especialistas y no existe un mecanismo de aceptación universal.

Con el fin de aumentar la confiabilidad en las estimaciones, se hace uso de toda la información hidrológica disponible y paliar el déficit temporal de información con la abundancia espacial, aumentando la longitud de los registros disponibles mediante la transferencia de información de diferentes sitios. Este procedimiento de análisis regional desarrollado por Hosking y Wallis (1997) fue aplicado a las variables de caudal: anual, verano (enero a marzo), otoño (abril a junio), invierno (julio a septiembre y primavera (octubre a diciembre), observado en cuencas con nacientes en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, en un amplio gradiente latitudinal que se extiende desde la cuenca del río Bermejo, hasta la cuenca del río Santa Cruz en el sector más austral del continente, determinándose las curvas adimensionales de frecuencia para las variables analizadas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Estaciones de aforos - Análisis exploratorio de datos (AED)

La información hidrológica analizada se corresponde con series de caudal diario medio y fue proporcionada, por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Las estaciones de aforos se localizan sobre la cordillera de Los Andes y serranías del noroeste argentino, en un amplio gradiente latitudinal que se extiende, prácticamente, a lo largo de todo el territorio nacional. Sus características principales se muestran en la **Tabla 1**. Se determinaron 5 variables hidrológicas, a saber:  $Q_{\text{año}}$ , caudal anual;  $Q_v$ ,  $Q_o$ ,  $Q_i$ , y  $Q_p$ , caudales estacionales de verano, otoño, invierno y primavera.

En general, las distintas series presentan porcentajes disímiles de datos faltantes. En función de la extensión del vacío de información, se aplicaron distintos procedimientos para su rellenamiento (Gyau-Boakye, 1993): para 4 días de datos perdidos se emplea un polinomio interpolador de tercer grado; si varía entre 4 y 20 días, se usa un modelo autoregresivo de primer orden con corrección, siempre y cuando exista información precedente a la laguna y su extensión sea entre dos y tres veces la longitud del vacío; para interrupciones mayores de 20 días, se utiliza el método **MOVE** (*Maintenance Of Variance Extention*) (Hirsch, 1982, cit. Salas, 1992), siempre que exista información en otro sitio con características similares (estación base) y un registro común que incluya la interrupción.

La aplicación de distintos tipos de test, requiere que las observaciones sean independientes y aleatorias y las series muestrales provengan de poblaciones normalmente distribuidas. Para ello, se verificaron las condiciones de: normalidad, independencia y aleatoriedad de las distintas series. Para evaluar la normalidad se aplicaron los Test de Shapiro-Wilks y Test de Asimetría y Curtosis (Salas, 1992). La independencia entre las observaciones fue evaluada mediante el contraste del coeficiente de correlación serial con un retardo de 1 y 2 años (Remington y Schork, 1974), el test de Bartlett y el de Von Neuman (Kundzewicz y Robson, 2000). La medida de la aleatoriedad se realizó mediante los Test de Rachas y Test de Kendall (Kundzewicz y Robson, 2000).

Posteriormente, se verificó si las series eran homogéneas o estacionarias, aspecto fundamental para un posterior análisis de frecuencia. La sola sospecha de cambios a escala planetaria en las



condiciones climáticas obliga a evaluar el régimen de escurrimiento en lo relacionado con modificaciones en la tendencia de largo plazo o cambios abruptos en los valores medios. La metodología empleada en la evaluación de la tendencia de largo plazo se basa en pruebas estadísticas paramétricas: *t* de Student (Remington y Schork, 1974), y no paramétricas: **SROC** (*Spearman Rank Order Correlation*) (Kundzewicz y Robson, 2000), Mann-Kendall (Hirsch *et al*, 1982; Westmacott y Burn, 1997) y sus modificaciones de corrección de la varianza (Hamed y Rao, 1998) y preblanqueo (Yue *et al*, 2002). Para la detección de cambios abruptos se emplean el test paramétrico *t* de Student secuencial y los no paramétricos: Pettitt (Pettitt, 1979), Buishand (Buishand, 1982) o Worsley (Worsley, 1979).

**Tabla 1.** Estaciones de aforos.

<b>RIO</b>	<b>ESTACION</b>		<b>LAT.</b>	<b>LONG.</b>	<b>AREA</b> [km <sup>2</sup> ]	<b>ALT.</b> [msnm]	<b>DATOS</b> [%]	<b>RECORD</b>
Bermejo	Aguas Blancas	ABL	22°43'	64°22'	4850	405	100.0	1944-03
	Pozo Sarmiento	PSA	23°06'	64°13'	25000	296	100.0	1940-03
Las Cañas	Potrero del Clavillo	LCA	27°24'	65°59'	1000	1300	100.0	1943-03
Los Patos	Alvarez Condarco	ACO	31°57'	69°42'	3710	1950	95.4	1952-03
	La Plateada	LPL	31°53'	69°41'	8500	1900	95.8	1909-03
San Juan	Km 101	101	31°20'	69°06'	18348	1310	86.5	1971-03
	Km 43,7	473	31°32'	68°53'	25670	945	99.9	1909-03
Vacas	Punta de Vacas	VAC	32°51'	69°46'	570	2450	99.5	1949-03
Cuevas	Punta de Vacas	CUE	32°51'	69°46'	680	2430	95.0	1949-03
Tupungato	Punta de Vacas	TUP	32°51'	69°46'	1800	2430	95.0	1949-03
Mendoza	Guido	GUI	32°51''	69°16'	9040	1238	100.0	1956-03
Tunuyán	Valle de Uco	UCO	33°47'	69°15'	2380	1200	97.7	1944-03
Diamante	La Jaula	LJA	34°40'	69°19'	2753	1500	98.5	1970-03
Atuel	Puente Sosneado	PSO	35° 05'	69° 36'	2385	1580	97.6	1972-06
	Loma Negra	LNE	35 04'	69°07'	3860	1340	100.0	1981-06
	La Angostura	LAN	35° 02'	68° 52'	3800	1200	99.8	1906-06
Salado	Cañada Ancha	CAN	35° 13'	69° 46'	810	1700	95.5	1939-06
Pincheira	Pincheira	PIN	35° 31'	69° 48'	160	1750	88.3	1967-06
Grande	La Estrechura	LES	35° 19'	70° 18'	1070	1690	81.5	1977-06
	La Gotera	LGO	35° 52'	69° 53'	6180	1400	94.8	1971-06
Valenzuela	Valle Noble	VAL	35° 19'	70° 18'	243	1680	79.0	1977-06
Chico	Las Loicas	CHI	35° 48'	70° 05'	590	1500	94.4	1991-06
Poti Malal	P. Gendarmería	PMA	35° 52'	69° 57'	840	1485	93.5	1971-06
Barrancas	Barrancas	BAR	36° 44'	69° 57'	2900	890	-	1960-06
Colorado	Buta Ranquil	BRA	37° 06'	69° 44'	15300	850	-	1939-05
Neuquén	Paso de Indios	PDI	38°32'	69°25'	30843	498	100.0	1903-03
Limay	Paso Limay	PDL	40°32'	70°26'	26400	538	100.0	1903-95
Chubut	El Maitén	EMA	42°06'	71°10'	1200	680	99.5	1943-03
	Los Altares	LAL	43°51'	68°30'	16400	275	97.4	1943-03
Santa Cruz	Charles Fuhr	CFU	50°16'	71°54'	15530	206	94.00	1955-03

La aplicación de distintos tipos de test, requiere que las observaciones sean independientes y aleatorias y las series muestrales provengan de poblaciones normalmente distribuidas. Para ello, se verificaron las condiciones de: normalidad, independencia y aleatoriedad de las distintas series. Para evaluar la normalidad se aplicaron los Test de Shapiro-Wilks y Test de Asimetría y Curtosis (Salas, 1992). La independencia entre las observaciones fue evaluada mediante el contraste del coeficiente de correlación serial con un retardo de 1 y 2 años (Remington y Schork, 1974), el test de Bartlett y el de Von Neuman (Kundzewicz y Robson, 2000). La medida de la aleatoriedad se realizó mediante los Test de Rachas y Test de Kendall (Kundzewicz y Robson, 2000).

Posteriormente, se verifico si las series eran homogéneas o estacionarias, aspecto fundamental para un posterior análisis de frecuencia. Además, la sola sospecha de cambios a escala planetaria en las condiciones climáticas obliga a evaluar el régimen de escurrimiento en lo relacionado con

modificaciones en la tendencia de largo plazo o cambios abruptos en los valores medios. La metodología empleada en la evaluación de la tendencia de largo plazo se basa en pruebas estadísticas paramétricas:  $t$  de Student (Remington y Schork, 1974), y no paramétricas: **SROC** (Spearman Rank Order Correlation) (Kundzewicz y Robson, 2000), Mann-Kendall (Hirsch *et al.*, 1982; Westmacott y Burn, 1997) y sus modificaciones de corrección de la varianza (Hamed y Rao, 1998) y preblanqueo (Yue *et al.*, 2002). Para la detección de cambios abruptos se emplean el test paramétrico  $t$  de Student secuencial y los no paramétricos: Pettitt (Pettitt, 1979), Buishand (Buishand, 1982) o Worsley (Worsley, 1979).

Se comprueba la presencia de datos atípicos por medio de los test de: Grubbs (U.S. Army Corps of the Engineers, 2001), Rosner (EPA, 2000) y el desarrollado por la Interagency Advisory Committee on Water Data (1982). En general, los métodos de detección son sencillos y directos, pero el tratamiento de cada uno de ellos requiere de la incorporación de condiciones no sólo matemáticas, sino también de consideraciones hidrológicas. De existir valores dudosos, deben ser comparados con la información histórica y de crecientes en sitios cercanos a fin de excluirlos o no del análisis. El tratamiento de este tipo de información siempre contiene una cuota de subjetividad y prácticamente no existe una metodología de aceptación universal.

### **Análisis de frecuencia regional**

El objetivo del análisis de frecuencia regional es obtener frecuencia (valor esperado para determinado tiempo de retorno, probabilidad de ocurrencia, etc.) de algún fenómeno extremo, en una determinada región. Se aplicó el desarrollado por Hosking y Wallis (1997). El método realiza algunas suposiciones, tales como: reemplaza la falta de información en un sitio particular con el aumento de información espacial asumiendo que este conjunto de estaciones es homogénea; las observaciones regionales tienen la misma función de distribución de probabilidades; la variable en los distintos sitios difiere en un factor de escala, que es la media o mediana de la distribución en cada estación. Para la estimación de cuantiles de las variables hidrológicas (v.h.) regionales se calcularon las curvas de crecimiento para distintas funciones de distribución conjuntamente con el uso de los momentos  $L$  regionalizados (Greenwood *et al.*, 1979; Landwerh *et al.*, 1979; Lettenmaier *et al.*, 1987). La curva de crecimiento, adimensional, es una relación funcional explícita entre un cuantil específico y su probabilidad de excedencia.

Previo al análisis regional propiamente dicho, es necesario recabar la mayor cantidad de información de distintos sitios y someterlos a un exhaustivo análisis exploratorio de datos como el descripto, para corregir errores, rellenar las series, detectar observaciones atípicas, verificar algunos supuestos estadísticos y analizar si se trata de series estacionarias.

Posteriormente, se agrupan los sitios de observación dentro de una región homogénea y estos deben ser similares respecto a su distribución de frecuencias. Es decir, para que un sitio no pertenezca a un agrupamiento, la curva de distribución de frecuencia acumulada debe ser radicalmente diferente del promedio grupal. Ello se mide por medio de la medida de discordancia  $D_k$ , que se determina empleando los cocientes de momentos  $L$  adimensionales ( $T_2, T_3, \dots T_i$ ). La medida de discordancia fue desarrollada por Hosking y Wallis (1997) para testear si un sitio o estación es similar al resto de sitios del agrupamiento. Cuando  $D_k > D_{\text{crítico}}$ , valor que se encuentra tabulado, indica que el sitio es discordante y no pertenece al grupo. Ello significa que dicha estación debe ser separada del grupo y sometida a un análisis de calidad más profundo. Se considera que el vector de momentos  $L$  representa un punto en el espacio y que el conjunto de estaciones de una región específica definen una nube de puntos. Cualquier punto que se aparte significativamente del centro de gravedad del conjunto de puntos, es considerado como discordante.

La heterogeneidad se utiliza para evaluar cuándo un conjunto de estaciones de una región específica puede ser considerado como homogéneo. La medida de heterogeneidad  $H_2$  (Hosking y Wallis, 1997) empleada compara la variabilidad de los momentos  $L$  adimensionales de cada sitio que conforman una región con la esperada, obtenida a partir de pruebas de simulación. Se define como:

$$V_2 = \left[ \frac{\sum_{k=1}^M N_k \left[ (T_2^{(k)} - T_2^R)^2 + (T_3^{(k)} - T_3^R)^2 \right]}{\sum_{k=1}^M N_k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [1]$$

$$H_2 = \frac{(V_2 - \mu_{V_2})}{\sigma_{V_2}} \quad [2]$$

La determinación de la media  $\mu_V$  y desviación estándar  $\sigma_{V_2}$  del estadístico  $V_2$  se logra mediante simulación. Se determinan series sintéticas para cada sitio de la región, se calculan los momentos  $L$  regionalizados y se estima  $V_2$ . El exponente  $k$  o  $R$  indica si se trata de momentos del sitio o regionalizados. La generación de series sintéticas para cada sitio, se realiza a partir de la distribución de probabilidad de Kappa o Wakeby y haciendo equivalente la probabilidad acumulada  $F(x)$  a números aleatorios uniformemente distribuidos en el intervalo  $(0,1)$ . El número de simulaciones realizadas es 500. Los autores han propuesto que una región es *aceptablemente homogénea* si  $H_2 < 1$ , *posiblemente homogénea* si  $1 < H_2 < 2$  y *heterogénea* si  $H_2 > 2$ .

Una vez comprobada la homogeneidad de la región o agrupamiento propuesto, es necesario adoptar una distribución del conjunto de distribuciones candidatas que mejor ajusta. Las distribuciones candidatas empleadas en el análisis son: General de Valores Extremos (**GVE**), Logística Generalizada (**GLO**), Generalizada Normal (3 parámetros, **GNO**), Normal (**NOR**), Gumbel (**GUM**), Pareto Generalizada (**GPA**, de poco uso en la estimación de caudal diario medio máximo anual), exponencial (**EXP**), Pearson III (**PE3**) y Wakeby (**WAK**). Los cuantiles para las estaciones de la cuenca del río Grande de cada distribución candidata se obtienen del producto entre las ordenadas de la curva de crecimiento regionalizada adimensional y la mediana de cada sitio.

Para el procesamiento de los distintos agrupamientos, la definición de las curvas de crecimiento para las funciones citadas anteriormente (cuantiles y valor de la función de distribución) y la estimación de sus parámetros sobre la base de los momentos  $L$  regionalizados se elaboró un programa en FORTRAN, empleando las rutinas desarrolladas por Hosking (1996).

La adopción de la función de distribución que mejor ajusta a los datos observados, se realiza sobre una medida de bondad de ajuste  $Z^{DIST}$  definida por Hosking y Wallis (1997). Se expresa como:

$$Z^{DIST} = \frac{\tau_4 - T_4^R + B_4}{\sigma_4} \quad [3]$$

$$B_4 = \frac{1}{N_s} \sum (T_4^{(m)} - T_4^R) \quad [4]$$

$$\sigma_4 = \sqrt{\frac{1}{N_s - 1} \sum_{m=1}^{N_s} (T_4^{(m)} - T_4^R - B_4)^2} \quad [5]$$

La determinación de  $B_4$  y  $\sigma_4$  se logra mediante simulación y se emplea un criterio similar al usado en la determinación del estadístico  $V$ . Se considera que el ajuste a determinada distribución es la adecuada, si el estadístico  $Z^{DIST}$  es cercano a cero, siendo un valor razonable cuando se encuentre entre  $-1,64 < Z^{DIST} < 1,64$ .

Otra medida del grado de incertidumbre del agrupamiento, es la definida como la diferencia entre la función de distribución regional y los distintos sitios que integran el agrupamiento, para un cuantil de recurrencia  $T$  es:

$$PUM_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{sitios}} N_i (\ln x(T)_i - \ln x(T)_i^R)^2}{\sum_{i=1}^{N_{sitios}} N_i}} \quad [6]$$

Donde el subíndice  $i$  indica el “i-énimo” sitio del agrupamiento, el exponente  $R$  denota el valor regional,  $x(T)$  es el cuantil adimensional de recurrencia  $T$ . Para una función específica, el menor valor indica el un buen agrupamiento.

En síntesis, el análisis de frecuencia regional requiere del cumplimiento de cuatro etapas:

- ✓ Análisis exploratorio de las observaciones.
- ✓ Identificación de regiones homogéneas.
- ✓ Selección de la distribución regional de frecuencias.
- ✓ Estimación de parámetros y cuantiles de la función regional de distribución de probabilidades.

## RESULTADOS

### Caudal anual y caudal estacional - AED

En las estaciones del noroeste argentino, Pincheira, Barrancas, Colorado, Neuquén y Limay, no se han detectado valores atípicos en ninguna de las variables analizadas. En la cuenca del río San Juan, hay evidencias de valores atípicos en el caudal anual. En la cuenca del Mendoza y Tunuyan, se identifica valores atípicos en, 1982-83 y 1987-88. El Diamante, solo presenta valores fuera de rango para el caudal anual, en el año 1982-83. En la cuenca del río Atuel, aparecen como valores atípicos, para algunas variables, las observaciones de los años: 1982-83, 1983-84, 19992-93, 1996-97 y 1999-00. Registros atípicos altos fueron identificados en todas las estaciones de la cuenca del río Grande, en: 1979-80, 1982-83, 1985-86, 1987-88, 1990-91, 2000-01, 2005-06 y 2006-07. En la cuenca del río Chubut, El Maitén muestra un valor atípico bajo para el caudal anual en el año 1943-44. En río Santa Cruz, el caudal anual de 1970-71 es un valor atípico. En general, la gran mayoría de los caudales atípicos detectados, se presentan en años donde el fenómeno El Niño tuvo una intensidad de moderada a severa (Vich *et al*, 2000) y difícilmente se puedan deber a errores en las mediciones, dado que la gran mayoría de las variables hidrológicas empleadas provienen de promedios de un conjunto de observaciones más o menos importantes. Por lo expuesto, en este trabajo no se los excluirá.

La **Tabla 2** muestra un resumen del AED, para las variables caudal anual y estacional. La nomenclatura es: **A** se acepta la hipótesis nula, **R** se rechaza la hipótesis para un nivel de significación de  $\alpha = 0.05$ ; la secuencia es: test de normalidad, independencia y aleatoriedad respectivamente. Como se han aplicado distintos métodos, se ha tomado un criterio restrictivo, basado en el hecho que para aceptar la condición analizada, ningún método debía rechazar la hipótesis nula. Además, se indica la presencia de homogeneidad, a partir de la determinación de cambios graduales o abruptos, para un

nivel de significación de  $\alpha = 5 \%$ . La condición de normalidad es rechazada en el 60 % de los casos, siendo el caudal de verano y otoño las variables que más falta de normalidad presentan; la ausencia de independencia y aleatoriedad ocurre en el 34 % de las series analizadas, destacándose el caudal de invierno y otoño.

Tabla 2.- AED, tendencia y cambios abruptos

EST.	AED					tendencia					cambios abruptos				
	Q <sub>año</sub>	Q <sub>I</sub>	Q <sub>P</sub>	Q <sub>V</sub>	Q <sub>O</sub>	Q <sub>año</sub>	Q <sub>I</sub>	Q <sub>P</sub>	Q <sub>V</sub>	Q <sub>O</sub>	Q <sub>año</sub>	Q <sub>I</sub>	Q <sub>P</sub>	Q <sub>V</sub>	Q <sub>O</sub>
ABL	AAA	ARR	RAA	RAA	RRR	+	ns	ns	+	+	71	72	ns	71	71
PSA	RRR	RRR	RAA	RRR	RRR	+	+	+	+	+	72	77	77	72	71
LCA	RAR	ARR	RAA	RRR	RRR	+	+	ns	+	+	71	73	83	71	73
ACO	RAA	ARA	RAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	76	77	ns	71	76
LPL	RAA	RRR	RAA	RAA	RRR	ns	—	ns	ns	ns	ns	77	ns	77	ns
101	AAA	ARR	RAA	RAA	AAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
47.3	RAA	RRR	RAA	RAA	RRR	ns	ns	ns	ns	ns	44	45	ns	44	44
CUE	RAA	ARR	RAA	RAA	RAR	ns	ns	ns	ns	ns	71	72	76	71	71
VAC	RRR	RAR	RAA	RAR	RRA	ns	+	ns	ns	ns	71	72	76	71	71
TUP	RRR	RRR	RRA	RRR	RRA	+	ns	+	+	ns	76	78	76	77	76
GUI	RRR	RRR	RRR	RRR	RRR	+	+	+	+	+	76	77	76	77	77
TUN	RAA	RAR	AAA	RAR	RAA	ns	+	ns	+	ns	71	79	ns	71	70
LJA	RRR	ARR	ARA	RAA	RRR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	79	ns	ns	ns
PSO	AAA	AAA	AAA	RAA	ARA	ns	ns	ns	-	ns	87	ns	ns	87	93
LNE	RAR	AAA	AAA	RAA	AAR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CAN	RRR	RRR	RRA	RRR	RRR	ns	+	+	ns	+	77	77	76	71	78
LAN	AAA	ARR	RAA	RAA	RRR	ns	ns	ns	ns	ns	71	54	71	71	53
PIN	AAA	ARR	ARA	AAA	ARA	ns	+	ns	ns	+	78	79	77	ns	78
COB	AAA	RRA	AAA	RAA	ARA	ns	—	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TOR	RAA	RRR	RAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	—	—	ns	ns	ns	43	46
LES	AAA	RAA	AAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	87	ns
VAL	AAA	AAA	AAA	RAA	AAA	ns	ns	ns	ns	ns	87	91	87	87	ns
CHI	AAA	AAA	AAA	RAA	AAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PMA	AAA	RAA	AAA	RAA	RAR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
LGO	AAA	ARR	AAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	97	ns	ns	ns
BAR	ARR	RRR	ARR	RAA	RRR	ns	+	ns	ns	+	72	72	71	72	71
BRA	ARA	RRR	ARA	RAA	RRA	ns	+	ns	ns	ns	77	79	ns	ns	79
PDI	AAA	AAA	AAR	RAA	RAR	ns	ns	ns	ns	ns	13	13	19	54	ns
PLI	AAA	RAA	RRR	RAA	RAA	—	ns	ns	—	ns	52	82	84	55	51
EMA	AAA	AAA	AAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	—	84	52	84	76	ns
LAL	AAA	AAA	AAA	AAA	RAA	ns	ns	ns	—	ns	84	ns	ns	84	ns
CFU	RAA	AAR	RAA	AAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

En la cuenca del Bermejo, en Pozo Sarmiento todas las variables muestran tendencia positiva. En el río Las Cañas, el caudal anual, de otoño e invierno muestran pendiente positiva estadísticamente significativa. En la cuenca del río San Juan, la serie La Plateada (río de los Patos), indicaría que los caudales de estiaje (otoño e invierno), presentan tendencia decreciente. Esta aparente contradicción se debe al hecho que la serie de mensuales es mucho más extensa que la de caudales diarios. Aguas abajo, en la sección Km 47,3 (San Juan) el caudal anual es decreciente. En la cuenca del río Mendoza, se observa tendencias positivas en distintas variables, excepto en el Cuevas. En el Tupungato existen evidencias de tendencias crecientes en el caudal anual, primavera y verano. Guido, sobre el río Mendoza, rechaza la hipótesis nula para todas las variables analizadas y la tendencia es creciente. El Tunuyan, únicamente presenta tendencia positiva para los caudales de invierno y verano. El principal afluente del Atuel sobre margen derecha posee una marcada tendencia creciente en el caudal de otoño, invierno y primavera. Aguas arriba de la confluencia, en la sección Puente Sosneado, el caudal de verano es decreciente. La siguiente estación, La Angostura, no muestra tendencia en las variables analizadas. El pequeño río Pincheira, muestra caudales crecientes en el caudal de invierno y otoño. En las nacientes del río Grande, en los dos afluentes que le dan origen, Tordillo y Cobre, solo se detectó

tendencia en algunas variables. Las estaciones mencionadas poseen numerosas interrupciones y dejaron de funcionar en la década del 70 por lo que sus resultados no son muy confiables. En el resto de las estaciones ubicadas sobre el cauce principal y sus afluentes no presenta tendencia estadísticamente significativa en ninguna de las variables analizadas. El río Barrancas presenta tendencia creciente en el caudal de invierno y verano. Para el río Colorado en Buta Ranquil, solamente el caudal de invierno muestra tendencia positiva. El río Neuquén, no muestra tendencia. El río Limay para la estación Paso Limay, muestra evidencias de tendencia decreciente en el caudal anual y de verano. En el río Chubut, en las estaciones El Maitén y Los Altares, no se detectan cambios en las series analizadas, excepto por algunas evidencias de variaciones decrecientes en el caudal de otoño verano. El río Santa Cruz en Charles Fuhr, no muestra evidencia estadísticamente significativa de tendencia en cualquiera de las analizadas. En síntesis, solo se presenta tendencia creciente en algunas variables y sitios de Los Andes desérticos y centrales y tendencia decreciente en algunas variables y sitios de Los Andes patagónicos.

En general, el test **t** de Student Secuencial señala puntos de quiebre estadísticamente significativos de manera más frecuente que los otros test. Muchas veces se presentan saltos múltiples, que ningún test de los empleados los identifica. El test de Pettitt, que no identificó cambios abruptos. Debe recordarse que los test empleados, requieren la condición de normalidad en la distribución, aspecto que solo se cumplen en el 40 % de los casos, lo que introduce un importe nivel de incertidumbre en los resultados.

En las estaciones ubicadas sobre el río Bermejo y en Las Cañas, la mayoría de las variables analizadas, poseen evidencias de cambios abruptos en los valores medios a comienzo de la década del 70. Las estaciones de aforo en la cuenca del río San Juan, el caudal de primavera no muestra cambios abruptos. Estos se presentan en otras variables a mediados de la década del 70. También hay evidencias estadísticamente significativas de cambios en 1944 en **47.3**, series muy extensa que comienza a principios del siglo. En la cuenca del río Mendoza, la mayoría muestran cambios abruptos alrededor del año 1977, particularmente en el río Tupungato. La detección de un cambio abrupto no necesariamente indica cambios en la tendencia. En el Tunuyan, el caudal de primavera no presenta cambios. En el río Diamante, la hipótesis de homogeneidad es rechazada en el caudal de invierno que presenta salto positivo. En la cuenca del Atuel, en **PSO** solo presentan evidencias de cambios las v. h. de anual, de verano y otoño, a fines de la década de 1980. En el Salado y Atuel en **LAN**, presentan cambios en todas las variables. El punto de quiebre es prácticamente coincidente en las distintas variable, con saltos positivos a mediados de los 70 y 1953. En la cuenca del Pincheira, el salto es positivo para todas las variables, excepto en caudal de verano; ocurre alrededor de 1978. En la cuenca del río Grande, solo **LES** muestra evidencias estadísticamente significativas de cambios bruscos a un escalón menor, a fines de los 80, para casi todas las v. h. bajo análisis, excepto caudal de otoño. El Barrancas presenta cambios abrupto significativos en todas las variables a comienzos de los 70. En el río Neuquén y Limay, el año de quiebre en los valores medio de las variables analizadas, muestran resultados muy disimiles entre sí, algunos en la década del 20 y otros en los 50 y 70. En la cuenca alta del río Chubut, la serie en **EMA** muestra cambios abruptos y dispares en todas las variables, excepto en el caudal de otoño. En el río Santa Cruz no hay saltos. En general los caudales  $Q_{\text{año}}$ ,  $Q_I$  y  $Q_V$  muestran cambios abruptos en más del 65 % de los casos, el  $Q_P$ , solo en un 44 %; además, no debe olvidarse que los métodos empleados son paramétricos y las condiciones de normalidad, independencia y aleatoriedad, juegan un rol muy importante.

### **Análisis regional de frecuencias**

Como primera medida se empleó el análisis tradicional (métodos de momentos, métodos de máxima verosimilitud, momentos ponderados por probabilidad y momentos mixtos) para la determinación de la función de distribución. Se aplicaron los modelos **AFMON** y **AFMULTI** (FICH-UNL, 1990). Se calculó el cuantil de las v.h. analizadas, para distintos niveles de probabilidad de excedencia  $P(Q > x) = 1 - F(Q \leq x)$ . El proceso de toma de decisión para la elección del modelo probabilístico

que “mejor”, genera controversias (Paoli, C y Cacik, P, 2000). Se calcularon los errores cuadráticos medios de frecuencia (**ECMF**) y de valores (**ECMV**) estimados, que permiten determinar cuál modelo ajusta mejor al conjunto de datos empleados. Lamentablemente son insuficientes, para poder realizar inferencias sobre la población de dicha variable.

Luego de un análisis exhaustivo de los distintos agrupamientos (todas las estaciones, las estaciones al norte y sur del río Colorado, estaciones localizadas en los Andes Centrales, Andes Patagónicos y distintas combinaciones de ellas), se encontró la región homogénea para cada una de las 5 variables analizadas. Las estaciones que componen la región homogénea para cada una de las variables, los momentos **L** adimensionales del agrupamiento y heterogeneidad **H<sub>2</sub>**, se muestran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.-** Estaciones que conforman la región homogénea, para las variables analizadas, momentos **L** adimensionales y heterogeneidad **H<sub>2</sub>**.

Cuenca	Q <sub>a</sub>	Q <sub>v</sub>	Q <sub>o</sub>	Q <sub>i</sub>	Q <sub>p</sub>
<b>Mendoza</b>		VAC	VAC		
		CUE	CUE		
		TUP	TUP		
		GUI	GUI		
<b>Tunuyan</b>	UCO	UCO	UCO	UCO	UCO
<b>Diamante</b>	LJA	LJA	LJA	LJA	LJA
<b>Atuel</b>	PSO	PSO	PSO	PSO	PSO
	LNE	LNE	LNE	LNE	LNE
	CAN	CAN	CAN	CAN	CAN
	LAN	LAN	LAN	LAN	LAN
<b>Pincheyra</b>	PIN	PIN	PIN	PIN	PIN
<b>Grande</b>	COB	COB	COB		COB
	TOR	TOR	TOR		TOR
	LES	LES	LES		LES
		VAL			VAL
	CHI	CHI	CHI		
	PMA	PMA	PMA		PMA
	LGO	LGO	LGO		LGO
<b>Colorado</b>	BAR	BAR	BAR		BAR
	BRA	BRA	BRA		BRA
<b>T<sub>2</sub></b>	0.185	0.245	0.166	0.147	0.200
<b>T<sub>3</sub></b>	0.121	0.232	0.162	0.110	0.074
<b>T<sub>4</sub></b>	0.139	0.160	0.154	0.129	0.124
<b>H<sub>2</sub></b>	-0.02	0.03	-0.07	0.94	1.03

Para el caudal anual se incluyen las 15 estaciones de las cuencas de los ríos Tunuyan, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado; se excluye del agrupamiento a la estación **VAL** sobre el Valenzuela, afluente del Grande. Para el caudal de verano, el agrupamiento posee 20 estaciones, que se localizan en las cuencas de los ríos: Mendoza, Tunuyan, Diamante, Atuel, Pincheyra Grande y Colorado. El agrupamiento del caudal de otoño incluye 19 estaciones, de las cuencas de los ríos: Mendoza, Tunuyan, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado, excluyendo la estación **VAL**, porque se trata de un sitio discordante; si se grafican los valores de caudal de otoño ordenados de menor a mayor, se puede observar que la mayor observación se aparta considerablemente del resto de valores (**Figura 1**). El agrupamiento correspondiente a el caudal de invierno es pequeño, solo 7 estaciones de los ríos Tunuyan, Diamante, Atuel y Pincheyra, no pudiéndose identificar otro grupo, en el conjunto de estaciones analizadas. Para la variable caudal de primavera, el agrupamiento es ligeramente heterogéneo y está constituido por 15 estaciones de las cuencas de los ríos: Tunuyan, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado, excepto **CHI** sobre el río Chico, afluente del Grande: Al analizar la secuencia ordenada de caudales no se observa, que algún valor podría hacer discordante el sitio (**Figura 2**), probablemente se deba a que posee un registro muy corto.

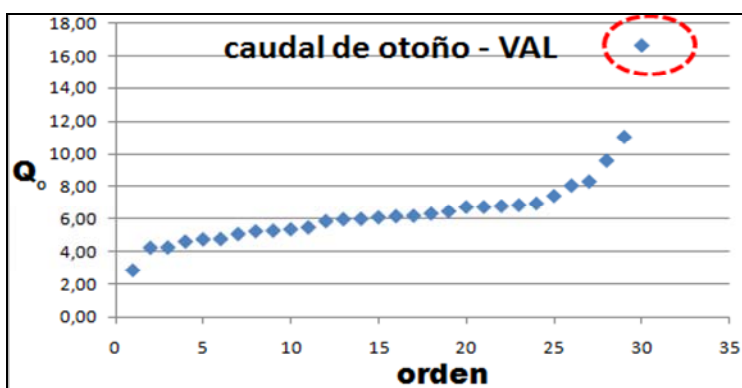


Figura 1.- Caudales de otoño ordenados para VAL, discordante, donde se observa una medida muy grande.

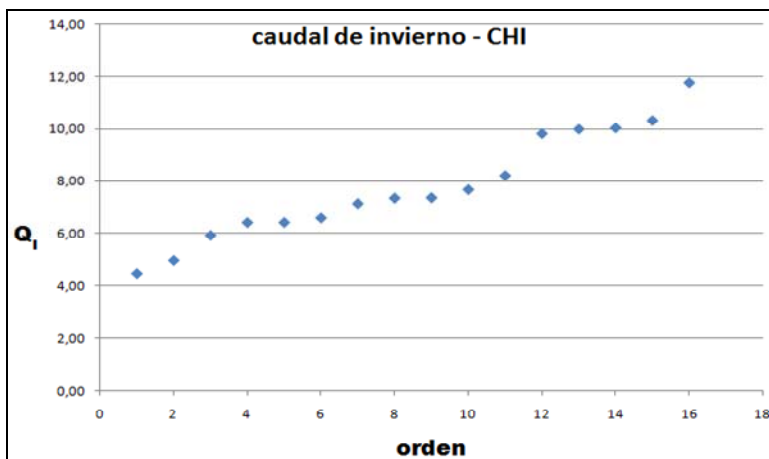


Figura 2.- Caudales de invierno ordenados para CHI, discordante, donde los caudales aumentan de manera abrupta no gradual.

Luego de comprobada la homogeneidad de la región propuesta para cada variable es necesario adoptar la función de distribución que mejor ajuste con los momentos  $L$  regionalizados a los datos observados, lo que se realiza con dos medidas de bondad de ajuste:  $Z^{DIST}$  y  $PUM_T$ . En cada caso, se seleccionan los 4 valores más pequeños de  $Z^{DIST}$  y los  $PUM_T$  correspondientes. Las funciones de distribución: Generalizada Normal y General de Valores Extremos son elegidas en todas las variables analizadas; Pearson 3, en las variables  $Q_{año}$ ,  $Q_I$  y  $Q_P$ ; la distribución Normal, en  $Q_I$  y  $Q_P$ ; y Gumbel y Exponencial para las variables  $Q_V$  y  $Q_O$ . Para cada variable,  $Z^{DIST}$  y  $PUM_T$  son jerarquizados, asignando el valor 1 para la medida más pequeña, 2 al segundo menor valor mas bajo y así sucesivamente hasta 4. Posteriormente, la función que presente simultáneamente los valores más bajo de jerarquía de  $Z^{DIST}$  y  $PUM_T$  es la que se adopta. Se tomó la función Pearson III, para los caudales  $Q_{año}$ ,  $Q_I$  y  $Q_P$  y Gumbel para  $Q_V$  y  $Q_O$ . La **Tabla 4** muestra los  $Z^{DIST}$ ,  $PUM_T$  para 4 recurrencias (50, 100, 500 y 1000 años) y los parámetros de curva de crecimiento adimensional para cada una de las variables analizadas.

Tabla 4.- medida de bondad de ajuste  $Z^{DIST}$  y  $PUM_T$  para recurrencia T de 50, 100, 500 y 1000 años y FD.

Cuenca	$Q_{año}$	$Q_V$	$Q_O$	$Q_I$	$Q_P$
FDR	PE3	GUM	GUM	PE3	PE3
Z	-0.87	0.86	-0.39	-0.20	-0.06
$\xi$	1.0000	0.7960	0.8614	1.0000	1.0000
$\alpha$	0.3345	0.3534	0.2402	0.2640	0.3566
k	0.7396			0.6740	0.4554
PUM 50	0.286	0.401	0.320	0.255	0.355
PUM 100	0.320	0.437	0.355	0.276	0.404
PUM 500	0.387	0.496	0.416	0.315	0.501
PUM 1000	0.412	0.516	0.437	0.330	0.537



Los cuantiles para las estaciones de la región homogénea se obtienen del producto entre las ordenadas de la curva de crecimiento regionalizada adimensional y la media de cada sitio. En la **Tabla 5**, se muestran los cuantiles correspondientes a un tiempo de retorno de 1000, 100 y 10 años, para las 5 variables analizadas.

**Tabla 5.-** Cuantiles para 1000, 100 y 10 de retorno, en  $m^3 \cdot s^{-1}$ . Análisis regional.

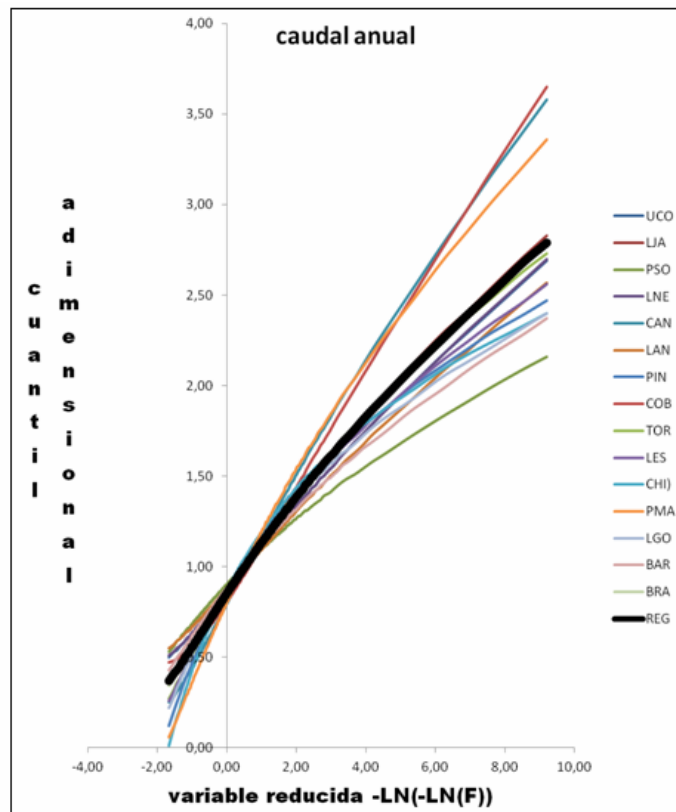
Cuenca	Est.	Q <sub>año</sub>			Q <sub>v</sub>			Q <sub>o</sub>			Q <sub>i</sub>			Q <sub>p</sub>		
Mendoza	VAC				23	17	11	6	5	4						
	CUE				35	26	17	10	8	6						
	TUP				154	115	74	30	24	18						
	GUI				264	198	127	66	53	39						
Tunuyan	UCO	68	56	41	162	121	78	37	30	22	24	20	15	89	74	56
Diamante	LJA	82	67	49	171	128	83	49	39	29	36	30	22	109	91	69
Atuel	PSO	98	80	59	222	166	107	62	50	37	43	36	26	117	98	74
	LNE	87	71	52	171	128	83	59	47	35	46	38	28	108	90	68
	CAN	25	21	15	39	29	19	13	10	7	12	10	7	45	37	28
	LAN	85	69	51	174	131	84	58	47	34	43	36	26	101	85	64
Pincheyra	PIN	13	11	8	26	20	13	8	7	5	7	5	4	17	14	11
Grande	COB	21	17	13	55	41	27	13	11	8				46	38	29
	TOR	27	22	16	47	35	23	8	7	5				29	24	18
	LES	91	74	55	164	123	79	41	33	24				159	132	100
	VAL				41	31	20							42	35	27
	CHI	32	26	19	39	29	19	15	12	9						
	PMA	20	16	12	20	15	9	10	8	6				37	31	23
Colorado	LGO	273	223	165	424	317	205	137	111	82				494	412	311
	BAR	89	73	54	125	94	61	59	47	35				142	118	89
	BRA	356	291	215	533	399	257	202	163	120				612	510	386

A modo de comparación, en la **Tabla 6** se muestran los cuantiles para 1000, 100 y 10 años de recurrencia calculados con la metodología tradicional y empleando la función de distribución hallada en el análisis regional.

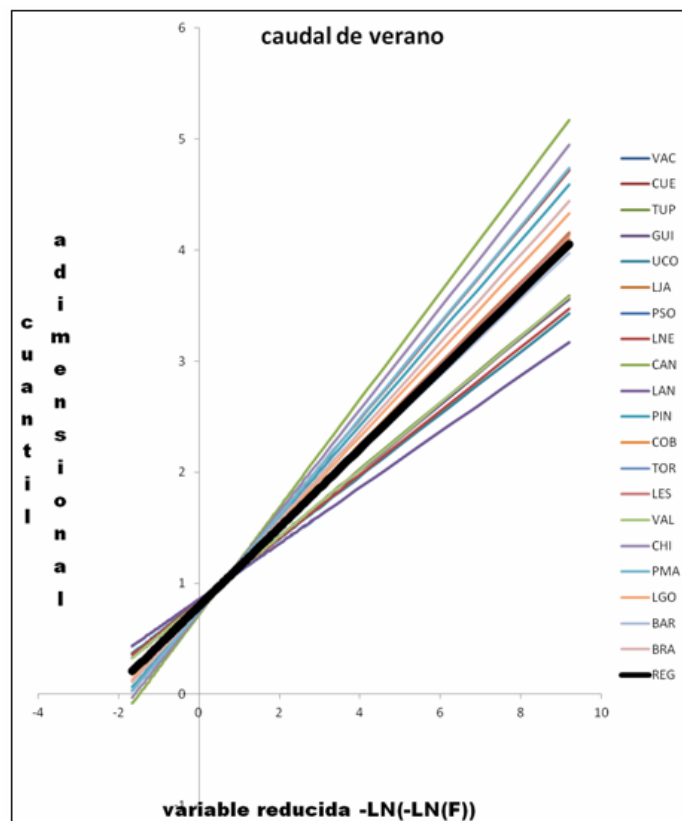
**Tabla 6.-** Cuantiles para 1000, 100 y 10 de retorno, en  $m^3 \cdot s^{-1}$ . Análisis tradicional

Cuenca	Est.	Q <sub>año</sub>			Q <sub>v</sub>			Q <sub>o</sub>			Q <sub>i</sub>			Q <sub>p</sub>		
Mendoza	VAC				22	17	11	7	5	4						
	CUE				39	28	18	11	8	6						
	TUP				133	101	69	29	23	17						
	GUI				227	173	118	70	55	39						
Tunuyan	UCO	67	54	40	134	103	71	34	27	20	24	20	16	88	73	55
Diamante	LJA	90	70	49	170	123	82	52	40	29	38	32	24	104	87	67
Atuel	PSO	61	59	53	172	133	82	51	42	32	37	33	27	97	84	67
	LNE	81	68	50	144	110	76	49	40	31	40	35	29	113	92	67
	CAN	31	25	17	47	34	21	17	12	8	15	12	9	55	44	31
	LAN	75	62	47	133	103	73	57	45	33	47	39	29	95	79	60
Pincheyra	PIN	12	10	8	28	21	13	9	7	5	6	5	4	17	14	11
Grande	COB	23	18	13	?	?	?	11	8	5				36	28	20
	TOR	26	22	16	?	?	?	16	12	8				42	36	28
	LES	93	75	55	161	120	79	39	31	23				169	140	103
	VAL				35	27	18							34	30	25
	CHI	28	25	20	45	33	20	13	11	8						
	PMA	23	20	13	22	16	10	11	9	6				57	43	28
Colorado	LGO	249	210	163	435	323	208	143	112	81				413	368	302
	BAR	77	65	51	?	?	?	?	?	?				107	96	81
	BRA	358	292	215	560	414	265	218	169	120				555	475	374

La **Figura 3** a **Figura 7** muestran la curva regional adimensional y la de cada sitio del agrupamiento, para cada una de las variables analizadas.



**Figura 3.** - Funciones de distribución Pearson III regional y para cada sitio del agrupamiento correspondiente al caudal anual  $Q_{año}$



**Figura 4.-** Funciones de distribución Gumbel regional y para cada sitio del agrupamiento correspondiente al caudal de verano  $Q_v$ .

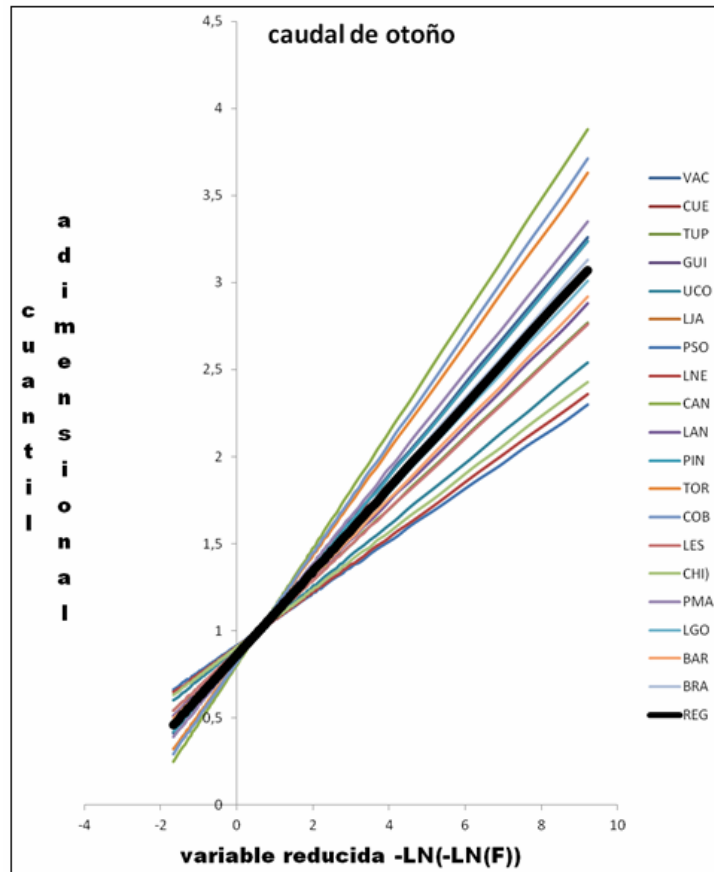


Figura 5.- Funciones de distribución Gumbel regional y para cada sitio del agrupamiento correspondiente al caudal de otoño  $Q_0$ .

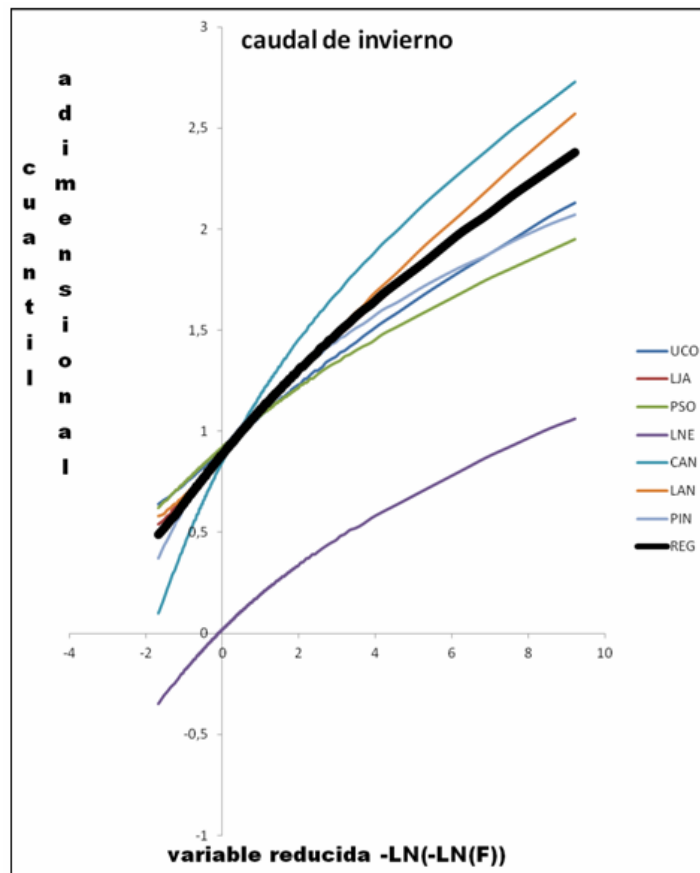
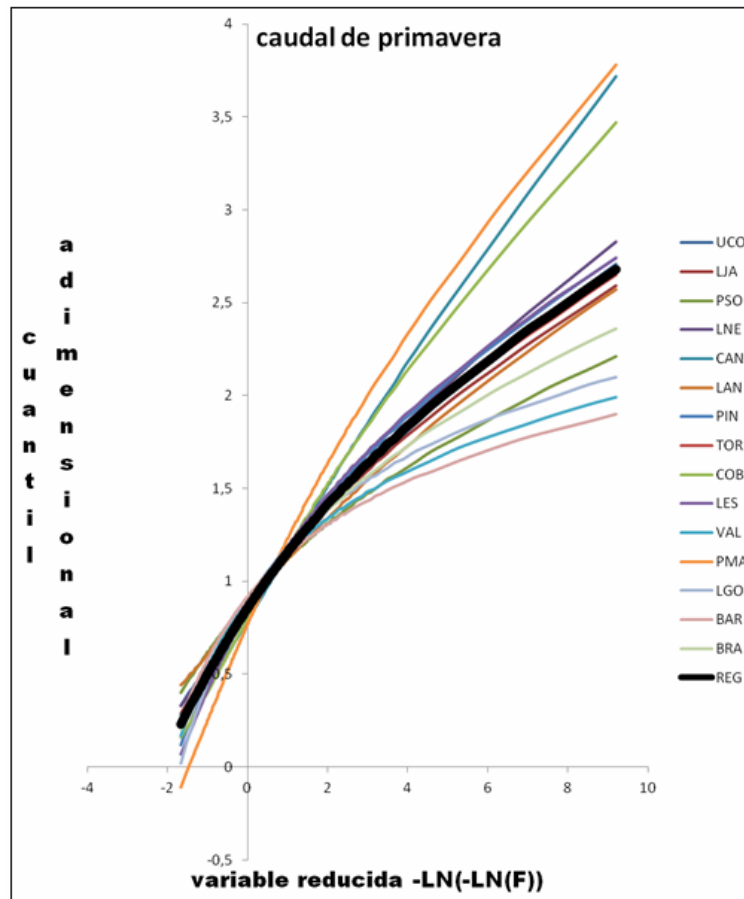


Figura 6.- Funciones de distribución Pearson III regional y para cada sitio del agrupamiento correspondiente al caudal de invierno  $Q_1$ .



**Figura 7.-** Funciones de distribución Pearson III regional y para cada sitio del agrupamiento correspondiente al caudal de primavera  $Q_p$ .

## CONCLUSIONES

El **AED** es imprescindible para la detección de errores, valores atípicos, verificación de supuestos básicos o faltas de homogeneidad en las series. En las estaciones del noroeste argentino, Pincheira, Barrancas, Colorado, Neuquén y Limay, no se han detectado valores atípicos en ninguna de las variables analizadas. Aparecen valores atípicos, para algunas variables, en las observaciones de los años: 1921-22, 1941-42, 1972-73, 1973-74, 1979-80, 1982-83, 1983-84, 1987-88, 1992-93, 1996-97, 1998-99 y 1998-00. Años donde el fenómeno El Niño tuvo una intensidad de moderada a severa) y difícilmente se puedan deber a errores en las mediciones, dado que la gran mayoría de las variables hidrológicas empleadas provienen de promedios de un conjunto de observaciones más o menos importantes. Por lo expuesto, en este trabajo no se los excluirá.

La condición de normalidad es rechazada en el 60 % de los casos, siendo el caudal de verano y otoño las variables que más falta de normalidad presentan; la ausencia de independencia y aleatoriedad ocurre en el 34 % de las series analizadas, destacándose el caudal de invierno y otoño, para un nivel de significación de  $\alpha = 5 \%$ .

Solo se presenta tendencia creciente en algunas variables y sitios de Los Andes desérticos y centrales y cambios graduales decrecientes en algunas variables y sitios de Los Andes patagónicos.

En general, el test **t** de Student Secuencial señala puntos de quiebre estadísticamente significativos de manera más frecuente que los otros test. Muchas veces se presentan saltos múltiples, que ningún test de los empleados los identifica. El test de Pettitt, que no identificó cambios abruptos. Debe recordarse que los test empleados, requieren la condición de normalidad en la distribución, aspecto

que solo se cumplen en el 40 % de los casos, lo que introduce un importante nivel de incertidumbre en los resultados. En general los caudales  $Q_{\text{año}}$ ,  $Q_I$  y  $Q_V$  muestran cambios abruptos en más del 65 % de los casos, el  $Q_P$ , solo en un 44 %. El salto en los valores medios generalmente se produce en la década de los 70.

En general, la estimación de los parámetros de las funciones de distribución empleando momentos regionales adimensionales es a menudo más eficiente que los métodos tradicionales de estimación en base a observaciones en un sitio, sobre todo cuando las series son relativamente cortas. El método de momentos  $L$  es un método de estimación de parámetros y cuantiles eficiente y computacionalmente conveniente. Sobre la base del empleo de los estadísticos  $Z^{\text{DIST}}$  y  $PUM_T$  la distribución Pearson III y Gumbel es la que presenta el mejor ajuste y sus cuantiles son generalmente, mayores que los derivados del análisis de frecuencia tradicional para cada sitio, con menores errores relativos en valores y frecuencias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Buishand, T. A.** (1982). "Some methods for testing the homogeneity of rainfall records", *Journal of Hydrology*, Vol. 58, pp. 11-17.
- FICH-UNL** (1990). *Adaptación para PC de programas de ajuste de modelos probabilísticos*. Informe inédito del proyecto 03-12 Análisis de Frecuencias de Crecida.
- Greenwood, J.A.; Landwehr, J.M.; Matalas, M.C. and Wallis, J.R.** (1979). "Probability weighted moments: Definitions and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form". *Water Resources Research*, Vol. 15, pp:1049-54.
- Gyau-Boakye, Philip.**(1993). *Filling gaps in hydrological runoff data*. Series in West África.
- Hamed. K.H. y A.R. Rao,** (1998). "A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data". *Journal of Hydrology*, Vol. 204. pp. 182-196.
- Hirsch. R.; J. Snack y R. Smith** (1982). "Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality data". *Water Resources Research*, Vol. 18, No 1, pp. 107-121.
- Hosking, J. R. M.** (1996). *Research Report: Fortran routines for use with the method of L-moments. Version 3*. IBM Research Division, RC 20525 (90933) 8/5/86.
- Hosking, J.R.M. and J. R. Wallis** (1997). *Regional Frequency Analysis. An approach based on L-Moments*. Cambridge University.
- Interagency Advisory Comité on Water Data.** (1982). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Bulletin 17 B, U.S. Department of Interior. Geological Survey. Office of Water Data Coordination.
- Kundzewicz. Zbigniew; and Robson. Alice.** (2000). *Detecting trend and other changes in hydrological data*. WCDMP-45. WMO/TD No 1013, Geneva.
- Landwerh, J.M.; Matalas, N.C. and Wallis, J.R** (1979). "Probability-weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles". *Water Resources Research* Vol. 15, pp.1055-64.
- Lettenmaier, D.; Wallis, J.; Wood, S.** (1987). "Effect of regional heterogeneity on flood frequency estimation". *Water Resources Research* Vol. 23, No. 2, pp. 313-323.
- Paoli C., Cacik P.** (2000). *Régimen de crecidas y análisis de caudales máximos*. En: Paoli C. y Schreider M. (eds). El río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura. Centro de Publicaciones. Universidad Nacional del Litoral.
- Pettitt, A. N.** (1979). "A nonparametric approach to the change-point problem". *Applied Statistics*, Vol. 28, pp. 126-135.
- Remington R. y Schork. A.** (1974). *Estadística biométrica y sanitaria*, Prentice Hall Internacional, Madrid.
- Salas. J. D.** (1992). *Analysis and modelling of hydrologic time series*, Maidment, David (ed) Handbook of Hydrology. MacGraw-Hill.
- U.S. Army Corps of the Engineers.** (2001). *Performance Evaluation (PE) Program*. Engineer Manual 200-1-7.
- Vich. A. y López P. M.** (2000). "Detección de tendencias en el régimen hídrica de los principales ríos de la provincia de Mendoza (Argentina)". Anales del XX Congreso Nacional del Agua.

**Westmacott, J. y Burn D.** (1997). "Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Curchill Nelson River Basin". *Journal of Hydrology*, Vol. 202, pp. 263-279.

**Worsley, K. J.** (1979). "On the likelihood ratio test for a shift in location of normal populations". *Journal of American Statistic Associations*, Vol. 74, pp. 365-367.

**Yue, Sheng, Pilon P., Cavadias G.** (2002). "Power de Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series". *Journal of Hydrology*, Vol. 259, pp.254-271.

## CARACTERIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DE 5 DÍAS DE DURACIÓN EN LA PAMPA HÚMEDA

**Gerardo Riccardi<sup>(1)(2)</sup>, Erik Zimmermann<sup>(1)(3)</sup>, Pedro Basile<sup>(1)</sup>, Hernán Stenta<sup>(1)</sup> y Carlos Scuderi<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Departamento de Hidráulica, Fac. de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario

<sup>(2)</sup> Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario

<sup>(3)</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

e-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

**RESUMEN:** En el diseño de estructuras hidráulicas para protección ante inundaciones como así también en el desarrollo de medidas no estructurales, es de importancia la consideración de tormentas extremas de larga duración. En cuencas hidrográficas de la región de Rosario, con extensiones superficiales superiores a los 400 km<sup>2</sup>, se comprueba que las tormentas de larga duración (2 a 5 días) resultan ser las críticas al evaluar caudales y niveles máximos como así también permanencia de niveles, especialmente en zonas de cuenca baja. Con el objeto de contribuir a la temática, se presenta un abordaje sobre la determinación de las características de la distribución temporal de tormentas de larga duración, analizadas en forma puntual en estaciones de la pampa ondulada en un área de aproximadamente 100000 km<sup>2</sup>. En rigor la variable considerada no correspondió en todos los casos a tormentas de 5 días de duración sino que se trata del acumulado de lámina en 5 días superior a un cierto umbral fijado en 100 mm. Al momento se han utilizado solo datos provenientes de la red del Servicio Meteorológico Nacional en 7 estaciones de la región, dado que existe consistencia en la definición de cada uno de los periodos de 24 hs de lluvia de 9 a 9 de la mañana. Los valores medios anuales de las estaciones están en el rango de los 890 mm al oeste hasta 1100 mm al este y al norte. Los resultados son presentados en la forma de familias de curvas clasificadas en lluvias con máximo en 1er, 2do, 3er, 4to y 5to día. Las distribuciones temporales son expresadas como porcentajes acumulados de la lluvia total y para cada uno de los 5 días de duración del evento lluvioso. Las curvas individuales determinadas en cada estación y para cada día de la duración del evento, proveen información para la estimación de las características de la distribución temporal en la forma de probabilidad de excedencia en un rango entre 10% a 90%. Si bien puede considerarse que la curva con mayor utilidad y representatividad es la curva media, las curvas asociadas a probabilidades de excedencia de 10% y 90% son útiles para estimaciones de escurrimiento en los tipos más extremos de distribuciones temporales. El análisis no involucró aspectos de la distribución subdiaria de la precipitación. Considerando la totalidad de las tormentas, en el 57% los días con máxima precipitación son el 1er o el 2do día, en tanto que en el resto la presencia del mayor día de precipitación se reparte aproximadamente en forma uniforme entre el 3er, 4to y 5to día. Además, se verifica que el valor medio de la relación porcentual entre los valores de cada día y la precipitación total son de 36%; 20%; 15%; 15% 15% desde el 1er. al 5to día respectivamente. Las relaciones determinadas pueden ser empleadas tanto para el diseño hidrológico como para la validación de las obras estructurales y medidas no estructurales proyectadas para la protección de la población ante inundaciones.

**PALABRAS CLAVE:** tormenta de diseño, tormentas de larga duración, distribución temporal, lluvias en la Pampa Húmeda.

## INTRODUCCIÓN

Diversos autores como Hershfield (1962), Huff (1967, 1970, 1990) entre otros, describieron la distribución temporal interna de tormentas intensas mediante la distribución porcentual de lámina acumulada en función del porcentaje acumulado de duración.

Huff (1967, 1970, 1990) desarrolló un método para determinar la distribución porcentual acumulada del total de lámina en función del porcentaje de duración. Clasificó las tormentas en 4 grupos de acuerdo al tiempo de presentación del barrote máximo. Los estudios fueron realizados en el estado de Illinois (Estados Unidos).

Keifer y Chu (1957) plantearon distribuciones a partir de la ubicación temporal de la máxima intensidad instantánea y su decaimiento en función de la IDR. De aquí resultó el conocido método de Chicago, el cual fue desarrollado originalmente para cuencas urbanas. Una variante discreta de este método puede considerarse el también conocido método de los bloques alternos (Chow et al., 1994) siempre y cuando se considere igual posicionamiento del pico del hietograma en ambos métodos.

Pilgrim, Cordery y French (1969) y Pilgrim y Cordery (1975) desarrollaron un método ampliamente utilizado en Australia. Se basa en el ordenamiento por intervalos y el promediado de los porcentajes acumulados de igual número de orden.

Eagleson (1970) en sus trabajos sobre normalización afirmó que para determinadas condiciones climáticas, las tormentas de una escala dada (micro, meso o escala sinóptica) presentan una distribución temporal similar cuando se las normaliza respecto a la lámina de precipitación total y a la duración.

Koutsoyiannis and Foufoula-Georgiou (1993) abordaron el escalamiento proponiendo un modelo sencillo de escalado para caracterizar la distribución temporal de la intensidad y la lámina instantánea incremental en un evento de tormenta. Tiempo atrás Gupta y Waymire (1991) habían ya afirmado que un proceso natural cumple con la propiedad de escalado simple, si la distribución de probabilidad de una variable física en una escala es idéntica a la distribución a otra escala, multiplicado por un factor que es una función de potencia de la relación de las dos escalas.

Dasso y Garcia (2003) propusieron un procedimiento de distribución temporal interna basados en los Intervalos de Máxima Intensidad Anual (IMA) (Caamaño Nelli, Garcia y Dasso, 1999), donde los hietogramas coinciden conceptual y temporalmente con la lámina a distribuir y reflejan de manera más verosímil los patrones históricos. El IMA fue empleado entre otros casos en estudios de precipitaciones en la provincia de Córdoba.

Toda la bibliografía recopilada aborda las distribuciones del acumulado de lámina precipitada para duraciones comprendidas en el rango de unos pocos minutos a no más de 72 hs, por lo que este estudio se considera un primer avance en la caracterización de estos eventos lluviosos de duraciones de 5 días. Cabe agregar que, en muchos de los abordajes, duraciones superiores a 72 hs no son consideradas puesto que, episodios lluviosos de mayor duración no han sido observados a lo largo de las series temporales disponibles, resultando el máximo de 4 y 5 días de duración con valores similares al máximo en 72 hs, descartándose por ello su análisis. También debe destacarse que la mayoría de los estudios existentes respecto a distribuciones temporales internas de la lluvia corresponde a eventos continuos de lluvias, definidos en casos como “aguaceros” o “chaparrones”. En este sentido el presente estudio, siguiendo la misma metodología empleada para el estudio de la distribución interna de aguaceros, intenta indagar en otro tipo de episodios de una duración



determinada (5 días) , en la cual la precipitación no es continua y donde se conforman con una sucesión de aguaceros de variadas intensidades y duraciones.

## DESARROLLO DEL TRABAJO

### Datos empleados

El trabajo se comenzó a desarrollar originalmente con datos de precipitación cada 24 horas, provenientes desde 9 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2009), 1 estación de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH, 2009) y con 1 estación de la Agencia de Extensión Rural INTA de Casilda (AER Casilda, 2009) En esta etapa del trabajo se consideró solamente estas estaciones pues se contaba con la certeza de que se registraron valores cada 24 horas y de 9 a 9 de cada día y con el mismo tipo de pluviómetro. En etapas futuras se aspira a incorporar un gran número de estaciones del sur de la provincia de Santa Fe con pluviometría diaria también disponibles pero sin la estandarización del SMN.

Las series de las 9 estaciones originalmente seleccionadas del SMN tienen longitudes temporales diferentes por lo que se resolvió tomar en consideración aquellas que tuvieran una longitud al menos superior a los 40 años. Tras este filtrado de longitudes, resultaron 7 estaciones emplazadas en aproximadamente 100000 km<sup>2</sup> (ver Figura 1). Lo aquí reportado comprende el análisis la serie hasta el año 2008.

Las estaciones pluviométricas en estudio, su ubicación geográfica y el período con disponibilidad total o parcial de datos se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.-** Estaciones de estudio

Denominación	Origen	Latitud	Longitud	Período
Casilda (CA)	E.A.Casilda	33 02 38 S	61 10 40 O	1958-2008
Gualedaychu (GU)	SMN	33 00 59 S	58 31 07 O	1962-2008
Junin (JU)	SMN	34 34 56 S	60 57 02 O	1959-2008
Marcos Juarez (MJ)	SMN	32 41 38 S	62 06 13 O	1967-2008
Paraná (PA)	SMN	31 47 22 S	60 29 02 O	1953-2008
Rosario Aero (RA)	SMN	32 54 57 S	60 46 49 O	1937-2008
Sauce Viejo (SV)	SMN	31 42 34 S	60 48 22 O	1965-2008

En la Figura 1 se presenta la ubicación geográfica de las estaciones georeferenciadas en coordenadas planas (Gauss Krugger faja 5), conjuntamente con la graficación de la isohietas de lluvia media anual.

### Definición de la variable analizada

La variable para lo cual se construyeron las distribuciones temporales, se trató de la lluvia acumulada en agrupamientos de 5 días consecutivos (P5d), con el primer día de lluvia no nula y con acumulado al 5to día mayor o igual a 100 mm. Sobre estos agrupamientos adoptados se estudiaron los acumulados al 1er, 2do, 3er, 4to y 5to día. Adicionalmente fueron estimadas algunas características para lluvias acumuladas en 5 días consecutivos con umbrales de 150 mm y 200 mm.

En la Tabla 2a se presenta para cada estación, las cantidades de eventos observados con la definición antes mencionada ( $P5d \geq 100$  mm). Se especifica los eventos observados en la serie total disponible y en un período de 41 años (1967 a 2008), en el cual todas las estaciones registraron datos simultáneamente en más de un 98% de los días. En la misma tabla se presenta el valor medio

de número de eventos por año. En Tablas 2b y 2c se presenta la misma información deducida para  $P5d \geq 150$  mm y  $P5d \geq 200$  mm respectivamente.

**Tabla 2a.-** Número de eventos en las estaciones de estudio  $P5d \geq 100$  mm

Estación	desde	Nro. eventos	Eventos/año	Nro. de eventos desde 1967	Eventos/año	Cant. de años sin datos o incompletos
CA	1958	85	1.73	77	1.93	1
GU	1962	78	1.70	70	1.71	0
JU	1959	66	1.35	56	1.37	0
MJ	1967	42	1.08	41	1.05	2
PA	1953	89	1.65	79	1.98	1
RA	1937	105	1.48	60	1.46	0
SV	1965	60	1.46	56	1.44	2
Promedio			1.49		1.56	

**Tabla 2b.-** Número de eventos en las estaciones de estudio  $P5d \geq 150$  mm

Estación	desde	Nro. eventos	Eventos/año	Nro. de eventos desde 1967	Eventos/año
CA	1958	21	0.43	18	0.45
GU	1962	21	0.46	18	0.44
JU	1959	15	0.31	13	0.32
MJ	1967	7	0.18	7	0.18
PA	1953	28	0.52	25	0.63
RA	1937	27	0.38	17	0.41
SV	1965	16	0.39	15	0.38
Promedio			0.38		0.40

**Tabla 2c.-** Número de eventos en las estaciones de estudio  $P5d \geq 200$  mm

Estación	desde	Nro. eventos	Eventos/año	Nro. de eventos desde 1967	Eventos/año
CA	1958	8	0.16	7	0.18
GU	1962	10	0.22	8	0.20
JU	1959	9	0.18	7	0.17
MJ	1967	2	0.05	2	0.05
PA	1953	10	0.19	10	0.25
RA	1937	6	0.08	3	0.07
SV	1965	8	0.20	8	0.21
Promedio			0.15		0.16

### Acumulado total de lluvia en 5 días y secuencia temporal observada

Una primer característica de interés resulta el total acumulado máximo de la lluvia a lo largo de 5 días consecutivos, estos valores se presentan en la Tabla 3 y se grafican a modo ilustrativo en la Figura 2, donde también consta la ubicación geográfica de las 7 estaciones en estudio.

**Tabla 3.-** Valores máximos en cada estación de  $P5d$

Estación	CA	GU	JU	MJ	PA	RA	SV
$P5d$ máximo (mm)	243	407	273	323	349	365	315

La secuencia temporal de presentación de agrupamientos de 5 días consecutivos con lluvia acumulada superior a los umbrales definidos se presentan en las Figuras 3 y 4 (a,b y c). La Figura 3 corresponde a la secuencia en cada una de las estaciones de eventos con  $P5d \geq 100$  mm. La Figura 4a. corresponde al conjunto de eventos con  $P5d \geq 100$  mm, la Figura 4b corresponde al conjunto asociado a  $P5d \geq 150$  mm, en tanto que en la Figura 4c se presentan los eventos agrupados para el

caso de  $P5d \geq 200$  mm. En cada caso también se presenta la graficación del promedio de eventos/año. En la Figura 5 se presenta la tendencia del valor medio interanual de cantidad de eventos al año y por estación de  $P5d \geq 100$  mm. Puede inferirse que la tendencia del número de eventos tras un ajuste lineal, aumenta levemente en un 0.8% anual.

### Clasificación según posición del día de mayor lluvia

Una vez extraídas las variables muestrales de las series de cada estación se procedió a clasificarlas de acuerdo al día de presentación del día con mayor lámina, resultando conformados subgrupos de variables con máximo en el 1er., 2do., 3er., 4to y 5to. día. En las Tablas 4 (a, b y c) y Figuras 6 (a, b y c) y se presentan y grafican los porcentajes de eventos con máximos en cada uno de los días. Para el umbral de  $P5d \geq 100$  mm corresponde Tabla 4a y Figura 6a,  $P5d \geq 150$  mm Tabla 4b y Figura 6b, en tanto que para  $P5d \geq 200$  mm corresponde Tabla 4c y Figura 6c. En la Figura 7 se presenta una síntesis de los porcentajes según la clasificación y según el umbral dado.

**Tabla 4a.-** Porcentajes de eventos según el día de presentación del máximo  $P5d \geq 100$  mm

Estación	Con máximo en 1er día (%)	Con máximo en 2do día (%)	Con máximo en 3er día (%)	Con máximo en 4to día (%)	Con máximo en 5to día (%)
CA	50.00	16.67	15.48	8.33	9.52
GU	25.00	31.58	9.21	15.79	18.42
JU	29.23	21.54	18.46	12.31	18.46
MJ	35.71	21.43	19.05	11.90	11.90
PA	35.96	19.10	15.73	14.61	14.61
RA	37.50	17.31	18.27	12.50	14.42
SV	40.00	21.67	11.67	10.00	16.67
Promedio	36.20	21.33	15.41	12.21	14.86

**Tabla 4b.-** Porcentajes de eventos según el día de presentación del máximo  $P5d \geq 150$  mm

Estación	Con máximo en 1er día (%)	Con máximo en 2do día (%)	Con máximo en 3er día (%)	Con máximo en 4to día (%)	Con máximo en 5to día (%)
CA	52.4	23.8	9.5	9.5	4.8
GU	9.5	23.8	9.5	33.3	23.8
JU	28.6	21.4	21.4	7.1	21.4
MJ	57.1	0.0	28.6	14.3	0.0
PA	42.9	17.9	10.7	14.3	14.3
RA	25.9	18.5	33.3	14.8	7.4
SV	25	37.5	12.5	12.5	12.5
Promedio	34.49	20.42	17.94	15.13	12.03

**Tabla 4c.** Porcentajes de eventos según el día de presentación del máximo  $P5d \geq 200$  mm

Estación	Con máximo en 1er día (%)	Con máximo en 2do día (%)	Con máximo en 3er día (%)	Con máximo en 4to día (%)	Con máximo en 5to día (%)
CA	62.5	37.5	0.0	0.0	0.0
GU	10.0	37.5	0.0	62.5	12.5
JU	33.3	11.1	11.1	11.1	33.3
MJ	50.0	0.0	0.0	50.0	0.0
PA	10.0	20.0	20.0	20.0	30.0
RA	60.0	20.0	20.0	0.0	0.0
SV	12.5	37.5	25.0	12.5	12.5
Promedio	34.05	23.37	10.87	22.30	12.62

## Distribuciones internas y asociación a probabilidades de excedencia

Para el caso de la muestra definida para  $P5d \geq 100$  mm, los valores porcentuales de acumulados de lluvia parciales desde el 1er. al 5to. día en cada uno de los subgrupos asociados a la presentación del día de máxima lamina fueron ajustados con distintos modelos probabilísticos resultando el de Valor extremo Tipo I (Gumbel) el que mejor ajusta en la mayor cantidad de series de valores de porcentuales acumulados, a las distribuciones determinadas mediante la aplicación del método de Huff (1967) original. A partir de la aplicación del modelo de Gumbel, se construyeron en cada estación y para cada subgrupo (según día de presentación del máximo) curvas asociadas a probabilidades de excedencia entre 10% y 90%. Conjuntamente fueron también determinados los intervalos de confianza para un nivel de confianza del 90%. En la Figura 8 (a, b, c, d, e, f y g) se ilustran todas las curvas de distribuciones temporales internas asociadas a las diferentes probabilidades de excedencia. Las curvas se determinaron por estación y en cada estación en cada subgrupo de acuerdo a la clasificación según el día de presentación del máximo día de lluvia. En cada estación la ilustración se completa con un gráfico de síntesis donde se presentan las curvas de excedencia de 50%.

A los efectos de indagar respecto a las diferencias de distribución interna entre estaciones se compararon las distribuciones 50% de excedencia. Pudo comprobarse que en los acumulados parciales no se observan diferencias sustanciales entre estaciones cuando se compara cada curva individual con el promedio de todas las estaciones, la diferencia máxima se valoriza en 6.7% para las curvas con máximo en el 1er y 2do día. En lo que respecta a la comparación de las curvas correspondientes a distribuciones con máximos en el 3er al 5to día, la diferencia máxima se valoriza en un 16%, siendo el subgrupo que se observa con mayores diferencias entre estaciones el correspondiente a las serie de 5 días con máxima lluvia en el 4to día. En la Figura 9 se ilustran las comparaciones de 5 de las 7 (por simplificación del gráfico) series procesadas.

En orden a comparar con distribuciones generadas por otros métodos se determinaron las distribuciones internas aplicando el método de Pilgrim (Pilgrim et al., 1969). El método de Pilgrim propone el ordenamiento por intervalos y el promediado de los porcentajes acumulados de igual número de orden, resultando en una única distribución interna. En el caso de las estaciones aquí analizadas el mayor día de lluvia según Pilgrim resultó el 1er día, y el porcentaje de lluvia asociada a ese día fue cercano al 60%, valor algo superior al que se deduce de la metodología aquí propuesta cuando se consideran eventos lluviosos con máximo en el 1er. día. Además, el método de Pilgrim también define valores superiores para el acumulado en el 2do. día (siempre considerando los eventos lluviosos con máximos en el 1er. día) y subestima (respecto a la metodología aquí propuesta) los valores parciales del 3er., 4to. y 5to día. En la Figura 10 se ilustran la comparación de la metodología aquí presentada, la propuesta original de Huff para (10%, 50% y 90% de excedencia), ambas aplicada al grupo de eventos con máxima lluvia en el 1er. día y el método de Pilgrim.

## CONCLUSIONES

En el 57% de las tormentas los días con máxima precipitación son el 1er o el 2do día, en tanto que en el resto la presencia del mayor día de precipitación se reparte aproximadamente en forma uniforme entre el 3er, 4to y 5to día.

Se verifica que el valor medio de la relación porcentual entre los valores de cada día y la precipitación total son de 36%; 21%; 15%; 13% 15% desde el 1er. al 5to día respectivamente.

Si bien se trata de agrupamientos de días con lluvias y no tormentas en el sentido propiamente dicho, las distribuciones temporales muestran una cierta similitud con patrones normalizados de tormentas de corta duración.

La distribución de valores extremos tipo I (Gumbel) resultó apta en más del 90% de las distribuciones modeladas al compararse con las distribuciones empíricas del método de Huff (1967).

La variante del método de Huff aquí presentada, se comporta en forma razonable para la determinación de la función de distribución acumulada de la lámina.

Al componer un hietograma de diseño, el valor porcentual de lámina en el mayor barrote según bloque alterno, Pilgrim o variante de Huff da como resultado valores semejantes en el orden de 60%  $\pm$  3%. Pilgrim estima por encima el 2do. máximo.

Desde el punto de vista del diseño hidrológico, al combinar la probabilidad de presentación del máximo en un determinado día y la distribución acumulada de la lámina, se generan un grupo de tormentas “equiprobables” las cuales deberían ser todas combinadas con las condiciones antecedentes adoptadas y consideradas en la transformación lluvia-caudal.

Las relaciones determinadas pueden ser empleadas tanto para el diseño hidrológico como para la validación de las obras estructurales y medidas no estructurales proyectadas para la protección de la población ante inundaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AER Casilda (Agencia de Extensión Rural INTA de Casilda)** (2009). “Lluvias diarias en estación Casilda”. Reporte electrónico de datos, Casilda.
- Caamaño Nelli, G., C. García y C. Dasso** (1999). “Hietograma Puntual de Diseño: correspondencia entre la Estimación y la Distribución de la Altura de Lluvia”. *Memorias del XIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, 157-168, Santiago, Chile.
- Chow, V.T-, D. Maidment y L. Mays** (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia.
- Dasso, C. y C. García** (2003). *Distribución Temporal Interna: Intervalos de Máxima Intensidad en Lluvias de Diseño* (Caamaño Nelli G y Dasso C., 2003), Universitas, 161-171, Córdoba.
- Eagleson, P.** (1970). *Dynamic Hydrology*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Gupta, V. and E. Waymire** (1991). *On lognormality and scaling in spatial rainfall average? Non-linear Variability in Geophysics: Scaling and Fractals* (D. Schertzer and S. Lovejoy, Eds.), Kluwer Academic, 175-183.
- Hershfield, D.** (1962). “Extreme Rainfall Relationships”. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 88, 6, 73-92, New York, USA.
- Huff, F.** (1967). “Time Distribution of Rainfall en Heavy Storms”. *Water Resources Research*, Vol. 3, 4, 1007-1019, USA.
- Huff, F.** (1970). “Time Distribution of Rainfall Rates”. *Water Resources Research*, Vol. 6, 2, 447-454, USA.
- Huff, F.** (1990). “Time Distribution of Heavy Rainstorms in Illinois”, *Circular 173 Illinois State Water Survey*, Illinois, USA.
- Keifer, C., and H. Chu** (1957). “Synthetic Storm Pattern for Drainage Design”. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 83, 4, 1-25, USA.
- Koutsoyannis, D. and E. Foufoula-Georgiou** (1993). “A scaling model of storm hietograph”. *Water Resources Research*, Vol. 29, 7, 2345-22361, USA.
- Pilgrim, D., I. Cordery and R. French** (1969), “Temporal Patterns of Design Rainfall for Sydney”. *Civil Engi. Transactions*, Vol. CE 11, 1, The Institution of Engineers, Sydney, Australia.
- Pilgrim, D and I. Cordery** (1975). “Rainfall Temporal Patterns for Design Flood”, *Journal of Hydraulics División, ASCE*, Vol. 101, Hy1, 81-95, USA.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional)**, (2009). “Lluvias diarias en las Estaciones Gualaguaychú, Junín, Marcos Juárez, Rosario Aero, Sauce Viejo y Paraná”. Reporte electrónico de datos, Buenos Aires, Argentina.

SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación) (2009). “Lluvias diarias en la Estación Coronel Bogado”. Reporte electrónico de datos, Buenos Aires, Argentina.

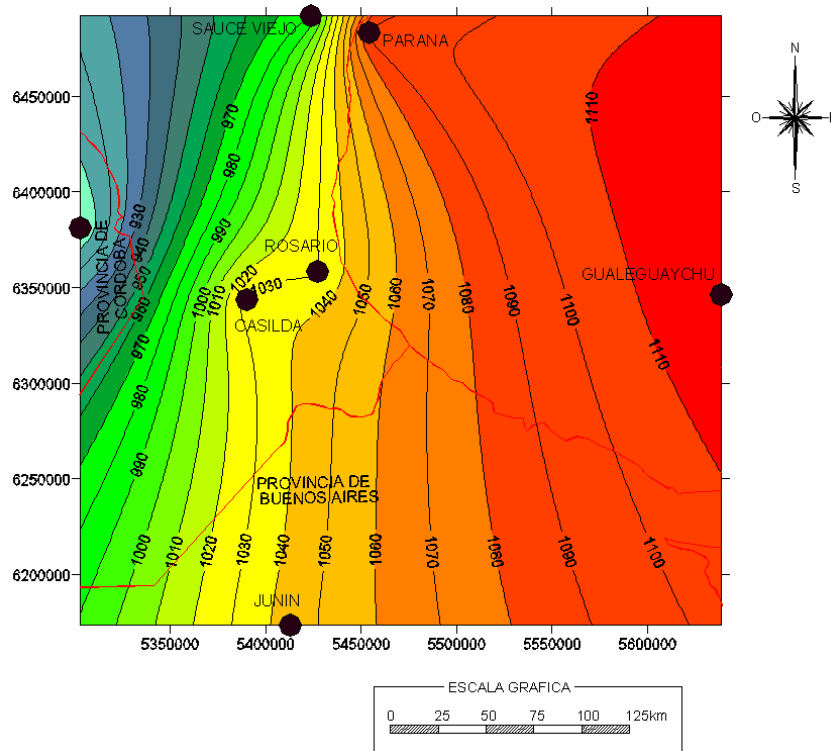


Figura 1.- Ubicación geográfica de las estaciones e isohietas de lluvia media anual.

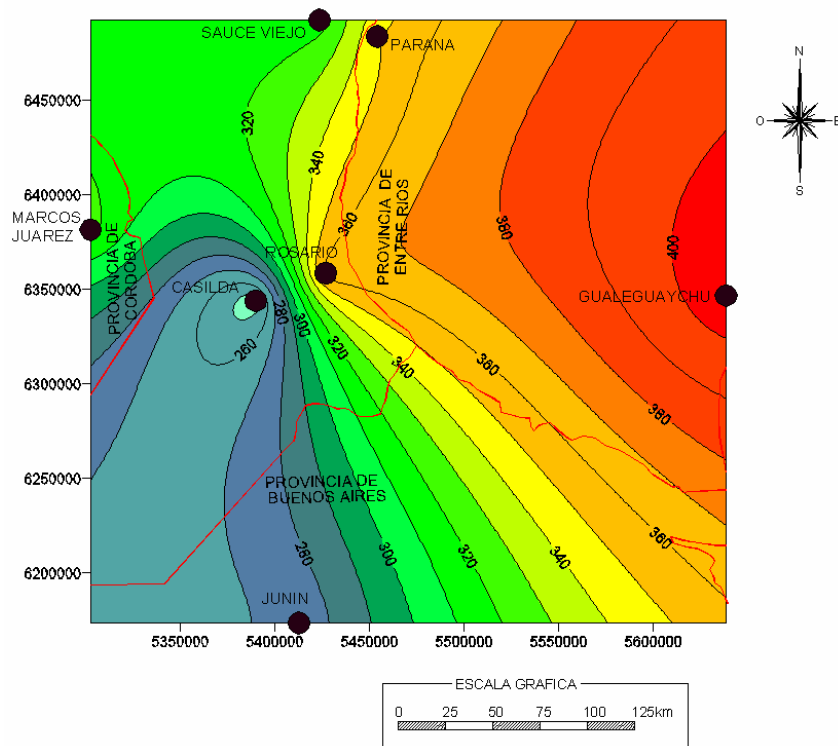


Figura 2.- Máximos de lluvias en agrupamientos de 5 días.

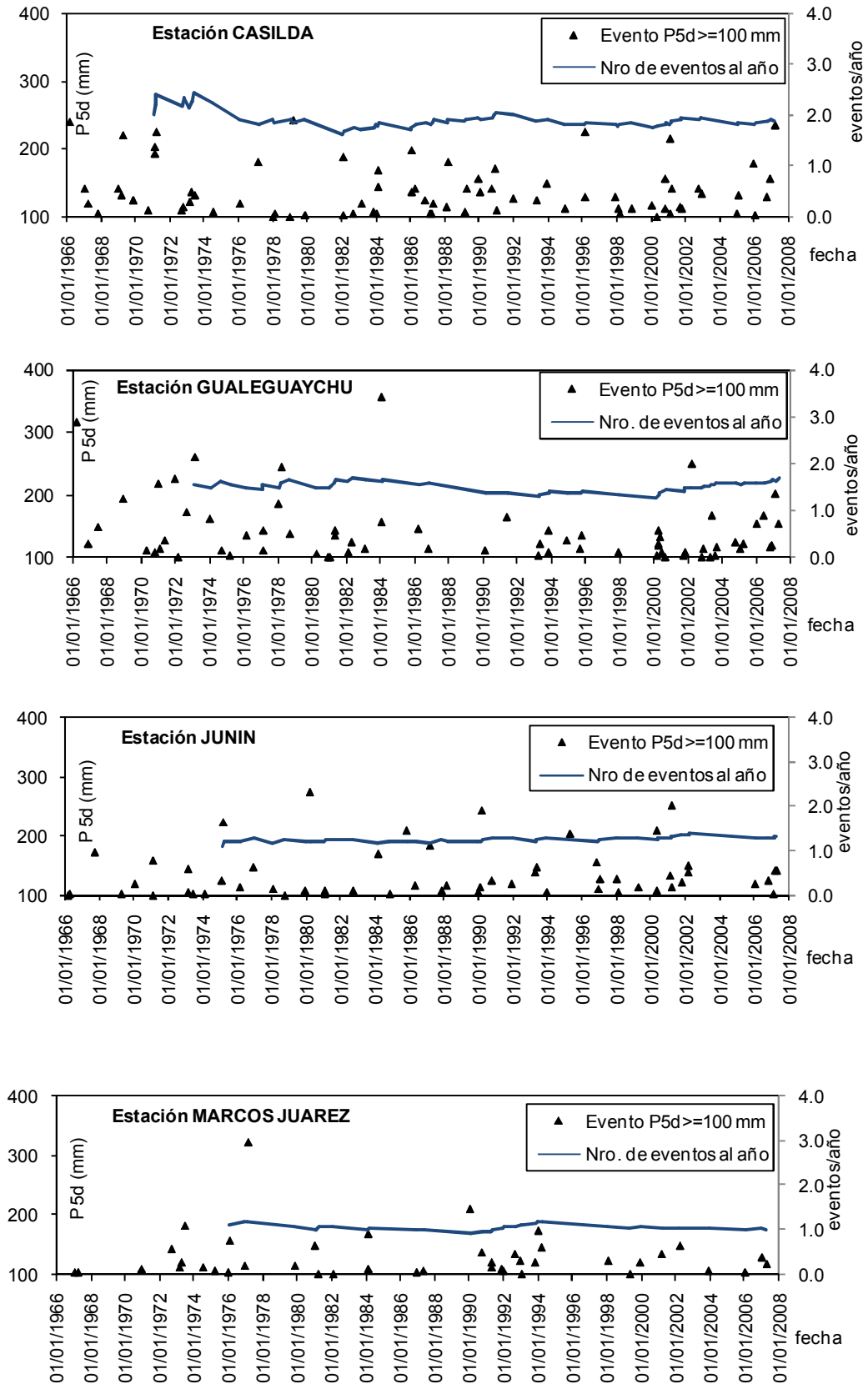


Figura 3.- Secuencia temporal de eventos con  $P_{5d} \geq 100$  mm y nro. de eventos en cada año (continúa en página siguiente).

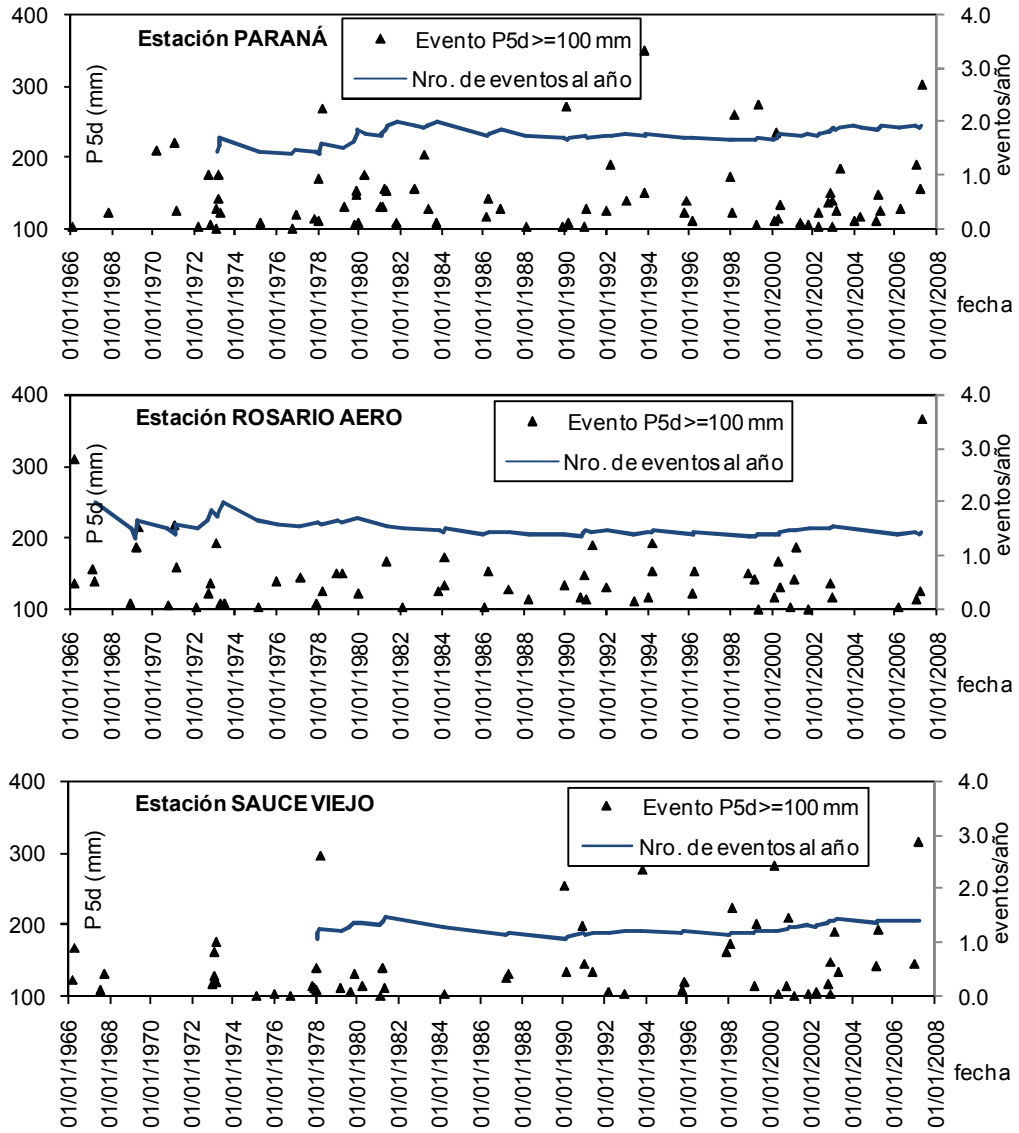


Figura. 3.- Secuencia temporal de eventos con  $P_{5d} \geq 100$  mm y nro. de eventos en cada año.

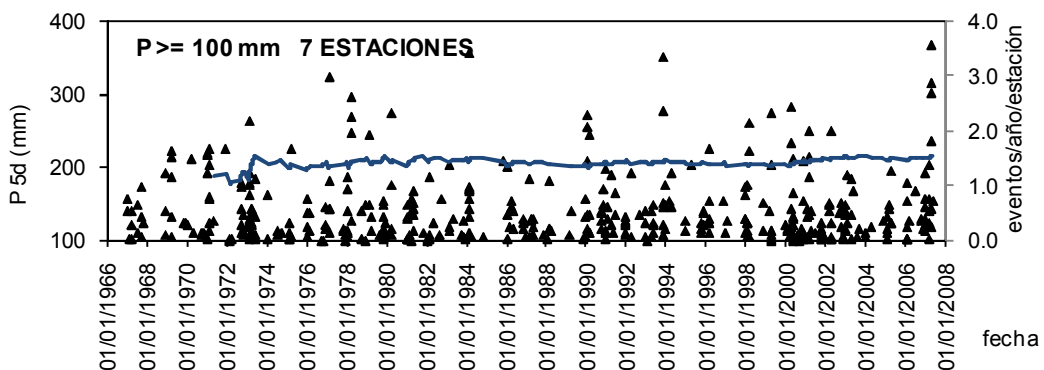
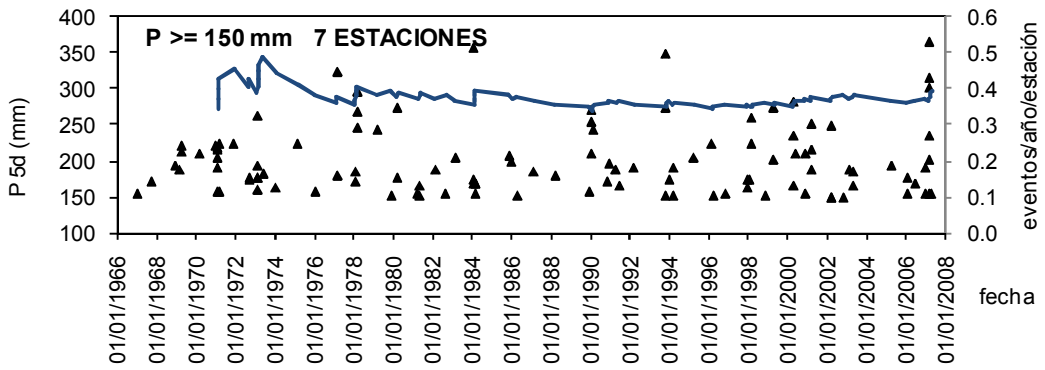
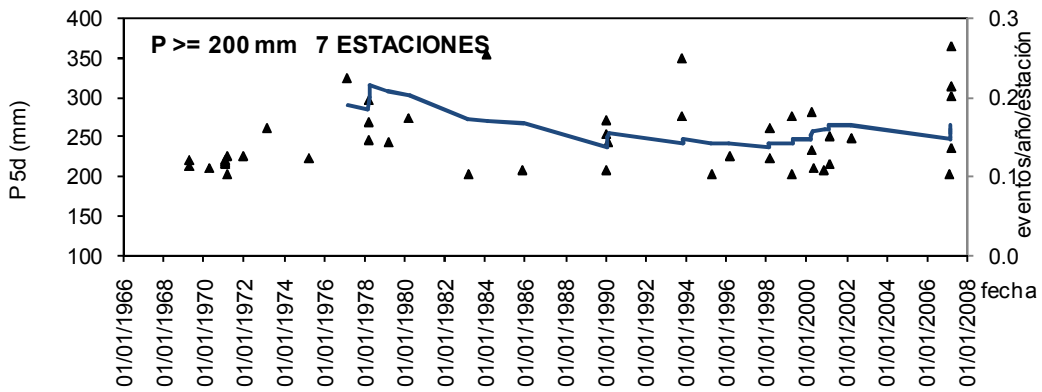


Figura 4a.- Secuencia temporal de eventos con  $P_{5d} \geq 100$  mm y valor medio de eventos al año en las 7 estaciones en conjunto.

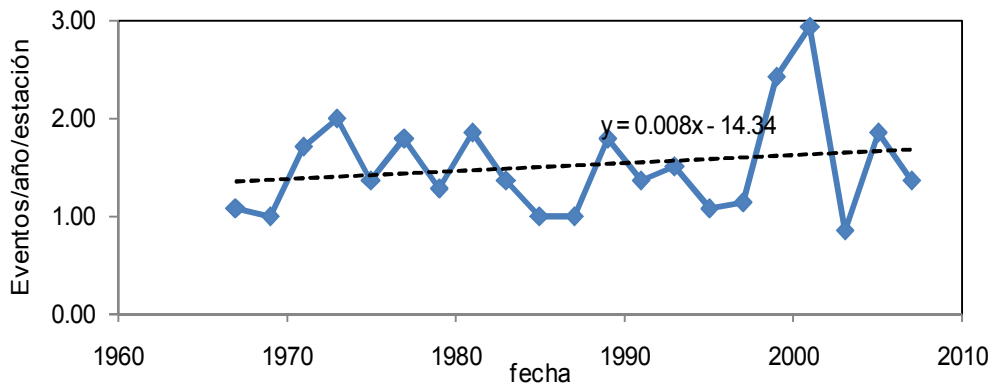




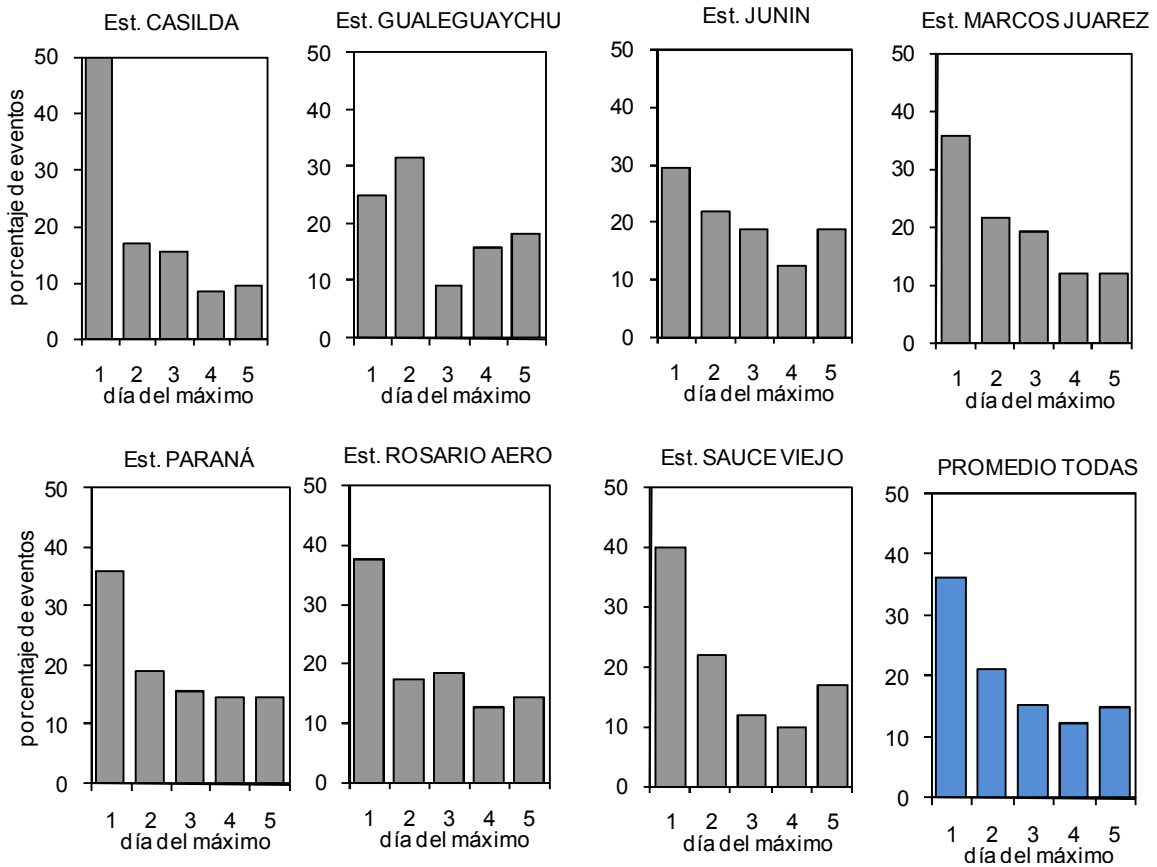
**Figura 4b.-** Secuencia temporal de eventos con  $P_{5d} \geq 150$  mm y valor medio de eventos al año en las 7 estaciones en conjunto.



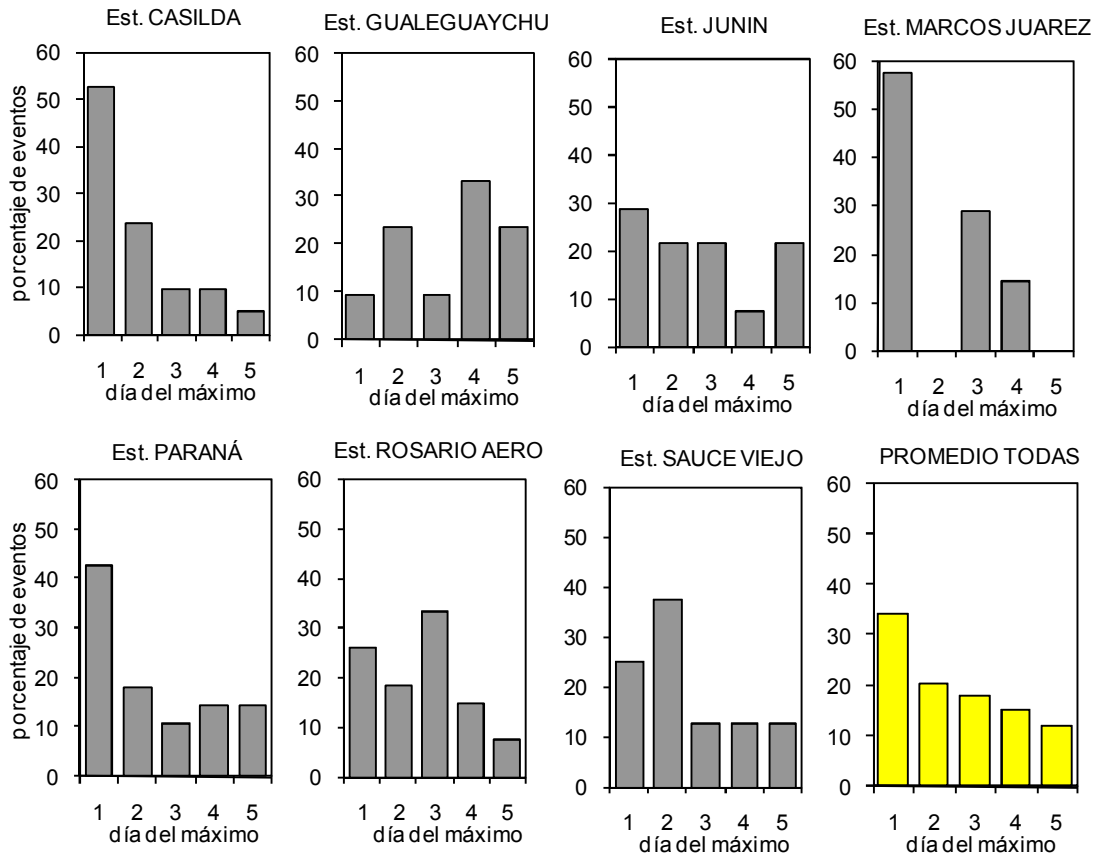
**Figura 4c.-** Secuencia temporal de eventos con  $P_{5d} \geq 200$  mm y valor medio de eventos al año en las 7 estaciones en conjunto.



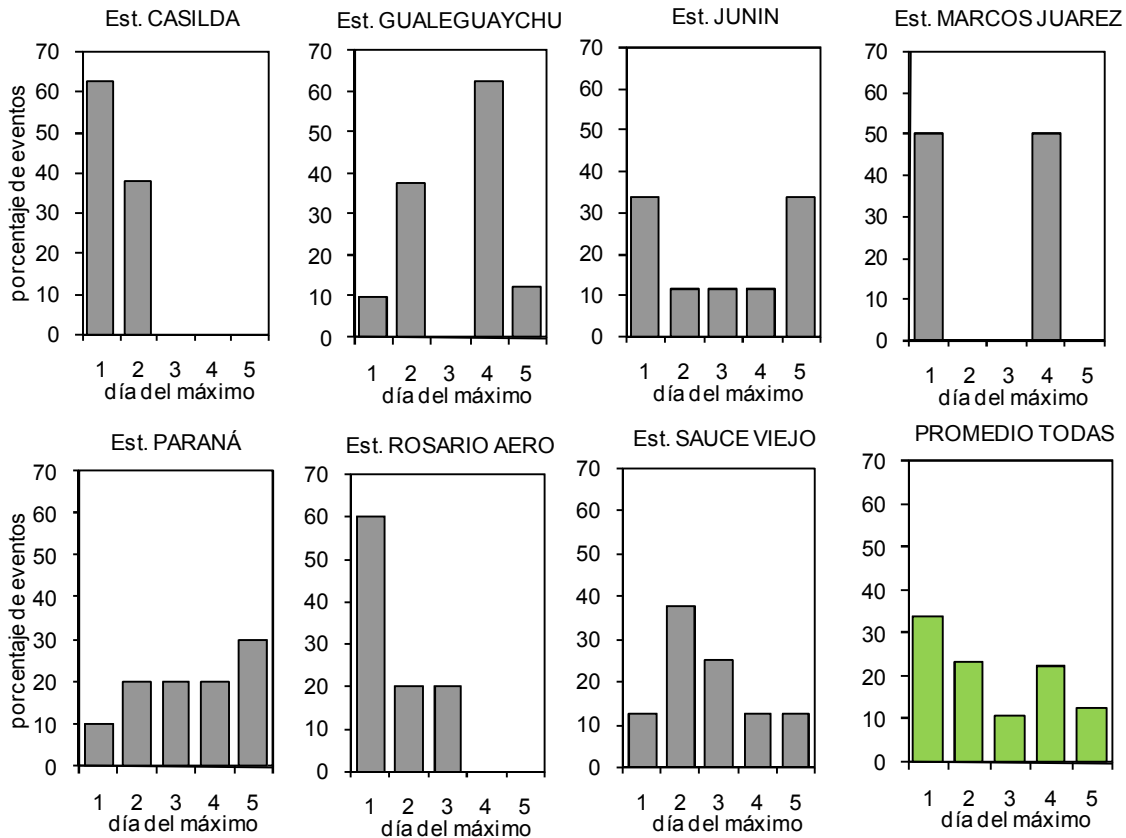
**Figura 5.-** Valor medio interanual de cantidad de eventos al año y por estación de  $P_{5d} \geq 100$  mm.



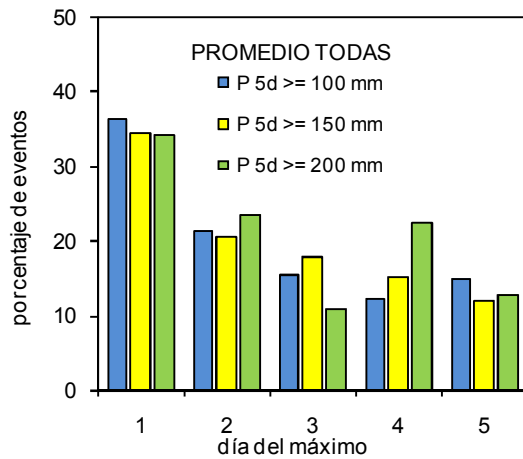
**Figura 6a.-** Porcentajes de eventos clasificados de acuerdo al día de presentación del máximo para  $P5d \geq 100$  mm en cada estación y el promedio del conjunto.



**Figura 6b.-** Porcentajes de eventos clasificados de acuerdo al día de presentación del máximo para  $P5d \geq 150$  mm en cada estación y el promedio del conjunto.



**Figura 6c.-** Porcentajes de eventos clasificados de acuerdo al día de presentación del máximo para  $P_{5d} \geq 200$  mm en cada estación y el promedio del conjunto.



**Figura 7.-** Resumen de clasificación de acuerdo a presentación del máximo

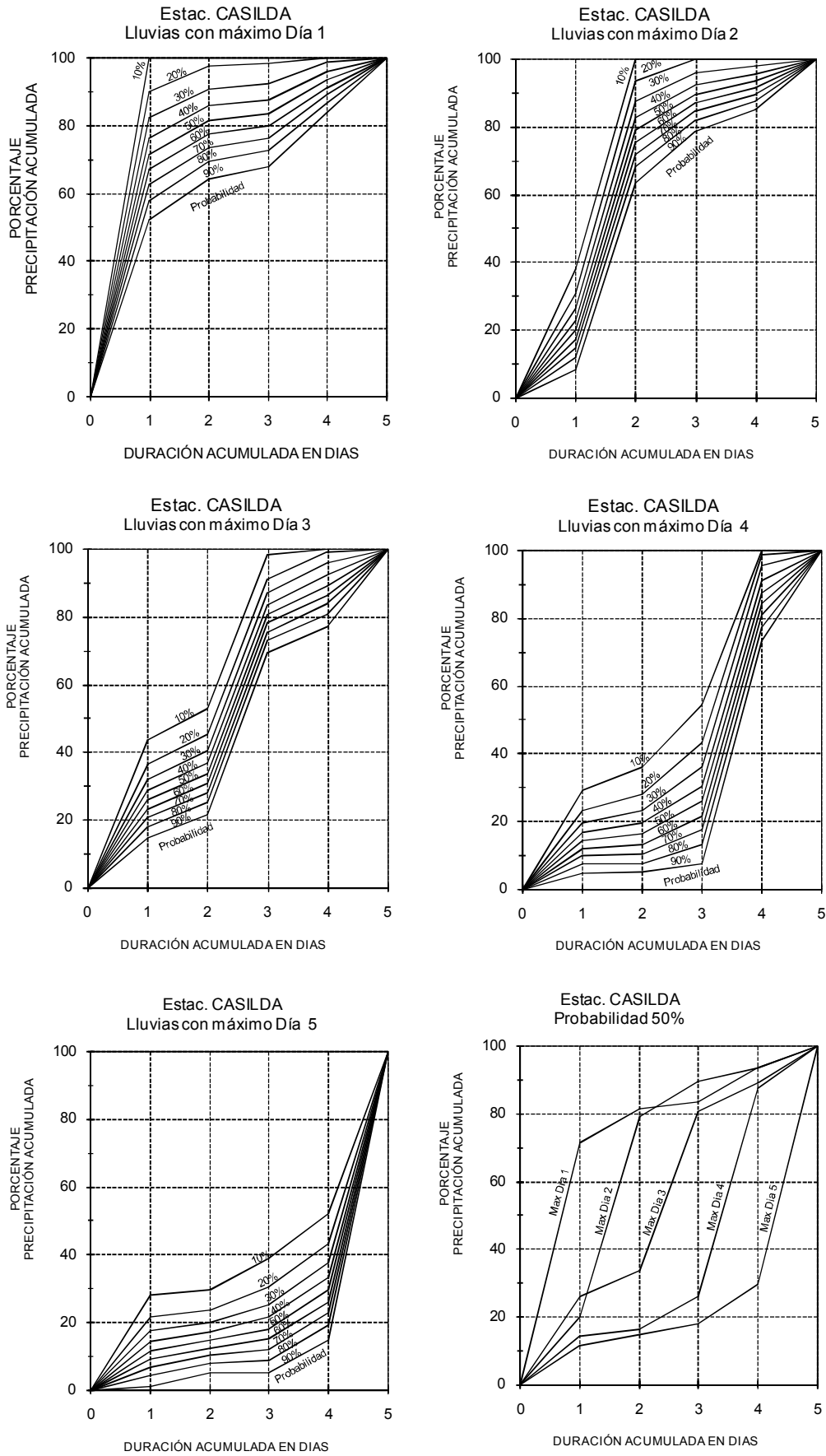
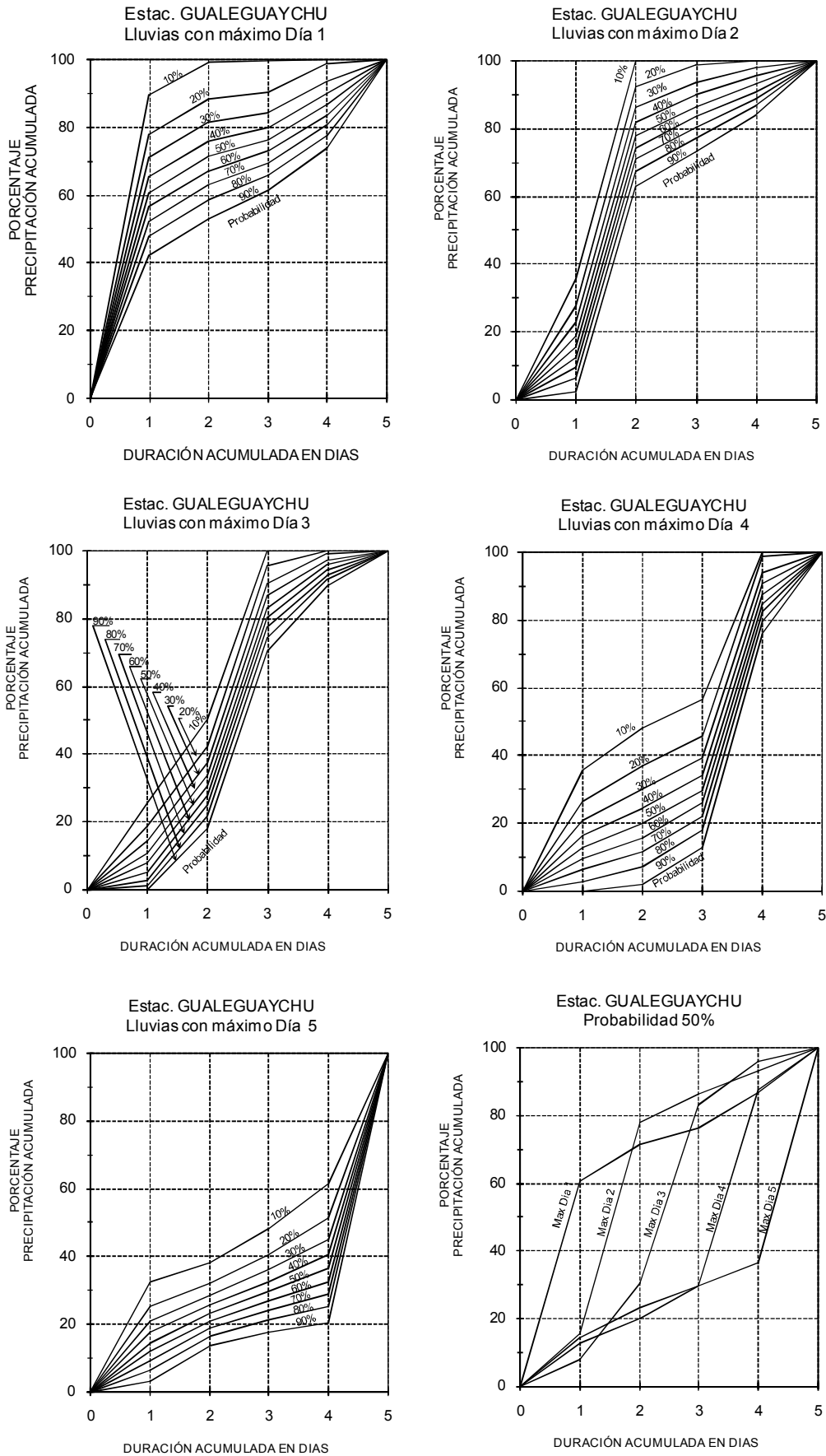


Figura 8a.- Distribución temporal interna de la lluvia dentro del agrupamiento de 5 días Estación Casilda.



**Figura 8b.-** Distribución temporal interna de la lluvia dentro del agrupamiento de 5 días Estación GUALEGUAYCHU.

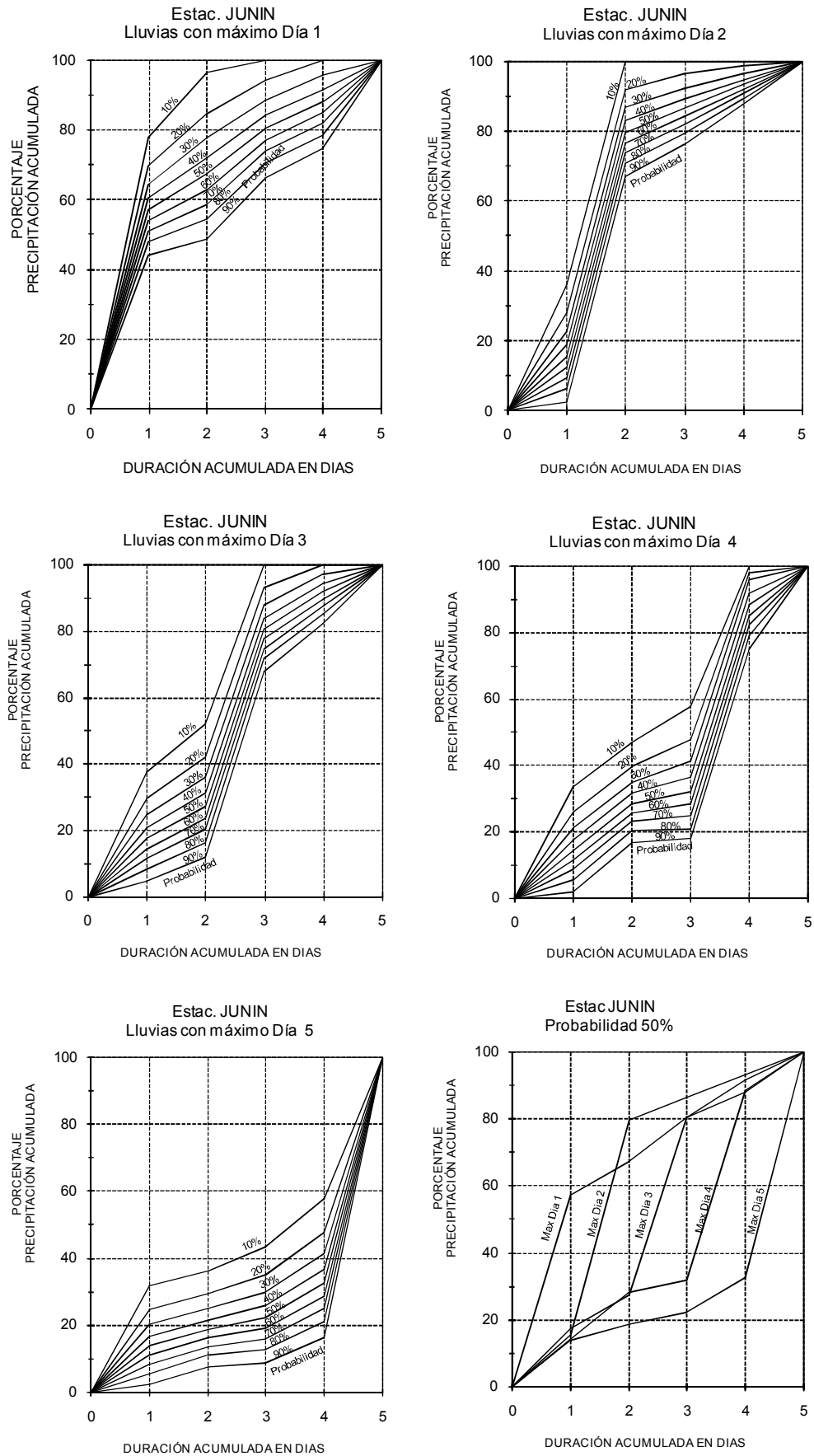
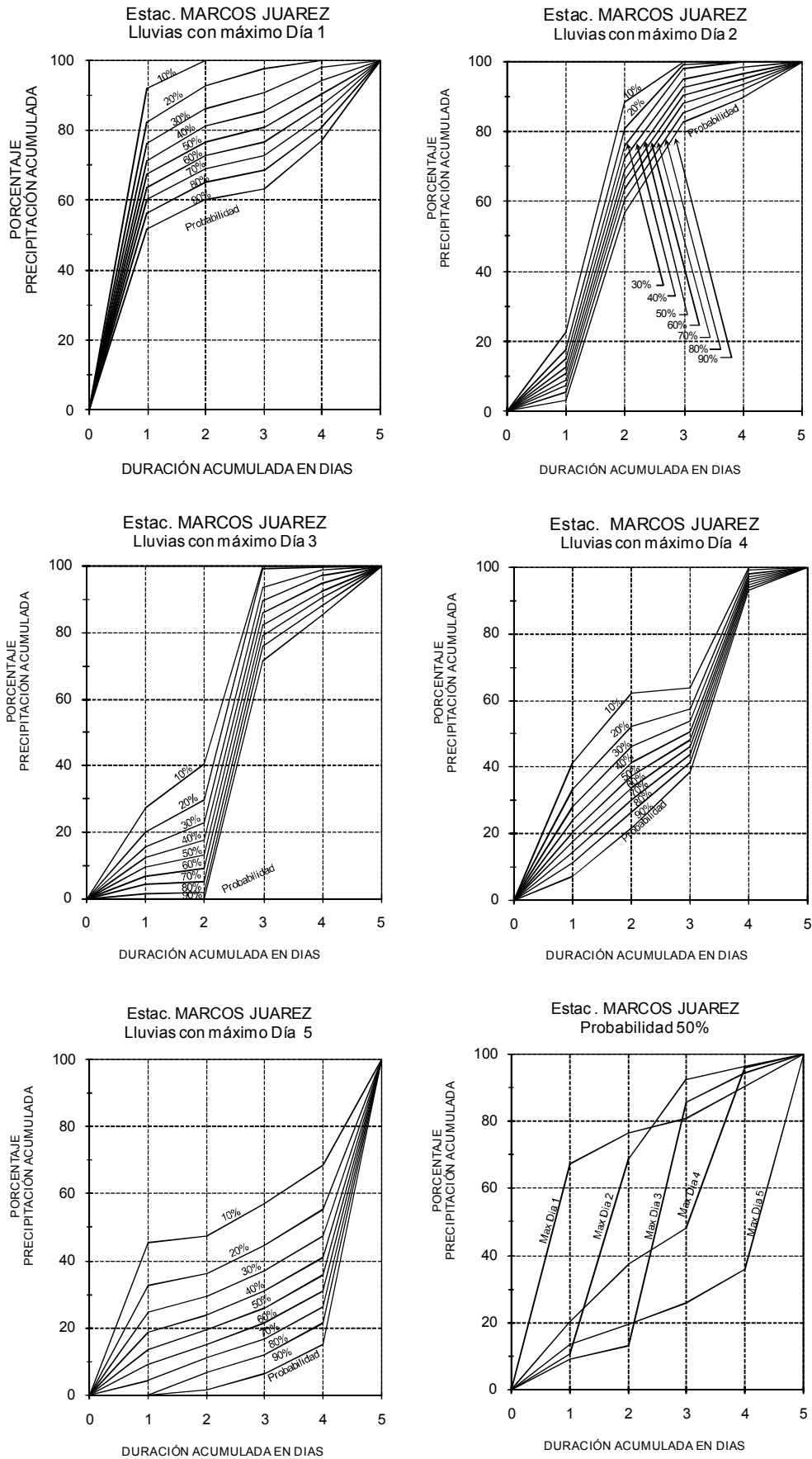


Figura 8c.- Distribución temporal interna de la lluvia dentro del agrupamiento de 5 días Estación Junín.



**Figura 8d.-** Distribución temporal interna de la lluvia dentro del agrupamiento de 5 días Estación Marcos Juárez.

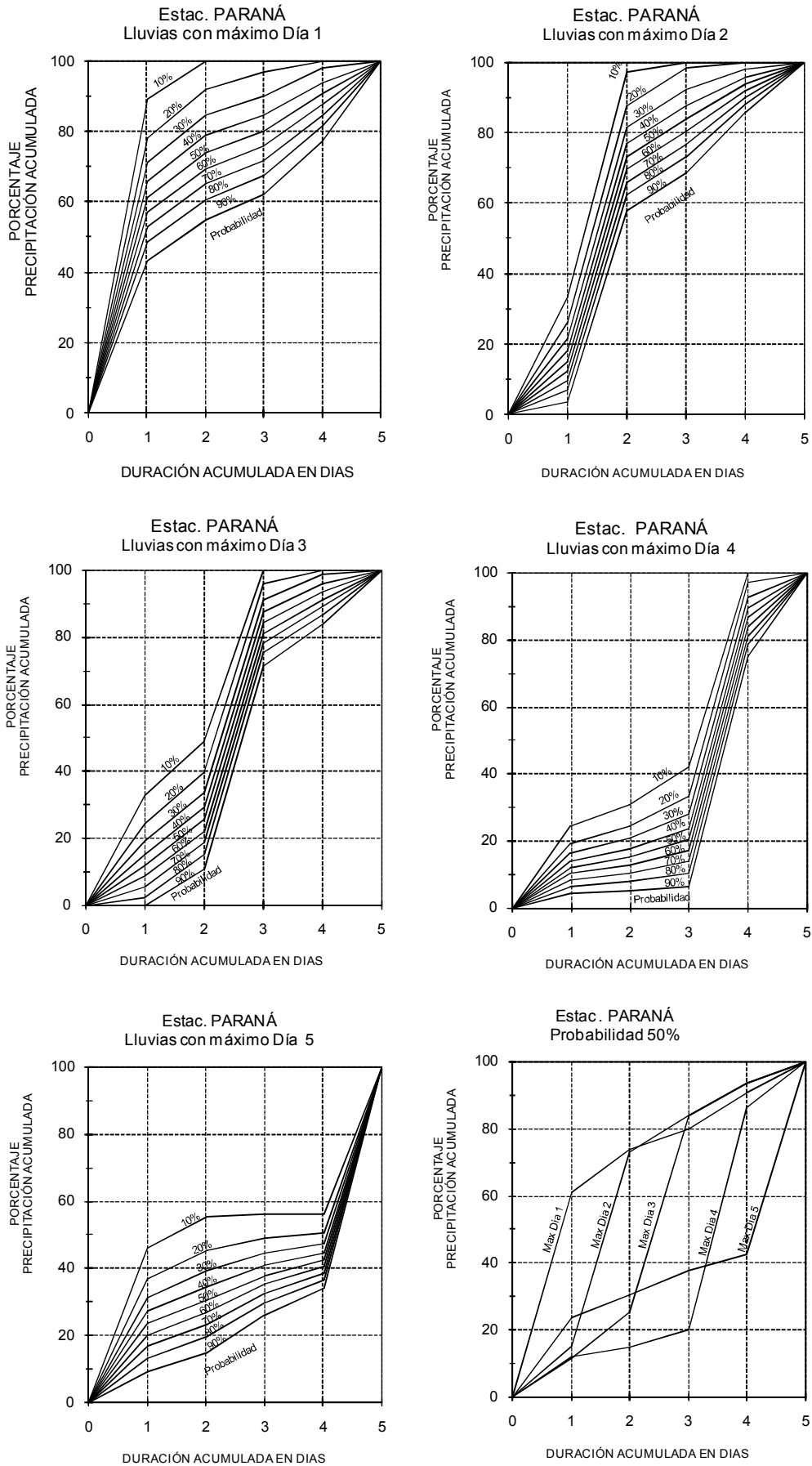
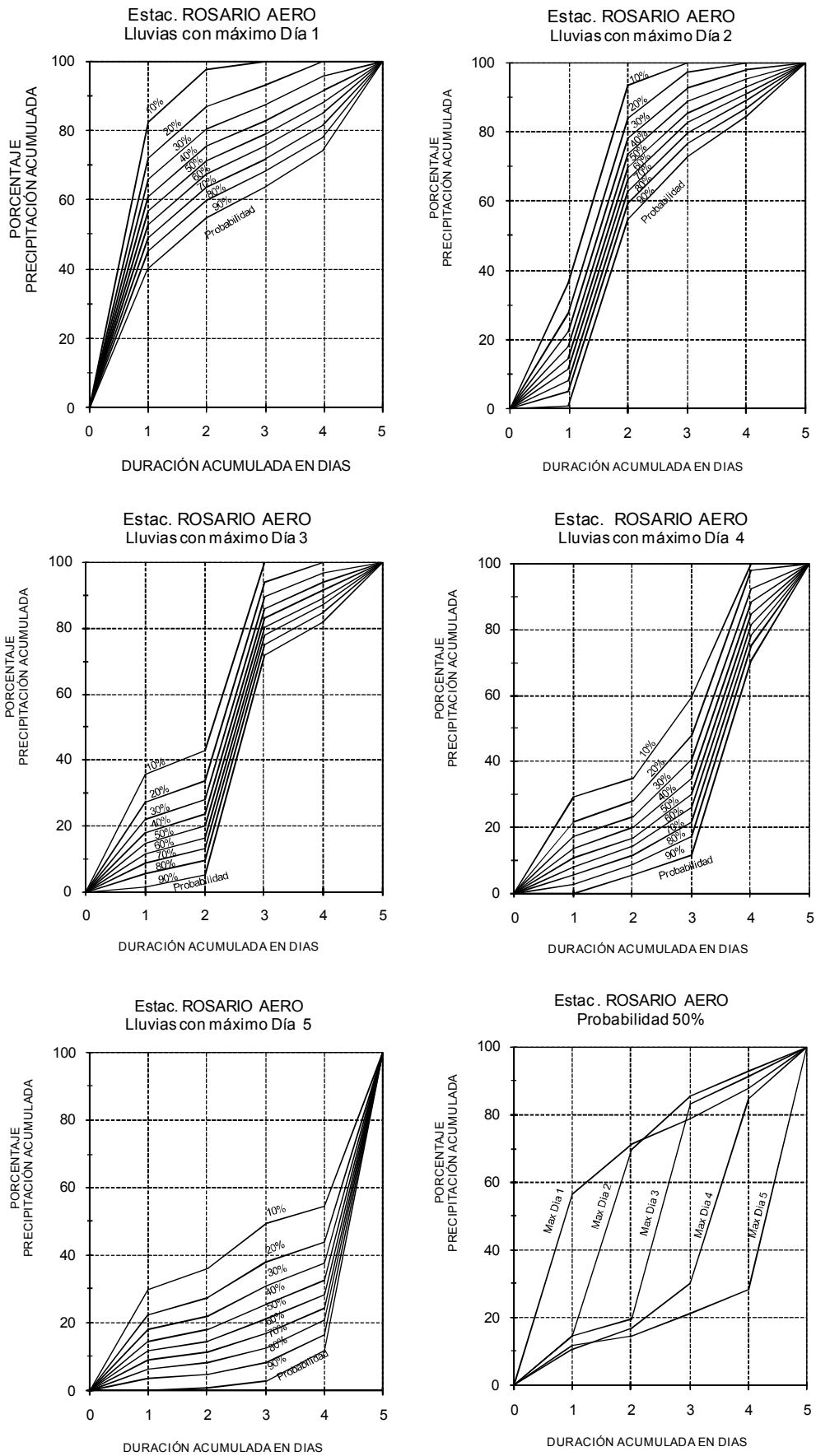
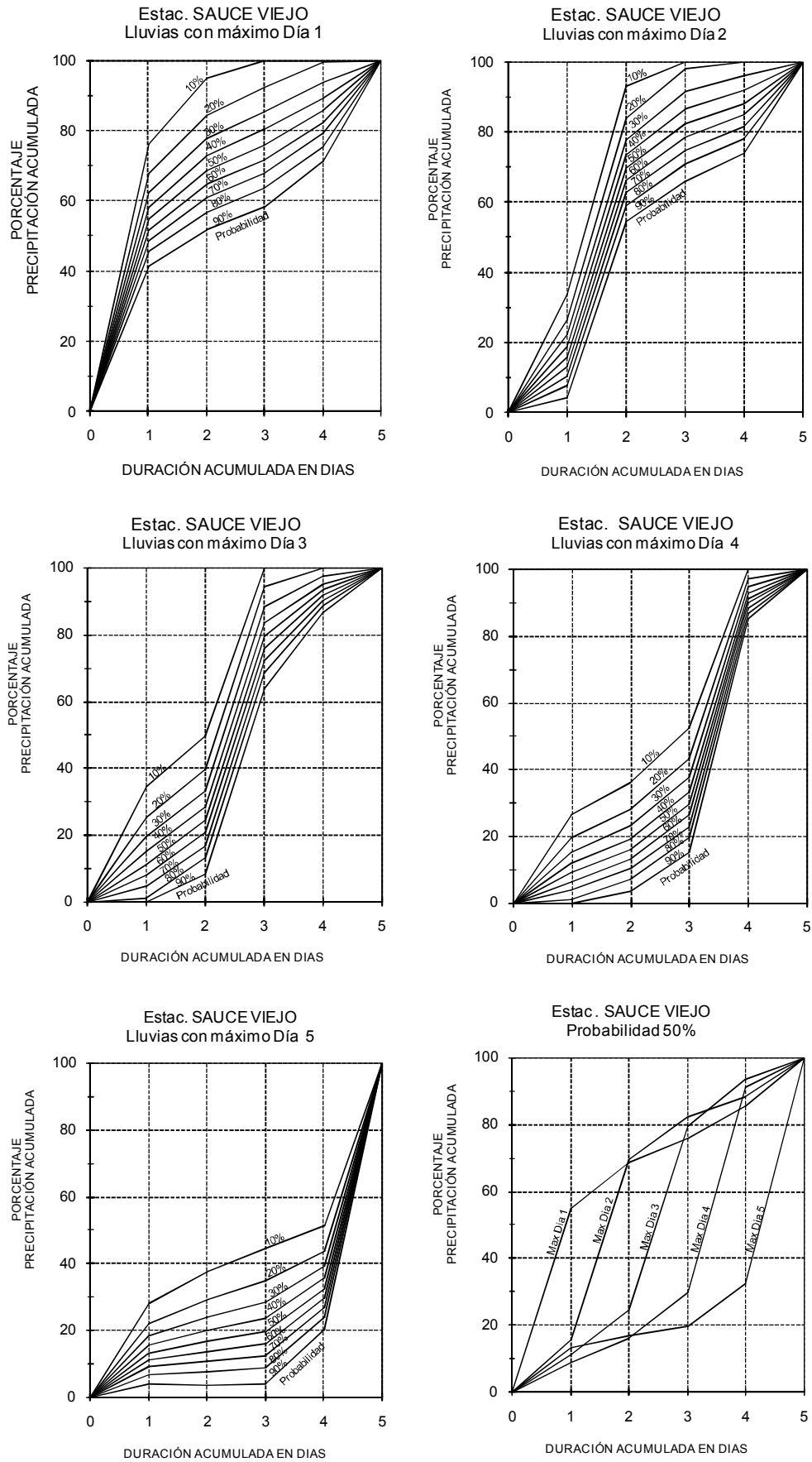


Figura 8e.- Distribución temporal interna de la lluvia dentro del agrupamiento de 5 días Estación Paraná.





**Figura 8f.-** Distribución temporal interna de la lluvia dentro del agrupamiento de 5 días Estación Rosario Aero.



**Figura 8g.-** Distribución temporal interna de la lluvia dentro del agrupamiento de 5 días Estación Sauce Viejo.

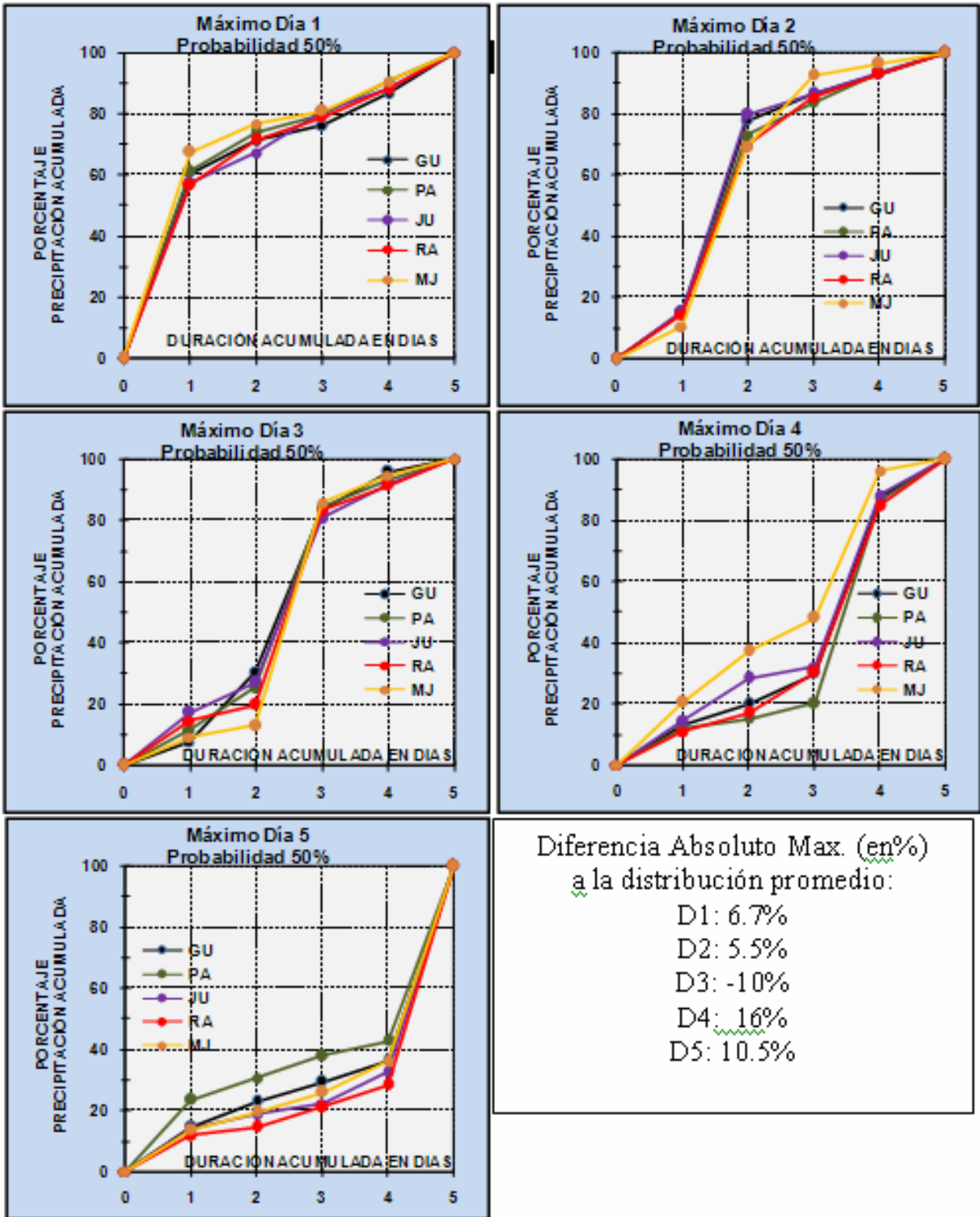


Figura 9.- Comparación entre distribuciones 50% en todas las estaciones

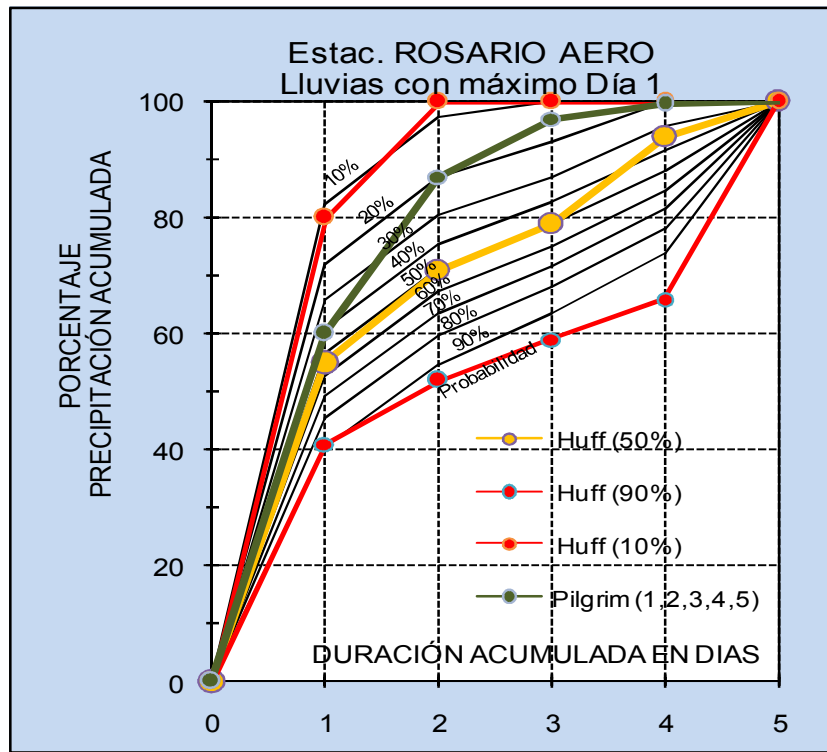


Figura 10.- Comparación entre distribuciones 50% en todas las estaciones

## **CARACTERIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN LA CUENCA INMEDIATA AL EMBALSE DE SALTO GRANDE**

***María Ambrosoni, Manuel Irigoyen, Eduardo Zamanillo y Nicolás Failache***

*Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, Represa de Salto Grande, Uruguay-Argentina.*

*Casilla de Correo 68036 Salto, Uruguay - Casilla de Correo 27422 Concordia, Argentina  
hidrologia@saltogrande.org*

**RESUMEN:** La Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, organismo binacional Uruguayo-Argentino que opera la represa hidroeléctrica de Salto Grande, mantiene desde el año 1981 y en forma ininterrumpida, una base propia de datos pluviométricos diarios. Las precipitaciones en la región de Salto Grande presentan gran variabilidad, registrándose los valores mínimos durante el invierno, y los máximos durante el otoño y la primavera. El conocimiento del régimen de lluvias y de las máximas precipitaciones registradas, permite optimizar el manejo de los caudales de aporte, y la evaluación de los riesgos involucrados en la gestión del complejo hidroeléctrico. En este trabajo se describe el comportamiento de las precipitaciones en la Cuenca Inmediata al embalse de Salto Grande, incluyendo un análisis cuantitativo de las precipitaciones máximas ocurridas en un área de 47.235 km<sup>2</sup> durante los últimos 30 años. Se presenta una caracterización sinóptica de la región y un estudio de las precipitaciones ocurridas entre los años 1981-2010, en las principales sub-cuencas que aportan en forma directa al embalse de Salto Grande. Particularmente, se analizan los principales eventos registrados en el período, y se comparan con la situación que generó (abril de 1959) el mayor impacto regional sobre las poblaciones ribereñas desde 1898 hasta la fecha. Se analiza la ocurrencia de los eventos extremos para duraciones de 1 a 10 días, sobre áreas de 1500 a 13700 km<sup>2</sup> y se muestra la influencia del fenómeno de “El Niño” en la magnitud de las precipitaciones de la región.

**PALABRAS CLAVE:** Salto Grande, precipitaciones máximas

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del Río Uruguay está ubicada al sur del trópico de Capricornio, entre las coordenadas geográficas 26° y 34° de latitud sur, y 50° y 59° de longitud oeste, con un área de drenaje de 365.000 km<sup>2</sup>. El río Uruguay nace de la confluencia de los ríos Pelotas y Canoas sobre territorio brasileño, en las sierras do Mar y Geral, a una altura cercana a los 2000 m sobre el nivel medio del mar, y desemboca en el Río de la Plata en confluencia con el Río Paraná, recorriendo 2200 km. La cuenca hasta el embalse de Salto Grande, abarca un área de 244.000 km<sup>2</sup>. La cuenca hasta Salto Grande (Figura 1) para fines hidrológicos operativos se subdivide en tres tramos:

- Cuenca Alta o Superior con un área de 99.521 km<sup>2</sup>, desde las nacientes hasta la Estación San Javier (Misiones).
- Cuenca Media, con un área de 97.214 km<sup>2</sup> entre San Javier y Paso de los Libres (Corrientes).
- Cuenca Inmediata o tramo inferior, con un área de 47.235 km<sup>2</sup>, desde Paso de los Libres hasta la represa de Salto Grande (Entre Ríos).

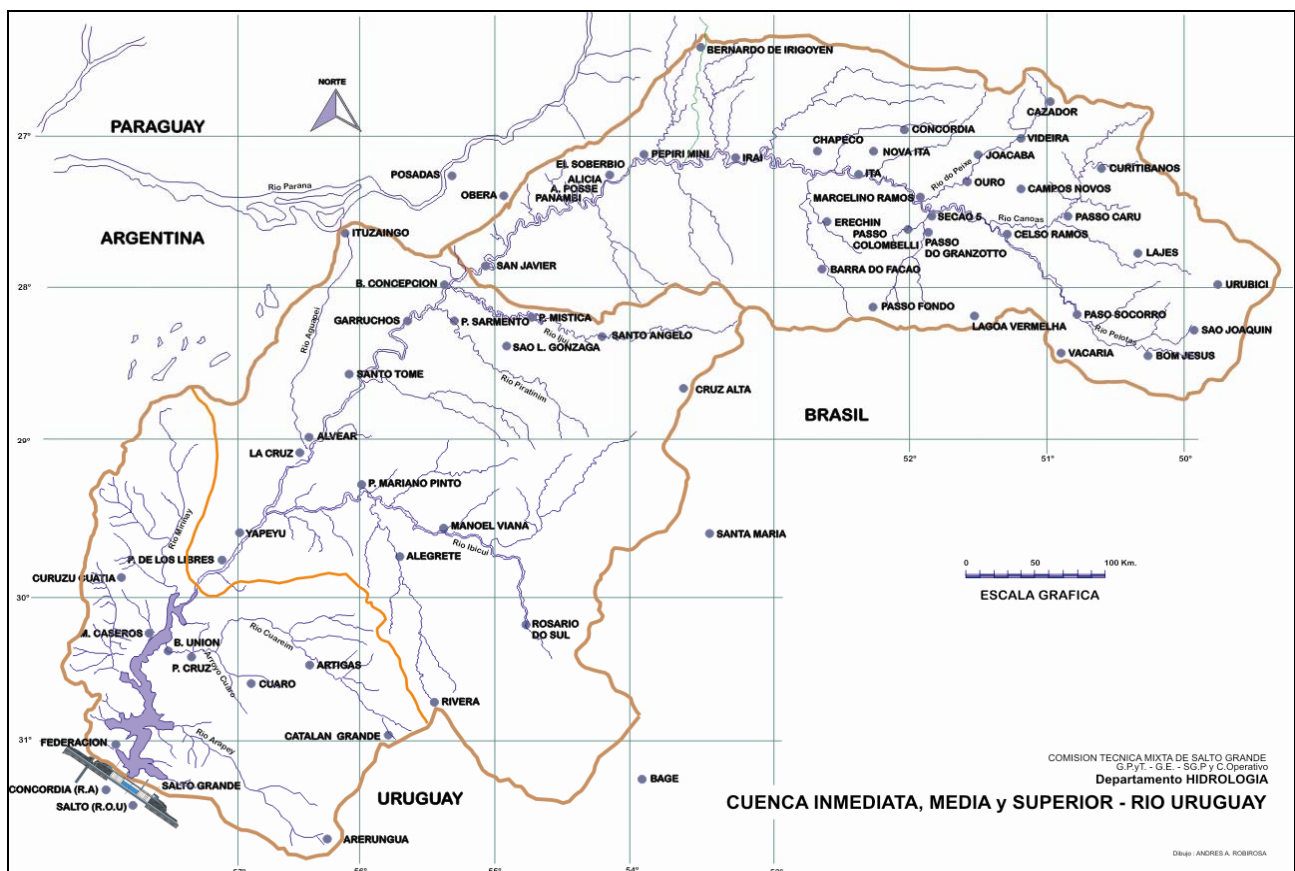


Figura 1. Mapa general de la Cuenca.

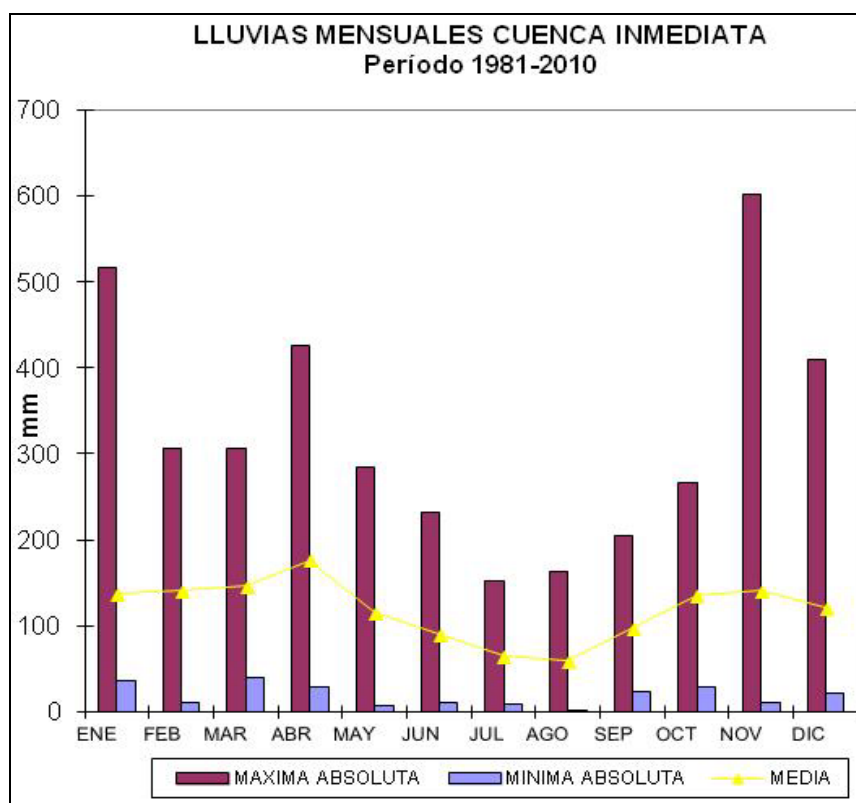
El régimen climático está condicionado por la latitud, por el relieve y por la circulación atmosférica que determina el desplazamiento de las masas de aire sobre la cuenca. El anticiclón semipermanente del Atlántico, ubicado entre los 30° y 40° de latitud sur sobre el océano, influye sobre el desarrollo del tiempo generando una circulación horizontal con direcciones predominantes del viento del NE-E, y aportando masas de aire de origen tropical. Estas masas al encontrar la barrera de la Serra do Mar en la costa de Brasil, descargan su humedad con precipitaciones máximas en los meses de verano. El anticiclón del Pacífico, provoca empujes de aire de origen polar con trayectoria marítima transportando generalmente abundante humedad, o con trayectoria continental de menor contenido hídrico. La interacción de ambas influencias (Atlántico y Pacífico), unida generalmente a la presencia de un sistema de baja presión semipermanente situado en el NW argentino y S de Bolivia,

masa caliente, húmeda y termodinámicamente inestable, que se profundiza antes del pasaje de los frentes fríos, produce precipitaciones abundantes e intensas.

Durante la primavera y el verano habitualmente se forman líneas de inestabilidad pre-frontales delante de los frentes fríos, con nubes de gran desarrollo vertical, y tormentas eléctricas, que pueden causar significativas precipitaciones. Durante los meses de otoño e invierno los frentes fríos que se desplazan hacia el norte, van perdiendo su fuerza y comienzan a calentarse durante su recorrido, estableciéndose así una corriente de aire del norte. Este nuevo sistema frontal puede producir lluvias persistentes, pero de reducida intensidad.

La Cuenca se encuentra en una zona templada, con ausencia de sistemas orográficos importantes en el sur de la región. El régimen de las precipitaciones es bastante uniforme durante el año, aumentando la irregularidad sobre la Cuenca Inmediata con máximos mensuales en marzo-abril y mínimos en julio-agosto. La distribución de los valores medios mensuales y anuales de precipitación, tiene contrastes poco marcados, aunque definidos a lo largo del año. Pese a esa distribución, las precipitaciones se caracterizan por su extremada irregularidad y variabilidad.

Para el período considerado se ha evaluado a la precipitación media en 1430 mm. El mes de mayor precipitación ha sido abril con 177 mm, y el mes menor ha sido agosto con 59 mm. La Figura 2 muestra la distribución media mensual, y las situaciones extremas ocurridas para cada mes en la serie. Se destaca por ejemplo el mes de noviembre que ha tenido un máximo de 602 mm, en el año 2009, y un mínimo de 12 mm, en 1999.



**Figura 2.-** Distribución de las precipitaciones.

En este trabajo se describe el comportamiento y los registros de las precipitaciones máximas medias areales, para duraciones de 1 a 10 días, registradas en la Cuenca Inmediata al embalse de Salto Grande, durante los últimos 30 años. La información utilizada corresponde a la red de pluviómetros convencionales distribuidos en la Cuenca Inmediata, según ubicación indicada en la Figura 3, y a la información proveniente de la Red Telemétrica de Salto Grande (Figura 4). La información proveniente de estas redes es colectada, procesada y consistida diariamente desde 1981.

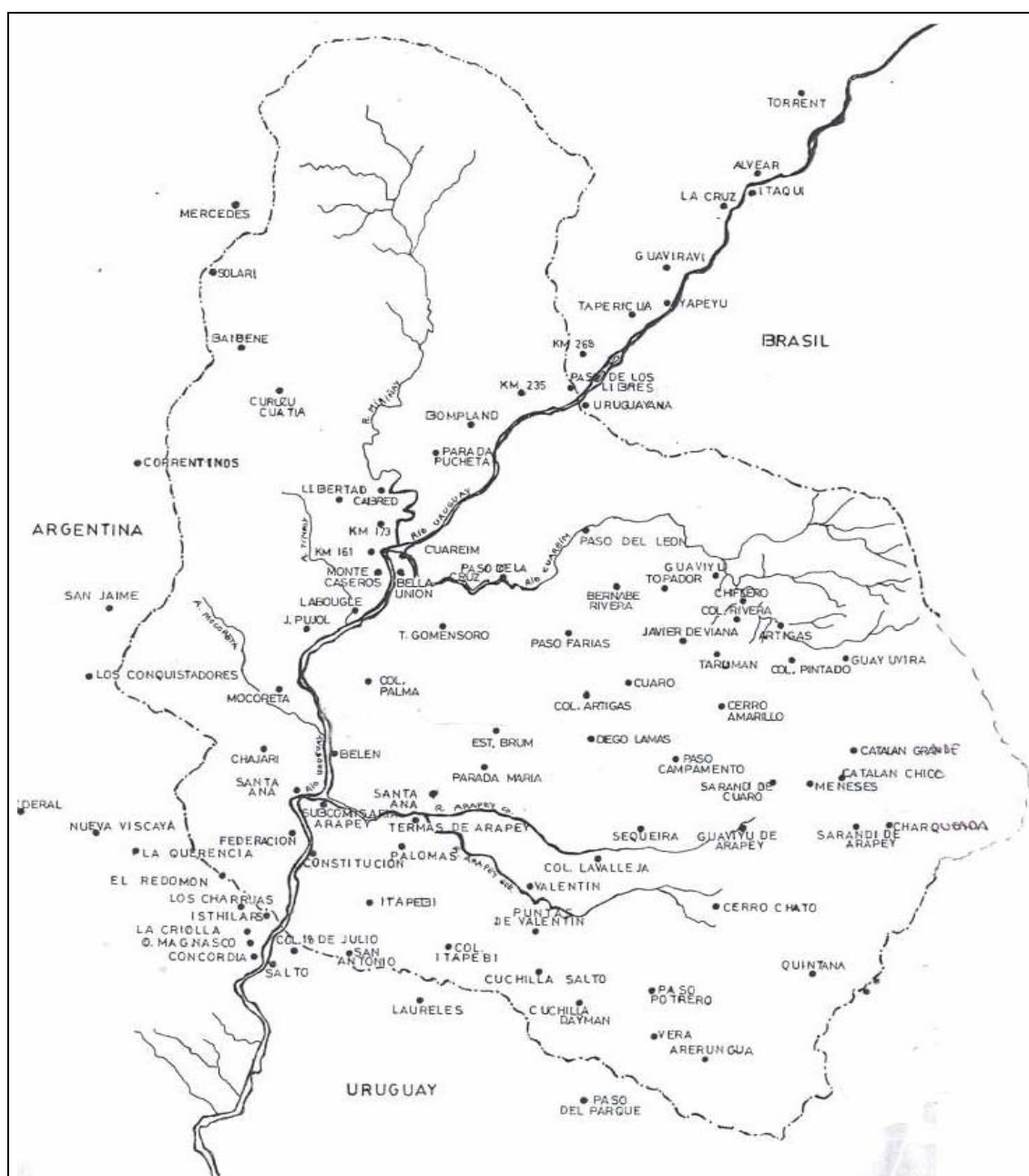


Figura 3. Mapa de ubicación de estaciones convencionales.

A efectos del cálculo de precipitaciones medias areales, la Cuenca Inmediata fue subdividida en seis subcuencas: Paso de los Libres-Monte Caseros, Miriñay - Mocoretá, Arapey, Cuareim, Cuenca Lago y Lago Directo. En la Tabla 1 se presenta el área de cada subcuenca y su proporción sobre el total de la cuenca inmediata. En cada subcuenca se calculó para cada día del período 1981-2010, la precipitación media areal, mediante una grilla donde cada celda tiene asociado un pluviómetro base, y pluviómetros alternativos.

Tabla 1. Área de las Subcuencas en estudio.

Sub cuenca	Area (km <sup>2</sup> )	% Área
Paso de los Libres-Monte Caseros	1.937	4.10
Miriñay-Mocoretá	10.911	23.10
Arapey	10.864	23.00
Cuareim	13.698	29.00
Cuenca Lago	8.313	17.60
Lago Directo	1.511	3.20
<b>Total Cuenca Inmediata</b>	<b>47.235</b>	<b>100.00</b>



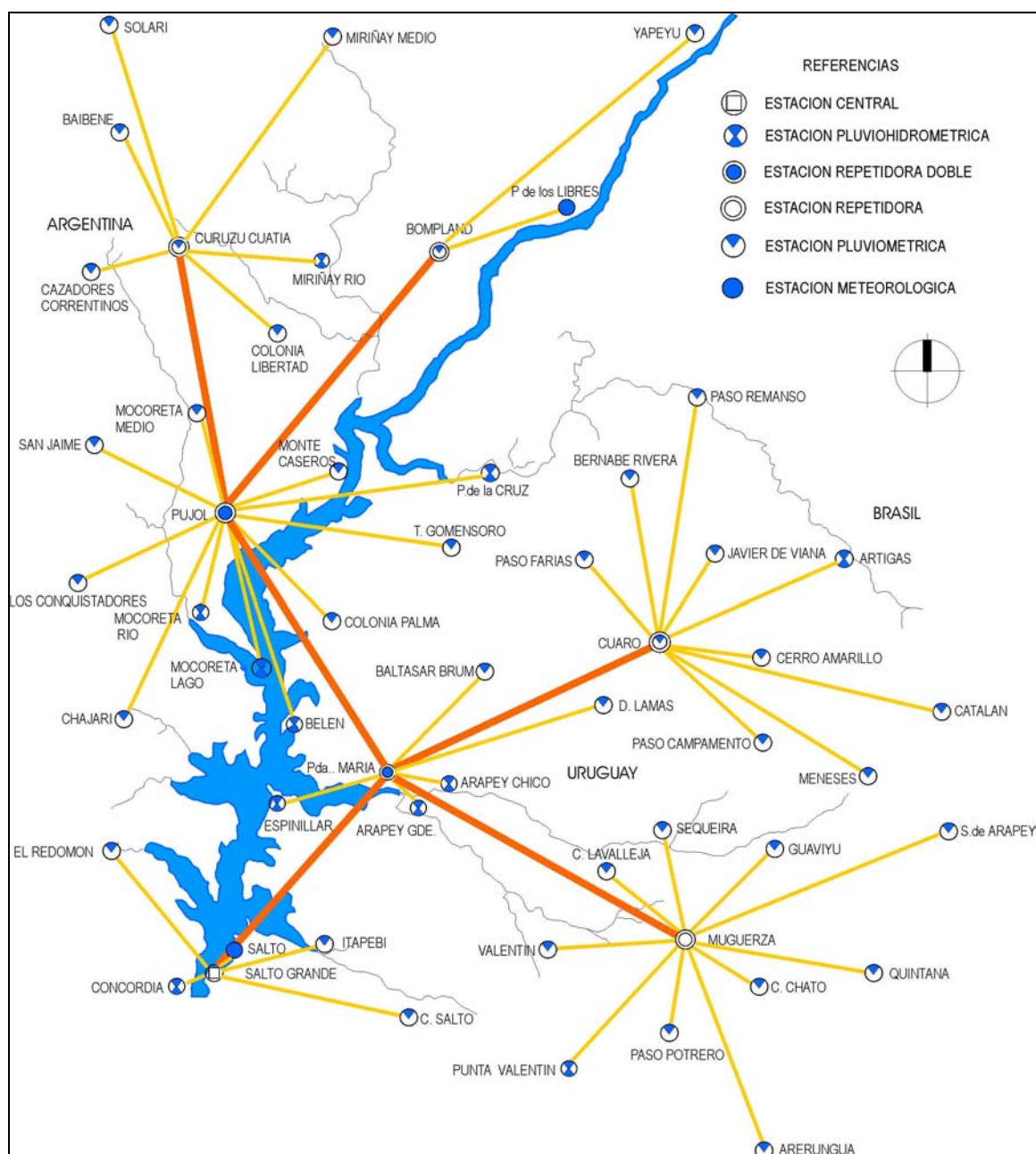


Figura 4. Mapa de ubicación de estaciones Red Telemétrica.

## PRECIPITACIONES MÁXIMAS MEDIAS

En las Tabla 2 se presentan los 15 mayores registros de precipitaciones medias diarias en el período 1981-2010 calculados para cada una de las subcuencas de la cuenca inmediata. En los años 1998 y 1993 la precipitación media diaria superó los 200 mm, en la sub cuenca de Paso de los Libres-Monte Caseros y en la sub cuenca Lago Directo. En tanto la precipitación máxima diaria en el total de la cuenca inmediata ( $47.235 \text{ km}^2$ ) fue de 118 mm.

En la Tabla 3 se presenta la distribución de frecuencias de las precipitaciones diarias para cada subcuenca. En las Tablas 4, 5, 6, 7, 8 y 9 se presenta la distribución de frecuencias de las precipitaciones máximas para 2, 3, 4, 5, 8 y 10 días de duración para el período 1981-2010. A su vez cada una de las tablas precitadas muestra el máximo valor medio para cada una de las subcuencas y cada una de las duraciones. Las Figuras 5, 6, 7, 8, y 9 muestran la relación lámina-duración para cada sub cuenca, y para el total de la cuenca inmediata.

**Tabla 2.** Las 15 mayores precipitaciones registradas en las subcuencas de la Cuenca Inmediata.  
**LAS 15 MAYORES PRECIPITACIONES MEDIAS DIARIAS (mm) Serie 1981-2010**  
**POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

No. orden	FECHA	URUGUAY PL.-MC, 4,1	FECHA	MRINAY MCRTA 23,1	FECHA	ARAPEY 23,0	FECHA	CREIM 29,0	FECHA	CUENCA LAGO 17,6	FECHA	LAGO DIRECTO 3,2	FECHA	PLUV. MEDIA 100
1	27/01/1998	210,7	05/06/1992	150,9	22/12/1997	173,7	17/04/1991	179,7	03/06/2006	157,8	08/05/1993	239,1	17/04/1991	118,5
2	05/06/1992	191,1	03/11/1982	124,0	24/04/2002	138,9	01/06/2001	168,6	07/03/1998	135,0	07/03/1998	191,6	15/02/1983	107,1
3	12/04/1992	169,6	12/04/1998	123,0	07/03/1998	138,4	15/02/1983	160,5	04/05/1983	132,7	22/12/1997	160,8	03/06/2006	105,7
4	05/05/1983	158,5	25/03/1987	114,4	06/01/1998	134,9	01/12/2002	152,0	22/12/1997	114,9	06/02/2010	140,4	05/05/1983	102,4
5	03/11/1982	136,1	06/11/2006	105,1	09/05/1993	129,3	25/03/1987	142,2	06/02/2010	111,1	04/05/1983	131,7	12/04/1992	98,1
6	04/02/1999	135,0	05/05/1983	104,1	03/06/2006	114,8	10/12/1990	140,5	17/04/1991	110,3	03/06/2006	129,4	24/04/2002	97,3
7	25/03/1987	126,6	25/03/1985	103,8	20/05/2003	110,2	24/04/2002	132,7	29/04/1992	109,0	01/04/1984	119,3	25/03/1987	97,2
8	30/09/1987	120,0	27/03/1992	103,5	15/02/1983	106,7	12/04/1992	130,7	24/05/1986	108,7	24/05/1986	115,8	10/12/1990	96,5
9	01/04/1987	114,1	27/01/1998	101,0	27/12/1997	106,5	05/05/1983	129,9	01/04/1984	105,3	28/01/1998	110,7	05/06/1992	95,9
10	14/10/2008	108,5	12/04/1992	100,8	05/06/2005	105,6	25/04/1996	125,9	28/01/1998	104,6	29/04/1992	105,7	22/12/1997	95,8
11	08/04/1986	105,9	15/01/1984	97,8	04/12/2002	104,2	06/11/2006	118,5	19/01/1988	100,9	01/12/2002	100,8	01/12/2002	90,3
12	08/05/1993	105,8	03/06/2006	95,0	23/04/1990	103,7	22/11/2009	112,6	05/05/1983	98,0	20/12/1997	100,0	28/01/1998	87,0
13	12/04/1998	105,8	27/03/2000	94,4	25/04/2002	103,2	04/05/1983	112,0	24/04/2002	92,7	06/01/1998	99,2	01/04/1987	86,5
14	05/02/1997	103,5	08/04/1986	92,5	27/04/2003	100,0	20/12/1997	106,4	16/04/1991	90,1	29/06/1999	96,3	24/05/1986	86,4
15	26/10/2003	103,1	27/09/1982	92,3	10/12/1990	99,9	05/11/2009	104,8	10/12/1990	87,4	10/04/1991	94,9	01/06/2001	83,1

**Tabla 3.** Distribución de frecuencias de las precipitaciones por subcuencas para duración 1 día.  
**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS DIARIAS**  
**POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

PERIODO ANALIZADO 02/01/1981 al 01/01/2011  
 Cantidad de datos: 10957

	SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA						CUENCA INMEDIATA
	URUGUAY PL.-MC. 4,1	MRINAY MCRTA 23,1	ARAPEY 23,0	CREIM 29,0	CUENCA LAGO 17,6	LAGO DIRECTO 3,2	PLUV. MEDIA 100
PRECIPITACION MAXIMA (24hs.)	210,7	150,9	173,7	179,7	157,8	239,1	118,5
FECHA DEL EVENTO:	27/01/1998	05/06/1992	22/12/1997	17/04/1991	03/06/2006	08/05/1993	17/04/1991
<b>PRECIPITACIONES:</b>	<b>CANTIDAD DE DATOS CON PRECIPITACION</b>						
> de 200 mm	1	0	0	0	0	1	0
> de 150 mm y <= de 200 mm	3	1	1	4	1	2	0
> de 100 mm y <= de 150 mm	12	9	12	11	10	8	4
> de 75 mm y <= de 100 mm	25	30	34	37	24	34	23
> de 50 mm y <= de 75 mm	120	112	103	124	110	113	96
> de 30 mm y <= de 50 mm	283	263	276	272	263	250	278
> de 20 mm y <= de 30 mm	309	278	346	358	307	277	328
> de 10 mm y <= de 20 mm	495	481	536	572	520	512	607
> de 5 mm y <= de 10 mm	435	471	527	473	521	452	584
> de 0 mm y <= de 5 mm	1454	1672	1599	1455	1860	1605	2125
= a 0 mm	7820	7640	7523	7651	7341	7703	6912
Total datos con prec. medias > 0 mm	3137	3317	3434	3306	3616	3254	4045

**Tabla 4.** Distribución de frecuencias de las precipitaciones por subcuencas para duración 2 días.  
**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS EN 48 HORAS**  
**POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

PERIODO ANALIZADO 02/01/1981 al 01/01/2011  
 Cantidad de datos: 10956

	SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA						CUENCA INMEDIATA
	URUGUAY PL.-MC. 4,1	MRINAY MCRTA 23,1	ARAPEY 23,0	CREIM 29,0	CUENCA LAGO 17,6	LAGO DIRECTO 3,2	PLUV. MEDIA 100
PRECIPITACION MAXIMA (48 horas)	264,6	191,7	261,4	257,5	230,7	313,9	182,7
FECHA INICIO DEL EVENTO:	27/01/1998	12/04/1998	22/12/1997	16/04/1991	04/05/1983	08/05/1993	04/05/1983
<b>PRECIPITACIONES:</b>	<b>CANTIDAD DE DATOS CON PRECIPITACION</b>						
> de 300 mm	0	0	0	0	0	1	0
> de 250 mm y <= de 300 mm	1	0	1	1	0	0	0
> de 200 mm y <= de 250 mm	1	0	1	3	3	5	0
> de 150 mm y <= de 200 mm	11	5	11	10	8	9	5
> de 100 mm y <= de 150 mm	45	46	47	53	42	52	32
> de 75 mm y <= de 100 mm	87	88	106	106	79	80	82
> de 50 mm y <= de 75 mm	276	259	234	280	248	244	260
> de 30 mm y <= de 50 mm	551	510	562	569	535	496	562
> de 0 mm y <= de 30 mm	3749	3949	4081	3884	4276	3927	4717
= a 0 mm	6235	6099	5913	6050	5765	6142	5298
Total datos con precipitaciones > 0 m	4721	4857	5043	4906	5191	4814	5658

**Tabla 5.** Distribución de frecuencias de las precipitaciones por subcuencas para duración 3 días.

**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS EN 72 HORAS  
POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

PERIODO ANALIZADO 02/01/1981 al 01/01/2011

Cantidad de datos: 10955

	SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA						CUENCA INMEDIATA
	URUGUAY PL.-MC.	MRINAY MCRTA	ARAPEY	CREIM	CUENCA LAGO	LAGO DIRECTO	PLUV. MEDIA
	4,1	23,1	23,0	29,0	17,6	3,2	100
PRECIPITACION MAXIMA (72 horas)	300,8	249,0	272,6	293,7	259,7	330,6	225,9
FECHA INICIO DEL EVENTO:	27/01/1998	12/04/1998	21/12/1997	16/04/1991	03/05/1983	08/05/1993	15/04/1991
PRECIPITACIONES:	CANTIDAD DE DATOS CON PRECIPITACION						
> de 300 mm	1	0	0	0	0	2	0
> de 250 mm y <= de 300 mm	1	0	3	3	1	2	0
> de 200 mm y <= de 250 mm	5	3	6	5	7	7	2
> de 150 mm y <= de 200 mm	22	10	24	30	19	28	13
> de 100 mm y <= de 150 mm	94	86	91	101	78	86	70
> de 75 mm y <= de 100 mm	149	169	177	178	141	137	150
> de 50 mm y <= de 75 mm	426	392	363	429	411	389	414
> de 30 mm y <= de 50 mm	816	737	825	841	764	714	830
> de 0 mm y <= de 30 mm	4484	4710	4821	4594	5024	4714	5442
= a 0 mm	4957	4848	4645	4774	4510	4876	4034
Total datos con precipitaciones > 0 m	5998	6107	6310	6181	6445	6079	6921

**Tabla 6.** Distribución de frecuencias de las precipitaciones por subcuencas para duración 4 días.

**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS EN 96 HORAS  
POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

PERIODO ANALIZADO 02/01/1981 al 01/01/2011

Cantidad de datos: 10954

	SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA						CUENCA INMEDIATA
	URUGUAY PL.-MC.	MRINAY MCRTA	ARAPEY	CREIM	CUENCA LAGO	LAGO DIRECTO	PLUV. MEDIA
	4,1	23,1	23,0	29,0	17,6	3,2	100
PRECIPITACION MAXIMA (96 horas)	364,0	263,3	313,0	328,4	267,8	340,7	253,1
FECHA INICIO DEL EVENTO:	27/01/1998	11/04/1998	20/12/1997	15/04/1991	15/04/1991	08/05/1993	15/04/1991
PRECIPITACIONES:	CANTIDAD DE DATOS CON PRECIPITACION						
> de 300 mm	2	0	1	1	0	4	0
> de 250 mm y <= de 300 mm	2	1	7	5	5	4	1
> de 200 mm y <= de 250 mm	9	5	9	10	11	11	5
> de 150 mm y <= de 200 mm	33	17	42	47	27	46	24
> de 100 mm y <= de 150 mm	154	152	144	169	126	133	123
> de 75 mm y <= de 100 mm	228	255	257	258	233	205	235
> de 50 mm y <= de 75 mm	592	509	527	579	554	531	560
> de 30 mm y <= de 50 mm	1018	940	1046	1081	954	888	1079
> de 0 mm y <= de 30 mm	4990	5225	5289	5057	5532	5280	5857
= a 0 mm	3926	3850	3632	3747	3512	3852	3070
Total datos con precipitaciones > 0 m	7028	7104	7322	7207	7442	7102	7884

**Tabla 7.** Distribución de frecuencias de las precipitaciones por subcuencas para duración 5 días.

**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS EN 120 HORAS  
POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

PERIODO ANALIZADO 02/01/1981 al 01/01/2011

Cantidad de datos: 10957 (10953)

	SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA						CUENCA INMEDIATA
	URUGUAY PL.-MC.	MRINAY MCRTA	ARAPEY	CREIM	CUENCA LAGO	LAGO DIRECTO	PLUV. MEDIA
	4,1	23,1	23,0	29,0	17,6	3,2	100
PRECIPITACION MAXIMA (120 horas)	371,7	265,3	313,0	329,4	274,6	348,6	255,7
FECHA INICIO DEL EVENTO:	27/01/1998	12/04/1998	20/12/1997	14/04/1991	18/01/1988	08/05/1993	14/04/1991
PRECIPITACIONES:	CANTIDAD DE DATOS CON PRECIPITACION						
> de 300 mm	3	0	2	2	0	6	0
> de 250 mm y <= de 300 mm	4	4	12	8	10	6	2
> de 200 mm y <= de 250 mm	14	5	12	20	14	17	9
> de 150 mm y <= de 200 mm	48	33	63	69	43	67	40
> de 100 mm y <= de 150 mm	234	227	213	245	192	193	206
> de 75 mm y <= de 100 mm	309	347	347	347	320	277	315
> de 50 mm y <= de 75 mm	730	630	675	733	694	672	704
> de 30 mm y <= de 50 mm	1195	1096	1252	1263	1133	1036	1279
> de 0 mm y <= de 30 mm	5296	5554	5548	5326	5808	5634	6058
= a 0 mm	3120	3057	2829	2940	2739	3045	2340
<b>Total datos con precipitaciones &gt; 0 mm</b>	<b>7833</b>	<b>7896</b>	<b>8124</b>	<b>8013</b>	<b>8214</b>	<b>7908</b>	<b>8613</b>

**Tabla 8.** Distribución de frecuencias de las precipitaciones por subcuencas para duración 8 días.

**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS ACUMULADAS 8 DÍAS  
POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

PERIODO ANALIZADO 02/01/1981 al 01/01/2011

Cantidad de datos: 10950

	SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA						CUENCA INMEDIATA
	URUGUAY PL.-MC.	MRINAY MCRTA	ARAPEY	CREIM	CUENCA LAGO	LAGO DIRECTO	PLUV. MEDIA
	4,1	23,1	23,0	29,0	17,6	3,2	100
PRECIPITACION MAXIMA (8 DÍAS)	390,9	294,5	420,2	377,4	324,5	372,5	297,4
FECHA INICIO DEL EVENTO:	23/01/1998	11/04/1998	20/12/1997	10/04/1991	10/04/1991	04/05/1993	10/04/1991
PRECIPITACIONES:	CANTIDAD DE DATOS CON PRECIPITACION						
> de 400 mm	0	0	2	0	0	0	0
> de 300 mm y <= de 400 mm	8	0	10	8	4	14	0
> de 250 mm y <= de 300 mm	13	16	22	28	29	24	12
> de 200 mm y <= de 250 mm	37	20	52	62	31	38	42
> de 150 mm y <= de 200 mm	149	106	151	169	135	160	125
> de 100 mm y <= de 150 mm	482	544	459	510	426	397	467
> de 75 mm y <= de 100 mm	589	561	604	578	601	503	582
> de 50 mm y <= de 75 mm	1105	946	1075	1175	1020	1011	1107
> de 30 mm y <= de 50 mm	1541	1482	1693	1679	1527	1447	1701
> de 0 mm y <= de 30 mm	5433	5745	5508	5302	5856	5854	5872
= a 0 mm	1593	1530	1374	1439	1321	1502	1042
<b>Total datos con precipitaciones &gt; 0 mm</b>	<b>9357</b>	<b>9420</b>	<b>9576</b>	<b>9511</b>	<b>9629</b>	<b>9448</b>	<b>9908</b>

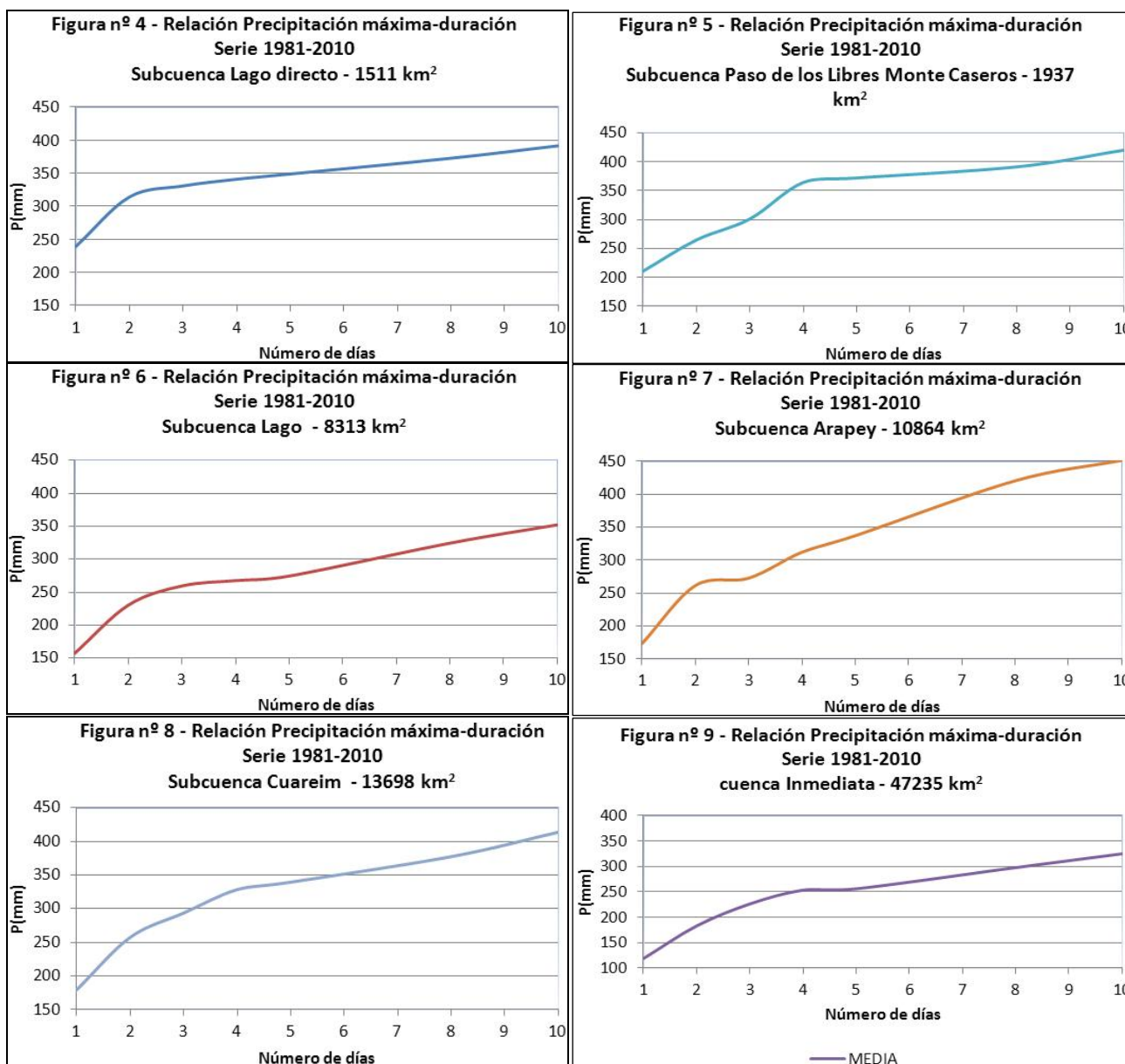
**Tabla 9.** Distribución de frecuencias de las precipitaciones por subcuencas para duración 10 días.

**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS EN 10 DÍAS  
POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

PERIODO ANALIZADO 02/01/1981 al 01/01/2011

Cantidad de datos:10948

	SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA						CUENCA INMEDIATA
	URUGUAY PL.-MC.	MRINAY MCRTA	ARAPEY	CREIM	CUENCA LAGO	LAGO DIRECTO	PLUV. MEDIA
	4,1	23,1	23,0	29,0	17,6	3,2	100
PRECIPITACION MAXIMA (10 DÍAS)	419,6	332,6	451,1	413,6	352,2	391,2	324,6
FECHA INICIO DEL EVENTO:	22/01/1998	05/04/1986	20/12/1997	09/04/1991	09/04/1991	04/05/1993	09/04/1991
PRECIPITACIONES:	CANTIDAD DE DATOS CON PRECIPITACION						
> de 400 mm	4	0	5	2	0	0	0
> de 300 mm y <= de 400 mm	9	3	20	17	15	32	6
> de 250 mm y <= de 300 mm	30	24	33	56	41	29	23
> de 200 mm y <= de 250 mm	60	47	104	92	58	79	74
> de 150 mm y <= de 200 mm	251	190	203	255	227	216	211
> de 100 mm y <= de 150 mm	652	731	642	709	574	538	642
> de 75 mm y <= de 100 mm	770	716	779	729	783	663	788
> de 50 mm y <= de 75 mm	1283	1106	1332	1373	1215	1228	1289
> de 30 mm y <= de 50 mm	1741	1672	1889	1927	1735	1655	1916
> de 0 mm y <= de 30 mm	5135	5500	5107	4915	5513	5608	5410
= a 0 mm	1013	959	834	873	787	900	589
Total datos con precipitaciones > 0 mm	9935	9989	10114	10075	10161	10048	10359



**EVENTO ABRIL DEL AÑO 1959**

La creciente extraordinaria de abril de 1959, que generó el mayor impacto regional sobre las poblaciones ribereñas desde 1898 hasta la fecha, se produjo debido al pasaje de dos depresiones sinópticas, una entre el 5 y 10, y la otra entre el 13 y 16 de abril, ambas con trayectoria NO- SE, que afectaron la cuenca inmediata. Esto indica que en los días previos a dichos pasajes, hubo ciclo génesis sobre el territorio argentino.

Todo este proceso produjo máximos de lluvia sobre la cuenca inmediata al embalse de Salto Grande en los días 8 y 14-15 de abril. Ambos pasajes estuvieron separados por unos 6 días de lluvias moderadas. El segundo pasaje centrado aguas arriba de la primera depresión produjo una descarga en Salto Grande retardada en comparación a la primera. Este segundo evento coincide con la cota máxima del Río Uruguay (18,40 m en Salto, el 16/04/59) y del Río Negro (10.01 m en Mercedes, el 18/04/59).

Es de notar, asimismo, que durante todo el período, la cuenca baja del Río Uruguay estuvo del lado ecuatorial de la corriente en chorro, existiendo en este sentido, condiciones que no favorecieron el progreso rápido de las zonas frontales hacia el norte. Por el contrario, facilitaron la advección de aire húmedo y cálido desde más al norte, y la actividad pre-frontal en condiciones frontales casi estacionarias. La información pluviométrica de abril del año 1959 fue recopilada y analizadas las isoyetas suministradas por la Dirección Nacional de Meteorología (ROU) y por el Servicio Meteorológico Nacional (RA).

En la Tablas 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 se presenta los valores calculados de precipitaciones máximas para cada una de las sub - cuencas de la cuenca inmediata para varios días de abril de 1959 y para duraciones de 1, 2, 3, 4, 5, 8 y 10 días.

**Tabla 10.** Precipitaciones máximas medias diarias - Abril 1959.**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS DIARIAS (mm) - ABRIL 1959  
POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

Los datos corresponden a las 24 hs anteriores a la hora 07,00 del día de la fecha

No. orden	FECHA	URUGUAY PL.,-MC, 4,1	FECHA	MRINAY MCRTA 23,1	FECHA	ARAPEY 23,0	FECHA	CREIM 29,0	FECHA	CUENCA LAGO 17,6	FECHA	LAGO DIRECTO 3,2	FECHA	PLUV. MEDIA 100
1	08/04/1959	189,9	08/04/1959	79,8	15/04/1959	195,8	09/04/1959	170,8	08/04/1959	69,4	14/04/1959	98,7	08/04/1959	89,8
2	14/04/1959	152,9	14/04/1959	74,9	09/04/1959	92,1	08/04/1959	121,4	15/04/1959	63,6	15/04/1959	73,0	09/04/1959	89,0
3	09/04/1959	64,0	30/04/1959	48,0	14/04/1959	74,8	10/04/1959	87,9	14/04/1959	58,8	08/04/1959	67,2	15/04/1959	83,6
4	30/04/1959	46,2	07/04/1959	26,4	13/04/1959	62,0	15/04/1959	74,5	09/04/1959	53,1	07/04/1959	51,1	14/04/1959	58,5
5	15/04/1959	36,5	09/04/1959	21,3	16/04/1959	61,9	30/04/1959	54,8	07/04/1959	52,1	13/04/1959	43,2	10/04/1959	44,3
6	21/04/1959	34,5	13/04/1959	19,3	08/04/1959	61,0	22/04/1959	27,6	10/04/1959	34,3	09/04/1959	42,1	30/04/1959	42,4
7	07/04/1959	32,0	21/04/1959	12,0	10/04/1959	45,8	03/04/1959	23,7	30/04/1959	32,9	03/04/1959	29,0	13/04/1959	26,4
8	13/04/1959	24,4	15/04/1959	8,3	03/04/1959	39,2	16/04/1959	17,2	21/04/1959	25,0	10/04/1959	28,7	07/04/1959	25,8
9	10/04/1959	20,7	05/04/1959	7,6	30/04/1959	30,3	07/04/1959	16,2	13/04/1959	21,1	22/04/1959	27,2	16/04/1959	22,2
10	05/04/1959	10,3	06/04/1959	4,8	22/04/1959	25,7	21/04/1959	15,6	22/04/1959	21,1	21/04/1959	26,0	03/04/1959	20,7

**Tabla 11.** Precipitaciones máximas medias en dos días - Abril 1959.**PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS EN 48 hs (mm) - ABRIL 1959  
POR SUBCUENCAS DE LA CUENCA INMEDIATA**

Los datos corresponden a las 48 hs anteriores a la hora 07,00 del día de la fecha

No. orden	FECHA	URUGUAY PL.,-MC, 4,1	FECHA	MRINAY MCRTA 23,1	FECHA	ARAPEY 23,0	FECHA	CREIM 29,0	FECHA	CUENCA LAGO 17,6	FECHA	LAGO DIRECTO 3,2	FECHA	PLUV. MEDIA 100
1	09/04/1959	253,9	08/04/1959	106,2	15/04/1959	270,6	09/04/1959	292,2	09/04/1959	122,5	15/04/1959	171,7	09/04/1959	178,8
2	08/04/1959	221,9	09/04/1959	101,1	16/04/1959	257,7	10/04/1959	258,7	15/04/1959	122,4	14/04/1959	141,9	15/04/1959	142,1
3	15/04/1959	189,4	14/04/1959	94,2	09/04/1959	153,1	08/04/1959	137,6	08/04/1959	121,5	08/04/1959	118,3	10/04/1959	133,3
4	14/04/1959	177,3	15/04/1959	83,2	10/04/1959	137,9	16/04/1959	91,7	10/04/1959	87,4	09/04/1959	109,3	08/04/1959	115,6
5	10/04/1959	84,7	30/04/1959	48,0	14/04/1959	136,8	15/04/1959	89,3	14/04/1959	79,9	16/04/1959	90,2	16/04/1959	105,8
6	30/04/1959	46,2	07/04/1959	31,2	08/04/1959	73,5	11/04/1959	87,9	16/04/1959	77,3	10/04/1959	70,8	14/04/1959	84,9

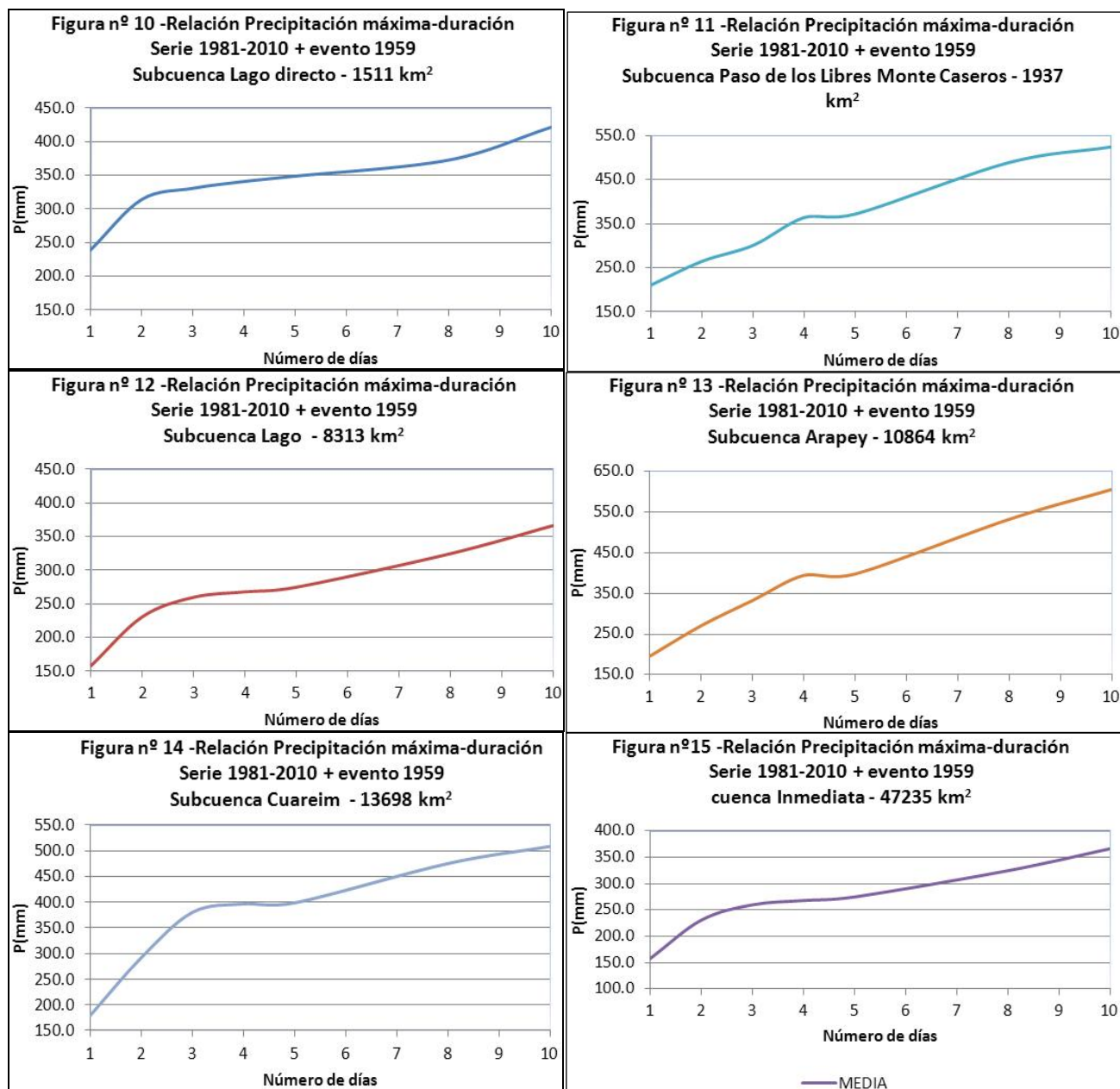






Esta tabla muestra que los eventos más importantes en las subcuencas de la cuenca inmediata han sido los eventos de los años 1959, 1983, 1986, 1992, 1993 y 1998, dependiendo de la subcuenca y la duración del evento. Para el total de la Cuenca Inmediata, los eventos más importantes son 1959, 1983 y 1991.

Las Figuras nº 10, 11, 12, 13, 14 y 15, muestran la relación lámina-duración para cada subcuenca y para el total de la cuenca inmediata registrado en el período 1981-2010 y abril de 1959. En las mismas se puede apreciar la extraordinaria magnitud del evento de 1959 especialmente en las subcuencas Arapey y Cuareim.



### RELACION ENTRE LAS PRECIPITACIONES MAXIMAS Y LOS EVENTOS EL NIÑO

Cuando el Fenómeno de “El Niño Oscilación del Sur” se presenta en una fuerte fase cálida de “El Niño”, la probabilidad de ocurrencia de grandes precipitaciones es claramente mayor, sin llegar a ser una señal totalmente determinante. En la Tabla 18 se presentan las precipitaciones mensuales, destacándose las registradas coincidentes con el evento cálido. En siete de los doce valores

mensuales máximos de la serie, ocurrieron durante el transcurso de un evento El Niño, incluido el máximo anual de 2273 mm del año 2002.

**Tabla 18.** Precipitaciones medias mensuales de la Cuenca Inmediata (mm).

**MAXIMAS DE LA SERIE**

**\*MAXIMAS ASOCIADAS A EVENTOS "EL NIÑO"**

AÑO/MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1981	146	215	52	79	168	84	51	83	73	40	69	83	1143
1982	75	213	40	42	129	133	48	104	204*	86	232	83	1389
1983	128	283*	122	164	236	36	113	42	79	117	114	47	1481
1984	194	278	143	100	113	93	81	36	148	134	116	35	1471
1985	45	159	211	166	175	102	120	93	110	147	30	32	1390
1986	154	100	231	380	242	116	34	74	126	120	338	27	1940
1987	124	44	298	182	79	35	137	84	116	34	108	93	1332
1988	397	47	86	67	7	36	36	77	166	76	68	64	1127
1989	43	11	113	167	22	35	30	115	30	117	137	141	962
1990	108	191	255	295	58	30	38	40	84	219	205	214	1736
1991	101	42	78	426*	80	162	132	30	59	150	80	210	1549
1992	76	200	185	347	185	219	69	23	75	78	70	180	1706
1993	202	44	117	158	285	65	41	13	24	266	185	114	1513
1994	43	186	100	81	77	73	71	53	66	164	80	81	1074
1995	109	217	149	81	60	44	86	2	52	159	85	23	1066
1996	228	112	120	283	15	10	9	31	65	95	141	100	1209
1997	101	216	49	90	111	63	64	75	48	200	173	410*	1599
1998	516*	153	285	311	109	232	85	55	165	49	80	109	2149
1999	36	164	92	158	49	122	82	18	52	95	12	66	947
2000	111	93	229	129	195	101	72	45	117	139	149	114	1493
2001	272	89	155	281	146	84	30	163	195	207	178	64	1863
2002	112	82	273	391	97	46	152*	49	186	260	320	304	2273*
2003	91	217	267	265	172	106	24	103	58	161	164	141	1769
2004	42	73	58	152	31	86	42	16	86	141	152	125	1002
2005	111	66	123	118	235	213	28	91	90	94	76	143	1386
2006	61	27	70	102	46	205	33	27	53	146	142	223	1133
2007	85	216	307	131	35	64	19	91	89	248	67	66	1415
2008	119	79	58	76	83	68	87	73	61	215	28	45	992
2009	73	120	54	30	93	40	25	38	169	91	602*	233	1568
2010	243	306	84	49	136	28	127	33	88	29	39	63	1224
<b>Med81/10</b>	<b>138</b>	<b>141</b>	<b>147</b>	<b>177</b>	<b>116</b>	<b>91</b>	<b>65</b>	<b>59</b>	<b>98</b>	<b>136</b>	<b>141</b>	<b>121</b>	<b>1430</b>

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agres–Hidrosud. (1969). Estudio hidrológico del proyecto Salto Grande.

Estudio Gradowczyk y Asociados (1977). Estudio en modelo matemático del río Uruguay. Informe Climatológico.

Hidroestructuras S.A. (2006). Evaluación de Eventos de Precipitación Máxima Probable, en la cuenca de Salto Grande.

Ambrosoni, M. (2010). Procesamiento de las precipitaciones en la cuenca inmediata al embalse de Salto Grande.

## APLICACIÓN DEL MODELO SQRT-ET<sub>MAX</sub> EN LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

*María Josefina Tito, Martín M. Pérez, María Lorena Guglielmo*

*Facultad de Ciencias de la Administración, Universidad Nacional de Entre Ríos.*

Tavella 1450 (3200) Concordia, Entre Ríos, Argentina.

[josefinatito, martinmperez, mlguglielmo]@gmail.com

**RESUMEN:** La construcción de obras hidráulicas tiene en cuenta las exigencias máximas que sobre ellas generarán futuras precipitaciones. En la provincia de Entre Ríos se trabajó sobre la regionalización de las precipitaciones máximas, usando para su modelización la distribución General de Valores Extremos, y la metodología del Índice de Creciente para su regionalización. El modelo SQRT-ET<sub>max</sub> fue desarrollado para aproximar adecuadamente la distribución de frecuencias de los máximos anuales de lámina de tormentas individuales, por lo que, *a priori*, debería representar de forma más fiable el fenómeno físico. El objetivo general de este trabajo fue aplicar este modelo a la estimación de las precipitaciones máximas diarias en la provincia, y comparar los resultados con los obtenidos con otros modelos existentes. Para ello fue necesario aplicar una herramienta de cálculo para aproximar los parámetros de la distribución SQRT-ET<sub>max</sub>, estimar los máximos diarios para distintos períodos de retorno en las estaciones seleccionadas.

**PALABRAS CLAVE:** regionalización, modelo SQRT-ET<sub>max</sub>, análisis de frecuencia.

## INTRODUCCIÓN

El control de los eventos extremos implica desarrollar una metodología que permita pronosticar su ocurrencia y magnitud en función de los mecanismos que los generan. Por lo tanto el dimensionamiento de las obras hidráulicas está directamente vinculado a la lluvia de diseño que en algún momento futuro generará las solicitaciones máximas sobre las mismas, la cual por su carácter aleatorio sólo puede predecirse utilizando técnicas probabilísticas.

El tipo de información de lluvia requerida para el análisis hidrológico depende de la técnica de inferencia a emplear e incluye altura de agua caída, probabilidad, intensidad, duración y patrón de distribución temporal.

Para que la precipitación pueda ser utilizada para estimar crecientes de proyecto es necesario realizar un análisis que relacione la intensidad de la lluvia con la duración y con la probabilidad de ocurrencia o la recurrencia de la tormenta en el lugar de interés. En este sentido Zamanillo *et al* (2008) han trabajado sobre la regionalización de las precipitaciones máximas para la provincia. Para la modelización de las precipitaciones máximas han usado la distribución GEV y en la regionalización de éstas, la metodología del índice de creciente.

En 1987 los ingenieros japoneses Etoh, Murota y Nakamishi (1987) desarrollaron el modelo SQRT-ET<sub>max</sub> con el propósito de aproximar apropiadamente la distribución de frecuencias de los máximos anuales de lámina de tormentas individuales y explicar teóricamente a través de ella la ocurrencia de aparentes *outliers*. Etoh, Murota y Nakamishi concluyen que esta distribución de dos parámetros es tan buena o incluso superior a las distribuciones convencionales de tres parámetros en el ajuste global a distribuciones de frecuencias de láminas máximas anuales de lluvias y tormentas individuales de alrededor de 24 horas. Se muestra también que la distribución SQRT-ET<sub>max</sub> es una solución altamente plausible al problema de los *outliers* de lluvias de duraciones que van de varias horas a 24 horas.

El modelo SQRT-ET<sub>max</sub> está basado en tres principios, admitidos de forma tradicional, de comportamiento de las precipitaciones extremas: la independencia de las mismas, la forma triangular del hietograma y la independencia entre intensidad máxima y duración de tormenta. Por esta razón se trata de un modelo elaborado expresamente para la modelización de precipitaciones y que por lo tanto *a priori* debería representar de forma más fiable el fenómeno físico. Es decir, no es de prever que se produzcan infravaloraciones de los valores asociados a períodos de retorno elevados.

El modelo SQRT-ET<sub>max</sub> fue aplicado para ajustar precipitaciones máximas del noroeste de la península ibérica, proporcionando valores superiores a los otros modelos cuando se alejan de los efectos de la costa y valores superiores a los proporcionados por la función de Gumbel e inferiores a los de la LOGPearson III en las zonas de la costa.

Se realizó también un estudio a la sensibilidad de datos erráticos concluyendo que la función SQRT-ET<sub>max</sub> tiene una menor sensibilidad a los mismos, lo que permite un mejor estudio de las series completas sin pérdida de información, que si bien se trata de datos muy alejados de la normalidad y muchas veces poco fiables, también es cierto que se trata de medidas obtenidas y por lo tanto deben tenerse en cuenta.

Esta formulación es la única que ha sido diseñada de forma específica para lluvias de tipo convectivo, que proporciona valores de precipitación más altos para períodos de retorno elevados, que admite mejor la presencia de *outliers* y que actualmente es la recomendada por el CEDEX

(Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España) y la utilizada por el GIF (Gestor de Infraestructuras Ferroviarias) en las líneas de alta velocidad también en España.

## OBJETIVOS GENERALES

- Aplicar el modelo SQRTE-ET<sub>max</sub> a la regionalización de las precipitaciones máximas en la provincia de Entre Ríos.
- Comparar los resultados obtenidos, a partir de esta aplicación, con los distintos modelos existentes (Gumbel y GEV).

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar una herramienta de cálculo para aproximar los parámetros de la distribución SQRTE-ET<sub>max</sub>.
- Estimar a través del modelo SQRTE-ET<sub>max</sub> los máximos diarios para distintos períodos de retorno para la provincia de Entre Ríos.
- Comparar los resultados obtenidos con los modelos existentes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Recopilación y selección de estaciones

Esta etapa involucró la recopilación de la información pluviométrica existente, generándose una base de datos constituida por los máximos diarios anuales correspondientes a 11 estaciones localizadas en la Provincia de Entre Ríos. La Tabla 1 detalla las longitudes de registro y el período de tiempo considerado para estas estaciones. La Figura 1 muestra la distribución geográfica de las mismas.

**Tabla 1:** Estaciones seleccionadas, longitudes y períodos de registro.

Estación	Longitud de Registro	Período
Banderas	50	1958-2009
Concepción del Uruguay	42	1968-2009
Colonia Avigdor	48	1958-2009
El Carmen	51	1958-2009
Gilbert	53	1956-2009
Hernández	63	1945-2009
Isletas	50	1958-2009
Paraná	42	1968-2009
Pedro Vallejos	50	1958-2009
San Gustavo	52	1958-2009
San Salvador	45	1959-2009

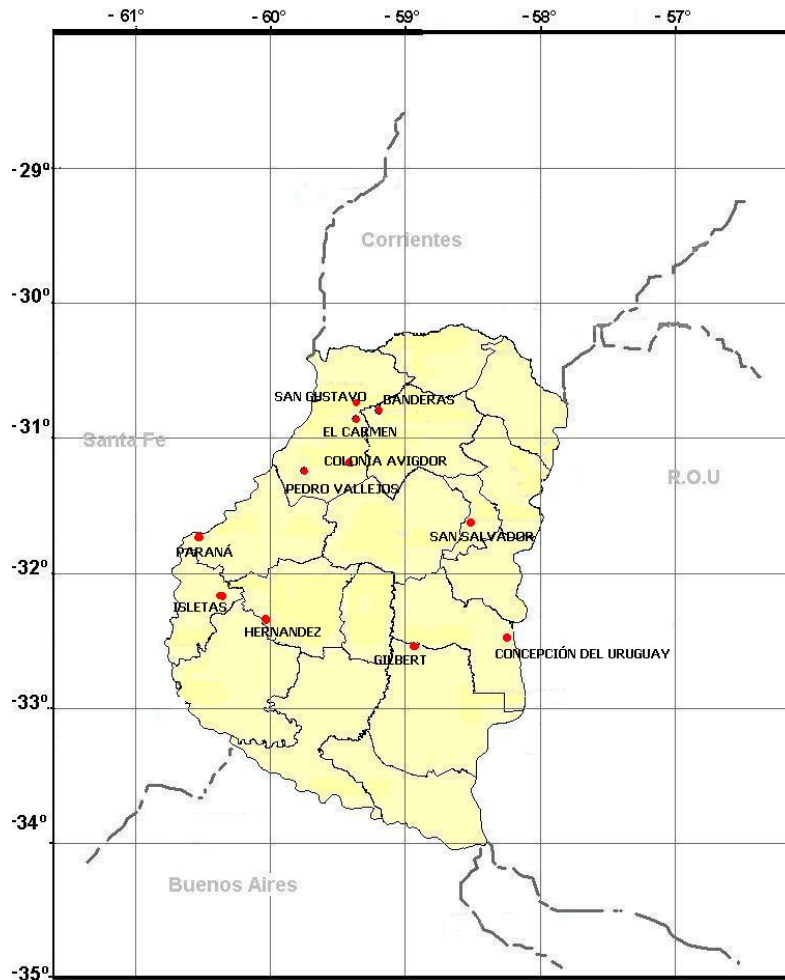


Figura 1: Distribución geográfica de las estaciones seleccionadas.

### Análisis estadístico de las series

La función de Distribución General de Valores Extremos (GEV) está indicada en [1]:

$$F(x) = e^{-\left(1 - \frac{k(x-x_0)}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad [1]$$

Los tres parámetros de la distribución son  $k$ ,  $x_0$  y  $\alpha$ , que determinan la forma, ubicación y escala. El parámetro  $k$  permite dividir a la familia general en tres clases:

- Si  $k = 0$  Distribución Gumbel o EVI
- Si  $k > 0$  Distribución Frechet o EVII
- Si  $k < 0$  Distribución Weibull o EVIII

Los parámetros de la Distribución de Valores Extremos Generalizada se estimaron a partir de los momentos ponderados por probabilidad.

La Función de Distribución Gumbel [2] está definida como:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-x_0}{\alpha}}} \quad [2]$$

Los dos parámetros de ubicación y escala de esta distribución son  $x_0$  y  $\alpha$ .

La distribución SQRT-ET<sub>max</sub> se deriva teóricamente, y su expresión es tan sencilla como las convencionales. La función de distribución de los máximos SQRT-ET<sub>max</sub> viene dada por [3]:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ e^{(-k \cdot (1 + \sqrt{\alpha \cdot x})) e^{(-\sqrt{\alpha \cdot x})}} & x \geq 0 \end{cases} \quad [3]$$

Los dos parámetros de la distribución son  $k$  y  $\alpha$ , que determinan la forma y la escala. La estimación directa de los parámetros de la función SQRT-ET<sub>max</sub> no se puede hacer de forma analítica, ya que la función [3] carece de primitiva conocida. Luego se debe realizar de forma aproximada mediante métodos numéricos.

En este sentido, Sáez Castillo (2009) ha desarrollado una metodología de aplicación de la función de distribución propuesta por Etoh, Murota y Nakamishi para el cálculo de máximos diarios a partir de los períodos de retorno. Ha estimado los parámetros de esta distribución por el método de máxima verosimilitud, implementando todos los procedimientos en el software estadístico R, que es un lenguaje de programación especialmente indicado para el análisis estadístico.

Se evaluó la bondad de los ajustes mediante análisis gráficos, tests de Kolmogorov-Smirnov, y criterios basados en parsimonia y medidas de la variabilidad no explicada.

Los análisis gráficos consisten en analizar visualmente la representación gráfica de los valores observados y los estimados por las distintas distribuciones consideradas, en una escala de probabilidad según la distribución de Gumbel, para cada una de las estaciones consideradas y para los distintos períodos de retorno.

El test de Kolmogorov-Smirnov se basa en cuantificar la diferencia entre el modelo teórico y los datos en su función de distribución. Tiene como estadístico el supremo de las diferencias. Este estadístico es evaluado dentro de la distribución en el muestreo, cuando menor es el valor del mismo, mejor es el ajuste.

La idea de parsimonia es que un buen modelo tiene pocos parámetros, ya que ha capturado las propiedades intrínsecas de la serie que se analiza; por el contrario, un modelo con demasiados parámetros es un modelo que probablemente ajuste mejor pero que sea menos robusto.

Históricamente la calidad de ajuste de una distribución se ha realizado efectuando la suma de los cuadrados de los residuos dividida por el tamaño de la muestra  $n$  (ECMV). El Criterio de Información de Akaike (AIC), Akaike (1974), definido por la Ecuación [4], combina el *ECMV*, el total  $p$  de parámetros de la distribución que va ser ajustada y la longitud  $n$  de la serie.

$$AIC(p) = n \cdot \ln(ECMV^2) + 2p \quad [4]$$

El criterio de información de Akaike pondera la varianza residual y el número de parámetros del modelo, en donde, para la distribución GEV,  $p = 3$ , y para las distribuciones Gumbel y SQRT-ET<sub>max</sub>,  $p = 2$ . De esta forma un modelo será mejor que otro si el *AIC* es menor independientemente del número de parámetros.

Como indicadores para medir la variabilidad no explicada, se consideraron el Error Cuadrático Medio de la Variable y el Error Cuadrático Medio de la Frecuencia.

El método de análisis regional del índice de creciente es una alternativa que toma en consideración la deficiencia de los métodos de análisis local, aumentando la longitud de los registros disponible mediante la transferencia de información de las diferentes estaciones pluviométricas que constituyen una supuesta región homogénea. El principio que subyace en este método, es que la distribución de los eventos máximos en una región homogénea es la misma salvo un factor de escala que refleja las características de las precipitaciones de cada estación. Una vez conocidos los cuantiles a escala regional y los valores medios locales, se pueden extrapolar extremos locales con cierta fiabilidad. La hipótesis básica de este método es que los puntos forman una región homogénea, o sea, las distribuciones de frecuencias de los  $N$  puntos son idénticas, salvo un factor de escala local, llamado índice de crecientes o factor de adimensionalización [5]:

$$\chi_j(F) = \mu_j x(F) \quad [5]$$

donde  $\mu_j$  es el índice de crecientes del punto  $j$ , y  $x(F)$  representa la curva regional de frecuencia de cuantiles adimensionales, común a todos los puntos. El factor de escala  $\mu_j$  puede ser estimado por cualquier medida de posición o tendencia central de la muestra de observaciones  $\{\chi_{1,j}, \chi_{2,j}, \dots, \chi_{n,j}\}$ .

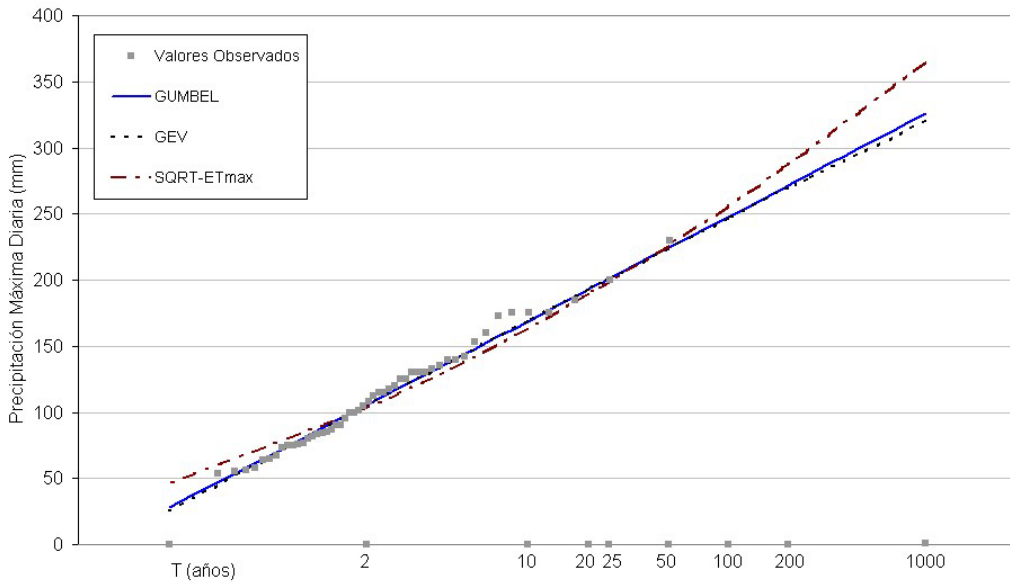
Los datos adimensionales estandarizados  $x_{i,j} = \chi_{i,j} / \hat{\mu}_j$   $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, N$ , donde  $n$  es la cantidad de datos por punto de la región y  $N$  es la cantidad de puntos de la región, forman una base para estimar una curva regional de cuantiles adimensionales  $x(F)$ . Los principales supuestos del método del índice de crecientes son:

- las observaciones en un punto cualquiera son idénticamente distribuidas;
- las observaciones en un punto cualquiera no presentan dependencia estadística serial;
- las observaciones en diferentes puntos son estadísticamente independientes;
- las distribuciones de frecuencia en diferentes puntos son idénticas, salvo un factor de escala;
- la forma matemática de la curva regional de cuantiles adimensionalizados puede ser correctamente especificada.

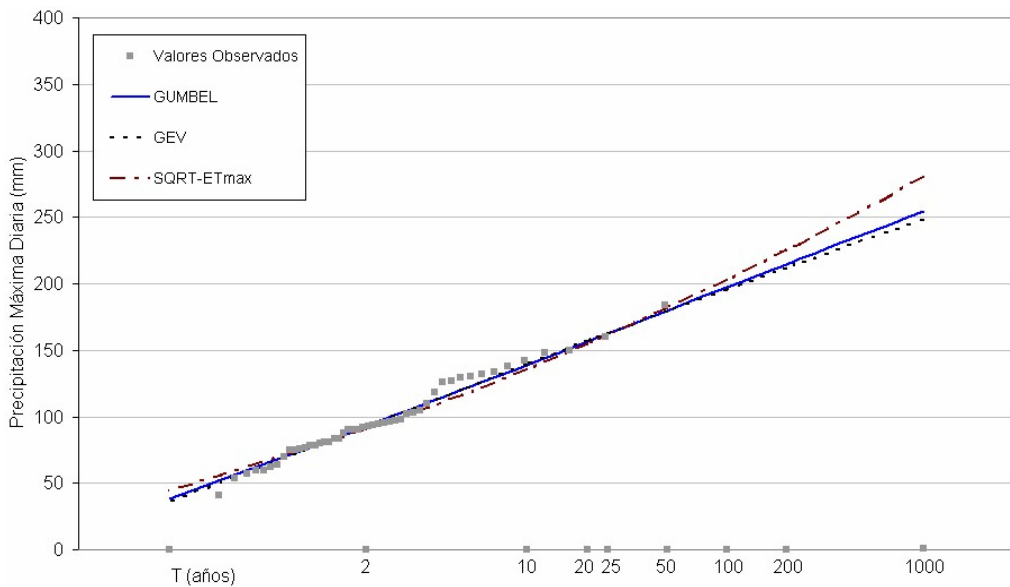
## RESULTADOS

El análisis de frecuencia de la serie de máximos diarios anuales para cada una de las estaciones pluviométricas elegidas se realizó con AFMULTI (Paoli et al, 1996) para las distribuciones Gumbel y Generalizada de Valores Extremos (GEV), y con la metodología desarrollada en R por Sáez Castillo para la distribución SQRT-ET<sub>max</sub>. A modo de ejemplo se presenta en las Figuras 2 a 5 los gráficos evaluados para las estaciones Banderas, Colonia Avigdor, Isletas y San Gustavo.

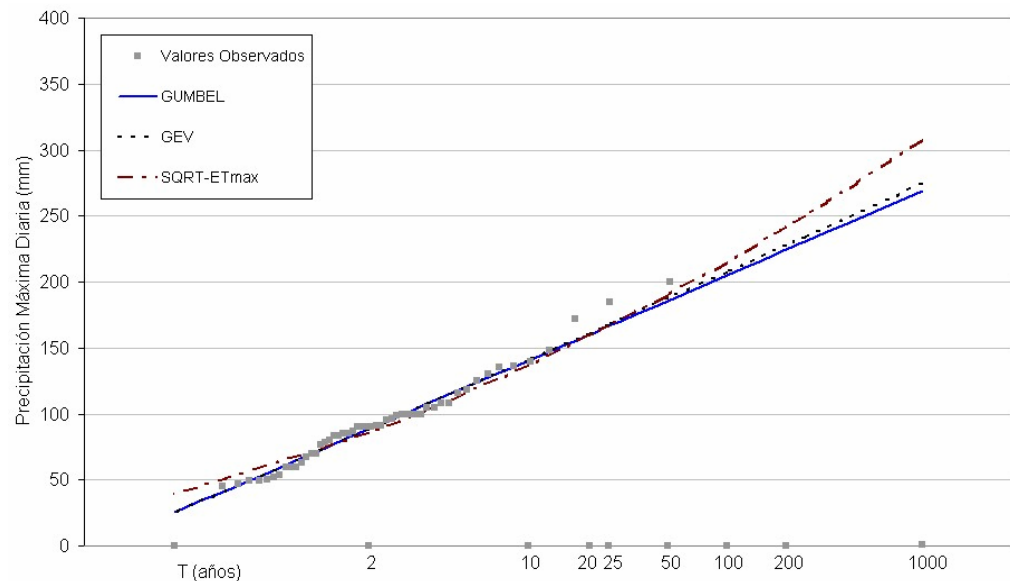




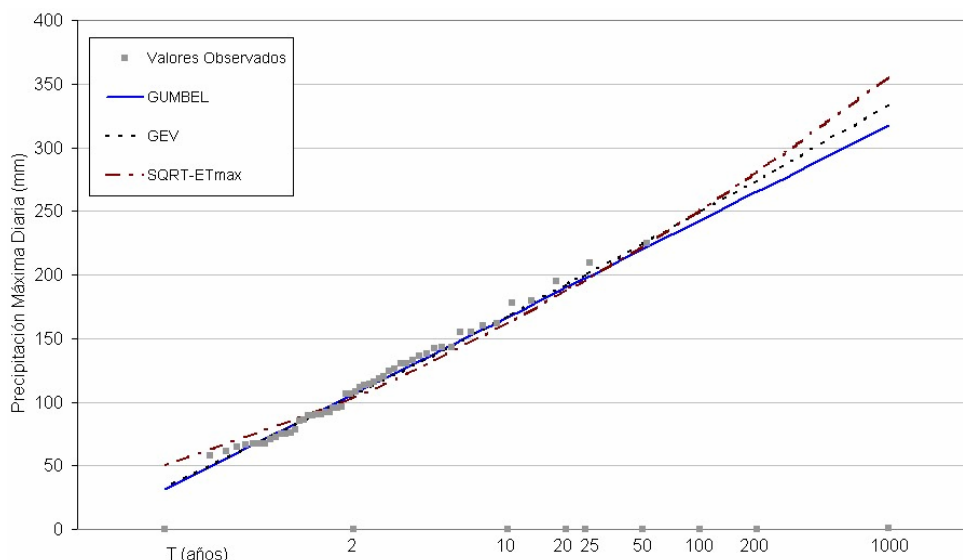
**Figura 2.** Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas diarias – Estación Banderas.



**Figura 3.** Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas diarias – Estación Colonia Aviador.



**Figura 4:** Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas diarias – Estación Isletas



**Figura 5.** Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas diarias – Estación San Gustavo.

En las Tablas 2, 3 y 4 se muestran los valores obtenidos para los tres estimadores: Error Cuadrático Medio de la Variable, el Error Cuadrático Medio de la Frecuencia y el Criterio de Información de Akaike. Los valores fueron calculados para cada una de las 11 estaciones, y para las tres distribuciones comparadas.

**Tabla 2.** Valor obtenido para el ECM de la Variable, para cada estación y para las tres distribuciones.

Estación	ECM Variable		
	Gumbel	GEV	SQRT-ET <sub>max</sub>
Banderas	5,23	5,24	5,96
Concepción del Uruguay	4,36	4,44	6,24
Colonia Avigdor	4,20	4,07	9,00
El Carmen	7,99	6,82	14,64
Gilbert	6,72	5,16	5,65
Hernández	10,16	9,55	8,77
Isletas	4,21	4,22	6,75
Paraná	6,03	6,70	9,92
Pedro Vallejos	11,12	7,90	9,02
San Gustavo	4,53	5,02	7,38
San Salvador	6,27	5,08	4,83

**Tabla 3.** Valor obtenido para el ECM de la Frecuencia, para cada estación y para las tres distribuciones.

Estación	ECM Frecuencia		
	Gumbel	GEV	SQRT-ET <sub>max</sub>
Banderas	0,0252	0,0240	0,0299
Concepción del Uruguay	0,0271	0,0258	0,0275
Colonia Avigdor	0,0318	0,0327	0,0339
El Carmen	0,0364	0,0347	0,0366
Gilbert	0,0287	0,0246	0,0244
Hernández	0,0289	0,0305	0,0367
Isletas	0,0348	0,0356	0,0443
Paraná	0,0196	0,0177	0,0180
Pedro Vallejos	0,0475	0,0254	0,0320
San Gustavo	0,0260	0,0258	0,0324
San Salvador	0,0298	0,0314	0,0323

**Tabla 4.** Valor obtenido para el AIC, para cada estación y para las tres distribuciones.

Estación	Criterio de Información de Akaike (AIC)		
	Gumbel	GEV	SQRT-ET <sub>max</sub>
Banderas	169,44	169,70	182,50
Concepción del Uruguay	127,68	131,21	157,83
Colonia Avigdor	141,77	140,75	215,00
El Carmen	215,97	201,82	279,79
Gilbert	205,93	179,94	178,65
Hernández	296,13	290,32	277,55
Isletas	147,75	149,98	195,02
Paraná	154,93	165,77	196,73
Pedro Vallejos	244,87	212,68	224,01
San Gustavo	161,11	173,79	211,86
San Salvador	169,22	152,27	145,68

En la Tabla 5 se muestra el valor del estadístico del test de Kolmogorov-Smirnov para cada una de las estaciones y para las tres distribuciones. A continuación, usando el modelo aproximado, se estimaron los máximos de las estaciones seleccionadas para la provincia de Entre Ríos (Zamanillo *et al*) para distintos períodos de retorno y para distintas duraciones (1, 2, 3, y 4 días). Este procedimiento se realizó en un conjunto de 37 estaciones localizadas tanto dentro de la provincia de Entre Ríos, como en las provincias limítrofes de Corrientes, Santa Fe y Buenos Aires y en la República Oriental del Uruguay. La distribución espacial de las mismas se presenta en la Figura 6.

**Tabla 5.** Valor del estadístico del test de Kolmogorov-Smirnov.

Estación	Estadístico del Test de Kolmogorov-Smirnov		
	GUMBEL	GEV	SQRT-ET <sub>max</sub>
Banderas	0,0638	0,0632	0,0953
Concepción del Uruguay	0,0693	0,0675	0,0985
Colonia Avigdor	0,0862	0,0829	0,1068
El Carmen	0,1168	0,1079	0,1514
Gilbert	0,0803	0,0802	0,0778
Hernández	0,0789	0,0857	0,1084
Isletas	0,1405	0,0919	0,1082
Paraná	0,0605	0,0616	0,0820
Pedro Vallejos	0,1347	0,0849	0,1093
San Gustavo	0,0742	0,1022	0,0994
San Salvador	0,0914	0,0829	0,0766

Se regionalizaron estos resultados con la metodología del índice de creciente (Saenz de Ormijana *et al*, 1991). Aplicado a los máximos anuales de precipitación supone que estos en un conjunto de estaciones que pertenecen a una región homogénea poseen distribuciones idénticas excepto por un factor de escala propio de cada estación. De esta forma, el máximo anual  $X_j$  en una estación  $j$  de la región puede expresarse como:  $X_j = u_j \eta_j$ . Expresión donde el factor de escala  $u_j$  es una constante particular de cada estación y el índice de crecientes  $\eta$  es la curva regional de cuantiles adimensionales, común a todas las estaciones, el cual se adoptó igual al valor medio de la serie de máximos para cada duración considerada.

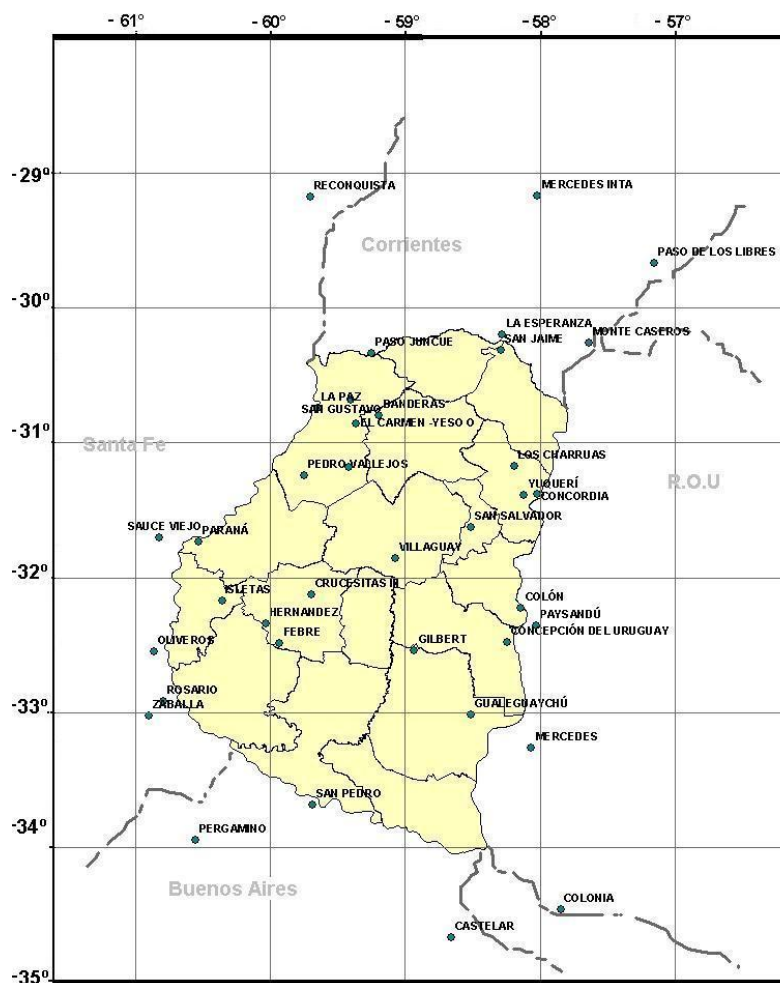


Figura 6. Ubicación geográfica de las 37 estaciones seleccionadas.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presenta una comparación de estimaciones de precipitaciones máximas diarias a partir de distintas distribuciones, Gumbel y GEV, que son las tradicionalmente usadas, y SQRT-ET<sub>max</sub>, especialmente formulada por Etoh, Murota y Nakamishi para modelizar este tipo de fenómenos. A partir de los resultados obtenidos al procesar las 11 estaciones con series de entre 42 y 63 años, se puede concluir que:

- Del análisis gráfico resulta que cualquiera de las tres distribuciones consideradas brinda un buen ajuste.
- Con respecto al error cuadrático medio de la variable, en 5 estaciones la distribución Gumbel presentó el menor valor, en 4 la GEV fue la que brindó mejor ajuste respecto de este índice, y sólo en 2 de ellas la distribución SQRT-ET<sub>max</sub> fue la que presentó el menor valor.
- Con respecto al error cuadrático medio de la frecuencia, la distribución de Gumbel sólo en 3 estaciones presenta el menor valor, la GEV brindó mejor ajuste en 7 estaciones, y en 1 de ellas la que presentó el menor valor fue la distribución SQRT-ET<sub>max</sub>.
- Según el Criterio de Información de Akaike, un modelo presenta un mejor ajuste que otro cuando este criterio toma menor valor, independientemente del número de parámetros que tenga.

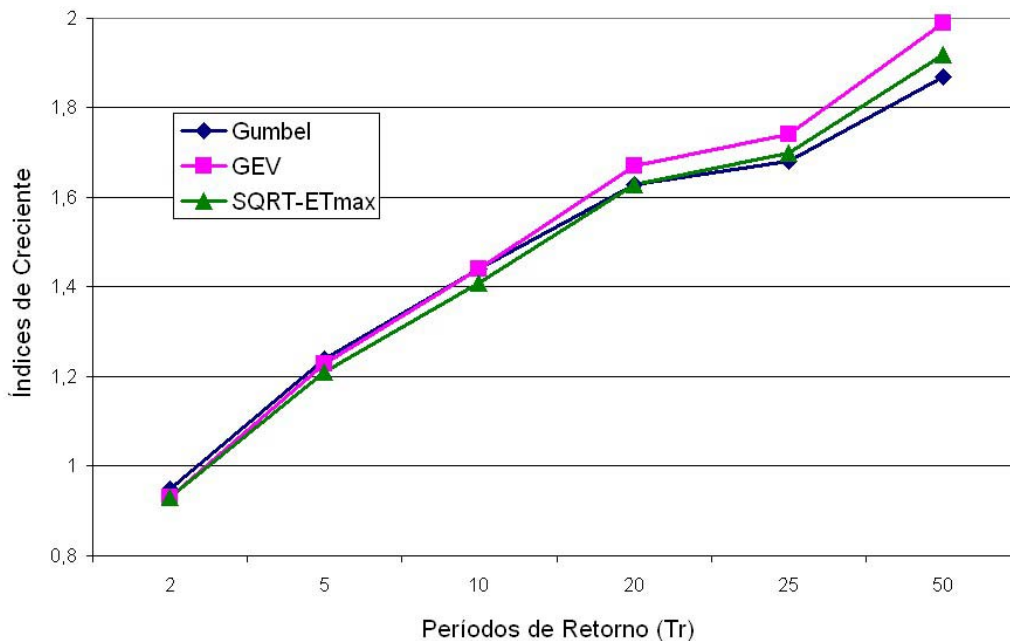
De acuerdo a esto, se obtuvo que el AIC en 5 estaciones presenta un menor valor según la distribución de Gumbel, en 3 presenta el menor valor para la GEV y en 3 para la SQRT-ET<sub>max</sub>.

- De acuerdo al test de Kolmogorov-Smirnov, las 3 distribuciones brindan un buen ajuste, pero el estadístico de este test presenta menores valores para la distribución GEV en 6 estaciones, mientras que para la distribución Gumbel, el menor valor corresponde a 3 estaciones, y para la distribución SQRT-ET<sub>max</sub> en 2 estaciones.

Del análisis anterior se puede afirmar que:

- Las 3 distribuciones brindan un buen ajuste para la estimación de precipitaciones máximas diarias dentro del rango de períodos de retorno empírico menor a 50 años.
- La distribución GEV es la que brinda el mejor ajuste, seguida por la distribución de Gumbel y luego la SQRT-ET<sub>max</sub>.
- La distribución SQRT-ET<sub>max</sub> es biparamétrica y es una alternativa a la distribución de Gumbel para el modelado de precipitaciones extremas.

De la estimación con el modelo aproximado de las precipitaciones máximas para 1, 2, 3 y 4 días y el cálculo del índice regional de creciente para distintos períodos de retorno y distintas duraciones se puede concluir que el índice regional de creciente prácticamente coincide para las 3 distribuciones en períodos de retorno menores a 25 años, notándose una pequeña diferencia para la Gumbel en períodos de retorno de 25 y 50 años, donde toma valores menores. La Figura 7 muestra la comparación de los índices regionales de creciente calculados para distintos períodos de retorno y duración de 1 día.



**Figura 7.** Índices de Creciente para distintos períodos de retorno, y para las 3 distribuciones, duración 1 día.

La distribución SQRT-ET<sub>max</sub> no siempre brinda un mejor ajuste frente a las distribuciones con las que se la ha contrastado, pero es biparamétrica y puede ser tomada como una alternativa a la distribución de Gumbel para la regionalización de precipitaciones máximas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akaike H.** (1974). "A new look at the statistical model identification". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 19 (6): 716–723.
- Etoh T.; Murota A. y Nakamishi M.** (1987). "Sqrt-Exponential Type Distribution of Maximum". *Hydrologic frequency modeling. Proceedings of the international symposium on flood frequency and risk analyses*. 14-17 May 1986 Louisiana State, Baton Rouge USA. Ed. D. Reidel.
- Sáez Castillo A.** (2009). "Modelización estocástica de precipitaciones máximas para el cálculo de eventos extremos a partir de los períodos de retorno mediante R". Informe Técnico. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Jaén.
- Zamanillo E.; Larenze, G.; Tito, J.; Pérez, M.; Garat, E. y Gómez, P.** (2008) "Regionalización de precipitaciones máximas para la provincia de Entre Ríos". *II Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua*. Libro de Resúmenes.

## CARACTERIZACIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA LA CUENCA DEL ARROYO FELICIANO

*Eduardo Zamanillo<sup>(1,2)</sup>, María Josefina Tito<sup>(2)</sup>, María Eugenia Garat<sup>(1)</sup>, Patricia Gómez<sup>(2)</sup> y Gustavo Larenze<sup>(1)</sup>*

<sup>(1)</sup>*Facultad Regional Concordia. Universidad Tecnológica Nacional.*

Salta 277. Concordia. Entre Ríos. Teléfono / Fax: +54 345 421 4590. E-mail: gihha@frcon.utn.edu.ar

<sup>(2)</sup>*Facultad de Ciencias de la Administración y Alimentación. Universidad Nacional de Entre Ríos.*

Avda. Tavella 1430. Concordia. Entre Ríos. Teléfono / Fax: +54 345 423 1432

E-mail: eduzam@ai.fcad.uner.edu.ar

**RESUMEN:** Se presentan los resultados de la regionalización de Precipitaciones Máximas en la cuenca del arroyo Feliciano. Se utilizó la información pluviométrica diaria colectada, para regionalizar precipitaciones máximas diarias, y combinar este producto con los resultados del análisis de las relaciones entre Intensidades, Duraciones y Recurrencias para determinar tormentas de proyecto en el área de la cuenca. Se describe sintéticamente la metodología de regionalización basada en la aplicación del método del índice de creciente. Se muestran los mapas regionalizados mediante el uso de la distribución GEV. Se vincularon las relaciones intensidad-duración-recurrencia existentes con los resultados de la regionalización de máximos diarios para estimar intensidades para duraciones menores a un día en zonas donde no existe registro pluviométrico ni pluviográfico. Como resultado se muestran los mapas de isohietas de precipitaciones máximas diarias para distintas duraciones y recurrencias y los mapas de isohietas de intensidades máximas para duraciones de tormenta de 60 minutos y períodos de retorno iguales a 5, 10, 20 y 50 años. Se analizan los patrones de distribución temporal de las tormentas intensas, identificando los criterios adoptados para la separación y selección de tormentas y se muestran los hietogramas de diseño a utilizar en la cuenca.

**PALABRAS CLAVE:** regionalización, precipitación máxima, índice de creciente, relaciones I-d-T, hietogramas de diseño

## INTRODUCCIÓN

En este estudio se desarrolla un modelo para la estimación de la frecuencia de las precipitaciones máximas, basado en el método de análisis regional del Índice de Creciente. Se demuestra que la Provincia de Entre Ríos puede ser considerada, desde el punto de vista de las precipitaciones máximas como una región homogénea, y que de acuerdo con los test de bondad de ajuste puede ser descrita por la función de distribución General de Valores Extremos (GEV). El método propuesto puede ser útil en la estimación de valores extremos de las precipitaciones, tanto si se dispone de datos locales como si se carece de ellos.

La estimación de las intensidades en sitios que carecen de información pluviográfica usualmente se realiza utilizando diferentes algoritmos de desagregación temporal de la precipitación máxima diaria. En este caso se empleó la metodología recomendada por el Manual de Tormentas de Diseño para la Provincia de Entre Ríos (Zamanillo et al, 2008).

Se procede a la desagregación temporal de la precipitación máxima diaria, para determinar las láminas correspondientes a duraciones menores de 24 horas, y sus correspondientes intensidades de precipitación, sobre las que es posible ajustar una ecuación Sherman de cuatro parámetros, que caracteriza la relación I-D-T del emplazamiento analizado. Una vez definidas las ecuaciones I-D-T para estas localidades se examinó la variación espacial de las intensidades de precipitación en el área de la cuenca. Como resultados se presentan los mapas de isohietas de intensidades máximas para duraciones de tormenta de 60 minutos y períodos de retorno iguales a 5, 10, 20 y 50 años.

Se utilizaron los patrones de distribución temporal obtenidos a partir del análisis de la información histórica registrada en los pluviógrafos provinciales aplicando el Método de Pilgrim, adoptada para la Provincia de Entre Ríos. En base a la desagregación temporal de las precipitaciones máximas diarias máxima y mínima se determinaron los Hietogramas de precipitación acumulada. Los mismos constituyen una aproximación a los valores límites de precipitación acumulada previstos para las dos subregiones pluviográficas de la cuenca del arroyo Feliciano.

## OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de la regionalización de las precipitaciones máximas diarias en la Provincia de Entre Ríos y el análisis de las relaciones Intensidad-duración-frecuencia para determinar tormentas de proyecto en el área de la Cuenca del arroyo Feliciano.

## METODOLOGIA Y RESULTADOS

### Regionalización de precipitaciones máximas

Para generar la base de datos se procesaron un total de trescientos cincuenta series pluviométricas, con longitudes de registro de 15 a 50 años distribuidas en toda la provincia, y en estaciones ubicadas en provincias vecinas y países limítrofes adoptándose como longitud de análisis, la serie de 30 años correspondiente al período 1976 – 2005.

Del análisis del Criterio de Información de Akaike y los errores cuadráticos medios de la variable y la frecuencia se adoptó para la provincia de Entre Ríos la distribución GEV por presentar el mejor ajuste local y regional (Zamanillo et al, 2008).



## Índice de Creciente

De las diversas metodologías de regionalización recomendadas por la bibliografía internacional se adoptó el Método del Índice de Crecientes, uno de los métodos regionales más difundidos debido a su sencillez. Se basa en el uso simultáneo de datos procedentes de un número de estaciones próximas que pueden considerarse homogéneas, hipótesis que fue verificada utilizando el Test de Homogeneidad Hidrológica de Dalrymple (Dalrymple, 1960).

El método del Índice de Creciente supone que la distribución de los eventos máximos en una región homogénea es la misma excepto por un factor de escala que refleja las características de las precipitaciones de cada estación (Sáenz de Ormijana et al, 1991). Conocidos los cuantiles a escala regional y los valores de las medias locales, el valor de la precipitación máxima en la estación  $j$ -ésima puede expresarse como:

$$x_j = \mu_j \cdot \eta \quad [1]$$

donde el factor de escala  $\mu_j$  se estima como la media de la serie histórica en la estación  $j$ -ésima y el índice de creciente regional  $\eta$  es una variable aleatoria adimensional idéntica para toda la región.

La adimensionalización de las series se llevó a cabo dividiendo los valores estimados  $P_{TRj}$  de cada estación (para  $Tr = 2, 5, 10, 20, 25$  y  $50$  años) por el factor  $\mu_j$  valor de las medias locales. Por lo tanto:

$\mu_j = P_{Mj}$  = Media de los máximos diarios de cada estación;

$P_{TRj}$  = Precipitación Máxima para el periodo de retorno  $Tr$  en la estación  $j$ .

Los índices de creciente locales  $\eta_j$  se calcularon dividiendo los valores estimados para  $Tr = 2, 5, 10, 20, 25$  y  $50$  años y para duraciones iguales a 1, 2, 3 y 4 días por la media de cada serie según:

$$\eta_j = \frac{P_{TRj}}{P_{Mj}} \quad [2]$$

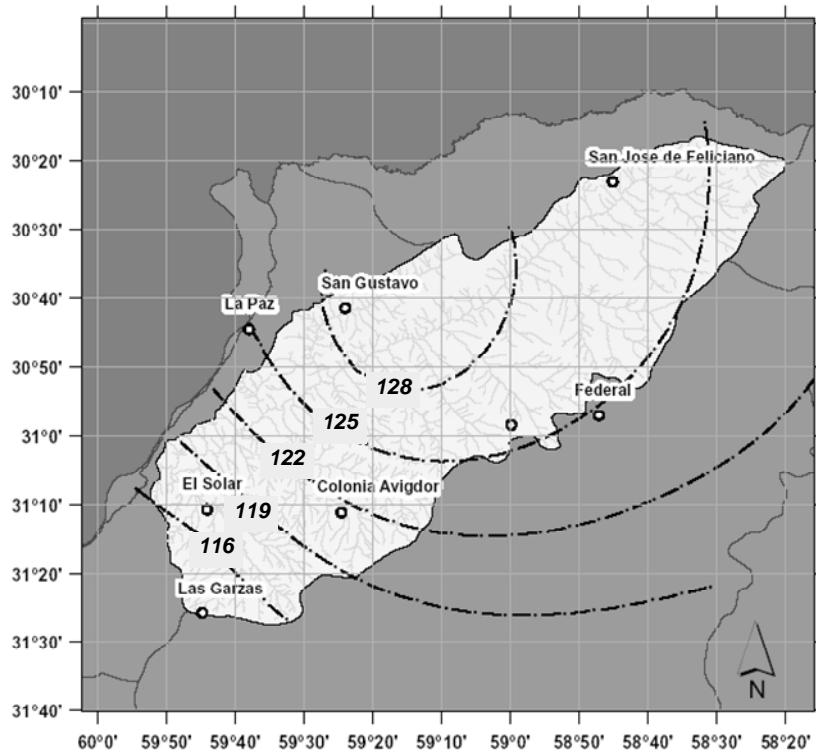
Los Índices de crecientes regionales se determinan como promedio de los cocientes locales correspondientes a las estaciones seleccionadas, según se indican en la Tabla 1 para cada duración y recurrencia de diseño.

**Tabla 1.** Índices de creciente regionales para períodos de retorno de 2 a 50 años. Duraciones: 1, 2, 3 y 4 días

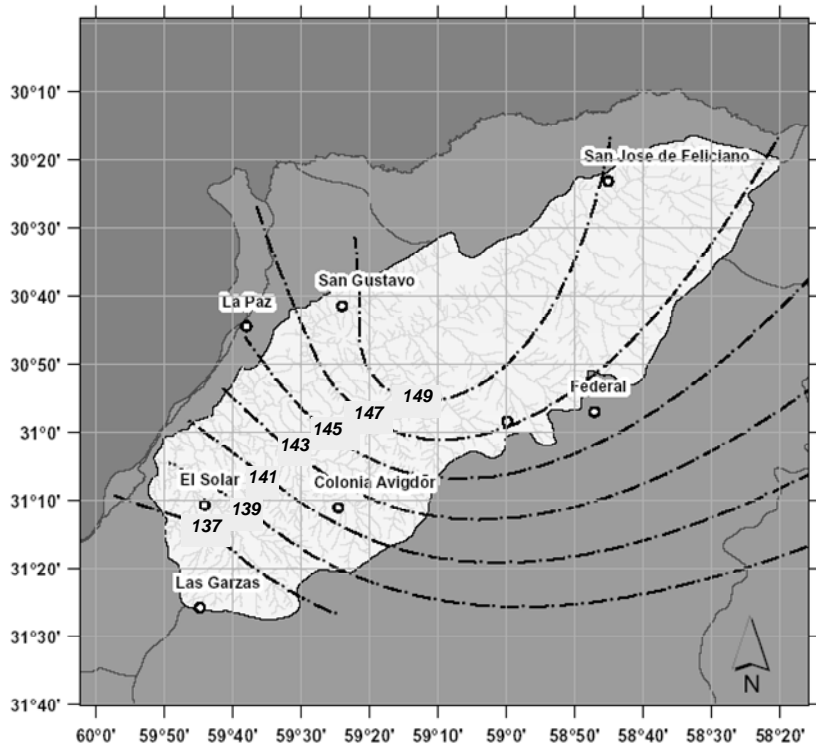
Duración (días)	Período de retorno (años)					
	2	5	10	20	25	50
1	0.93	1.23	1.44	1.67	1.74	1.99
2	0.93	1.24	1.46	1.68	1.76	1.99
3	0.92	1.24	1.46	1.68	1.76	2.00
4	0.93	1.24	1.46	1.68	1.76	2.00

Por otra parte, se llevó a cabo la regionalización de la Precipitación Máxima Media, para duraciones iguales a 1, 2, 3 y 4 días. A modo de ejemplo, se presentan los mapas de isohietas en las Figuras 1 y 2 para 1 y 2 días de duración.

El uso combinado de la Tabla 1 y los mapas de Medias permite estimar en cada punto de la cuenca la Precipitación Máxima Media (mm) correspondiente a un período de retorno  $Tr$  (años) para duraciones iguales a 1, 2, 3 y 4 días. (Olmos et al., 2007).



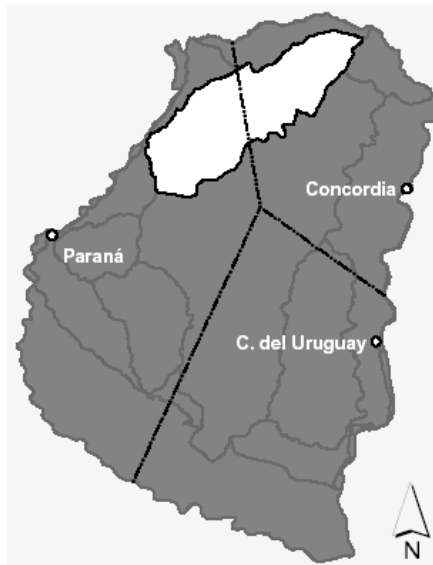
**Figura 1.** Isohietas de precipitaciones máximas medias (mm) – Cuenca del Arroyo Feliciano  
Duración: 1 días



**Figura 2.** Isohietas de precipitaciones máximas medias (mm) - Cuenca del Arroyo Feliciano  
Duración: 2 días

**Relaciones Intensidad - Duración – Recurrencia**

De acuerdo a los criterios presentados en el Manual de Tormentas de Diseño para la Provincia de Entre Ríos (Zamanillo et al, 2008), la Provincia de Entre Ríos se divide en tres zonas de influencia asociadas a los pluviógrafos en operación, que se indican en la Figura 3.



**Figura 3.** Zonas de influencia asociadas a los pluviógrafos con series extensas. Provincia de Entre Ríos.

A cada zona se le atribuye el mismo patrón de distribución temporal de la lámina total precipitada, caracterizado por las relaciones  $RT = P_{24\text{horas}}/P_{\text{máx}} \text{ diaria.}$  y por los cocientes  $r_{d/24}$  entre láminas de distintas duraciones  $d$  (min) con respecto a la precipitación de 24 horas ( $P_{24\text{horas}}$ ), los cuales se obtienen de la relación I-D-T representativa de cada pluviógrafo (Caamaño Nelli et al, 2003).

A partir de estas relaciones se procede a la desagregación temporal de la precipitación máxima diaria, para determinar las láminas correspondientes a duraciones menores de 24 horas, y sus correspondientes intensidades de precipitación, sobre las que es posible ajustar una ecuación tipo Sherman de cuatro parámetros, que caracteriza la relación I-D-T del emplazamiento analizado (García, 2000).

$$i = \frac{K \cdot Tr^m}{(d+c)^n} \quad [3]$$

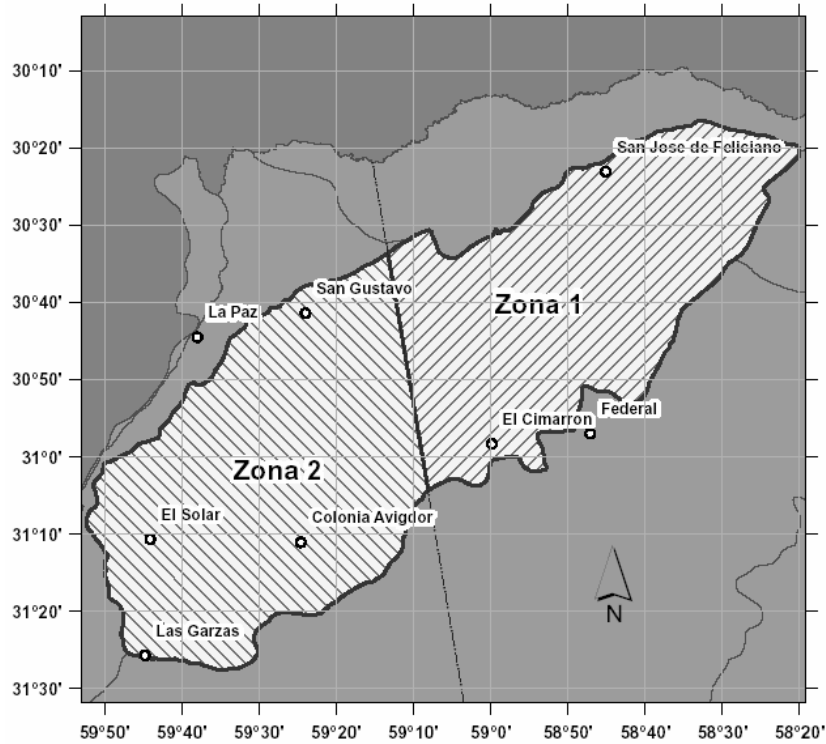
donde,  $i$ : Intensidad de precipitación en mm/h,  $Tr$ : Período de retorno en años,  $d$ : duración de la precipitación en minutos,  $k$ ,  $m$ ,  $n$  y  $c$ : parámetros que se determinan para cada localidad en base a un análisis de regresión lineal múltiple.

De acuerdo a las zonas de influencia presentadas en la Figura 3, la cuenca del arroyo Feliciano se divide en dos subregiones pluviográficas que se indican en la Figura 4: la Zona 1 asociada al pluviógrafo Concordia, y la Zona 2 al de Paraná.

La determinación de los parámetros de las ecuaciones I-D-T se presenta en la Tabla 2, para las localidades de San José de Feliciano, San Gustavo, El Solar, Colonia Avigdor y Las Garzas, ubicadas en la cuenca del Arroyo Feliciano, y para las localidades limítrofes de La Paz y Federal.

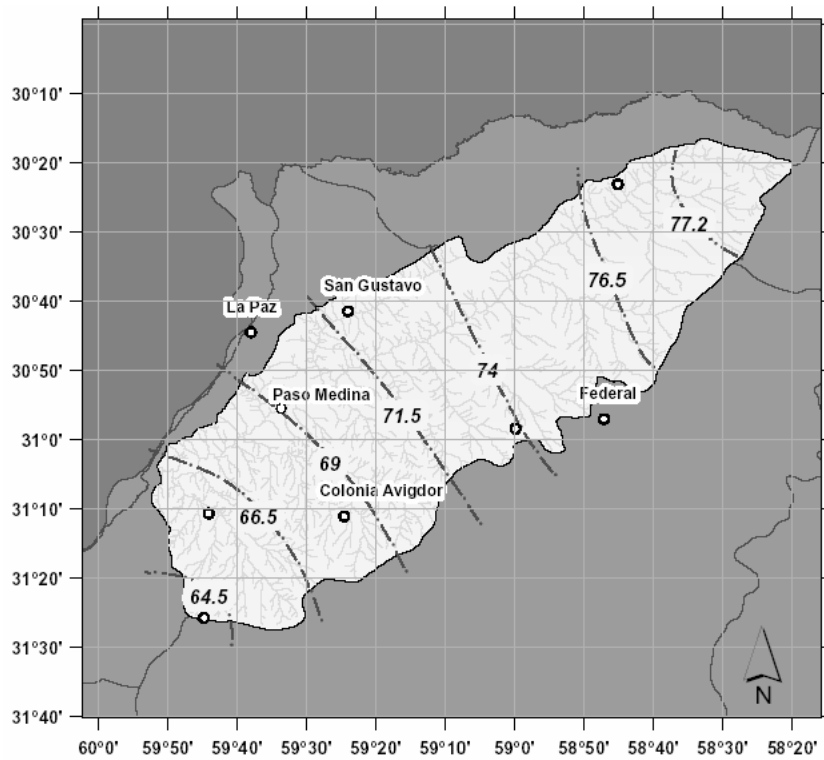
**Tabla 2.** Parámetros de las relaciones I-D-T para localidades de la cuenca del Arroyo Feliciano.

LOCALIDAD	LATITUD	LONGITUD	K	m	n	c
1. San José De Feliciano	30° 23' 24"	58° 45' 00"	882.5	0.23	0.71	5
2. San Gustavo	30° 41' 24"	59° 24' 00"	764.9	0.23	0.69	6
3. El Solar	31° 08' 24"	59° 42' 36"	706.5	0.23	0.69	6
4. Colonia Avigdor	31° 11' 24"	59° 25' 12"	724.1	0.23	0.69	6
5. Las Garzas	31° 25' 48"	59° 44' 24"	681.1	0.23	0.69	6
6. La Paz	30° 45' 00"	59° 39' 00"	743.9	0.23	0.69	6
7. Federal	30° 57' 00"	58° 47' 24"	870.5	0.23	0.71	5



**Figura 4.** Zonas de influencia de los pluviógrafos - Cuenca del Arroyo Feliciano  
 Zona 1: pluviógrafo Concordia - Zona 2: pluviógrafo Paraná.

Una vez definidas las ecuaciones I-D-T para estas localidades se examinó la variación espacial de las intensidades de precipitación en el área de la cuenca. Las Figuras 5 y 6 presentan los mapas de isohietas de intensidades máximas para duraciones de tormenta de 60 minutos y períodos de retorno iguales a 10 y 50 años.



**Figura 5.** i60 minutos - Tr = 10 años.

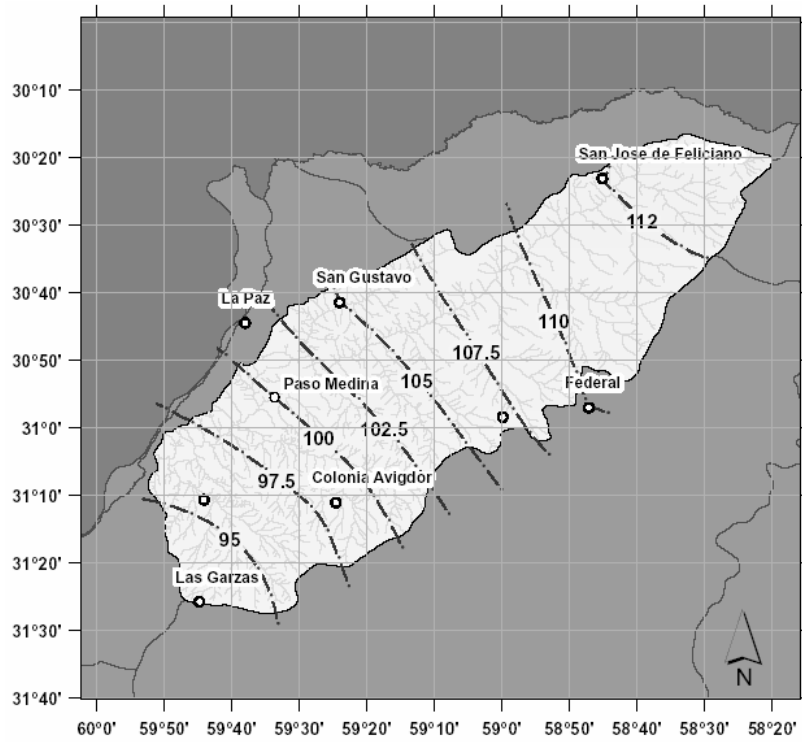


Figura 6. i60 minutos - Tr = 50 años.

### Hietogramas de Diseño

Se utilizaron los patrones de distribución temporal obtenidos a partir del análisis de la información histórica registrada en los pluviógrafos provinciales aplicando el Método de Pilgrim, estándar de diseño hidrológico en Australia, y adoptada para la Provincia de Entre Ríos (Pilgrim et al, 1977). Los mismos dependen del rango de duración de la tormenta, según se indica en las Figuras 7 y 8.

Debido a un criterio de proximidad geográfica los hietogramas de la localidad de Concordia se extrapolan a todos los emplazamientos incluidos en la Zona 1, y los correspondientes a la localidad de Paraná a los de la Zona 2.

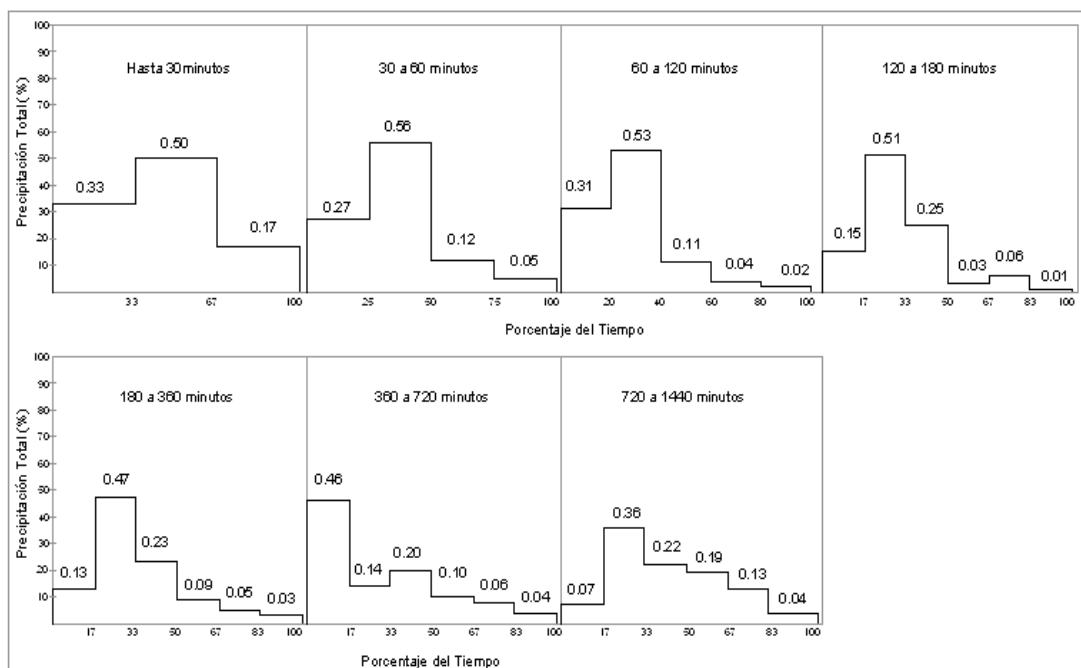
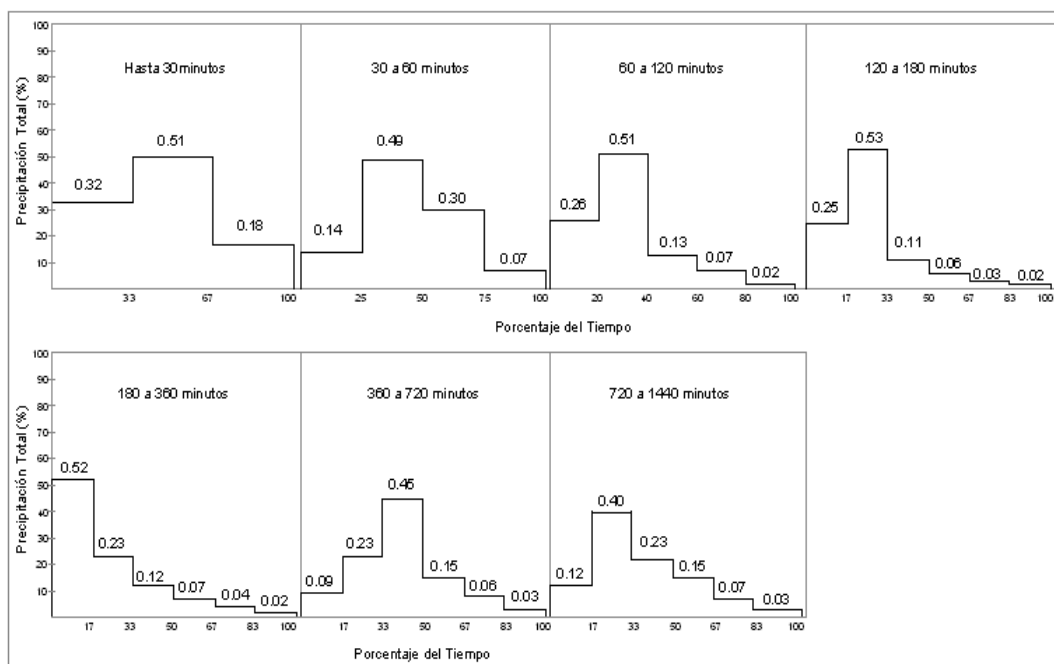


Figura 7. Zona 1- Hietogramas de tormenta. Concordia.



**Figura 8.** Zona 2 - Hietogramas de tormenta. Paraná.

Para caracterizar los valores extremos estimados para la cuenca se identificaron los valores máximo y mínimo de precipitación máxima diaria para 50 años de periodo de retorno indicados en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Rango estimado de Precipitaciones Máximas Diarias para Cuenca Feliciano. Tr: 50 años

Designación	Duración (días)			
	1	2	3	4
MÁX ZONA 1	253	300	332	340
MÍN ZONA 1	225	270	291	306
MÁX ZONA 2	252	298	329	342
MÍN ZONA 2	243	293	320	334

A modo de ejemplo, se presenta el resultado de combinar las IDF correspondiente a la localidad de San José de Feliciano con los Hietogramas de la Zona 1 para recurrencias iguales a 5 y 50 años. Para un período de retorno igual a 10 años, como ejemplo de diseño, se presenta la evolución de la precipitación acumulada para dicha localidad según se indica en la Figura 9.

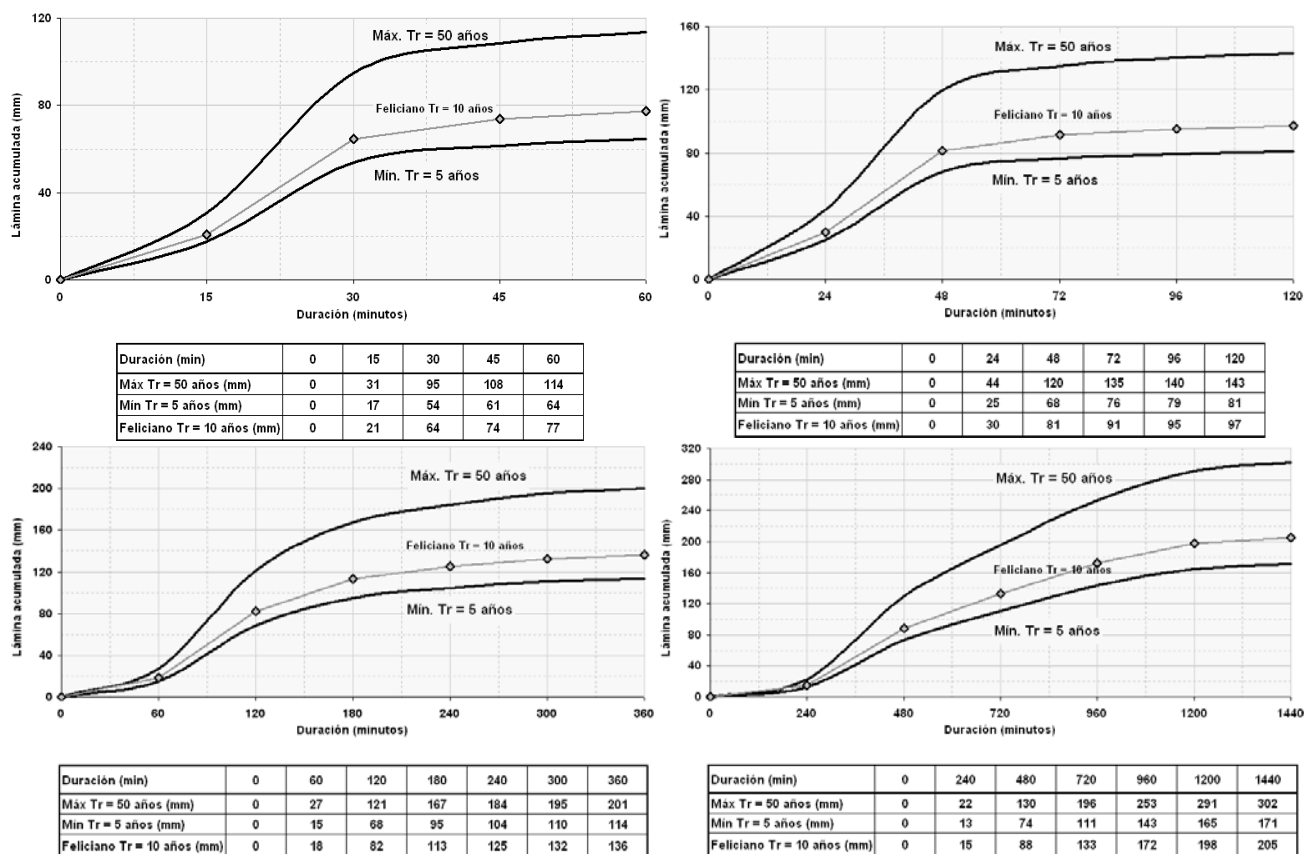


Figura 9. Zona 1 - Hietogramas extremos de precipitación acumulada - Cuenca del Arroyo Feliciano.

## CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos se establecen las siguientes conclusiones:

- Se dispone de una metodología de regionalización basada en la aplicación del método del índice de creciente para determinar máximos diarios en zonas sin disponibilidad de datos.
- Se determinaron patrones de distribución temporal de las tormentas intensas, identificando los criterios adoptados para la separación y selección de tormentas.
- Se vincularon las relaciones intensidad-duración-recurrencia existentes con los resultados de la regionalización de máximos diarios para estimar tormentas de diseño para duraciones menores a un día en zonas donde no existe registro pluviométrico ni pluviográfico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Borsellino, M.J., Mattar M.T., Olmos, L.A., (2002).** “Estimación de curvas i-d-f para datos de lluvias a nivel diario - Aplicación a la región centro-oeste de Santiago del Estero”. Instituto de Recursos Hídricos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías - Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., (1994).** “Hidrología Aplicada”. McGraw – Hill Interamericana, S.A. Bogotá, Colombia.
- Caamaño Nelli, G.E. y Dasso, C.M., (2003).** “Lluvias de Diseño” - Conceptos, Técnicas y Experiencias. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universitat-Editorial Científica Universitaria Argentina.
- Dalrymple, T., (1960).** “Manual of Hidrology, Part 3 - Flood-Flow Techniques”. *Homogeneity Test. Geological Survey Water Suply Paper 1543-A.* Washington.
- Genta, J.L. y Charbonnier, F., (2003).** “Curso de Hidrología Aplicada”. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería. Montevideo.

- Di Benedetto, H.M.**, (1991). “*Análisis y elaboración de metodologías para el aprovechamiento de datos de lluvia diaria para la estimación de intensidades*”. Dirección Provincial de Hidráulica- Centro de Investigaciones Hídricas de la región semiárida (CIHRSA). Córdoba.
- Di Benedetto, H.M., Zamanillo, E.A., Caamaño Nelli, G.E.**, (1991). “*Hietogramas típicos de tormentas intensas en la estación La Suela, Provincia de Córdoba*”. Dirección Provincial de Hidráulica-Centro de Investigaciones Hídricas de la región semiárida (CIHRSA). Córdoba.
- Devoto, G.A.**, (2002). “*Regionalización de Lluvias Intensas en Argentina*”. Universidad Católica Argentina. Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas y de Ingeniería.
- García C.M., Zamanillo, E.A., Caamaño Nelli, G.E.**, (1994). “*Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias para la Provincia de Córdoba*”. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida (CIHRSA).
- García, C.M.**, (2000). “*Lámina de Lluvia Puntual para Diseño Hidrológico*”. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Medina, L. y Moyano, M.C.** (1975). “Estudio piloto de lluvias intensas en la República Argentina”. *Hidrología Cuad. N°2*. INCYTH. Buenos Aires.
- Olmos, L.A., Ibáñez, J., Hartmann A.**, (2007). “*Aplicación del Método del Índice de Crecientes en Lluvias Máximas Diarias de la Provincia de Santiago del Estero*”. - Instituto de Recursos Hídricos - Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías.
- Paoli, C., Bolzico, J., Cacik, P.**, (1994). “*Análisis de Frecuencia de Variables Hidrológicas*”. Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.
- Pérez, M.M., Larenze, G., Zamanillo, E.A.**, 2008. “Análisis de interiores y exteriores de tormenta para la Provincia de Entre Ríos”. *III Jornadas de Difusión de proyectos de investigación-extensión. INEX 2008*. Universidad Nacional de Entre Ríos, Concepción del Uruguay.
- Pilgrim, D.H., Cordery I., French, R.**, (1977). “*Australian rainfall and runoff*”. The Institution of Engineers, Australia.
- Saenz De Ormijana, F., Hidalgo Castro F.J., Santa Perez, A.**, (1991). “Estimación de Precipitaciones Máximas mediante el Método Regional del Índice de Avenida”. *Revista de Obras Públicas*, España.
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., Lane, Wl.**, (1980). “Applied Modelling of Hidrologic Time Series”. *Water Resources Publications*.
- Tucci, E.M.**, (1997). “*Hidrología, Ciencia y Aplicación*”. Segunda Edición. Porto Alegre.
- Zamanillo, E.A., Larenze, G., Tito, M.J., Pérez, M.M., Garat, M.E., Gómez, P.**, (2008). “Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias para la Provincia de Entre Ríos”. *Segundo Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua*. Córdoba.
- Zamanillo, E.A., Larenze, G., Tito, M.J., Pérez, M.M., Garat, M.E., Gómez, P.**, (2008). *Manual de Tormentas de Diseño para la Provincia de Entre Ríos*. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia, Grupo de Investigación en Hidrología e Hidráulica Aplicada.



## DERIVACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE CURVAS IDR PARA ROSARIO, CASILDA Y ZAVALLA (SANTA FE, ARGENTINA)

**Pedro A. Basile**<sup>(1),(2)</sup>, **Gerardo Riccardi**<sup>(1),(2),(3)</sup> y **Hernán Stenta**<sup>(1),(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – UNR)

<sup>(2)</sup> Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – UNR)

<sup>(3)</sup> Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina

E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

**RESUMEN:** Las curvas intensidad-duración-recurrencia (IDR) se emplean en el diseño hidrológico para estimar intensidades medias máximas de lluvia, de determinadas duraciones y recurrencias, como así también, para la construcción de hietogramas de diseño. Tales herramientas posibilitan especificar los escenarios de entrada a los modelos de transformación lluvia-caudal, para la determinación de caudales máximos o hidrogramas de diseño. En este trabajo se describe la derivación y parametrización de curvas IDR para las ciudades de Rosario, Casilda y Zavalla, localizadas en el sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. En primer lugar, se determinaron los valores de lámina-duración-recurrencia (PDR), considerando valores de lámina máxima para duraciones de 1 a 5 días y recurrencias variables entre 2 y 10000 años. Las láminas de lluvias para dichas duraciones fueron obtenidas a partir de la FDP Gumbel, que mejor representa a la serie de datos pluviométricos máximos anuales registrados en las Estaciones: Rosario Aero-SMN (1935-2007); INTA-Agencia de Extensión Rural Casilda (1962-2007) y FCAG-UNR Estación Agroexperimental Zavalla (1973-2007). Por otra parte, Casilda y Zavalla no cuentan con datos pluviográficos. Consecuentemente, en esas dos estaciones, las láminas de lluvia para duraciones menores que 24 horas se obtuvieron a partir de la transposición de las relaciones  $R_{24h,1d,R}$  y  $r_{D_i,24h}$ , derivadas mediante la FDP teórica de Gumbel ajustada a la información pluviográfica registrada en la Estación Rosario Aero-SMN durante el período (1942-1984). Por lo tanto, la metodología implementada para extender las curvas para duraciones menores que 24 horas en Casilda y Zavalla, consistió en multiplicar la precipitación de duración 1 día por la relación  $R_{24h,1d}$ ; que permitió convertir la lámina máxima de 1 día (pluviométrica) en la lámina máxima de 24 horas (pluviográfica). Posteriormente, multiplicando esta última por las respectivas relaciones entre láminas,  $r_{D_i,24hs}$ , se determinaron las láminas para las duraciones  $D_i \leq 24$  horas y para cada una de las recurrencias adoptadas. De esta manera se obtuvieron curvas PDR para duraciones comprendidas entre 5 minutos y 5 días. Finalmente, para las tres estaciones, se derivaron las curvas IDR y se parametrizaron ajustando ecuaciones del tipo Sherman de tres parámetros.

**PALABRAS CLAVE:** Lluvias de diseño, Curvas IDR, Rosario, Casilda, Zavalla.

## INTRODUCCIÓN

Las curvas intensidad-duración-recurrencia (IDR) se emplean en el diseño hidrológico para estimar intensidades medias máximas de lluvia, de determinadas duraciones y recurrencias, como así también, para la construcción de hietogramas de diseño (Orsolini et al., 2008; Caamaño Nelli et al., 1999). Tales herramientas posibilitan especificar los escenarios de entrada a los modelos de transformación lluvia-caudal para la determinación de caudales máximos o hidrogramas de diseño (Riccardi et al., 2009; Stenta et al., 2009; Zimmermann et al., 2009a y b; García et al., 2000).

El presente trabajo tiene como objetivo general actualizar y ampliar los estudios estadísticos de precipitaciones registradas en las Estaciones: Rosario Aero, INTA-Agencia de Extensión Rural de Casilda y FCAG-UNR Estación Agro-Experimental de Zavalla, ubicadas en el sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. Por otra parte, se plantea como objetivo específico derivar curvas IDR para dichas estaciones y parametrizarlas ajustando ecuaciones tipo Sherman de tres parámetros.

Tales curvas permitirán abordar el diseño de obras hidráulicas en la zona de influencia de tales ciudades, desde el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano; incluyendo conductos pluviales, cordón cuneta, bocas de tormenta, reservorios de detención, etc.; hasta el dimensionamiento de alcantarillas, puentes y canales artificiales en sectores rurales.

### Descripción de los datos utilizados

En el estudio se utilizó una serie de registros pluviométricos de 44 años (1962-2007), de la Estación INTA-Agencia de Extensión Rural de Casilda (que en adelante denominaremos Estación Casilda), localizada a una latitud de 33° 02' Sur, una longitud de 61° 09' Oeste y una altura de 70.5 m sobre el nivel del mar. Por otra parte, se utilizaron 35 años (1973-2007) de datos pluviométricos registrados en la FCAG-UNR Estación Agro-Experimental de Zavalla (que en adelante denominaremos Estación Zavalla), localizada a una latitud de 33° 01' Sur, una longitud de 60° 53' Oeste y una altura de 50 m sobre el nivel del mar.

Además, se utilizó una serie de registros pluviográficos de 43 años (1942-1984) y una serie de registros pluviométricos de 73 años (1935-2007), de la Estación Rosario Aero (SMN); distante aproximadamente 40 km de la Estación Casilda y 16 km de la Estación Zavalla y localizada a una latitud de 32° 55' Sur, una longitud de 60°46' Oeste y a 22.5 m sobre el nivel del mar.

Las Estaciones de Rosario y Zavalla se encuentran dentro de la cuenca del A° Ludueña (sur de la provincia de Santa Fe, Argentina), mientras que, la Estación Casilda se ubica fuera de dicha cuenca en proximidad del límite Sur-Oeste. El área de la cuenca es aproximadamente de 700 km<sup>2</sup>, con una pendiente media del curso principal de 0.00133. En la Figura 1 se presenta la ubicación de la cuenca del A° Ludueña y se indican las distintas estaciones de medición de lluvia consideradas en el presente estudio.

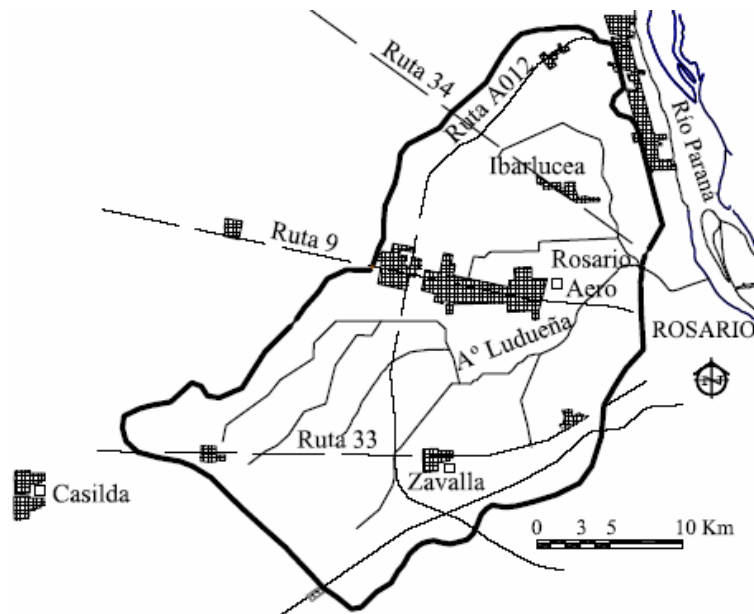


Figura 1.- Cuenca del A° Ludueña y estaciones de medición de lluvia consideradas.

### Metodología de cálculo implementada

En función de los datos pluviométricos registrados se procedió a realizar la construcción de las muestras de lluvias máximas para distintas duraciones. A partir de los registros se seleccionaron lluvias máximas anuales para duraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 días. Además, a partir de los datos pluviográficos, se seleccionaron las láminas máximas anuales para duraciones de 5, 15, 30, 60, 180, 360, 720 y 1440 minutos.

A cada una de las muestras se le ajustaron cinco funciones de distribución de probabilidades teóricas (FDP) o modelos probabilísticos (MP): LogGauss, Gumbel, GEV (General Extremes Values), Pearson y Exponencial, empleando el programa AFMULTI (Paoli et al., 1994), por otra parte, la probabilidad experimental se calculó con la ecuación de Hazen. Se seleccionó la FDP teórica de mejor ajuste de acuerdo a la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Chi-Cuadrado.

La metodología implementada para desagregar temporalmente hacia duraciones menores que 24 horas en Casilda y Zavalla, consistió, en primer lugar, en multiplicar la lámina de duración 1 día ( $P_{1d,R}$ ) de Casilda y Zavalla por la relación  $R_{24h,1d,R}$ :

$$P_{24h,R} = R_{24h,1d,R} P_{1d,R} \quad [1]$$

donde  $R_{24h,1d,R}$  es la relación entre las láminas máximas de igual recurrencia  $R$ ,  $P_{24h}$  y  $P_{1d}$ , correspondientes a períodos de 24 horas móviles (datos pluviográficos) y a períodos de 1 día fijos (datos pluviométricos), derivada utilizando la FDP teórica ajustada a los datos de la Estación Rosario Aero:

$$R_{24h,1d,R} = \left( \frac{P_{24h}}{P_{1d}} \right)_R \quad [2]$$

Es decir, se introdujo la diferencia entre el día pluviométrico (generalmente con horario de inicio y fin prefijados) y el intervalo móvil de 24 horas que rastrea las láminas máximas de cada tormenta (García et al., 2001). De esta manera se determinaron las lámina de lluvia  $P_{24h,R}$  de las Estaciones Casilda y Zavalla.

Sucesivamente, las láminas para las diferentes duraciones  $D < 24$  hs y para cada recurrencia,  $P_{D_i,R}$ , se determinaron multiplicando las láminas de duración 24 horas, obtenidas precedentemente, por las respectivas relaciones entre láminas  $r_{D_i,24h,R}$ :

$$P_{D_i,R} = P_{1d,R} R_{24h,1d,R} r_{D_i,24h,R} \quad [3]$$

donde  $r_{D_i,24h}$  son las relaciones entre las láminas máximas de igual recurrencia para duraciones menores o iguales que 24 horas (1440 minutos) calculadas con la FDP teórica ajustada a los datos pluviográficos de la Estación Rosario Aero:

$$r_{D_i,24h,R} = \left( \frac{P_{D_i}}{P_{24h}} \right)_R, D_i \leq 24 \text{ hs} \quad [4]$$

donde  $P_{D_i}$  y  $P_{24h}$  son láminas para duraciones  $D_i$  y 24 horas respectivamente, asociadas a la recurrencia  $R$ . Obviamente, para la duración  $D_i=24$  horas se verifica que  $r_{D_i,24h,R} = 1$ .

Las intensidades medias máximas para cada duración y cada recurrencia se determinaron mediante el cociente entre las respectivas láminas. Luego, las curvas IDR derivadas se parametrizaron, para cada  $R$ , ajustando ecuaciones del tipo Sherman de tres parámetros:

$$i = \frac{\alpha}{(\beta + D)^\gamma} \quad [5]$$

donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son parámetros,  $D$ : duración de lluvia expresada en minutos e  $i$ : intensidad expresada en (mm/h). El ajuste de los parámetros se realizó con la función Solver de Excel® minimizando la función objetivo, definida como el error relativo promedio, es decir:

$$ERP = \left( \frac{1}{N_D} \right) \sum_{k=1}^{N_D} \left( \frac{|i_{ECP,k} - i_{FDP,k}|}{i_{FDP,k}} \right) \quad [6]$$

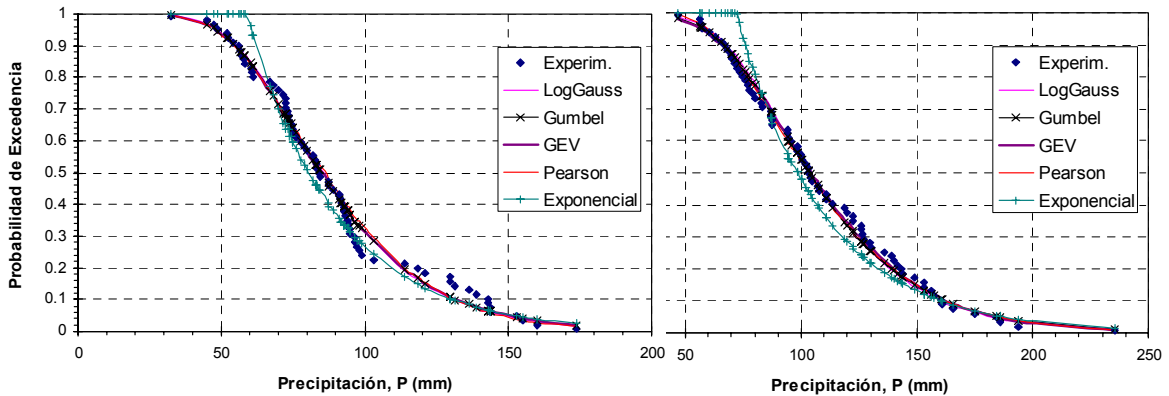
con  $N_D$ : número total de duraciones consideradas,  $i_{ECP,k}$  e  $i_{FDP,k}$ : intensidades medias máximas, para la  $k$ -ésima duración de lluvia, calculadas respectivamente con la ecuación parametrizada y con la función de distribución de probabilidades teórica seleccionada.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

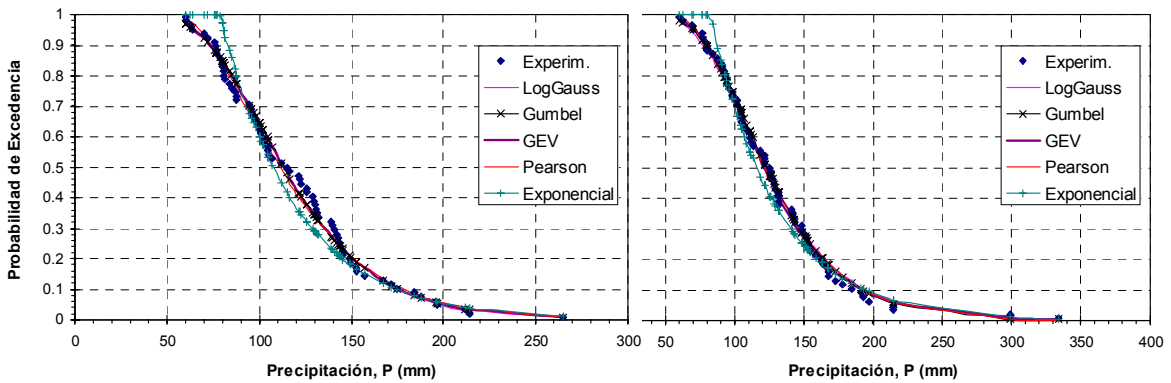
De acuerdo a las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y  $\chi^2$  (Chi-Cuadrado) ninguno de los modelos probabilísticos es descartado para los tres niveles de significancia: 5%, 1% y 0.1%. Sin embargo, el modelo que mejor ajusta, considerando los valores del error cuadrático medio de la variable (ECMV) y de la frecuencia (ECMF), para el conjunto de duraciones, es el modelo de valores extremos tipo I de Gumbel. Por lo tanto, se adoptó el modelo probabilístico de Gumbel para caracterizar la distribución de probabilidades de las precipitaciones registradas en Rosario, Casilda y Zavalla.

El modelo de Gumbel muestra un comportamiento robusto y estable, inclusive para recurrencias elevadas. La robustez y la estabilidad indican que el modelo no diverge ni oscila para recurrencias elevadas. El modelo LogGauss (Galton) tiene un comportamiento similar al de Gumbel con valores de ECMV y ECMF ligeramente superiores o iguales en algunos casos. El modelo Exponencial es el que peor ajuste brinda, con valores del ECMV y del ECMF aproximadamente 50 % y 160 % superiores respectivamente al de Gumbel. El modelo GEV, respecto al de Gumbel, es ligeramente divergente y aumenta considerablemente la lámina en su extremo superior cuando la FDP se representa en términos de recurrencias crecientes. El modelo Pearson presenta errores cuadráticos similares al modelo GEV pero su comportamiento es ligeramente inestable para valores crecientes

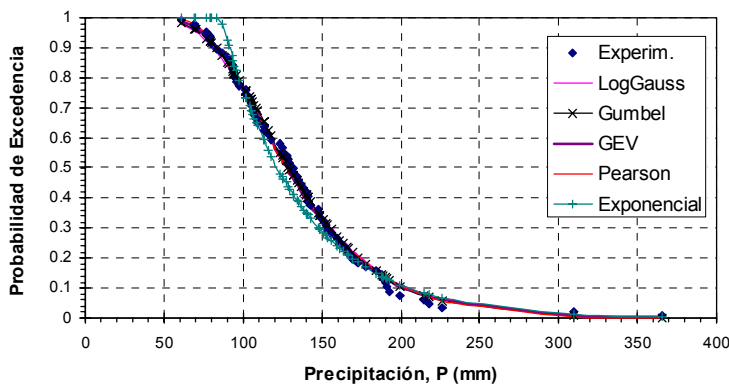
de la recurrencia. En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan las probabilidades de excedencia calculadas con los distintos modelos probabilísticos conjuntamente con la correspondiente probabilidad experimental para duraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 días, para Rosario. Por razones de espacio no se presentan las correspondientes a Casilda y Zavalla, aunque las gráficas son similares.



**Figura 2.-** Probabilidad de excedencia, lluvias de D=1 día (izquierda) y D=2 días (derecha), Rosario.



**Figura 3.-** Probabilidad de excedencia, lluvias de D=3 días (izquierda) y D=4 días (derecha), Rosario.



**Figura 4.-** Probabilidad de excedencia, lluvias de D=5 días, Rosario.

En las Figuras 5, 6 y 7 se observan los valores de las láminas máximas en función de la recurrencia, para las duraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 días, determinadas con el modelo probabilístico de Gumbel y los valores determinados con la ecuación de probabilidad experimental de Hazen para Rosario, Casilda y Zavalla.

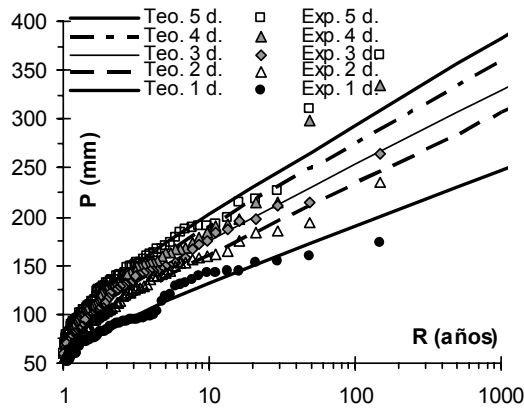


Figura 5.- Ajuste de la FDP Gumbel, datos pluviométricos Rosario.

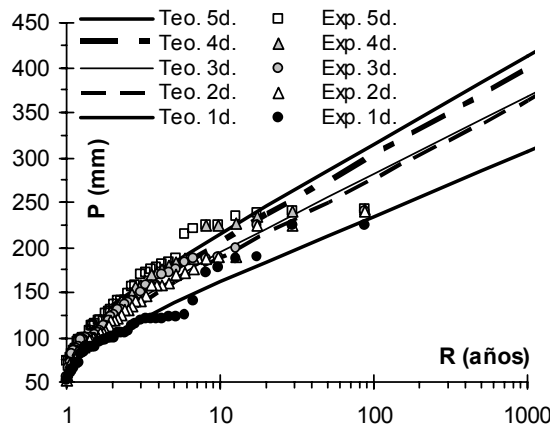


Figura 6.- Ajuste de la FDP Gumbel, datos pluviométricos Casilda.

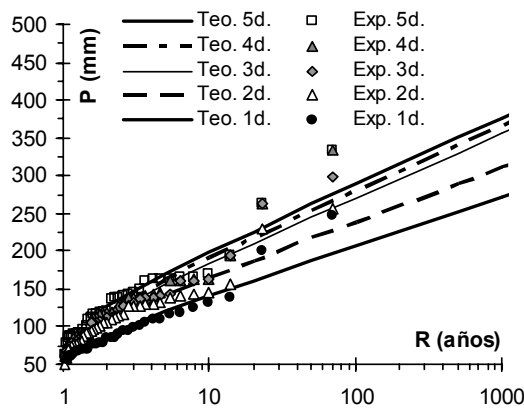


Figura 7.- Ajuste de la FDP Gumbel, datos pluviométricos Zavalla.

Por otra parte, en la Figura 8 se presentan los valores de las láminas máximas en función de la recurrencia, para las duraciones de 5, 15, 30, 60, 180, 360, 720 y 1440 minutos, determinadas con la FDP Gumbel y los respectivos valores calculados con la probabilidad experimental de Hazen para Rosario.

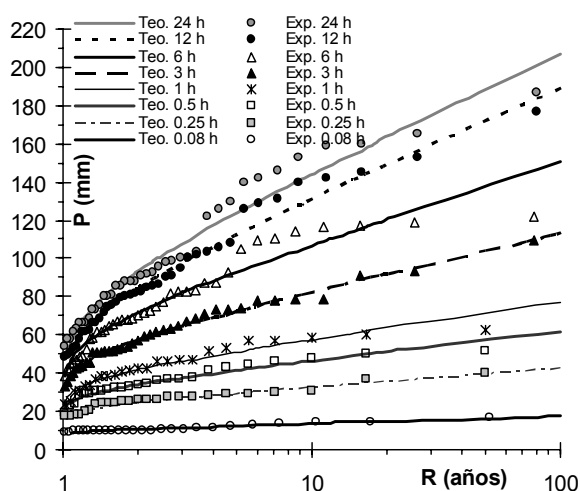


Figura 8.- Ajuste de la FDP Gumbel, datos pluviográficos Rosario.

La relación  $R_{24h,1d,R}$  entre láminas máximas de igual recurrencia  $R$ ,  $P_{24h}$  y  $P_{1d}$ , correspondientes a períodos de 24 horas móviles (datos pluviográficos) y a períodos de 1 día fijos (datos pluviométricos) respectivamente, se calculó utilizando los datos de Rosario a partir de una regresión lineal entre las láminas máximas  $P_{24h}$  y  $P_{1d}$  calculadas en con la FDP teórica adoptada para cada una de las recurrencias especificadas. El valor obtenido es  $R_{24h,1d,R} = 1.086$ . Tal valor es similar al valor medio de 1.08 determinado para la región central de Argentina (García et al., 2001) y ligeramente menor que el valor 1.13 calculado por Hershfield (1961).

Las relaciones  $r_{Di,24h}$  entre las láminas máximas de igual recurrencia para  $D_i \leq 24$  horas (1440 minutos), calculadas a partir de la FDP teórica adoptada, muestran una cierta variabilidad con la recurrencia, aunque no en forma sustancial, sobre todo para  $R < 10$  años y duraciones  $15 \text{ minutos} < D < 360$  minutos (ver Figura 9).

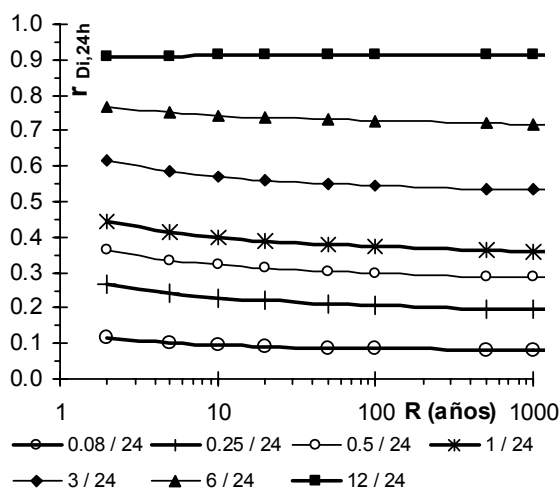


Figura 9.- Relaciones entre láminas, FDP Gumbel, datos pluviográficos Rosario.

En las Tablas 1, 2 y 3 se presentan las ecuaciones de las curvas IDR parametrizadas para Rosario, Casilda y Zavalla respectivamente. Es decir, se presenta una ecuación tipo (5) para cada valor de  $R$ , donde se observan los valores de los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , conjuntamente con el rango de duración para el cual son válidas. Considerando las tres estaciones, el error relativo promedio mínimo obtenido a partir del proceso de ajuste fue 2.6% y el máximo 9.6%.

**Tabla 1.-** Ecuaciones de las curvas IDR parametrizadas para Rosario (Santa Fe, Argentina).

	R (años)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Rango D (mín.)	ERP (%)
Ec. (1)	2	2503.797	22.997	0.889587	5 < D < 2880	6.27
Ec. (2)	5	1849.402	17.280	0.807910	5 < D < 7200	2.92
Ec. (3)	10	2049.965	18.197	0.801054	5 < D < 7200	3.01
Ec. (4)	20	2199.949	18.576	0.794053	5 < D < 7200	3.10
Ec. (5)	50	2299.979	18.120	0.782692	5 < D < 7200	3.38
Ec. (6)	100	2400.000	15.004	0.776693	15 < D < 7200	3.00
Ec. (7)	500	2399.942	17.011	0.753355	60 < D < 7200	2.55
Ec. (8)	1000	2399.963	14.860	0.743670	60 < D < 7200	3.92
Ec. (9)	5000	2400.081	9.774	0.724910	60 < D < 7200	5.15
Ec. (10)	10000	2400.095	8.800	0.717432	60 < D < 7200	4.37

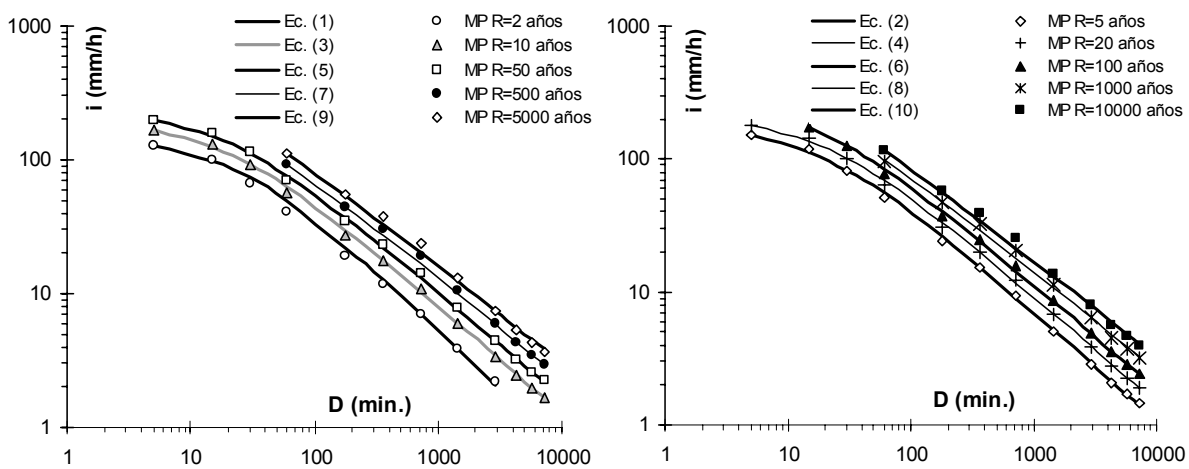
**Tabla 2.-** Ecuaciones de las curvas IDR parametrizadas para Casilda (Santa Fe, Argentina).

	R (años)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Rango D (mín.)	ERP (%)
Ec. (1)	2	2503.818	19.263	0.8693	5 < D < 7200	3.47
Ec. (2)	5	1849.399	12.403	0.7920	5 < D < 7200	5.47
Ec. (3)	10	2050.044	13.443	0.7848	5 < D < 7200	5.82
Ec. (4)	20	2200.032	13.529	0.7769	5 < D < 7200	6.07
Ec. (5)	50	2300.082	11.977	0.7637	5 < D < 7200	6.89
Ec. (6)	100	2400.057	11.021	0.7567	5 < D < 7200	7.37
Ec. (7)	500	2400.292	8.609	0.7322	5 < D < 7200	9.62

**Tabla 3.-** Ecuaciones de las curvas IDR parametrizadas para Zavalla (Santa Fe, Argentina).

	R (años)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Rango D (mín.)	ERP (%)
Ec. (1)	2	2503.818	19.288	0.8844	5 < D < 7200	8.39
Ec. (2)	5	1849.364	15.723	0.8074	5 < D < 7200	3.25
Ec. (3)	10	2050.044	13.446	0.8010	5 < D < 7200	4.12
Ec. (4)	20	2199.966	16.501	0.7942	5 < D < 7200	4.05
Ec. (5)	50	2300.047	16.071	0.7811	5 < D < 7200	4.52
Ec. (6)	100	2400.034	16.000	0.7715	5 < D < 7200	4.92
Ec. (7)	500	2400.289	10.309	0.7477	5 < D < 7200	6.81

En las Figuras 10, 11 y 12 se presenta la comparación entre las ecuaciones de las curvas IDR continuas parametrizadas y los valores puntuales determinados con modelo probabilístico (MP) para las ciudades de Rosario, Casilda y Zavalla respectivamente.



**Figura 10.-** Ecuaciones parametrizadas y valores puntuales (MP) para Rosario.



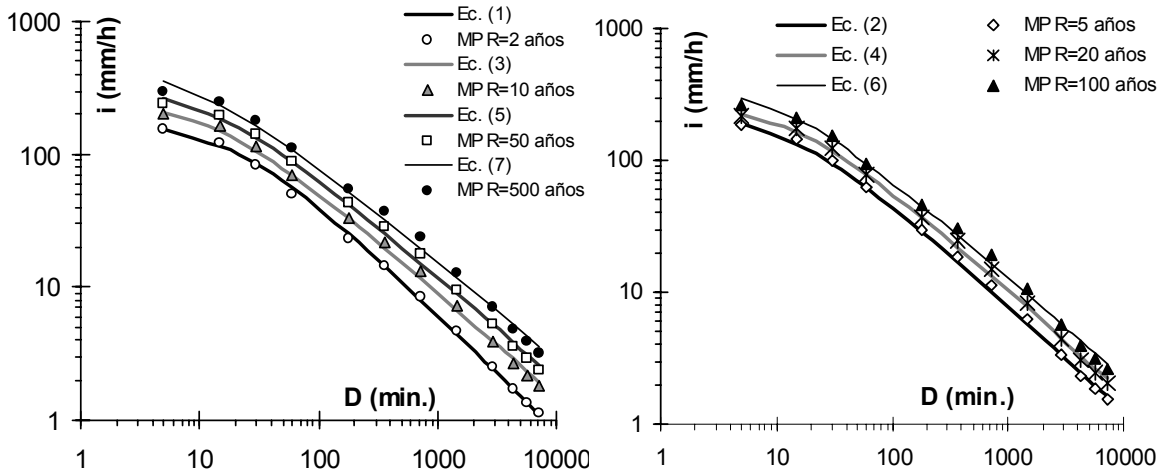


Figura 11.- Ecuaciones parametrizadas y valores puntuales (MP) para Casilda.

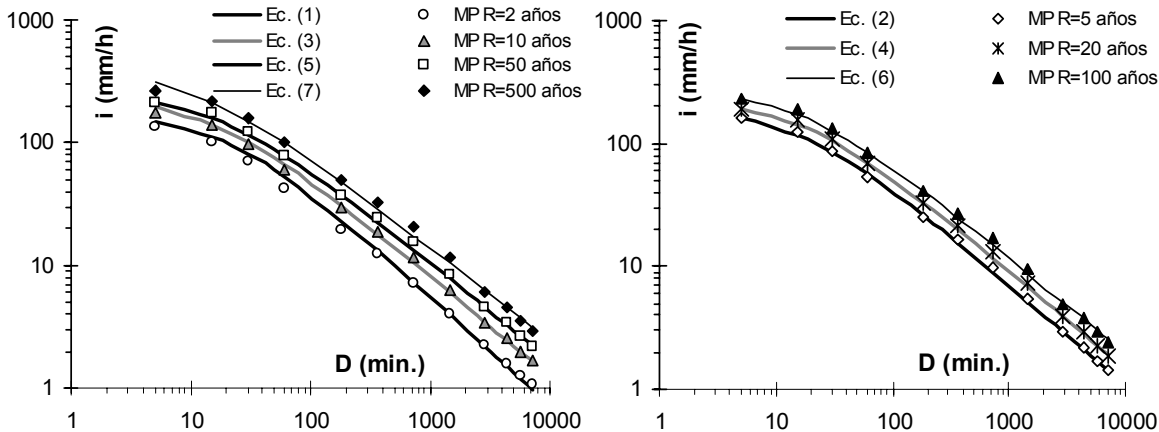


Figura 12.- Ecuaciones parametrizadas y valores puntuales (MP) para Zavalla.

En las Figuras 10 a 12 se observa que el ajuste de las ecuaciones parametrizadas a los valores puntuales calculados con la FDP Gumbel es muy satisfactorio, en dichas figuras se observa también el rango de duración para el cual son válidas las ecuaciones presentadas en las Tablas 1, 2 y 3, es decir, en la mayoría de los casos el rango de duración comprende desde los 5 minutos hasta los 7200 minutos (5 días).

**CONCLUSIONES**

Se construyeron curvas intensidad-duración-recurrencia, para las ciudades de Rosario, Casilda y Zavalla, utilizando en forma conjunta datos pluviométricos y datos pluviográficos. La metodología para la derivación de las curvas en Casilda y Zavalla fue basada en la transposición de las relaciones  $R_{24h,1d,R}$  y  $r_{Di,24h}$  derivadas a partir de información de lluvia registrada en la Estación Rosario Aero.

El valor calculado de la relación  $R_{24h,1d,R}$  a partir de la FDP teórica adoptada (Gumbel) es similar al valor medio calculado para la región central de la República Argentina por García et al. (2001) y ligeramente inferior al valor propuesto por Hershfield (1961).

Las relaciones  $r_{Di,24h,R}$ , calculadas a partir del ajuste de la FDP Gumbel a los datos pluviográficos de Rosario, no presentan una variación sustancial con la recurrencia. Tales relaciones permitieron

desagregar temporalmente láminas máximas para duraciones  $D_i \leq 24$  hs en función de los datos pluviométricos registrados en Casilda y Zavalla.

Las curvas IDR fueron parametrizadas satisfactoriamente ajustando ecuaciones tipo Sherman de tres parámetros, resultando valores aceptables del ERP.

Las curvas IDR construidas constituyen una herramienta fundamental para el dimensionamiento de obras hidráulicas en zonas urbanas y rurales de las ciudades de Rosario, Casilda y Zavalla, localizadas en el sur de la provincia de Santa Fe, República Argentina.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al CONICET, la ANPCYT y el MASPOMA (Provincia de Santa Fe) por el apoyo brindado mediante los proyectos PIP 5308, PICTO 23187 y Convenio MASPOMA-FCEIA, UNR, respectivamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basile, P.A.; E. Zimmermann; G. Riccardi; H. Stenta; C. Scuderi; J.P. Rentería y A. González** (2009). “Derivación de curvas Intensidad-Duración-Recurrencia unificadas para la ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina”. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 199 (CD-ROM).
- Caamaño Nelli, G. y C.M. García** (1999). “Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal”. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, ISSN 0186-4076, 14(3), 37-44. DF., México.
- García, C.M.; G. Caamaño Nelli y C.M. Dasso** (2001). “Estimación de laminas máximas de lluvia a partir de información pluviométrica diaria”. *Revista Ingeniería del Agua*, ISSN 1134-2196, 8(2), 179-189. Valencia, España.
- García, C.M.; G. Caamaño Nelli y C.M. Dasso** (2000). “Coherencia entre la lámina y su distribución en la estimación del hietograma puntual de diseño”. *XVIII Congreso Nacional del Agua*. Santiago del Estero, Argentina, ISBN 987-99083-4-1 (Libro resúmenes extendidos y CD-ROM).
- Hershfield, D.M.** (1961). “Rainfall Frequency Atlas of the U.S. for Duration from 30' to 24h and Return Periods from 1-100 years”. *United States Weather Bureau*. Technical Paper N° 40. Washington, USA.
- Orsolini, H.E.; E.D. Zimmermann y P.A. Basile** (2008). *Hidrología: Procesos y Métodos*. Editora de la Universidad Nacional de Rosario (UNR Ed.), Segunda Edición, 414 p., ISBN: 978-950-673-657-6. Rosario, Argentina.
- Paoli, C.; J. Bolzicco y P. Cacik** (1994). “Análisis de Frecuencia de Variables Hidrológicas”. *Reporte técnico*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL).
- Riccardi, G.; E. Zimmermann; P.A. Basile; H. Stenta; C. Scuderi; J.P. Rentería y L. Odicini** (2009). “Aspectos metodológicos para la definición de crecidas de diseño en cuencas de la región del Gran Rosario”. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 203 (CD-ROM).
- Stenta, H.; G. Riccardi; R. Navarro; E. Zimmermann; R. Postiglione, P.A. Basile, O. Zucca y S. Zacarias** (2009). “Aplicación de un modelo matemático distribuido en la cuenca del arroyo Ludueña para diferentes alternativas de obras hidráulicas orientadas al saneamiento hídrico integral”. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 239 (CD-ROM).
- Zimmermann, E.; P.A. Basile; C. López; G. Riccardi; H. Stenta; C. Scuderi y J.P. Rentería** (2009 a). “Distribución Espacial para la Tormenta de Diseño en el Área del Gran Rosario”. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 202 (CD-ROM).
- Zimmermann, E.; P.A. Basile; C. López; G. Riccardi; H. Stenta; C. Scuderi y J.P. Rentería** (2009 b). “Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área Gran Rosario”. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 201 (CD-ROM).

## **CRITERIOS DE DISEÑO HIDROLÓGICO APLICADOS PARA LAS OBRAS DE LOS SISTEMAS DE RESERVORIOS - ESTACIONES DE BOMBEO DE LA CUENCA OESTE DE LAS CIUDADES DE SANTA FE Y RECREO**

*Raúl Pedraza\*, Alejandro Felizia\*\*, José Macor, Rosana Mazzon, Jorge Collins, Luis Lenzi, Alejandra Arbuét y Mariano Díez*

*\*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral, Argentina, rpedraza@fich.unl.edu.ar*

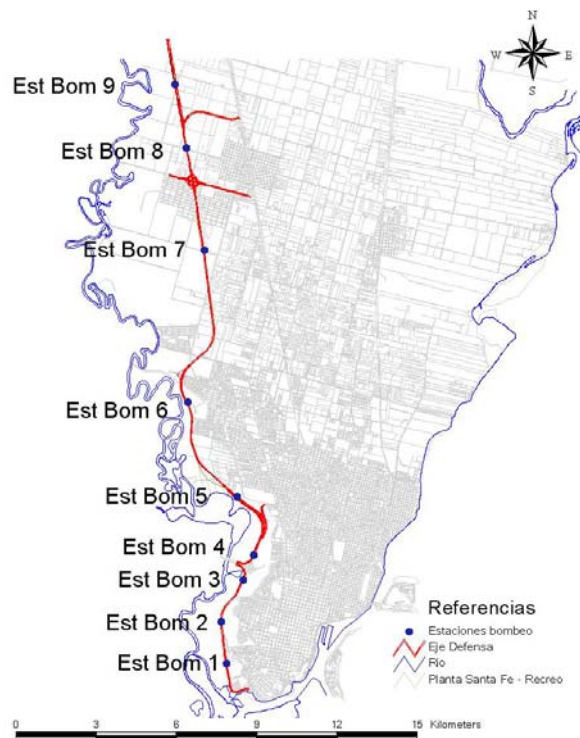
*\*\*Centro Regional Litoral – Instituto Nacional del Agua, Argentina, afelizia@arnet.com.ar*

**RESUMEN:** Se describen los criterios de diseño aplicados para el proyecto de las obras de los sistemas de reservorios-estaciones de bombeo de la cuenca Oeste de las ciudades de Santa Fe y Recreo. El proyecto se desarrolló en el marco de un convenio MASPyMA–MCSF-INA–UNL–UTN (2008). El objetivo general de las obras es mitigar los efectos de las inundaciones de origen pluvial. Los parámetros de diseño se adoptaron en base a una simulación hidrológico-hidrodinámica, considerando un escenario de urbanización proyectado a 25 años, con los conductos troncales proyectados en el marco del Plan Director de Desagües Pluviales de la Ciudad de Santa Fe (INA - CRL, 2001) en funcionamiento y una tormenta de diseño de 100 años de recurrencia y 5 días de duración. La superficie total simulada fue de 6138 ha. La duración de la tormenta de diseño se adoptó en base a un análisis del almacenamiento de detención para distintas duraciones de lluvia y considerando las duraciones de tormentas críticas registradas en la región. La recurrencia de diseño se adoptó dentro del rango recomendado por la literatura internacional para el diseño de dispositivos del sistema de drenaje mayor y teniendo en cuenta la alta densidad poblacional y vulnerabilidad social del sector estudiado. Se consideró como evento de referencia el ocurrido en marzo de 2007, que originó la inundación del sector durante varios días y la afectación de miles de personas. En la estación Sauce Viejo, este evento tuvo asociada una recurrencia de 100 años para las duraciones de 1 a 5 días, simultáneamente. Las crecidas de diseño aportantes a los sistemas y el diseño preliminar de las capacidades de bombeo y de almacenamiento requeridas, se calcularon por aplicación del modelo ARHYMO (Maza et al., versión 2008), considerando una condición de humedad antecedente promedio. Los diseños hidráulicos finales y/o verificaciones de las capacidades de bombeo y de almacenamiento requeridas, de los canales de descarga por gravedad de las estaciones de bombeo y de las obras de control, canales y alcantarillas de vinculación entre reservorios, se obtuvieron por aplicación del modelo SWMM (Stormwater Management Model, U. S. Environmental Protection Agency, versión 2008), considerando como entradas a los sistemas los hidrogramas simulados con ARHYMO.

**PALABRAS CLAVE:** diseño hidrológico, sistemas reservorios-estaciones de bombeo.

## INTRODUCCIÓN

El terraplén de defensa contra inundaciones del río Salado al Oeste, así como el terraplén de la Av. Mar Argentino al Sur, interfieren el drenaje por gravedad del agua pluvial de la cuenca oeste de las ciudades de Santa Fe y Recreo hacia los cursos de agua receptores. Por tal motivo, se han construido hasta la fecha 9 estaciones de bombeo (EB 1 a EB 9) (Figura 1).



**Figura 1.-** Ubicación de las estaciones de bombeo existentes sobre la vertiente oeste de las ciudades de Santa Fe y Recreo.

La inundación de origen pluvial de la zona Oeste ocurrida en marzo de 2007 puso de manifiesto la necesidad de adoptar medidas estructurales y no estructurales para reducir la vulnerabilidad hídrica de dicho sector. En este marco, a fines de 2008 se firmó un convenio entre el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Prov. de Santa Fe (MASPyMA), la Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe (MCSF), el Instituto Nacional del Agua (INA), la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), con el objeto de brindar asistencia técnica para el desarrollo del proyecto ejecutivo de obras de reacondicionamiento de los sistemas reservorio-estación de bombeo (RES-EB) existentes y de nuevas obras en dicha zona.

## HIDROLOGÍA DE PROYECTO

Los parámetros de diseño se adoptaron en base a una simulación hidrológica, considerando un escenario de urbanización futuro proyectado a 25 años, con los conductos troncales proyectados en el marco del Plan Director de Desagües Pluviales de la Ciudad de Santa Fe (INA - CRL, 2001) en funcionamiento y una tormenta de diseño de 100 años de recurrencia y 5 días de duración.

### Tormentas de Diseño

En la selección de la duración de una tormenta de diseño (TD), se debe considerar tanto las características del tiempo de respuesta hidrológica de la cuenca como las duraciones de tormentas críticas en la región. La práctica corriente es seleccionar la duración igual o mayor al tiempo de

concentración de la cuenca. Sin embargo, el criterio de adoptar una duración igual al tiempo de concentración puede no ser adecuado para el diseño de dispositivos de almacenamiento (U. S. Water Environment Federation - ASCE, 1992).

Para el diseño preliminar de dispositivos de detención en cuencas pequeñas, Chow (1994) propuso aplicar el método racional modificado, considerando diferentes duraciones de lluvia (una igual y las restantes mayores al tiempo de concentración) y determinar la duración crítica para la TD como aquella que genera el mayor volumen de detención, para un caudal máximo de salida permitido.

Siguiendo el criterio propuesto por Chow, se aplicó el modelo ARHYMO a una cuenca urbana representativa del área en estudio y se calcularon los hidrogramas de crecida aportantes al reservorio de bombeo para tormentas de distinta duración. En base a los almacenamientos de detención simulados y considerando las duraciones de tormentas críticas registradas en la región, se adoptó una duración de 5 días para la TD.

Como antecedentes de tormentas críticas registradas de esta duración, pueden mencionarse las de marzo de 2007 (419.8 mm) y de abril de 1914 (490.8 mm). La primera, fue registrada en la estación Sauce Viejo (Aero), originó la inundación del sector Oeste durante varios días y la afectación de miles de personas. La segunda, fue registrada en el Observatorio del Colegio de la Inmaculada Concepción, ubicado al Sur de la ciudad de Santa Fe, y originó la inundación de vastos sectores de la ciudad y una crecida histórica del río Salado en su tramo inferior.

La duración adoptada incorpora un factor de criticidad relacionado con la saturación del suelo antes de la ocurrencia de los bloques de mayor intensidad de lluvia. Esta saturación puede deberse a que la intensidad de lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo o a una elevación del nivel freático hasta proximidades de la superficie del terreno en zonas bajas.

Se adoptaron las recurrencias de 25, 50 y 100 años para las tormentas de diseño, en correspondencia con el rango recomendado por la literatura internacional para el diseño de dispositivos del sistema de drenaje mayor, como es el caso de los sistemas RES-EB (U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2001).

Teniendo en cuenta la alta densidad poblacional y la elevada vulnerabilidad social de la zona de influencia de los reservorios de bombeo del Distrito Santa Fe, se adoptó la recurrencia de 100 años para el diseño los sistemas RES-EB. Dado que el presupuesto de las obras requeridas es elevado, se propuso desarrollar el proyecto de las obras civiles para la crecida de 100 años y luego modular las inversiones del equipamiento de bombeo por etapas hasta completar el bombeo requerido para la crecida de diseño (25, 50 y 100 años).

Con el objeto de determinar la altura de lluvia total de la TD y su distribución temporal, primeramente se realizó el análisis de frecuencia de las lluvias máximas anuales para 1, 2, 3, 4 y 5 días consecutivos en las estaciones Paraná INTA y Sauce Viejo Aero, correspondientes al período 1972/73 – 2007/08 (fuente: Servicio Meteorológico Nacional), aplicando el programa AFMULTI (Paoli et al., 1991).

Se ajustaron las funciones teóricas de probabilidad Log Normal de 2 parámetros, Gumbel y General de Valores Extremos. Teniendo en cuenta el análisis gráfico y los resultados de la bondad de ajuste, se adoptó la distribución Log Normal como representativa para la extrapolación probabilística. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 2 y 3 y en las Tablas 1 y 2.

Se observa que para duraciones de 1 a 3 días, los valores obtenidos para Paraná son más críticos que los de Sauce Viejo y que para duraciones mayores existe similitud entre los valores de ambas

estaciones. Teniendo en cuenta este aspecto, se adoptaron los valores de Paraná para el cálculo de las TD. En la Tabla 2 también puede observarse que la tormenta del 26/03/07 registrada en Sauce Viejo tiene asociada una recurrencia de aproximadamente 100 años para las duraciones de 1 a 5 días, simultáneamente.

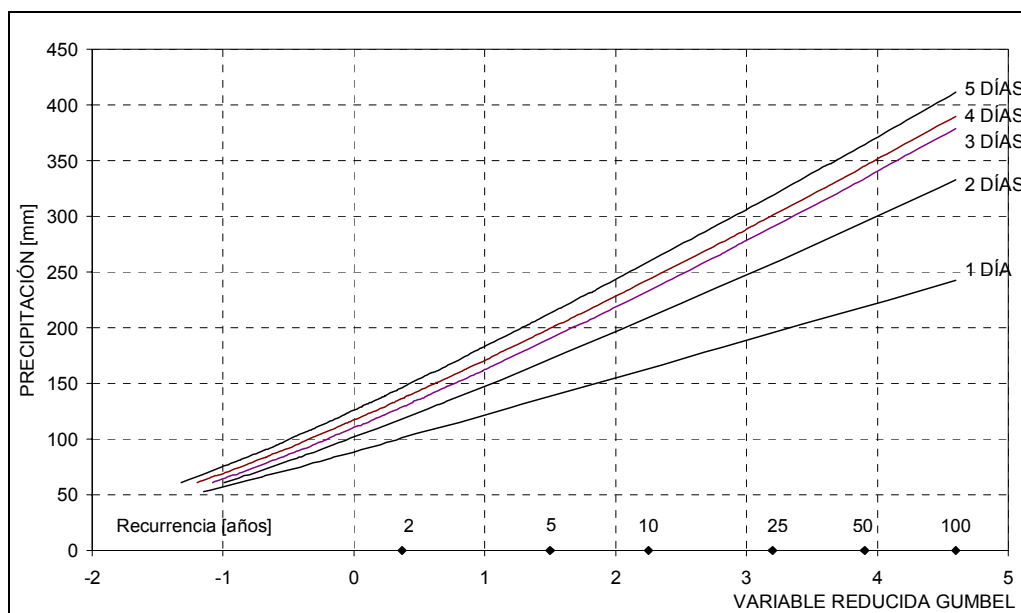


Figura 2.- Precipitaciones máximas anuales en 1, 2, 3, 4 y 5 días consecutivos en Paraná.

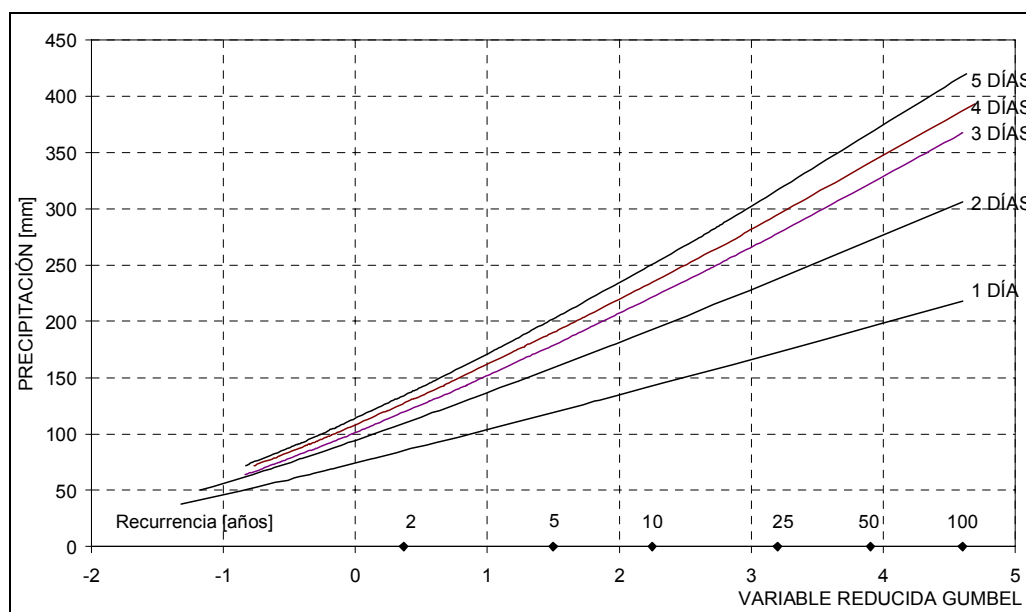


Figura 3.- Precipitaciones máximas anuales en 1, 2, 3, 4 y 5 días consecutivos en Sauce Viejo.

Tabla 1.- Precipitaciones máximas anuales para distintas duraciones en Paraná [mm].

T [años]	Duración [días]				
	1	2	3	4	5
25	195.2	257.7	290.1	300.6	318.7
50	218.9	294.9	334.0	344.7	364.7
100	242.7	333.0	379.0	389.9	411.6

(T): recurrencia

**Tabla 2.-** Precipitaciones máximas anuales para distintas duraciones en Sauce Viejo y precipitaciones acumuladas registradas para la tormenta del 26/03/07[mm].

T [años]	Duración [días]				
	1	2	3	4	5
25	172.6	237.3	278.1	293.8	315.4
50	195.2	271.4	322.1	339.7	365.7
100	218.0	306.2	367.6	387.1	417.8
<b>26/03/07</b>	<b>198.0</b>	<b>303.3</b>	<b>364.3</b>	<b>393.3</b>	<b>419.8</b>

A partir de las precipitaciones máximas en 1, 2, 3, 4 y 5 días se calcularon las precipitaciones máximas en 24, 48, 72, 96 y 120 h consecutivas, aplicando coeficientes de corrección por intervalo fijo de medición. Una vez corregidas las lluvias acumuladas, se calcularon las incrementales y se distribuyeron temporalmente con el método de bloques alternados. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos para la TD de 100 años de recurrencia.

**Tabla 3.-** Cálculo de la TD de 100 años de recurrencia.

Tiempo [días]	Pac [mm]	Coef.	Tiempo [h]	Pac [mm]	Pinc [mm]	Pinc [mm]	I [mm/h]
1	242.7	1.13	24	274.3	274.3	11.2	0.47
2	333.0	1.04	48	346.3	72.1	44.1	1.84
3	379.0	1.03	72	390.4	44.1	274.3	Variable
4	389.9	1.03	96	401.6	11.2	72.1	3.00
5	411.6	1.02	120	419.8	18.2	18.2	0.76

(Pac): precipitación acumulada – (Pinc) precipitación incremental – (I) intensidad de lluvia

Se adoptó un intervalo de tiempo de 5 min para las TD. Para los intervalos 0 – 24 h, 24 – 48 h, 72 – 96 h y 96 – 120 h, se adoptaron intensidades de lluvia constantes. Para el intervalo 48 – 72 h, se adoptó una intensidad variable, con el bloque de intensidades máximas en el subintervalo 57 - 63 h y la máxima intensidad al tiempo 60 h (tiempo medio de las TD). Para este subintervalo de 6 h de duración, las intensidades se calcularon con la IDF de Paraná (Tabla 4) y el método de bloques alternados.

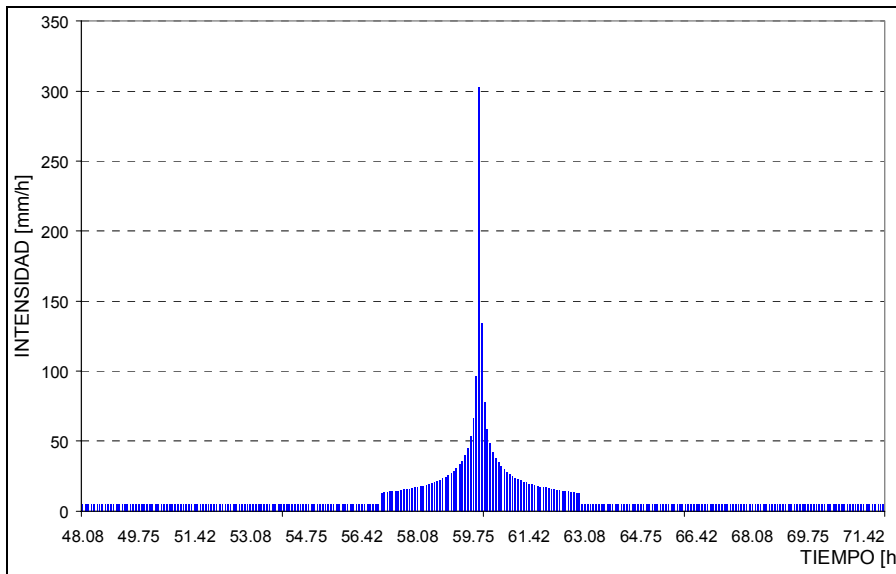
**Tabla 4.-** Intensidades de lluvia para distintas duraciones y recurrencias en la estación Paraná (Período 1965/2000) [mm/h].

D [min]	Recurrencia [años]		
	25	50	100
5	252.4	278.9	305.2
15	151.5	164.6	177.6
30	108.0	117.2	126.4
60	68.7	73.9	79.0
180	37.5	41.3	45.0
270	31.0	34.3	37.4
360	24.5	27.2	29.8

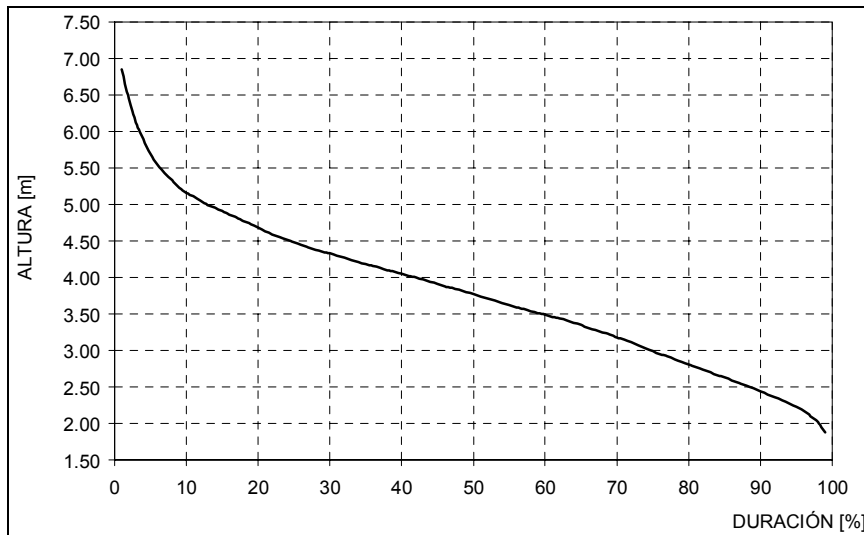
Se adoptó una distribución espacial uniforme, sin abatimiento areal y una condición inicial de humedad promedio en la cuenca. El procedimiento descrito se aplicó para determinar las TD de recurrencias 25, 50 y 100 años. La Figura 4 muestra la distribución temporal de la intensidad de lluvia en el subintervalo 48 – 72 h para la TD de 100 años de recurrencia.

### Análisis de duración de alturas hidrométricas y de simultaneidad de ocurrencia de lluvias críticas y de crecidas de los cursos de agua receptores

Se realizó un estudio de duración y frecuencia de las alturas hidrométricas diarias del río Salado en la Ruta Prov. N° 70 y en Santo Tomé (INALI) y del riacho Santa Fe en Puerto Santa Fe, para el período 1972 – 2008, con el objeto de evaluar el porcentaje de tiempo que podrían funcionar los conductos de descarga por gravedad de las EB. A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestra la curva de duración de alturas del riacho Santa Fe en Puerto Santa Fe. La curva de duración indica el porcentaje de tiempo que se registran alturas diarias mayores o iguales a un valor dado.



**Figura 4.-** Distribución temporal de la TD de 100 años de recurrencia en el intervalo 48 – 72 h.



**Figura 5.-** Curva de duración de alturas hidrométricas diarias del riacho Santa Fe en Puerto Santa Fe.  
Cota del cero de escala = 8.20 m IGM.

Se realizó un estudio de simultaneidad de ocurrencia de precipitaciones máximas locales y crecidas del río Salado y del riacho Santa Fe. A tal efecto, se identificaron las fechas de ocurrencia de las precipitaciones máximas anuales en 5 días consecutivos en Sauce Viejo (1972/73 - 2007/08), se identificaron las alturas hidrométricas en las distintas estaciones para esas fechas y se calcularon las duraciones correspondientes. La Tabla 5 muestra los valores obtenidos para las 10 lluvias máximas, ordenadas de mayor a menor.



Se observa que las duraciones medias de las alturas hidrométricas correspondientes a las 10 lluvias máximas presentan valores por debajo del 50 % (variando entre el rango 41-43 % para las 3 estaciones). Sin embargo, 2 de los 10 eventos (26/03/07 y 03/03/98) correspondieron a alturas hidrométricas altas de los cursos de agua receptores, con duraciones del 4 % en Santo Tomé, del 4 – 5 % en Puerto Santa Fe y del 3 - 25 % en la Ruta Prov. N° 70. Por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia simultánea de precipitaciones críticas y niveles altos en los cursos no es despreciable.

**Tabla N° 5.-** Precipitaciones máximas anuales en 5 días consecutivos en Sauce Viejo, alturas hidrométricas y duraciones correspondientes en distintas estaciones.

Nro. de orden	Fecha			P5 [mm]	RP N°70		Santo Tomé		Puerto Sta. Fe	
	Día	Mes	Año		h [m]	D [%]	h [m]	D [%]	h [m]	D [%]
1	26	Mar	2007	419.8	3.98	<b>24.9</b>	5.70	<b>4.2</b>	5.64	<b>4.8</b>
2	14	Mar	1978	296.6	2.36	54.2	3.33	69.3	3.34	64.7
3	3	Abr	2000	281.0	2.95	44.4	3.30	70.4	3.08	73.1
4	26	Oct	1993	275.2	2.31	55.0	4.46	26.9	4.52	24.6
5	29	Ene	1990	254.1	s/d	s/d	4.12	39.1	4.11	37.7
6	3	Mar	1998	223.0	6.56	<b>2.9</b>	5.87	<b>3.7</b>	5.85	<b>3.8</b>
7	23	Nov	2000	209.0	1.07	79.9	3.86	49.2	3.77	49.6
8	22	Abr	1999	202.0	2.60	50.2	4.08	40.6	4.00	41.5
9	8	Dic	1990	197.2	3.44	35.6	4.65	21.0	4.84	16.2
10	30	Oct	1981	192.9	3.26	38.9	2.51	92.2	2.38	90.9
Med					3.17	<b>42.9</b>	4.19	<b>41.6</b>	4.15	<b>40.7</b>
Mín					1.07	2.9	2.51	3.7	2.38	3.8
Máx					6.56	79.9	5.87	92.2	5.85	90.9

Fecha: fecha de ocurrencia de P5 (día inicial), P5: precipitación máxima anual en 5 días consecutivos en Sauce Viejo, h: altura hidrométrica correspondiente a la fecha indicada, D: duración de la altura h, Med, Mín, Máx: valores medio, mínimo y máximo.

### Simulación hidrológica

Las crecidas de diseño aportantes a los sistemas RES-EB y el diseño preliminar de las capacidades de bombeo y de almacenamiento requeridas, se calcularon por aplicación del modelo ARHYMO (Maza et al., versión 2008), considerando como entradas las TD de 25, 50 y 100 años de recurrencia. La Tabla 6 muestra un listado de los sistemas RES-EB y sus correspondientes cuencas de aporte, de Norte a Sur.

Dado el objetivo del estudio, no se representaron explícitamente en el esquema topológico las obras del micro-drenaje (bocas de tormenta, cunetas y conductos menores).

La red de conductos principales se simuló por medio de conductos “equivalentes”, cuya capacidad de conducción se calculó como suma de las capacidades de conducción de los conductos principales existentes más los proyectados en el Plan Director de Desagües Pluviales de la Ciudad de Santa Fe (INA - CRL, 2001).

Los conductos “equivalentes” se desagregaron en tramos por medio de nodos. Se consideraron nodos en todas aquellas secciones de control en las que existían cambios significativos en la capacidad de conducción de los conductos, en secciones correspondientes a puntos bajos o con obras condicionantes del flujo superficial (ej. terraplenes ferroviarios con alcantarillas) y en secciones donde interesaba disponer de información de salida.

Una vez identificadas las secciones de control, se delimitaron las subcuencas de aporte. Éstas se desagregaron a una meso-escala, con una superficie media de aprox. 100 ha para las subcuencas rurales y de entre 10 - 20 ha para las subcuencas urbanas.

**Tabla 6.-** Sistemas RES-EB y cuencas de aporte correspondientes.

RES- EB	Cuencas	Superficie [ha]
9	Canal A° Aguiar	937(*1)
8	Canal Mitre	504
7	Canal Mihura	705
6	Recreo Sur	1490
	Monseñor Rodríguez	
	Teniente Loza (incluye subcuencas Chubut y FFCC)	
	Gorriti	
5	Flores	970
	Israel	
4	Derqui	613
	Ecuador	
	Pedro Centeno	
3	Club Unión - Parque Garay	230
2	Durán	372
	Corrientes	
1	Entre Ríos	190
0	Centenario	127
Total		6138

(\*1) Área de aporte directo al Canal A° Aguiar al Este de la Ruta Nac. N° 11

Dado que las recurrencias de las TD excedían ampliamente las recurrencias de diseño de los conductos existentes y proyectados en el Plan Director, se contemplaron en la simulación los efectos originados por el desbordamiento del flujo en los nodos donde la capacidad de conducción del sistema entubado era superada. Se consideraron dos situaciones de desbordamiento:

a) Si el nodo desbordado correspondía a un punto bajo o a una obra condicionante del flujo superficial, se incorporó un nodo de almacenamiento y se aplicó la rutina de propagación de crecidas basada en el método de Puls.

b) Si el nodo desbordado correspondía a una calle con pendiente positiva, se insertó un algoritmo de separación del flujo, de manera tal de propagar por conducto a sección llena y por calle el resto del flujo.

Se actualizó la dinámica hídrica de las cuencas definidas en el Plan Director, en base a relevamientos de campo y de información de obras ejecutadas por la Municipalidad de Santa Fe con posterioridad a dicho Plan.

Se implementó el modelo a cada cuenca en base a información planialtimétrica disponible de estudios antecedentes, como el Plan Director de Desagües Pluviales de la Ciudad de Santa Fe (INA - CRL, 2001), el Plan Director de Desagües Pluviales de Recreo (INCOCIV, 2006) y el Proyecto de Actualización de las Cartas de Áreas de Riesgo Hídrico de Santa Fe (INA-CRL, 2007), y de información relevada específicamente para este estudio en la zona de los reservorios, canales y alcantarillas de vinculación.

La topografía de la zona presenta pendientes bajas hacia el oeste, variando en el rango 0.00040 m/m a 0.00200 m/m y existen bajos cerrados que generan almacenamientos temporarios de agua superficial. Los terraplenes de rutas y ferrocarriles actúan como divisorias de aguas o como fuertes condicionantes del flujo superficial.

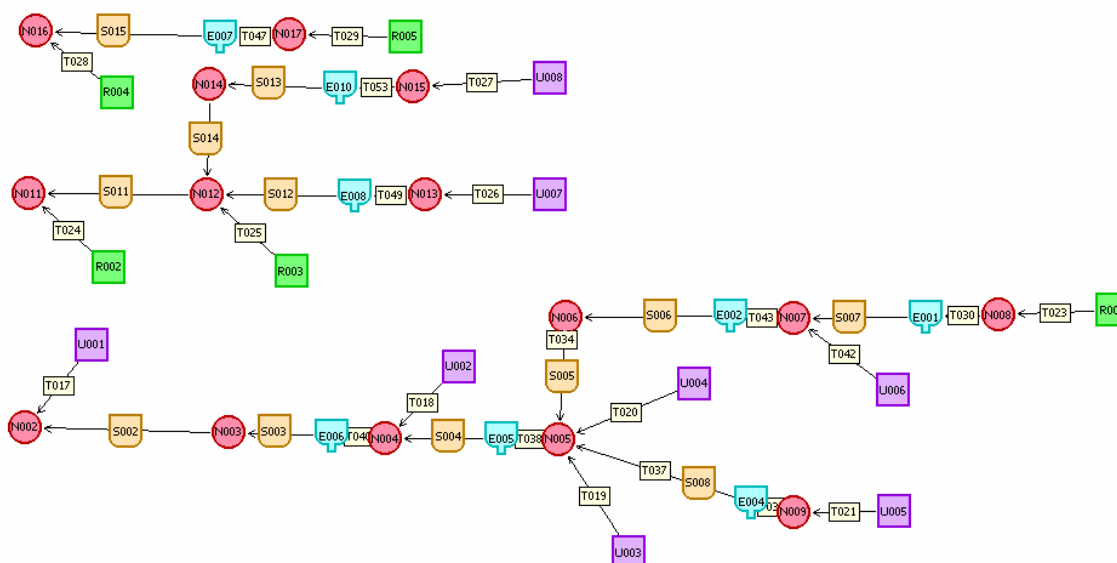
Se determinaron las superficies impermeables total y directamente conectada en base a fotografías aéreas de los años 2003 y 2004, a información satelital (Google Earth, 2006) y a un reconocimiento de campo. Las impermeabilidades actuales se proyectaron a un escenario de urbanización futuro a 25 años.

Los métodos de cálculo hidrológico del modelo ARHYMO aplicados en este proyecto y los valores adoptados de los principales parámetros se listan en la Tabla 7.

**Tabla 7.-** Métodos del modelo ARHYMO aplicados en este estudio y parámetros adoptados.

Facilidad	Métodos	Parámetro y rango de variación
Pérdidas de escurrimiento	Número de Curva (CN) del SCS.	CN para cobertura permeable: 60 – 70 Ia: expresión por defecto.
	Almacenamiento en depresiones (cuencas urbanas).	DPSI: expresión por defecto.
Hidrogramas en subcuencas	Hidrograma unitario adimensional (cuencas rurales).	K: expresión por defecto. tp: expresión por defecto.
	Hidrograma unitario de embalses lineales en paralelo (cuencas urbanas).	TIMP: 30 – 82 % XIMP: 25 – 57 % KI: expresión por defecto. KP: expresión por defecto. MNI: 0.030 MNP: 0.250
Propagación de crecidas	Tiempo de traslado variable (canales, conductos).	n = 0.030
	Puls modificado (embalses).	
Opciones el hietograma	Hietograma especificado por el usuario.	

Se adoptó un intervalo de tiempo de cálculo de 5 minutos. A modo de ejemplo, en la Figura 6 se muestra el esquema topológico utilizado para simular las cuencas Recreo Sur (580 ha) y Monseñor Rodríguez (333 ha), aportantes al RES 6. Se observa que en los esquemas se incorporaron nodos de almacenamiento en correspondencia con puntos bajos u obras que condicionan el flujo superficial. Estos almacenamientos se identifican con la nomenclatura E00x.



**Figura 6.-** Esquema topológico para la simulación hidrológica de las cuencas Recreo Sur y Monseñor Rodríguez.

Los caudales máximos de entrada a los reservorios obtenidos se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8.-** Parámetros de diseño finales de los sistemas RES-EB.

EB	RES	Qpico de entrada [m3/s]	Cota fondo [m IGN]	Nivel máx. adm. [m IGN]	Nivel máx. simulado [m IGN]	Vol. almac. requerido [hm3]	Caudal de bombeo	
							requerido [m3/s]	existente [m3/s]
9	9	10.8	15.50	17.50	17.50	1.456	1.20	1.20
8	8	25.9	15.50	18.00	17.90	0.935	1.80	1.80
7	7	30.7	15.00	17.50	17.32	1.316	1.80	1.80
6	6	52.1	12.50	15.50	15.46	1.787	15.20	5.48
5	4/5 (*1)	139.2	10.50	13.50	13.45	2.017	17.40	5.48
4							11.60	5.11
3	3	32.1	10.50	13.00	12.03	1.073	6.00	5.11
2	2	43.3	10.50	12.50	11.92	1.087	6.17	6.17
1	1	22.9	10.50	12.50	12.32	0.274	6.50	4.88
0 (*2)	0	15.5	11.00	12.50	12.39	0.030	9.00	0.00
TOTAL							76.67	37.03

(\*1) El proyecto contempla la vinculación de los reservorios 4 y 5 por medio de la construcción de una alcantarilla sin compuerta ubicada debajo de la calle Gorostiaga. (\*2) EB proyectada a construir al Sur de la EB 1.

## DISEÑO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS

Los diseños hidráulicos finales y/o verificaciones de las capacidades de bombeo y de almacenamiento requeridas, de los canales de descarga por gravedad de las estaciones de bombeo y de las obras de control, canales y alcantarillas de vinculación entre reservorios, se obtuvieron por aplicación del modelo SWMM (Stormwater Management Model, U. S. Environmental Protection Agency, versión 2008). Se consideraron como entradas a los sistemas los hidrogramas simulados con ARHYMO para la recurrencia de 100 años.

### Capacidad de almacenamiento y de bombeo requeridas

Dado que existe una probabilidad no despreciable de ocurrencia simultánea de precipitaciones críticas y niveles de agua altos en los cursos de agua receptores, se adoptó como criterio que cada sistema RES-EB debía ser capaz de evacuar la crecida de diseño sólo por bombeo.

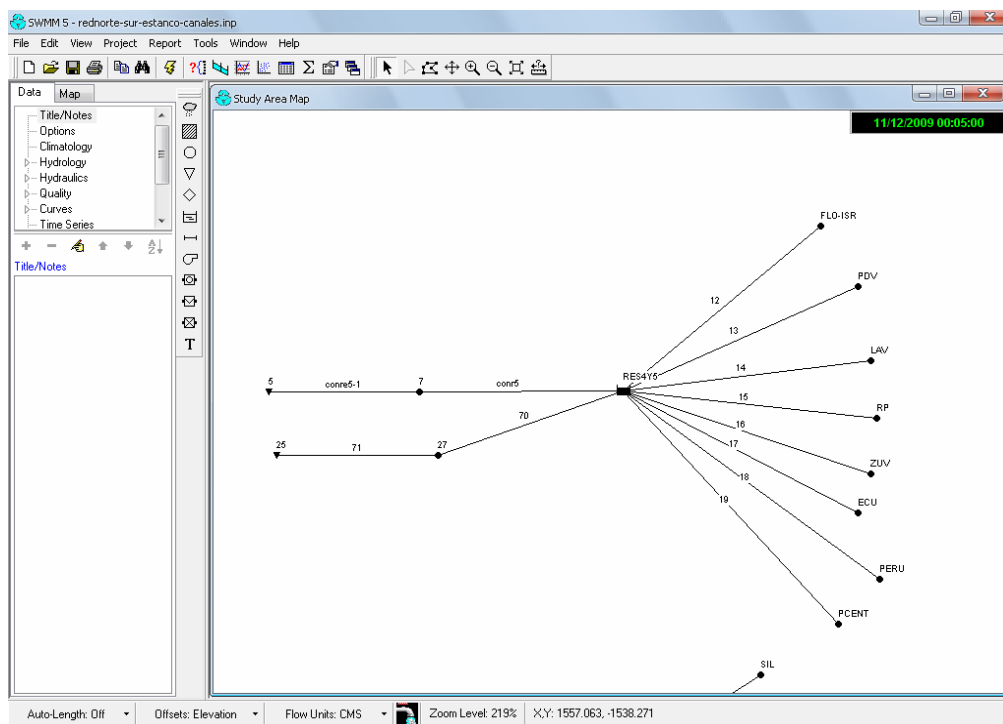
Se aplicó el modelo SWMM a los sistemas RES-EB, considerando que éstos funcionan en forma independiente (no conectados entre sí) y descargan por bombeo hacia el río el agua pluvial generada en la cuenca de aporte propia. Los conductos de descarga por gravedad se consideraron cerrados.

Dado que los canales de vinculación existentes entre los reservorios tienen una pendiente general hacia el Sur, se planteó la condición de funcionamiento independiente de los sistemas RES-EB con el objeto de que las capacidades de almacenamiento y de bombeo a calcular para cada sistema permitan evacuar por bombeo la totalidad del agua pluvial generada en su correspondiente cuenca de aporte, sin trasladar efectos perjudiciales hacia aguas abajo. Se adoptó como condición inicial que los reservorios se encontraban vacíos o próximos a esta condición.

A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 7 el esquema topológico utilizado para la modelación hidrodinámica del sistema RES-EB 4-5. Se observa a la derecha los nodos de conexión, donde se ingresan los hidrogramas por cada ramal principal calculados con ARHYMO. En el centro se observa el nodo de almacenamiento, que representa el RES 4-5, al que se ingresan el hidrograma

generado por el área de aporte directo más el hidrograma generado por la lluvia que cae en el reservorio propiamente dicho. A la izquierda se observan los nodos de vertido.

Las capacidades de almacenamiento y de bombeo requeridas se determinaron por un proceso de aproximación, de modo de no superar el nivel de agua máximo admisible en cada RES. Los parámetros de diseño finales de los sistemas RES-EB se muestran en la Tabla 8.



**Figura 7.-** Esquema topológico para simulación hidrodinámica del sistema RES-EB 4-5.

El caudal total de bombeo requerido es de 76.67 m<sup>3</sup>/s y la capacidad total de bombeo existente es de 37.03 m<sup>3</sup>/s, por lo que se requiere un aumento del 107 % de la capacidad de bombeo actual. El proyecto incluye además la construcción de RES 0 y RES 1 y la ampliación de los reservorios RES 2, RES 3, RES 6, RES 7, RES 8 y RES 9.

### Conductos de descarga por gravedad de las Eb

Las estaciones EB 1 a EB 4 no disponen de conducto de descarga por gravedad, por lo que el agua pluvial que proviene de sus cuencas debe ser evacuada íntegramente por bombeo. Las estaciones EB 5 a EB 9, en cambio, disponen de conducto de descarga, por lo que el agua puede ser evacuada por gravedad o por bombeo, según el nivel del río.

Se incorporaron conductos de descarga por gravedad con compuerta para las EB 0, EB 1, EB 2, EB3 y EB 4, por las siguientes razones:

- a) como dispositivo de seguridad, en caso acontecer una situación de emergencia de extrema gravedad, como la falla total del bombeo y/o la rotura de terraplenes de defensa contra inundaciones. En estos casos, por medio de la apertura de las compuertas, el nivel de agua en los reservorios se limitará al nivel del río. Esto evitará repetir lo ocurrido durante la inundación del año 2003, cuando el nivel de agua dentro del área defendida fue de hasta 2.5 m más elevado que el nivel del río en la zona Sur y hubo que efectuar cortes en la defensa para desagotar dicha área.
- b) para descargar por gravedad el agua pluvial desde el reservorio al río Salado, cuando el nivel del río esté por debajo del nivel de agua en dicho reservorio.

Para los conductos de descarga por gravedad se adoptó la alcantarilla recta Tipo A2 de la Dirección de Vialidad de la Prov. de Santa Fe, que es similar a las existentes en las EB5 a EB9.

Con el objeto de proyectar/verificar los conductos de descarga por gravedad de las EB, se aplicó el modelo SWMM considerando a los sistemas RES-EB funcionando en forma independiente (no conectados entre sí), cada uno descargando hacia el río el agua pluvial de su cuenca de aporte propia a través de su conducto de descarga por gravedad, estando el bombeo inactivo. Se simuló este escenario considerando diferentes niveles del río y se obtuvieron los hidrogramas de descarga, las velocidades máximas en los conductos y los niveles máximos alcanzados en cada reservorio. Las características geométricas de los conductos y los niveles del río máximos para los cuales se puede evacuar sólo por gravedad la crecida de diseño sin superar el nivel máximo admisible se muestran en la Tabla 9.

**Tabla N° 9.-** Características geométricas de los conductos de descarga por gravedad.

EB	Sección [m]		Cota de fondo [m]	Nro. vanos	Nivel río máx (*) [m IGN]
	B [m]	H [m]			
9 Canal A° Aguiar	1.50	1.80	16.15	1	17.00
	2.50	2.50	15.50	2	
8	2.50	2.80	16.15	1	17.00
7	2.50	1.80	15.30	2	16.50
6	2.50	1.80	13.20	3	15.15
5	2.50	1.80	11.00	3	13.00
4	2.77	2.45	10.50	6	13.00
3	2.77	2.31	10.50	4	12.70
2	2.50	1.80	10.50	3	12.20
1	2.50	1.80	10.50	3	12.20
0	2.50	1.80	10.50	3	12.20

B: ancho, H: altura libre. (\*): Nivel del río máximo para el cual se puede evacuar por gravedad la crecida de diseño sin superar el nivel de agua máximo admisible en el reservorio.

El diseño final se adoptó teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Los conductos adoptados permiten evacuar por gravedad la crecida de diseño sin superar los respectivos niveles máximos admisibles para niveles del río con permanencias que varían entre aproximadamente el 50% del tiempo para las EB ubicadas al Sur (EB0, EB1 y EB2) al 96 % del tiempo para la EB9.
- b) Las velocidades de flujo máximas a la salida (de hasta 3 m/s) son compatibles con las obras de protección contra erosión adoptadas.

### Obras de control, canales y alcantarillas de vinculación entre reservorios

Las obras de control (OC) tienen por objeto controlar o anular los caudales de vinculación entre reservorios contiguos y consisten en terraplenes con eventuales alcantarillas de paso. En algunos casos se trata de terraplenes de rutas o de ferrocarriles existentes y en otros, son terraplenes proyectados a construir sobre caminos existentes. En acuerdo con el Comitente, se adoptaron los siguientes criterios:

- a) Se independizó el funcionamiento de los sistemas RES-EB 7, 8 y 9 del resto de los sistemas RES-EB 6 a RES-EB 0, para evitar ingresos de escorrentía generada en zonas rurales y suburbanas del Distrito Recreo a zonas densamente pobladas del Distrito Santa Fe.

El canal A° Aguiar realiza un trasvasamiento de cuenca del A° Aguiar (130 km<sup>2</sup>), que naturalmente debería desaguar en la Laguna Setúbal, hacia el río Salado. El canal desagua en el río dentro del área defendida, a través de una alcantarilla con compuerta ubicada inmediatamente al Norte del sistema RES- EB 9.

El ingreso de las crecidas del A° Aguiar al área defendida incorpora un riesgo significativo, ya que en caso de simultaneidad de ocurrencia de crecidas de este curso de agua y del río Salado, la escorrentía del primero no podría evacuarse por gravedad, aportaría hacia el RES 9 y eventualmente al RES 8 y haría colapsar estas obras. Por lo tanto, se recomendó al Comitente reacondicionar los canales de descarga del canal A° Aguiar que se encuentran al Este de la Ruta Nac. N° 11 hacia la Laguna Setúbal, de modo que reconstruir su dinámica hídrica natural.

b) Se independizó el funcionamiento de los sistemas RES-EB 7, 8 y 9 entre sí.

Con el objeto de proyectar/verificar las obras de control, canales y alcantarillas de vinculación en el tramo RES-EB 6 a RES-EB 0, se aplicó el modelo SWMM al tramo mencionado, considerando los sistemas RES - EB proyectados interconectados de Norte a Sur, con los conductos de descarga por gravedad cerrados y con los bombeos en funcionamiento.

Las características geométricas de los canales de vinculación entre reservorios existentes en el subtramo RES-EB 6 y la Ruta Nac. N°11 se representaron por medio de perfiles transversales relevados específicamente para este estudio. Para el tramo comprendido entre la Ruta Nac. N° 11 y el RES-EB 0 se ingresaron las secciones de un canal proyectado. Se incluyeron en la modelación cinco áreas de almacenamiento (Mauro, Recreo Sur, Monseñor Rodríguez, Loza y FFCC) existentes sobre el canal de préstamo aportante al RES 6, así como otras alcantarillas existentes en el tramo simulado.

La configuración de la red se conformó de nodos de almacenamiento, de conexión y de vertido, y de links de bombeo, de vertedero, de orificio y de canales. La Figura 8 muestra el esquema topológico utilizado para la aplicación del modelo SWMM.

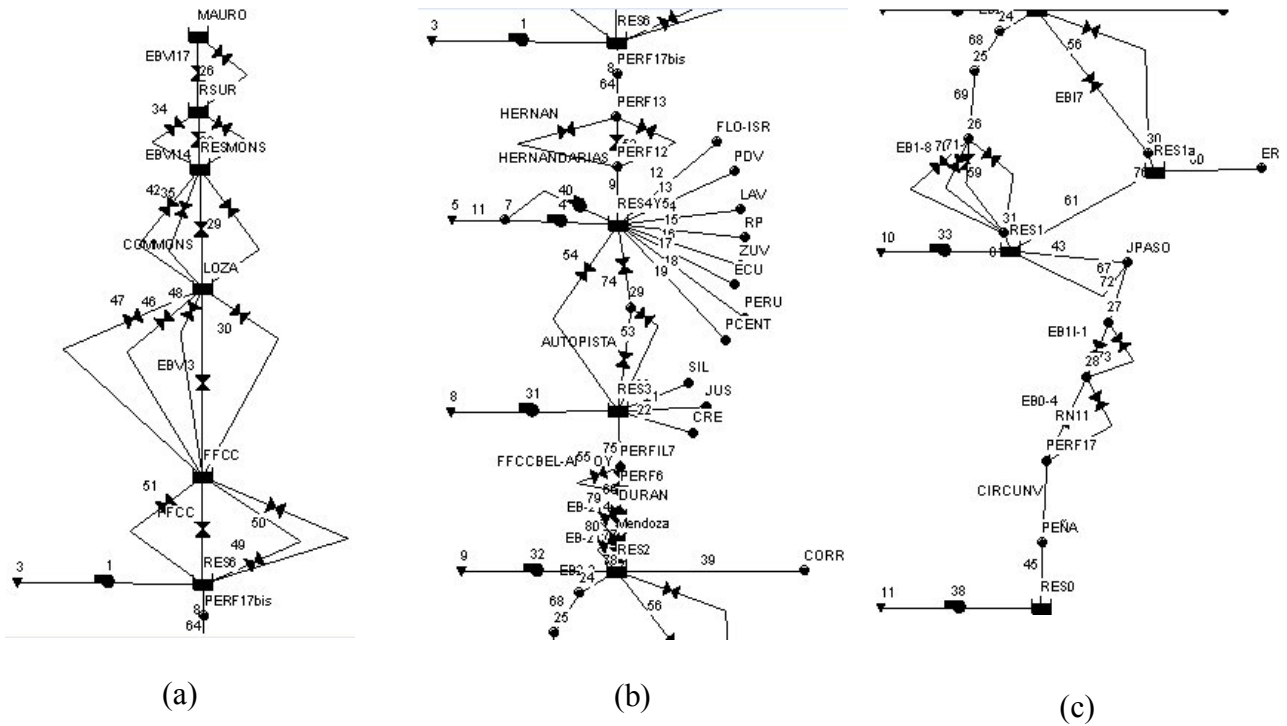
Se utilizó la opción de onda dinámica, con un intervalo de tiempo de 1 seg para la propagación.

La Tabla 10 muestra las OC proyectadas que requieren un alteo y/o la construcción de nuevas alcantarillas o remoción de alcantarillas existentes.

**Tabla N° 10.- Características de las OC proyectadas.**

OC	Terraplén		Alcantarilla			
	Traza	Cota coronamiento [m IGN] (*)	Cota de fondo [m IGN]	Sección	Cant. vanos	Dimensiones [m]
9 - 8	Camino rural	19.20 (2)	16.85	circular	2	D=0.6m (3*)
			15.50	rectangular	2	H=1.0 B=2.5 (4) (con compuerta)
8 - 7	Ruta Nac. N° 70	18.96 (1)	17.01	cuadrada	2	H=2.0 B=2.0 (3*)
7 - 6	Camino Viejo a Esperanza y calle Carnevale	18.50 (2)	16.30	circular	2	D=1.0 (3*)
			16.50	circular	2	D=0.8 (3*)
6 - 4/5	Calle Hernandarias	16.50 (2)	13.40	cuadrada	2	B=1.5 H=1.5 (3)
3 - 2	FFCC Gral. M. Belgrano (desactivado)	13.00 (2)	12.40	rectangular	1	B=1.5 H=0.6 (4)

(\*) cota inferior sobre la traza de la OC. B: ancho, H: altura, D: diámetro. (1): OC sin alteo. (2) OC con alteo, (3): alcantarilla existente a conservar, (3\*): alcantarilla existente a remover, (4) alcantarilla proyectada.



**Figura 8.-** Esquema topológico utilizado para la simulación hidrodinámica de las obras de control, canales y alcantarillas de vinculación en el tramo RES-EB 6 – RES-EB 0.

a) Canal de préstamo aportante al RES 6, b) Tramo RES6 – RES2, c) Tramo RES2 – RES0.

En la Tabla 11 se presentan, a modo comparativo, los resultados obtenidos de la simulación para los 3 escenarios siguientes. E.1: TD, reservorios independientes, con bombeo y sin descarga por gravedad, E.2: TD, reservorios conectados en el tramo RES-EB 6 – RES-EB 0, con bombeo y sin descarga por gravedad y E.3: tormenta de marzo de 2007, reservorios conectados en el tramo mencionado, con bombeo y sin descarga por gravedad.

**Tabla N° 11.-** Niveles máximos simulados para distintos escenarios.

RES-EB	Nivel máx. adm. [m IGN]	Nivel máx. E.1 [m IGN]	Nivel máx. E.2 [m IGN]	Nivel máx. E.3 [m IGN]
6	15.50	15.46	15.26	15.07
4/5	13.50	13.45	13.33	12.55
3	13.00	12.03	12.43	12.15
2	12.50	11.93	11.95	11.83
1	12.50	12.32	11.95	11.73
0	12.50	12.39	12.22	11.30

E.1: TD, reservorios funcionando en forma independiente, con bombeo y sin descarga por gravedad. E.2: TD, reservorios conectados en el tramo RES-EB 6 – RES-EB 0, con bombeo y sin descarga por gravedad. E.3: tormenta de marzo de 2007, reservorios conectados en el tramo mencionado, con bombeo y sin descarga por gravedad.

En función de los resultados obtenidos de la simulación, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

a) Para los 3 escenarios, los niveles de agua máximos resultantes en los reservorios no superan los niveles máximos admisibles. Para el escenario E.2 se obtuvieron niveles máximos inferiores a los del E.1, excepto para los RES 2 y 3. Para el escenario E.3 se obtuvieron niveles máximos inferiores a los del E.2.



- b) Para los escenarios E.2 y E.3, los niveles de agua máximos en los canales de vinculación son menores a las cotas de desborde de los mismos.
- c) Para los 3 escenarios no se superan las cotas de coronamiento de las OC.
- d) Existe flujo y reflujo entre reservorios contiguos a través de los canales de vinculación. Este efecto hidrodinámico es originado por la diferencia del nivel de agua en los reservorios, que es variable con el tiempo. Los caudales pico en todos los canales de vinculación son inferiores a  $\pm 5$  m<sup>3</sup>/s para el E.2 y a  $\pm 2$  m<sup>3</sup>/s para el E.3. En consecuencia, no es necesario reacondicionar los mismos.

## CONCLUSIONES

La duración crítica de la tormenta de diseño es un parámetro muy importante para el diseño de dispositivos de almacenamiento. Para este estudio se adoptó una duración de 5 días, teniendo en cuenta un análisis del almacenamiento de detención para distintas duraciones de lluvia y considerando las duraciones de tormentas críticas registradas en la región.

Teniendo en cuenta la alta densidad poblacional y la elevada vulnerabilidad social de la zona de influencia de los reservorios de bombeo del Distrito Santa Fe, se adoptó una recurrencia de 100 años para el diseño los sistemas RES-EB.

Se determinó que la probabilidad de ocurrencia simultánea de precipitaciones críticas y niveles de agua altos en los cursos de agua receptores no es despreciable. Por lo tanto, se adoptó como criterio que cada sistema RES-EB debía ser capaz de evacuar la crecida de diseño sólo por bombeo.

Dado que los canales de vinculación existentes entre los reservorios tienen una pendiente general hacia el Sur, se planteó la condición de funcionamiento independiente de los sistemas RES-EB para el diseño con el objeto de que las capacidades de almacenamiento y de bombeo proyectadas para cada sistema permitan evacuar por bombeo la totalidad del agua pluvial generada en su correspondiente cuenca de aporte, sin trasladar efectos perjudiciales hacia aguas abajo.

Para evitar ingresos de escorrentía generada en zonas rurales y suburbanas del Distrito Recreo a zonas densamente pobladas del Distrito Santa Fe, se independizó el funcionamiento de los sistemas RES-EB 7, 8 y 9 del resto de los sistemas RES-EB 6 a RES-EB 0.

Se adoptó conservar los canales de vinculación existentes entre RES 6 y RES 0 sin incorporar obras con compuertas. El uso de estos dispositivos es complejo desde un punto de vista operativo y puede generar conflictos entre diferentes sectores durante la ocurrencia de eventos críticos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- INCOIV** (2006). Plan Director de Desagües Pluviales de Recreo.
- Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Litoral** (2001). Plan Director de Desagües Pluviales de la Ciudad de Santa Fe.
- Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Litoral** (2007). Actualización de las Cartas de Áreas de Riesgo Hídrico de Santa Fe.
- Chow V.T., Maidment D., Mays L.** (1994). “Hidrología Aplicada”. Mc. Graw Hill Interamericana S.A.
- Maza J., Fornero L., Litwin C., Fernández P.** (1996, 2008). ARHYMO. Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino.
- Paoli C., Bolzico J. y Cacik P.** (1991). Manual de usuario programa AFMULTI. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral.

**U.S. Environmental Protection Agency** (2009). "Storm Water Management Model (SWMM)".

**U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration** (2001). "Urban Drainage Design Manual" (Hydraulic Engineering Circular N° 22)", FHWA.

**U.S. Water Environment Federation - American Society Of Civil Engineers (ASCE)** (1992). "Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems", ASCE, New York.

## **DESEMPEÑO DEL MODELO DIT ANTE DISTINTAS DISTRIBUCIONES TEÓRICAS DE PROBABILIDAD: CASO IDT DE LA CIUDAD DE LA RIOJA**

***Juan Francisco Weber***

*Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria - CP (X5016ZAA) - Córdoba, Argentina, jweber@civil.frc.utn.edu.ar*

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene como objetivo analizar el desempeño del modelo DIT (Caamaño y Dasso, 2003) ante distintas distribuciones teóricas de probabilidad, tomando como caso la relación idT de la ciudad de La Rioja, República Argentina, determinada a partir de los datos pluviográficos recolectados por el SMM y actualmente disponibles en la APA (Weber, 2009). En esa oportunidad, se impuso la distribución lognormal de probabilidades, distribución con la cual ha sido mayoritariamente implementado el modelo DIT. La información pluviográfica disponible abarca un periodo discontinuo de 25 años hidrológicos, subdividido en tres subperiodos: el primero, desde 1961 hasta 1978; el segundo, desde 1981 hasta 1989; y el tercero, desde 1995 a 1998. Cabe destacar que si bien la información se extiende más allá de estos límites, debido a la falta de completitud de algunos años la longitud efectiva de la serie fue reducida. Para caracterizar el año hidrológico, se realizó un análisis de frecuencias de precipitaciones en función de cada mes. Para asignar probabilidades de excedencia (y por tanto periodos de retorno) a las intensidades máximas anuales, se siguió el procedimiento de las posiciones de graficación o posiciones de ploteo (Chow et al, 1994). Para ello se utilizó la fórmula de Weibull. Se consideraron cinco distribuciones teóricas de probabilidad, a través de sus respectivos factores de frecuencia (Rao y Hamed, 2000): lognormal, Gumbel, Log Pearson III, Weibull y Gamma. Se realizó un ajuste de los parámetros del modelo DIT considerando las cinco distribuciones mencionadas, a través de un software de optimización desarrollado ad hoc. El parámetro de calidad de ajuste considerado fue el desvío estándar de la estimación. Se concluye que, en el caso de la serie pluviográfica de la ciudad de La Rioja, el modelo DIT produjo el mejor ajuste junto con la distribución lognormal, justificando plenamente la elección realizada en el desarrollo de la idT de la ciudad de La Rioja.

**PALABRAS CLAVE:** modelo DIT, distribuciones de probabilidad, relación idT.

## INTRODUCCIÓN

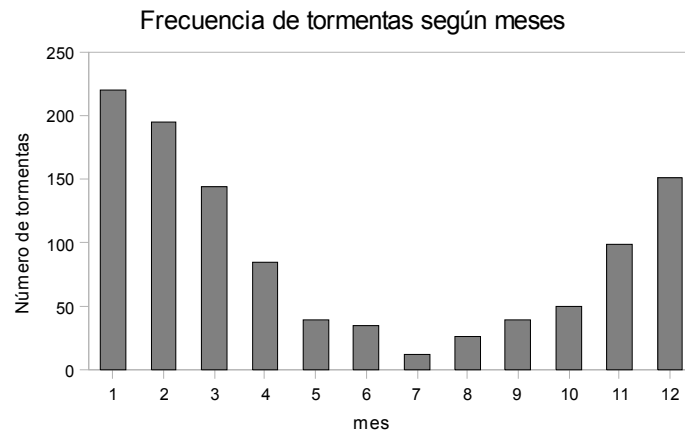
Para diversos proyectos de obras hidráulicas, tales como vertederos, sistemas de drenaje, etc. como así también en la zonificación de un sitio en base al riesgo hídrico, es necesario conocer tres propiedades que caracterizan las precipitaciones máximas: intensidad, duración y recurrencia (o periodo de retorno). La relación entre estas tres variables se debe deducir a partir de las observaciones de lluvias intensas durante un periodo de tiempo suficientemente largo y representativo de los eventos extremos locales (Tucci, 1993). Contar con las curvas i-d-T para un determinado sitio permite simplificar considerablemente los posteriores trabajos de diseño hidrológico.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el desempeño del modelo DIT (Caamaño y Dasso, 2003) ante distintas distribuciones teóricas de probabilidad, tomando como caso la relación idT de la ciudad de La Rioja, República Argentina, determinada a partir de los datos pluviográficos recolectados por el SMM y actualmente disponibles en la APA (Weber, 2009).

## INFORMACIÓN DISPONIBLE

La información pluviográfica disponible abarca un periodo discontinuo de 25 años hidrológicos, subdividido en tres subperiodos: el primero, desde 1961 hasta 1978; el segundo, desde 1981 hasta 1989; y el tercero, desde 1995 a 1998. Cabe destacar que si bien la información se extiende más allá de estos límites, debido a la falta de completitud de algunos años la longitud efectiva de la serie fue reducida.

Para caracterizar el año hidrológico, se realizó un análisis de frecuencias de precipitaciones en función de cada mes, obteniéndose el histograma de la Figura 1. Esto muestra que los meses menos lluviosos son julio y agosto, eligiéndose entonces como inicio del año hidrológico el día 1 de agosto, y como fin el 31 de julio. Dentro de cada periodo, se verificó la completitud, flexibilizando el criterio en el caso en que los meses faltantes correspondieran al periodo de sequía.



**Figura 1.-** Distribución de tormentas según meses.

En primer lugar, se generó a partir de la información disponible, 15 series (una por cada duración considerada, entre 5 y 720 minutos) de precipitaciones máximas anuales (dentro de cada año hidrológico) de longitud 25. Esto hace un total de 375 valores a ajustar con la relación idT buscada. Si bien es cuestionable el generar una serie de máximos anuales a partir de una serie discontinua, se optó por este criterio dada la escasez de información pluviográfica adicional.

Estas láminas fueron transformadas en intensidades dividiendo por la correspondiente duración, a partir de la relación:

$$i(mm/h) = \frac{h(mm) \cdot 60}{d(min)} \quad [1]$$

Cabe destacar que la máxima intensidad obtenida fue de **140 mm/h** para una duración de 5 minutos, en los 25 años hidrológicos considerados.

### Asignación empírica de probabilidades

Para asignar probabilidades de excedencia (y por tanto periodos de retorno) a las intensidades máximas anuales antes calculadas, se siguió el procedimiento de las posiciones de graficación o posiciones de ploteo (Chow et al, 1994). Se han propuesto numerosos métodos para la determinación de las posiciones de graficación. La más consistente desde un punto de vista de la estadística teórica (Caamaño y Dasso, 2003), y por otra parte muy utilizada, es la fórmula de Weibull, dada por:

$$p(X \geq x_m) = \frac{m}{n+1} \quad [2]$$

donde  $X$  es la variable aleatoria, intensidades máximas anuales en este caso, definida a partir de una serie de  $n$  valores,  $x_m$  es un valor ubicado en la posición  $m$  dentro de la lista de valores de  $X$  ordenados en forma decreciente. O bien, considerando el periodo de retorno  $T$ , que no es más que la recíproca de la probabilidad de excedencia:

$$T = \frac{n+1}{m} \quad [3]$$

Cada una de las 15 series de intensidades máximas anuales fue ordenada en forma decreciente y a cada valor de la serie se le asignó un periodo de retorno mediante la ecuación [3].

### EL MODELO DIT

Dentro del segundo grupo, se destaca a nivel local el modelo DIT (Caamaño Nelli y García, 1999). La idea de este método se basa en el concepto de factor de frecuencia (Chow et al, 1994), que caracteriza un valor extremo  $y$  de la serie como la media  $\mu_y$  más el factor de frecuencia  $\Phi_y$  multiplicado por el desvío estándar  $\sigma_y$ :

$$y = \mu_y + \sigma_y \Phi_y \quad [4]$$

para definir el factor de frecuencia es necesario adoptar una distribución teórica de probabilidades para la serie de extremos, el planteo original del modelo DIT asume la distribución lognormal para las lluvias de la provincia de Córdoba. Caamaño y García (1999) presentan una expresión pseudo-analítica para determinar el factor de frecuencia asociado a un periodo de retorno dado:

$$\Phi_y = 2,584458(\ln T)^{0,375} - 2,252573 \quad [5]$$

Realizando una serie de consideraciones teóricas, estos autores encuentran una expresión que relaciona las variables  $i$ ,  $d$ ,  $T$  y que constituye la ecuación del modelo DIT:

$$\ln i = A\Phi_y - B\delta_y + C \quad [6]$$

en donde  $\Phi_y$  es el factor de frecuencia definido en la expresión [5], asumiendo una distribución lognormal (y que puede ser reemplazado por cualquier otra expresión que dependa de la distribución teórica de probabilidades elegida),  $\delta_y$  viene dado por:

$$\delta_y = (\ln d)^q \quad [7]$$

siendo  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $q$  los parámetros del modelo.

Este modelo DIT tiene la misma flexibilidad que la ecuación de Sherman (4 parámetros) pero al tener fundamento estadístico, es posible su transposición a una estación pluviométrica asociada, mediante el procedimiento sugerido por Caamaño y García (1999).

## DISTRIBUCIONES TEÓRICAS DE PROBABILIDAD CONSIDERADAS

### Distribución lognormal

La distribución lognormal es la distribución de una variable aleatoria cuyo logaritmo sigue la distribución normal. Surge de la combinación de términos aleatorios mediante un proceso multiplicativo (Hines y Montgomery, 1993). La distribución lognormal se ha aplicado a una amplia variedad de campos entre los que se incluyen las ciencias físicas, las biológicas, las sociales y la ingeniería. La función de densidad de la distribución lognormal es:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_Y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x - \mu_Y}{\sigma_Y}\right]^2}, \quad x > 0 \quad [8]$$

$$f(x) = 0, \quad \text{en otro caso}$$

donde  $Y = \ln X$  es la variable distribuida normalmente, con media  $\mu_Y$  y varianza  $\sigma_Y^2$ . La media y la varianza de la distribución lognormal son:

$$E(X) = \mu_X = e^{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2} \quad [9]$$

$$V(X) = \sigma_X^2 = e^{2\mu_Y + 2\sigma_Y^2} \left( e^{\sigma_Y^2} - 1 \right) \quad [10]$$

La Figura 2 muestra la función de densidad lognormal para distintos valores de sus parámetros.

Como se citó anteriormente, Caamaño y García (1999) presentaron una expresión pseudo-analítica para determinar el factor de frecuencia de Chow (ecuación [4]) asociado a un periodo de retorno dado:

$$\Phi_y = 2,584458(\ln T)^{0,375} - 2,252573 \quad [11]$$

esta expresión dio un error máximo del 2,768 %, con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0,999978$  (Caamaño y Dasso, 2003).

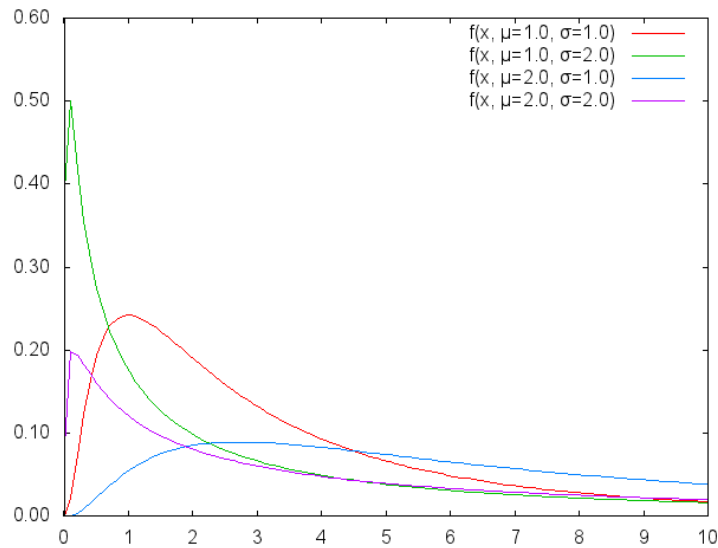


Figura 2.- Función de densidad de la distribución lognormal.

### Distribución de Gumbel

La distribución de Gumbel, llamada así en honor de Emil Julius Gumbel (1891-1966) es utilizada para modelar la distribución de valores máximos (o mínimos). La aplicabilidad potencial de la distribución de Gumbel para representar los máximos se debe a la teoría de valores extremos que indica que es probable que sea útil si la muestra de datos tiene una distribución normal o exponencial.

La función de probabilidad acumulada de la distribución de Gumbel es:

$$F(x) = e^{-e^{-(x-\mu)/\beta}} \quad [12]$$

y la función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = e^{-z-e^{-z}} \quad [13]$$

donde  $\mu$  y  $\beta$  son los parámetros de la distribución, y  $z = (x - \mu)/\beta$ . De acuerdo a los valores de  $\mu$  y  $\beta$ , la función de la expresión [13] adopta las formas indicadas en la Figura 3.

Los estimadores de los parámetros vienen dados por:

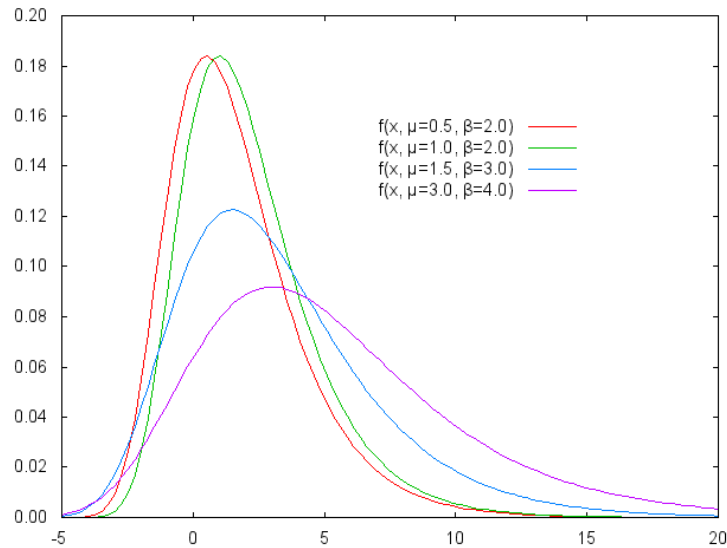
$$\beta = \frac{\sqrt{6}\sigma_x}{\pi} \quad [14]$$

$$\mu = \mu_x - 0.5772\beta \quad [15]$$

De acuerdo a Chow et al (1994) el factor de frecuencia de la distribución de Gumbel viene dado por:

$$\Phi = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \quad [16]$$

donde T es el periodo de retorno, en años.



**Figura 3.-** Función de densidad de la distribución de Gumbel.

### Distribución log Pearson III

Esta es la distribución estándar para el análisis de frecuencia de crecientes máximas anuales en Estados Unidos. Si la variable X sigue esta distribución, entonces  $\ln X$  sigue la distribución Pearson III también llamada Gamma de 3 parámetros. Esta es una distribución muy flexible, que puede asumir distintas formas a medida que sus tres parámetros varían (Chow et al, 1994).

El sistema de distribuciones Pearson incluye siete tipos; todos son soluciones para  $f(x)$  de una ecuación de la forma:

$$\frac{d[f(x)]}{dx} = \frac{f(x)(x-d)}{C_0 + C_1x + C_2x^2} \quad [17]$$

donde  $d$  es la moda de la distribución y  $C_0, C_1, C_2$  coeficientes a determinarse. Cuando  $C_2 = 0$ , la solución de la ecuación [17] es una distribución Pearson tipo III, con una función de densidad dada por:

$$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x - \varepsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\varepsilon)}}{\Gamma(\beta)} \quad [18]$$

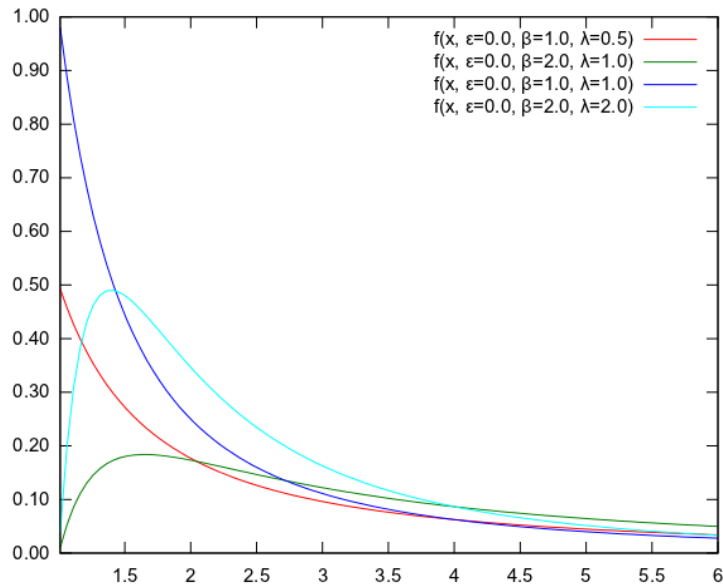
donde  $\lambda, \beta$  y  $\varepsilon$  son los parámetros de la distribución, función del desvío estándar y del coeficiente de asimetría.

Si en la expresión [18] y sus parámetros, se reemplaza en el miembro derecho a  $x$  por  $y = \ln x$ , se tiene la distribución log-Pearson III:

$$f(x) = \frac{\lambda^\beta (y - \varepsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(y-\varepsilon)}}{x\Gamma(\beta)} \quad [19]$$

La Figura 4 muestra la función de densidad log-Pearson III para diversos valores de sus parámetros.





**Figura 4.-** Función de densidad de la distribución logPearson III.

De acuerdo a Chow et al (1994) el factor de frecuencia de la distribución logPearson III viene dado por:

$$\Phi = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + zk^4 + \frac{1}{3}k^5 \quad [20]$$

donde z es la variable estandarizada y  $k = Cs/6$ , con Cs el coeficiente de asimetría.

### Distribución de Weibull

La distribución de Weibull se aplica ampliamente en muchos fenómenos aleatorios. La principal utilidad de esta distribución es que proporciona una aproximación excelente a la ley de probabilidades de muchas variables aleatorias (Hines y Montgomery, 1993).

La función de densidad de la distribución de Weibull es:

$$f(x) = \frac{\beta}{\delta} \left( \frac{x - \gamma}{\delta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{x - \gamma}{\delta} \right)^\beta}, \quad x \geq \gamma$$

$$f(x) = 0, \quad \text{en otro caso} \quad [21]$$

Sus parámetros son  $\gamma$  (el parámetro de localización),  $\beta$  (el parámetro de forma) y  $\delta$  (el parámetro de escala). Mediante la selección apropiada de estos parámetros, esta función de densidad se aproximará de manera muy cercana a muchos fenómenos observacionales.

La Figura 5 muestra la función de densidad log-Pearson III para diversos valores de sus parámetros. Cuando  $\gamma = 0$  y  $\beta = 1$ , la distribución de Weibull se reduce a una densidad exponencial con  $\lambda = 1/\delta$ .

Rao y Hamed (2000) presentan el factor de frecuencia de Chow para la distribución de Weibull (ecuación [22]).

$$\Phi(T) = \frac{(\ln T)^{\frac{1}{\beta}} - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)}{\sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)}} \quad [22]$$

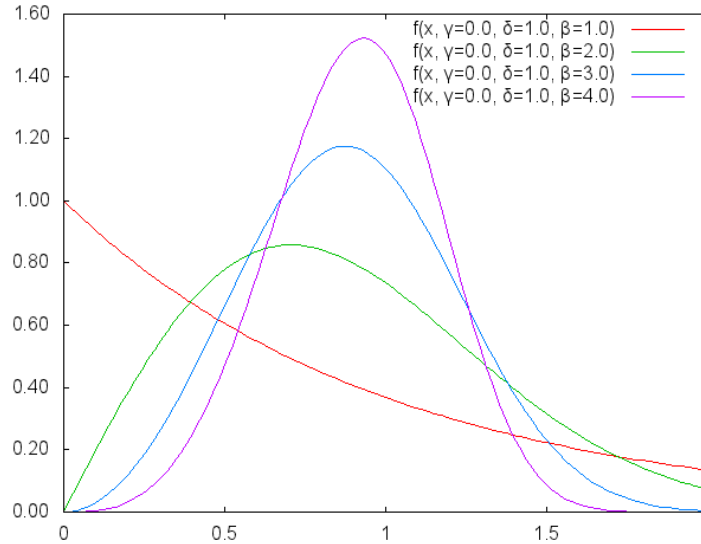


Figura 5.- Función de densidad de la distribución de Weibull.

### Distribución Gamma

La distribución gamma es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros  $r$  y  $\lambda$  cuya función de densidad para valores  $x > 0$  es:

$$f(x) = \frac{\lambda}{\Gamma(r)} (\lambda x)^{r-1} e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

$$f(x) = 0, \quad \text{en otro caso} \quad [23]$$

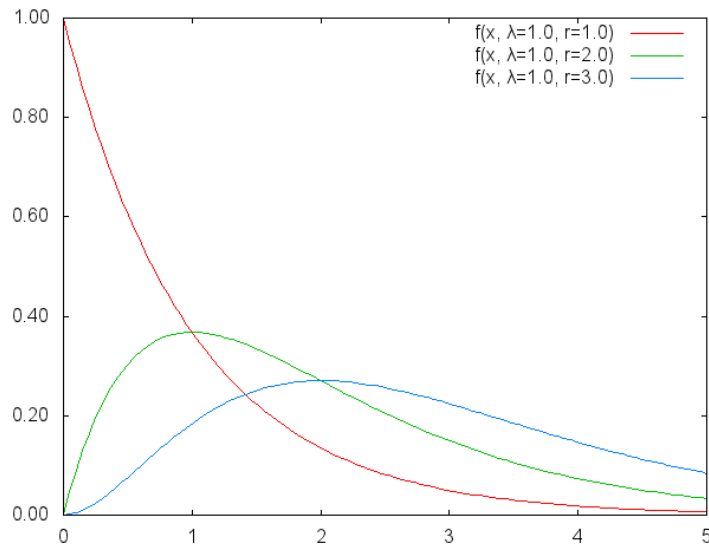
La distribución gamma tiene algunas propiedades interesantes:

- si  $r = 1$ , la distribución gamma se reduce a la distribución exponencial;
- si la variable aleatoria  $X$  es la suma de  $r$  variables aleatorias independientes exponencialmente distribuidas, cada una con parámetro  $\lambda$ , entonces  $X$  tiene una densidad gamma con parámetros  $r$  y  $\lambda$ ;
- la media y la varianza de la distribución gamma, son:

$$E(x) = \frac{r}{\lambda} \quad [24]$$

$$V(x) = \frac{r}{\lambda^2} \quad [25]$$

La Figura 6 muestra la función de densidad gamma para diversos valores de sus parámetros.



**Figura 6.-** Función de densidad de la distribución gamma.

El factor de frecuencia de la distribución gamma es, según la transformación de Wilson-Hilferty (Rao y Hamed, 2000):

$$\Phi(T) = \frac{2}{C_s} \left\{ \left[ \frac{C_s}{6} \left( u - \frac{C_s}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1 \right\} \quad [26]$$

donde  $C_s$  es el coeficiente de asimetría y  $u$  es la variable normal estándar correspondiente a una probabilidad de no excedencia  $P = 1 - 1/T$ .

### ANTECEDENTES

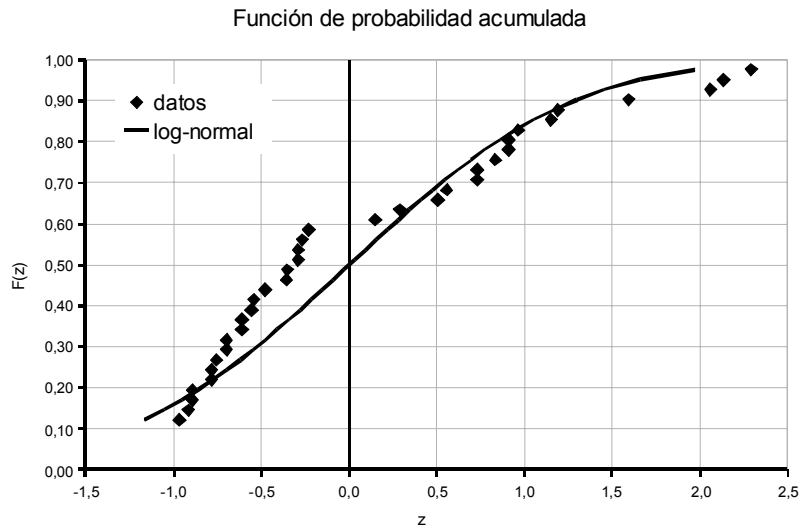
A partir de la información pluviográfica mencionada, se determinó (Weber, 2008, 2009) la relación intensidad-duración-recurrencia para la ciudad de La Rioja en base al modelo DIT (Caamaño y Dasso, 2003). En esa oportunidad se optó por dicho modelo porque fue el que mejor ajuste presentó a la serie disponible, frente a las relaciones idT de Sherman y Bogomazov y Petrov.

Para la aplicación del modelo DIT, en esa oportunidad se asumió una distribución lognormal de las precipitaciones máximas, lo cual no fue completamente justificado sino en base a la apreciación cualitativa de la función de distribución de probabilidad de la serie de máximos pluviométricos anuales, según se indica en la Figura 7.

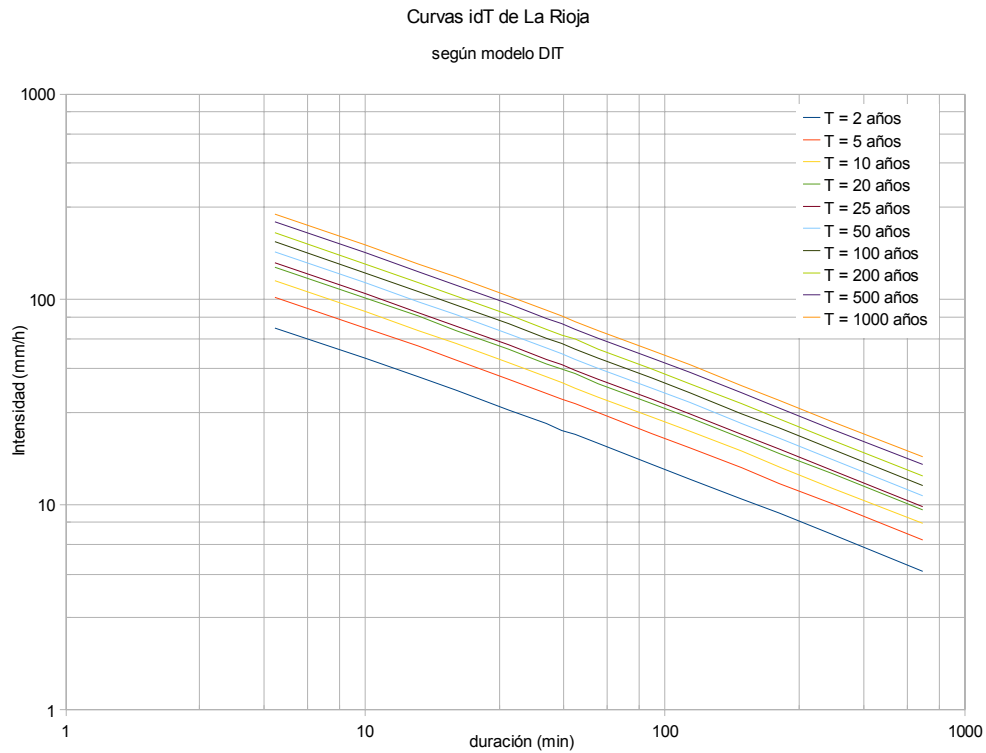
Para la información disponible, los parámetros de ajuste del modelo DIT obtenidos fueron los siguientes:

- $A = 0,414$
- $B = 0,398$
- $C = 4,972$
- $q = 1,141$

para los cuales se obtuvo un desvío estándar de la estimación de 3,92 mm/h con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0,9716$ . En la Figura 8 puede verse la relación intensidad-duración-recurrencia obtenida, mientras que en la Figura 9 se aprecia la correlación entre observaciones y predicciones del modelo DIT.



**Figura 7.-** Distribución de probabilidad acumulada – serie pluviométrica de máximos anuales.

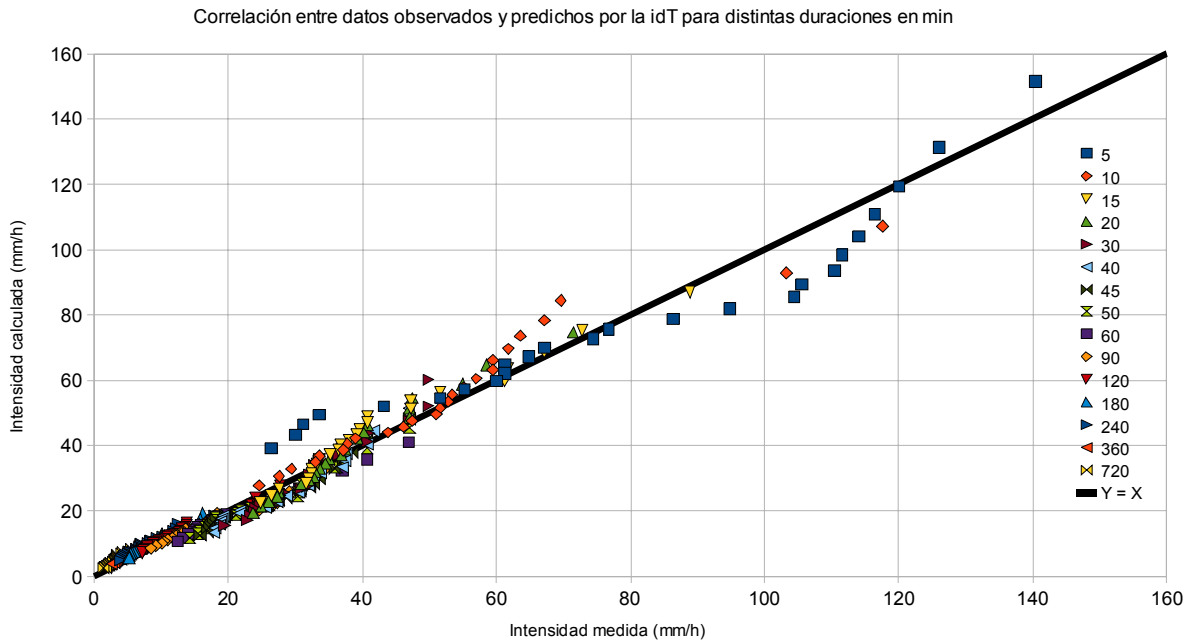


**Figura 8.-** Curvas idT de La Rioja en escala doble logarítmica.

### AJUSTE DE PARÁMETROS

A través de un software desarrollado *ad-hoc*, se realizó el ajuste de los parámetros del modelo DIT considerando cada una de las 5 distribuciones de probabilidad descriptas, asumiendo como función objetivo a minimizar el desvío estándar de la predicción DS, definido por

$$DS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (i_j^c - i_j)^2}{N}} \quad [27]$$

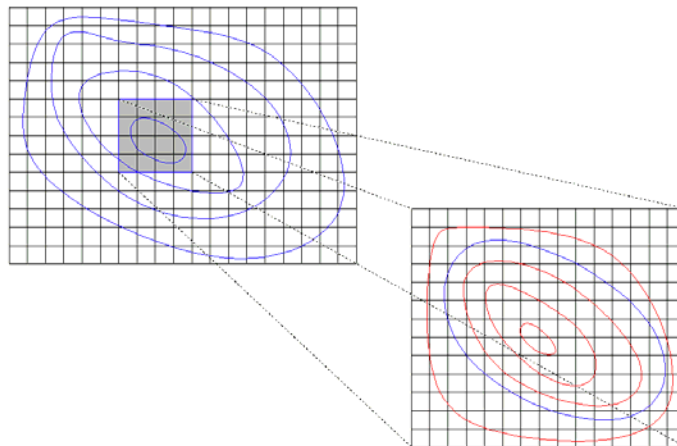


**Figura 9.-** Correlación entre observaciones y predicciones del modelo DIT.

donde  $i_j^c$  e  $i_j$  representan cada uno de los  $N$  valores calculados y medidos (respectivamente) de la intensidad. Este parámetro es una escala del error de la estimación de un valor a partir del modelo aplicado.

El software fue desarrollado en el lenguaje C++ y aplica el método de búsqueda directa (fuerza bruta) con refinamiento automático de malla, en el espacio tetradimensional establecido por los parámetros A, B, C y q. En la Figura 10 puede observarse la heurística del método de optimización para el caso de un modelo biparamétrico. El intervalo de búsqueda por parámetro, en cada iteración, se redujo a la décima parte. La tolerancia de los iteradores fue fijada en  $1 \times 10^{-15}$ .

La obtención de los parámetros (con 4 cifras decimales significativas) demandó alrededor de 3 horas en una computadora con un procesador Pentium DualCore de 2,8 GHz con 2 Gb de memoria RAM.



**Figura 10.-** Heurística del método de búsqueda directa con refinamiento de malla.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos al aplicar el software de optimización. Se observan los 4 parámetros del modelo DIT ajustados para las 5 distribuciones de probabilidad exploradas, junto con el valor de la función objetivo dada por la ecuación [27].

**Tabla 1.- Resultados del ajuste.**

<b>Distribución</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>q</b>	<b>F.O.</b>
lognormal	0.4139	0.4164	4.9986	1.1183	5763.9
Gumbel	0.3625	0.3865	4.9883	1.1543	7819.2
LogPearson III	-0.2889	0.3344	5.0799	1.2230	60736.2
Weibull	0.3379	0.3804	5.0089	1.1624	8088.1
gamma	0.1089	0.4944	5.0975	1.0251	59493.7

Como puede verse, el mejor desempeño lo obtuvo la distribución lognormal, cuyos parámetros son ligeramente distintos a los obtenidos previamente (Weber, 2009) debido a que estos últimos son más precisos.

Las distribuciones de Gumbel y de Weibull, si bien no alcanzan el desempeño de la lognormal, logran estimaciones de una precisión del mismo orden de magnitud. Es de notar la similitud de los parámetros obtenidos. Las distribuciones logPearson III y gamma producen resultados mucho más alejados de los obtenidos por la tres distribuciones antes mencionadas. Es de notar incluso en la distribución logPearson III el valor negativo en el parámetro A.

La menor variabilidad porcentual entre distribuciones se obtiene sobre el parámetro C (máximo 2 %), mientras que los valores del parámetro A presentaron la mayor dispersión.

De este modo se justifica plenamente la elección de la distribución lognormal para la construcción de la relación intensidad-duración-recurrencia en base al modelo DIT para la ciudad de La Rioja.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caamaño Nelli, G. y C. Dasso** (2003). *Lluvias de Diseño*. Universitas, Córdoba.
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García** (1999). “Relación intensidad-duración-recurrencia de lluvias máximas: enfoque a través del factor de frecuencia – caso lognormal”. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XIV, Num. 3, pags. 37-44.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, L. W. Mays** (1994). *Hidrología Aplicada*. Mc Graw Hill, Santa Fe de Bogotá.
- Hines, W. W. y D. C. Montgomery** (1993). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería*. Tercera edición, CECSA, México.
- Rao, A. R. y K. H. Hamed** (2000). *Flood Frequency Analysis*. CRC Press.
- Tucci, C. M.** (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da Universidade, UFRGS.
- Weber, J. F.** (2008). *Determinación de la relación intensidad – duración – recurrencia para la ciudad de La Rioja*. Informe técnico – Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Rioja. Convenio U.T.N., F.R.L.R. - Dir. Prov. de Vivienda y Urbanismo, Programa de Mejoramiento de Barrios II (1842/OC-AR).
- Weber, J. F.** (2009). “Determinación de la relación intensidad – duración – recurrencia para la ciudad de La Rioja”. *II Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas - Córdoba (Argentina) - 26 y 27 de marzo de 2009*.

**VALIDACIÓN DE MODELOS DE APROXIMACIÓN ESTADÍSTICA  
PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LLUVIA  
EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES**

***Tito Ignacio Lasanta***

*Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.  
Av. Las Heras 2214. (1127). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina.  
email: titolasanta@gmail.com*

**RESUMEN:** En el trabajo se validan modelos clásicos y bayesianos de aproximación estadística para la estimación de parámetros de lluvia (Zimmermann 2003a y 2003b), para el *Área Metropolitana Buenos Aires* con datos de estaciones con buena cobertura geográfica y buena calidad de la información. Se validó el *modelo de aproximación bayesiana* propuesto por Zimmermann (2003a), para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos en cada mes, condicionado a la lámina de lluvia mensual, que recurre al teorema de Bayes para obtener probabilidades a priori de la cantidad de eventos de tormenta de un mes dado y a un proceso *poissoniano* para describir tanto el arribo de tormentas, como el arribo de células de lluvia en la misma tormenta, en el *Área Metropolitana Buenos Aires*. Asimismo se validó un modelo de *función de densidad de probabilidad* (Zimmermann 2003b) para la lámina de un evento de tormenta particular, basada en el número de eventos lluviosos del mes, que sugiere una función acumulada exponencial para la precipitación. La alta correlación obtenida entre las series de lluvias, ha permitido validar con éxito ambos modelos para las series de precipitaciones del *Área Metropolitana de Buenos Aires*. Se concluye, además, que el modelo de la *función de densidad de probabilidad*, para la lámina de un evento de tormenta particular, es sensible al valor del parámetro empírico *b de Hazen*. A tal conclusión se arribó calculando la frecuencia experimental acumulada y el parámetro de la función de densidad de probabilidad *Gamma*, para distintos valores de *b*, calculando la correlación existente entre láminas pronosticadas y registradas. Se comprobó que los valores que toma la función de densidad de probabilidad *Gamma*, resultan sensibles al parámetro *b*, incidiendo significativamente en la validación del modelo.

**PALABRAS CLAVE:** precipitación, estimación de parámetros, modelos bayesianos

## INTRODUCCION

Se propone en el trabajo estudiar la relación existente entre las características estadísticas de láminas de precipitaciones medidas en escala de gran agregación y las cantidades de los correspondientes eventos de lluvia. Se dispone de los modelos de generación de lluvias de *Zimmermann (2003a)* y *(2003b)*, quien ha concebido y desarrollado la metodología propuesta y la ha validado con éxito en la provincia de *Santa Fe, Argentina*. En el trabajo se propone, la aplicación de dichos modelos, a datos de lluvias registrados en las estaciones *Estefanía*, del *Instituto Nacional del Agua (INA)*, *Villa Ortúzar*, del *Servicio Meteorológico Nacional (SMN)* de la *Fuerza Aérea Argentina*, y del *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)*, en *Castelar*, del *Área Metropolitana Buenos Aires*, con el fin de analizar la validez de su aplicación.

## DESARROLLO

En *primer lugar*, se considera el modelo de aproximación *bayesiano* formulado por *Zimmermann (2003a)* para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos en cada mes, condicionado a la lámina de lluvia mensual. En *segundo lugar*, se determina una función de densidad de probabilidad, propuesta asimismo por *Zimmermann (2003b)*, para la lámina de un evento de tormenta particular.

### Validación del modelo de aproximación *Bayesiano* de *Zimmermann*

*Zimmermann (2003a)* propone utilizar el *teorema de Bayes* para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos en cada mes. La expresión del teorema de *Bayes*, aplicado al modelo de *Zimmermann*, es la correspondiente a la ecuación [1], donde  $f(N)$  es la probabilidad a priori de la cantidad de eventos de tormenta de un mes dado.

$$f(N/P) = \frac{f(P/N) \cdot f(N)}{f(P)} \quad [1]$$

$f(N/P)$ : Probabilidad a priori de la cantidad de eventos de tormenta de un mes dado, condicionado a la lámina de lluvia;  $f(P/N)$ : Distribución de probabilidades, para la lámina mensual, dado el número de eventos de lluvia;  $f(N)$ : Probabilidad a priori de la cantidad de eventos de tormenta de un mes dado;  $f(P)$ : Probabilidad de la precipitación  $P$ , en el mes dado.

Se utilizará el modelo exponencial concebido por *Zimmermann (2003a)*, para la representación de cantidades precipitadas, tiempos entre lluvias y duración de los eventos. Se adopta para modelar los procesos estocásticos de tormentas puntuales en el trabajo, la aproximación propuesta por *Zimmermann (2003a)* quien adopta, para describir tanto el arribo de tormentas, como el arribo de células de lluvia en la misma tormenta, la distribución de *Poisson*. Tal aproximación constituye la herramienta de modelación disponible más robusta y es la que se propone para determinar la función  $f(N)$ . Concretamente, *Todorovic (1967)*, citado por *Zimmermann y Arrasca (2005)*, propone para el cálculo de  $f(N)$ , la distribución de *Poisson*. La aplicación de la expresión teórica conduce a la expresión que se muestra en la ecuación [2]:

$$f(N) = \frac{\lambda_1^N \cdot e^{-\lambda_1}}{N!} \quad [2]$$

$f(N)$ : Función de distribución *de Poisson*, para el número de eventos de lluvia de un mes dado;  $\lambda_1$ : Número medio mensual de eventos de lluvia;  $N$ : Número de eventos de lluvia para un mes dado;  $e$ : Número  $e$ .



En dicha ecuación, se adopta para la tasa de arribos de *Poisson*,  $\lambda_1$ , el número medio mensual de eventos de tormenta.

Para estimar valores de precipitación, condicionados al número de lluvias registradas, se ha utilizado, a propuesta de *Zimmermann y Arrasca (2005)*, la función *Gamma*, para determinar la distribución acumulada de precipitación total.

El cálculo de la función de distribución acumulada de probabilidades de láminas mensuales de precipitación de  $N$  tormentas, ha sido propuesto por *Todorovic (1967)*. *Zimmermann y Arrasca (2005)*, han obtenido, por derivación, la función de densidad de probabilidades de láminas de precipitación condicionados a la cantidad de eventos de tormenta  $f(P/N)$ , que se utiliza en el presente trabajo y que se indica en la ecuación [3]:

$$f(P/N) = \frac{\lambda_2^N \cdot e^{-\lambda_2 \cdot P} \cdot P^{N-1}}{(N-1)!} \quad [3]$$

$f(P/N)$ : Función de densidad de probabilidad *Gamma*, para la lámina mensual, dado el número de eventos de lluvia;  $\lambda_1$ : Número medio mensual de eventos de lluvia;  $\lambda_2$ : Inversa de la lámina media para una tormenta;  $P$ : Lámina de precipitación en un mes dado;  $N$ : Número de eventos de lluvia para un mes dado;  $e$ : Número  $e$

$\lambda_2$ , en la ecuación [3], puede interpretarse, como proponen *Zimmermann y Arrasca (2005)*, como la inversa de la lámina media de la precipitación que produce una sola tormenta, es decir el cociente entre  $\lambda_1$  y la precipitación media mensual. Se calcula, como proponen *Zimmermann y Arrasca (2005)*, para cada mes y para cada año, los valores de la función de probabilidad de láminas, condicionada a la cantidad de eventos, para una serie correlativa de la cantidad de eventos  $N$  y se calcula para cada valor de  $N$ , la probabilidad asociada a la precipitación.

Mediante la aplicación del modelo *bayesiano de Zimmermann*, se determina el número de eventos, condicionado a la precipitación total del período, de acuerdo con la expresión de la ecuación [4]:

$$f(N/P) = \frac{\lambda_2^N \cdot e^{-\lambda_2 \cdot P} \cdot P^{N-1} \cdot \lambda_1^N \cdot e^{-\lambda_1}}{(N-1)! \cdot N!} \quad [4]$$

$$\sum_{j=1}^{N \max} \frac{\lambda_2^{N_j} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot P} \cdot P^{N_j-1} \cdot \lambda_1^{N_j} \cdot e^{-\lambda_1}}{(N_j-1)! \cdot N_j!}$$

$f(N/P)$ : Función de densidad de  $N$  condicionado a la lámina  $P$ ;  $\lambda_1$ : Número medio mensual de eventos de lluvia;  $\lambda_2$ : Inversa de la lámina media para una tormenta;  $N_j$ : Número de eventos de lluvia para el mes  $j$ ;  $e$ : Número  $e$ ;  $N$ : Cantidad de tormentas en un mes dado;  $P$ : Lámina de precipitación en un mes dado.

Se dispone de valores de precipitación de todos los eventos de tormenta ocurridos en cada mes, durante el período considerado, tres estaciones meteorológicas del AMBA: *SMN*, *INA* e *INTA*, así como la cantidad de eventos registrados. Sobre esa base se calcularon valores de láminas totales mensuales, láminas mensuales promedio (o láminas medias mensuales) y número máximo probable de eventos de tormenta por mes.

Para el modelo propuesto por *Zimmermann* para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos en cada mes, condicionado a la lámina de lluvia mensual se determina la función de probabilidades para el número  $N$  de eventos de lluvia para cada mes de la serie correlativa, condicionada a la lámina de lluvia y se selecciona el número de eventos de lluvia que se corresponde con la probabilidad máxima.

Para ello se calculan los valores de lámina media mensual, número medio de eventos por mes  $\lambda_1$ , y los correspondientes valores de  $\lambda_2$ . La función de probabilidades condicionadas para cada valor  $N$  de la serie correlativa, permitió calcular probabilidades asociadas a la cantidad de eventos de tormenta. Se seleccionó, a partir de dicho cálculo, el número de lluvias que se corresponde con la probabilidad máxima, para cada mes y para cada año. Se indican en la Tabla 1 los valores de láminas mensuales (en mm), el número  $N$  de sucesos más probable para dicha lámina y la probabilidad calculada para los  $N$  sucesos, para las estaciones del *SMN*.

En la Tabla 2 se muestran las cantidades de eventos de tormenta calculados, utilizando el modelo de *Zimmermann*, contrastado con los valores registrados, para las estaciones meteorológicas del *SMN*, *INA* e *INTA*, respectivamente.

**Tabla 1.-** Valores de lámina mensual (en mm), máxima probabilidad del número  $N$  de sucesos para dicha lámina y número  $N$  de sucesos más probable para la estación del *SMN*.

ANO		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	LAMINA	64,8	202,9	159,6	216,7	69	69	31	12,6	74,4	105,6	196,2	97
	P(X=N)	<b>0,19416</b>	<b>0,1691</b>	<b>0,52</b>	<b>0,3799</b>	<b>0,1917</b>	<b>0,3225</b>	<b>0,207</b>	<b>0,5458</b>	<b>0,5634</b>	<b>0,301</b>	<b>0,5293</b>	<b>0,1964</b>
	N	<b>5</b>	<b>17</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>7</b>
2	LAMINA	168,9	27,1	49,6	107,3	49,1	57,2	37,2	38,4	24	8,6	71	205,9
	P(X=N)	<b>0,70559</b>	<b>0,2741</b>	<b>0,3713</b>	<b>0,2288</b>	<b>0,3095</b>	<b>0,5752</b>	<b>0,5243</b>	<b>0,4186</b>	<b>0,233</b>	<b>0,5367</b>	<b>0,2281</b>	<b>0,358</b>
	N	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>11</b>
3	LAMINA	105,4	28,2	59,1	0	159,6	83,9	42,6	69,7	64,7	90,4	75,2	46,8
	P(X=N)	<b>0,22712</b>	<b>0,2893</b>	<b>0,3289</b>	<b>1</b>	<b>0,5802</b>	<b>0,4133</b>	<b>0,2544</b>	<b>0,4032</b>	<b>0,5111</b>	<b>0,444</b>	<b>0,2404</b>	<b>0,5354</b>
	N	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>3</b>
4	LAMINA	118,5	140,6	86,5	156,1	102,4	68,3	31,5	51,6	33	204,8	127,3	166,7
	P(X=N)	<b>0,42355</b>	<b>0,5473</b>	<b>0,5807</b>	<b>0,3307</b>	<b>0,2477</b>	<b>0,8124</b>	<b>0,2235</b>	<b>0,392</b>	<b>0,1986</b>	<b>0,5924</b>	<b>0,3968</b>	<b>0,314</b>
	N	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
5	LAMINA	46	48,2	129,6	193	98,1	47	63,2	39,3	21,6	124,2	152	50,5
	P(X=N)	<b>0,23241</b>	<b>0,6167</b>	<b>0,4302</b>	<b>0,4888</b>	<b>0,2323</b>	<b>0,1685</b>	<b>0,409</b>	<b>0,5967</b>	<b>0,25</b>	<b>0,1557</b>	<b>0,4174</b>	<b>0,2502</b>
	N	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>4</b>
6	LAMINA	50,5	51,5	101,3	157	14,9	26,4	28,5	1,6	29,7	97,2	102,1	43
	P(X=N)	<b>0,2515</b>	<b>0,1959</b>	<b>0,3853</b>	<b>0,3648</b>	<b>0,8873</b>	<b>0,6908</b>	<b>0,6858</b>	<b>1</b>	<b>0,6718</b>	<b>0,3771</b>	<b>0,4027</b>	<b>0,7552</b>
	N	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
7	LAMINA	163,2	81,5	22,5	80,3	132,8	26,1	102,9	4,5	121,2	115,1	115,1	307,5
	P(X=N)	<b>0,48498</b>	<b>0,5165</b>	<b>0,323</b>	<b>0,4566</b>	<b>0,7468</b>	<b>0,4181</b>	<b>0,7306</b>	<b>0,6511</b>	<b>0,4481</b>	<b>0,2294</b>	<b>0,1868</b>	<b>0,454</b>
	N	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>13</b>

**Tabla 2.-** Número de sucesos mensuales calculados y registrados, para la estación *del SMN*.

AÑO		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
1	Calculados	5	17	9	12	6	9	5	2	6	10	10	7
	Registrados	9	18	9	12	9	9	8	2	6	10	10	9
2	Calculados	5	3	5	9	4	5	4	4	4	1	7	11
	Registrados	5	6	5	9	5	5	4	4	7	2	8	11
3	Calculados	8	3	6	1	7	9	6	6	6	7	7	3
	Registrados	9	5	6	0	7	9	7	6	6	7	8	3
4	Calculados	7	7	5	10	9	3	5	5	5	10	9	10
	Registrados	7	7	5	10	9	3	7	5	9	10	9	10
5	Calculados	4	3	9	9	8	7	7	3	3	13	10	4
	Registrados	7	3	9	9	9	11	7	3	6	15	10	6
6	Calculados	4	6	2	3	1	1	1	1	1	1	2	1
	Registrados	6	10	10	9	4	6	7	1	4	6	7	4
7	Calculados	3	6	3	9	3	1	3	6	9	9	4	9
	Registrados	8	6	4	9	5	0	4	6	6	9	4	13
8	Calculados	8	5	3	5	4	4	5	1	11	12	11	13
	Registrados	8	5	4	5	4	4	5	6	11	12	12	13
9	Calculados	7	8	9	9	5	4	6	10	6	4	7	7
	Registrados	7	8	9	10	5	4	6	10	7	7	8	7

A continuación se calcularon los coeficientes de correlación, obtenidos mediante regresión lineal simple entre las series completas de números mensuales de eventos lluviosos, obtenidos por aplicación del modelo y los números mensuales de eventos registrados en las estaciones.

La Tabla 3 muestra los coeficientes de correlación, indicados en el párrafo anterior, para las estaciones del *SMN*, del *INA* y del *INTA*.

**Tabla 3.-** Coeficientes de correlación para el modelo de aproximación bayesiana de *Zimmermann*, para las estaciones estudiadas.

ESTACION	COEFICIENTE DE CORRELACION
<i>Estefanía (INA)</i>	0,8417
<i>Castelar (INTA)</i>	0,7886
<i>Villa Ortúzar (SMN)</i>	0,7856

Resumiendo lo expuesto, se han calculado las láminas medias mensuales y los parámetros de las distribuciones de *Poisson* y *Gamma*, se han calculado las probabilidades del número de eventos condicionada a la lámina P, se han determinado los valores de N más probables, para cada lámina, y se han correlacionado, para cada estación, los eventos de tormenta calculados y observados. Los resultados, permiten concluir que el modelo de aproximación bayesiana para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos de *Zimmermann* y *Arrasca (2005)*, es apropiado en las tres estaciones estudiadas, concluyéndose que es posible la validación del método propuesto por *Zimmermann*, en el *Área Metropolitana de Buenos Aires*.

## Validación del modelo exponencial de estimación de láminas de lluvia de *Zimmermann*

El modelo propuesto por *Zimmermann* (2003b), permite obtener la función de densidad de probabilidad, para la lámina de un evento de tormenta particular, basada en el número de eventos lluviosos del mes.

El autor sugiere, la utilización de funciones exponenciales para representar láminas de lluvias, por lo que se aplica el modelo exponencial de *Zimmermann*, para la precipitación  $P_n$ , correspondiente a un evento simple de un mes dado, cuya formulación teórica se expone a continuación.

La expresión que se utiliza en el trabajo para determinar la función acumulada exponencial para una precipitación  $P_n$ , correspondiente a un evento simple de un mes dado, se indica mediante la ecuación [5]. Es conveniente destacar, como indica el autor, que el hecho de requerir del conocimiento de un único parámetro, constituye una ventaja el utilizar la distribución exponencial.

$$F(P_n) = 1 - e^{-\lambda_3 P_n} \quad [5]$$

$F(P_n)$ : Función acumulada;  $\lambda_3$ : Parámetro de la distribución; e: Número e;  $P_n$ : Lámina de precipitación acumulada en  $n$  eventos de lluvia.

En la ecuación [5],  $P_n$  representa una precipitación acumulada, para valores de  $n$  comprendidos entre 1 y  $N$ , como se muestra en la ecuación [6]:

$$\sum_{n=1}^N P_n = P \quad [6]$$

$P_n$ : Lámina de precipitación acumulada en  $n$  eventos de lluvia;  $P$ : Lámina de precipitación mensual acumulada;  $N$ : Máximo número de eventos de lluvia.

La expresión sugerida por *Zimmermann* (2003 b) para  $P_n$  es la indicada en la ecuación [7]:

$$P_n = -\frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln[1 - F(P_n)] \quad [7]$$

$P_n$ : Lámina de precipitación acumulada en  $n$  eventos de lluvia;  $\lambda_3$ : Parámetro de la distribución;  $F(P_n)$ : Función acumulada empírica.

De ese modo es posible hallar el parámetro  $\lambda_3$ , despejándolo de la ecuación [7], luego de aplicar la operación sumatoria. La función  $F(P_n)$ , puede determinarse aplicando las fórmulas empíricas denominadas *fórmulas de California*, propuestas por *Chow* (1994) y representadas por la expresión general indicada en la ecuación [8], donde  $n$  es el número de orden del evento de tormenta, ordenando la muestra en orden decreciente,  $N$  el número total de eventos de tormenta en el mes considerado y  $b$  un parámetro empírico usualmente comprendido entre 0 y 0,5.

$$F(P_n) = \frac{n-b}{N+1-2b} \quad [8]$$

$F(P_n)$ : Función acumulada empírica;  $N$  : Número máximo de eventos de lluvia para un mes dado;  $n$ : Número de orden del evento de tormenta;  $b$ : Coeficiente empírico.

Inicialmente, se ha adoptado, como proponen *Zimmermann y Arrasca (2005)*, la formulación empírica extrema de *Hazen*, adoptando el valor  $b= 0.5$ , en la ecuación [8]. Paralelamente se estudió en este trabajo la sensibilidad de la función  $F(P_n)$ , a los valores del coeficiente y su incidencia en la validación del modelo, analizando la variabilidad de la correlación entre valores teóricos y empíricos. Considerando lo expresado en los dos párrafos anteriores, se determina el parámetro  $\lambda_3$  a partir de la ecuación [9]:

$$\lambda_3 = - \frac{\sum_{n=1}^N \ln\left(\frac{N-n+0,5}{N}\right)}{P} \quad [9]$$

$N$ : Número máximo de eventos de lluvia para un mes dado;  $n$ : Número de orden del evento de tormenta;  $P$ : Lámina acumulada mensual;  $\lambda_3$ : Parámetro de la distribución.

Se aplica a continuación, el modelo exponencial de estimación de láminas de lluvia de *Zimmermann*. Se ordenaron las láminas de precipitación, ajustándoles un valor de probabilidad empírica utilizando para ello la formulación de *Hazen*. Se obtuvieron los valores del parámetro  $\lambda_3$  y se generaron  $N$  láminas de precipitación, para diferentes valores del coeficiente  $b$ , en la ecuación [8].

Los valores de precipitación estimados se correlacionaron con los valores de precipitación registrados, de acuerdo con *Amisial (1978)*, en las tres estaciones estudiadas. Se muestran en la Tabla 4, los resultados de los coeficientes de correlación obtenidos.

**Tabla 4.-** Coeficientes de correlación para el modelo de *Zimmermann* de estimación de láminas de precipitación, para las estaciones estudiadas.

ESTACION	COEFICIENTE DE CORRELACION
<i>Estefanía (INA)</i>	0,897
<i>Castelar (INTA)</i>	0,824
<i>Villa Ortúzar (SMN)</i>	0,900

Se aprecia en los resultados los valores de correlación del orden del 90%, lo cual muestra una alta correlación positiva entre valores reales, registrados en las estaciones y valores teóricos calculados en el presente trabajo. Se corroboran, de ese modo, las conclusiones del trabajo de *Zimmermann (2003 b)*, reafirmando la bondad de la expresión de *Hazen*.

Se determinó la sensibilidad del modelo calculando valores de  $F(P_n)$  para distintas variantes del parámetro empírico  $b$  trasladando posteriormente el análisis a la correlación existente entre láminas pronosticadas y medidas.

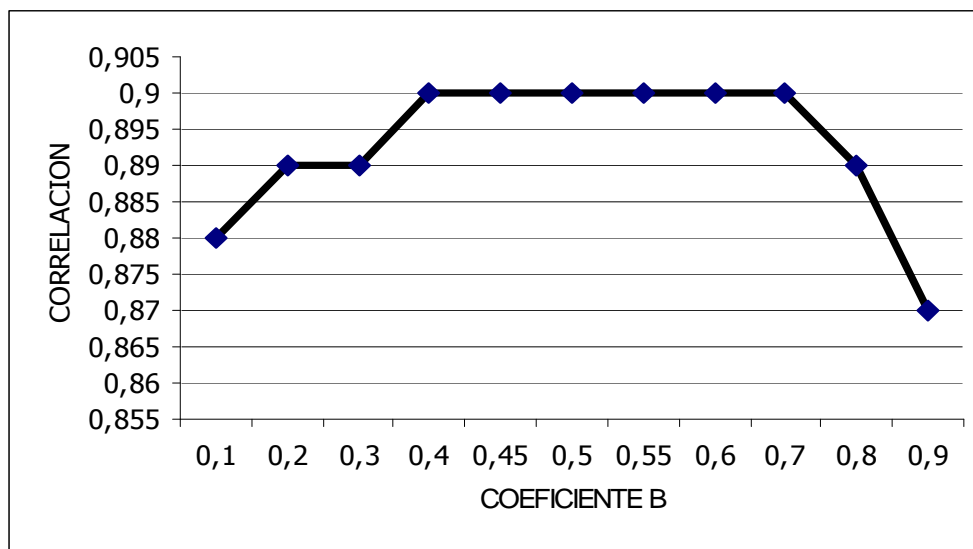
Cabe aclarar que cuando se modifica el coeficiente  $b$  en la ecuación [8] también se modifica tanto la frecuencia experimental  $F(P_n)$ , como el coeficiente  $\lambda_3$ . De hecho, se han calculado los valores del coeficiente  $\lambda_3$  de acuerdo con la ecuación [10]:

$$\lambda_3 = - \frac{\sum_{n=1}^N \ln\left(\frac{N-n+b}{N}\right)}{P} \quad [10]$$

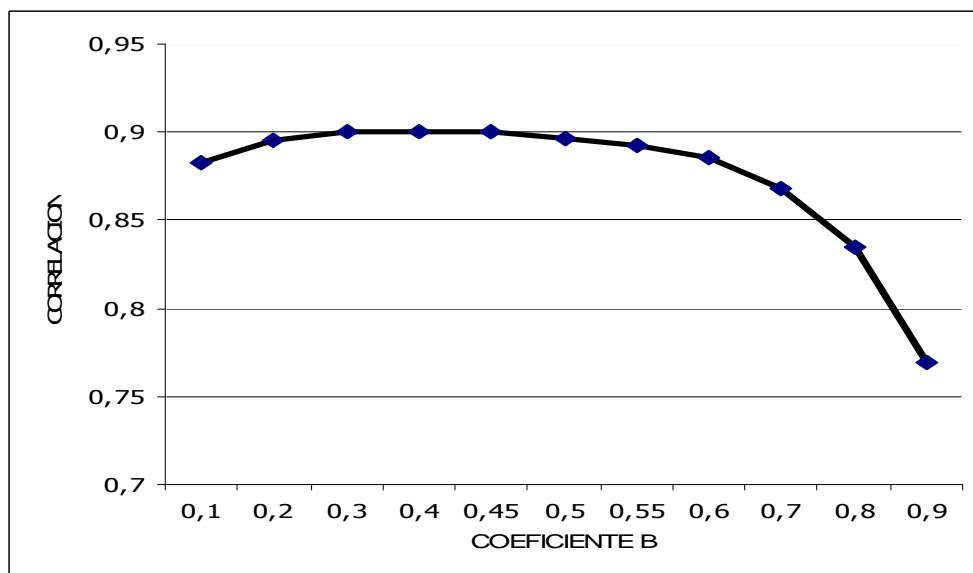
$N$ : Número máximo de eventos de lluvia para un mes dado;  $n$ : Número de orden del evento de tormenta;  $P$ : Lámina acumulada mensual;  $\lambda_3$ : Parámetro de la distribución;  $b$ : Coeficiente empírico de la fórmula de *Hazen*.

Se aplicó el análisis a las tres estaciones meteorológicas. Los resultados se muestran en los gráficos de las Figuras 1, 2 y 3 para las estaciones del *SMN*, *INA* e *INTA*, respectivamente.

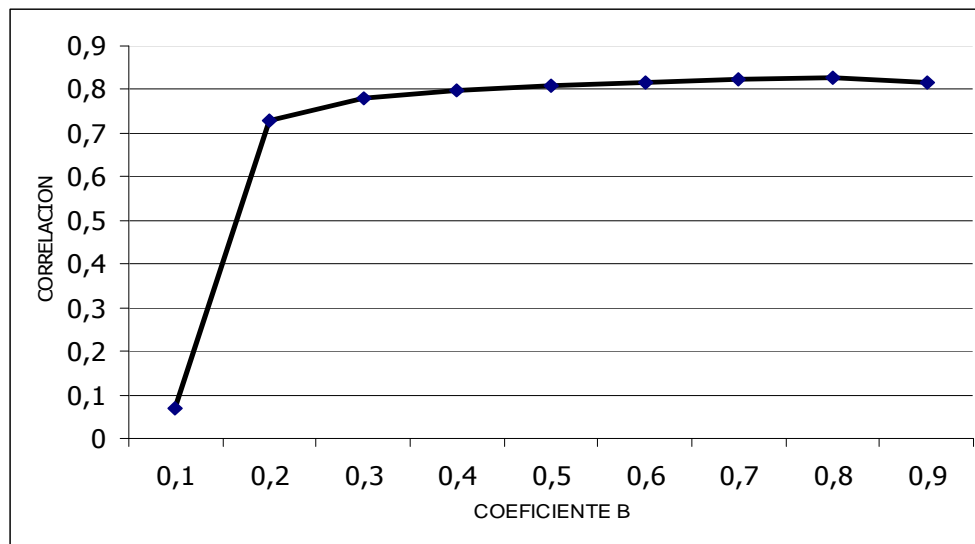
Los valores de correlación de la Tabla 4, son valores máximos de correlación, calculados adoptando para el coeficiente  $b$ , aquellos valores que maximizan la correlación.



**Figura 1.-** Análisis de sensibilidad del modelo de estimación de láminas de precipitación de *Zimmermann* para distintos valores del coeficiente empírico  $b$ , para la estación del *SMN*.



**Figura 2.-** Análisis de sensibilidad del modelo de estimación de láminas de precipitación de *Zimmermann* para distintos valores del coeficiente empírico  $b$ , para la estación del *INA*.



**Figura 3.-** Análisis de sensibilidad del modelo de estimación de láminas de precipitación de *Zimmermann* para distintos valores del coeficiente empírico  $b$ , para la estación del *INTA*.

De los cálculos realizados, se aprecia que los valores del coeficiente  $b$ , que se corresponden con coeficientes de correlación máximos, son 0.5, 0.4 y 0.8 para las estaciones del *SMN*, *INA* e *INTA*, respectivamente. Dichos valores se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.-** Valores de los coeficientes  $b$  de *Hazen*, que maximizan la correlación para el modelo de estimación de láminas de precipitación de *Zimmermann*, para las estaciones estudiadas.

ESTACION	COEFICIENTE $b$ DE HAZEN
<i>Villa Ortúzar (SMN)</i>	0.5
<i>Estefanía (INA)</i>	0.4
<i>Castelar (INTA)</i>	0.8

Analizando los resultados obtenidos, es posible concluir que el modelo para determinar láminas de precipitación, sobre la base del conocimiento del número de lluvias registradas, de *Zimmermann*, se ha validado, en el presente trabajo, para los datos de precipitación de las tres estaciones estudiadas, correspondientes al *Área Metropolitana Buenos Aires*.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bowker A. y Lieberman, G.** (1981). Estadística para Ingenieros. México: Prentice Hall.
- Bras, R. y Rodriguez Iturbe, I.** (1985). Random functions and hydrology. Massachusetts: Addison-Wesley.
- Bravo, S.** (2002). Tesis doctorales y trabajos de investigación científica. Madrid: Thomson, 5ª ed.
- Caamaño Nelli, G. y García C.** (2003). Precipitación máxima probable. Estimación Estadística Regional diaria, Cap. 8. En lluvias de diseño (Caamaño Nelly y Dasso, 2003). Córdoba: Universitas.
- Chow, V.** (1994). "Handbook of Applied Hydrology". Bogotá: Mc Graw Hill.
- Lasanta, T.** (2010). "Variables morfológicas y climáticas en subcuencas del río Reconquista. Incidencia en el desarrollo tecnológico". Jornadas 2010 de Ciencia y Tecnología. Facultad Regional General Pacheco, Universidad Tecnológica Nacional. 23 de noviembre de 2010.
- Lasanta, T.** (2008). "Análisis estadístico de valores extremos de precipitación en el área metropolitana de Buenos Aires. Su aplicación en la validación de modelos bayesianos de generación de lluvias". Centro Universitario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. Septiembre de 2008.
- Leadbetter, M.; Lindgren, G. y Rootzén, H.** (1982). Extremes and Related Properties of Random Sequences and Processes. New York: Springer Verlag.
- Lucero, O.** (1994). La tormenta de proyecto estadística para la Ciudad de Buenos Aires. Buenos Aires: INCYTH-CIRSA.

- Moyano, M.** (1994). Lluvias Intensas en la Capital Federal 1937-1985. Grupo de Trabajo de Hidrología, Buenos Aires: GTH-INCYTH.
- Perahia R. y Lasanta, T.** (2010). “*La problemática de las Cuencas Hídricas y las transformaciones socio territoriales en el AMBA*”; Raquel Perahia, Tito Lasanta. En el libro: *Cuestiones territoriales en la región metropolitana de Buenos Aires*. Compiladoras: Raquel Perahia, Sonia Vidal Koppmann. Editorial: NOBUKO –Facultad de Arquitectura de la Universidad de Buenos Aires, ISBN. 978-987-584-3059. Noviembre de 2010.
- Raudkivi.** (1978). Hydrology, Londres: Pergamon Press.
- Riccardi, G.** (2004). Hidrología en Medios Antropizados. Rosario: UNR.
- Starosolszky, O.** (1987). Data acquisition and processing. En Starosolszky, O. (Ed.). Applied Surface Hydrology (p. 175 -380). Colorado: Water Resources Publication.
- Témez, J.** (1978). Cálculo Hidrometeorológico de Caudales máximos en pequeñas cuencas.
- Todorovic P.** (1967). Applied Probability Course Notes. Fort Collins, Colorado, USA.
- Yevjevich, V.** (1978). Probability and Statistics in Hydrology (2° Ed.). Colorado: Water Resources Publications.
- Zimmermann E.** (2003a). “Aproximación Bayesiana para la estimación de ocurrencias de lluvia aplicada a balances hídricos mensuales seriados”. Jornadas Regionales Interdisciplinarias sobre Ambiente. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fé, Argentina.
- Zimmermann E.** (2003b). “Aproximación estadística para estimar láminas de lluvia aplicada a balances hídricos mensuales seriados”. III Congreso Argentino de Hidrogeología. Rosario, Vol. 1: 11-20.
- Zimmermann E. y Arrasca, M.** (2005). “Validación regional del modelado bayesiano de lluvias aplicado a balances hídricos para estimar recargas subterráneas”. XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Vol. 1: 23-27.



## **A NEW GOES MULTISPECTRAL TECHNIQUE FOR OPERATIONAL PRECIPITATION ESTIMATION. PRELIMINARY RESULTS OVER SOUTHERN SOUTH AMERICA**

***Daniel Barrera<sup>(1)</sup> y Sebastián Gómez Gómez<sup>(2)</sup>***

*<sup>(1)</sup>CONICET. Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra. FA.*

*Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453. Buenos Aires.*

*email: dbarrera@agro.uba.ar*

*<sup>(2)</sup>Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad de Buenos Aires.*

**ABSTRACT:** A multispectral technique to estimate rainfall was developed based on the GMSRA technique (Ba and Gruber 2001) and other works. By means of a textural analysis of cloud tops, a screening of cirrus clouds, based on detection of local minimum temperature and further analysis of temperature slope, is performed. Pixels being local minima whose slope is greater than a given threshold are retained as convective centers, and extent of convective core areas around local minima are determined as a function of IR temperature at the central pixel. Rain rate inside that area is estimated based on the local minimum temperature. Overshooting cloud tops are detected using  $T_{6.7-10.7}$ . During nighttime, a discriminant method is used to separate rainy and non-rainy pixels, especially for the case of stratiform rain. During daytime, a visible corrected reflectance  $\geq 0.40$  is used to retain thick clouds and filter cirrus clouds. We use microphysical structure information from GOES multispectral data to screen out non-raining clouds; reflected solar part of NIR (3.9  $\mu\text{m}$ ) observations are used to derive effective radius of cloud top ice crystals and water droplets associated with warm-top raining clouds; effective radius is used to discriminate rainy pixels and to assign a rain rate. Instantaneous rain rate maps were compared against hourly maps produced by other sources.

**KEYWORDS:** GOES multispectral technique, rain rate, raingauge and model validation.

## EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EROSIVO DE LLUVIA EN LA REGIÓN LIMITROFE ENTRE LAS PROVINCIAS DE CÓRDOBA Y SANTA FE, ARGENTINA

*Carlos M. García<sup>(1)(3)</sup>, Gabriel Caamaño Nelli<sup>(2)</sup>, Carlos Catalini<sup>(1)</sup>,  
María Teresa Altamirano<sup>(1)</sup> y Luis G. Müller<sup>(1)</sup>*

*<sup>(1)</sup>Universidad Católica de Córdoba. Grupo de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas.  
email: cgarcia2mjc@gmail.com*

*<sup>(2)</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua*

*<sup>(3)</sup>Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad  
Nacional de Córdoba.*

**RESUMEN :** El concepto de energía cinética de las lluvias es la base de modelos de erosión hídrica que se utilizan en la actualidad. De todos ellos, el más extendido es el denominado Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Es una ecuación empírica de tipo paramétrica multiplicativa, desarrollada sobre una gran base de datos experimentales. Entre los factores multiplicativos incluidos en esta ecuación se encuentra el factor anual (promediado en “n” número de años) del potencial erosivo de las lluvias (R). El objetivo de este trabajo es estimar el factor R en la región limítrofe entre las provincias de Córdoba y Santa Fe, Argentina. Para tal fin se emplearon datos pluviográficos históricos registrados en la localidad de Ceres, provincia de Santa Fe (período 1955-1994) y Marcos Juárez, provincia de Córdoba (período 1961-1991). Estas localizaciones representan la región este de la provincia de Córdoba, Argentina. Estos datos estaban disponibles en formato digital en el Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (CIRSA-INA) y se utilizaron en estudios de lluvias intensas para diseño hidrológico. En primera instancia se delimitaron los eventos de tormenta en la serie; según criterios de separación entre dos eventos de tormentas de 1, 2, 3 y 6 horas, para evaluar los efectos de este criterio sobre los resultados del estudio. Finalizada la determinación de eventos, se evaluó que tormentas generan erosión según los criterios: a) independientemente de la duración, tengan una lámina acumulada  $\geq 12.5\text{mm}$ , o b) para eventos de corta duración ( $\leq 15$  minutos) aquellos que tengan una lámina acumulada  $\geq 6.25\text{ mm}$ . En base a ello se detectaron a razón de 15 y 17 tormentas erosivas por año para Ceres y Marcos Juárez, respectivamente. La estimación del valor de R para un año hidrológico se realizó acumulando, para todas las tormentas erosivas en cada año, el producto de la energía cinética de cada intervalo de lluvia en una tormenta (e, estimadas según tres métodos de cálculo) por la máxima intensidad de lluvia en 30 minutos de esa tormenta (I30). El valor de R definitivo se obtuvo al promediar los valores anuales del factor. Los resultados muestran que la incidencia de los criterios de separación de eventos y de los métodos de estimación, son menores al 10%.

**PALABRAS CLAVE:** Potencial erosivo de lluvias, Energía cinética de tormenta.

## ESTUDIOS ACTUALES SOBRE PRECIPITACIÓN MÁXIMA PROBABLE EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

**Carlos M. García<sup>(1)(4)</sup>, Gabriel Caamaño Nelli<sup>(1)(2)(3)</sup>, Carlos G. Catalini<sup>(1)</sup>  
y Bernabé Bianchiotti<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Universidad Católica de Córdoba. Grupo de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobrementemente Aforadas.  
email: cgarcia2mjc@gmail.com

<sup>(2)</sup>Instituto Nacional del Agua. Centro de la Región Semiárida.

<sup>(3)</sup>Consejo Nac. de Investigaciones Científicas y Técnicas.

<sup>(4)</sup>Universidad Nacional de Córdoba. Centro de Estudios y Tecnología del Agua.  
Medrano 235. (5152). Villa Carlos Paz. Córdoba. Argentina. Tel: (03541)-422347

### RESUMEN

La Precipitación Máxima Probable (PMP) es la mayor lluvia racionalmente esperable en un punto de la tierra. Se utiliza para incorporar el carácter aleatorio del componente pluvial, al dimensionar obras hidráulicas grandes o cuya falla implique cuantiosos riesgos humanos y materiales. Caamaño Nelli y García (1999) emplearon el método estadístico de Hershfield (1961, 1965) para estimar la PMP en 24 horas, a partir de datos pluviométricos. Esta técnica presenta ventajas, como atenerse al tipo de información comúnmente disponible y someterla a cuidadosas correcciones. La aplicación consideró series de 140 pluviómetros distribuidos en la Provincia de Córdoba, del periodo 1941-1994, e incluyó la representación del comportamiento espacial de la variable. Como en otros estudios, no se detectó asociación de la PMP, ni de los parámetros que participan de su estimación, con rasgos geográficos o con la longitud de las series usadas. Hoy se está actualizando esa evaluación, para ratificar o rectificar sus inferencias, merced a la mayor disponibilidad de datos, lograda por dos vías: alargar 20 de las series antedichas, por haber encontrado registros posteriores, e incorporar otras 9 estaciones de las 34 halladas que no contempla en el trabajo de referencia, debido a que entonces no existían o cubrían periodos muy breves. Todas las series nuevas o extendidas se sometieron a pruebas para verificar si cumplían las hipótesis estadísticas básicas y algunas fueron removidas por no hacerlo. La ampliación de la base de información fortalece el respaldo a las conclusiones, pero en principio no tendría impacto en ellas, ya que no modificaría la envolvente regional de factores de frecuencia, que es la piedra angular del método de Hershfield. El trabajo prevé mejorar la configuración del campo de variación, empleando un sistema de información geográfica y criterios de suavizado que han dado buen resultado para lluvias de baja recurrencia en el área de estudio.

**PALABRAS CLAVE:** Precipitación Máxima Probable, Regionalización, Método de Hershfield



III Taller sobre Regionalización de  
Precipitaciones Máximas  
Rosario, Argentina 1 diciembre 2011



Dr. Alfonso Gutiérrez L.  
Ing. Carlos Paoli

Iniciativa Internacional sobre Inundaciones, IFI  
Programa Hidrológico Internacional, PHI UNESCO

## Proyectos emblemáticos IFI



### INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

#### Antecedentes

El Plan Estratégico para la **Sexta Fase** del PHI (PHI-VI, 2002-2007), el Subtema 2.1 *“Los fenómenos extremos y la gestión de los recursos terrestres e hídricos”* trata de la elaboración de un marco para reducir la vulnerabilidad ecológica y socioeconómica a los **extremos hidrológicos** (inundaciones, sequías, corrientes de fango, acumulación de hielo).

El Plan Estratégico de la **Séptima Fase** del PHI (PHI-VII 2008-2013), el Subtema 1.2 propuesto *“Extremos hidrológicos en zonas sensibles y estresadas tanto hidroclimáticas como de biomasa”* abarcará las medidas para la gestión de los riesgos contra los acontecimientos **hidrológicos extremos**.



### INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

International Flood Initiative (IFI) is a joint initiative in collaboration with such international organizations as [UNESCO \(IHP\)](#), [WMO](#), [UN/ISDR](#), [UNU](#), [IAHS](#) and [IAHR](#). IFI made its [official launch](#) in January 2005 at the World Conference on Disaster Reduction (WCDR) in Kobe, Japan. ([UNESCO](#)) and ([WMO](#)), building on past cooperative successes, have launched the (IFI) to address existing management gaps through a holistic approach and to provide a platform for further collaborative efforts. The initiative will work in close cooperation with the United Nations University ([UNU](#)), the International Strategy for Disaster Reduction ([ISDR](#)), [IAHS](#) and [IAHR](#). The IFI secretariat is located in the International Centre for Water Hazard and Risk Management ([ICCHARM](#)) in Tsukuba, Japan. UN agencies working on other aspects of flood management will also be invited to contribute to the initiative.



## INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

**Objectives:** The overall aim of the initiative is to build capacity in countries to understand and better respond to floods by taking advantage of their benefits while at the same time minimizing their social, economic and environmental risks.

**Strategic Activities:** The initiative will focus on research, information networking, education and training, empowering communities and providing technical assistance and guidance



## INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

### Antecedentes

**Marzo de 2005.** Ginebra, Suiza. Primera reunión para la *International Flood Initiative/Programme, IFI*.

Coordinación Mundial en el Centro Internacional sobre los riesgos relacionados con el agua y su gestión (**ICHARM**), Japón.

**Agosto de 2007.** Guatemala. El Comité Mexicano del PHI, **CoNaMexPHI** solicitó la Coordinación Regional de esta Iniciativa.



## INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

### Objetivo, IFI LAC

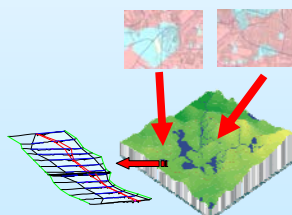
El objetivo general de esta Iniciativa es construir las capacidades necesarias para entender y responder de una manera eficiente ante las inundaciones, estimar la vulnerabilidad y potenciar los beneficios de la gestión de riesgos, en el ámbito de Latinoamérica y El Caribe.

Esquema de trabajo entre los países:

7 Objetivos específicos

4 Ámbitos generales

5 Áreas estratégicas





## INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

### Objetivos específicos

1. Promover la investigación científica en materia de inundaciones fluviales, costeras, rurales y urbanas.
2. Promover el comprensión de la vulnerabilidad y la estimación del riesgo por inundación;
3. Promover el desarrollo de herramientas computacionales para la modelación de cuencas y ríos;
4. Realizar actividades eficaces de capacitación en círculos institucionales y profesionales para poner en marcha las acciones oportunas de sensibilización dirigidas, entre otros destinatarios, a la opinión pública;



## INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

### Objetivos específicos *continuación...*

5. Crear y afianzar redes de intercambio de información de carácter científico, técnico y normativo entre instituciones y particulares;
6. Organizar actividades de transmisión de conocimientos e información, en particular simposios y talleres internacionales;
7. Elaborar publicaciones y material técnico relacionado con los objetivos y actividades de esta Iniciativa.



## INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

### Ámbitos generales

- A.1 Vulnerabilidad
- A.2 Gestión de riesgos y de emergencias
- A.3 Gobernabilidad y participación
- A.4 Pronóstico y alerta anticipada



#### **A.1 Vulnerabilidad**

- A.1.1. Metodologías para tomar en cuenta diversos fenómenos
- A.1.2. Estimar impactos a nivel social, político, de salud y ecológico
- A.1.3. Estimar impactos económicos incluyendo los beneficios de las inundaciones
- A.1.4. Mecanismos (incluyendo financiamiento) para incrementar capacidades
- A.1.5. Indicadores de desarrollo



## INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

### A.2 Gestión de riesgos y de emergencias

- A.2.1. Análisis de riesgo múltiple
- A.2.2. Bases de datos para evaluar el riesgo
- A.2.3. Modelación hidrológica, hidráulica y económica
- A.2.4. Cartografía de riesgos por inundación
- A.2.5. Medidas estructurales y no estructurales



### A.3 Gobernabilidad y participación

- A.3.1. Creación de grupos de trabajo
- A.3.2. Reformas institucionales



### A.4 Pronóstico y alerta anticipada

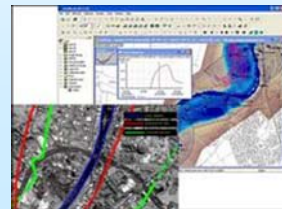
- A.4.1. Pronóstico a tiempo real y sistemas de alerta
- A.4.2. Comunicación efectiva
- A.4.3. Vigilancia
- A.4.4. Respuesta a las alertas



## INICIATIVA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES IFI

### Actividades estratégicas

1. Investigación
2. Crear bases de datos y redes de información
3. Educación y capacitación
4. Potenciar comunidades
5. Asistencia técnica



## GRUPO DE TRABAJO



**Alfonso Gutiérrez López**  
*Coordinador Regional*  
 Centro de Investigaciones del Agua, CIAQ  
 Universidad Autónoma de Querétaro  
[ifilacphi@uaq.mx](mailto:ifilacphi@uaq.mx)

**Julio Ordoñez Gálvez**  
 Servicio Nacional de Meteorología e  
 Hidrología, SENAMHI  
 Lima, Perú

**Sadi Laporte M.**  
**Berny Fallas López**  
 Instituto Costarricense de Electricidad ICE  
 San José, Costa Rica

**Javier Mendoza Rodríguez**  
 Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA  
 La Paz, Bolivia

**Víctor Manuel Pérez**  
 Instituto Nacional de Sismología,  
 Vulcanología, Meteorología e Hidrología,  
 INSIVUMEH  
 Ciudad de Guatemala, Guatemala

**Carlos Paoli**  
 Instituto Nacional del Agua  
 Santa Fe, Argentina

**Juan Carlos Bertoni**  
 Universidad Nacional de Córdoba  
 Instituto Nacional del Agua, INA,  
 Argentina

**José Vargas Baecheler**  
 Departamento de Ingeniería Civil,  
 Universidad de Concepción, Chile

**Argelio Fernández**  
 Instituto Nacional de Recursos  
 Hidráulicos, INRH  
 La Habana, Cuba

**Christian Euscatogui**  
 Instituto de Hidrología, Meteorología y  
 Estudios Ambientales, IDEAM  
 Santafé de Bogotá, Colombia

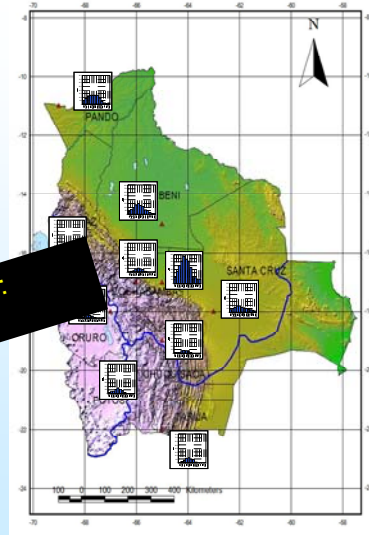
**Isaías Montoya Blanco**  
 Instituto Nicaragüense de Estudios  
 Territoriales, INETER  
 Managua, Nicaragua

**DIGITALIZACIÓN DE  
REGISTROS DE  
PLUVIÓGRAFOS**

Contar con registros de pluviógrafos confiables de manera sistemática y digital.

Comparar los registros con los pluviómetros tradicionales

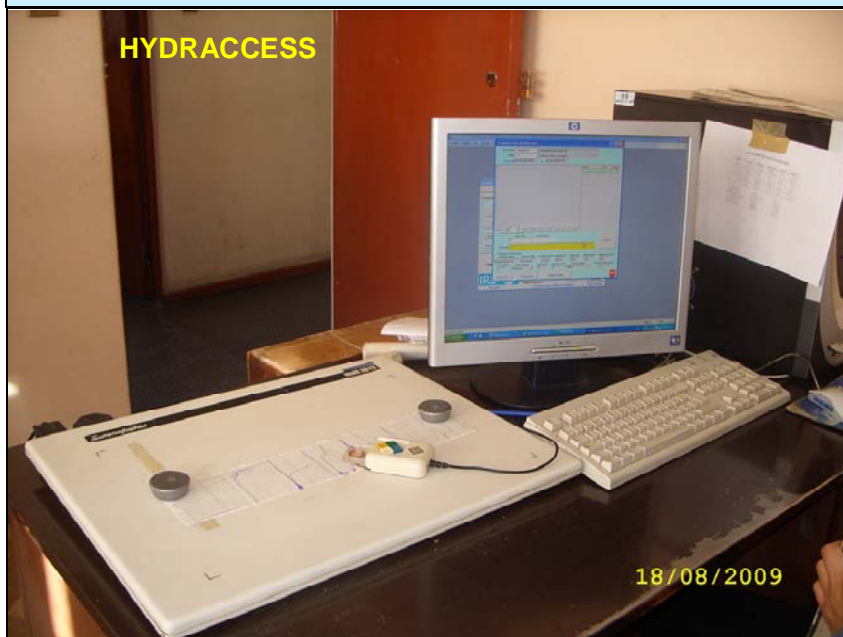
**Punto de investigación:  
Bolivia y México**



Javier Mendoza, 2009

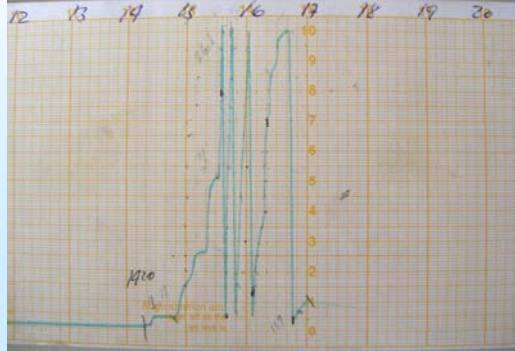


**HYDRACCESS**





AÑO	5		10		15	
	fecha	P(mm)	fecha	P(mm)	fecha	P(mm)
1975-76	10/06/1976 10:35:27	5,2	10/06/1976 10:35:27	6,9	10/06/1976 10:35:27	6,9
1976-77	12/01/1977 16:18:58	6,1	12/01/1977 16:17:48	6,2	12/01/1977 16:12:48	6,2
1977-78	13/02/1978 16:49:38	6,9	13/02/1978 16:48:10	9,7	13/02/1978 16:48:10	9,9
...	...	...	...	...	...	...
1989-90	19/05/1990 17:53:12	2,9	05/02/1990 21:41:47	3,8	05/02/1990 21:41:47	5,2



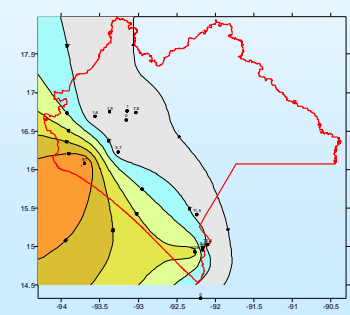
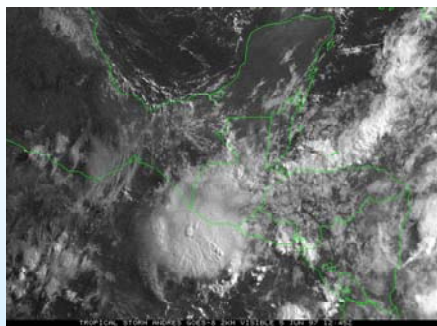
**CONOCIMIENTO DE LOS CAMPOS LLUVIA EXTREMA PRODUCIDA POR HURACANES**



Proyecto de investigación IFI responsables: México y Perú

Interpolación de los campos de lluvia, utilizando un método de: interpolación con variogramas direccionales (Kriging)

**CONOCIMIENTO DE LOS CAMPOS LLUVIA EXTREMA PRODUCIDA POR HURACANES**



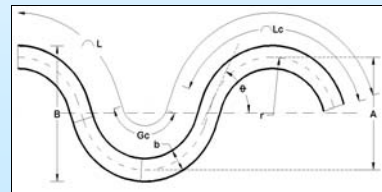
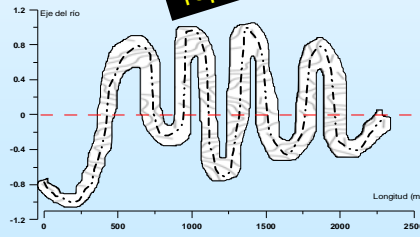
Isoyetas utilizando un método de tradicional: interpolación cuadrática

Alfonso Gutiérrez, Julio Ordoñez y Leonel Encarnación, 2010

### ZONAS DE RIESGO DE MEANDRO DE UN RÍO DE PLANICIE



Proyecto de investigación IFI, responsables: México y Guatemala



### ZONAS DE RIESGO DE MEANDRO DE UN RÍO DE PLANICIE



Río Cahuacán, entre los municipios de Tapachula y Tuxtla Chico; extendiéndose casi 2.5 km a lo largo del cauce, Llanura Costera de Chiapas y Guatemala, sobre una zona de depósito sedimentarios.



Roberto Mejía, y Vladimir Contreras, 2007

Alfonso Gutiérrez, Vladimir Contreras y Roberto Mejía, 2009

Alfonso Gutiérrez y Daniel Resendiz, 2011

### TRAYECTORIAS DE HURACANES EMPLEANDO MODELACIÓN GEOESTADÍSTICA

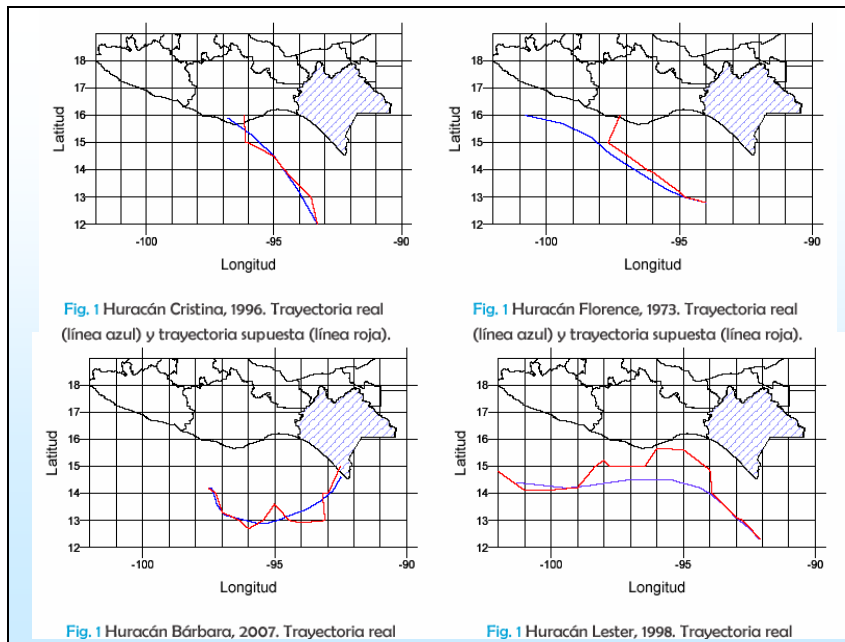


Proyecto de investigación IFI, responsables: México, República Dominicana, Cuba y Haití

Pronóstico de trayectorias:

Utilizar la historia del fenómeno para conocer su evolución a futuro.

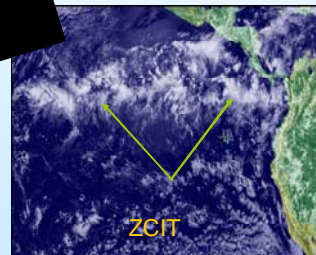
Alfonso Gutiérrez, Argelio Fernández y Leonel Encarnación, 2010



**SEGUIMIENTO DE SISTEMAS NUBOSOS**

Una Zona de Convergencia Intertropical bien estructurada y cercana a la costa del Pacífico aumenta las precipitaciones sobre la región.

Punto de investigación: México y Costa Rica

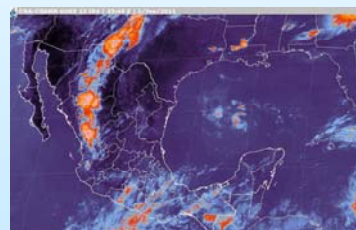
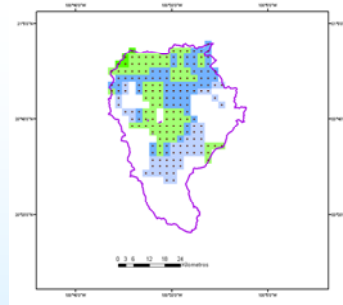


Sadi Laporte, Berny Fallas y Alfonso Gutiérrez, 2010

**SEGUIMIENTO DE SISTEMAS NUBOSOS**

Una planificación hídrica racional exige conocer los posibles sucesos futuros, con cierta probabilidad de ocurrencia.

La técnica más importante para hacer inferencias sobre el futuro con base en lo ocurrido en el pasado, es el “análisis de series de tiempo”, o modelación estocástica.



Fabiola Arellano y Alfonso Gutiérrez, 2009

## GESTIÓN DEL RIESGO

1. Análisis de riesgo múltiple
2. Bases de datos para evaluar el riesgo
3. Modelación hidrológica, hidráulica y económica
4. Cartografía de riesgos por inundación
5. Medidas estructurales y no estructurales



Punto de investigación:  
Perú y México

Julio Ordoñez y Alfonso Gutiérrez, 2010



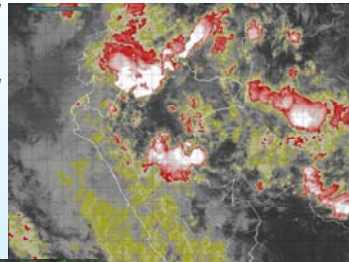
PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

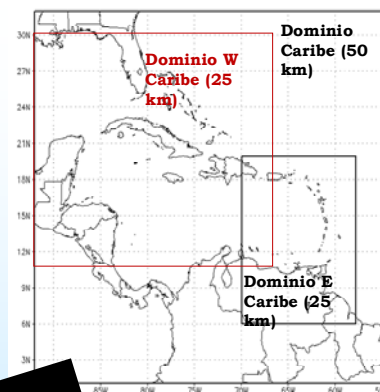
## INUNDACIONES - SAN MARTIN

Simultáneamente el día 6 de febrero en el Huallaga Central, se registraron lluvias copiosas, que variaron de 91 mm., en Tocache a 45 mm. en Picota, incrementando el caudal del río Huallaga y de sus principales tributarios como: Tocache, Abiseo, Saposoa y Sisa en la margen izquierda y del Biavo y Ponaza en la margen derecha.



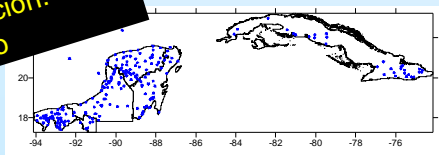
## MAPAS DE PELIGRO

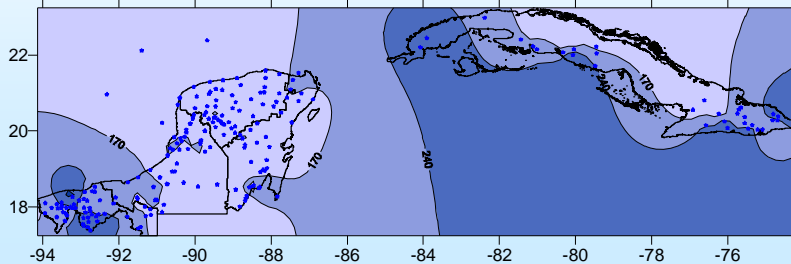
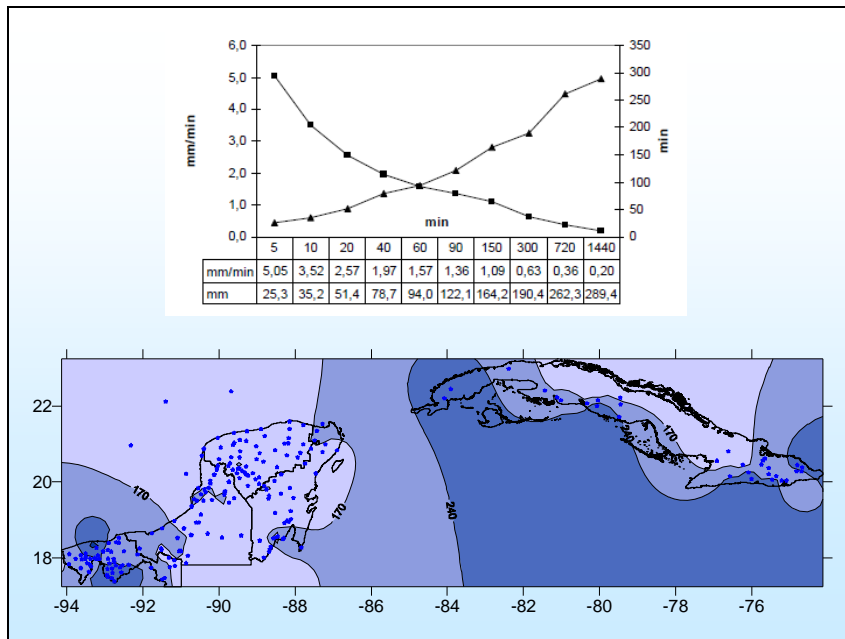
1. Análisis de intensidades, duraciones y probabilidad de ocurrencia de precipitaciones máximas.
2. Análisis estadístico de eventos típicos.
3. Cartografía del peligro histórico.
4. Estimación conjunta entre los dos países



Punto de investigación:  
Cuba y México

Eduardo Planos y Alfonso Gutiérrez, 2011

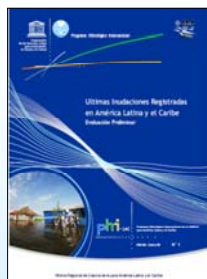




### Página web de IFI-LAC

<http://www.ifilac.org/>

### SERIE DE DOCUMENTOS TÉCNICOS IFI



Actualmente se tienen los siguientes documentos terminados y/o en dictamen.

1. Inundaciones registradas en América Latina y el Caribe.
2. Función de la vegetación en las inundaciones de zonas urbanas.
3. Factores de reducción por área: teoría y ejemplos de aplicación.
4. Envoltante regional de precipitaciones máximas en LAC.
5. Análisis espacial de eventos hidrológicos.
6. Transito hidrológico de avenidas.
7. Estudios topohidráulicos en cauces.
8. Método sección velocidad y sección pendiente para determinar el caudal.
9. Cálculo del daño esperado por inundación.
10. Estimación bivariada de eventos hidrológicos.
11. Construcción de curvas idt.
12. Análisis de series de tiempo en hidrología.
13. Glosario de términos técnicos y modismos regionales en materia de hidrología.
14. Manejo de aguas pluviales en zonas urbanas (3 ejemplares).

**REUNIONES DE TRABAJO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS:  
México 2009, Perú 2010, Guatemala 2011, La Habana, 2012**



PHI UNESCO - IFI - FRIEND - Coordinaciones Regionales  
para Latinoamérica y el Caribe, LAC



**Programa FRIEND - AMIGO para América Latina y el Caribe**

El proyecto **FRIEND (Regímenes de Corriente en Cuencas Experimentales y Red de Datos Internacionales)**, es un proyecto transversal en la agenda científica del Programa Hidrológico Internacional surgido en el año **1985**, que tiene como objetivos de trabajo los siguientes:

- Mejorar la comprensión de la variabilidad espacial y temporal de régimen hidrológico a escala regional
- Compartir datos provenientes de redes de observación seleccionadas y de cuencas experimentales
- Compartir y mejorar las herramientas para el análisis hidrológico
- Detectar tendencias debidas a la variabilidad y el cambio climáticos
- Detectar el impacto humano sobre el régimen hidrológico



PHI UNESCO - IFI - FRIEND - Coordinaciones Regionales  
para Latinoamérica y el Caribe, LAC



**PROYECTO DE REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES MÁXIMOS EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE**

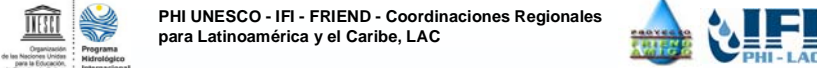
**PRIMERA ETAPA**  
CURVAS Y ENVOLVENTE REGIONAL DE  
PRECIPITACIONES MÁXIMAS

**PROTOCOLO REGIONAL**  
Asunción, Paraguay 3 de julio 2009

**Objetivo general**

Mostrar el comportamiento regional de los fenómenos hidrológicos extremos, a través de series de tiempo de valores máximos de precipitaciones y caudales; que sean representativos del comportamiento de estos fenómenos en la región LAC.

	<p>PHI UNESCO - IFI - FRIEND - Coordinaciones Regionales para Latinoamérica y el Caribe, LAC</p>	
<p><b>PROYECTO DE REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES MÁXIMOS EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE</b></p>		
<p><b>Objetivos específicos de esta primera etapa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaborar un documento técnico describiendo las metodologías de análisis y regionalización de precipitaciones extremas de la región.</li> <li>• Identificar el origen de las precipitaciones máximas ocurridas en la región, describiendo sus principales características hidroclimatológicas.</li> <li>• Construir curvas de intensidad-duración-frecuencia (probabilidad), con base en los registros de precipitaciones máximas de estaciones climatológicas seleccionadas y validadas en cada país de la región.</li> <li>• Ubicar los eventos máximos de precipitación de la región, en la curva universal de lluvias máximas.</li> </ul>		
	<p>PHI UNESCO - IFI - FRIEND - Coordinaciones Regionales para Latinoamérica y el Caribe, LAC</p>	
<p><b>PROYECTO DE REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES MÁXIMOS EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE</b></p>		
<p><b>Objetivos específicos de esta primera etapa (continuación)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conformar una base de datos regional de precipitaciones máximas (PMAX-LAC-Data), con el objeto de fomentar la recolección, el acervo y la utilización regional de información de precipitación máxima en la región.</li> <li>• Desarrollar y mejorar herramientas computacionales para el análisis y tratamiento de series de tiempo de precipitación.</li> <li>• Capacitar profesionistas dentro de la región, para reproducir la metodología propuesta en sus países.</li> <li>• Promover subproyectos regionales que, en los contextos nacionales, reflejen estos objetivos.</li> </ul>		
	<p>PHI UNESCO - IFI - FRIEND - Coordinaciones Regionales para Latinoamérica y el Caribe, LAC</p>	
<p><b>PROYECTO DE REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES MÁXIMOS EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE</b></p>		
<p><b>Metodología propuesta</b></p>		
<p>Los <u>productos básicos</u> en este proyecto se refieren a las siguientes actividades: (1) recolección de datos de precipitación máxima en 24 horas; (2) recolección o cálculo de intensidades de lluvia para diferentes duraciones de tormenta; (3) crítica de datos (pruebas de ruptura y segmentación de series de tiempo); (4) análisis de representatividad regional de las estaciones utilizadas.</p>		
<p>Los <u>productos hidrológicos</u> en este proyecto se refieren a los siguientes puntos: (1) validar la metodología para la construcción de curvas intensidad-duración-frecuencia regionales (i-d-f); (2) construir las curvas i-d-f, para cada serie de datos de precipitación; (3) ubicar los eventos máximos de precipitación de la región, en la curva universal de lluvias máximas.</p>		



PHI UNESCO - IPI - FRIEND - Coordinaciones Regionales para Latinoamérica y el Caribe, LAC

## PROYECTO DE REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES MÁXIMOS EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE

### TALLER DE MAXIMOS HIDROLOGICOS

**FRIEND – IPI, Ciudad Guatemala, Guatemala. 8 al 10 de junio, 2011**

Los representantes de Bolivia, Costa Rica, Cuba, Guatemala, México y Perú presentaron los resultados alcanzados en cumplimiento de los acuerdos del Primer Taller de Máximos Hidrológicos, efectuado en Lima.

Como conclusión del debate realizado se definió que este es un estudio de tipo metodológico, que tiene como objetivo mostrar el comportamiento regional de los fenómenos hidrológicos extremos, a través de series de tiempo de valores máximos de precipitaciones; que sean representativos del comportamiento de estos fenómenos en la región LAC, utilizando para ello la función de distribución Gumbel y series de duración parcial para el estudio de los máximos valores de precipitación observados en 24 horas.



PHI UNESCO - IPI - FRIEND - Coordinaciones Regionales para Latinoamérica y el Caribe, LAC

## PROYECTO DE REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES MÁXIMOS EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE

### Resultados previstos

- Publicar un documento técnico describiendo las metodologías de análisis y regionalización de precipitaciones extremas de la región.
- Identificar el origen de las precipitaciones máximas ocurridas en la región, describiendo sus principales características hidroclimatológicas.
- Construir curvas de intensidad-duración-frecuencia (probabilidad), con base en los registros de precipitaciones máximas de estaciones climatológicas seleccionadas y validadas en cada país de la región.
- Conformar una base de datos regional de precipitaciones máximas (PMAX-LACData), con el objeto de fomentar la recolección, el acervo y la utilización regional de información de precipitación máxima en la región.
- Desarrollar y mejorar herramientas computacionales para el análisis y tratamiento de series de tiempo de precipitación.



# 140

FICHA HISTÓRICA  
REGISTRO DE INUNDACIÓN  
VII-25 MÉXICO



---

**Datos básicos**

PAÍS:	Argentina	FECHA:	7 de Abril de 1995
ESTADO/ PROVINCIA:	Buenos Aires	REGIÓN GEOGRÁFICA:	
CIUDAD / COMUNIDAD:	Pergamino		
CAUSAS:	Tormenta de lluvia y granizo		
VIENTOS MÁXIMOS:		ESCALA:	
VELOCIDAD:		DIRECCIÓN:	

**Precipitación**

DURACIÓN:	7 de Abril de 1995	ÁREA DE LA CUENCA:	km <sup>2</sup>
LLUVIA ANTECEDENTE:			
CUENCA:			
PRECIPITACIÓN MÁXIMA:	300 mm en 2 horas y media	ESTACIÓN:	
INTENSIDADES:	110 mm por hora	LATITUD:	
PERIODO DE RETORNO:		LONGITUD:	





140

FICHA HISTÓRICA  
REGISTRO DE INUNDACIÓN  
VII-25 MÉXICO



---

**Fotografías**




Ciudad de Pergamino, Buenos Aires










140

FICHA HISTÓRICA  
REGISTRO DE INUNDACIÓN  
VII-25 MÉXICO



---

**Daños**

SUPERFICIE AFECTADA: 60% de la superficie de la ciudad de Pergamino

DURACIÓN DE LA INUNDACIÓN:

PERSONAS AFECTADAS:


PÉRDIDAS ECONÓMICAS: USD

DAÑOS MATERIALES: Agricultura, carreteras, infraestructura urbana.

AFECTACIONES: Fallecimientos y personas desalojadas de sus viviendas

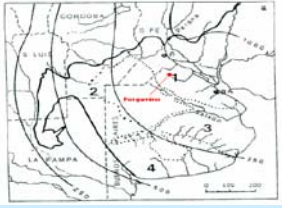
---

**Medios**




La Opinión, Diario de Pergamino.

**Mapas**




Ubicación del Partido de Pergamino



140

FICHA HISTÓRICA  
REGISTRO DE INUNDACIÓN  
VII-25 MÉXICO



---

**Breve reseña:** (máximo 1800 caracteres con espacios)

El 7 de abril de 1995 la región Norte de la provincia de Buenos Aires fue afectada por una tormenta de lluvia y granizo que provocó inundaciones, numerosos evacuados y daños en los distintos partidos de la zona. La ciudad de Pergamino fue la más perjudicada por el fenómeno ya que quedó aislada y paralizada por una inundación de características dramáticas. Las pérdidas se consideraron catastróficas por el elevado valor económico de los bienes e inmuebles particulares y públicos afectados, además de los daños a la infraestructura urbana. Esta inundación es recordada como una situación inesperada en relación con las experiencias previas ya que involucró a zonas y sectores sociales de la ciudad considerados fuera de riesgo



PRESIDENCIA DE LA NACIÓN  
 MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL,  
 INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS  
 SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS  
 SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS

## III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas

### “Plan de Radarización Hidrometeorológica de la República Argentina”

## Proyecto SINARAME

SSRH SMN INA INTA SHN UNC UBA + INVAP...

Rosario, Diciembre 2011







## Antecedentes y situación actual



PRESIDENCIA DE LA NACIÓN  
 MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL,  
 INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS  
 SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS  
 SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS

Argentina hasta el presente cuenta con los siguientes radares meteorológicos:

- ❖ SMN 1 RM en Ezeiza.
- ❖ INTA 1 RM Doppler en Pergamino, 2 RMD en Anguil (La Pampa) y en Paraná.
- ❖ DACC 3 RM en Mendoza.
- ❖ Tabacalera Jujuy: 1RM.
- ❖ SHN 1 RM en Bahía Blanca (Espora).

Entre 2007 y 2010 se inician negociaciones SSRH-INVAP-SMN para crear el SINARAME incorporando a los radares existentes 11 RMD más.


Mayo 2011: se firma contrato con INVAP.

Septiembre 2011: pago anticipo y acta de inicio.


Noviembre 2011: Informe Ingeniería Conceptual de proyecto (RMA-COP)






PRESIDENCIA DE LA NACIÓN  
 MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL,  
 INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS  
 SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS  
 SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS



## SINARAME

SISTEMA NACIONAL DE RADARES METEOROLÓGICOS


- Desarrollo de radar meteorológico acorde al estado del arte (RMA)
- Diseño e implementación de un centro de operaciones para recibir y procesar datos de una red de radares meteorológicos (COP).
- Integración de los nuevos radares, el centro de operaciones y los radares actualmente existentes en un “Sistema” que optimice las prestaciones.




**MAPA DE COBERTURA DEL SINARAME**  
 Cobertura preliminar de radar, se debe validar mediante  
 Análisis de campo de pruebas,  
 Verificación de parámetros,  
 Registro de datos de prueba.

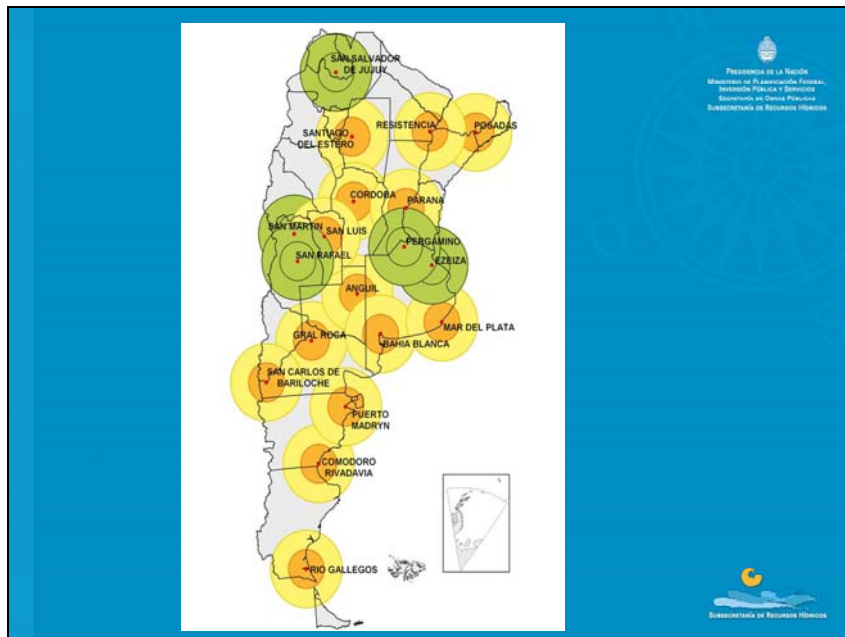
**Principales aplicaciones:**

- Descripción del estado del tiempo instantáneo
- Pronóstico a corto plazo (Nowcasting)
- Evaluación de hidrometeoros
- Previsión y monitoreo de contingencias (granizo, inundaciones repentinas, tormentas severas, etc.)
- Seguridad a la aeronavegación
- Estudios de física de la atmósfera



**SISTEMA METEOROLÓGICO ARGENTINO**  
 • SINARAME  
 • SINARAME  
 • SINARAME





## Aplicaciones

- ❖ Aviso temprano de: frentes, tornados, tormentas severas (granizos).
- ❖ Aviso de Flash Flood.
- ❖ Asimilación de datos de radar: a modelos de mesoescala para now casting, GIS.
- ❖ Clasificación de Hidrometeoros permite: identificar granizo, estudiar erosión por impacto de gotas.
- ❖ Junto con las estaciones: manejo del agua de cuencas.



### Características técnicas del RMD BC 2P

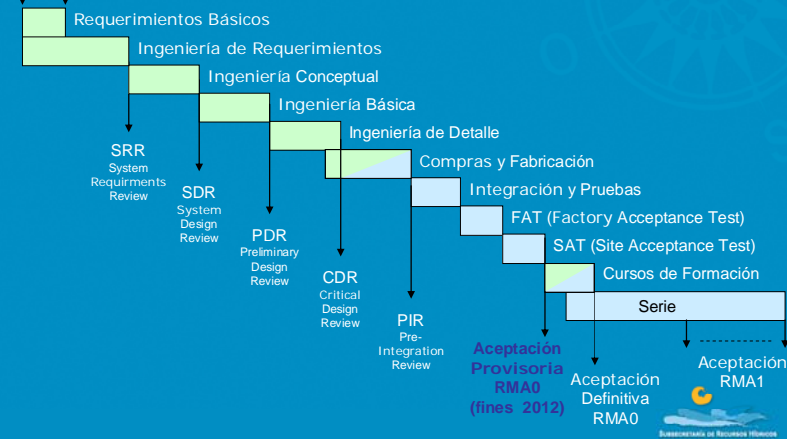
- ❖ Banda C (5.3)
- ❖ > 400 Km. de Reflectividad
- ❖ > 200 Km. en Velocidad
- ❖ Ancho de pulso
- ❖ Modo intensidad (LP) de 3 a 0.4 useg
- ❖ Modo Doppler (SP) de 0.8 a 0.85 useg
- ❖ Mínima señal detectable (MDS) -110 dBm o menor
- ❖ Supresión clutter terrestre -40 dB o mejor
- ❖ Figura de ruido 3 dB o mejor
- ❖ Rango dinámico mayor a 92 dB
- ❖ Diámetro de la Antena > 4 m
- ❖ Ganancia de la Antena > 40 dB
- ❖ Ancho de haz no mayor a 1° @ 3 db
- ❖ Movimiento acimutal 360°
- ❖ Velocidad acimutal 0.5 a 6 RPM
- ❖ Movimiento de elevación -1° a 15°/seg
- ❖ Resolución de apuntado > +- 0.1°
- ❖ Supresión de lóbulos laterales > a 25 db a partir del lóbulo principal



### Cronograma RMA

Carta de Intención (Oct 2008)

Contrato (Inicio 2011)



### **SINTESIS FINAL DEL TALLER**

En la reunión de cierre del III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas se acordó ir generando mecanismos de recopilación, centralización y accesibilidad a toda la información que los distintos grupos que trabajan en la temática disponen. Para ello se acordó sobre la necesidad de que uno de los grupos centralice la acción y para ello fue elegido el grupo de la provincia de Córdoba en el que participa el Ing. Carlos Catalini.

En vistas a ir dándole forma a esta consigna, también se acordó que cada grupo que tenga interés en participar, designe un representante y se lo comunique al Ing. Catalini a partir de marzo del año 2012. Una vez que se tenga una mensura de los grupos interesados se irán delineando los próximos pasos que directamente coordinará el Ing. Carlos Catalini con el equipo de representantes de cada grupo.

También se acordó acerca de extender la invitación a participar a grupos que no han estado presentes en el taller pero que tengan intenciones de colaborar en este emprendimiento. Es de importancia poder involucrar en el mediano plazo a todas las regiones geográficas de nuestro país.

La comunicación puede realizarse por medio de e\_mail a: Ing. Carlos Catalini [cgcatalini@gmail.com](mailto:cgcatalini@gmail.com).

## ORGANIZADORES



## AUSPICIANTES



## INSTITUCIONES PARTICIPANTES

- Centro de Estudios y Tecnología del Agua. (FCEyN-UNC).
- Centro de la Región Semiárida. (INA).
- Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas. (CIFASIS-CONICET).
- Centro Regional Litoral. (INA).
- Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. (CURIHAM-FCEIA-UNR).
- Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. Represa de Salto Grande. Uruguay-Argentina.
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
- Departamento de Hidráulica. (FCEIA-UNR).
- Departamento de Hidráulica. (FI-UNNE).
- Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra. (FA. UBA).
- Facultad de Ciencias de la Administración y Alimentación. (UNER).
- Facultad de Ingeniería. (UBA).
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (UNL).
- Facultad Regional Concordia. (UTN).
- Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales. (IANIGLA-CONICET).
- Instituto de Estudios del Ambiente y Recursos Naturales. (FFyL-UNCUYO).
- Instituto de Hidrología de Llanuras. (UNICEN).
- Laboratorio de Construcciones Hidráulicas. (FCEyT-UNT).
- Laboratorio de Hidráulica. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba. (UTN).
- Servicio Meteorológico Nacional.
- Universidad Católica de Córdoba.







### **III TALLER SOBRE REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS**

---

Páginas tipeadas provistas por autores  
UNR EDITORA  
Editorial de la Universidad Nacional de Rosario  
Secretaría de Extensión Universitaria  
Urquiza 2050 – S2000AOB – Rosario – Santa Fe – República Argentina  
[www.unreditora.unr.edu.ar](http://www.unreditora.unr.edu.ar) / [editora@sede.unr.edu.ar](mailto:editora@sede.unr.edu.ar)  
CD-ROM – 200 ejemplares.  
ABRIL 2012







Editorial de la Universidad Nacional de Rosario  
Secretaria de Extensión Universitaria