

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**DESAGREGACIÓN DE PRECIPITACIÓN DIARIA PARA APLICACIONES EN  
HIDROLOGÍA URBANA.**

**JAVIER CAMAÑO ESPINOZA.<sup>1</sup>**  
**DIEGO RIVERA SALAZAR<sup>2</sup>**  
**JOSÉ LUIS ARUMÍ RIBERA<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

En muchas cuencas y para diversas aplicaciones en hidrología son requeridos datos de alta resolución temporal el presente trabajo se aplica un modelo estocástico que permita obtener datos con una resolución horaria a partir de series de tiempo diarias históricas. Se analizan las duraciones de los eventos obtenidos, intensidades generadas, intervalos de tiempo sin precipitación, cantidades de lluvia caída por evento, autocorrelación y periodos de retorno obtenidos para la desagregación de una serie de datos de precipitación de una estación ubicada en la zona central de Chile.

---

<sup>1</sup>Doctorando, Depto. Recursos hídricos, Universidad de Concepción – [javercamano@udec.cl](mailto:javercamano@udec.cl)

<sup>2</sup>Profesor Asociado, Depto. Recursos hídricos, Universidad de Concepción – [dirivera@udec.cl](mailto:dirivera@udec.cl)

<sup>3</sup>Profesor Titular, Depto. Recursos hídricos, Universidad de Concepción - [jarumi@udec.cl](mailto:jarumi@udec.cl)

## Introducción

La hidrología urbana es un área de la hidrología que se enfoca en ciudades y regiones que tienen niveles muy altos de interferencia humana con procesos naturales Schilling (1991)

En áreas urbanas, una alta proporción de la lluvia se vuelve efectiva y produce escorrentía y la variabilidad espacial y temporal constituye una fuente significativa de incerteza para modelación hidrológica.

La lluvia es el principal forzante de la generación de la escorrentía y la erosión del suelo por agua, ciertas aplicaciones en la hidrología requieren de datos de lluvia sub-horaria, tales aplicaciones incluyen la modelación de la erosión y el transporte de sedimentos, inundaciones urbanas, modelos de calidad de agua, diseño de estructuras hidráulicas, etc. Por lo tanto es de importancia académica poseer series de tiempo sub horarias para estudios relacionados con las especialidades expuestas anteriormente (Engida y Steves, 2011)

En el caso del drenaje urbano y el modelamiento de inundaciones, una buena resolución temporal y espacial es requerida y son necesarios métodos de simulación para superar el problema de la limitación de datos (Segond et al, 2007)

La mayoría del tiempo, redes estacionales nacionales típicas no proveen las altas resoluciones requeridas para drenaje urbano y la longitud recordada de los datos colectados es inadecuado para realizar análisis estadísticos (Segond et al, 2007)

Muchos modelos han sido usados para desagregar datos de precipitación, Woolhiser y Osborn (1985) presentaron un esquema de desagregación de una tormenta individual en profundidades fraccionadas correspondiendo a un décimo de la duración de la tormenta, su esquema fue basado en la no dimensionalidad del proceso de Markov resultando en transformaciones sucesivas del proceso de lluvia real.

El uso de desagregar un total diario en tormentas individuales en un día fue estudiado por Hershenthorn y Woolhiser (1987). El modelo matemático más general para desagregar lluvia para escalas de tiempo más reducidas que la mensual fue estudiado por Koutsoyiannis et al. (1998) y Koutsoyianis y Xanthopoulos (1990). Sin embargo el problema de desagregación de un evento de tormenta a escalas más finas fue direccionado de una manera matemáticamente simple pero acertada por Koutsoyiannis (1994), basado en la suposición que la función de distribución marginal del incremento de la profundidad de lluvia a una corta escala de tiempo (horaria) es (aproximadamente) gamma y la prueba matemática que reescala las profundidades de lluvia incrementa de tal manera que se ajusten a las cantidades diarias no altera la función de distribución de probabilidad gamma.

Cabe destacar que el objetivo de la última técnica no fue la simulación continua de lluvia, sino la simulación basada en eventos (Zarris et al, 1998). Koutsoyiannis y Pachakis (1996), la administró para construir una herramienta de simulación continua basada en esta técnica , con el supuesto de un proceso nuevo para las ocurrencias de lluvia y una hipótesis de escalamiento (Koutsoyiannis y Foufoula-Georgiou,1993) para los procesos de intensidad.

Esta última técnica, sin embargo no consideraba cantidades explícitas diarias. Esto fue realizado por Glasbey et al. (1995). Usando el RPBLRPM (Random Parameter Bartlett-Lewis Rectangular Pulse Model) propuesto por Rodríguez-Iturbe et al. (1987), los autores examinan un método basado en la simulación de datos hasta un buen ajuste de los totales diarios, es obtenido para la duración de un cierto evento en los datos diarios. El reescalamiento es luego requerido para reproducir los totales diarios exactamente.

Un modelo más sistemático, basado en el proceso de pulso rectangular fue estudiado por Koutsoyiannis y Onof (2001).

## Datos

Se analizan los datos de la estación meteorológica Chillán de propiedad de la Universidad de Concepción, la cual se encuentra ubicada en  $36^{\circ} 36'$  latitud y  $72^{\circ} 06'$  longitud a una cota de 144 m.s.n.m. Se utilizan para este trabajo los datos de precipitación con una resolución temporal de 15 minutos para entre los años 1999-2004.

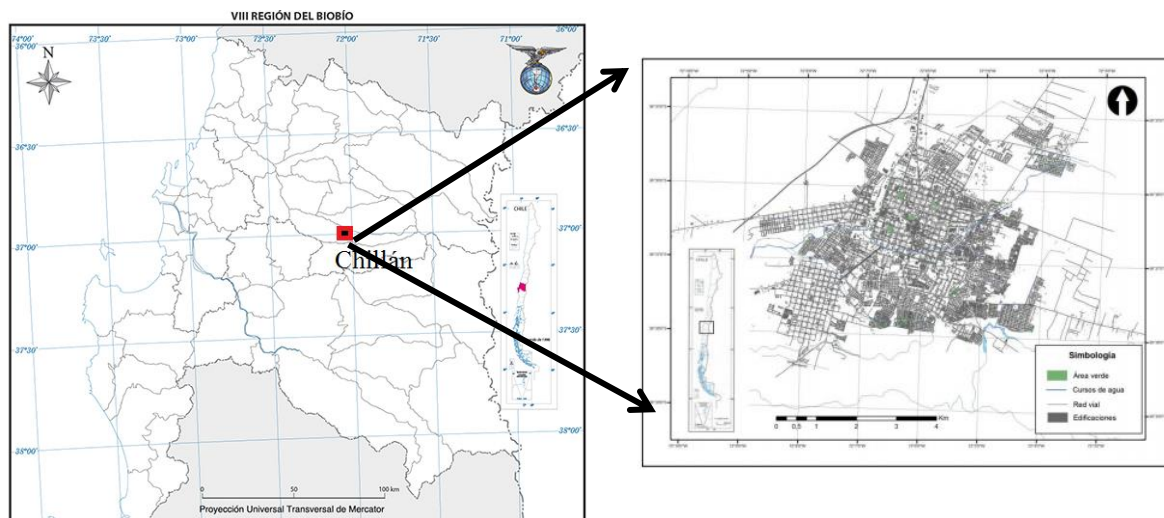
## Métodos

A partir de los datos de precipitación cada 15 minutos de la estación de Chillán, se agregaron para generar datos diarios.

Se calcularon los parámetros del Modelo HYETOSR considerando una base mensual (MBLRPM<sub>Monthly</sub>) y sobre una base Estacional (MBLRPM<sub>Season</sub>).

Posteriormente estos parámetros para cada consideración del modelo fueron calibrados a través del evolutionary annealing-simplex optimisation method propuesto por Efstratiadis y Koutsoyiannis (2002).

Se realizaron diversas corridas del modelo para desagregar los datos diarios agregados anteriormente hasta la escala horaria y se comparan estadísticos y características de los datos desagregados.



**Figura 1.-** Ciudad de Chillán (extraído de Riveros et al ,2012).

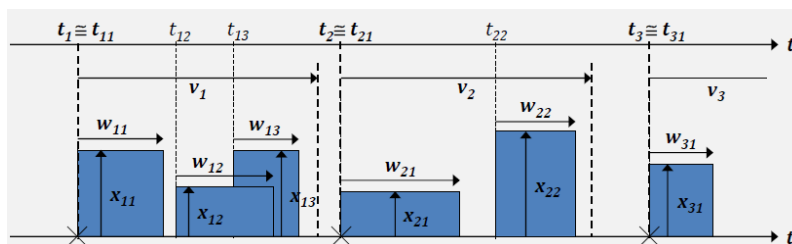
## Modelo de Desagregación

Un modelo de generación de precipitación exitoso capaz de reproducir la estructura de la lluvia a baja escala que pueda ser usado como un modelo de desagregación el cual podría ser combinado con un procedimiento apropiado para ajustar las cantidades de lluvia a un nivel más bajo de tal manera de obtener los totales diarios. Esta implementación fue desarrollada primeramente por Koutsoyiannis y Onof (2001) y resultó en un programa computacional llamado HYETOS.

Como modelo de precipitación adecuado el de proceso puntual de Bartlett-Lewis (Figura 2) en cualquiera de sus configuraciones (de parámetro aleatorio o constante, intensidades distribuidas exponenciales o gamma) fue elegido debido a su amplia aplicabilidad y experiencia en la calibración y aplicabilidad a varios climas. Existe bastante evidencia respecto a su habilidad de reproducir características importantes de la precipitación horaria a diaria, tales evidencias pueden ser encontradas en la literatura (Rodríguez-Iturbe et al., 1987, 1998; Onof & Weather, 1993, 1994).

Los supuestos del modelo original (Rodríguez-Iturbe et al., 1987) consistían en que el origen de la tormenta  $t_i$  ocurre siguiendo un proceso de Poisson con tasa  $\lambda$ , el origen de la celda  $t_{ij}$  ocurre siguiendo igualmente un proceso de Poisson con una tasa  $\beta$ , la llegada de la celda termina después de un tiempo  $v_i$  exponencialmente distribuido (Parámetro  $\gamma$ ), las duraciones de cada celda  $w_{ij}$  son exponencialmente distribuidas (parámetro  $\eta$ ) y las intensidades de cada celda  $x_{ij}$  pueden ser distribuidas gamma o exponencialmente (Figura 2). Finalmente como un procedimiento de ajuste adecuado, fue elegido el procedimiento de ajuste proporcional debido a su habilidad de no afectar los periodos secos. (Koutsoyiannis, 2003).

Posteriormente a la primera versión (Diciembre de 2009), se siguieron desarrollando nuevas versiones (Junio 2004, Septiembre 2005, Abril 2012 y Julio 2013) hasta la última versión (Julio 2013) denominada HYETOSR debido a que la implementación del modelo se encontraba operativa en R, ésta versión fue desarrollada por (Kossieris et al., 2012).



**Figura 2.-** Modelo de Pulso Rectangular de Bartlett-Lewis (extraído de Kossieris et al., 2015)

En la versión mencionada se encuentra operativa la versión original del modelo de Pulso Rectangular de Bartlett-Lewis y la una versión modificada (Rodríguez-Iturbe et al., 1998) llamada Modelo de Pulso Rectangular de Bartlett-Lewis de parámetros aleatorios (RPBLRPM por sus siglas en inglés). La principal diferencia entre las versiones es que en el modelo original todos los parámetros son asumidos constantes. En la versión modificada el parámetro  $\eta$  es variado aleatoriamente de tormenta en tormenta con distribución gamma con parámetro  $\alpha$  (argumento a) y parámetro de escala  $v$  (argumento v) subsecuentemente los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$  también varían de tal manera que la relación  $k=\beta/\gamma$  (argumento k) y  $\phi=\gamma/\eta$ (argumento f) son constantes. La distribución de intensidad uniforme  $x_{ij}$  es típicamente asumida exponencial con parámetro  $1/u_x$  (argumento mx), alternativamente se pueden asumir una distribución gamma de dos parámetros con promedio  $u_x$ (argumento mx) y desviación estándar  $1/\sigma_x$  (argumento sx) .

Así en la versión original, el modelo utiliza 5 parámetros,  $\lambda, \beta, \gamma, \eta$  y  $u_x$  y en la versión modificada 7 parámetros,  $\lambda, k, \phi, \alpha, v, u_x$  y  $\sigma_x$ . (Kossieris et al, 2015)

La calibración de los parámetros del MBLRPM se realiza a través del evolutionary annealing-simplex method propuesto por Efstratiadis y Koutsoyiannis (2002), el cual se trata de una técnica de optimización global heurística probabilística. Se trata de un método que permite al modelo HYETOSR obtener un set de parámetros optimizados que se calculan a partir de los datos diarios y que son necesarios para correr el modelo y desagregar la precipitación diaria en datos horarios.

## Criterios de Evaluación

Se comparan las propiedades estadísticas de los datos de precipitación desagregados con el Modelo HYETOSR calculando los parámetros de manera mensual (MBLRPM<sub>Monthly</sub>), los parámetros de manera estacional (MBLRPM<sub>season</sub>) y los datos horarios observados (Obs). Primeramente se compara la skewness, el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada mes considerando los días húmedos y secos (All Data) los días húmedos (wet days) y las horas húmedas (wet hours).

Como criterio de comparación de los modelos mostrados, se proponen el error relativo (1)

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{r_{Dis,i} - r_{Obs}}{r_{Obs}} \quad (1)$$

Adicionalmente utilizando el error relativo se adiciona como estadístico de la lluvia a comparar el número de horas húmedas (wet hours), la duración de los eventos (Wet spell duration), el volumen de lluvia caída por evento (Wet spell amount), la longitud del periodo seco entre eventos (Dry spell duration), la intensidad promedio (average intensity) y el porcentaje de periodo seco (fraction of dry intervals).

Se analiza la autocorrelación entre las serie de tiempo desagregadas (MBLRPM<sub>Monthly</sub> y MBLRPM<sub>season</sub>) y la serie de tiempo horaria histórica.

Finalmente se analiza la intensidad de precipitación para diferentes periodos de retorno para los dos modelos y los datos históricos, como se carece de una larga serie de datos de

precipitación se crea una serie sintética obteniendo las 100 intensidades más altas de cada serie y comparándolas con las históricas.

## **Resultados y Discusión**

Los estadísticos indican comportamientos variados según sea la característica a analizar, en cuanto a la cantidad de horas húmedas (wet hours) se observa que existe una sub estimación de las horas húmedas para ambos modelos, el MBLRPM<sub>season</sub> permite obtener una menor sub estimación de las horas húmedas (-24,1%).

Respecto a la duración de los eventos (wet spell duration) ambos modelos sobrestiman esta característica en menor medida, presentando el MBLRPM<sub>Season</sub> una sobrestimación menor (36,7%).

La duración del periodo seco es pobremente reproducida, presentando una sobrestimación de ésta característica para ambos modelos, el MBLRPM<sub>Monthly</sub> es el que presenta peor comportamiento presentando una alta sobrestimación (93,4%) respecto al MBLRPM<sub>Season</sub> (38,3%).

Las intensidades promedio son igualmente sobrestimadas por ambos modelos, ésta característica es mejor reproducida por el MBLRPM<sub>Season</sub> presentando (31,8%).

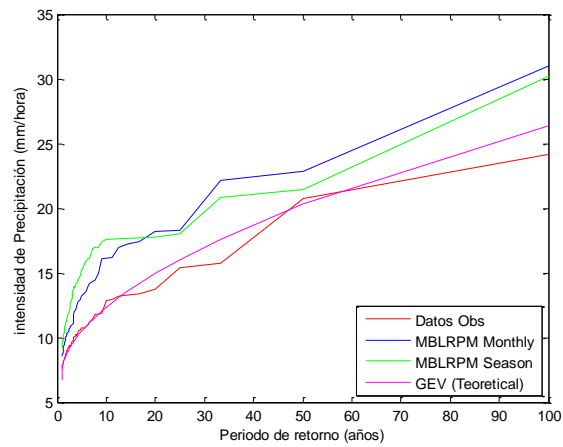
Finalmente el porcentaje de periodos secos respecto al total de los datos presenta una ligera sobrestimación, ambos modelos se acercan bastante a la característica observada (3,4 y 2,4 % para el MBLRPM<sub>Monthly</sub> y MBLRPM<sub>Season</sub> respectivamente).

Al analizar los 100 intensidades más extremas por cada serie se observa que existe una sobrestimación de las intensidades para todos los periodos de retorno, sin embargo se considera aceptable considerando que se desagrega solo el total diario, no teniéndose ninguna referencia de las intensidades subdiarias.

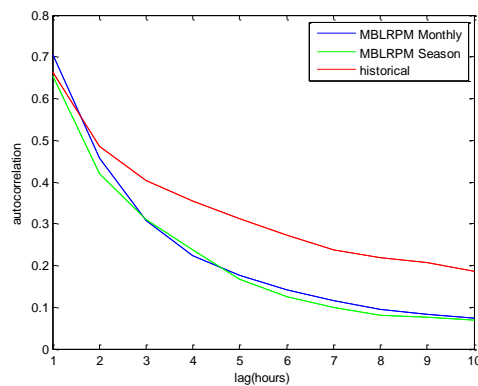
Se hace hincapié en la complejidad de reproducir las características principales de la precipitación a través de estadísticos, teniendo en consideración la Figura 5 que corresponde a una tormenta desagregada para del mes de Noviembre de 2004 se ve claramente que existe un desfase entre las ocurrencias de las tormentas y una sobrestimación de las intensidades horarias, por lo que se plantea que se requiere de un análisis más acabado respecto a las condiciones meteorológicas en las que se estos modelos estocásticos se ajusten mejor a los datos observados de precipitación.

**Tabla 1.-** Características de la serie desagregada comparada con los datos observados

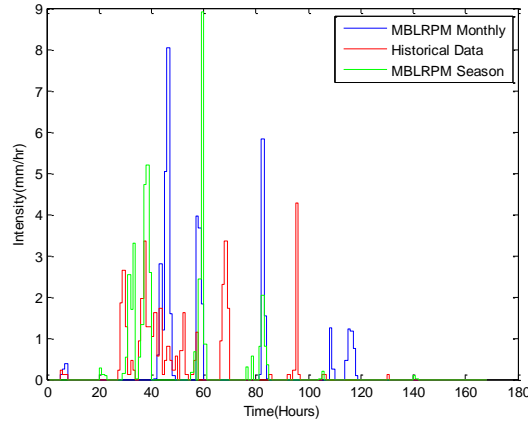
| <i>Rainfall Characteristics</i>  | <i>relative error (%)</i> |                      |
|----------------------------------|---------------------------|----------------------|
|                                  | <i>MBLRPM Monthly</i>     | <i>MBLRPM Season</i> |
| <b>Number of Wet Hours</b>       | -33,0                     | -24,1                |
| <i>Wet spell Duration</i>        | 27,1                      | 3,6                  |
| <i>standard deviation</i>        | -11,7                     | -23,9                |
| <i>skewness</i>                  | -16,0                     | -10,8                |
| <b>Wet spell Amount</b>          | 90,1                      | 36,7                 |
| <i>standard deviation</i>        | 14,9                      | 2,1                  |
| <i>skewness</i>                  | -50,0                     | -36,3                |
| <b>Dry Spell Duration</b>        | 93,4                      | 38,3                 |
| <i>standard deviation</i>        | 55,2                      | 23,4                 |
| <i>skewness</i>                  | -9,9                      | 23,9                 |
| <b>Average Intensity</b>         | 49,5                      | 31,8                 |
| <b>Fraction of Dry Intervals</b> | 3,4                       | 2,4                  |



**Figura 3.-** Intensidades sintéticas obtenidas para diferentes periodos de retorno para los MBLRPM monthly, el MBLRPM Season, datos históricos y la Gev (teórica).



**Figura 4.-** Autocorrelaciones obtenidas para los tres modelos.



**Figura 5.-** Ejemplo de tormenta desagregada para noviembre de 2004.

### Conclusiones e investigaciones futuras.

Como modelo de desagregación el HYETOSR se plantea como una herramienta para apoyar la generación de datos de precipitación en lugares donde solo se poseen los datos diarios que es lo que comúnmente se posee en Chile. La aplicabilidad práctica de las salidas de este modelo pueden ser utilizadas en conjunto con un modelo de infiltración (Horton, Green y Ampt, etc.) o con uno lluvia – escorrentía o numérico que permita comparar los caudales generados utilizando las salidas de este modelo estocástico versus los caudales observados. Cabe destacar que se deben buscar aplicaciones donde una resolución menor a la diaria sea requerida (modelos de erosión, hidráulica urbana, etc.) para validar el uso del modelo.

Se analizó el modelo con los datos diarios solo desde 1999 al 2004, por lo que las observaciones aquí analizadas sólo pueden caracterizar el periodo mencionado, sin prejuicio a que al analizar una serie más larga o diferente exista un mejor ajuste a los datos horarios observados para diferentes condiciones meteorológicas o fenómenos como el ENSO.

Para el periodo observado, el número de horas húmedas se encuentra subestimado, lo que puede conllevar a alcanzar intensidades superiores a las observadas (Tabla 1), pudiendo generar problemas al utilizar las salidas del HYETOSR en modelación hidráulica.

Los estadísticos propios de la serie histórica han sido adecuadamente reproducidos (promedio, desviación estándar, y coeficiente de variación), las precipitaciones asociadas a los periodos de retorno se sobrestiman sin embargo se presume un grado de seguridad si los datos se utilizan para fines de diseño.

La autocorrelación se encuentra subestimada por ambos modelos, sin embargo se observa una dependencia temporal que es reproducida igualmente por ambos modelos.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Conicyt por el financiamiento dado a través de los proyectos Fondecyt-BMBF-PCCII-2031 y Conicyt/Fondap/15130015 y el autor Javier Camaño expresa su agradecimiento al mismo organismo por la Beca Doctorado Nacional 2015.

## REFERENCIAS

- Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D. (2002). An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems. In Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics (pp. 1423-1428).
- Engida, A. N., & Esteves, M. (2011). Characterization and disaggregation of daily rainfall in the Upper Blue Nile Basin in Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 399(3), 226-234.
- Glasbey, C. A., Cooper, G., & McGechan, M. B. (1995). Disaggregation of daily rainfall by conditional simulation from a point-process model. *Journal of Hydrology*, 165(1), 1-9.
- Huerta-Riveros, P. C., Paúl-Espinoza, I. R., & Leyton-Pavez, C. E. (2012). Impacto de indicadores de gestión en salud sobre estrategias de un servicio de salud público. *Rev. salud pública*, 14(2), 248-259.
- Hershendorfer, J., & Woolhiser, D. A. (1987). Disaggregation of daily rainfall. *Journal of Hydrology*, 95(3), 299-322.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1), 118-135.
- Koutsoyiannis, D., & Xanthopoulos, T. (1990). A dynamic model for short-scale rainfall disaggregation. *Hydrological Sciences Journal*, 35(3), 303-322.
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation/Statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: I. Recherche théorique. *Hydrological sciences journal*, 49(4).
- Koutsoyiannis, D., & Pachakis, D. (1996). Deterministic chaos versus stochasticity in analysis and modeling of point rainfall series. *Journal of Geophysical Research: D: Atmospheres*, 101, 26441-26451.
- Koutsoyiannis, D., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). A scaling model of a storm hyetograph. *Water Resources Research*, 29(7), 2345-2361.
- Koutsoyiannis, D., & Onof, C. (2001). Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model. *Journal of Hydrology*, 246(1), 109-122.
- Kossieris, P., Efstratiadis, A., Tsoukalas, I., & Koutsoyiannis, D. (2015). Assessing the performance of Bartlett-Lewis model on the simulation of Athens rainfall.
- Kossieris, P., Koutsoyiannis, D., Onof, C., Tyralis, H., & Efstratiadis, A. (2012). HyetosR: An R package for temporal stochastic simulation of rainfall at fine time scales. European Geosciences Union General Assembly.
- Rodríguez-Iturbe, I., Power, B. F., & Valdes, J. B. (1987). Rectangular pulses point process models for rainfall: analysis of empirical data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 92(D8), 9645-9656.
- Schilling, W. (1991) Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmos. Res.* 27(1/3), 5–21.
- Segond, M. L., Neokleous, N., Makropoulos, C., Onof, C., & Maksimovic, C. (2007). Simulation and spatio-temporal disaggregation of multi-site rainfall data for urban drainage applications. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 917-935.
- Woolhiser, D. A., & Osborn, H. B. (1985). A stochastic model of dimensionless thunderstorm rainfall. *Water Resources Research*, 21(4), 511-522.

Zarris, D., Koutsoyiannis, D., & Karavokiros, G. (1998, September). A simple stochastic rainfall disaggregation scheme for urban drainage modelling. In Proc. Fourth Int. Conf. on Developments in Urban Drainage Modelling (pp. 85-92). London: IAWQ/UNESCO/Imperial College.