



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

**Influencia de la estacionalidad al estimar la variabilidad
interanual de la precipitación mediante distribuciones
derivadas**

**(Influence of seasonality on the estimation of rainfall
interannual variability using derived distributions)**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
mención en Ingeniería Civil

JORGE SEBASTIÁN MORAGA NAVARRETE
CONCEPCIÓN-CHILE
2015

Profesor Guía: Claudio Meier Vargas
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

En trabajos anteriores se ha demostrado que, utilizando sólo unos pocos años de datos, es posible estimar correctamente la distribución de la precipitación anual, usando distribuciones derivadas. Este enfoque requiere ajustar distribuciones de probabilidad para las características externas de las tormentas (altura total caída en cada evento y tiempo entre el inicio de una tormenta y la que le sigue), las cuales en muchos casos muestran una marcada estacionalidad. Con el objetivo de mejorar el desempeño del enfoque de distribuciones derivadas, se propuso estudiar los efectos de incorporar la estacionalidad, separando los años de registro en una estación fría y otra cálida, con duraciones y fechas de inicio constantes.

Dado que la cantidad de tormentas en el registro, y por ende sus características externas, son altamente sensibles al criterio utilizado para identificar eventos independientes, es necesario primero desarrollar una estrategia adecuada para establecer el umbral de tiempo mínimo que debe transcurrir entre dos pulsos de lluvia consecutivos, para determinar que se trata de dos tormentas independientes. Se compararon diversos criterios, utilizando los datos de una red de 52 estaciones meteorológicas en Suiza, para encontrar aquél con mejor desempeño al aplicar el enfoque propuesto. Los resultados muestran que, si bien existen importantes diferencias caso a caso, en general ninguna estrategia para identificar tormentas independientes es superior, teniendo todas un desempeño aceptable.

Al analizar los datos correspondientes a las estaciones frías y cálidas, es posible verificar que las características externas de las tormentas dependen fuertemente de la estacionalidad. Con el enfoque de distribuciones derivadas, utilizando submuestras de 5 años extraídas del remuestreo aleatorio del registro, se comparó la variabilidad interanual de la precipitación, considerando tanto los registros anuales completos como estaciones semi-anales independientes para estimar las distribuciones de las características externas de las tormentas. Los resultados, obtenidos a partir de los registros de 12 estaciones representativas del territorio suizo, muestran claramente que, al incorporar la estacionalidad, es posible estimar de mejor manera la variabilidad interanual con registros cortos. En consecuencia, se recomienda incorporar la estacionalidad en el enfoque de distribuciones derivadas para caracterizar la precipitación anual con pocos años de datos.



*And if the dam breaks open many years too soon
And if there is no room up on the hill
And if your head explodes with dark forebodings too
I'll see you on the dark side of the moon
(Roger Waters)*

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al profesor Claudio Meier por su incondicional apoyo durante el desarrollo de este trabajo, así como a lo largo de los últimos años. El profesor Peter Molnár contribuyó en la discusión de metodologías y referencias. La Dirección de Postgrado de la Universidad de Concepción financió la asistencia a congresos para difusión de resultados, además de beneficiar al autor con una beca de articulación que le permitió desarrollar el programa de magíster.



CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Hipótesis de trabajo	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Metodología de trabajo	3
1.5	Organización de la tesis	3
CAPÍTULO 2	ENFOQUE DE LAS DISTRIBUCIONES DERIVADAS	5
2.1	Criterios de independencia de tormentas	5
2.2	Distribuciones derivadas	7
2.3	Precipitación anual con registros de corta duración	11
2.4	Conclusiones	12
CAPÍTULO 3	MÉTODOS Y DATOS	13
3.1	Área de estudio y datos	13
3.2	Identificación de tormentas independientes	14
3.3	Remuestreo para registros más cortos	16
3.4	Conclusiones	17
CAPÍTULO 4	VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA PRECIPITACIÓN	19
4.1	Tiempo mínimo entre tormentas	19
4.2	Influencia del análisis estacional sobre la estimación de la distribución derivada	24
4.3	Conclusiones	26
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES	27
BIBLIOGRAFÍA	29
ANEXOS	32
Anexo 3.3	Pruebas de autocorrelación para la precipitación anual	32
Anexo 4.1	Tiempos mínimos entre tormentas	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representación de la precipitación mediante pulsos rectangulares	6
Figura 2.2 Funciones de densidad de probabilidad para 200 muestras de 5 años en Concepción	12
Figura 3.1 Ubicación de las 52 estaciones suizas consideradas en el estudio	14
Figura 3.2 Funciones de autocorrelación para los pulsos de precipitación en la estación de Zürich-Kloten	15
Figura 3.3 Subregiones climáticas de Suiza	17
Figura 3.4 Funciones de densidad de probabilidad para 100 submuestras de 5 años en Zürich-Kloten	18
Figura 4.1 Sensibilidad de distintos parámetros al tiempo mínimo entre tormentas T_{b-min} para 12 estaciones seleccionadas	20
Figura 4.2 Desviaciones estándar estimadas con distribuciones derivadas y obtenidas desde la muestra usando tres estrategias para determinar eventos independientes para temporadas anuales	21
Figura 4.3 Desviaciones estándar estimadas con distribuciones derivadas y obtenidas desde la muestra usando tres estrategias para determinar eventos independientes para temporadas cálidas	23
Figura 4.4 Desviaciones estándar estimadas con distribuciones derivadas y obtenidas desde la muestra usando tres estrategias para determinar eventos independientes para temporadas frías	24
Figura 4.5 Desviación estándar de la precipitación anual para 100 submuestras de 5 años en 12 ubicaciones seleccionadas.	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A3.3.1 Resultados test de autocorrelación lag-1 para la precipitación anual.....	32
Tabla A4.1.1 Resultados a partir de distintas estrategias para determinar la independencia entre eventos de precipitación considerando temporadas anuales.....	33
Tabla A4.1.2 Resultados a partir de distintas estrategias para determinar la independencia entre eventos de precipitación considerando temporadas cálidas	35
Tabla A4.1.3 Resultados a partir de distintas estrategias para determinar la independencia entre eventos de precipitación considerando temporadas frías	37



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La precipitación anual y su variabilidad interanual son variables climatológicas de suma importancia en los campos de la hidrología, agricultura, gestión de recursos hídricos, climatología y ciencias ambientales en general. Se trata, además, una variable fundamental para analizar las tendencias de mediano y largo plazo debido a los efectos del cambio climático global.

El comportamiento probabilístico de la precipitación anual está dado por su distribución estadística o función de densidad de probabilidades (PDF, según sus siglas en inglés), la cual comúnmente se obtiene suponiendo un modelo estadístico y ajustándolo a los datos de la serie de alturas totales de precipitaciones anuales, de manera que se considera tan solo un dato por cada año completo de registro. En zonas templadas, el modelo estadístico típicamente utilizado es la distribución normal (Linsley, 1982), la cual requiere contar con al menos 25 o 30 datos para obtener un ajuste que represente razonablemente la población de la cual proviene la muestra. Sin embargo, en un gran número de estaciones, y esto es particularmente cierto en Chile, las series de datos disponibles sólo cubren unos pocos años y los registros suelen ser incompletos, por lo que no es posible estimar adecuadamente los parámetros de la PDF o tener alguna noción de la validez del modelo utilizado. Es importante notar que, al ajustar funciones de probabilidad a datos anuales de precipitación, se ignora gran cantidad de información relevante contenida en los registros pluviográficos. En particular, se desaprovecha toda la información referida a las características externas de las tormentas individuales que componen el registro.

Por otra parte, es sabido que el clima sufre fluctuaciones a la escala de décadas, por lo que ajustar un modelo a una serie de datos de gran extensión, aún con datos completos y confiables, podría no entregar una buena representación del clima actual, puesto que se estaría suponiendo homogeneidad estadística. Se presenta, entonces, un dilema sin solución mediante el enfoque tradicional, ya que los registros extensos que se necesitan para ajustar adecuadamente un modelo estadístico no permiten garantizar que el proceso analizado sea estacionario durante ese largo periodo.

En trabajos anteriores (Pranzini, 2001; Pranzini y Meier, 2001; Moraga, 2014; Meier *et al.*, 2015) se ha demostrado que utilizando un enfoque basado en el concepto de las distribuciones derivadas, que aprovecha la información de las características externas de las tormentas, específicamente el tiempo entre inicio de las tormentas y la altura de agua caída en cada tormenta, es posible caracterizar la precipitación anual y su variabilidad utilizando tan sólo unos pocos años de registros continuos. De esta manera, se pueden soslayar los inconvenientes ya mencionados.

Las características externas de la precipitación son altamente sensibles al criterio que se escoja para determinar qué constituye una tormenta independiente, lo que incide en las estimaciones de las distribuciones marginales de tales características. En la literatura no existe ninguna metodología desarrollada pensando en el enfoque de las distribuciones derivadas para la precipitación anual, por lo que en este trabajo se utilizan dos enfoques propuestos anteriormente para otras aplicaciones (como la confección de curvas intensidad-duración-frecuencia o para el uso en modelos estocásticos de precipitación), y se propone una tercera alternativa, con el fin de encontrar el criterio más adecuado para aplicar distribuciones derivadas.

Se encuentra bien documentado que en muchas regiones templadas, si bien ocurren eventos de precipitación el año completo, los procesos que los originan pueden diferir según la estación meteorológica (Eagleson, 1976; Linsley, 1982), lo que debiese verse reflejado en las características externas de las tormentas. Por lo tanto, se propone que al incorporar la estacionalidad en el análisis se podrá mejorar la caracterización de la precipitación anual utilizando el enfoque de las distribuciones derivadas.

1.2 Hipótesis de trabajo

Al incorporar la estacionalidad en un enfoque de distribuciones derivadas se obtiene una mejor estimación de la variabilidad interanual de la precipitación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Mejorar la estimación de la variabilidad interanual de la precipitación a partir de series cortas incorporando la estacionalidad en el enfoque de distribuciones derivadas.

1.3.2 Objetivos específicos

Analizar la sensibilidad de las características externas de las tormentas al criterio de independencia utilizado.

Comparar criterios de independencia entre tormentas, encontrando aquél que resulte más adecuado para representar la variabilidad interanual de la precipitación mediante distribuciones derivadas.

Incorporar un análisis estacional simple al enfoque de las distribuciones derivadas.

Evaluar el desempeño del método propuesto aplicado a registros de corta duración.

1.4 Metodología de trabajo

Se utilizaron datos de precipitación de una gran red meteorológica para determinar la mejor estrategia para identificar eventos independientes para el enfoque de las distribuciones derivadas. A partir de esto, se abordó el objetivo central del trabajo comparando el desempeño del enfoque propuesto con y sin incorporar la estacionalidad aplicado a registros artificiales de corta duración.

1.5 Organización de la tesis

La motivación del trabajo, la hipótesis y los objetivos se plantean en el Capítulo 1, junto con un resumen de la metodología adoptada. En el Capítulo 2 se discuten las bases teóricas del trabajo. En particular, se comenta la bibliografía disponible acerca de los criterios para identificar eventos de precipitación independientes y se explica el método de las distribuciones derivadas planteado por

Eagleson, destacando su idoneidad para analizar registros cortos de precipitación. En el Capítulo 3 se describen los datos y área de estudio, se presentan las distintas estrategias utilizadas para separar eventos independientes, y se explica la metodología propuesta para generar submuestras desde los registros y evaluar el desempeño del método propuesto. En el Capítulo 4 se presenta un análisis de la sensibilidad de las características externas de las tormentas al criterio de independencia escogido, y se entregan los tiempos mínimos entre tormentas encontrados con cada estrategia utilizada, tanto para años completos como para temporadas semi-anales. Además, se presentan los resultados para distribuciones derivadas de la precipitación anual obtenidas a partir de submuestras de corta duración, y se comparan los casos con y sin considerar estacionalidad. En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y se comentan los principales resultados y futuras líneas de investigación.



CAPÍTULO 2 ENFOQUE DE LAS DISTRIBUCIONES DERIVADAS

El método típicamente utilizado para representar la distribución de la precipitación anual consiste en ajustar una distribución normal o lognormal a una serie de datos de precipitación anual total. Con este enfoque, la información para cada año de datos en la serie se resume en un solo valor de altura de agua caída, descartándose una gran cantidad de información disponible en los registros de precipitación.

El enfoque utilizado en este trabajo, planteado por primera vez por Eagleson (1978), se basa en el método de las distribuciones derivadas (Benjamin y Cornell, 1970), según el cual la distribución de interés es obtenida matemáticamente a partir de las distribuciones univariadas o marginales de las variables que explican el proceso. En el caso de la precipitación anual, su PDF se obtiene ajustando modelos estadísticos a los datos de dos características externas de los eventos de precipitación: el tiempo transcurrido entre el inicio de tormentas sucesivas y la altura de agua caída en cada tormenta.

2.1 Criterios de independencia de tormentas

El primer paso para aplicar la metodología es identificar las tormentas o eventos de lluvia independientes; esto no siempre es trivial debido a la naturaleza de los procesos geofísicos que ocasionan las precipitaciones. Por ejemplo, una tormenta frontal o estratiforme de larga duración puede presentar breves períodos secos (intermitencias) que podrían confundirse con el fin de la tormenta, cuando en realidad son parte del mismo evento de precipitación.

Ante esta complejidad, podría ser tentador identificar las tormentas independientes basándose en información estrictamente relacionada con los procesos geofísicos que las originaron. Dicho enfoque, sin embargo, es impracticable; el requerimiento de datos sería extensivo y, de cualquier manera, aún habría espacio para la interpretación arbitraria, por cuanto los fenómenos atmosféricos responsables de la precipitación son diversos y sumamente complejos. Es por esto que cuando se busca modelar la secuencia de tormentas, usualmente se opta por un enfoque más bien fenomenológico, es decir, basándose en la observación y medición de las precipitaciones propiamente tales.

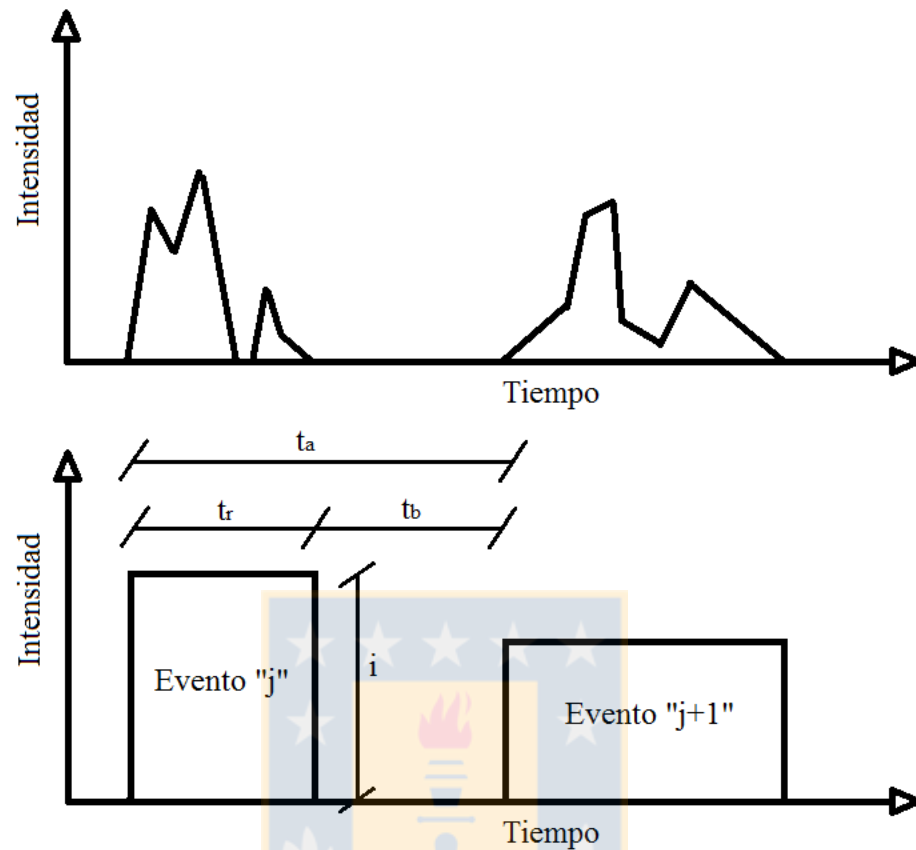


Figura 2.1 Representación de la precipitación mediante pulsos rectangulares

El modelo utilizado para representar la secuencia de tormentas es el de la precipitación como pulsos rectangulares (Figura 2.1), que considera a cada tormenta como un solo evento con intensidad media “ i ”. Este enfoque ignora toda la información relacionada con la variabilidad durante una tormenta (sus características internas) y, en cambio, se enfoca sólo en sus propiedades externas, que son su duración “ t_r ”, el tiempo entre tormentas “ t_b ”, el tiempo entre el inicio de tormentas consecutivas “ t_a ”, y la altura de precipitación caída en cada tormenta “ h ”, igual al producto de su intensidad media “ i ” por su duración “ t_r ”.

Se hace necesario, entonces, definir un criterio de independencia que permita singularizar tormentas, diferenciando los períodos secos que realmente separan eventos independientes de aquellas intermitencias más cortas, que ocurren dentro de una misma tormenta. Es posible encontrar una gran variedad de criterios de independencia en la literatura, los que están sintetizados

en Dunkerley (2008); éste además ilustra la sensibilidad de las características obtenidas desde la secuencia de tormentas ante cambios en los criterios de independencia utilizados.

En general, la mayoría de los autores ha optado por escoger un período seco mínimo entre tormentas, $t_{b-\min}$, como condición suficiente para calificarlas como eventos independientes. En muchos casos, el $t_{b-\min}$ se decide en forma arbitraria, considerando la escala temporal del problema a resolver. Por ejemplo, Vaes (1999), preocupado del diseño de sistemas de drenaje urbano, plantea que dos eventos de lluvia (tales que el sistema de drenaje pudiese fallar) son independientes si no ocurren en la misma noche o día, planteando entonces un período seco mínimo de 12 horas. Sin embargo, también existen intentos de determinar estadísticamente la independencia entre eventos consecutivos de precipitación, sin considerar las aplicaciones posteriores de los resultados. Por ejemplo, se ha definido el tiempo de separación como aquél para el cual la función de autocorrelación para los pulsos de precipitación se hace mínima (Grace y Eagleson 1967; Sariahmed y Kisiel, 1968; Gaál *et al.*, 2014). Otra estrategia busca que el coeficiente de variación de los tiempos entre tormentas t_b sea unitario, como ocurriría para una variable distribuida exponencialmente (Restrepo-Posada y Eagleson, 1982; US EPA, 1989). Sin embargo, ninguna de estas opciones ha sido utilizada anteriormente para caracterizar la precipitación anual mediante distribuciones derivadas.

2.2 Distribuciones derivadas

La altura de precipitación en un cierto año es la suma de todas las alturas de precipitación aportadas por las tormentas individuales durante aquel período. El método propuesto por Eagleson (1978) se basa en que, conociendo las distribuciones estadísticas marginales de la altura de precipitación de las tormentas, h , y del tiempo entre el inicio de tormentas sucesivas, t_a , se puede encontrar la distribución de la altura de precipitación para una temporada, P_a , tal como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$P_a(v) = \sum_{j=1}^v h_j, \quad (2.1)$$

Donde v es el número de tormentas durante un año y h_j es la altura de precipitación caída en la tormenta “ j ”. Por supuesto, en el caso general de un año calendario, tanto v como h son variables aleatorias.

Escogiendo las funciones de distribución adecuadas, Eagleson (1978) mostró que es posible obtener una solución analítica para derivar la PDF de la precipitación anual. De la Ecuación 2.1 se puede observar que, en términos matemáticos, la precipitación anual es una variable compuesta por las variables “altura de precipitación en cada tormenta” y “número de tormentas en un año”. Si se conocen las distribuciones univariadas de probabilidades de cada una de estas variables, llamadas “distribuciones marginales”, es posible encontrar la distribución de probabilidades de la variable compuesta P_a con el método de las distribuciones derivadas:

$$f_{P_a}(y) = \sum_{v=0}^{\infty} f_{P_a(v)}(y) P_{\theta}(v), \text{ con } y > 0, \quad (2.2)$$

Donde:

f_{P_a} : Distribución de probabilidades de la precipitación anual

$P_{\theta}(v)$: Probabilidad de que ocurran exactamente “v” tormentas en un año

$f_{P_a(v)}(y)$: Densidad de probabilidad de una altura de agua total “y” distribuida en “v” tormentas en un año

La PDF de la precipitación anual se puede expresar como se muestra en la Ecuación 2.2. En términos matemáticos, la ecuación representa la densidad de probabilidad de que la suma de las alturas de agua contribuidas por “v” tormentas en un año sea exactamente “y”, ponderada por la probabilidad discreta de que ocurran exactamente “v” tormentas ese año, lo cual está sumado sobre todos los posibles números de tormentas en un año (desde 1 hasta infinito).

De esta manera, en lo práctico, el problema se reduce a encontrar buenos modelos probabilísticos para $P_{\theta}(v)$, la probabilidad de que existan exactamente “v” tormentas en un año, y $f_{P_a(v)}(y)$, la densidad de probabilidad correspondiente a una altura total “y” distribuida en “v” tormentas.

2.2.1 Distribución del tiempo entre tormentas

El proceso de ocurrencia de eventos de precipitación es representado por una distribución tipo Poisson, que supone que los eventos sucesivos son independientes entre sí y que ocurren con una frecuencia promedio “ ω ”. El modelo determina la probabilidad de ocurrencia de un evento en un intervalo de tiempo Δt , lo que equivale a determinar la probabilidad de que ocurran exactamente “v” eventos en un período “t”, lo que se expresa matemáticamente en Ecuación 2.3.

$$P_{\theta}(v) = \frac{(\omega t)^v e^{-\omega t}}{v!}, \text{ con } v = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.3)$$

En teoría, el tiempo que transcurre entre tormentas depende no sólo del número de eventos que ocurran durante un período, sino también de la duración de dichos eventos. En la práctica, se desprecia la duración de las tormentas por ser muy inferior al tiempo entre tormentas, lo cual permite describir el tiempo entre tormentas, T_a , como un proceso exponencial de acuerdo a la Ecuación 2.4.

$$f_{T_a}(u) = \omega e^{-\omega u}, \text{ con } u > 0, \quad (2.4)$$

Si bien es posible escoger cualquier distribución para describir la variable T_a , el modelo exponencial permite, como se muestra a continuación, derivar una solución analítica para f_{P_a} .

2.2.2 Distribución de las alturas de precipitación

Se necesita ahora un modelo probabilístico que describa la altura de precipitación de cada tormenta, h_j , de manera de obtener $f_{P_a(v)}(y)$, la densidad de probabilidad correspondiente a una altura total “ y ” distribuida en “ v ” eventos. Buscando siempre encontrar una expresión sencilla para “ f_{P_a} ”, y siguiendo a Eagleson (1978), se decidió utilizar la distribución Gamma(κ, λ), cuya expresión matemática se describe en la Ecuación 2.5.

$$f_h(u) = \frac{\lambda (\lambda u)^{(\kappa - 1)} e^{-\lambda u}}{\Gamma(\kappa)}, \text{ } u > 0, \quad (2.5)$$

Esta distribución marginal queda determinada por los parámetros “ λ ”, de escala, y “ κ ”, de forma, los cuales están dados por la Ecuación 2.6:

$$m_h = \frac{\kappa}{\lambda}, \quad (2.6)$$

$$\sigma_h^2 = \frac{\kappa}{\lambda^2}, \quad (2.7)$$

donde “ m_h ” y “ σ_h ” son la media y la desviación estándar de “ h ”, respectivamente.

Una de las propiedades características de la distribución Gamma(κ, λ), y la razón por la cual fue el modelo escogido para este método, es su capacidad “regenerativa”, lo cual significa que la sumatoria de “ v ” variables independientes, cada una con distribución Gamma con parámetros “ λ ” y “ κ ” comunes, entrega una variable de distribución Gamma($v\kappa, \lambda$). De esta manera, la distribución

de $P_a(v)$, la suma de las alturas caídas en v eventos independientes, queda descrita por la Ecuación 2.8.

$$f_{P_a(v)}(y) = \frac{\lambda (\lambda y)^{(v\kappa - 1)} e^{-\lambda y}}{\Gamma(v\kappa)}, y > 0, \quad (2.8)$$

2.2.3 Obtención analítica de la PDF

Reemplazando las Ecuaciones 2.3 y 2.8 en la Ecuación 2.2 es posible obtener la expresión para la función de densidad de probabilidades (la PDF) de la precipitación, f_{P_a} , durante un determinado periodo o temporada con duración “ t ”, descrita por la Ecuación 2.9.

$$f_{P_a}(y) = \sum_{v=1}^{\infty} f_{P_a(v)}(y) P_{\theta}(v) = \frac{\lambda (\lambda y)^{(v\kappa - 1)} e^{-\lambda y}}{\Gamma(v\kappa)} \frac{(\omega t)^v e^{-\omega t}}{v!}, \text{ con } y > 0, \quad (2.9)$$

Resta considerar la probabilidad discreta de que no ocurra ningún evento de precipitación durante la temporada, es decir, $v = 0$. Esto equivaldría a afirmar que la precipitación total anual, P_a , fuese igual a cero, por lo que esa probabilidad se puede calcular como un caso particular de la Ecuación 2.3, como se muestra en la Ecuación 2.10.

$$f_{P_a}(0) = P_{\theta}(v = 0) = e^{-\omega t}, \quad (2.10)$$

Cabe destacar que el valor de “ t ” puede corresponder a períodos menores a un año, como mostró Eagleson (1978) para su análisis en climas áridos y mediterráneos, con temporadas de lluvia acotadas. Esto también posibilita analizar la precipitación anual como la suma de múltiples estaciones más cortas, como se plantea en este trabajo.

2.2.4 Obtención analítica de la CDF

Conociendo la PDF es posible encontrar la función de distribución acumulada, CDF, para la precipitación anual “ P_a ”, integrando la Ecuación 2.9 como en la Ecuación 2.11.

$$F_{P_a}(y) = \int_0^y f_{P_a}(x) dx, \quad (2.11)$$

Reemplazando las Ecuaciones 2.9 y 2.10 en 2.11 e integrando, se obtiene la Ecuación 2.12.

$$F_{P_a}(y) = e^{-\omega t} + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(\omega t)^v \cdot e^{-\omega t}}{v!} P[v\kappa, \lambda y], \text{ con } y > 0, \quad (2.12)$$

donde,

$$P[\nu\kappa, \lambda y] = \frac{\int_0^{\lambda y} z^{(\nu\kappa-1)} e^{-z} dz}{\Gamma(\nu\kappa)}, \quad (2.13)$$

se conoce como la función Gamma incompleta de Pearson. De esta manera queda completamente definida la CDF para la precipitación anual en función de los tres parámetros obtenidos a partir de la secuencia de tormentas: “ λ ”, “ ω ” y “ κ ”.

2.3 Precipitación anual con registros de corta duración

En trabajos anteriores (Pranzini, 2001; Moraga, 2014; Meier *et al.*, 2015) se exploró la posibilidad de utilizar el enfoque de las distribuciones derivadas para caracterizar la distribución anual utilizando registros de corta duración, como propuso originalmente Eagleson (1978). Esto se hizo dividiendo registros de larga data en temporadas de un año, y confeccionando luego un gran número de registros artificiales de corta duración (entre 3 a 10 años), mediante un remuestreo aleatorio del registro inicial, para analizar la dispersión de los resultados obtenidos.

Los resultados de Moraga (2014) y Meier *et al.* (2015) muestran que la dispersión de las distribuciones de probabilidad obtenidas es mucho menor que la calculada ajustando los datos anuales a una distribución normal o log-normal (Figura 2.2). Los resultados para las localidades de Lugano y Concepción muestran muy buenos desempeños incluso para registros con sólo 5 años de datos. En este trabajo, se adoptó una metodología similar para evaluar el efecto de considerar la estacionalidad de los datos al ajustar las distribuciones marginales de las características externas de las tormentas.

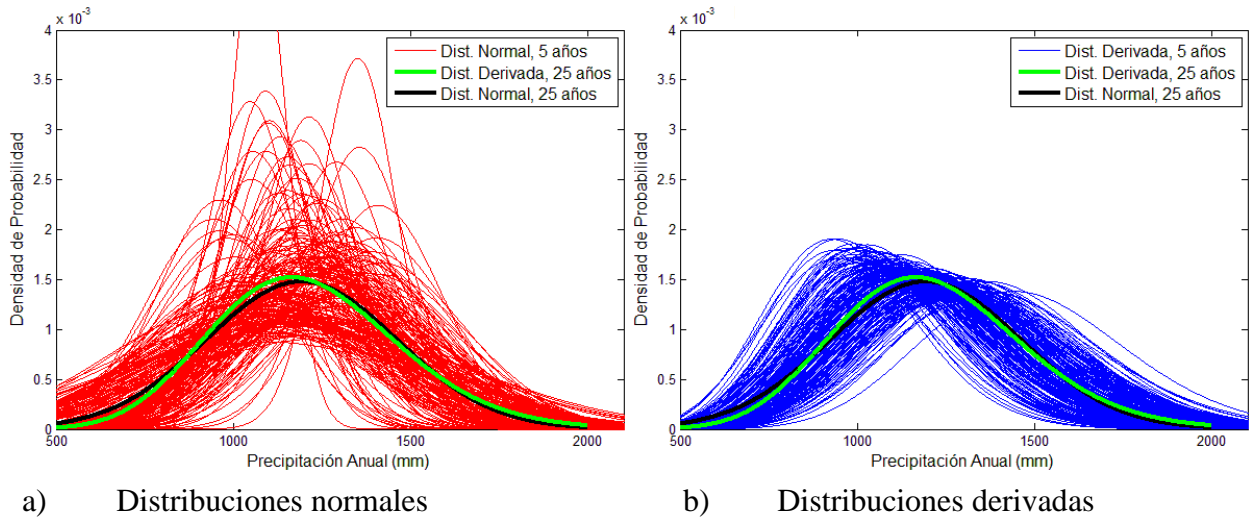


Figura 2.2 Funciones de densidad de probabilidad para 200 muestras de 5 años en Concepción (extraído de Moraga, 2014)

2.4 Conclusiones

A partir de la revisión de varias experiencias disponibles en la literatura, se concluye que se necesita desarrollar un criterio de independencia entre tormentas adecuado para aplicar el enfoque de las distribuciones derivadas.

El enfoque de las distribuciones derivadas, que se basa en el ajuste de distribuciones marginales para las características externas de las tormentas, es una gran herramienta para caracterizar la precipitación anual, especialmente cuando se dispone de registros de corta duración. Dada la marcada estacionalidad que se puede observar en las características externas de las tormentas, surge el interés por estudiar el efecto que tiene el incorporar la estacionalidad como parte del enfoque para encontrar la variabilidad interanual de la precipitación.

CAPÍTULO 3 MÉTODOS Y DATOS

La metodología propuesta se divide en dos etapas: Primero, se evalúa la mejor estrategia para determinar el criterio de independencia entre tormentas. Para esto se utilizan los registros completos correspondientes a 52 estaciones ubicadas en toda Suiza, comparando la variabilidad interanual obtenida mediante los distintos criterios con aquella observada para cada muestra de datos.

En segundo lugar, se verifica la hipótesis que el considerar temporadas semi-anales mejora la estimación de la distribución derivada de la precipitación anual. Para ello se generan registros sintéticos de corta duración, a partir de un remuestreo aleatorio de las temporadas del registro original, se obtienen las distribuciones derivadas para las temporadas cálidas y frías y se compara su convolución con la distribución obtenida utilizando temporadas anuales.

3.1 Área de estudio y datos

Se utilizaron los datos de precipitación de 52 estaciones de la red del Servicio Meteorológico Federal Suizo, MeteoSwiss. Cada uno de los registros comprende 32 años de datos pluviográficos, con resolución de 10 minutos entre Abril de 1982 y Marzo de 2014. En todos los casos, los datos fueron recolectados por un pluviómetro Lambrecht de cubetas basculantes, el cual registra el total de veces que la cubeta se llenó durante un período, totalizando la cantidad de agua capturada.

En cada estación los registros se dividieron en una estación cálida (entre el 1 de Abril y el 30 de Septiembre) y una estación fría (entre el 1 de Octubre y el 31 de Marzo), siguiendo a Gaál *et al.* (2014). Así, para cada ubicación de Suiza se consideraron un registro con temporada anual (entre el 1 de Abril y el 31 de Marzo del año siguiente) y dos registros de temporadas semi-anales. De esta manera se comparó el efecto de incorporar la estacionalidad en el enfoque propuesto.

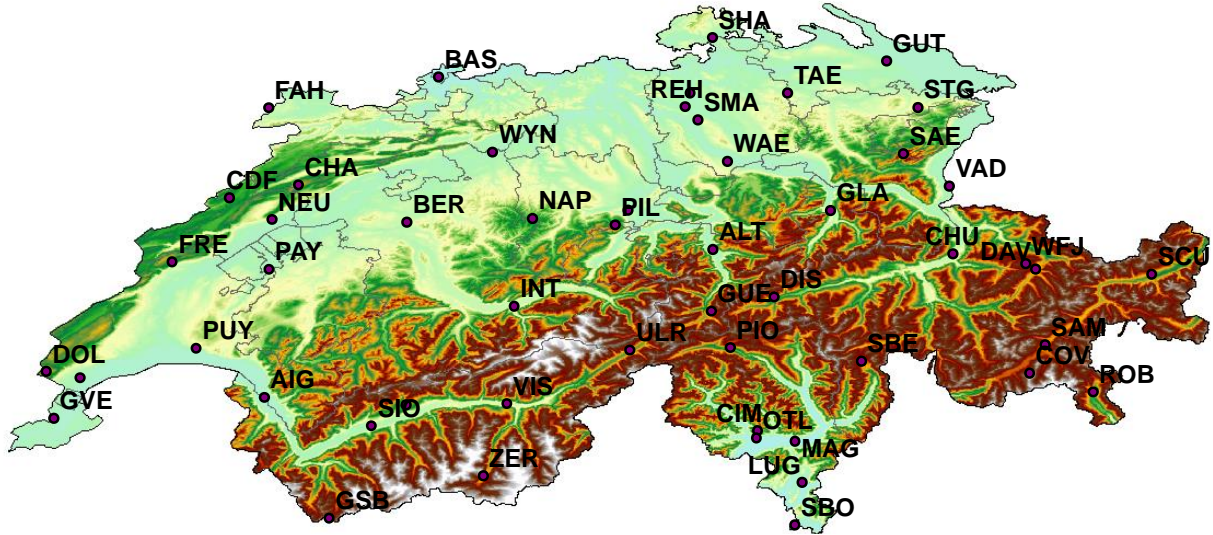


Figura 3.1 Ubicación de las 52 estaciones suizas consideradas en el estudio

3.2 Identificación de tormentas independientes

Previo a aplicar el método de las distribuciones derivadas, fue necesario identificar la secuencia de eventos independientes a partir del registro de precipitación. En vista de que no existe un criterio universalmente aceptado para este fin, se aplicaron tres estrategias distintas y se compararon luego sus resultados, escogiendo aquella que resultó más apta para el objetivo de este trabajo.

3.2.1 Autocorrelación del registro de tormentas

La primera alternativa corresponde a minimizar el coeficiente de autocorrelación del registro de pulsos de precipitación (Grace y Eagleson 1967; Sariahmed y Kisiel, 1968). Este enfoque, que ya ha sido utilizado para estaciones suizas por Gaál *et al.* (2014), consiste en separar el registro completo en temporadas individuales y encontrar la función de autocorrelación para cada año (Figura 3.2). Se escogió como tiempo mínimo entre tormentas aquel valor para el cual el coeficiente de autocorrelación promedio sobre todos los años del registro fuese estadísticamente igual a cero, con nivel de significancia $\alpha = 0.1$.

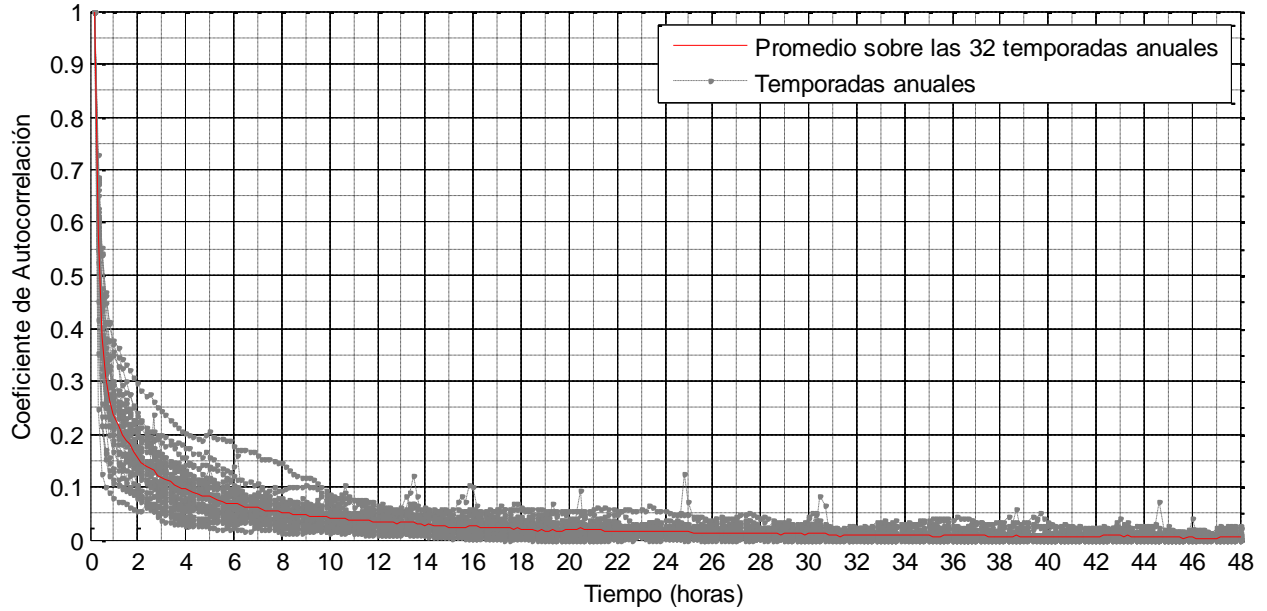


Figura 3.2 Funciones de autocorrelación para los pulsos de precipitación en la estación de Zürich-Kloten

3.2.2 Coeficiente de variación del tiempo entre tormentas

Otra alternativa se basa en maximizar el ajuste de los tiempos entre tormentas a una distribución exponencial, aprovechando la propiedad de que el coeficiente de variación de la distribución exponencial es igual a 1 (Restrepo-Posada y Eagleson, 1982; US EPA, 1989), de acuerdo a la Ecuación 3.1.

$$CV(t_b) = \frac{\text{desv}(t_b)}{\text{media}(t_b)} = 1 , \tag{3.1}$$

Para cada una de las ubicaciones, se identificaron los eventos de precipitación para diversos tiempos mínimos entre tormentas, crecientes entre 60 y 2880 minutos (48 horas), con pasos de 20 minutos. En cada caso, se encontró la desviación estándar y la media de la serie de tiempos entre tormentas, t_b . Se escogió como criterio de independencia el menor tiempo mínimo entre tormentas que entregara un coeficiente de variación igual a 1.

3.2.3 Número de tormentas por año

Se propone que una secuencia de tormentas independientes debiese ajustarse correctamente a una distribución de probabilidades tipo Poisson. Para determinar si ese es el caso, se utilizó el método propuesto por Cunnane (1979) y Askar y Rouselle (1987), tal como hicieron Cruise y Arora (1990) en un estudio de crecidas fluviales. Esta prueba consiste en buscar que el cociente entre la varianza y la media del número de tormentas por año N se aproxime a la unidad, según la Ecuación 3.2.

$$R = \frac{\text{var}(N)}{\text{media}(N)} = 1, \quad (3.2)$$

Se separaron eventos independientes probando con un tiempo mínimo entre tormentas desde los 60 hasta los 2880 minutos, con paso de 20 minutos. En cada caso, se calculó R y se escogió, para cada estación, el menor valor de $t_{b-\text{min}}$ para el que se cumpliera la condición.

3.3 Remuestreo para registros más cortos

A partir de la base de datos disponibles, se seleccionaron 12 estaciones correspondientes a cada una de las sub-regiones hidroclimáticas suizas (Figura 3.3), según lo definido por Schüepp y Gensler (1980). Los registros de 32 años de duración fueron divididos en 32 temporadas individuales (anuales, y semi-anuales frías y cálidas) y luego se generaron submuestras equivalentes a registros de 5 años de duración, seleccionando cinco temporadas anuales (o bien cinco pares de temporadas semestrales, en el caso estacional) al azar. Este proceso se repitió 100 veces para cada estación, calculándose en cada ocasión la distribución derivada para la precipitación anual.

Este enfoque de remuestreo acarrea implícitamente la hipótesis de que la autocorrelación anual de la serie de datos sea despreciable, es decir, que lo que ocurre con la precipitación de un año no tiene correlación con la precipitación del año siguiente. Sólo de esta manera sería posible “cortar” el registro completo en tramos de un año para poder generar nuevos registros artificiales. La autocorrelación anual fue verificada mediante el test estadístico τ de Kendall (Ferguson *et al.*, 2000), el cual indicó que no se rechaza la hipótesis nula de que no existe autocorrelación para los datos de precipitación total anual para 48 de los 52 casos (Anexo 3.3).

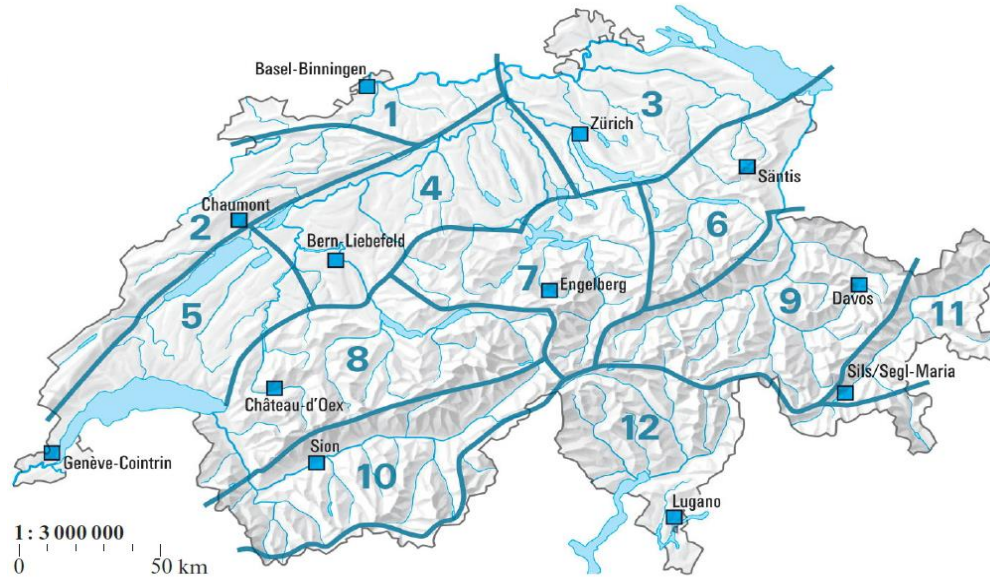


Figura 3.3 Subregiones climáticas de Suiza (extraído de Schüepp y Gensler, 1990)

Para evaluar el efecto de considerar la estacionalidad, se calculó la distribución de la precipitación anual mediante la convolución de las distribuciones correspondientes a las temporadas frías y cálidas. Luego, se comparó el desempeño de los distintos métodos observando la desviación estándar de cada distribución como medida de la variabilidad interanual. Un ejemplo de las distribuciones encontradas para el registro correspondiente a Zürich-Kloten, se muestra en la

Figura 3.4.

3.4 Conclusiones

Por una parte, se propone una metodología que permite escoger un criterio de independencia entre tormentas adecuado para el enfoque propuesto, teniendo en cuenta su capacidad para reproducir la variabilidad interanual de la precipitación al usar registros de larga data.

Por otra parte, se propone utilizar submuestras de corta duración obtenidas a partir del remuestreo de temporadas individuales provenientes de los registros originales. De esta manera, es posible evaluar, para registros de corta duración, el efecto de incorporar la estacionalidad como parte del enfoque de las distribuciones derivadas.

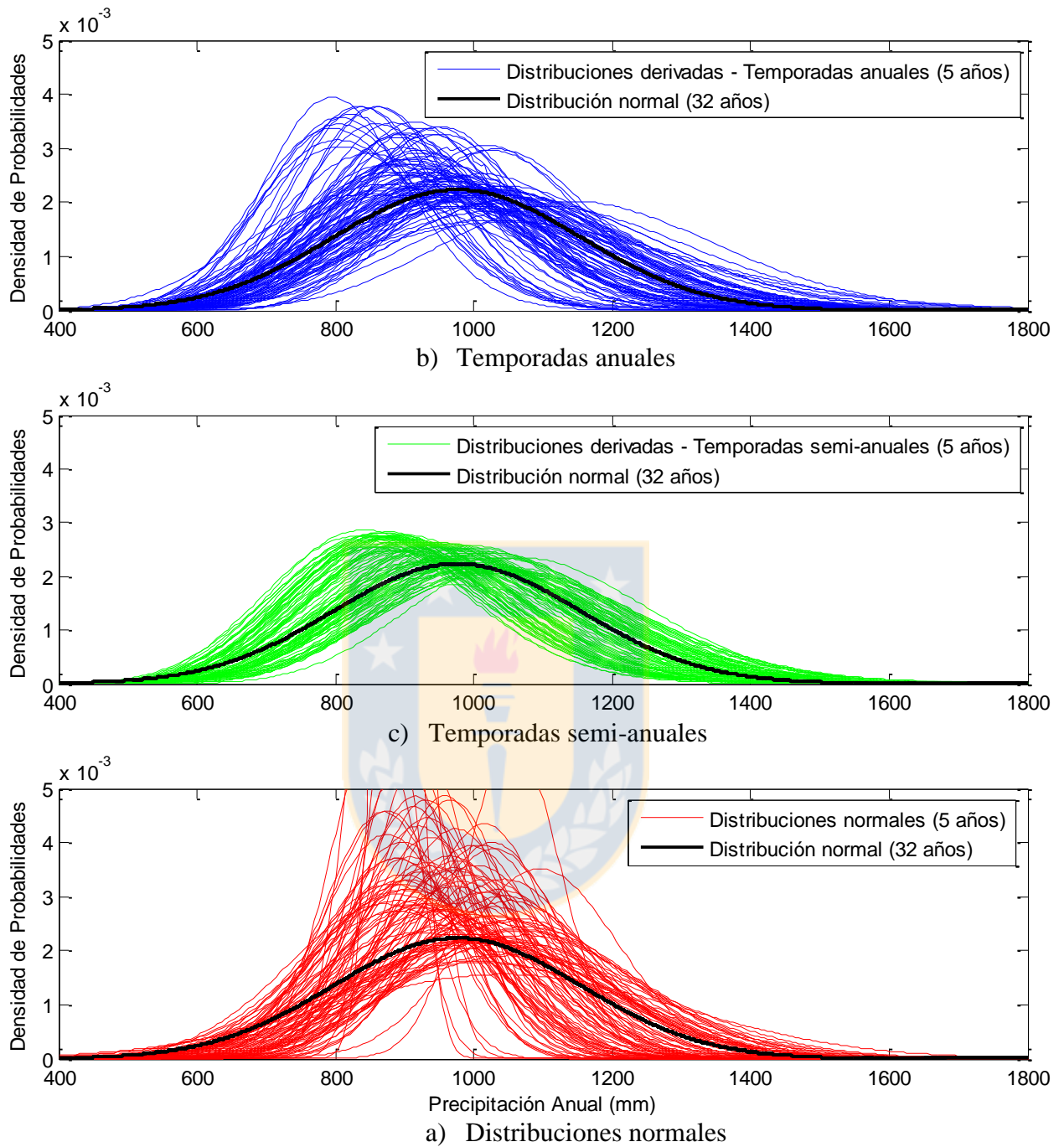


Figura 3.4 Funciones de densidad de probabilidad para 100 submuestras de 5 años en Zürich-Kloten

CAPÍTULO 4 VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA PRECIPITACIÓN

4.1 Tiempo mínimo entre tormentas

Dunkerley (2008) y Joo *et al.* (2013) han destacado lo importante que es la determinación de los eventos independientes de precipitación al calcular las características externas de las tormentas. La Figura 4.1 muestra la variación de los coeficientes omega (ω , a), lambda (λ , b) y kappa (κ , c) de las distribuciones marginales, al variar el tiempo mínimo entre tormentas con el que se define la secuencia de eventos, para 12 ubicaciones seleccionadas de la base de datos.

Se observa que, en el rango entre una y 24 horas, los parámetros de las distribuciones marginales son altamente sensibles al criterio de independencia utilizado. Esto es particularmente cierto para omega y kappa, que en algunos casos muestran variaciones superiores al 200%. La Figura 4.1 (d) también muestra la sensibilidad de la desviación estándar de la precipitación anual, calculada utilizando distribuciones derivadas. Si bien la magnitud de la desviación estándar varía bastante dependiendo de la estación seleccionada, la sensibilidad con respecto al tiempo mínimo entre tormentas muestra el mismo comportamiento en los 12 lugares considerados.

Lo anterior ilustra la importancia de definir correctamente el criterio de independencia entre eventos. Dado que no existe ninguna experiencia previa validada para aplicar el enfoque de distribuciones derivadas a la precipitación anual, se compararon tres estrategias de acuerdo a su capacidad para representar la desviación estándar observada para la precipitación anual a partir de registros de larga data (32 años) en 52 ubicaciones distintas.

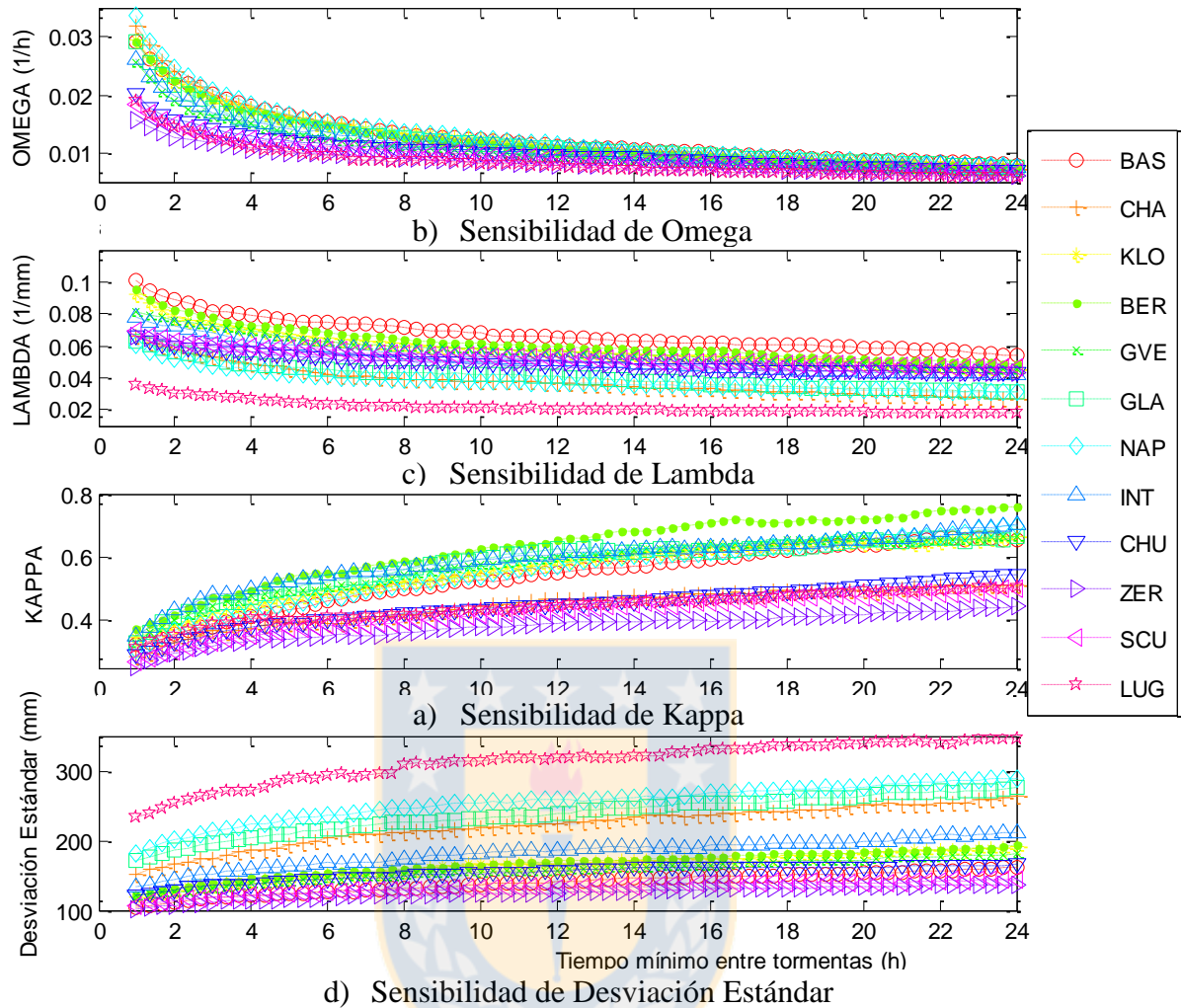


Figura 4.1 Sensibilidad de distintos parámetros al tiempo mínimo entre tormentas T_{b-min} para 12 estaciones seleccionadas

4.1.1 Temporadas anuales

Se compararon las tres metodologías descritas en la sección 3.2 para determinar el criterio de independencia entre tormentas. Los distintos tiempos mínimos entre tormentas encontrados para cada ubicación, considerando tanto el registro completo como sólo las temporadas cálidas o frías, se encuentran detallados en el Anexo 4.1.

El desempeño de cada estrategia se determinó comparando la desviación estándar de la distribución derivada con la correspondiente desviación estándar de la muestra, para los 32 años de datos y para cada una de las 52 localidades. La Figura 4.2 muestra los resultados de las regresiones lineales,

considerando temporadas anuales para todas las ubicaciones, agrupadas según subregión climática, de acuerdo a Schüepp y Gensler (1990).

Resalta el hecho de que para las tres metodologías o estrategias el coeficiente de determinación R^2 es similar y muy cercano a uno, lo cual indica que, en general, la desviación estándar obtenida mediante el enfoque de distribuciones derivadas es cercana a la observada en el registro completo.

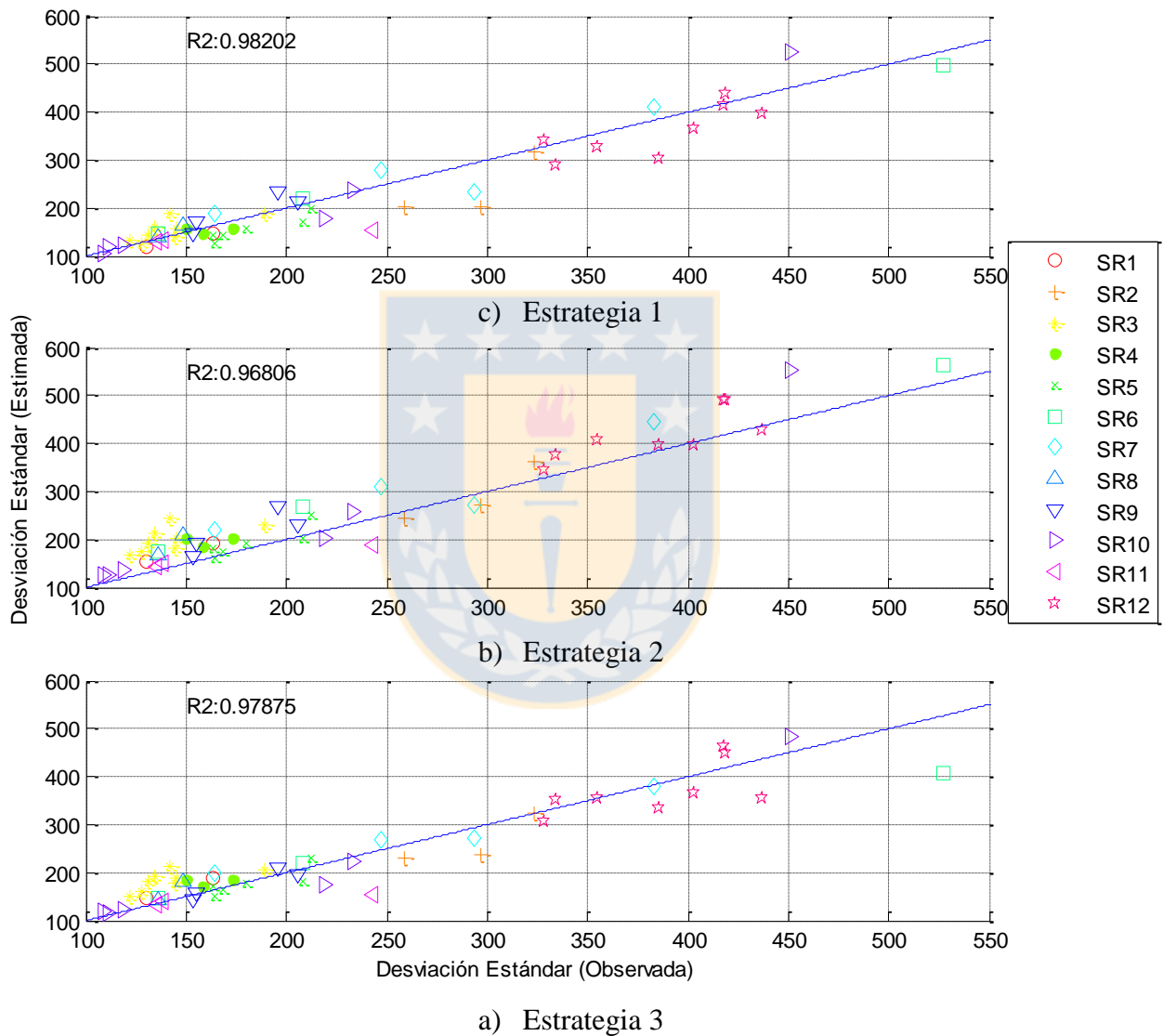


Figura 4.2 Desviaciones estándar estimadas con distribuciones derivadas y obtenidas desde la muestra usando tres estrategias para determinar eventos independientes para temporadas anuales

También es interesante observar las diferencias entre las distintas subregiones. No sólo se aprecia que la magnitud de T_{b-min} varía de manera regular con la ubicación, sino que además las diferencias

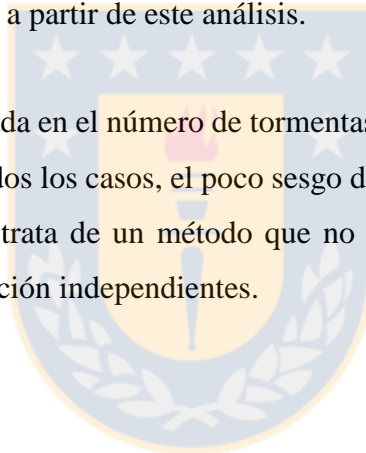
en los resultados son muy grandes para la subregión de Valais (SR 10) y muy pequeñas para las subregiones del *plateau* noreste, central y occidental (SR 3, 4 y 5, respectivamente).

4.1.2 Temporadas semi-anales

Los registros de precipitación se dividieron en temporadas cálidas, entre el 1 de Abril y el 30 de Septiembre, y frías, entre el 1 de Octubre y el 31 de Marzo. En ambos casos, se aplicaron nuevamente las tres estrategias distintas para encontrar un criterio de independencia, comparándose luego los resultados como se muestra en las Figuras 4.3 y 4.4.

En general, todas las estrategias adoptadas entregan buenos resultados para ambas temporadas. La Estrategia 2 entrega un coeficiente de determinación inferior en ambos casos, pero no es posible discernir sobre la mejor opción a partir de este análisis.

Se escogió la Estrategia 3, basada en el número de tormentas por año, debido al alto coeficiente de determinación entregado en todos los casos, el poco sesgo de los resultados, a su simplicidad en la aplicación, y al hecho que se trata de un método que no había sido utilizado hasta ahora para identificar eventos de precipitación independientes.



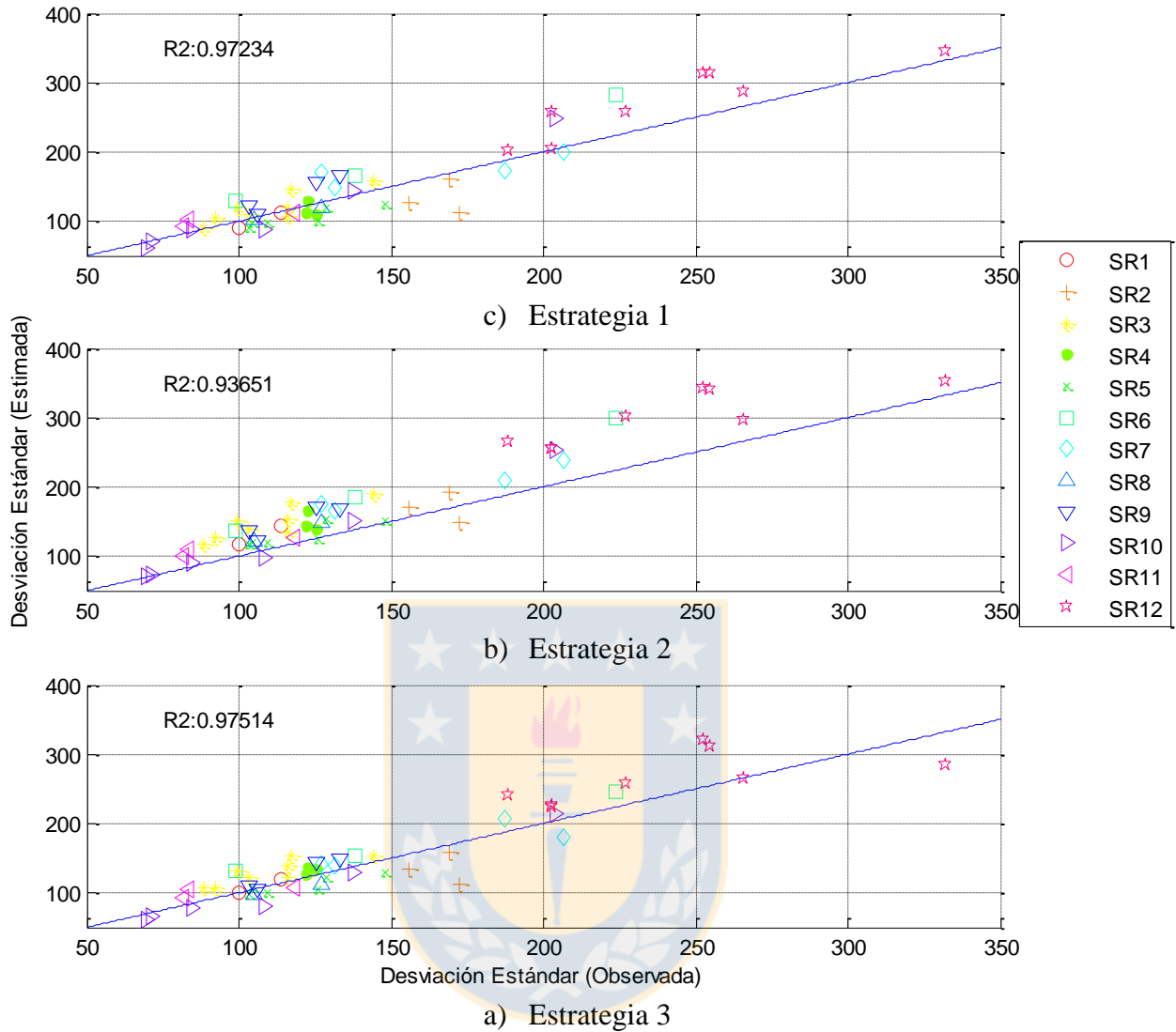


Figura 4.3 Desviaciones estándar estimadas con distribuciones derivadas y obtenidas desde la muestra usando tres estrategias para determinar eventos independientes para temporadas cálidas

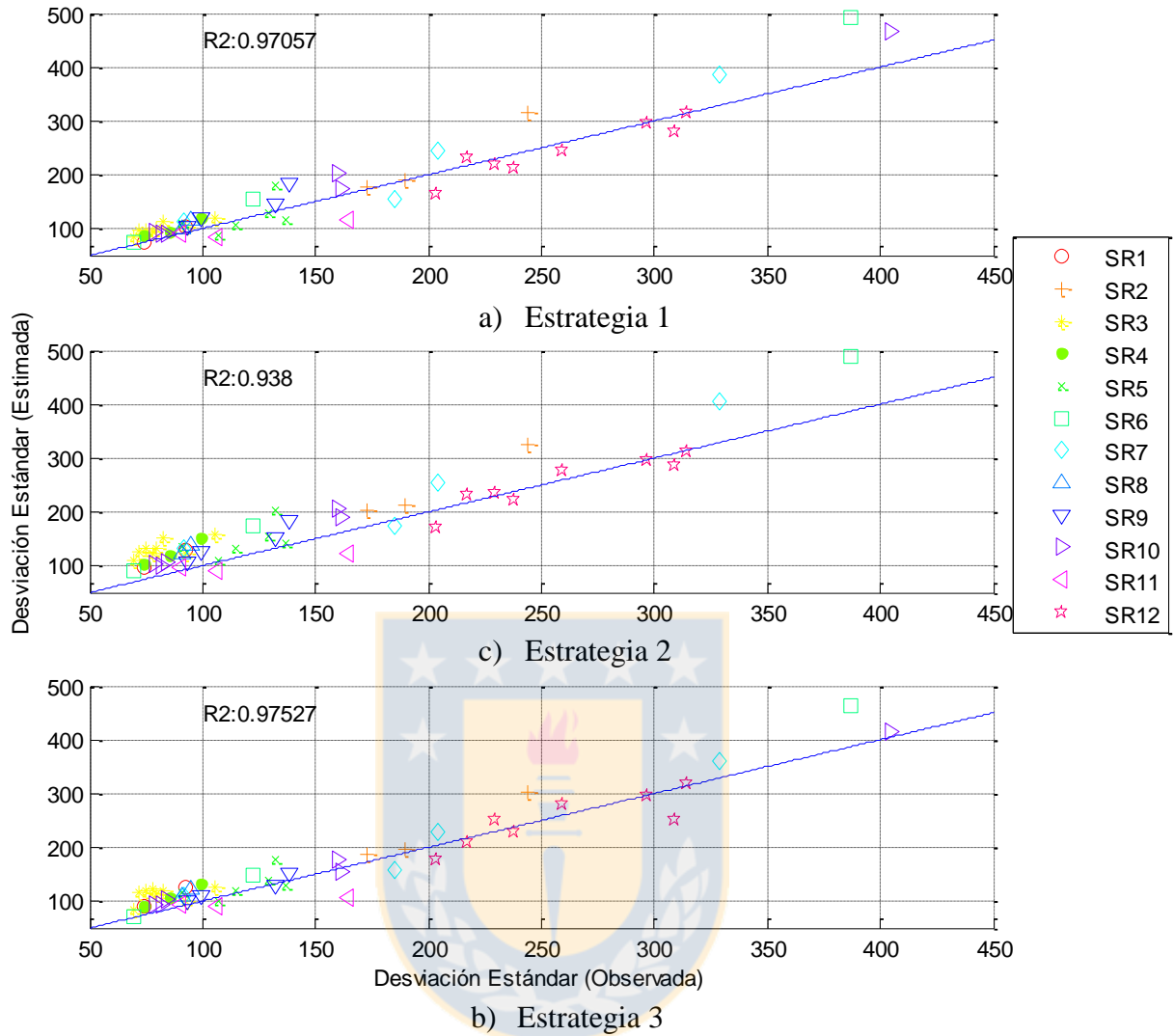


Figura 4.4 Desviaciones estándar estimadas con distribuciones derivadas y obtenidas desde la muestra usando tres estrategias para determinar eventos independientes para temporadas frías

4.2 Influencia la estacionalidad sobre la estimación de la precipitación anual

Se utilizaron los registros de 32 años de datos para 12 estaciones seleccionadas, correspondientes a las 12 subregiones climáticas de Suiza. Cada registro fue separado en 32 temporadas cálidas y 32 temporadas frías. Luego, los registros fueron remuestreados de manera de generar 100 submuestras independientes de 5 años de longitud cada una, tanto para las temporadas frías como para las cálidas. Para cada submuestra de 5 años, se identificó el tiempo mínimo entre tormentas utilizando la Estrategia 3 descrita en la sección 3.2.3, y se estimó luego la distribución de la precipitación

anual de dos maneras: Como una distribución derivada para temporadas anuales y como la convolución de las distribuciones derivadas obtenidas para las dos temporadas semi-anales.

Para cada distribución resultante se calculó la desviación estándar como medida de la variabilidad interanual. En la Figura 4.5 se muestra la media +/- la desviación estándar de los 100 valores de desviación estándar, obtenidos para cada estación estudiada. Además, se comparan estos resultados, obtenidos con distribuciones derivadas, con las desviaciones estándar observadas para los cinco valores de precipitación anual en cada submuestra del registro, así como con la desviación estándar observada para los 32 años del registro completo.

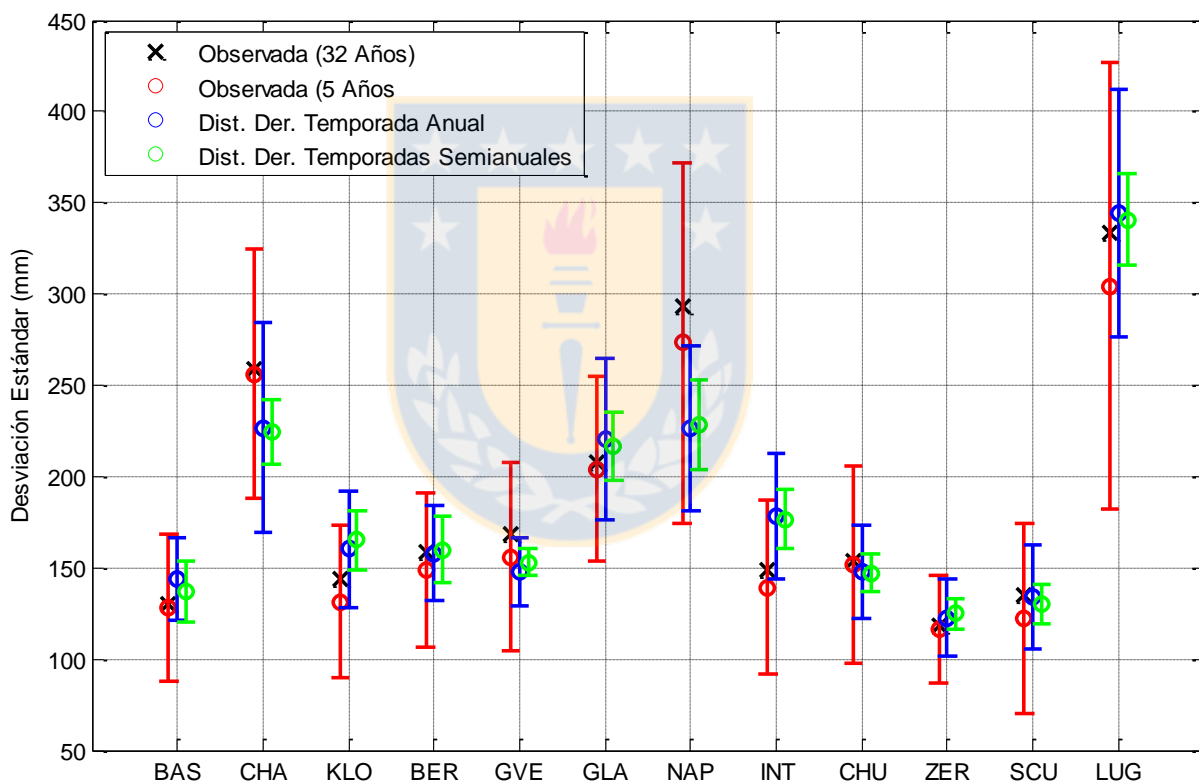


Figura 4.5 Desviación estándar de la precipitación anual para 100 submuestras de 5 años en 12 ubicaciones seleccionadas.

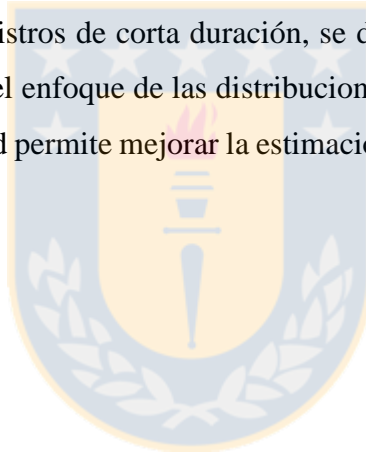
Los resultados muestran que, en general, en el caso de registros cortos, con el enfoque de distribuciones derivadas se estima mucho mejor la variabilidad interanual de la precipitación que utilizando una distribución normal, lo que confirma los resultados de Moraga (2014) y Meier *et al.* (2015).

Más importante aún, en todos los casos la dispersión de los resultados disminuye notoriamente al incorporar la estacionalidad dentro del enfoque de distribuciones derivadas. Se concluye que, con el enfoque de distribuciones derivadas, considerando estacionalidad, es posible obtener una mejor caracterización de la variabilidad de la precipitación anual a partir de registros de corta duración.

4.3 Conclusiones

Se analizaron tres estrategias para encontrar criterios de independencia entre eventos de precipitación, comparando su desempeño según su capacidad para reproducir la desviación estándar de la precipitación anual para registros extensos. En todos los casos se encontraron buenos resultados y no fue posible distinguir un método claramente superior al resto.

Mediante el remuestreo de registros de corta duración, se determinó la desviación estándar de la precipitación anual utilizando el enfoque de las distribuciones derivadas. Los resultados muestran que incorporar la estacionalidad permite mejorar la estimación de la variabilidad interanual a partir de registros de corta duración.



CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

A partir de los registros de una red de 52 estaciones en Suiza se compararon tres estrategias para determinar un criterio de independencia entre tormentas que fuese adecuado para aplicar el enfoque de distribuciones derivadas para la precipitación anual. Los resultados muestran que, si bien los resultados varían entre ubicaciones, en general los tres métodos entregan resultados satisfactorios al representar la variabilidad interanual para registros de 32 años de duración.

Utilizando 100 submuestras de 5 años, para 12 estaciones que cubren la variabilidad climática de Suiza, se estudiaron los efectos de considerar estaciones semi-anales en el enfoque de las distribuciones derivadas. El desempeño se evaluó considerando la desviación estándar de la distribución como una medida de la variabilidad interanual de la precipitación. En todas las estaciones analizadas, se observa que la dispersión de las desviaciones estándar obtenidas para las distintas submuestras es inferior cuando se considera la estacionalidad que al utilizar temporadas de años completos. En ambos casos la dispersión resulta mucho menor que la de la desviación estándar de las submuestras.

Se concluyó que incorporar la estacionalidad dentro del enfoque de distribuciones derivadas permite mejorar la caracterización de la precipitación anual, por lo que se acepta la hipótesis planteada. Esto es permite estimar la distribución de la precipitación anual aunque se cuente con registros de corta extensión.

Además, lo anterior posibilita un mejor estudio del comportamiento de largo plazo de la precipitación anual, pues abre la posibilidad de utilizar porciones de registro relativamente cortas, sobre las que se garantice la homogeneidad de los datos, y de esta manera caracterizar la precipitación anual en ventanas de pocos años, en lugar de utilizar los registros extensos que son necesarios para el enfoque tradicional de ajustar una distribución normal.

Junto con lo anterior, otra futura línea de investigación dice relación con estudiar el efecto de ajustar distintos modelos estadísticos para encontrar las distribuciones marginales. Si bien en tal caso puede que no sea posible encontrar una solución analítica, como la presentada por Eagleson (1978)

utilizando distribuciones tipo Poisson y Gamma, sí sería factible encontrar la PDF de la precipitación anual mediante métodos numéricos. Es posible que, para distintos tipos de clima, otros modelos proporcionen mejores ajustes para las distribuciones marginales y, por lo tanto, mejores resultados para las distribuciones derivadas.



BIBLIOGRAFÍA

Ashkar, F. y J. Rousselle (1987) Partial duration series modeling under the assumption of a poissonian flood count. **Journal of Hydrology. (90)**. 135-144.

Benjamin, J.R., y C.A. Cornell (1970) **Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers**. McGraw-Hill, New York.

Cruise, J. F. y Arora (1990) A hydroclimatic application strategy for the Poisson partial duration model. **Water Resources Bulletin. 26(3)**. 431-442.

Cunnane, C. (1979) A note on the Poisson assumption in partial duration series models. **Water Resources Research. 15(2)**. 489-494.

Dunkerley, D. (2008) Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. **Hydrological Processes. 22(26)**. 5024-5036.

Eagleson, P. S. (1978) Climate, soil, and vegetation: 2. The distribution of annual precipitation derived from observed storm sequences. **Water Resources Research. 14(5)**. 713-721.

Ferguson, T. S., C. Genest, y M. Hallin (2000) Kendall's tau for serial dependence. **Canadian Journal of Statistics. 28**. 587-604.

Gaál, L., P. Molnár y J. Szolgay (2014) Selection of intense rainfall events based on intensity thresholds and lightning data in Switzerland. **Hydrology and Earth System Sciences. 18**. 1561-1573.

Grace, R.A. y P.S. Eagleson (1967) A Model for Generating Synthetic Sequences of Short-Time-Interval Rainfall Depths. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences Symposium. 268-276**. Fort Collins, CO. Estados Unidos. Septiembre.

Joo, J., J. Lee, J. H. Kim, H. Jun y D. Jo (2013). Inter-event time definition setting procedure for urban drainage systems. **Water**. **6(1)**. 45-58.

Linsley, R. K., M. A. Kohler, y J. L. H. Paulhus (1982) **Hydrology for Engineers**, 3rd Edition. McGraw-Hill, New York.

Meier, C. I., J. S. Moraga, G. U. Pranzini y P. Molnár (2015) Effects of record length and resolution on the derived distribution of annual precipitation. **Hydrology and Earth System Sciences**. (En revisión).

Moraga, J. S. (2014) **Comportamiento probabilístico de la precipitación anual mediante distribuciones derivadas**. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción.

Pranzini, G. U. (2001) **Distribución de la precipitación anual en Concepción derivada de las características de la secuencia de tormentas**. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción.

Pranzini, G. U. y C. I. Meier (2001) Distribución de la precipitación anual en Concepción derivada de las características externas de la secuencia de tormentas. **Memorias del XV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica**. (27-38). Concepción. Noviembre.

Restrepo-Posada, P. J., y P. S. Eagleson (1982) Identification of independent rainstorms. **Journal of Hydrology**. **55(1)**. 303-319.

Sariahmed, A. y C.C. Kisiel (1968) Synthesis of Sequences of Summer Thunderstorm Volumes for the Atterbury Watershed in the Tucson Area. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences Symposium on Use of Analog and Digital Computers in Hydrology**. 439-447. Tucson, AZ. Estados Unidos.

Schüepf, M. y G. Gensler (1980) Klimaregionen der Schweiz. En Müller, G. (ed.) **Die Beobachtungsnetze der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt. Konzept 1980. 93.** Anexo Ib. Zürich.

US EPA (1989) **Analysis of Storm Event Characteristics for Selected Rainfall Gages throughout the United States.** ED Driscoll, WC Consultants. Washington D.C.

Vaes, G. (1999) **The Influence of Rainfall and Model Simplification on Combined Sewer System Design.** PhD. Dissertation, KU Leuven, Bélgica.



ANEXOS

Anexo 3.3 Pruebas de autocorrelación para la precipitación anual

Tabla A3.3.1 Resultados test de autocorrelación lag-1 para la precipitación anual

Ubicación	Tau de Kendall	Valor-p	Resultado Hipótesis	Ubicación	Tau de Kendall	Valor-p	Resultado Hipótesis
AIG	0,256	0,044	Se rechaza	NAP	0,394	0,002	Se rechaza
ALT	0,075	0,566	No se rechaza	NEU	0,088	0,500	No se rechaza
BAS	0,135	0,295	No se rechaza	OTL	-0,075	0,566	No se rechaza
BER	-0,006	0,973	No se rechaza	PAY	0,213	0,096	No se rechaza
CDF	0,161	0,210	No se rechaza	PIL	0,222	0,083	No se rechaza
CGI	0,191	0,136	No se rechaza	PIO	0,092	0,479	No se rechaza
CHA	0,161	0,210	No se rechaza	PUY	0,196	0,127	No se rechaza
CHU	0,123	0,344	No se rechaza	REH	0,217	0,089	No se rechaza
CIM	0,041	0,762	No se rechaza	ROB	0,045	0,736	No se rechaza
COV	0,196	0,127	No se rechaza	SAE	0,333	0,008	Se rechaza
DAV	0,131	0,311	No se rechaza	SAM	0,140	0,279	No se rechaza
DIS	0,015	0,919	No se rechaza	SBE	0,041	0,762	No se rechaza
DOL	0,234	0,066	No se rechaza	SBO	-0,187	0,145	No se rechaza
FAH	0,209	0,103	No se rechaza	SCU	0,131	0,311	No se rechaza
FRE	0,135	0,295	No se rechaza	SHA	0,183	0,155	No se rechaza
GLA	0,204	0,111	No se rechaza	SIO	-0,071	0,589	No se rechaza
GSB	0,019	0,893	No se rechaza	SMA	0,183	0,155	No se rechaza
GUE	-0,084	0,522	No se rechaza	STG	-0,006	0,973	No se rechaza
GUT	0,204	0,111	No se rechaza	TAE	0,187	0,145	No se rechaza
GVE	0,265	0,037	Se rechaza	ULR	0,019	0,893	No se rechaza
INT	0,127	0,327	No se rechaza	VAD	0,084	0,522	No se rechaza
KLO	0,230	0,071	No se rechaza	VIS	0,032	0,813	No se rechaza
LUG	-0,071	0,589	No se rechaza	WAE	0,024	0,866	No se rechaza
LUZ	0,144	0,264	No se rechaza	WFJ	0,015	0,919	No se rechaza
MAG	-0,019	0,893	No se rechaza	WYN	0,213	0,096	No se rechaza
MVE	0,088	0,500	No se rechaza	ZER	-0,037	0,787	No se rechaza

Anexo 4.1 Tiempos mínimos entre tormentas

Tabla A4.1.1 Resultados a partir de distintas estrategias para determinar la independencia entre eventos de precipitación considerando temporadas anuales

Ubicación	T _{b-min} (min)			Desviación estándar (mm)			Omega (1/h)			Lambda (1/mm)			Kappa		
	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3
AIG	300	1100	380	139,7	169,0	144,6	0,0129	0,0078	0,0119	0,0765	0,0566	0,0736	0,621	0,759	0,654
ALT	450	1260	700	188,1	218,1	199,5	0,0120	0,0079	0,0102	0,0435	0,0368	0,0410	0,439	0,584	0,499
BAS	180	1180	940	117,9	152,4	148,5	0,0202	0,0089	0,0101	0,0817	0,0591	0,0613	0,380	0,636	0,588
BER	240	1320	800	145,6	186,8	171,4	0,0173	0,0079	0,0102	0,0727	0,0509	0,0585	0,495	0,750	0,675
CDF	280	1100	580	203,7	271,6	237,2	0,0160	0,0091	0,0124	0,0464	0,0312	0,0395	0,442	0,574	0,527
CGI	360	1320	800	156,4	193,6	177,4	0,0122	0,0072	0,0091	0,0592	0,0419	0,0494	0,526	0,638	0,603
CHA	370	1140	800	203,8	244,9	229,0	0,0151	0,0086	0,0107	0,0417	0,0306	0,0353	0,391	0,499	0,472
CHU	460	1380	320	147,2	163,2	142,7	0,0107	0,0070	0,0119	0,0508	0,0436	0,0528	0,418	0,539	0,392
CIM	390	1920	740	326,4	408,6	354,0	0,0099	0,0053	0,0082	0,0185	0,0128	0,0164	0,321	0,416	0,349
COV	460	1300	400	155,3	187,1	153,5	0,0107	0,0073	0,0113	0,0468	0,0381	0,0482	0,402	0,522	0,396
DAV	470	1240	280	169,8	193,4	157,9	0,0121	0,0081	0,0138	0,0489	0,0402	0,0528	0,450	0,547	0,408
DIS	780	1560	280	213,9	230,7	196,2	0,0087	0,0061	0,0125	0,0288	0,0252	0,0315	0,366	0,436	0,273
DOL	540	1040	640	317,0	363,9	322,7	0,0114	0,0087	0,0106	0,0252	0,0203	0,0246	0,442	0,482	0,465
FAH	220	1060	980	148,1	190,9	188,4	0,0199	0,0093	0,0098	0,0699	0,0490	0,0499	0,429	0,648	0,633
FRE	330	1260	800	200,6	251,0	229,1	0,0150	0,0078	0,0100	0,0474	0,0323	0,0387	0,469	0,602	0,572
GLA	410	1260	400	220,0	267,6	220,0	0,0132	0,0082	0,0132	0,0442	0,0329	0,0442	0,531	0,649	0,531
GSB	870	1200	700	525,6	553,1	485,1	0,0090	0,0076	0,0094	0,0110	0,0102	0,0120	0,319	0,352	0,314
GUE	840	1400	660	279,1	309,2	269,1	0,0093	0,0074	0,0102	0,0225	0,0202	0,0241	0,357	0,425	0,349
GUT	240	1220	560	133,2	167,6	149,3	0,0170	0,0086	0,0123	0,0744	0,0535	0,0638	0,452	0,647	0,546
GVE	320	1240	900	143,1	175,2	163,2	0,0130	0,0073	0,0085	0,0639	0,0474	0,0538	0,492	0,650	0,634
INT	320	1380	600	163,7	208,6	182,3	0,0136	0,0078	0,0114	0,0603	0,0427	0,0532	0,532	0,691	0,592
KLO	230	1220	1120	140,8	182,5	178,5	0,0181	0,0086	0,0090	0,0713	0,0492	0,0514	0,442	0,650	0,651
LUG	300	1980	1500	287,6	377,0	350,7	0,0104	0,0049	0,0058	0,0248	0,0150	0,0179	0,401	0,496	0,512
LUZ	200	1200	600	156,1	203,5	186,3	0,0174	0,0085	0,0119	0,0652	0,0473	0,0531	0,463	0,720	0,589
MAG	700	1800	1040	437,3	491,7	448,7	0,0081	0,0055	0,0069	0,0125	0,0100	0,0118	0,321	0,370	0,346
MVE	650	1360	480	179,3	200,8	173,3	0,0094	0,0067	0,0104	0,0368	0,0281	0,0389	0,382	0,390	0,366
NAP	320	1080	1020	232,5	273,0	270,6	0,0161	0,0091	0,0094	0,0416	0,0331	0,0336	0,456	0,631	0,622
NEU	260	1200	900	143,2	181,9	169,8	0,0157	0,0082	0,0094	0,0674	0,0478	0,0537	0,461	0,640	0,623
OTL	570	1920	1400	415,2	489,7	462,2	0,0085	0,0053	0,0061	0,0143	0,0104	0,0118	0,349	0,400	0,394
PAY	230	1340	1020	124,4	161,4	152,0	0,0161	0,0074	0,0084	0,0773	0,0545	0,0603	0,452	0,704	0,680

	T _{b-min} (min)			Desviación estándar (mm)			Omega (1/h)			Lambda (1/mm)			Kappa		
PIL	670	1140	520	409,1	447,0	380,7	0,0113	0,0083	0,0125	0,0166	0,0140	0,0192	0,345	0,386	0,358
PIO	1130	1380	340	339,7	345,1	305,0	0,0068	0,0063	0,0100	0,0149	0,0146	0,0172	0,323	0,345	0,252
PUY	320	1160	540	171,2	203,7	182,8	0,0136	0,0080	0,0111	0,0568	0,0455	0,0529	0,520	0,717	0,602
REH	220	1440	1180	143,8	191,6	182,7	0,0182	0,0076	0,0085	0,0708	0,0462	0,0500	0,449	0,695	0,670
ROB	700	1800	540	366,3	396,0	365,8	0,0077	0,0055	0,0085	0,0083	0,0079	0,0084	0,124	0,173	0,113
SAE	780	1200	220	496,7	562,2	408,4	0,0100	0,0084	0,0176	0,0141	0,0120	0,0197	0,401	0,431	0,317
SAM	560	1560	1040	131,8	150,6	140,6	0,0088	0,0060	0,0071	0,0470	0,0397	0,0439	0,365	0,462	0,427
SBE	1030	1560	420	395,6	427,9	354,4	0,0076	0,0062	0,0108	0,0141	0,0123	0,0172	0,349	0,374	0,301
SBO	320	2040	940	304,4	398,5	333,5	0,0102	0,0049	0,0066	0,0220	0,0132	0,0178	0,365	0,443	0,429
SCU	400	1440	720	127,8	143,3	132,5	0,0109	0,0066	0,0089	0,0557	0,0460	0,0527	0,384	0,501	0,434
SHA	210	1380	960	126,3	174,5	160,0	0,0182	0,0080	0,0093	0,0775	0,0472	0,0545	0,422	0,606	0,586
SIO	400	1400	1120	105,4	127,0	120,3	0,0094	0,0067	0,0073	0,0739	0,0539	0,0595	0,491	0,526	0,527
SMA	240	1280	880	157,4	203,5	188,0	0,0174	0,0081	0,0097	0,0619	0,0437	0,0485	0,434	0,667	0,609
STG	270	1160	480	187,3	230,9	206,3	0,0173	0,0091	0,0136	0,0505	0,0386	0,0450	0,416	0,619	0,487
TAE	230	1340	800	160,7	212,8	192,0	0,0188	0,0079	0,0103	0,0660	0,0421	0,0501	0,466	0,687	0,631
ULR	840	1220	480	238,9	256,5	223,0	0,0088	0,0074	0,0110	0,0267	0,0241	0,0299	0,381	0,414	0,343
VAD	380	1220	420	148,3	176,3	148,6	0,0125	0,0082	0,0120	0,0556	0,0449	0,0554	0,433	0,557	0,445
VIS	610	1260	440	118,1	124,6	115,0	0,0086	0,0066	0,0092	0,0551	0,0489	0,0575	0,401	0,446	0,390
WAE	260	1320	600	188,8	245,2	212,2	0,0168	0,0081	0,0115	0,0546	0,0373	0,0458	0,485	0,695	0,589
WFJ	580	1200	220	234,0	268,6	208,4	0,0117	0,0085	0,0165	0,0350	0,0285	0,0403	0,450	0,515	0,358
WYN	260	1260	700	155,8	202,1	183,4	0,0156	0,0078	0,0108	0,0641	0,0428	0,0509	0,490	0,658	0,581
ZER	610	1500	580	122,7	136,5	122,9	0,0085	0,0061	0,0086	0,0508	0,0430	0,0509	0,379	0,447	0,377

Tabla A4.1.2 Resultados a partir de distintas estrategias para determinar la independencia entre eventos de precipitación considerando temporadas cálidas

Ubicación	T _{b-min} (min)			Desviación estándar (mm)			Omega (1/h)			Lambda (1/mm)			Kappa		
	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3
AIG	220	620	140	103,3	121,7	97,9	0,0166	0,0114	0,0202	0,0728	0,0620	0,0779	0,514	0,679	0,453
ALT	330	760	220	148,0	166,3	139,9	0,0153	0,0110	0,0170	0,0406	0,0365	0,0424	0,387	0,507	0,350
BAS	130	840	300	89,7	117,6	99,7	0,0228	0,0107	0,0162	0,0776	0,0564	0,0668	0,357	0,590	0,434
BER	170	880	600	110,7	139,5	134,2	0,0223	0,0102	0,0123	0,0713	0,0521	0,0555	0,442	0,696	0,630
CDF	160	860	280	127,4	169,3	134,9	0,0234	0,0109	0,0175	0,0610	0,0417	0,0560	0,417	0,638	0,498
CGI	210	820	340	98,2	120,4	106,6	0,0165	0,0100	0,0137	0,0691	0,0559	0,0630	0,441	0,634	0,499
CHA	170	840	160	111,5	147,9	111,5	0,0226	0,0115	0,0226	0,0675	0,0467	0,0675	0,407	0,595	0,407
CHU	380	780	220	109,5	121,2	104,2	0,0123	0,0104	0,0148	0,0514	0,0474	0,0560	0,414	0,488	0,380
CIM	300	960	300	257,4	300,5	257,4	0,0133	0,0088	0,0133	0,0192	0,0150	0,0192	0,318	0,380	0,318
COV	300	720	200	112,3	126,7	107,0	0,0160	0,0115	0,0181	0,0583	0,0477	0,0616	0,428	0,487	0,393
DAV	320	620	140	122,2	135,2	109,4	0,0162	0,0129	0,0216	0,0605	0,0523	0,0656	0,509	0,564	0,391
DIS	610	760	200	165,0	166,9	149,0	0,0117	0,0104	0,0175	0,0290	0,0284	0,0326	0,334	0,363	0,246
DOL	260	780	240	160,4	191,4	158,6	0,0173	0,0110	0,0178	0,0465	0,0357	0,0470	0,493	0,603	0,480
FAH	150	940	260	111,3	142,4	120,1	0,0236	0,0100	0,0191	0,0629	0,0460	0,0595	0,351	0,608	0,428
FRE	180	780	200	120,4	153,2	122,0	0,0204	0,0112	0,0197	0,0615	0,0456	0,0611	0,430	0,617	0,444
GLA	300	640	180	165,3	184,3	153,2	0,0172	0,0131	0,0215	0,0465	0,0430	0,0528	0,518	0,658	0,471
GSB	590	660	200	247,4	253,0	214,9	0,0126	0,0121	0,0197	0,0226	0,0224	0,0278	0,402	0,425	0,314
GUE	540	820	100	169,5	175,4	141,8	0,0132	0,0110	0,0253	0,0330	0,0317	0,0403	0,389	0,443	0,238
GUT	180	780	240	104,4	126,1	106,7	0,0201	0,0112	0,0176	0,0686	0,0553	0,0667	0,413	0,615	0,452
GVE	210	860	240	97,3	118,6	99,7	0,0166	0,0096	0,0157	0,0688	0,0548	0,0668	0,430	0,618	0,447
INT	220	800	140	119,7	147,8	111,5	0,0175	0,0112	0,0209	0,0647	0,0506	0,0707	0,516	0,678	0,462
KLO	170	860	400	107,8	134,8	120,6	0,0215	0,0104	0,0150	0,0671	0,0511	0,0575	0,398	0,635	0,490
LUG	180	980	560	202,9	265,3	241,8	0,0155	0,0087	0,0105	0,0300	0,0198	0,0222	0,392	0,487	0,435
LUZ	160	880	240	128,1	164,5	136,5	0,0212	0,0100	0,0178	0,0616	0,0447	0,0559	0,460	0,718	0,500
MAG	440	800	360	313,5	341,4	310,3	0,0113	0,0096	0,0123	0,0141	0,0128	0,0143	0,302	0,338	0,286
MVE	300	660	160	86,8	96,7	79,5	0,0136	0,0110	0,0158	0,0785	0,0700	0,0824	0,513	0,596	0,433
NAP	220	820	740	173,0	209,9	205,8	0,0210	0,0115	0,0120	0,0444	0,0354	0,0361	0,444	0,661	0,640
NEU	180	840	260	99,4	124,1	104,5	0,0185	0,0107	0,0162	0,0654	0,0537	0,0628	0,378	0,593	0,425
OTL	390	860	460	314,7	343,1	320,7	0,0119	0,0092	0,0114	0,0148	0,0130	0,0146	0,314	0,361	0,331
PAY	150	960	260	90,7	117,1	97,4	0,0200	0,0095	0,0163	0,0789	0,0599	0,0746	0,413	0,697	0,495
PIL	320	820	180	200,2	237,4	180,9	0,0180	0,0111	0,0232	0,0331	0,0235	0,0379	0,397	0,443	0,343
PIO	800	780	200	258,5	255,3	227,1	0,0093	0,0092	0,0145	0,0156	0,0160	0,0186	0,308	0,312	0,228
PUY	220	820	260	123,5	149,7	128,6	0,0162	0,0099	0,0154	0,0547	0,0444	0,0525	0,445	0,626	0,460

	T_{b-min} (min)			Desviación estándar (mm)			Omega (1/h)			Lambda (1/mm)			Kappa		
REH	160	920	380	110,5	139,5	122,4	0,0221	0,0104	0,0155	0,0678	0,0508	0,0581	0,410	0,665	0,499
ROB	380	800	320	344,2	351,7	285,3	0,0130	0,0101	0,0138	0,0059	0,0058	0,0087	0,068	0,088	0,093
SAE	440	640	160	282,6	299,1	246,3	0,0156	0,0130	0,0251	0,0232	0,0211	0,0286	0,437	0,476	0,338
SAM	380	900	500	101,2	110,6	104,3	0,0123	0,0091	0,0113	0,0539	0,0486	0,0514	0,396	0,486	0,411
SBE	730	840	360	286,2	295,8	264,0	0,0107	0,0100	0,0138	0,0166	0,0157	0,0183	0,356	0,363	0,299
SBO	180	1060	360	203,6	255,4	224,1	0,0154	0,0085	0,0128	0,0266	0,0198	0,0238	0,328	0,468	0,372
SCU	300	600	320	92,8	99,3	93,5	0,0146	0,0114	0,0143	0,0651	0,0581	0,0644	0,406	0,456	0,410
SHA	130	880	420	90,1	117,7	106,7	0,0233	0,0102	0,0147	0,0810	0,0542	0,0622	0,379	0,576	0,467
SIO	240	840	160	62,1	71,3	60,0	0,0112	0,0089	0,0124	0,0996	0,0885	0,1020	0,513	0,627	0,470
SMA	170	860	340	119,8	153,2	139,5	0,0210	0,0104	0,0167	0,0598	0,0447	0,0497	0,398	0,630	0,453
STG	220	680	200	157,6	189,3	153,8	0,0201	0,0128	0,0210	0,0453	0,0378	0,0475	0,411	0,577	0,411
TAE	160	860	320	119,4	151,7	131,2	0,0225	0,0105	0,0171	0,0636	0,0469	0,0569	0,414	0,659	0,496
ULR	560	780	220	143,3	151,7	128,1	0,0111	0,0099	0,0150	0,0339	0,0310	0,0391	0,357	0,370	0,296
VAD	330	620	380	128,9	136,9	130,9	0,0161	0,0123	0,0149	0,0501	0,0468	0,0492	0,417	0,505	0,440
VIS	390	780	160	70,7	73,1	66,7	0,0104	0,0081	0,0129	0,0677	0,0628	0,0730	0,369	0,416	0,318
WAE	190	780	260	145,8	178,7	152,1	0,0215	0,0110	0,0177	0,0539	0,0406	0,0486	0,451	0,658	0,477
WFJ	370	600	160	156,6	170,1	143,2	0,0162	0,0133	0,0226	0,0470	0,0424	0,0512	0,506	0,568	0,391
WYN	170	880	440	111,2	142,4	125,9	0,0207	0,0105	0,0135	0,0662	0,0492	0,0559	0,421	0,646	0,543
ZER	430	600	180	87,2	89,1	77,4	0,0111	0,0101	0,0137	0,0570	0,0561	0,0678	0,371	0,403	0,342

Tabla A4.1.3 Resultados a partir de distintas estrategias para determinar la independencia entre eventos de precipitación considerando temporadas frías

Ubicación	T _{b-min} (min)			Desviación estándar (mm)			Omega (1/h)			Lambda (1/mm)			Kappa		
	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3
AIG	530	1440	980	100,0	123,1	108,5	0,0098	0,0066	0,0077	0,0742	0,0479	0,0630	0,735	0,708	0,778
ALT	690	1500	640	113,2	133,3	111,0	0,0092	0,0069	0,0094	0,0512	0,0373	0,0523	0,538	0,536	0,534
BAS	400	1420	1160	73,2	96,0	89,2	0,0143	0,0079	0,0087	0,0975	0,0646	0,0714	0,530	0,668	0,645
BER	460	1620	1100	92,0	120,1	105,9	0,0124	0,0064	0,0082	0,0810	0,0502	0,0647	0,629	0,747	0,746
CDF	770	1240	860	189,7	210,8	195,1	0,0106	0,0079	0,0097	0,0311	0,0250	0,0286	0,501	0,528	0,491
CGI	740	1680	1140	127,9	153,2	139,1	0,0084	0,0056	0,0070	0,0462	0,0333	0,0403	0,596	0,643	0,625
CHA	770	1360	1000	176,4	203,9	187,8	0,0102	0,0071	0,0087	0,0287	0,0213	0,0251	0,406	0,425	0,413
CHU	780	1500	660	102,6	106,4	100,4	0,0085	0,0061	0,0087	0,0453	0,0401	0,0467	0,412	0,464	0,408
CIM	1570	2220	2400	211,2	220,4	227,4	0,0052	0,0044	0,0044	0,0159	0,0145	0,0138	0,366	0,381	0,376
COV	950	1500	820	116,2	123,1	106,3	0,0075	0,0060	0,0070	0,0357	0,0327	0,0380	0,379	0,428	0,384
DAV	960	1440	320	118,7	125,1	109,6	0,0081	0,0068	0,0114	0,0362	0,0333	0,0422	0,379	0,413	0,323
DIS	1120	1740	600	145,4	151,7	128,8	0,0068	0,0055	0,0077	0,0277	0,0263	0,0309	0,393	0,455	0,350
DOL	1160	1260	1040	314,9	326,1	302,1	0,0075	0,0072	0,0079	0,0152	0,0141	0,0162	0,471	0,461	0,469
FAH	490	1180	1120	103,9	127,3	124,7	0,0133	0,0087	0,0087	0,0713	0,0524	0,0531	0,590	0,692	0,680
FRE	860	1620	820	178,7	201,1	175,5	0,0092	0,0060	0,0093	0,0323	0,0243	0,0329	0,538	0,579	0,532
GLA	790	1500	680	153,7	172,4	146,5	0,0093	0,0066	0,0093	0,0377	0,0288	0,0402	0,538	0,548	0,548
GSB	1080	1620	720	465,1	528,2	415,7	0,0068	0,0058	0,0080	0,0079	0,0069	0,0093	0,339	0,380	0,325
GUE	1200	1620	920	243,9	253,3	229,7	0,0073	0,0063	0,0079	0,0155	0,0146	0,0168	0,336	0,366	0,325
GUT	470	1560	460	84,3	109,0	84,3	0,0123	0,0071	0,0123	0,0801	0,0503	0,0801	0,547	0,603	0,547
GVE	540	1560	1080	106,6	132,7	119,2	0,0102	0,0059	0,0073	0,0612	0,0385	0,0493	0,597	0,623	0,652
INT	620	1740	980	116,7	138,2	120,8	0,0107	0,0065	0,0082	0,0540	0,0387	0,0460	0,546	0,617	0,554
KLO	430	1440	1440	94,1	121,5	121,5	0,0135	0,0075	0,0075	0,0748	0,0462	0,0462	0,541	0,599	0,599
LUG	1460	2160	2520	218,9	235,8	249,8	0,0049	0,0040	0,0040	0,0169	0,0137	0,0128	0,440	0,413	0,416
LUZ	440	1400	640	86,4	103,8	89,5	0,0124	0,0075	0,0107	0,0873	0,0655	0,0838	0,638	0,788	0,704
MAG	1760	1980	1620	316,6	313,2	318,0	0,0049	0,0045	0,0051	0,0095	0,0094	0,0096	0,322	0,333	0,317
MVE	1420	1740	760	175,3	188,3	154,9	0,0057	0,0057	0,0074	0,0195	0,0191	0,0255	0,350	0,375	0,353
NAP	640	1220	880	154,5	174,0	157,1	0,0111	0,0080	0,0095	0,0395	0,0309	0,0378	0,507	0,537	0,550
NEU	570	1440	940	109,6	133,7	117,4	0,0107	0,0069	0,0086	0,0600	0,0423	0,0544	0,582	0,642	0,653
OTL	1750	2040	1680	295,8	295,4	294,3	0,0048	0,0044	0,0048	0,0108	0,0106	0,0108	0,360	0,374	0,357
PAY	440	1560	1180	87,6	110,7	99,9	0,0120	0,0064	0,0074	0,0749	0,0492	0,0592	0,535	0,640	0,651
PIL	1160	1360	840	385,1	405,5	360,3	0,0076	0,0071	0,0090	0,0106	0,0097	0,0118	0,365	0,367	0,342
PIO	1820	1560	960	230,8	232,7	210,0	0,0048	0,0053	0,0062	0,0123	0,0125	0,0150	0,297	0,283	0,284
PUY	550	1440	1040	115,2	141,5	130,0	0,0105	0,0065	0,0080	0,0634	0,0418	0,0522	0,685	0,713	0,748

	T _{b-min} (min)			Desviación estándar (mm)			Omega (1/h)			Lambda (1/mm)			Kappa		
REH	480	1800	1360	95,3	131,0	119,8	0,0129	0,0064	0,0078	0,0759	0,0408	0,0502	0,584	0,624	0,643
ROB	1130	1860	1740	163,8	172,1	177,0	0,0055	0,0045	0,0049	0,0226	0,0203	0,0202	0,406	0,429	0,420
SAE	1690	1500	1300	491,4	490,3	463,0	0,0064	0,0072	0,0075	0,0082	0,0084	0,0091	0,413	0,392	0,392
SAM	830	1500	1680	85,0	91,2	90,8	0,0065	0,0051	0,0046	0,0399	0,0336	0,0321	0,306	0,317	0,320
SBE	1660	1740	720	280,7	285,6	251,6	0,0056	0,0055	0,0079	0,0112	0,0110	0,0147	0,308	0,315	0,306
SBO	1510	2160	2880	243,1	278,1	278,6	0,0044	0,0040	0,0033	0,0148	0,0109	0,0105	0,457	0,382	0,417
SCU	680	1620	1500	89,0	95,0	93,4	0,0078	0,0053	0,0054	0,0470	0,0386	0,0390	0,373	0,408	0,401
SHA	540	1680	1240	95,1	126,2	116,9	0,0115	0,0066	0,0081	0,0660	0,0407	0,0479	0,517	0,575	0,565
SIO	640	1620	1360	89,3	107,0	103,6	0,0080	0,0057	0,0061	0,0569	0,0389	0,0414	0,493	0,473	0,471
SMA	530	1560	980	101,2	130,5	112,3	0,0124	0,0070	0,0089	0,0684	0,0432	0,0564	0,565	0,635	0,628
STG	570	1440	460	102,7	121,1	99,9	0,0119	0,0074	0,0126	0,0684	0,0498	0,0694	0,593	0,668	0,559
TAE	550	1740	720	112,7	152,5	118,8	0,0114	0,0065	0,0101	0,0605	0,0345	0,0553	0,587	0,605	0,605
ULR	1240	1500	520	201,5	205,3	176,5	0,0067	0,0060	0,0100	0,0214	0,0207	0,0271	0,438	0,464	0,378
VAD	600	1560	420	75,5	89,6	72,4	0,0098	0,0066	0,0105	0,0779	0,0566	0,0822	0,528	0,567	0,511
VIS	830	1500	480	93,4	103,1	93,1	0,0070	0,0056	0,0086	0,0484	0,0407	0,0516	0,457	0,481	0,429
WAE	480	1740	620	118,2	158,8	124,4	0,0119	0,0065	0,0107	0,0601	0,0349	0,0543	0,601	0,653	0,606
WFJ	1410	1380	240	184,2	183,6	151,8	0,0067	0,0068	0,0133	0,0217	0,0217	0,0308	0,391	0,385	0,291
WYN	650	1500	920	119,1	152,1	131,7	0,0102	0,0070	0,0091	0,0516	0,0349	0,0448	0,546	0,582	0,557
ZER	830	1920	940	90,3	99,7	93,0	0,0068	0,0049	0,0067	0,0424	0,0360	0,0408	0,361	0,419	0,362