

GENERACIÓN DE SERIES DE LLUVIAS MEDIAS AREALES.

Erik D. Zimmermann, Gerardo A. Riccardi, Martín Arraigada, Horacio Pieroni

CONICET, CURIHAM, Fac. Cs. Ex. Ingeniería y Agrimensura, Univ. Nac. Rosario
Riobamba 245 bis (2000) Rosario – Tel/Fax 341 4808541- email: erikz@fceia.unr.edu.ar

Palabras clave: series de precipitación, distribución areal, llanura pampeana

RESUMEN

Se propone una metodología que permite vincular un dato puntual de precipitación, acumulada en un intervalo de tiempo dado, a la media areal correspondiente. El procedimiento ha sido aplicado para transformar series sintéticas de tormentas, generadas a partir de estadísticos de información pluviográfica puntual, con el fin de otorgarles representación areal.

La metodología consiste en la afectación directa de las series originales por un coeficiente de distribución areal (CDA) definido como la razón entre la precipitación puntual en la estación de referencia y la media registrada en el área de estudio. El CDA fue considerado como una variable probabilística dándosele dos tratamientos diferentes: (a) considerándolo una variable aleatoria independiente y (b) considerándolo dependiente de la lámina precipitada de la tormenta.

Se estudió el comportamiento estadístico del CDA para un conjunto de 63 tormentas seleccionadas de información pluviográfica regional y bajo 6 duraciones consideradas: 30', 1 h, 3 h, 6 h, 12 h y 24 h. Se contó con registros de 7 estaciones pluviográficas en el área de estudio (aproximadamente 5400 km²) con series temporales de 3 a 20 años, tomándose como referencia la estación de Rosario Aero (SMN). Se analizaron los patrones espaciales de las tormentas construyéndose 378 mapas de isoyetas, combinando las duraciones y tormentas seleccionadas.

Se construyeron series de valores de CDA extractándose los estadísticos y ajustándose las funciones de distribución de probabilidad. La ley de Weibull fue la que mejor ajustó los valores muestrales para la alternativa (a). Se propusieron ecuaciones de regresión multiplicativas para los coeficientes de las distribuciones en función de las duraciones consideradas, obteniéndose ajustes satisfactorios.

En el caso (b) pudo observarse que a partir de la duración de 12 hs. las regresiones entre el CDA y el monto precipitado presentaron coeficientes de correlación que superan el valor de 0,7 ($r^2 > 0.49$) mientras que para el resto de las duraciones la correlación es incipiente a prácticamente nula. Se propusieron regresiones lineales CDA(P) siendo P la precipitación acumulada en una duración determinada, corregidas por una componente aleatoria de *ruido blanco* con media nula y desvío estándar equivalente al error estándar de estimación. Este procedimiento permitió la generación aleatoria de residuos que son adicionados a la expresión analítica de la recta de ajuste entre CDA y P.

Ambas alternativas fueron incorporadas a los algoritmos de generación sintética de tormentas que permitieron obtener series con 20 años de extensión mediante realizaciones de Monte Carlo. Posteriormente, las series constituyeron las variables de entrada de modelos de simulación hidrológica desarrollados para estudios de impactos ambientales en el largo plazo ante acciones antrópicas.

INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos que permiten realizar simulaciones en el largo plazo, usualmente emplean información de entrada generada en forma sintética ante la falta de datos históricos de gran extensión temporal. Generalmente se formulan modelos probabilísticos para la generación sintética de tormentas puntuales (Zimmermann *et al* 1996, Zimmermann 1998). Normalmente, las series generadas de esta forma, son expandidas uniformemente hacia toda la superficie de captación de una cuenca.

Cuando el área de aplicación es considerable, con el fin de lograr que esa serie puntual sea representativa de un área de trabajo, se emplean frecuentemente las curvas de abatimiento areal. Las mismas se construyen relacionando la precipitación media en un área prefijada y la precipitación puntual asociada al foco de la tormenta. Si bien las curvas publicadas en la bibliografía (Zawadzki, 1973, WMO 1983) conservan un sentido estadístico, dado que los registros sobre las que se basan representan eventos históricos extremos, la metodología puede utilizarse en el análisis del fenómeno para cualquier tormenta en general, siempre y cuando la estación de referencia constituya el foco de la tormenta.

Cuando se analizan series de tormentas sobre una estación en particular, debe tenerse en cuenta que la misma puede o no constituirse el centro de la tormenta, por ello debe preverse una metodología de distribución areal que contemple esta probabilidad. Se propone aquí una metodología alternativa de distribución, obtenida sobre la base de criterios estadísticos, representativa para la región particular sobre la que se ha obtenido información pluviográfica.

COEFICIENTE DE DISTRIBUCION AREAL

El objetivo del trabajo consiste en la búsqueda de una metodología que permita transformar un dato puntual de precipitación en un valor representativo de un área especificada.

Dado que las láminas de lluvia registradas en una estación no siempre constituirán el foco de la tormenta, resulta necesario analizar el comportamiento de las mismas con respecto a la lluvia media del área de estudio.

Para ello se definió el coeficiente de distribución areal *CDA* como la razón entre la precipitación puntual en la estación de referencia y la media registrada en el área de estudio:

$$CDA = \frac{PP(d)}{PM(d)} \quad (1)$$

donde *PM(d)* es la precipitación media areal para una duración *d* y *PP(d)* es la precipitación equivalente puntual de la estación de referencia. La aplicación de este coeficiente a la serie puntual de tormentas permitirá transformar la información a escala areal.

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION DISPONIBLE

Se ha realizado un análisis del comportamiento del *CDA* en la región pampeana (sur santafecino) partiendo del conocimiento de eventos lluviosos en una estación de referencia, referidos a la media areal estimada en la zona de estudio. El análisis de los patrones espaciales de las tormentas se realizó con un conjunto de estaciones pluviográficas para las cuales se recopiló información de eventos simultáneos (Tabla 1).

La información recopilada de la estación Rosario Aero (Aeropuerto de Fisherton, Servicio Meteorológico Nacional) abarcó la mayor extensión y constituyó la referencia para todo el estudio.

El área de análisis abarcó la zona geográfica limitada por las estaciones extremas (Sapucay y Oliveros), según se muestra en la Figura 1. La superficie total del "rectángulo" abarca unos 52 km de ancho por unos 104 km de alto, es decir algo más de 5400 km². No obstante, las integraciones de los mapas de isoyetas para estimar la altura media de precipitación se realizaron tomando como referencia el rectángulo que circunscribe la superficie de captación de la cuenca del A° Ludueña (rectángulo menor en la Fig. 1).

Tabla 1. Extensión temporal de la información pluviográfica disponible.

	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	
Sapucay (Alcorta)																						
R.Aero (Funes)																						
Zavalla																						
Fuentes																						
Oliveros																						
Ibarlucea																						
DNC (Pérez)																						

Depuración y análisis de la información pluviográfica

Se depuraron los eventos de lluvia que presentaron: (a) registros inconsistentes (p/ej. incompatibilidades entre los registros pluviográficos y pluviométricos, etc.), (b) registros pluviográficos simultáneos en menos de tres estaciones, (c) registros nulos para un evento determinado en algunas de las estaciones y bajos montos para el resto (esto fue considerado para eliminar aquellos eventos, que por la baja magnitud, sólo provocaban precipitación en un sector del área de estudio y no en su totalidad) y (d) registros promedios areales inferiores a los 5 mm (esto fue adoptado para considerar los eventos de mayor magnitud).

Para analizar la estructura de la correlación espacial no fue necesario contar con el registro histórico completo de cada estación pluviográfica, siendo suficiente contar con un conjunto de eventos para los cuales exista registro simultáneo en el mayor número posible de las estaciones. La aplicación de estas restricciones al conjunto de datos resultó en una muestra de sesenta y tres (63) eventos seleccionados. Para cada uno de ellos se acumularon las alturas de lluvia para diferentes duraciones sobre las cuales se analizaron, posteriormente, sus distribuciones espaciales. Las duraciones seleccionadas fueron 30', 1, 3, 6, 12 y 24 hs. El comienzo adoptado para cada evento coincidió con el comienzo de la tormenta en la estación que registró primero.

Construcción de los mapas de isoyetas

Para cada evento seleccionado se construyeron los mapas de isoyetas con el fin de realizar el análisis de la relación entre la precipitación puntual y areal.

Para la construcción de los mapas de isoyetas se utilizó una metodología con base estadística que emplea la estructura de la correlación espacial de los registros regionales observados (Zimmermann y Silber, 2002). La metodología contempla un decaimiento de la correlación según una ley exponencial y los estadísticos de las láminas de lluvias diarias regionales. En este trabajo, dado que se hicieron aplicaciones del método para duraciones menores, fue necesaria la determinación de los coeficientes de decaimiento para lluvias de menores duraciones (Zimmermann

et al 2001). La metodología empleada consistió en la construcción de *correlogramas*, es decir, gráficas de coeficientes de correlación medidos sobre las series de láminas acumuladas para iguales duraciones en función de la distancia entre las estaciones de medición. Las estaciones consideradas son las que figuran en la Tabla 1. Las duraciones que se analizaron fueron 30', 1, 3, 6, 12 y 24 hs.

Los coeficientes de decaimiento obtenidos tras ajustar ecuaciones exponenciales a los correlogramas de cada una de las duraciones analizadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de decaimiento exponencial para la correlación espacial de datos pluviográficos. Otras referencias.

	Duraciones			Datos pluviométricos
	6 horas	12 horas	24 horas	
Eagleson (Australia)				0.0228 Km ⁻¹
Stol (Holanda)				0.0010 Km ⁻¹
Hendrick y Comer (USA)				0.0844 Km ⁻¹
Rodríguez y Mejía (Venezuela)				0.0900 Km ⁻¹
Presente investigación (Santa Fe, Argentina)	0.0275 Km⁻¹	0.0211 Km⁻¹	0.0168 Km⁻¹	0.0131 Km⁻¹

Puede observarse que los coeficientes de abatimiento se aproximan al obtenido para los datos pluviométricos (Zimmermann y Silber 2002) a medida que las duraciones de tormenta se acercan a las 24 hs., existiendo una coherencia en la información procesada. Los coeficientes de decaimiento disminuyen con las duraciones, hecho que también presenta una coherencia.

No obstante, los coeficientes de determinación de éstos ajustes resultaron bajos ($r^2 < 0,2$) lo cual señala que las curvas exponenciales de ajuste presentaron una importante desviación para algunos puntos. Al respecto, debe mencionarse que la cantidad de eventos disponibles en donde simultáneamente existieron registros no nulos en las estaciones fue escasa, principalmente para las duraciones menores, tales como 30' a tres horas, motivo por el cual no se obtuvieron los coeficientes para tales duraciones. Los mismos se estimaron mediante extrapolación lineal ajustada a los coeficientes para duraciones mayores. Puede observarse en Tabla 2 que los coeficientes hallados se asemejan a los obtenidos por Eagleson en Australia.

A continuación se construyeron los mapas de isoyetas para las 63 tormentas seleccionadas considerando, además, las alturas de precipitación acumuladas a los 30', 1h, 3hs., 6 hs., 12 hs. y 24 hs. de comenzado cada una de las tormentas. En definitiva se construyeron trescientos setenta y ocho (378) mapas de isoyetas.

Los mapas generados fueron clasificados por duración, para permitir el análisis del *CDA* para cada duración específica y, a continuación, se construyeron series de valores de *CDA* para cada duración analizada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El coeficiente de distribución areal fue considerado como una variable de carácter aleatorio dándosele dos tratamientos diferentes: (a) considerándolo como una variable aleatoria independiente y (b) considerándolo dependiente de la lámina precipitada de la tormenta.

La primer propuesta surge por simplicidad, donde la distribución areal de la lluvia no dependería de ningún parámetro característico de la tormenta, ni de la intensidad media ni la máxima, ni de la duración ni el volumen precipitado.

La segunda, surge bajo la hipótesis de que a medida que el volumen precipitado aumenta la uniformidad espacial de la tormenta es mayor.

CDA como variable aleatoria independiente

Se estudio el comportamiento estadístico del *CDA* para el conjunto de tormentas y duraciones consideradas (Tabla 3). Pudo observarse una mayor dispersión para las duraciones menores con mayores rangos y desvíos del *CDA* en esos casos. También se dedujeron, en promedio, precipitaciones mayores a la media areal en la estación Rosario Aero, específicamente para las duraciones menores a 6 horas.

Tabla 3. Estadísticos del coeficiente de distribución areal.

	0,5 h	1 h	3 hs	6 hs	12 hs	24 hs
Casos no nulos	18	27	45	59	63	63
Media	1.556	1.271	1.216	1.067	1.017	1.009
Desvío	0.822	0.715	0.687	0.397	0.293	0.292
Asimetría	0.493	0.805	1.542	0.546	0.034	0.139
Máximo	3.258	3.255	3.249	2.156	1.733	1.787
Mínimo	0.260	0.158	0.090	0.177	0.156	0.156

El análisis de frecuencias realizado para cada duración mostró la misma tendencia: a medida que la duración aumenta, el *CDA* tiende a estrecharse sobre un valor medio unitario, disminuyendo la asimetría y el desvío.

Debe mencionarse que la cantidad de casos analizados para duraciones inferiores a 3 hs disminuyen notoriamente, acotando las conclusiones que puedan extractarse de las muestras.

Se ajustaron leyes de distribución estadística a los coeficientes *CDA*, una para cada duración analizada. Se analizaron un conjunto de leyes teóricas de distribución entre las que figuran la exponencial, normal, log-normal y extremas como Weibull. Los mejores ajustes se lograron con ésta última, alcanzándose resultados satisfactorios. Los parámetros de las distribuciones se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros y errores de ajuste. Distribución Weibull

	0.5 h	1 h	3 hs	6 hs	12 hs	24 hs
<i>SEC</i>	0.0050	0.0195	0.0063	0.0094	0.0022	0.0022
α	2.382	2.130	3.571	3.057	5.004	5.004
β	1.519	1.364	1.112	1.160	1.108	1.108

donde *SEC* representa la suma de los errores cuadráticos entre la distribución teórica y la acumulada de cada muestra, α y β son los parámetros de la distribución Weibull, cuya formulación es la siguiente:

$$F(x) = 1 - \exp\left(\frac{-x}{\beta}\right)^\alpha \quad (2)$$

donde $F(x)$ es la función de distribución acumulada y x la variable aleatoria (*CDA* en este caso).

Con el fin de disponer de expresiones analíticas que vinculen la duración de la lámina de lluvia y los parámetros de las leyes de distribución ajustadas, se plantearon diferentes ecuaciones de regresión lográndose los mejores ajustes con leyes multiplicativas descritas por las siguientes formulaciones:

$$\beta = 2,4891.d^{0,2243} \quad (r^2 = 0,835) \quad (3)$$

$$\alpha = 1,3558.d^{-0,0812} \quad (r^2 = 0,795) \quad (4)$$

donde d es la duración de la lámina de lluvia en horas. Los parámetros y errores de ajustes con los parámetros regresados se muestran en la Tabla 5 (Figuras 2 a 7). Se observa que los errores cuadráticos no han variado significativamente

Tabla 5. Parámetros regresados y errores de ajuste. Dist. Weibull

	0.5 h	1 h	3 hs	6 hs	12 hs	24 hs
<i>SEC</i>	0.0138	0.0234	0.0300	0.0141	0.0038	0.0123
α	2.131	2.489	3.185	3.721	4.347	5.078
β	1.434	1.356	1.240	1.172	1.108	1.047

El procedimiento para generar aleatoriamente coeficientes de distribución areal de lluvia consistiría en aplicar el método de Monte Carlo asociando leyes de distribución de Weibull, cuyos parámetros, α y β , se obtengan a partir de la duración d del evento según ecuaciones (3) y (4) y seguidamente aplicar la ecuación (2) para obtener los *CDA*.

CDA como variable distribuida en forma conjunta con la precipitación

Se hizo un intento por correlacionar el coeficiente *CDA* con la magnitud de la precipitación registrada en Rosario Aero. Esto permitiría una relación analítica entre ambas variables utilizable en el momento de predecir la transformación puntual - areal de la precipitación.

Analizando regresiones no lineales, pudo observarse que sólo para duraciones mayores a 12 hs., la regresión entre el *CDA* y el monto precipitado presentó coeficientes de correlación superiores a 0,7 ($r^2 > 0.49$). Para el resto de las duraciones la correlación resultó incipiente a prácticamente nula. No obstante, la tendencia a la uniformidad areal a medida que la la precipitación aumenta es observable en los registros pluviométricos de tormentas de magnitud. Por lo tanto, el planteo de una correlación entre el *CDA* y la lámina precipitada trata de explicar esta tendencia.

En el planteo de una regresión lineal entre la variable dependiente, *CDA*, y la precipitación considerada como variable independiente, P , pueden adoptarse las siguientes definiciones (Custodio y Llamas 1983):

$$CDA = a + bP + \varepsilon_i \quad (5)$$

$$b = S_{CDA-P} / S_P^2 \quad (6)$$

$$a = \overline{CDA} - b\overline{P} \quad (7)$$

donde ε_i representa el error o residuo entre el valor muestral y el teórico, S_{CDA-P} y S_P , representan la covarianza de CDA, P y el desvío estándar para la variable P , respectivamente, y los valores con rayas como supraíndices representan los promedios para la serie de cada variable.

Hay que destacar que la ecuación lineal está ajustada por mínimos cuadrados a una muestra determinada, la ecuación correspondiente a la población debe incluir la cantidad aleatoria, ε_i , que representa el error producido por el hecho de que las dos variables no estarán, necesariamente, relacionadas por una función lineal.

Frecuentemente la distribución de los residuos se asume normal con media nula (ruido blanco). El residuo y el error estándar de desviación, S_e , puede estimarse a partir de los parámetros muestrales de la siguiente manera:

$$\varepsilon_i = \mu_\varepsilon \pm K.S_e = \pm K.S_e \quad (8)$$

$$S_e = \sqrt{S_{CDA}^2 - b^2 S_P^2} \quad (9)$$

siendo μ_ε la esperanza de los residuos, considerada como el valor nulo, K el “ancho de la banda” de la recta de ajuste y S_{CDA} el desvío estándar para la variable CDA .

Seguidamente, se realizaron regresiones lineales entre CDA y la lámina de precipitación para cada duración analizada (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros de las regresiones $CDA-P$

Duración	A	$1000 b$	S_e	Coef. Correlación r
0,5 h	1.539	3.003	0.847	< 0.4
1 h	1.328	-5.682	0.728	< 0.4
3 h	1.166	2.484	0.693	< 0.4
6 h	0.856	6.616	0.366	0.404
12 h	0.781	5.262	0.247	0.549
24 h	0.787	4.678	0.251	0.523

Puede observarse que la correlación entre ambas variables mejora a partir de la duración de 6 h, no obstante son muy bajas en todos los casos. Además, las pendientes de las rectas ajustadas son pequeñas e incluso para la regresión realizada para una hora la misma es negativa (Tabla 6). Esto evidencia que no existe una tendencia muy definida del coeficiente CDA a aumentar ó a disminuir con el total de la lámina de lluvia caída (Figuras 8 y 9). Dada la baja correlación detectada no se intentaron regresiones entre los parámetros y las duraciones.

El procedimiento para generar aleatoriamente coeficientes de distribución areal de lluvia consistiría, en este caso, en aplicar el método de Monte Carlo asociando a una ley normal con media nula y desvío estándar S_e , para estimar el residuo ε_i , obtener la pendiente b y ordenada al origen a acordes con la duración d del evento (Tabla 6) y aplicar la ecuación (5) para obtener los CDA .

CONCLUSIONES

Se propone una metodología para transformar un dato puntual de precipitación a su correspondiente media areal, mediante la aplicación de un coeficiente de distribución areal, CDA , al que se le atribuyó un carácter aleatorio. El procedimiento puede aplicarse para transformar series sintéticas de tormentas, generadas a partir de estadísticos de información pluviográfica puntual, con el fin de otorgarles representación areal.

El CDA fue considerado de dos maneras: (a) como una variable aleatoria dependiente de la duración del evento pluvial y (b) dependiente de la lámina precipitada y la duración.

Basándose en información pluviográfica regional del sur santafecino, se analizó estadísticamente la relación entre la precipitación puntual de la estación Rosario Aero y la media areal calculada tomando como referencia la cuenca del arroyo Ludueña (provincia de Santa Fe). Para el primer tratamiento, se ajustaron leyes de distribuciones de probabilidad al CDA , resultando la de Weibull la más apropiada y cuyos parámetros pueden obtenerse mediante las regresiones potenciales de la duración propuestas en el trabajo. En el segundo caso, las correlaciones entre el CDA y la altura de precipitación fueron incipientes, haciendo poco sustentable la propuesta.

El procedimiento recomendado para generar aleatoriamente coeficientes de distribución areal de lluvia, consistiría en aplicar el método de Monte Carlo asociando leyes de distribución de Weibull, cuyos parámetros se obtengan a partir de la duración del evento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Custodio E., Llamas M.** (1983) *Hidrología Subterránea*. Segunda Edición. Ediciones Omega S.A. Barcelona. España ISBN 84-282-0446-2
- Silber M.** (1985) "Algoritmo de cálculo y representación de los campos paramétricos continuos". XII Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina.
- World Meteorological Organization (WMO)** (1983) *Guide to Hydrological Practices*. Vol II. Anaysis, Forecasting and other Applications. WMO N° 168. 4th edn. Geneva, Switzerland.
- Zawadzki I.I.** (1973) "Statistical properties of precipitation patterns", J. Appl. Meteorol., 12, 459-472.
- Zimmermann E., Navarro R. y Silber M.** (1996) "Un Modelo Probabilístico para la Generación de Tormentas Sintéticas" XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR-LAD, Guayaquil, Ecuador.
- Zimmermann E.** (1998) "Synthetic Storm Generation in a Flatland Region, Santa Fe, Argentina". Journal of Environmental Hydrology (IAEH), Vol. 6, N° 2, pp. 1-5.
- Zimmermann E., Riccardi G., Pieroni H., Arraigada M.** (2001) "Curvas de abatimiento areal de tormentas. Región Pampa Ondulada (Santa Fe, Argentina)". Cuadernos del CURIHAM. PHI-UNESCO. ISSN 1514-2906. Vol. 7 (1), 24-37.
- Zimmermann E., Silber M.** (2002) "Algoritmo para la representación de campos de precipitación". XIX Congreso Nacional del Agua. Carlos Paz. Argentina. (aceptado para su presentación).

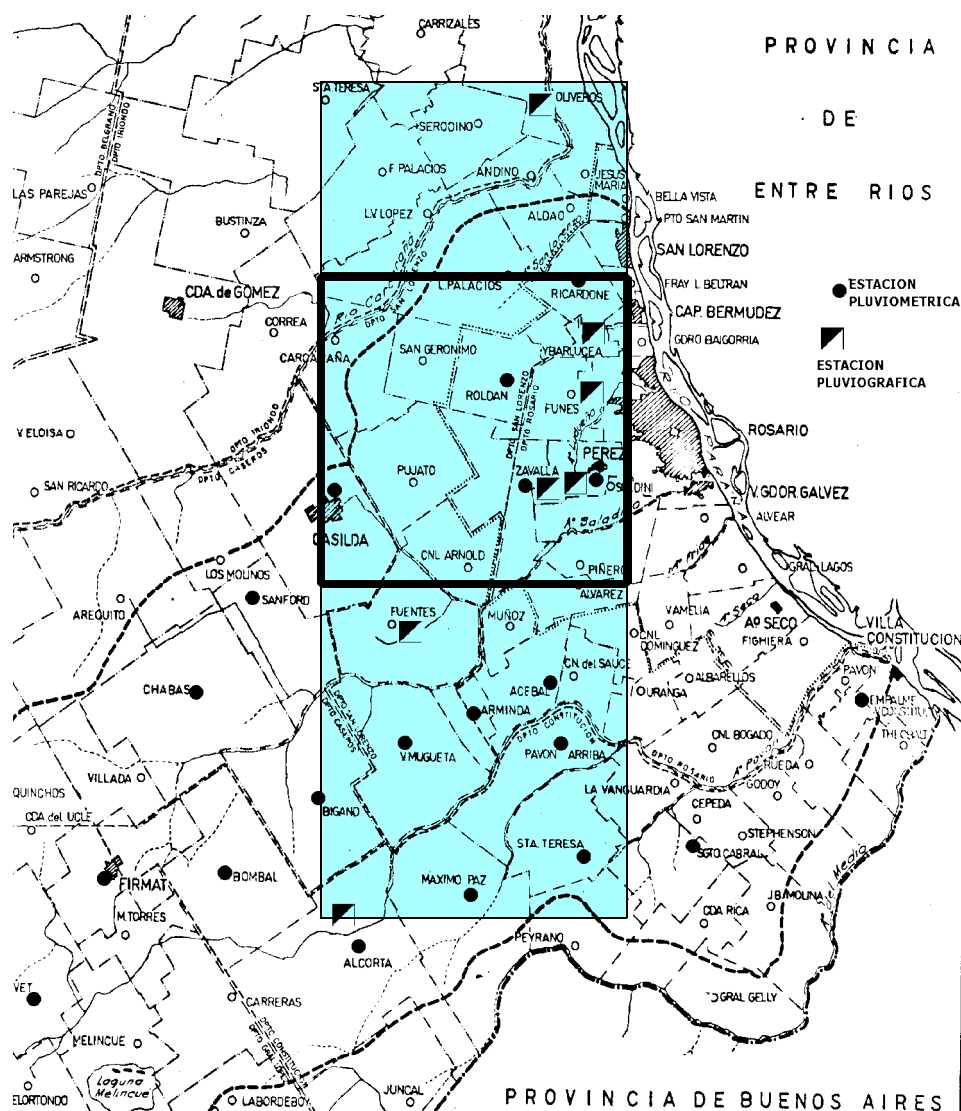


Figura 1. Area de análisis del arroyo Ludueña (rectángulo menor).

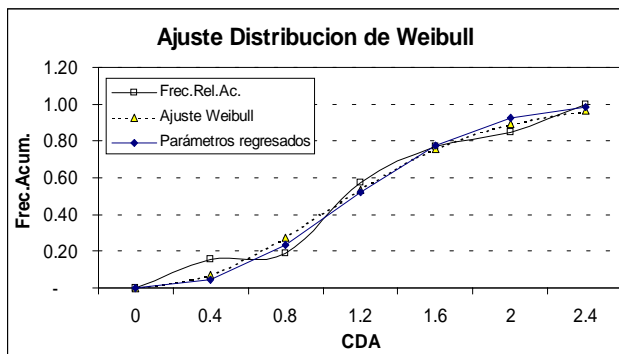


Figura 2. Ajuste para duración 0,5 hs.

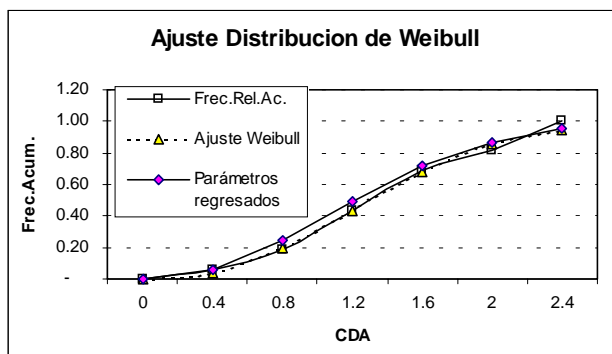


Figura 3. Ajuste para duración 1 h.

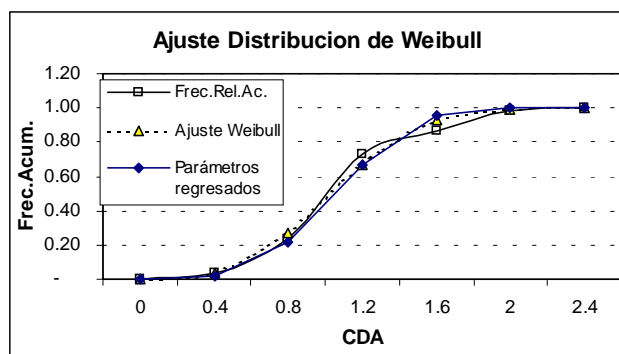


Figura 4. Ajuste para duración 3 hs.

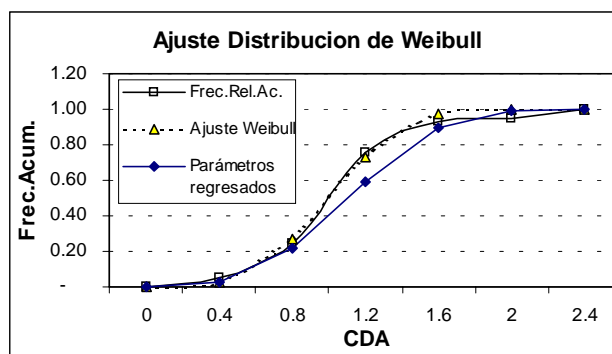


Figura 5. Ajuste para duración 6 hs.

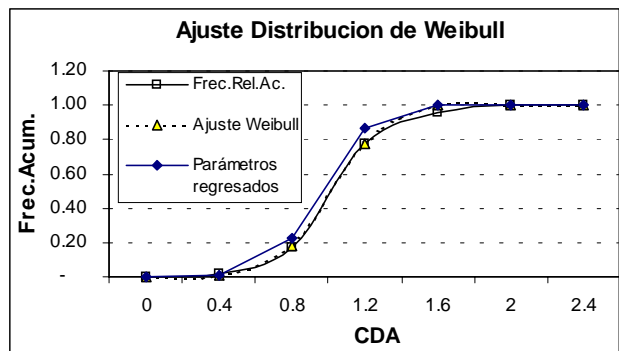


Figura 6. Ajuste para duración 12 hs.

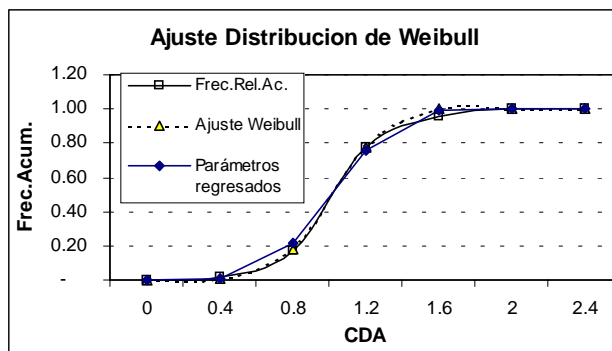


Figura 7. Ajuste para duración 24 hs.

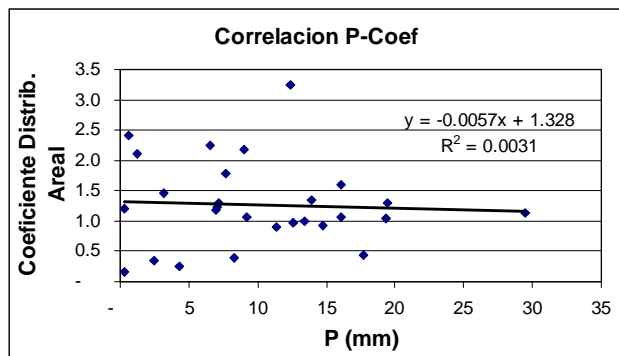


Figura 8. Ajuste para duración 1 h

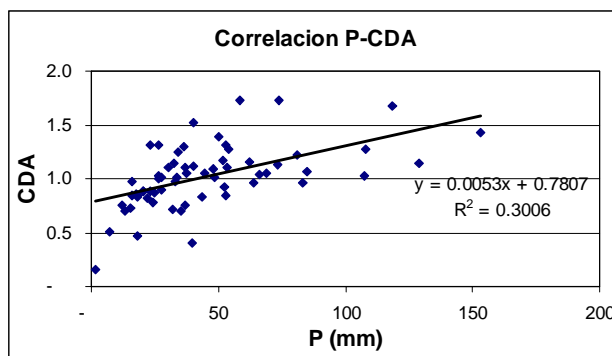


Figura 9. Ajuste para duración 24 hs.