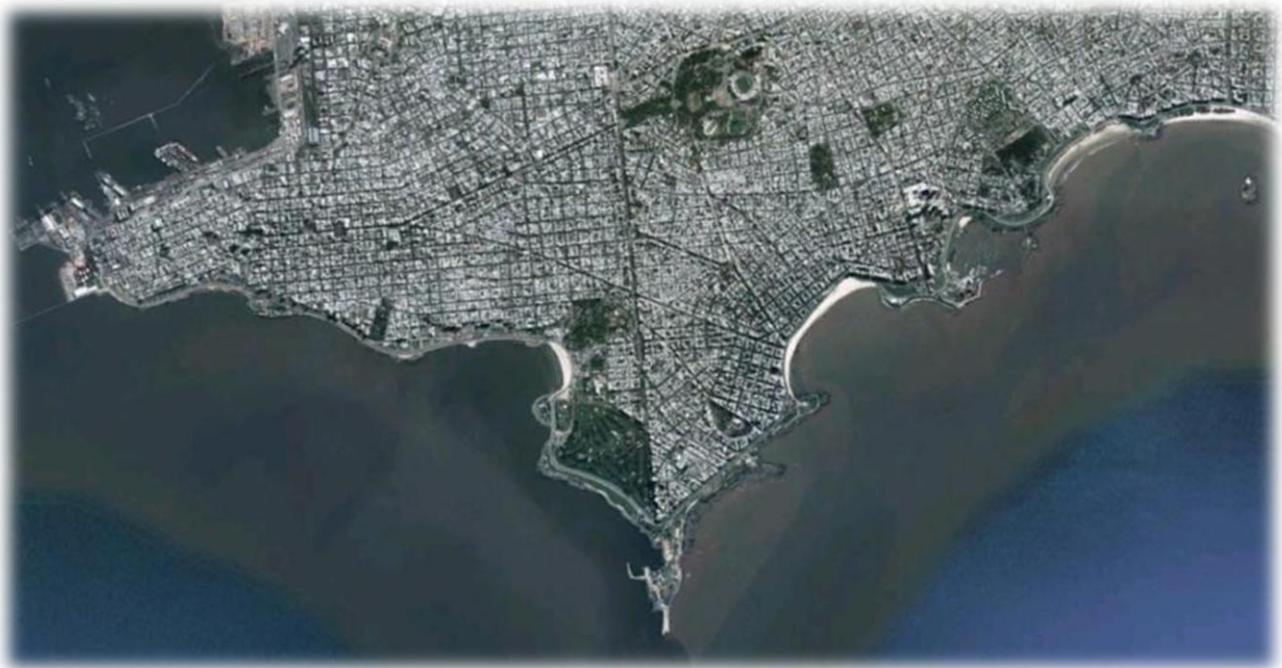




# **ESTUDIOS DE BASE Y ASESORAMIENTO PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DIRECTOR DE SANEAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE MONTEVIDEO**

**CONVENIO UDELAR-FING IMFIA Y IM**



**INFORME FINAL**

**Diciembre de 2013**



## EQUIPO TÉCNICO

---

### Facultad de Ingeniería

#### *Instituto de Mecánica de los Fluidos en Ingeniería Ambiental*

Ing. Luis Silveira, Ph.D.

Ing. Rafael Terra, Ph.D.

Dr. Ing. Gabriel Usera

Dr. Ing. Christian Chreties

Ing. M.Sc. Jimena Alonso

Ing. M.Sc. Magdalena Crisci

Bach. Martín Scavone

#### *Instituto de Matemáticas y Estadística*

Dr. Ing. Gonzalo Perera

Lic. Meliza González

### Intendencia de Montevideo

Ing. Pablo Guido

Ing. María Mena

---



## ÍNDICE

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS.....	1
<b>2</b>	<b>INFORMACIÓN DISPONIBLE</b> .....	<b>3</b>
2.1	PRECIPITACIÓN .....	3
<b>3</b>	<b>ACTUALIZACIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA DE PRECIPITACIÓN</b> .....	<b>21</b>
3.1	ANTECEDENTES .....	21
3.2	METODOLOGÍA .....	23
3.3	RESULTADOS .....	25
3.4	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	42
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE PRECIPITACIONES Y NIVELES DEL RÍO DE LA PLATA</b> .....	<b>45</b>
4.1	ANÁLISIS DE CORRELACIONES .....	45
4.2	ANÁLISIS DE CÓPULAS .....	48
4.3	AJUSTE DE UNA CURVA DE DISTRIBUCIÓN A LOS DATOS DE MAREA.....	49
<b>5</b>	<b>LINEAMIENTOS PARA LA DEFINICIÓN DE LAS TORMENTAS DE DISEÑO</b> .....	<b>51</b>
5.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	51
5.2	INFORMACIÓN UTILIZADA .....	56
5.3	TORMENTAS DE DISEÑO .....	57
5.4	ANÁLISIS DE LAS TORMENTAS DE DISEÑO OBTENIDAS Y COMPARACIÓN CON LA DE LA IM .....	64
5.5	RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	68
5.6	PASOS FUTUROS .....	69
<b>6</b>	<b>INCIDENCIA DEL CAMBIO Y/O VARIABILIDAD CLIMÁTICA</b> .....	<b>71</b>
6.1	INTRODUCCIÓN.....	71
6.2	NIVEL DE MAREA EN MONTEVIDEO Y NIVEL DEL MAR .....	72
6.3	NIVEL DE MAREA EN MONTEVIDEO, VIENTO Y PRESIÓN EN SUPERFICIE.....	80
6.4	NIVEL DE MAREA Y PRECIPITACIÓN EN MONTEVIDEO.....	94
6.5	PATRONES ATMOSFÉRICOS ASOCIADOS A EVENTOS EXTREMOS DE MAREA EN MONTEVIDEO.....	102
6.6	DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE EVENTOS EXTREMOS.....	117
6.7	ESCENARIOS .....	122
6.8	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	126
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>129</b>

---



# 1 INTRODUCCIÓN

En el marco del Convenio firmado el 06.03.2009, entre la Intendencia de Montevideo (en adelante IM) y la Universidad de la República - Facultad de Ingeniería (en adelante UDELAR-FI), la Comisión Facilitadora de Ejecución acordó el 24.11.2011 las Especificaciones Particulares para la realización de diversos “estudios de base y asesoramientos a la IM que sirvan como instrumentos de soporte de la actualización del Plan Director de Saneamiento de Montevideo (PDSM).” La ejecución se inició el 15.07.2012, de acuerdo con lo establecido en la cláusula quinta de las citadas especificaciones particulares.

## 1.1 Objetivos

A continuación se presenta el objetivo general y los objetivos específicos del convenio.

### 1.1.1 Objetivo General

Realizar estudios de base y brindar asesoramiento a la IM en diversos temas hidrometeorológicos a ser utilizados como instrumentos de soporte de la actualización del PDM.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos comprenden:

- Actualización de las curvas intensidad-duración-frecuencia de precipitación
- Análisis de la distribución conjunta de precipitaciones y niveles del río de la Plata
- Lineamientos para la definición de las tormentas de diseño
- Incidencia del cambio y/o variabilidad climática.

En el presente informe se presenta la metodología utilizada y los resultados obtenidos para abordar cada uno de estos objetivos.



## 2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

A continuación se describe la información hidrometeorológica utilizada a lo largo del presente estudio, así como el análisis de calidad realizado en el caso de los datos pluviográficos registrados en las estaciones del El Prado y Carrasco.

### 2.1 Precipitación

#### 2.1.1 Datos pluviométricos

Fueron utilizados los datos de precipitación diaria registrados en los pluviómetros Prado y Carrasco (Montevideo) de la DNM en el período 1981-2011.

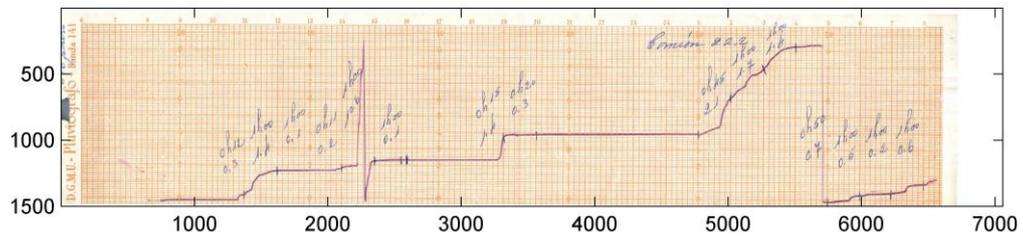
#### 2.1.2 Datos pluviográficos

En el marco de un acuerdo entre la Facultad de Ingeniería y la Dirección Nacional de Meteorología (DNM), se digitalizaron y procesaron las bandas pluviográficas de la estación del Prado, que contenían precipitaciones de al menos 1 mm de lluvia en 24 horas, registradas entre 1969 y 2005 menos 1971, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 2000 formando 29 años. Cabe mencionar que el pluviógrafo de Prado se encuentra fuera de funcionamiento desde 2005.

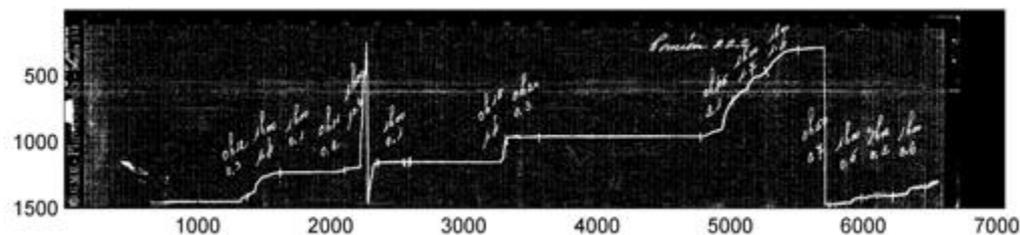
El paquete de trabajo de digitalización se descompone en cinco módulos independientes, aunque interconectados:

- i. **Escaneo de Bandas.** Se realizó utilizando un scanner de alta productividad, no obstante lo cual el escaneo de cada banda insumió aproximadamente 1 minuto. Se escanearon las bandas que contenían precipitaciones de al menos 1mm de lluvia en 24 horas. El escaneo se realizó automáticamente para ambas caras de la banda, registrando en el anverso las fechas de colocación y retiro de la banda.
- ii. **Desarrollo de la aplicación Ingreso Fechas.** Ésta aplicación permite ingresar de forma sencilla las fechas correspondientes al anverso de las bandas. Inicialmente se intentó un reconocimiento automático de estas inscripciones, pero dado que las mismas son manuscritas no se pudo viabilizar esta estrategia en esta oportunidad. La aplicación fue utilizada para generar una base de datos de las fechas correspondientes a cada banda digitalizada.
- iii. **Desarrollo de algoritmos de segmentación y seguimiento.** Estos algoritmos permiten realizar la segmentación de la imagen escaneada cruda, pasando a una imagen en blanco y negro que retiene únicamente las porciones que contienen información relativa a la traza del pluviógrafo, para posteriormente realizar el seguimiento de esta traza y obtener la salida numérica. En esta etapa se encontraron

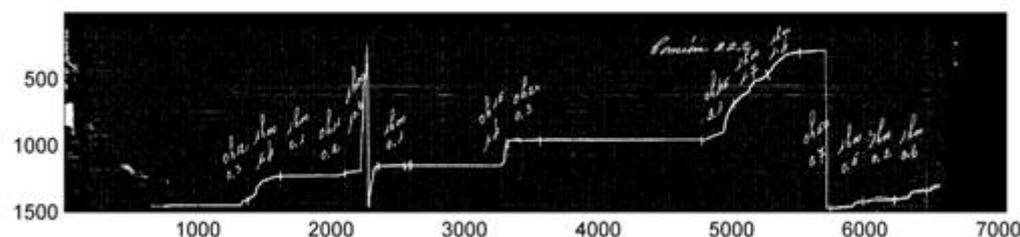
dificultades superiores a las anticipadas para el tratamiento de algunas patologías de los registros gráficos, especialmente la escasez de tinta en los punteros, producto del desgaste y falta de mantenimiento de los pluviógrafos.



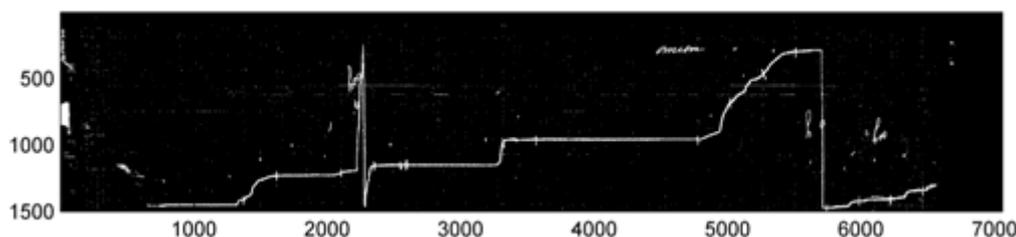
La primera etapa de segmentación produjo una imagen con alto contenido de ruido y la presencia de caracteres manuscritos que existían en el registro original. Se trata de una segmentación cromática estadística cuyo desarrollo se considera un producto original del trabajo realizado.



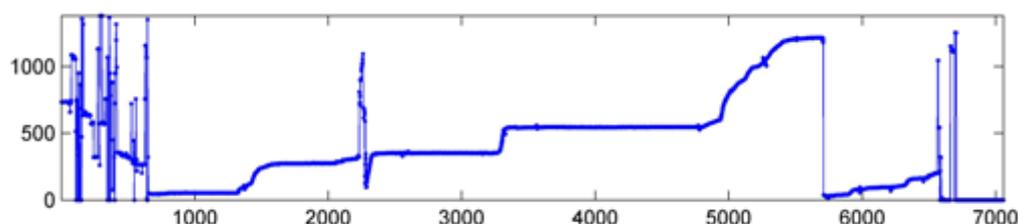
Se aplicó a continuación un filtro basado en la comparación con un banco de imágenes testigo y con el descarte de regiones de pixeles de pequeño tamaño.



Seguidamente se aplicó un segundo conjunto de algoritmos en desarrollo para la detección por forma y color de los caracteres manuscritos lo que permitió extraerlos dejando una imagen más limpia.



Finalmente, un tercer conjunto de algoritmos permitió realizar el tracking de la curva del pluviógrafo, una vez que las principales patologías fueron removidas. Una etapa final de control de calidad del resultado y detección de errores permitió la mejora iterativa del resultado volviendo a interrogar la imagen original en las zonas donde se dispararon alarmas de baja calidad de la traza.



- iv. **Desarrollo de la aplicación Curve Explorer.** Se trata de otro módulo de aplicación desarrollado sobre Matlab que permite ingresar manualmente y en forma gráfica líneas poligonales que siguen la traza identificada por el operador en la banda escaneada que se despliega en pantalla. La aplicación dispone de una serie de comandos 'single-key' (activados mediante la pulsación de una única tecla) que facilitan la digitación de los puntos claves. Se realizó una experiencia piloto con la aplicación procesando la base de datos correspondiente a la estación Prado, la cual consta de aproximadamente 2000 imágenes. El tiempo de procesamiento insumido fue de aproximadamente 170 horas-hombre, o unos 5 minutos por imagen. Esta experiencia resultó positiva para el procesamiento de conjuntos acotados de imágenes y permitió elaborar una base de referencia para la validación de los algoritmos de procesamiento automático. Sin embargo se considera que la misma no es escalable al procesamiento manual masivo de grandes cantidades de imágenes.
- v. **Procesamiento de la base de datos.** Esta etapa se abordará en forma sistemática una vez completado el desarrollo de algoritmos de segmentación y seguimiento, mediante el uso del Cluster-FING, el cual proporciona más de 150 núcleos de procesamiento paralelo. En base al estado actual de los algoritmos se estima que el procesamiento de cada imagen insumirá entre 20 y 40 minutos de CPU. De acuerdo con lo expuesto en el ítem "aplicación Curve Explorer", se dispone actualmente de la base de datos correspondiente a la estación Prado, ya procesados en forma semi-manual. Respecto al formato de presentación de los datos, el mismo se basó en una estructura Matlab compuesta de un registro para cada banda, o período de 24 horas de cada estación.



Estos registros cuentan con 5 campos alfa numéricos. Tres campos numéricos corresponden a la fecha, en forma de Año, Mes y Día. Un campo alfanumérico descriptivo indica en cada caso las unidades de los datos, correspondiendo a “mm de lluvia acumulados en períodos de un minuto”. Finalmente un campo vectorial contiene la serie temporal de datos para el día correspondiente al registro, conteniendo en total 1560 datos, uno por cada minuto desde la hora 6 del día de la fecha hasta la hora 8 del día siguiente. Normalmente los registros discurren de la hora 7 a la hora 7 del día siguiente, pero existen excepciones en los casos de bandas que permanecen colocadas más de un día y/o cuando el cambio de banda no se produce exactamente las 7 de la mañana.

Como fue mencionado, la tarea que se describe en el ítem desarrollo de algoritmos de segmentación y seguimiento, que constituye el núcleo principal del escaneó y procesamiento de las bandas pluviográficas, presentó dificultades mayores a las esperadas para el procesamiento de las bandas que presentan una traza de mala calidad por escasez de tinta en el puntero. Los datos correspondientes a la estación Prado fueron procesados de forma semi-manual utilizando la aplicación Curve Explorer. Este desarrollo, no previsto inicialmente, ha permitido realizar una entrega de la base de datos de dicha estación, que al mismo tiempo constituye una base de referencia para validar y corregir los procedimientos actualmente en desarrollo.

A partir de la serie de datos obtenida de la digitalización y procesamiento de las bandas pluviográficas y con el objetivo de utilizar dicha información para la elaboración de las curvas IDF, fue necesario realizar una extracción de las series de máximos anuales para diferentes duraciones. Se procedió entonces a efectuar previamente una conversión de la serie continua de datos a una serie de acumulados, utilizando ventanas móviles, de ancho igual a cada duración.

Para ello se procedió, en primer lugar, a efectuar un reconocimiento de bandas contiguas a través de una rutina de Matlab, con la cual se explora mediante un ciclo de iteración cada entrada de la estructura original y se evalúa la fecha asociada a la correspondiente banda y a la banda siguiente. Si las bandas  $i$  e  $i+1$  son contiguas, la rutina las une, considerando el intervalo de tiempo en que se solapan (2h), y evalúa si la banda  $i+2$  es contigua a la pareja ya combinada. La salida de esta etapa se almacena en una estructura, con los mismos campos de la estructura original, en que cada entrada de la misma corresponde a una banda copiada directamente de la estructura original (si la duración del evento es menor o igual a 24 horas) o un conjunto de bandas unidas (si el evento tiene una duración mayor a un día).

Seguidamente, para esta nueva estructura, se ejecuta una segunda rutina que computa la precipitación acumulada en ventanas móviles de duración  $d$  (5, 10, 20 y 30 minutos, y 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas). Los datos resultantes son almacenados en una matriz auxiliar de 4 columnas, las primeras tres indican la fecha (año, mes, día) y la restante la lluvia de duración  $d$ . Por último, la rutina extrae para cada año la precipitación máxima de duración  $d$ .



### 2.1.3 Análisis de calidad de los datos

En base a un análisis preliminar de calidad de datos de la E.M. Prado para el período 1969-2005 y debido a los huecos en dicha serie de información, se decidió incorporar al análisis la información existente en las E.M. Carrasco y Melilla, de la Dirección Nacional de Meteorología, de la E.M. Sayago, de la Facultad de Agronomía, Universidad de la República y de la E.M. Las Brujas (INIA).

A finales de 2012 se realizó un acuerdo entre la Dirección Nacional de Meteorología y la Facultad de Ingeniería a efectos de obtener la información de las estaciones Carrasco y Melilla. Durante los meses de febrero y marzo se procesó la información de la E.M. Carrasco. Para el caso de la E.M. de Sayago (Facultad de Agronomía) se dispuso de información digital horaria para el período 2002-2012 mientras que la información de las bandas pluviográficas para el período (1994-2002) no pudo utilizarse por ser de registro semanal sin el necesario nivel de precisión para la apreciación de intensidades en intervalos de minutos u horarios. En el caso de la E.M. Las Brujas (INIA) se dispuso de la información horaria digital para el período 2000-2012, y de las bandas pluviográficas anteriores a 2000. A la fecha están siendo procesadas, pero el número de bandas disponibles así como la corta longitud de la serie, permiten establecer que no serán suficientes para ajustar relaciones IDF propias de la estación, aunque si probablemente contribuyan a la descripción espacial de las precipitaciones máximas en el Departamento.

La consistencia de la información pluviográfica digitalizada de las E.M. Prado y Carrasco se analizó mediante la comparación de los registros pluviográficos con los registros pluviométricos correspondientes a cada una. Para efectuar dicha comparación se manejaron los acumulados diarios de pluviómetro para todos los días correspondientes a bandas pluviográficas digitalizadas. En segundo lugar se calcularon los acumulados diarios a partir de los registros pluviográficos con ventana fija y coincidente con el lapso de registro del pluviómetros (7 a 7 am). Finalmente se conformó la serie de máximos anuales, calculando los máximos anuales para todas las duraciones con ventana móvil y paso de 1 minuto.

A partir de la observación de las series de máximos anuales de todas las duraciones surge que hay buena correlación de fechas entre los máximos ya que los eventos de precipitación en los que se sitúan estos máximos son entre 2 y 3 por año. Se analizó esto en detalle evaluando la coincidencia de fechas en los máximos según duración para la serie extendida en la E.M. Prado.

El resultado se resume en la Tabla 2-1. Vale aclarar que para duraciones menores a 1h solo se usaron los datos de la nueva serie ya que no se dispone de las fechas en la serie original de Rodríguez Fontal.



**Tabla 2-1 Coincidencia de fecha para eventos de distinta duración**

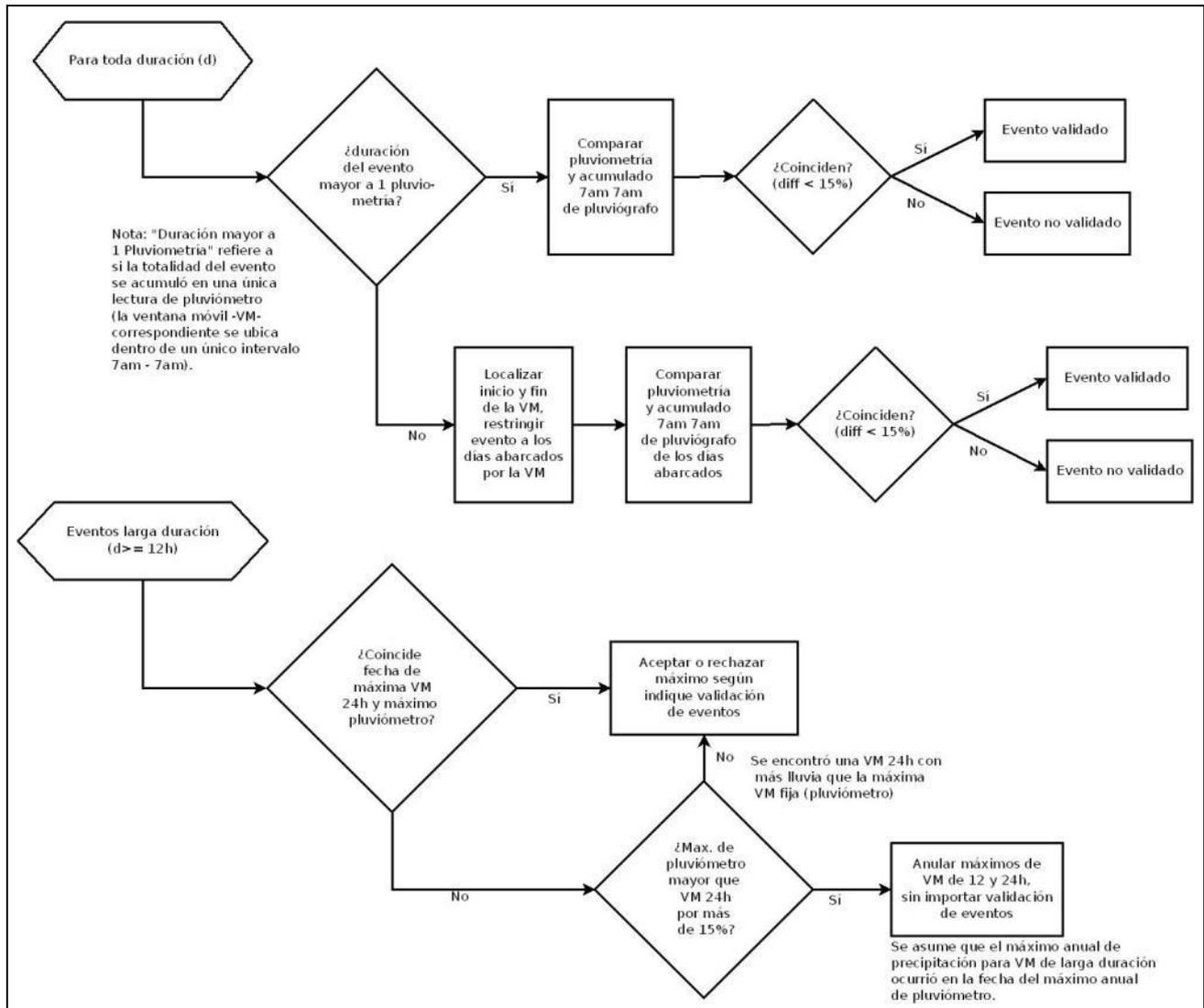
Duración	24h	12h	6h	3h	2h	1h	30min	20min	10min
24h		70%	56%	46%	38%	30%	40%	40%	30%
12h	70%		71%	58%	49%	41%	50%	50%	40%
6h	56%	71%		72%	63%	48%	70%	70%	60%
3h	46%	58%	72%		85%	65%	80%	60%	60%
2h	38%	49%	63%	85%		71%	70%	50%	60%
1h	30%	41%	48%	65%	71%		90%	70%	70%
30min	40%	50%	70%	80%	70%	90%		80%	80%

La cual muestra la existencia de 3 grupos de coincidencia:

- 1) 24 y 12h
- 2) 6, 3 y 2h
- 3) 1h, 30min, 20 y 10 min

Esto genera un criterio cualitativo de validación de la información pluviográfica, por el cual se estudiarán las duraciones en “bloque” para tomar la decisión de validar eventos.

De lo expuesto surgen criterios para la validación de los eventos máximos anuales por duración que siguen el diagrama de flujo expuesto en la Figura siguiente.



**Figura 2-1: Diagrama de procedimiento para la validación (filtrado) de los máximos anuales de precipitación por ventana móvil (VM).**

Del análisis de todo el conjunto de información se desprende que la variación espacial de las precipitaciones extremas en el departamento de Montevideo es tal que no permite completar la serie histórica de Prado utilizando relaciones simples con el resto de las estaciones pluviográficas.

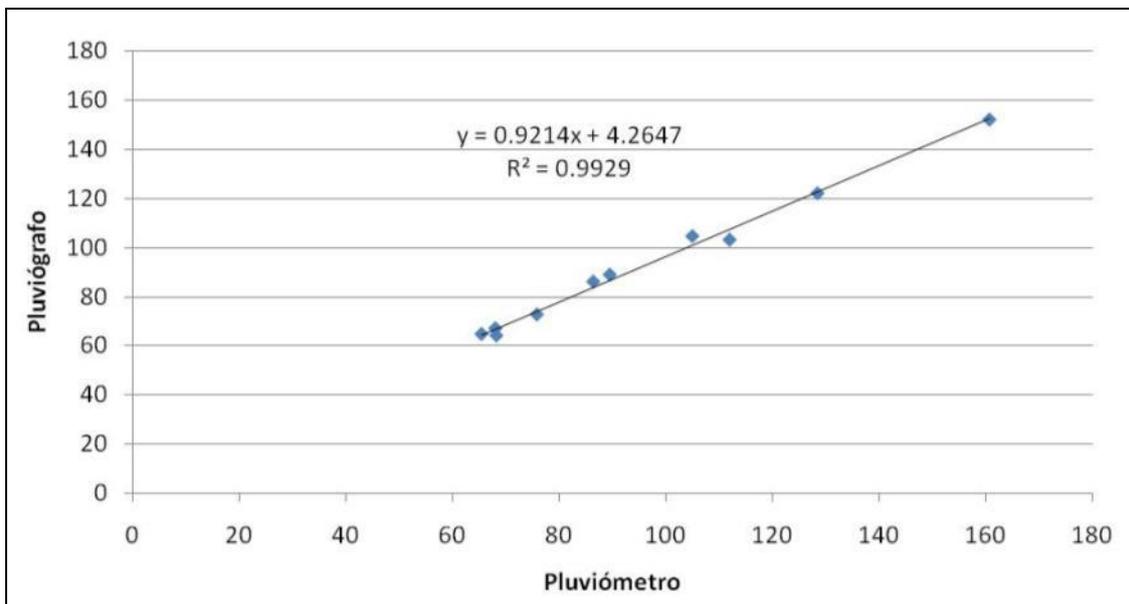
Si bien es factible desarrollar una metodología que permita establecer los patrones de variación eso excede los objetivos alcanzables en el marco de este estudio y su validación es compleja debido a las limitaciones de cantidad y calidad de la información recopilada en las demás estaciones (en particular Carrasco).

A continuación se presentan los principales resultados del tratamiento de datos realizado sobre la información digitalizada de las E.M. Prado y Carrasco.

#### a) Estación Meteorológica Prado

De la comparación pluviómetro-pluviógrafo surge que de los 25 años del período común dichos máximos coinciden por fecha en 16 años, en otros 7 no existe la banda de la fecha del máximo y en los restantes 2 el pluviógrafo tuvo otro registro mayor en distinta fecha (posible mal funcionamiento del equipo en la fecha del máximo).

Los valores de serie coincidente presentan diferencias mayores al 15% en 6 de los 16 años, la correlación entre las parejas con diferencias menores al 15% se presenta en la Figura 2-2. Se encuentra que el pluviógrafo subestimó los máximos registrados en un 7,9%. Este resultado es coherente con lo obtenido en otros estudios en que se comparó la relación pluviómetro – pluviógrafo.



**Figura 2-2: Relación eventos máximos pluviómetro – pluviógrafo E.M. Prado**

Con los criterios expuestos, fueron extendidas las series de máximos anuales de Estación Prado con los máximos, correspondientes al período 1981-2005, extraídos de las bandas de pluviógrafo barridas por ventana móvil. La Tabla 2-2 presenta los resultados de la extensión de las series de máximos anuales para cada duración, mientras que en la Tabla 2-3 se presenta el detalle de que información se incorporó para cada año según duración.

**Tabla 2-2: Longitud series de máximos anuales en Prado**

Duración	Longitud (años) hasta 1974	Longitud (años) hasta 2005
24h	69	80
12h	69	80
6h	69	86
3h	69	87
2h	69	85
1h	69	86
30 min	57	73
20 min	57	73
10 min	57	73

**Tabla 2-3: Detalle de la información incorporada por duración y por año**

Año	Duración									
	24 h	12 h	6 h	3 h	2 h	1 h	30 min	20 min	10 min	5 min
1981	no	no	si	si	no	no	si	si	si	si
1982	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1983	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1984	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1985	no	no	si	si	si	si	si	si	si	no
1986	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1987	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1988	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1989	no	no	si	si	si	si	si	si	si	si
1990	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1991	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1992	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1993	no	no	si	si	si	si	no	no	no	no
1994	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1995	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1996	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1997	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1998	no	no	si	si	si	si	no	no	no	no
1999	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2000	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
2001	no	no	si	si	si	si	si	si	si	si

Año	Duración									
	24 h	12 h	6 h	3 h	2 h	1 h	30 min	20 min	10 min	5 min
2002	no	no	no	si	si	si	si	si	si	si
2003	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2004	si	si	si	si	no	si	si	si	si	si
2005	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si

Con el objetivo de resumir la descripción estadística de las series de información del período original y del período extendido, a continuación se presentan diagramas “box-plot” para todas las duraciones. Estos diagramas permiten interpretar la dispersión de los datos utilizando la mediana, los percentiles 25 y 75 y los valores máximos y mínimos; también proporcionan una visión general de la simetría de la distribución de los datos y muestran la presencia de valores atípicos (outliers).

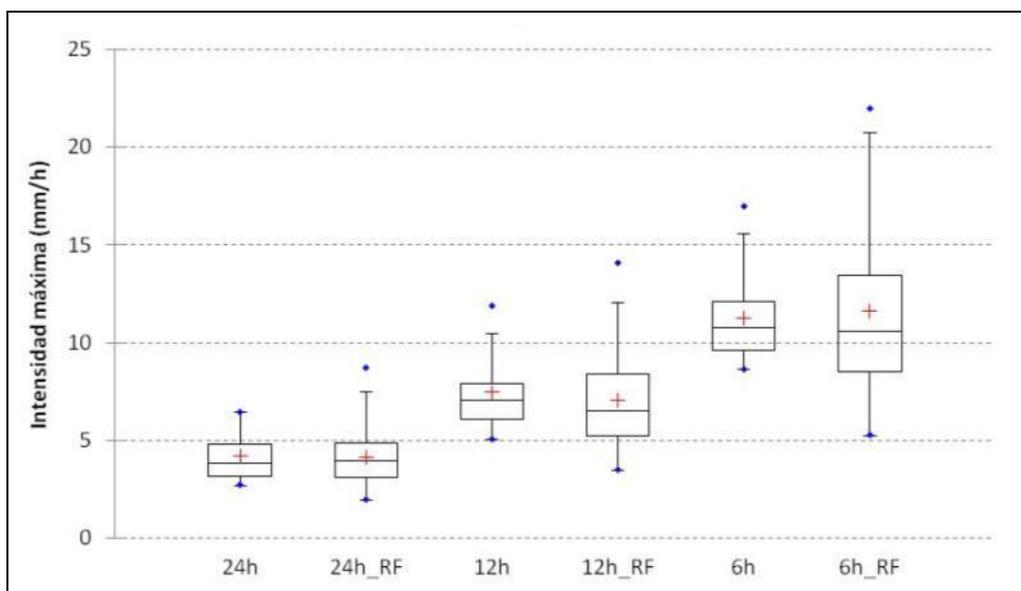


Figura 2-3: Estadísticas para 24, 12 y 6h, en el período 1906-1974 (RF) y 1975-2005.

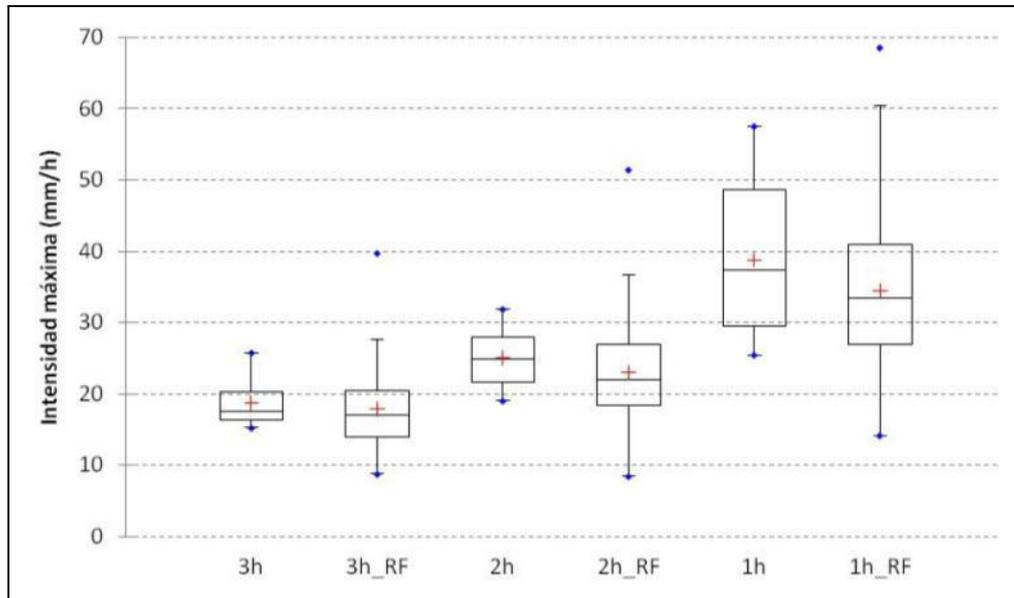


Figura 2-4: Estadísticas para las series de 3, 2 y 1h, en el período 1906-1974 (RF) y 1975-2005.

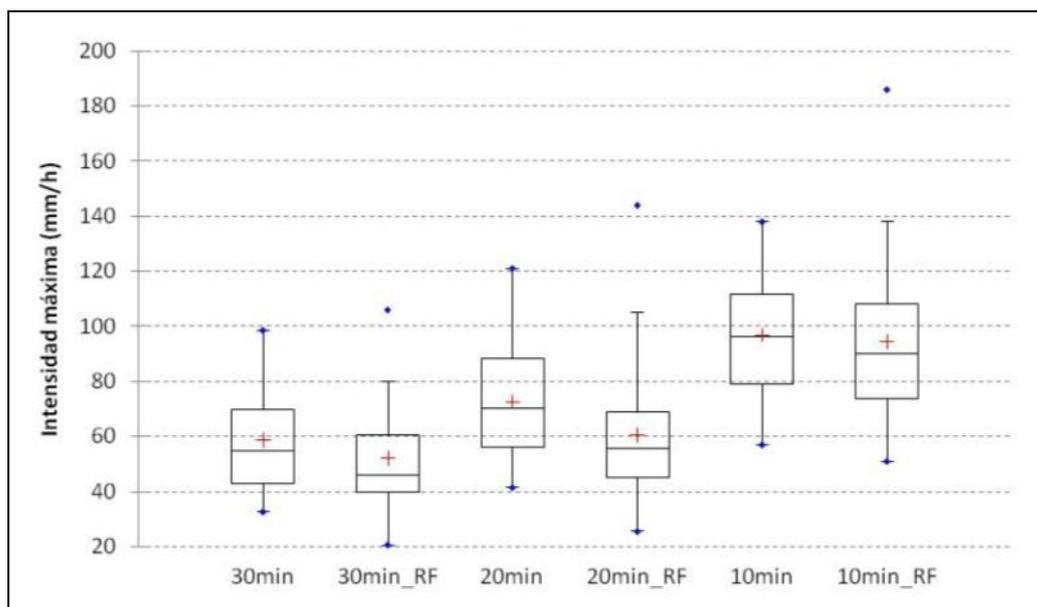


Figura 2-5: Estadísticas para las series de 30, 20 y 10 min, en el período 1906-1974 (RF) y 1975-2005.

En particular, se observa que la media y mediana tienden a ser mayores para duraciones menor o igual a 2 horas, para el período más reciente (1975-2005) en comparación con el antecedente histórico (1906-1974).

## b) Estación Meteorológica Carrasco

De la comparación pluviómetro-pluviógrafo surge que de los 32 años del período común dichos máximos coinciden por fecha en 21 años, en otros 3 no existe la banda de la fecha del máximo y en los restantes 9 el pluviógrafo subestimó el acumulado diario (en general el equipo dejó de registrar luego de comenzado el evento). Los valores de serie coincidente presentan diferencias mayores al 15% en 5 de los 21 años, la correlación entre las parejas con diferencias menores al 15% se presenta en la Figura 2-6, donde se muestra que el pluviógrafo subestimó los máximos registrados en un 10%. Como se señaló anteriormente, son diferencias coherentes con otros estudios en que se comparó la relación pluviómetro – pluviógrafo.

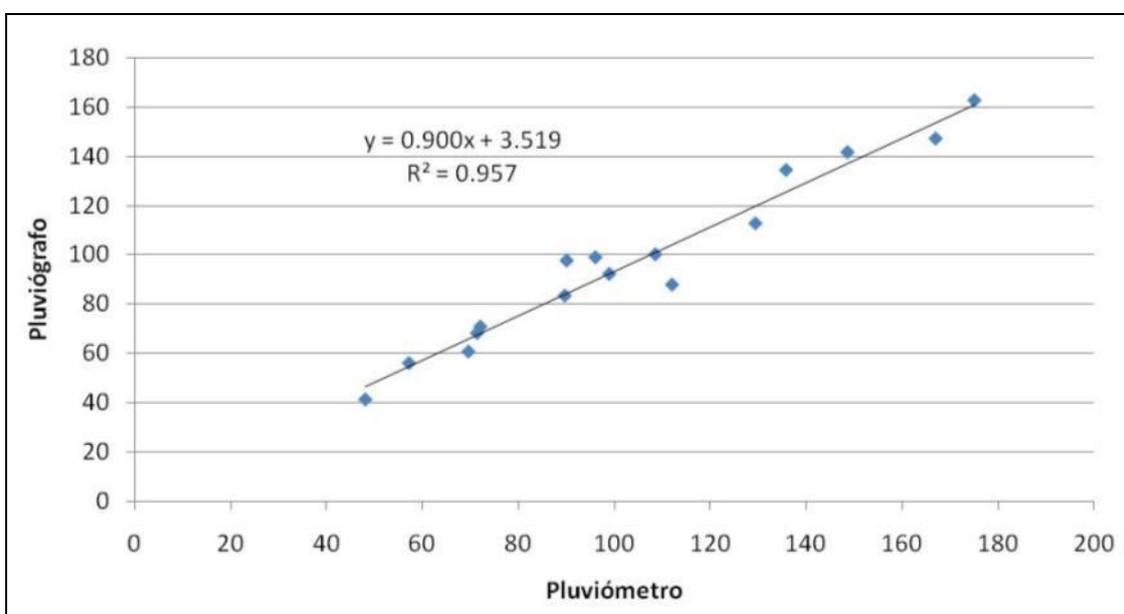


Figura 2-6: Relación eventos máximos pluviómetro – pluviógrafo E.M. Carrasco

Con la misma metodología expuesta en el ítem 3.2b), se conformaron las series de máximos anuales de E. M. Carrasco para este estudio con los máximos correspondientes al período 1977-2012, extraídos de las bandas de pluviógrafo barridas por ventana móvil. La Tabla 2-4 presenta el detalle de que información incorporada para cada año según duración.

Tabla 2-4: Detalle de la información incorporada por duración y por año en el E.M. Carrasco

Año	Duración								
	24h	12h	6h	3h	2h	1h	30min	20min	10min
1977	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1978	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1979	no	no	si	si	si	si	si	si	si
1980	si	si	si	si	si	si	si	si	si



Año	Duración								
	24h	12h	6h	3h	2h	1h	30min	20min	10min
1981	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1982	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1983	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1984	no	no	no	si	si	si	si	si	si
1985	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1986	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1987	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1988	si	si	si	si	si	no	no	no	no
1989	no	no	no	si	si	si	si	si	si
1990	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1991	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1992	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1993	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1994	si	si	si	si	si	si	si	si	si
1995	si	si	si	si	si	si	no	no	no
1996	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1997	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1998	no	no	no	no	no	no	no	no	no
1999	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2000	no	no	si	si	no	no	no	no	no
2001	no	no	si	si	si	si	si	si	si
2002	no	no	no	no	no	no	no	no	no
2003	no	no	no	no	no	no	no	no	no
2004	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2005	no	no	no	no	no	no	no	no	no
2006	si	si	si	si	si	si	no	no	no
2007	no	no	no	no	no	si	si	si	si
2008	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2009	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2010	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2011	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2012	si	si	si	si	si	si	si	si	no

En el Anexo V se presenta un ajuste preliminar de la serie de máximos de esta estación, como primer avance en la generación de un mapa de curvas IDF para el departamento de Montevideo.

Con el objetivo de resumir la descripción estadística de las series de información obtenidas en la E. M. Carrasco y compararlas con las nuevas series de la E.M. Prado, se presentan diagramas “box-plot” para todas las duraciones de la Figura 2-7 a la Figura 2-9.

Se observa que en general las series de datos de la estación Carrasco presentan mayor dispersión que las de Prado, a menos de las series de duración 1h que no presentan diferencias significativas y las de 30 y 20 min que tienen menor dispersión.

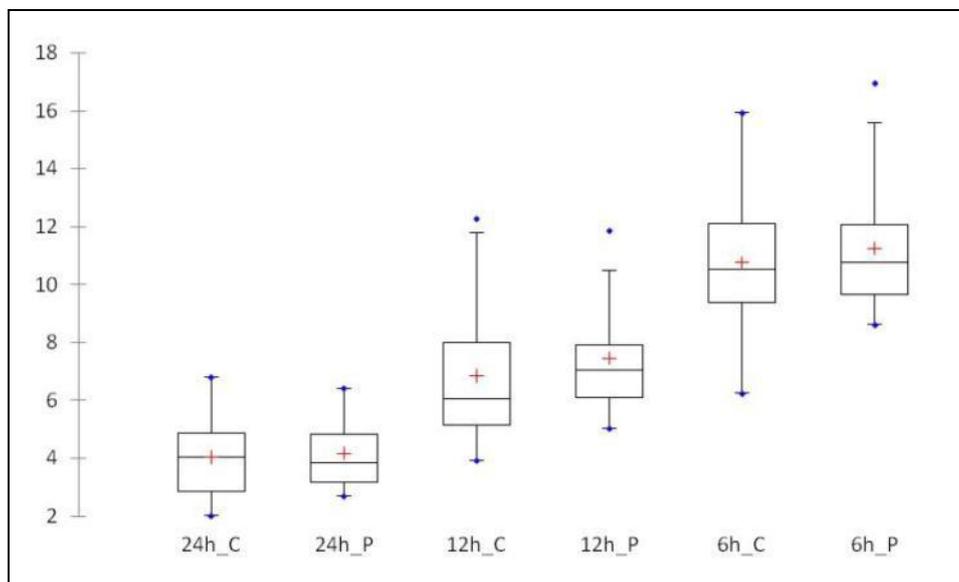
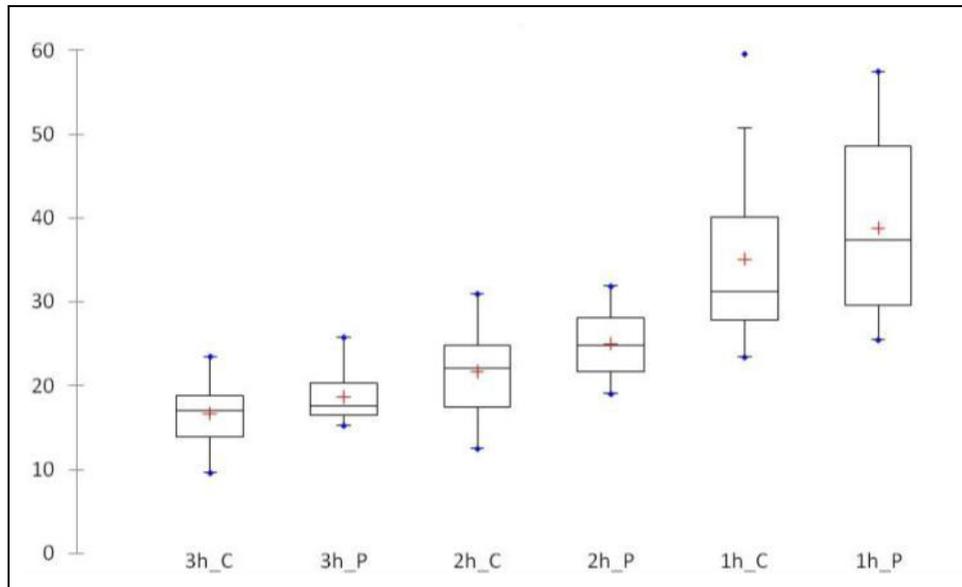
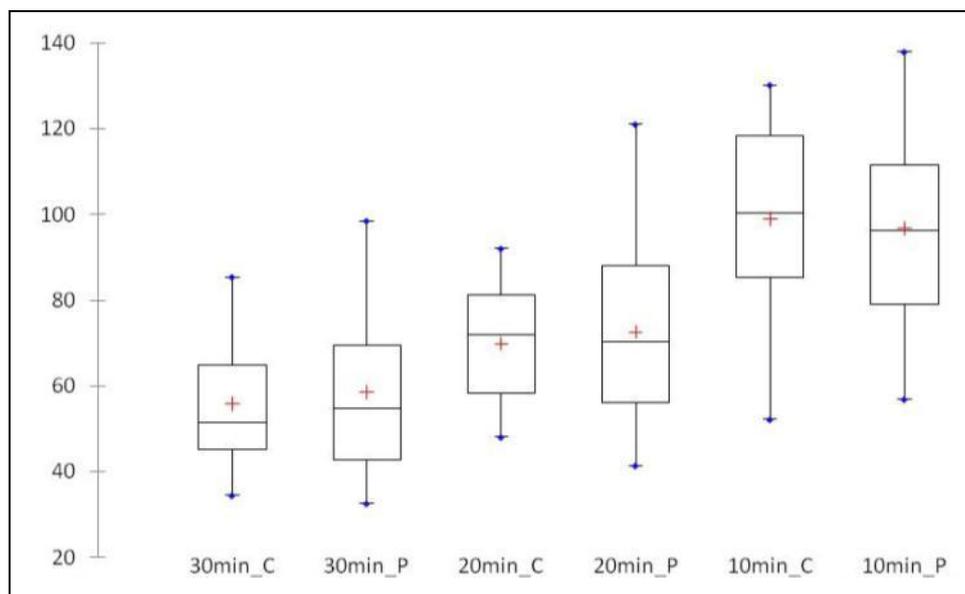


Figura 2-7: Estadísticas para 24, 12 y 6h, en el período nuevo de Prado (P) y Carrasco (C).

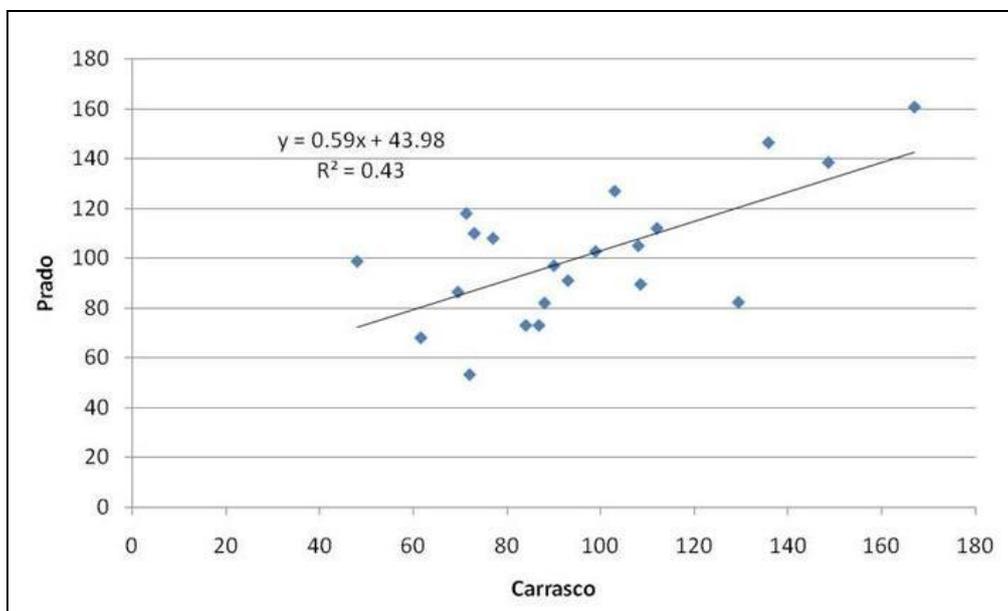


**Figura 2-8: Estadísticas para 3, 2 y 1h, en el período nuevo de Prado (P) y Carrasco (C).**



**Figura 2-9: Estadísticas para 30, 20 y 10 min, en el período nuevo de Prado (P) y Carrasco (C).**

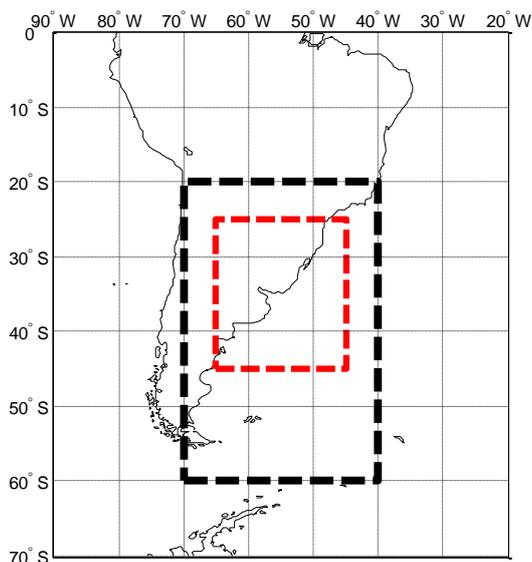
De los 32 años del período común analizado entre las estaciones Prado y Carrasco, los máximos anuales de pluviómetro no coinciden en fecha en 11 casos. Para los restantes no se observa una buena correlación entre las magnitudes registradas en ambas estaciones. La Figura 2-10 muestra la baja correlación existente, con lo cual se demuestra la dificultad existente para completar datos faltantes de una serie con la otra.



**Figura 2-10: Relación entre máximos anuales de pluviómetro Prado-Carrasco**

#### 2.1.4 Presión a nivel de mar y viento

Se utilizaron datos de viento a 10 m de altura y presión a nivel de mar provenientes del reanálisis global ERA-Interim, realizado por el ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). El período de reanálisis es 1979-2011, con paso temporal 6 horas y paso espacial  $0,25^\circ$ . La Figura 2-11 presenta los dominios espaciales de los datos utilizados en este trabajo.



**Figura 2-11: Dominios de datos utilizados: presión de superficie (negro) y velocidad y dirección del viento a 10 m (rojo).**

Por otro lado, se utilizaron datos de presión a nivel del mar de simulaciones con el CCSM4 en resolución de  $1.875^\circ$  y salidas cada 6hr para dos escenarios, uno con el clima actual (experimento AMIP 1979-2008) y otro con el escenario RCP4.5 (del 2006 al 2100, al cual hubo que sacarle 9 años con datos faltantes con lo que se totalizaron 86 años).

Los datos están descritos en: [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/standard\\_output.pdf](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/standard_output.pdf)

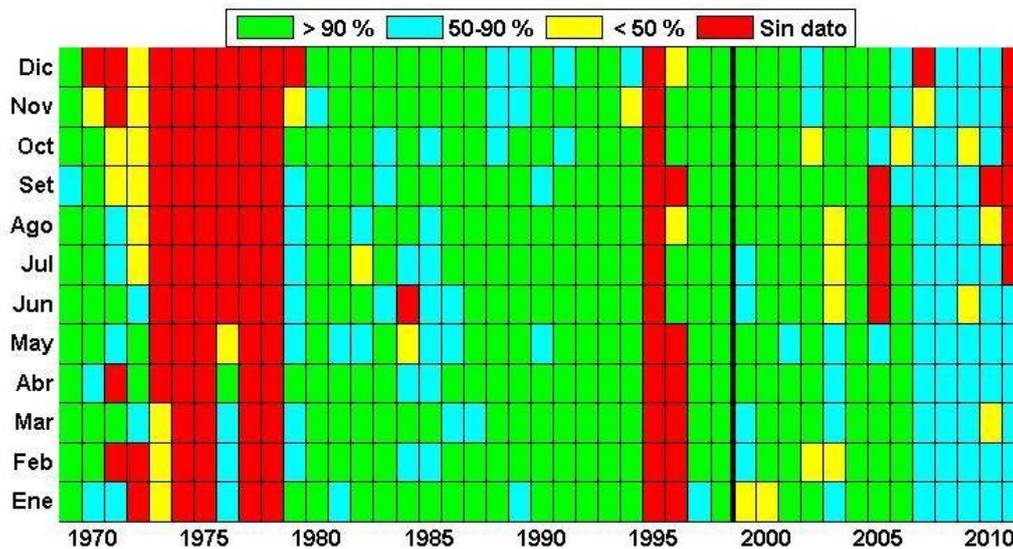
La selección del modelo se hizo en base a disponibilidad de las salidas necesarias y a desempeño conocido del modelo en la región.

## 2.1.5 Nivel del mar

### a) Montevideo

Se utilizaron los siguientes datos de nivel registrados en la bahía de Montevideo, brindados por el SOHMA:

- Datos horarios en el período 1969-2011. En la Figura 2-12 se presenta la cantidad de datos disponibles en cada mes del período.
- Datos medios y máximos anuales en el período 1900-2011.



**Figura 2-12: Disponibilidad de datos horarios de nivel en la bahía de Montevideo en el período 1969-2011. La línea negra demarca la el inicio de los datos 15 minutosales.**

### b) Región del Atlántico Sudoccidental

Se utilizaron datos medios anuales del nivel del mar en la región del Atlántico Sudoccidental con resolución de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  reconstruidos por Church. et al. (2004) para el período 1950-2001, disponibles en [http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl\\_data\\_cmar.html](http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html). Dicha reconstrucción fue realizada a nivel global en base a datos de satélite y a datos registrados en una amplia cantidad de estaciones locales.

Por otro lado, se utilizaron datos de marea meteorológica provenientes de modelación numérica a escala global, forzada con datos de viento y presión de superficie obtenidos del reanálisis ERA-Interim. Estos datos de marea, denominados Dynamic Atmospheric Correction (DAC), son proporcionados por AVISO, del CNES (Centre National d'Études Spatiales de Francia). Los datos DAC están dados en la misma grilla que los datos de ERA-Interim y con el mismo paso temporal. El período de datos es 1992 a la actualidad. En este trabajo se utilizan datos DAC correspondientes al mismo dominio espacial de los datos de presión (domino en negro de la Figura 2-11).

### c) Global

Fue utilizada la serie de datos anuales del nivel medio global obtenida por Church. et al. (2004) a partir de los datos globales reconstruidos por dicho autor para el período 1950-2001. Dicha serie también se encuentra disponible en la página web mencionada anteriormente.

## **3 ACTUALIZACIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA DE PRECIPITACIÓN**

### **3.1 Antecedentes**

#### **3.1.1 Antecedentes nacionales**

Gianoni (1973) señala que los primeros antecedentes nacionales para determinar la relación intensidad-duración-frecuencia (en adelante IDF), se deben al Ing. Carlos M. Maggiolo, quién construyó en 1920 la curva IDF para un período de retorno ( $T_r$ ) de 15 años y duraciones entre 5 min y 3 horas, con el propósito de determinar  $C_i$  en la fórmula de McMath para el dimensionado de la red de colectores de la ciudad de Montevideo. Posteriormente, el Ing. Giannattasio en el año 1923 determinó otras curvas de la misma índole, que fueron publicadas en la Revista de Ingeniería.

Gianoni, en el año 1937, establece las fórmulas de IDF de lluvias de Montevideo, de tipo hiperbólico, con base en 28 años de datos de observaciones de la estación meteorológica de El Prado, correspondientes al período 1906-1936, excepto los años 1928 y 1929. Las mismas, según Gianoni (1973) están documentadas en los planos Nos. 8281-82 y 83, de la ex Dirección de Saneamiento, del en ese entonces Ministerio de Obras Públicas. Posteriormente, el propio autor transforma las curvas de tipo hiperbólico al logarítmico para aplicar el método racional modificado (Gianoni, 1973), sin ampliar la información de base. Asimismo, señala que la información de base no es suficiente para extrapolar en duración y frecuencia, más allá de “ciertos límites adecuadamente seguros” y admite que la experiencia demuestra que las curvas hiperbólicas producen magnitudes erróneas por defecto, error que en su valor relativo va en aumento con la duración de la lluvia.

Terra (1977) establece dos familias de curvas, la primera para duraciones entre 1 y 24 horas y períodos de retorno entre 2,33 y 100 años, la segunda para duraciones entre 5 y 60 minutos y períodos de retorno entre 5 y 100 años. La información de base de este trabajo son 61 años de datos de la estación meteorológica de El Prado, en el período comprendido entre 1912 y 1972. No obstante, define una lluvia base – no fundamentada – a considerar según la duración, resultando 109 eventos, y en la determinación de las curvas IDF solamente considera los mayores 30 eventos, con una fundamentación estadística “ad hoc”.

Rodríguez Fontal (1980, 1984), determina las curvas IDF a nivel nacional, tomando como base información de la red nacional de pluviógrafos y pluviómetros, correspondiente al período comprendido entre 1906 y 1975. Su trabajo divide el Uruguay en 8 subregiones, para las cuales desarrolla fórmulas que relacionan intensidad de lluvia, duración, período de retorno y riesgo. Posteriormente, Genta et al. (1998) transforman las fórmulas de Rodríguez Fontal (1980, 1984) en un mapa de isoyetas de 3 horas de duración y 10 años de período de retorno, conjuntamente con ecuaciones que permiten calcular coeficientes de corrección según el período de retorno, la duración y el área de la cuenca.

En el marco del Plan Director de Saneamiento de Montevideo de la IM (IMM, 1994), se extendió la serie de información utilizada por Terra (1977) de 1973 a 1990 con la información de la estación de Prado que por no estar completa, fue sustituida en algunos eventos por las estaciones de Antepuerto, Oficina Central y Melilla. En este marco se ajustó la curva IDF utilizando la expresión conocida como “Ley de Montana”, obteniéndose así los nuevos coeficientes de dicha Ley para el período 1912-1990. Las ecuaciones correspondientes a estos trabajos se presentan en el Anexo I.

### 3.1.2 Antecedentes internacionales

Aparicio (1989) reúne los enfoques tradicionalmente aplicados para la determinación de las curvas idf. Según este autor, existen básicamente dos métodos: i) intensidad-período de retorno, que relaciona estas dos variables para cada duración por separado, mediante algunas de las funciones de distribución de probabilidad utilizadas en Hidrología para eventos extremos, e ii) familia de curvas, que relaciona simultáneamente las tres variables mediante ecuaciones de la forma:

$$i(Tr, d) = \frac{k \cdot Tr^m}{(d + c)^n} \quad [3.1]$$

O bien, ecuaciones similares, como plantean Chow et al. (1994):

$$i(Tr, d) = \frac{c \cdot Tr^m}{d^p + f} \quad [3.2]$$

En ambos casos,  $Tr$  representa el período de retorno y  $d$  la duración. Las constantes de las dos ecuaciones se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple.

Pizarro et al. (2003) determina las curvas IDF para zonas semiáridas de Chile Central, y Zamanillo et al. (2008) para la Provincia de Entre Ríos, Argentina. En ambos casos, aplican la metodología de la familia de curvas reseñada por Aparicio (1989), adoptando la Ley de Gumbel.

Una revisión bibliográfica del estado del arte en materia de curvas IDF, limitada a publicaciones internacionales de la última década, muestra que la metodología adoptada se basa, en general, en los procedimientos de cálculo que proponen Koutsoyiannis et al. (1998). Según esta referencia, la expresión general de la relación Intensidad-Duración-Frecuencia tiene la forma:

$$I(Tr, d) = \frac{a(Tr)}{(d + \theta)^\eta} \quad [3.3]$$

Siendo:  $I(Tr, d)$  la intensidad de la lluvia (mm/hora) para un período de retorno  $Tr$  y duración  $d$ ;  $\theta$  y  $\eta$  parámetros que se ajustan mediante cálculo numérico, mientras que  $a(Tr)$  adquiere una expresión analítica en base a la función de distribución seleccionada.

Para datos cuyo comportamiento sigue la ley de Gumbel (distribución de valores extremos tipo 1 que adopta Rodríguez Fontal (1980) para el cálculo de las IDF nacionales),  $\alpha(T_r)$  tiene la siguiente expresión:

$$\alpha(T_r) = \mu - \alpha \ln \left( \ln \left( \frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right) \quad [3.4]$$

En esta expresión,  $\mu$  y  $\alpha$  se calculan de la media y la desviación estándar del conjunto de datos de base.

## 3.2 Metodología

La metodología adoptada incluye las siguientes etapas:

- Reconstrucción de las curvas intensidad-duración-frecuencia (en adelante IDF) de Rodríguez Fontal y validación de la metodología de Koutsoyiannis en los períodos 1906-1974 y 1913-1974.
- Actualización de datos de precipitación.
- Actualización de las curvas IDF.

### 3.2.1 Reconstrucción de las curvas IDF de Rodríguez Fontal y validación de la metodología de Koutsoyiannis

En primer lugar, se reconstruyeron las curvas IDF obtenidas por Rodríguez Fontal (1980) utilizando para ello las series de máximos anuales de precipitación para duraciones de 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas y para eventos de corta duración (10, 20 y 30 minutos), correspondientes a los períodos 1906-1974 y 1913-1974, respectivamente. Dichas series fueron proporcionadas por Rodríguez Fontal en forma manuscrita. Dada la existencia de un período común 1969-1974, entre la serie manuscrita procesada manualmente y la serie de información digitalizada, se procedió a una comparación entre ambas, cuyos resultados se presenta en el Anexo II.

Para realizar la reconstrucción de las curvas IDF de Rodríguez Fontal (1980), se ajustaron las series de máximos anuales a una distribución de Gumbel (GEV Tipo 1), al igual que en su trabajo original, pero levantando la simplificación realizada por dicho autor, que aproximó la función doble logarítmica de la distribución a una función simple logarítmica (limitado por las disponibilidades computacionales de la época). En ambos trabajos, original y reconstrucción, se aplicó la fórmula de Weibull para el cálculo de probabilidades empíricas correspondientes a los datos observados.

Reconstruidas las curvas IDF de Rodríguez Fontal, se procedió a realizar una validación del método de cálculo propuesto por Koutsoyiannis et al. (1998), cuyas expresiones fueron presentadas en la sección 3.1.

### 3.2.2 Actualización de las curvas IDF

En la actualización de las curvas IDF se consideraron las siguientes alternativas:

- Curvas IDF con base en máximos anuales correspondientes al período 1906-2005.
- Curvas IDF con base en máximos anuales correspondientes al período 1975-2005.
- Curvas IDF con base en series de excedencias correspondientes al período 1975-2005.

A continuación se describe la metodología que se utilizará en cada caso.

#### a) Curvas IDF con base en máximos anuales 1906-2005

La información de base utilizada fue el registro de máximos anuales de la Estación Meteorológica de Prado (DNM), según se detalló en el ítem 3.2 b). En primer lugar se realizaron los ajustes individuales para todas las duraciones. Posteriormente y del mismo modo que en el trabajo de reconstrucción efectuado para el período 1906-1977, se distinguió entre: i) eventos cortos (duración < 1 hora) e ii) eventos largos (duración > 1 hora) y se implementó la metodología de Koutsoyiannis et al. (1998), a efectos de procesar a la vez series de máximos anuales de diferentes duraciones.

Con base en los antecedentes nacionales en materia de curvas IDF, se adoptó la decisión de ajustar la distribución Gumbel. Se ejecutó, además, las pruebas de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Pearson ( $X^2$ )

#### b) Curvas IDF con base en máximos anuales 1975-2005

A efectos de considerar eventuales incrementos en la intensidad de los eventos registrados en las últimas décadas, se realizó el ajuste para la serie comprendida entre 1975 y 2005, a menos de los años con datos faltantes en la estación Prado (1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980 y 2000), formando 24 años de datos. No obstante, una vez realizado el análisis de calidad de la información, ésta serie se redujo sensiblemente (ver Tabla 2-3). La metodología a aplicar es la misma descrita en el punto anterior.

#### c) Curvas IDF con base en series de excedencia 1975-2005

Las series de duración parcial (SDP) o de picos sobre umbral son aquellas que incluyen todos los valores extremos (picos) que sobrepasan un valor de umbral dado. Tienen la ventaja de permitir trabajar con series más extensas cuanto menor sea el umbral elegido, pero al mismo tiempo aumenta la posibilidad de que las observaciones no sean independientes y el análisis de probabilidad se vea afectado.

Ben Zvi (2009) recopila numerosos criterios de selección del umbral que vinculan el número de eventos que deben ser incorporados a la SDP con el período (en años) de la serie original, variando según el autor esta relación entre 1 y 4.

Si se define un valor base, tal que el número de valores de la serie que lo superan es igual al número de años de la serie, se obtiene una serie de excedencias anuales (Chow et. al, 1994). El periodo de retorno  $T_E$  de las magnitudes de los eventos que conforman una serie de excedencias anuales se relaciona con el correspondiente período de retorno  $T$  de las magnitudes derivadas de una serie constituida por máximos anuales por:

$$T_E = \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right]^{-1} \quad [3.5]$$

La metodología a adoptar consiste en seleccionar el valor de umbral de precipitación extrema tal que el número de eventos sea igual al número de años de la serie (29 eventos). El umbral se valida en función de la aplicación del test de aleatoriedad de Rangos de Spearman a la serie de excedencias.

Luego se ajusta una distribución Gumbel y posteriormente se analiza la bondad de dicho ajuste mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling.

### 3.3 Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos, referentes a la validación de la metodología de Koutsoyiannis y la actualización de las curvas IDF.

#### 3.3.1 Reconstrucción de las curvas IDF de Rodriguez Fontal y validación de la metodología de Koutsoyiannis

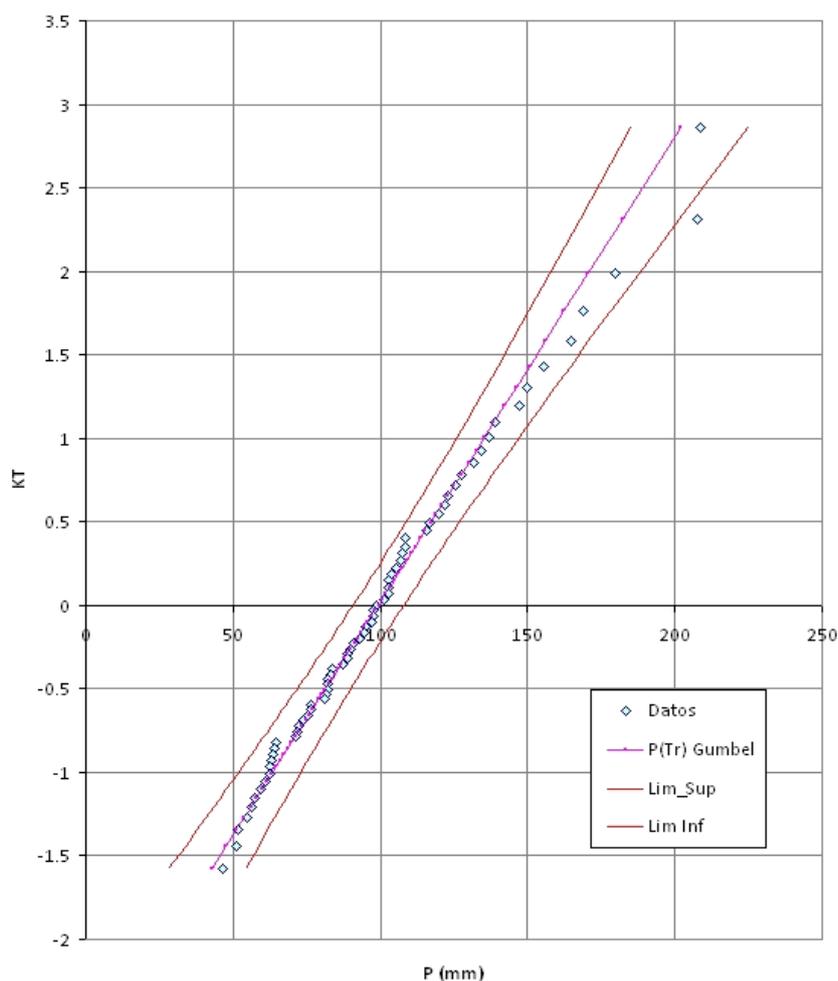
En la Tabla 3-1 se presentan los valores de los parámetros de la distribución de Gumbel obtenidos de la reconstrucción de las curvas de Rodriguez Fontal para las series de máximos anuales en el período 1906-1974, así como los obtenidos originalmente por dicho autor (utilizando la simplificación del doble logaritmo). Los parámetros  $\varepsilon_t$  y  $K_t$  corresponden a la formulación propuesta por Rodriguez Fontal (ver Ecuación 1.2 del Anexo I), siendo el primero comparable con el parámetro  $\mu$  de la distribución de Gumbel.

**Tabla 3-1: Parámetros de la distribución de Gumbel calculados y parámetros originales de la forma simplificada de Rodríguez Fontal (1980)**

Duración	Parámetros originales (Rodríguez Fontal, 1980)		Parámetros Gumbel (calculados)	
	$\epsilon_t$	$K_t$	$\mu$	$\alpha$
24h	83.2	0.774	83.22	27.97
12h	70.7	0.770	71.07	23.55
6h	58.3	0.770	58.46	19.45
3h	45.0	0.791	44.96	15.45
2h	39.3	0.728	38.88	12.23
1h	29.1	0.718	29.26	9.02
30 min	22.0	0.733	22.01	7.00
20 min	17.0	0.721	17.05	5.34
10 min	13.5	0.687	13.45	4.01

Para verificar la distribución de Gumbel obtenida se aplicaron tres pruebas de bondad de ajuste:  $X^2$ , Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. Se obtuvo que para el test  $X^2$  la hipótesis fue aceptada para todas las duraciones menos las de 10 min, 2 h y 6 h para las cuales la hipótesis fue rechazada, mientras que para las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling dicha hipótesis fue aceptada para todas las duraciones.

En la Figura 3-1 se presenta la reconstrucción de la curva intensidad-frecuencia (KT), para una duración de 24 horas, utilizando los datos del período 1906-1974. KT corresponde al factor de frecuencia definido por Chow.



**Figura 3-1: Reconstrucción de la curva intensidad – frecuencia (KT) para una duración de 24 hs**

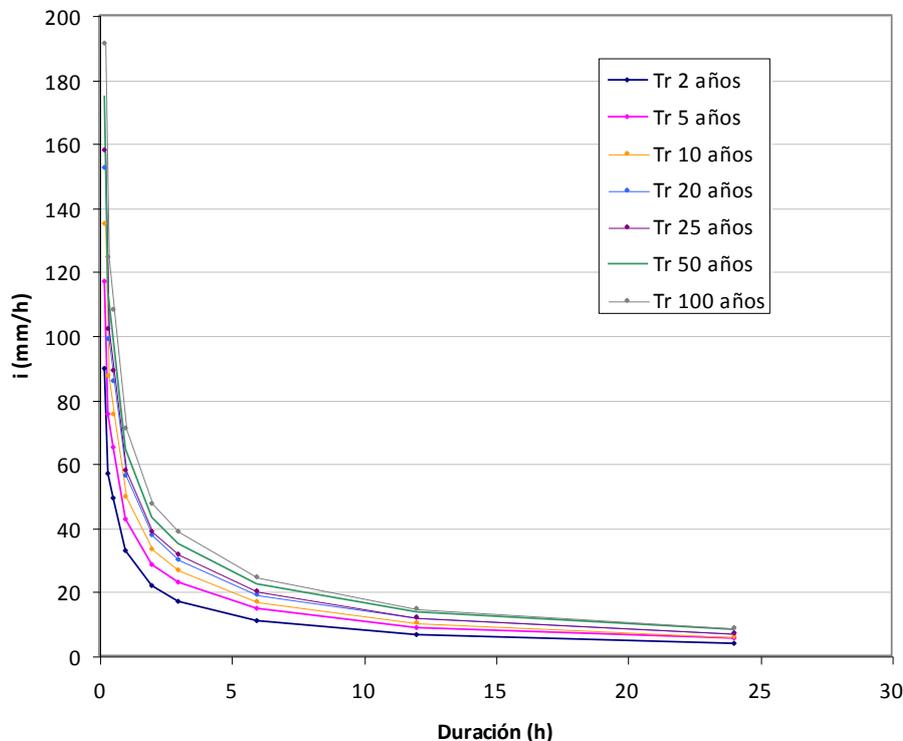
La Tabla 3-2 compara los valores de precipitación de las curvas IDF para una duración de 24 hs y diferentes períodos de retorno, obtenidos de la reconstrucción realizada y de aplicar la formulación de Rodríguez Fontal, así como el error entre ambos (expresado en función de los valores de Rodríguez Fontal, por ser los que se utilizan actualmente). En el Anexo III se incluye idéntica comparación para duraciones de 10, 20, 30 minutos y 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas.

**Tabla 3-2: Comparación entre la curva intensidad – frecuencia (Tr) original de Rodríguez Fontal (1980) y su reconstrucción, para una duración de 24 h**

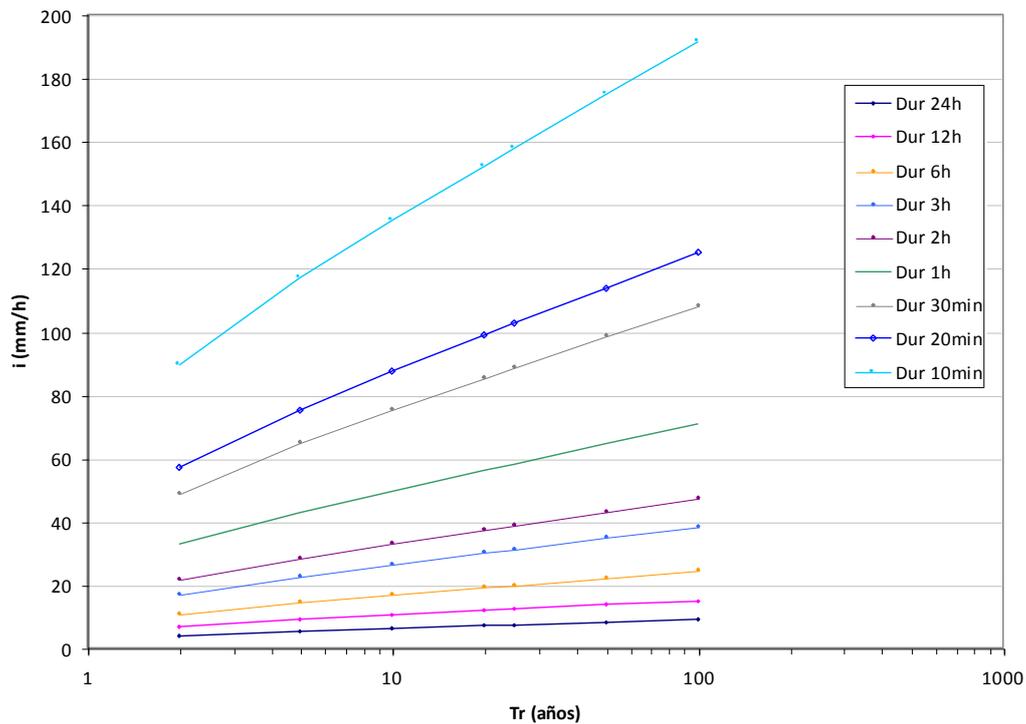
Duración: 24 h				
Tr (años)	KT	Precipitación (mm)		Error (%)
		Rodríguez Fontal	Gumbel (calculada)	
2	-0.164	102.6	93.5	-8.9%
5	0.719	128.2	125.2	-2.4%
10	1.305	147.6	146.2	-1.0%
20	1.866	167.0	166.3	-0.4%
25	2.044	173.2	172.7	-0.3%
50	2.592	192.6	192.3	-0.1%
100	3.137	212.0	211.9	-0.1%

La diferencia máxima en la comparación se da para los períodos de retorno menores, allí donde la simplificación del doble logaritmo hecha por Rodríguez Fontal tiene mayor incidencia.

Por otra parte la Figura 3-2 y la Figura 3-3 muestran las curvas intensidad – duración e intensidad – frecuencia (Tr), obtenidas de la reconstrucción realizada, parametrizadas según período de retorno y duración respectivamente.



**Figura 3-2: Curvas intensidad – duración parametrizadas según el período de retorno (Tr)**



**Figura 3-3: Curvas intensidad – frecuencia ( $T_r$ ) parametrizadas según la duración**

Por último, se realizó un ajuste de la distribución GEV, a efectos de verificar que el parámetro  $\kappa$  tiende a 0, de modo de validar el uso de la distribución de Gumbel. La Tabla 3-3 muestra que el valor del parámetro  $\kappa$  es muy próximo a 0.

**Tabla 3-3: Parámetros de la distribución GEV y parámetros de la distribución de Gumbel**

Duración	Parámetros GEV			Parámetros Gumbel	
	$\mu$	$\alpha$	$\kappa$	$\mu$	$\alpha$
24h	3.47	1.20	-0.022	3.47	1.17
12h	5.95	2.10	-0.055	5.92	1.96
6h	9.81	3.53	-0.073	9.74	3.241
3h	14.99	5.15	0.000	14.99	5.15
2h	19.44	6.12	0.000	19.44	6.12
1h	29.56	10.13	-0.102	29.26	9.03
30min	44.14	14.61	-0.034	44.02	14.00
20min	51.14	16.02	0.000	51.14	16.02
10min	80.71	24.07	0.000	80.71	24.07

Los resultados de las prueba de bondad de ajuste realizadas para la distribución GEV fueron los siguientes: El test  $X^2$  aceptó la hipótesis de que los datos siguen una distribución GEV para las duraciones de 20 min, 1h, 6 h, 12 h y 24 h, rechazándola para las restantes

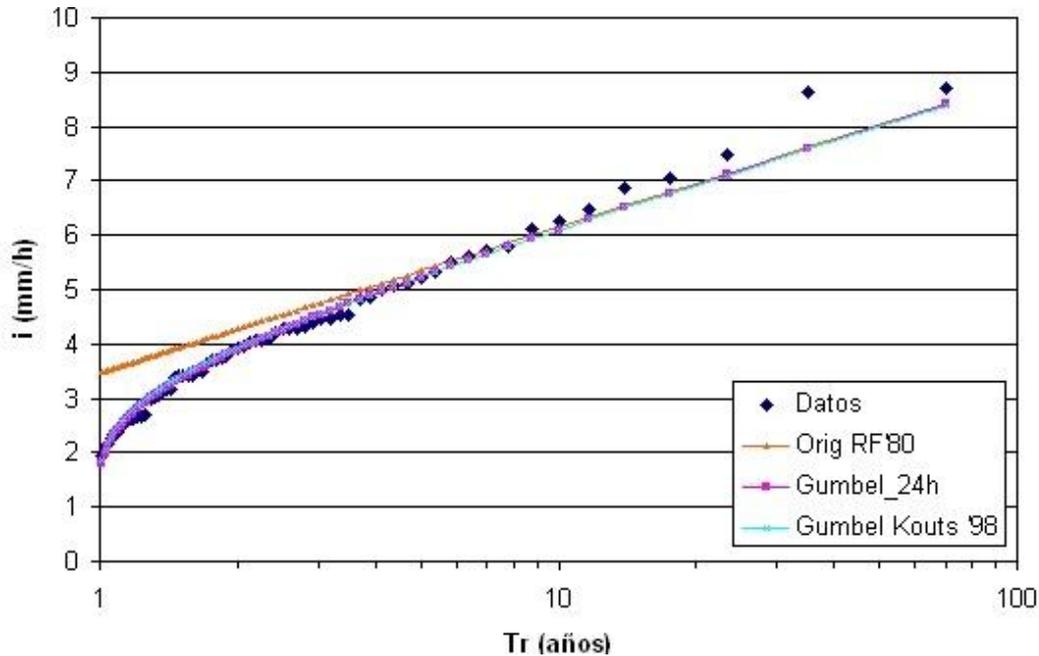
duraciones; la prueba de Kolmogorov-Smirnov aceptó la hipótesis para todas las duraciones y la prueba Anderson-Darling aceptó la hipótesis para todas las duraciones menos para la de 30 min. Cabe acotar que el test  $X^2$  es muy sensible a la selección arbitraria de intervalos (ancho e inicio), por lo que son más confiables los resultados de los tests de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling.

Finalmente, con el objetivo de validar la metodología de reconstrucción de las curvas IDF con la propuesta por Koutsoyiannis et al. (1998), para duraciones mayores a 1 hora, se ajustó la distribución de Gumbel, según las ecuaciones [1.3] y [1.4] para las series de precipitaciones máximas anuales. Los parámetros resultantes fueron los que se presentan en la Tabla 3-4 a continuación:

**Tabla 3-4: Parámetros de la distribución Gumbel para  $d \geq 1$  h**

$\mu$	38.68
$\alpha$	12.61
$\eta$	0.75
$\theta$	0.46

En la Figura 3-4 se presenta una comparación entre la relación intensidad-frecuencia ( $Tr$ ) para la duración de 24 horas obtenida originalmente por Rodríguez Fontal, por la reconstrucción realizada y por el método de Koutsoyiannis et al. (1998), correspondientes al período 1906-1974. Asimismo, en la Tabla 3-5, se comparan los valores numéricos de la precipitación de 24 horas calculada por ambos métodos y el error que se comete con el método de Koutsoyiannis et al. (1998), tomando como referencia el resultante de Rodríguez Fontal (1980). En el Anexo III se incluye idéntica comparación para duraciones de 10, 20, 30 minutos y 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas.



**Figura 3-4: Comparación entre las curvas intensidad – frecuencia (Tr) para una de duración 24 hs, obtenidas por Rodríguez Fontal (1980), su reconstrucción y el método de Koutsoyiannis et al. (1998)**

**Tabla 3-5: Comparación entre las curvas precipitación– frecuencia (Tr) obtenidas por Rodríguez Fontal (1980) y por el método de Koutsoyiannis et al. (1998)**

Duración: 24 h				
Tr (años)	KT	Precipitación (mm)		Error (%)
		Rodríguez Fontal	Koutsoyiannis	
2	-0.164	102.6	94.5	-7.9
5	0.719	128.2	125.7	-2.0
10	1.305	147.6	146.3	-0.9
20	1.866	167.0	166.1	-0.5
25	2.044	173.2	172.4	-0.5
50	2.592	192.6	191.8	-0.4
100	3.137	212.0	211.0	-0.5

Nuevamente se observa que las diferencias no son significativas, lo cual valida la metodología propuesta. La diferencia máxima en la comparación se da en el entorno a los 2 años de período de retorno, allí donde la simplificación del doble logaritmo hecha por Rodríguez Fontal tiene mayor incidencia.

### 3.3.2 Actualización de las curvas IDF

#### a) Curvas IDF con base en máximos anuales 1906-2005

En la Tabla se presentan los valores de los parámetros de la distribución de Gumbel obtenidos para cada una de las series de máximos anuales extendidas al período 1906-2005, para duraciones entre 1 a 24 horas, y 1913-2005 para duraciones entre 10 a 30 minutos. No se incluye la duración 5 minutos puesto que no se cuenta con los datos para el período 1913-1974. En el Anexo VI se detallan todas las series de datos utilizadas, con la fecha de ocurrencia del evento y su magnitud.

**Tabla 3-6: Parámetros de la distribución de Gumbel calculados para las series extendidas 1906-2005 (1 a 24 horas) y 1913-1974 (10 a 30 minutos)**

Duración	$\mu$	$\alpha$
24 h	83.7804	27.2010
12 h	72.0812	22.9457
6 h	58.8304	18.0710
3 h	46.2079	14.1242
2 h	40.1458	11.3866
1 h	30.1626	8.9509
30 min	22.6431	7.1532
20 min	17.7161	5.6419
10 min	13.6634	3.7978

Para verificar la distribución de Gumbel obtenida se aplicaron tres pruebas de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y  $X^2$ . En el primer test la hipótesis fue aceptada en todos los casos, mientras que para A-D fue rechazada únicamente en la duración 3h, en  $X^2$  se rechazó únicamente la duración 2h.

Los valores de precipitación de las curvas IDF para las duraciones en estudio y diferentes períodos de retorno, obtenidos de la serie extendida, se comparan con los originales de Rodríguez Fontal para el período 1906-1974 y con los obtenidos de las ecuaciones de la Ley de Montana en el período 1912-1990 (IMM, 1994). Los resultados se presentan desde la Tabla 3-7 a la Tabla 3-15.

**Tabla 3-7: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 24h.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	93.47	97.57	93.75	-3.91%	0.30%
5	125.17	135.59	124.58	-8.12%	-0.47%
10	146.16	160.80	144.99	-9.83%	-0.80%
20	166.29	184.99	164.57	-11.04%	-1.03%
25	172.67		170.78		-1.09%
50	192.34		189.92		-1.26%
100	211.87		208.91		-1.40%

**Tabla 3-8: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 12h.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	79.70	78.16	80.49	2.98%	1.00%
5	106.39	108.62	106.50	-1.95%	0.10%
10	124.06	128.82	123.72	-3.96%	-0.28%
20	141.01	148.19	140.23	-5.37%	-0.55%
25	146.39		145.47		-0.62%
50	162.95		161.61		-0.82%
100	179.40		177.63		-0.98%

**Tabla 3-9: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 6h.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	65.58	62.61	65.45	4.54%	-0.20%
5	87.62	87.01	85.94	-1.24%	-1.92%
10	102.21	103.19	99.50	-3.58%	-2.66%
20	116.21	118.71	112.50	-5.23%	-3.19%
25	120.65		116.63		-3.33%
50	134.33		129.34		-3.71%
100	147.91		141.96		-4.02%

**Tabla 3-10: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 3h.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	50.62	50.16	51.38	2.45%	1.50%
5	68.13	69.70	67.39	-3.31%	-1.08%
10	79.72	82.66	77.99	-5.65%	-2.17%
20	90.84	95.10	88.16	-7.29%	-2.95%
25	94.37		91.38		-3.16%
50	105.24		101.32		-3.72%
100	116.02		111.18		-4.17%

**Tabla 3-11: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 2h.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	43.37	44.05	44.32	0.60%	2.20%
5	57.23	61.22	57.23	-6.53%	0.00%
10	66.41	72.60	65.77	-9.41%	-0.96%
20	75.21	83.52	73.97	-11.44%	-1.65%
25	78.00		76.57		-1.84%
50	86.60		84.58		-2.34%
100	95.14		92.53		-2.75%

**Tabla 3-12: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 1h.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	32.57	35.29	33.44	-5.23%	2.67%
5	42.80	49.04	43.59	-11.12%	1.84%
10	49.57	58.16	50.31	-13.51%	1.48%
20	56.07	66.91	56.75	-15.19%	1.21%
25	58.13		58.79		1.14%
50	64.48		65.09		0.95%
100	70.78		71.34		0.79%

**Tabla 3-13: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 30 min.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	24.57	24.36	25.26	3.73%	2.81%
5	32.51	33.87	33.37	-1.48%	2.65%
10	37.76	40.12	38.74	-3.43%	2.58%
20	42.81	46.16	43.89	-4.91%	2.53%
25	44.40		45.52		2.52%
50	49.33		50.55		2.48%
100	54.22		55.55		2.45%

**Tabla 3-14: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 20 min.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	19.00	20.05	19.78	-1.32%	4.10%
5	25.06	27.88	26.18	-6.12%	4.47%
10	29.07	33.02	30.41	-7.90%	4.64%
20	32.91	37.99	34.47	-9.26%	4.75%
25	34.13		35.76		4.79%
50	37.89		39.73		4.87%
100	41.61		43.67		4.94%

**Tabla 3-15: Precipitación máxima 1906-2005, comparación 10 min.**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	14.92	14.37	15.06	4.73%	0.90%
5	19.47	19.99	19.36	-3.16%	-0.56%
10	22.48	23.68	22.21	-6.19%	-1.19%
20	25.37	27.24	24.94	-8.43%	-1.66%
25	26.28		25.81		-1.79%
50	29.10		28.48		-2.13%
100	31.90		31.13		-2.41%

Puede observarse que la incorporación de los últimos 30 años al análisis no generó diferencias significativas en cuanto a estadística de tormentas extremas refiere; los cuantiles de precipitación extrema para todas las duraciones, ver Tabla 3-7 a Tabla 3-15, no han

variado en más de 5% respecto de sus correspondientes de las curvas de Rodríguez Fontal. Por otra parte, las diferencias con las curvas de Montana fueron más acentuadas en comparación con las curvas de Rodríguez Fontal. Estas diferencias pueden explicarse en una parte por la metodología de ambos trabajos. En efecto, tanto Rodríguez Fontal como la presente actualización consideran el evento extremo registrado cada año, para cada duración; en tanto, las curvas de Montana adoptan para la selección de eventos umbrales arbitrarios para cada duración y, seguidamente, seleccionan los 30 mayores para el cálculo de las curvas IDF.

Esta forma de selección de eventos presenta un sesgo, tal que en la actualización del trabajo de Terra (1977), cuando incorpora el período de datos 1973-1990, tan solo considera entre 4 a 9 datos de los 18 años de registros disponibles, dependiendo de la duración. Esto asigna mayor peso a, por ejemplo décadas extremadamente lluviosas, mientras que la selección de extremos anuales toma en cuenta las variaciones interanuales e interdecadales. Por otra parte, la probabilidad de ocurrencia o período de retorno asignado a los 30 eventos, seleccionados por la ley de Montana, se efectuó adoptando la fórmula de Weibull, concebida para extremos anuales puesto que al mayor de los eventos le asigna un período de retorno 1 año mayor al número de años disponibles. En cambio, Chow et al., 1994 proponen una reducción del período de retorno cuando el umbral se determina de modo tal que los eventos seleccionados coincidan con la longitud de la serie (ver ecuación 1.5 más arriba), existiendo en la literatura otras propuestas dependiendo del criterio de selección del umbral. Asimismo se encuentra una incidencia significativa en el hecho de que los períodos de información utilizados no coinciden (1912 a 1990 para Montana y 1906 o 1913 a 2005 para la presente actualización).

En segundo lugar, aplicando la metodología de Koutsoyiannis et al. (1998), fue deducida una relación IDF para eventos de duración 1 hora o mayor, fruto del tratamiento conjunto de las series de máximos anuales de eventos de largo 1h a 24h. Los resultados son presentados en la Tabla 3-16. Tanto el test de Kolmogorov-Smirnov, como el de Anderson-Darling prueban la bondad del ajuste. El estadístico de Kruskal-Wallis óptimo resultó de 0.029 [p valor 5% = 11.07], por lo cual la curva global es válida.

**Tabla 3-16: Parámetros Gumbel ajustados 1906-2005**

$\mu$	$\alpha$	$\eta$	$\theta$
44.6483	14.0358	0.7950	0.7612

Finalmente en la Tabla 3-17 se presentan los resultados de las precipitaciones máximas estimadas a partir de la familia de curvas para la duración 24h. En el Anexo IV se incluyen las demás tablas de comparación para duraciones de 1, 2, 3, 6 y 12 horas.

**Tabla 3-17: Precipitaciones máximas, duración 24h. Curvas de Koutsoyiannis et al. (1998)**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P 1906-2005 (mm)	Diferencia (%)
2	94.49	93.18	-1.38%
5	125.68	122.95	-2.17%
10	146.33	142.66	-2.50%
20	166.14	161.57	-2.75%
25	172.42	167.57	-2.81%
50	191.78	186.04	-2.99%
100	210.99	204.38	-3.13%

Nuevamente, las precipitaciones de diseño obtenidas mediante las curvas actualizadas no difieren notoriamente con las curvas originales de Rodríguez Fontal, por tanto el uso de las ecuaciones actualizadas o las reconstruidas de Rodríguez Fontal no reportaría incidencia en la determinación de variables de diseño.

En relación a períodos de retorno de 15 días, una revisión bibliográfica muestra que las obras hidráulicas, según su tipo, en general se diseñan para períodos de retorno entre 2 a 100 años, utilizándose períodos de retorno mayores para grandes represas. Un ejemplo puede encontrarse en Chow et al., 1994, tabla 13.1.1. Por otra parte, si el tiempo se expresa en años, para períodos de retorno menores a 1 año se obtiene probabilidades iguales o mayores a 1. Asimismo, la distribución de Gumbel tiende a infinito con  $Tr = 1$  año.

Por otra parte, en la cláusula tercero de las especificaciones particulares, a efectos de acotar el número de bandas a digitalizar, se adoptó un umbral mínimo de 10 mm, que luego se llevó a 1 mm. Un estudio tendiente a obtener períodos de retorno expresados en días debería considerar los días de no lluvia, 0 mm, que requiere un análisis de calidad de la información no previsto en los términos del convenio.

### b) Curvas IDF con base en máximos anuales 1975-2005

La misma metodología se aplicó a la serie de información de la E.M. Prado exclusivamente al período de información extendida 1975-2005, que luego de los análisis de disponibilidad y calidad de datos se reduce al período 1981-2005. En la Tabla 3-18 se presentan los resultados del ajuste de la distribución de Gumbel a los máximos anuales de este período. Se agrega en este caso el ajuste de la distribución para la serie de duración 5 minutos.

**Tabla 3-18: Parámetros Gumbel P(Tr) 1975 - 2005**

Dur	$\mu$	$\alpha$
24 h	86.9872	22.9383
12 h	78.3420	19.3564
6 h	61.0958	11.2039
3 h	52.0492	7.2077
2 h	46.4485	6.2566
1 h	33.9789	8.3540
30 min	24.9877	7.5532
20 min	20.3786	6.2314
10 min	14.4330	3.0130
5 min	10.0213	2.4561

Nuevamente se aplicaron tres pruebas de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y  $X^2$ . En el primer test la hipótesis fue aceptada en todos los casos, en el segundo la hipótesis es rechazada para la duración 3h, mientras que para el tercer test la hipótesis fue rechazada para las duraciones de 2 y 3 h.

Los valores de precipitación de las curvas IDF para todas las duraciones y diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período 1975-2005 se comparan con los originales de Rodríguez Fontal (1980) para el período 1906-1974 y con los obtenidos de las ecuaciones de la Ley de Montana en el período 1912-1990 (IMM, 1994).

**Tabla 3-19: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 24h**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	93.47	97.57	95.39	-2.23%	2.06%
5	125.17	135.59	121.39	-10.47%	-3.02%
10	146.16	160.80	138.61	-13.80%	-5.16%
20	166.29	184.99	155.12	-16.15%	-6.72%
25	172.67		160.36		-7.13%
50	192.34		176.49		-8.24%
100	211.87		192.51		-9.14%

**Tabla 3-20: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 12h**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	79.70	78.16	85.44	9.31%	7.20%
5	106.39	108.62	107.38	-1.14%	0.93%
10	124.06	128.82	121.90	-5.37%	-1.74%
20	141.01	148.19	135.83	-8.34%	-3.67%
25	146.39		140.25		-4.19%
50	162.95		153.87		-5.57%
100	179.40		167.38		-6.70%

**Tabla 3-21: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 6h**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	65.58	62.61	65.20	4.14%	-0.58%
5	87.62	87.01	77.90	-10.47%	-11.09%
10	102.21	103.19	86.31	-16.36%	-15.56%
20	116.21	118.71	94.37	-20.50%	-18.79%
25	120.65		96.93		-19.66%
50	134.33		104.81		-21.97%
100	147.91		112.64		-23.85%

**Tabla 3-22: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 3h**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	50.62	50.16	54.69	9.04%	8.03%
5	68.13	69.70	62.86	-9.82%	-7.74%
10	79.72	82.66	68.27	-17.41%	-14.37%
20	90.84	95.10	73.46	-22.75%	-19.14%
25	94.37		75.10		-20.42%
50	105.24		80.17		-23.82%
100	116.02		85.21		-26.56%

**Tabla 3-23: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 2h**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	43.37	44.05	48.74	10.64%	12.39%
5	57.23	61.22	55.83	-8.80%	-2.44%
10	66.41	72.60	60.53	-16.63%	-8.85%
20	75.21	83.52	65.03	-22.14%	-13.53%
25	78.00		66.46		-14.80%
50	86.60		70.86		-18.18%
100	95.14		75.23		-20.93%

**Tabla 3-24: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 1h**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	32.57	35.29	37.04	4.96%	13.72%
5	42.80	49.04	46.51	-5.16%	8.66%
10	49.57	58.16	52.78	-9.25%	6.46%
20	56.07	66.91	58.79	-12.13%	4.85%
25	58.13		60.70		4.42%
50	64.48		66.58		3.25%
100	70.78		72.41		2.30%

**Tabla 3-25: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 30 min**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	24.57	24.36	27.76	13.95%	12.95%
5	32.51	33.87	36.32	7.21%	11.71%
10	37.76	40.12	41.99	4.66%	11.17%
20	42.81	46.16	47.42	2.74%	10.79%
25	44.40		49.15		10.68%
50	49.33		54.46		10.40%
100	54.22		59.73		10.17%

**Tabla 3-26: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 20 min**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	19.00	20.05	22.66	13.03%	19.25%
5	25.06	27.88	29.73	6.60%	18.63%
10	29.07	33.02	34.40	4.18%	18.36%
20	32.91	37.99	38.89	2.35%	18.17%
25	34.13		40.31		18.11%
50	37.89		44.69		17.97%
100	41.61		49.04		17.86%

**Tabla 3-27: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 10 min**

Tr (años)	P 1906-1974 (mm)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)	Diferencia con RF (%)
2	14.92	14.37	15.54	8.09%	4.13%
5	19.47	19.99	18.95	-5.20%	-2.65%
10	22.48	23.68	21.21	-10.40%	-5.63%
20	25.37	27.24	23.38	-14.16%	-7.82%
25	26.28		24.07		-8.41%
50	29.10		26.19		-10.01%
100	31.90		28.29		-11.32%

**Tabla 3-28: Precipitación máxima 1975-2005, comparación 5 min**

Tr (años)	P Montana 1912-1990 (mm)	P 1981-2005 (mm)	Diferencia con Montana (%)
2	10.31	10.92	5.97%
5	14.33	13.71	-4.38%
10	16.98	15.55	-8.41%
20	19.53	17.32	-11.34%
25		17.88	
50		19.61	
100		21.32	

Los eventos de larga duración ( $d > 2$  h) reportan una tendencia de disminución de hasta un 20% en el caso de períodos de retorno de 25 años. En segundo lugar para las duraciones cortas desde 1 hora hasta 20 minutos, se observa una tendencia al aumento de las

intensidades máximas (10 a 20%), también para períodos de retorno medios. La tendencia se revierte nuevamente para las duraciones muy cortas de 10 y 5 minutos, donde se dan disminuciones del orden de 10%. El análisis para períodos de retorno mayores no resulta consistente ya que la serie de origen no alcanza los 30 años.

### 3.4 Resumen y conclusiones

Los antecedentes nacionales más relevantes en cuanto al ajuste curvas intensidad duración frecuencia en el Uruguay refieren a los trabajos de Terra (1977), Rodríguez Fontal (1980) y la Ley de Montana (IMM, 1994). Este trabajo tomó como base metodológica el trabajo de Rodríguez Fontal por considerarse más riguroso desde el punto de vista del tratamiento de la información y la metodología del ajuste de probabilidad, en tanto los trabajos de Terra y Ley de Montana presentan un sesgo de selección de datos.

Con base en las series de máximos anuales en el período 1906-1974, se reconstruyeron las curvas IDF calculadas por Rodríguez Fontal (1980), sin la simplificación logarítmica utilizada por el autor debido a las limitaciones computacionales de la época. Los resultados obtenidos fueron consistentes, constatándose diferencias menores al 1%, excepto para períodos de retorno entre 5 a 2 años, en que la diferencia es máxima (entre 2 a 9%), puesto que allí la simplificación del doble logaritmo hecha por Rodríguez Fontal tiene mayor incidencia.

La validación de método de familia de curvas de Koutsoyiannis et al. (1998), para duraciones mayores a 1 hora, correspondientes al período 1906-1974, es consistente con las curvas IDF calculadas por Rodríguez Fontal (1980) y la reconstrucción efectuada en el presente trabajo. Tomando como referencia las curvas de Rodríguez Fontal (1980), se constataron diferencias menores al 1%, excepto para períodos de retorno entre 5 a 2 años, por la misma razón expuesta en el párrafo precedente.

La actualización de las curvas IDF con base en máximos anuales 1906-2005, en que se incorporaron los últimos 30 años al análisis, no generó diferencias significativas en cuanto a estadística de tormentas extremas refiere; los cuantiles de precipitación extrema para todas las duraciones no variaron en más de 5% respecto de sus correspondientes de las curvas de Rodríguez Fontal. Por otra parte, las diferencias con las curvas de Montana fueron más acentuadas en comparación con las curvas de Rodríguez Fontal, debido a la diferente metodología utilizada en ambos trabajos, particularmente el sesgo en la selección de datos utilizados en la Ley de Montana y la consideración de diferentes períodos.

Aplicando la metodología de Koutsoyiannis et al. (1998), fue deducida una relación IDF para eventos de duración 1 hora o mayor, fruto del tratamiento conjunto de las series de máximos anuales de eventos de largo 1h a 24h. Tanto el test de Kolmogorov-Smirnov, como el de Anderson-Darling, y el estadístico de Kruskal-Wallis prueban que la curva global es válida.

Si se considera el último período, 1981-2005, los eventos de larga duración ( $d > 2$  h) reportan una tendencia de disminución de hasta un 20% en el caso de períodos de retorno de 25 años. En segundo lugar para las duraciones cortas desde 1 hora hasta 20 minutos, se



observa una tendencia al aumento de las intensidades máximas (10 a 20%), también para períodos de retorno medios. La tendencia se revierte nuevamente para las duraciones muy cortas de 10 y 5 minutos, donde se dan disminuciones del orden de 10%. El análisis para períodos de retorno mayores no resulta consistente ya que la serie de origen no alcanza los 30 años.

Cuando se realiza un test de bondad de ajuste se compara la función de distribución bajo estudio con la probabilidad empírica asignada a los datos. La probabilidad empírica usualmente utilizada obedece a la fórmula de Weibull, que presupone datos continuos. En la extensión de la serie original manejada por Rodríguez Fontal (1980) o ley de Montana (1994), se priorizó la calidad de los datos en lugar de la continuidad. Ello puede afectar en alguna medida la probabilidad asignada a los datos y, por lo tanto, el resultado del test de bondad de ajuste. No obstante, ésta incidencia probablemente tenga un peso menor sobre el diseño de obras. Por otra parte se destaca la dificultad presentada para completar la serie de información de la E.M. Prado con la correspondiente a Carrasco, dados en primer lugar los problemas de huecos y calidad de información en ambas y en segundo lugar la baja correlación entre dichas series.

Del análisis de todo el conjunto de información se desprende que la variación espacial de las precipitaciones extremas en el departamento de Montevideo es tal que no permite completar la serie histórica de Prado. Considerando que se trata de la estación de mayor registro histórico del País y que dejó de funcionar en el año 2005, resulta imprescindible volver a instalar una estación en la misma ubicación geográfica. En la medida que la Dirección Nacional de Meteorología no reponga dicha estación, se recomienda establecer los acuerdos que se requieran para instalar en ese sitio, una de las estaciones pluviográficas a ser adquiridas por la Intendencia de Montevideo.



## 4 ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE PRECIPITACIONES Y NIVELES DEL RÍO DE LA PLATA

En este capítulo se presentan los principales resultados sobre el estudio de asociación entre el nivel del Río de la Plata y las precipitaciones en Montevideo.

Para esto se realiza un análisis estadístico bi-variado utilizando la información compatibilizada de precipitación y nivel, correspondiente al período 1981-2011, con 9749 observaciones (excluyendo las fechas sin medición de nivel).

Los datos provienen de los registros horarios de nivel del río en el puerto de Montevideo - disponibles para el período 1969-2011- y los registros de precipitaciones del pluviómetro de la Estación Prado, correspondientes al período 1981-2012.

El procedimiento consistió en un análisis correlaciones entre el máximo diario del nivel (medido en metros) y el acumulado diario de precipitaciones (en milímetros) y en la implementación de la técnica de cópulas para la modelización de la dependencia entre dichas variables.

### 4.1 Análisis de correlaciones

A continuación se presentan los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, para toda las observaciones de la serie en primer lugar y luego considerando sólo días donde los valores de precipitación y/o nivel superan determinado umbral.

De esta manera se observa que al considerar tomar toda la muestra (9749 fechas), los coeficientes estimados son 0,02 y 0,07; valores que, aunque resultan estadísticamente significativos en dicho tamaño de muestra según el test Z de Fisher, son de baja magnitud.

En cambio, la correlación entre el máximo de marea y las precipitaciones, en aquellas fechas en que el acumulado de lluvia es de al menos 10 mm, no es estadísticamente significativa.

Luego, al restringir la muestra a los casos donde el nivel máximo diario del río supera los umbrales 1,1<sup>1</sup>; 1,5 y 2 metros, la asociación con lluvia resulta significativa sólo para niveles mayores a 2 metros, con coeficientes de 0.13.

Sin embargo, los días en que tal evento de nivel ocurre conjuntamente con lluvias que superan los 10 mm, son solamente 78 en un total de 9749 días (menos del 1). Los coeficientes de correlación en estos casos valen 0,23 y 0,28.

---

<sup>1</sup> Promedio del nivel en toda la serie observada.

**Tabla 4-1: Correlaciones entre nivel máximo diario del río y acumulado diario de precipitaciones**

Parámetro	Pearson	Spearman
Ro	0,02	0,07
P valor	0,05	0
N	9749	9749

**Tabla 4-2: Correlaciones entre nivel máximo diario del río y acumulado diario de precipitaciones para precipitaciones de más de 10 y 29.5 mm.**

Parámetro	10<mm		29,5<mm (percentil 90)	
	Pearson	Spearman	Pearson	spearman
Ro	0,03	0,04	-0,05	-0,06
P valor	0,369	0,231	0,400	0,312
N	900	900	286	286

**Tabla 4-3: Correlaciones entre nivel máximo diario del río y acumulado diario de precipitaciones para niveles mayores a 1,1; 1,5 y 2 m.**

Parámetro	1,1<m nivel		1,5<m nivel	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
Ro	0	0,04	0,02	0,02
P valor	1,000	0,001	0,247	0,247
N	7247	7247	3350	3350

**Tabla 4-4: Correlaciones entre nivel máximo diario del río y acumulado diario de precipitaciones para niveles mayores a 2 m y precipitaciones de más de 10mm.**

Parámetro	2<m nivel & 10<mm	
	Pearson	Spearman
Ro	0,23	0,28
P valor	0,043	0,013
N	78	78

La siguiente tabla muestra los estadísticos descriptivos de lluvia y marea para los 78 casos mencionados. Allí se observa que el promedio de lluvia y nivel fue 23 mm y 2,3 m respectivamente.

Tomando en cuenta además los datos de pluviógrafo de Prado, se verificó que para esos días sólo registran lluvias en 48 de los 78 días. En éstos, la intensidad máxima de lluvia de 1 hora y 30 minutos de duración promedia 9 y 7 mm respectivamente.

**Tabla 4-5: Estadísticos descriptivos de los 78 días con eventos de lluvia y nivel**

		Nivel (m)	Acumulado diario (mm)	Intensidad máxima una hora (mm/h)	Intensidad máxima 30 minutos (mm/30m)
<b>N</b>	<b>Válidos</b>	78	78	48	48
	<b>Perdidos</b>	0	0	30	30
<b>Media</b>		2,3	27,91	9,02	6,57
<b>Mínimo</b>		2,02	10,30	1,10	1,10
<b>Máximo</b>		3,30	108,00	28,87	25,79
<b>Percentiles</b>	<b>25</b>	2,10	13,80	3,90	2,51
	<b>50</b>	2,28	21,75	6,56	4,58
	<b>75</b>	3,30	36,80	11,67	8,81

Posteriormente, de manera de explorar si la asociación entre el nivel de marea y las lluvias se da con algún desfase en el tiempo, se estiman las correlaciones en diferentes los distintos escenarios que se definen a continuación:

- Llamaremos corrimiento +1 en la fecha cuando se consideran para el día n: lluvia del día n y nivel del día n+1
- Llamaremos corrimiento 0 en la fecha cuando se consideran para el día n: lluvia del día n y nivel del día n
- Llamaremos corrimiento -1 en la fecha cuando se consideran para el día n: lluvia del día n y nivel del día n-1

La siguiente tabla muestra las correlaciones que se encontraron en el cruce nivel-lluvia bajo los diversos corrimientos y su significación de acuerdo al test Z de Fisher.

**Tabla 4-6: Correlaciones entre nivel y marea con corrimientos de fechas**

Corrimiento	Pearson	Spearman
-1	-0.044 (p=0,00008)	-0.041 (p=0,00008)
0	0.023 (p=0,05)	0.07 (p=0.00)
+1	0.2123 (p=0)	0.3016 (p=0)

Se observa que tomando toda la serie de datos, hay correlación muy significativa y positiva entre lluvia de un día y nivel del día posterior, que asciende a 0,20 y 0.30 para *Pearson* y *Spearman*. El cambio observado en los coeficientes en los distintos corrimientos parece

coherente, siendo negativo al considerar el día nivel del día anterior, cercano a cero en la misma fecha y positiva al moverse al día siguiente.

Se destaca que la correlación encontrada, que resulta significativa, toma un valor relativamente bajo en relación con objetivo de este trabajo. No obstante se considera como indicios de que puede haber más variables involucradas que produzcan asociación fuerte entre nivel y precipitaciones. Con estos resultados se procede al análisis mediante cópulas.

## 4.2 Análisis de cópulas

La técnica de Cópulas (Sklar 1959) es una herramienta que permite expresar la dependencia existente entre varios factores aleatorios. Una de las grandes virtudes de las Copulas es que permite modelar situaciones en que la dependencia está ligada a un evento crítico, por ejemplo cuando se da a partir de ciertos rangos.

Tomando el corrimiento +1 se ajustó al vector (Lluvia del día n, Nivel del día n+1) la **COPULA DE LI-JOE**, definida por:

- $\lambda C^{\text{perp}} + (1-\lambda)C^U$ , donde
- $C^{\text{perp}}(u,v)=uv$  es la cópula de independencia
- $C^U(u,v)=\min\{u,v\}$  es la cópula "Upper", de máxima dependencia positiva.

A partir de la estimación de  $\lambda$  se testea el ajuste del siguiente modelo de cópulas:

$$C = 0.788 C^{\text{perp}} + 0.212 C^U$$

### 4.2.1 Performance de la Cópula estimada vs Realidad

Para estudiar el ajuste del modelo a los datos, se contrastan los resultados del mismo con la estimación empírica de la cópula, en primer lugar a través de indicadores clásicos de error y luego mediante pruebas de ajuste. Los resultados se resumen en la tabla.

**Tabla 4-7: Performance del modelo**

Indicadores de ajuste	Pruebas de ajuste
MIDE=0.03%	Kolmogorov-Smirnov: P-valor 0,27
Desvío de predicción=1.7%	Chi-Cuadrado (categorizando): P-valor 0,41
Cociente desvío de predicción/media datos=4%	Fermanian-Scaillet2: P-valor 0,34
Cociente desvío de predicción/desvío datos=3%	

<sup>2</sup> Diseñado específicamente para ajustar modelos de cópulas

Como puede observarse se verifica un error bajo en todos los indicadores calculados, al tiempo que las pruebas de ajuste implementadas aceptan (no rechazan) el ajuste del modelo **C= 0.788 C<sub>perp</sub>+0.212 CU** a los datos estudiados, con p-valores altos.

#### 4.2.2 Interpretación

El modelo de cópulas estimado tiene una expresión muy sencilla de interpretar: la asociación entre las series de nivel y lluvia tienen un comportamiento independiente con probabilidad 0,78 que -con probabilidad 0,21- cambia, pasando a máxima dependencia positiva entre las variables.

Resta indagar sobre qué tipo de eventos climáticos se producen con esta frecuencia y producen la alta asociación entre nivel y lluvia, las que "normalmente" son independientes.

### 4.3 Ajuste de una curva de distribución a los datos de marea

Para el ajuste de la distribución univariada de los máximos diarios de nivel del Río de la Plata se utilizan todos los registros disponibles, correspondientes al período 1969-2011. De esta manera se estiman los parámetros con una muestra de 11636 observaciones.

En primera instancia se constata que los test de bondad de ajuste rechazan el ajuste a los datos de la distribución Normal, Gumbel y Weibull estimando los parámetros por el método máxima verosimilitud.

Por este motivo se procede a estimar una densidad mezcla de Normales, cuya expresión es la siguiente:

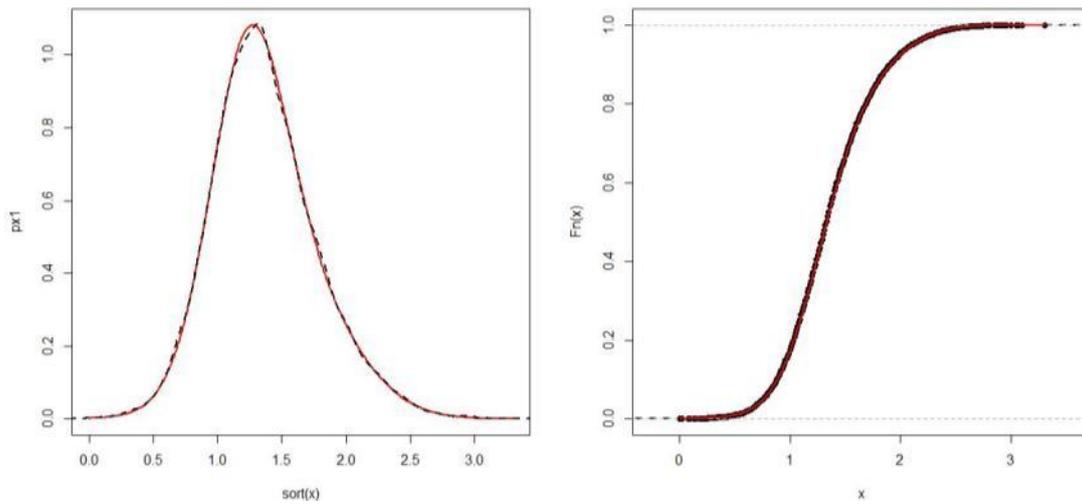
$$p(x) = \lambda_1 N(x; \mu_1, \sigma_1) + \lambda_2 n(x; \mu_2, \sigma_2) ,$$

donde  $N(x; \mu, \sigma)$  representa la función de densidad de una Gaussiana con media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ .

Los parámetros estimados por el algoritmo EM (*Expectation Maximization*) dan lugar a la siguiente densidad de los máximos de nivel:

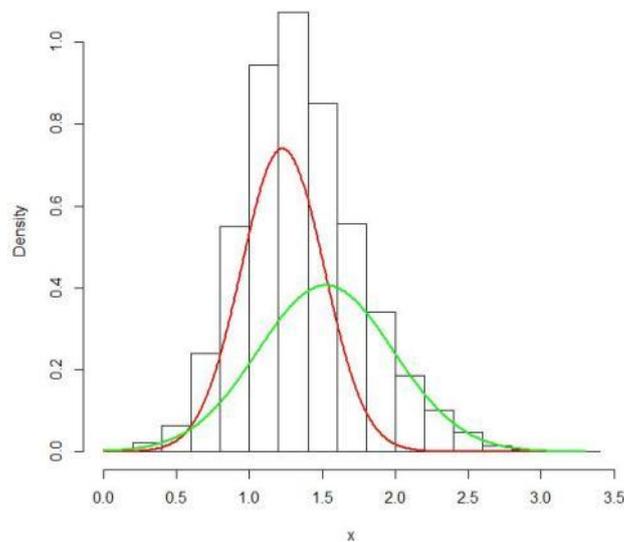
$$p(x) = 0.5263098 N(x; 1.228967, 0.2835921) + 0.4736902 N(x; 1.523828, 0.4652696)$$

Comparando los resultados con estimaciones no paramétricas se observa gráficamente que la función presenta un buen ajuste a los datos (Figura 4-1). Las líneas punteadas representan la densidad y distribución acumulada ajustada y las rojas la densidad estimada por núcleos y la función de distribución empírica acumulada. El test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov "acepta" el ajuste a los datos con un p valor elevado ( $D= 0.0107$ ,  $p\text{-valor}=0.52$ ).



**Figura 4-1: Funciones de densidad y distribución acumulada ajustadas (línea punteada) y empíricas (línea roja)**

A modo descriptivo finalmente se presenta el histograma de los datos y las gráficas de las componentes Normales (en rojo y verde) de la densidad que ajustada (Figura 4-2), cuyos pesos son 0,53 y 0,47 respectivamente. Según este modelo, la distribución de frecuencias de los máximos diarios de nivel del Río tienen un comportamiento Normal con media 1,2 y desvío estándar 0,28 en la proporción 0,53 de la muestra y en la proporción 0,47 las frecuencias se distribuyen Normal pero con una media y desvío mayor, 1,5 y 0,46 respectivamente.



**Figura 4-2: Histograma de los datos y componentes Normales de la función ajustada**

## 5 LINEAMIENTOS PARA LA DEFINICIÓN DE LAS TORMENTAS DE DISEÑO

El objetivo de este informe es caracterizar la distribución temporal de precipitación en las tormentas registradas en Montevideo y analizar su impacto en la estimación de hidrogramas de diseño de obras hidráulicas.

Para ello se realizó, en primer lugar, una revisión bibliográfica en la temática, a partir de la cual se seleccionaron algunas metodologías, en función de su aplicabilidad en Uruguay (tanto desde el punto de vista conceptual así como de la información disponible) para ser implementadas en el marco de este proyecto.

Dichas metodologías fueron implementadas utilizando los datos pluviográficos registrados y digitalizados en la estación Prado (Montevideo) en el período 1968-2005.

Una vez implementadas, se analizó el impacto de las diferentes tormentas de diseño obtenidas en los hidrogramas de crecida que las mismas generan en una cuenca del tipo urbana, ya que este es el objetivo último de contar con un hietograma de diseño. Dichos resultados se compraron además con los obtenidos al utilizar la tormenta de diseño utilizada por la Intendencia de Montevideo (en adelante IM) y la tormenta del Bloque Alterno, utilizada a nivel nacional para el diseño de obras hidráulicas.

### 5.1 Revisión bibliográfica

A continuación se presenta una breve descripción de los diferentes métodos analizados en el marco de este proyecto, para luego implementar aquellos que se consideran más aplicables para nuestro país (desde el punto de vista conceptual así como de la información disponible).

En función de la naturaleza de los métodos, los mismos pueden agruparse en 4 categorías (Veneziano y Villani, 1999):

- Métodos que utilizan una geometría de hietograma simple, cuyos valores se definen por un punto de las curvas IDF.
- Métodos que utilizan la formulación completa de las curvas IDF para determinar la forma y los valores del hietograma de diseño.
- Métodos que utilizan formas de tormenta normalizadas obtenidas en base a registros históricos.
- Métodos que realizan simulaciones utilizando por ejemplo modelos estocásticos de lluvia.

Los primeros tres tipos de métodos son los más frecuentemente utilizados en la práctica, mientras que los métodos de la última categoría, propuestos más recientemente, si bien son muy potentes requieren un tratamiento matemático avanzado y altos recursos para su

implementación. A continuación se realiza una breve descripción, en orden cronológico, de los métodos más difundidos.

**Keifer y Chu (1957)** desarrollaron un procedimiento para determinar el hietograma de diseño asociado a un determinado lugar, duración y período de retorno, a partir de la derivación de las curvas IDF y tomando como hipótesis que la intensidad media para cualquier duración menor a la duración total de la tormenta tiene la misma recurrencia (es igual a la intensidad que se obtiene de las curvas IDF para dicha duración).

Dada la formulación de las curvas IDF:

$$P = \frac{at_d}{(t_d + b)^c}$$

Siendo:  $P$  la precipitación total del evento  
 $t_d$  la duración de la tormenta  
 $a, b$  y  $c$  parámetros

Derivando la precipitación respecto al tiempo para obtener la intensidad, se tiene:

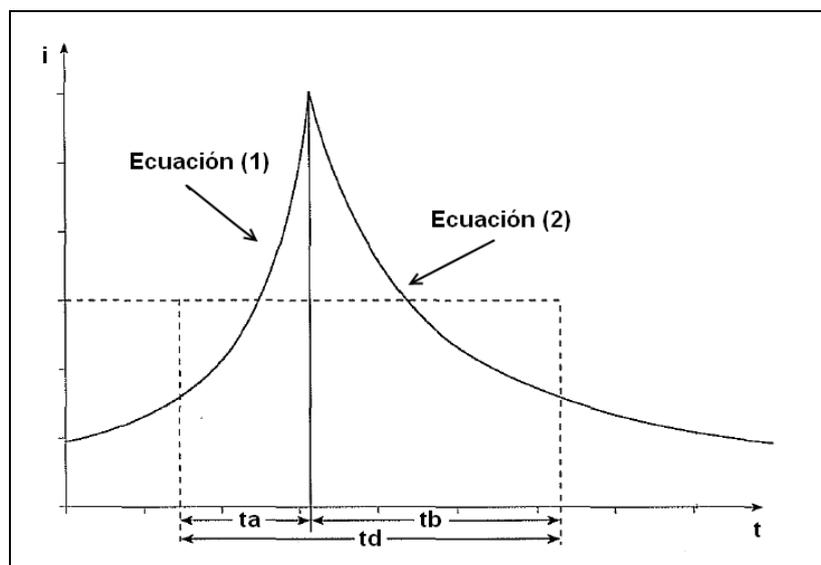
$$i = \frac{dP}{dt_d} = \frac{a[(1-c)t_d + b]}{(t_d + b)^{1+c}}$$

Esta expresión corresponde a una tormenta completamente avanzada, por lo que para establecer la posición del pico se introduce un parámetro  $r = t_b / t_d$  donde  $t_b$  es el tiempo antes del pico y  $t_a = (1-r)t_d$  es el tiempo después del pico. De esta forma se obtienen las siguientes 2 funciones de intensidad (antes y después del pico):

$$(1) \text{ Antes del pico: } i_b = \frac{a[(1-c)\frac{t_b}{r} + b]}{(\frac{t_b}{r} + b)^{1+c}}$$

$$(2) \text{ Después del pico: } i_a = \frac{a[(1-c)\frac{t_a}{1-r} + b]}{(\frac{t_a}{1-r} + b)^{1+c}}$$

En la Figura siguiente se presenta un esquema del hietograma de diseño planteado por Keifer y Chu (1957).



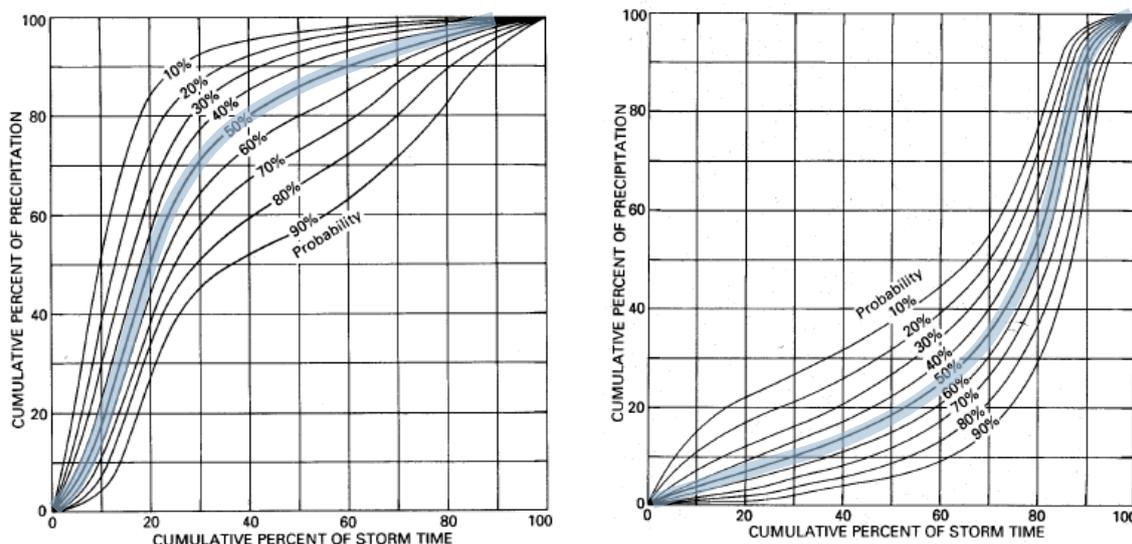
**Figura 5-1 Hietograma de diseño – Método de Keifer y Chu (1957)**

El valor de  $r$  puede obtenerse a partir de datos históricos. Keifer y Chu obtuvieron para Chicago valores de  $r$  muy similares para diferentes recurrencias, concluyendo que  $r$  es independiente del período de retorno.

Bedient y Huber (2002) indican respecto a este método, que una característica crítica de las curvas IDF es que las intensidades corresponden a la duración de la tormenta especificada y no representan series temporales reales de lluvia.

**Huff** (1967) propone una metodología para obtener un conjunto de hietogramas adimensionales (asociados a diferentes probabilidades) a partir de registros históricos de tormentas. Dicha metodología consiste en clasificar en primer lugar las tormentas en 4 grupos en función de si la mayor proporción de precipitación se da en el cuartil 1, 2, 3 o 4 de la duración total. Luego, para cada grupo de tormentas se determinan las curvas de probabilidad de la distribución temporal acumulada de la lluvia.

En la Figura siguiente se presentan, a modo de ejemplo, las curvas de probabilidad obtenidas por Huff a partir del registro de 261 tormentas en Illinois (mayores a 0.5 pulgadas de precipitación total y de entre 3 y 48 horas de duración), para los grupos correspondientes a los cuartiles 1 y 4 respectivamente. Cada curva indica la probabilidad de que el patrón observado caiga a la izquierda de la misma.



**Figura 5-2: Curvas de distribución temporal de lluvia obtenidas por Huff (1967) en Illinois, para las tormentas correspondientes a los cuartiles 1 y 4**

Dichas curvas pueden ser determinadas tanto para registros en estaciones puntuales como para subcuencas (promediando la precipitación registrada en las estaciones de influencia).

En caso de existir alguna estacionalidad, Huff recomienda separar los eventos en función de la misma para realizar posteriormente el análisis.

Bonta (2003) presentó una metodología para determinar el número mínimo de tormentas para que las curvas de Huff sean estables.

El método de Huff ha sido extensamente difundido. Las curvas de distribución de la precipitación de tormentas desarrolladas por el NRCS para Estados Unidos (Tipo I y Tipo II) son típicos ejemplos de curvas de este tipo.

**Pilgrim y Cordery (1975)** proponen otro método para estimar la distribución temporal de tormentas de diferente duración en base a registros históricos. El método consiste en clasificar los eventos más intensos en diferentes grupos según su duración, para cada uno de las cuales:

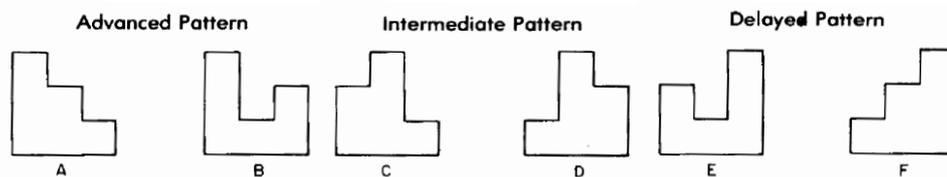
- Se discretizan los eventos en cuantiles temporales. La cantidad de cuantiles a considerar depende de la duración.
- Se calcula, para cada evento, la precipitación correspondiente a cada cuantil y se le da un rango (1 al cuantil de mayor precipitación, 2 al siguiente y así sucesivamente).
- Se obtiene, en función de los rangos obtenidos y del promedio del porcentaje de precipitación asociado a cada rango, un hietograma adimensional.

Se obtiene así un patrón de distribución temporal de la precipitación para cada duración y su desviación estándar. En caso de existir para cierta duración de tormenta, alguna

estacionalidad, se recomienda separar los eventos en función de la misma para realizar posteriormente el análisis.

**Yen y Chow** (1980) proponen caracterizar el hietograma de diseño a través de un hietograma triangular, en donde la altura del mismo se determina a través de la precipitación total y la duración ( $h = 2 * P_{TOTAL} / \text{duración}$ ) y el tiempo al pico se estima a partir de datos históricos. Dichos autores estimaron los hietogramas triangulares para casi 10.000 tormentas en 4 lugares de Estados Unidos encontrando que los mismos eran casi idénticos para la mayor parte de las tormentas fuertes.

**Chukwuma y Schwab** (1983) presentan otra metodología para estimar patrones de distribución temporal a partir de registros históricos. Proponen clasificar las tormentas en 6 grupos, en función de la forma según terciles temporales (Figura 5-3).



**Figura 5-3: grupos de tormentas (Chukwuma y Schwab, 1983)**

Luego, para cada grupo, discretizando cada tormenta en 12 intervalos temporales y utilizando una técnica de remuestreo (bootstrap), obtienen el patrón temporal de precipitación más frecuente correspondiente a cada grupo y sus intervalos de confianza.

Chukwuma y Schwab proponen también un análisis para determinar la cantidad de tormentas mínimas necesarias para construir un patrón temporal de precipitación, obteniendo para todos los grupos una cantidad aproximada de 50 tormentas.

Los métodos hasta aquí presentados son sencillos, tanto desde el punto de vista de su formulación teórica como de su implementación, motivo por el cual son los métodos evaluados en el marco de este proyecto, como primer paso para analizar las tormentas de diseño en Montevideo. Sin embargo, cabe mencionar los siguientes métodos más recientes:

**Grimaldi y Serimaldi** (2006) presentan una metodología que consiste en realizar un análisis bivariado para analizar la probabilidad conjunta de la intensidad máxima y la precipitación total condicionado por la profundidad crítica, utilizando una función 3-copula para definir la probabilidad conjunta trivariada. Luego, dada la profundidad crítica de una tormenta (definida en función de la duración y del período de retorno a través de las curvas IDF) es posible determinar, de una forma probabilística, el pico y la precipitación total.

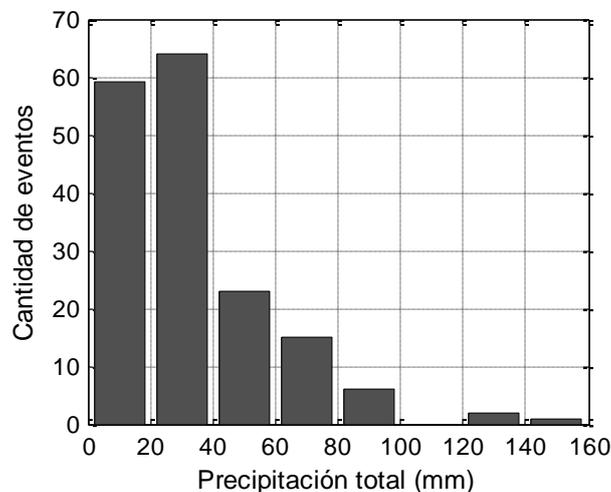
**Veneziano y Villani** (1999) proponen una metodología para determinar el hietograma de diseño asociado a cierto caudal de diseño, utilizando la teoría BLUE (Best Linear Unbiased Estimation), de forma tal que el hietograma dependa explícitamente de las características de correlación del proceso de precipitación y del hidrograma unitario de la cuenca.

## 5.2 Información utilizada

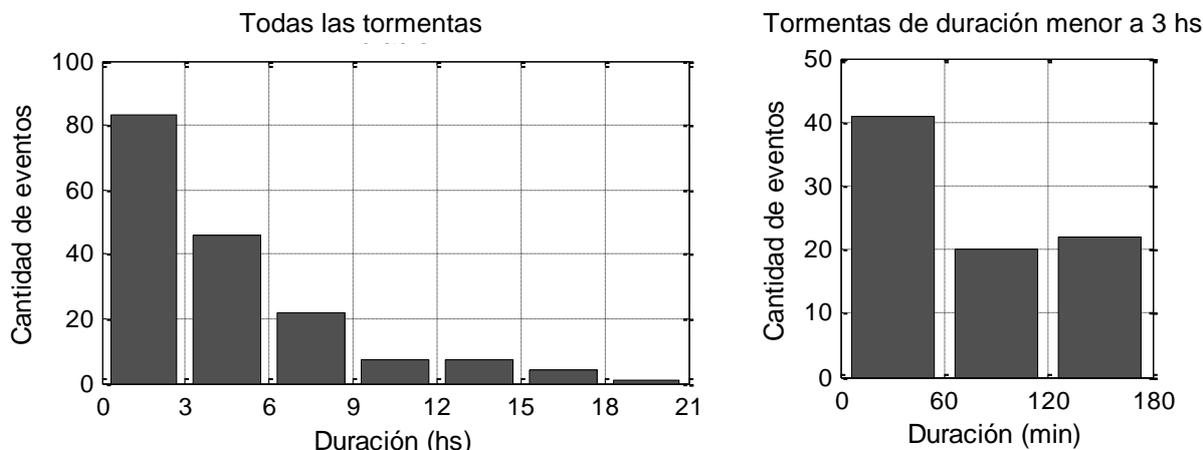
Se utilizaron los datos registrados y digitalizados de la estación Prado, acumulados cada 5 minutos, en el período 1968-2005. A partir de dichos datos se identificaron, en primer lugar, diferentes eventos de precipitación. Para ello se tomó un tiempo mínimo de 6 hs sin registro de precipitación para considerar que 2 eventos corresponden a tormentas independientes. Una vez identificadas las tormentas, se procedió a cortar las colas de las mismas, para evitar tormentas muy largas con precipitaciones muy pequeñas al inicio y fin. El criterio para encontrar los puntos de corte de inicio y de fin de cada tormenta fue tal que la intensidad media del evento, con y sin corte, no varíe más del 1%.

Finalmente, a partir del conjunto de tormentas identificadas y procesadas, fueron seleccionadas para el análisis aquellas tormentas con intensidad máxima de 10 minutos mayor a 40 mm/h aproximadamente (valor correspondiente a un período de retorno algo mayor a 1 año). Se obtuvo así un total de 170 tormentas, de las cuales 154 corresponden a un período de retorno menor a 2 años, 15 corresponden a un período de retorno de entre 2 y 10 años y 1 tormenta tiene un período de retorno de casi 40 años.

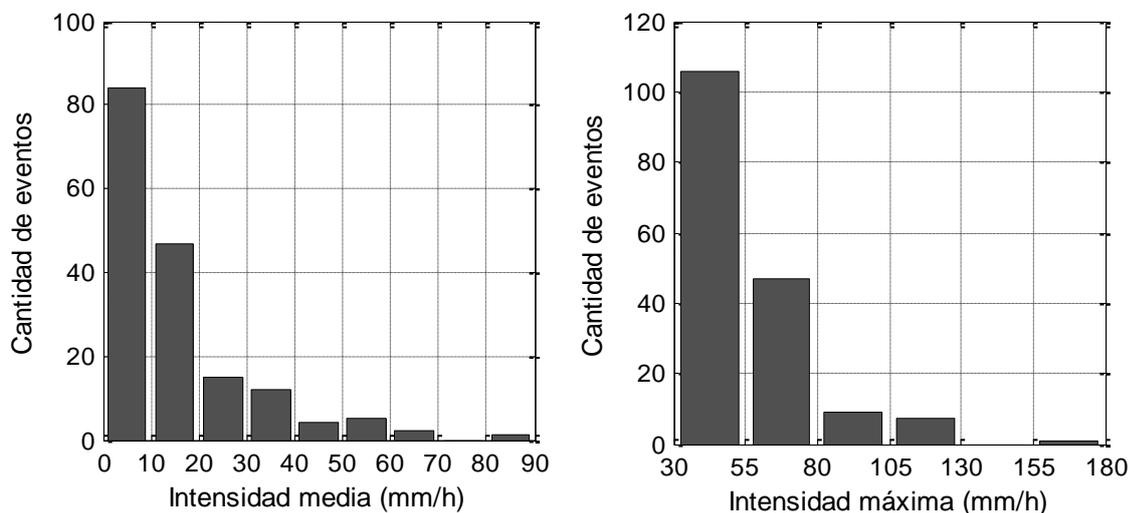
En las Figuras siguientes se presentan, a modo descriptivo, los histogramas de precipitación total, duración, intensidad media e intensidad máxima del conjunto de tormentas seleccionadas y procesadas para el análisis.



**Figura 5-4 Histograma de precipitación total acumulada de las tormentas**



**Figura 5-5 Histogramas de la duración total de las tormentas**



**Figura 5-6 Histogramas de intensidad media e intensidad máxima de las tormentas**

### 5.3 Tormentas de diseño

Como fue mencionado anteriormente, fueron evaluadas para su aplicación las metodologías comprendidas en las primeras 3 categorías. En función de su aplicabilidad en Uruguay, fueron seleccionadas las siguientes metodologías para aplicar en Montevideo:

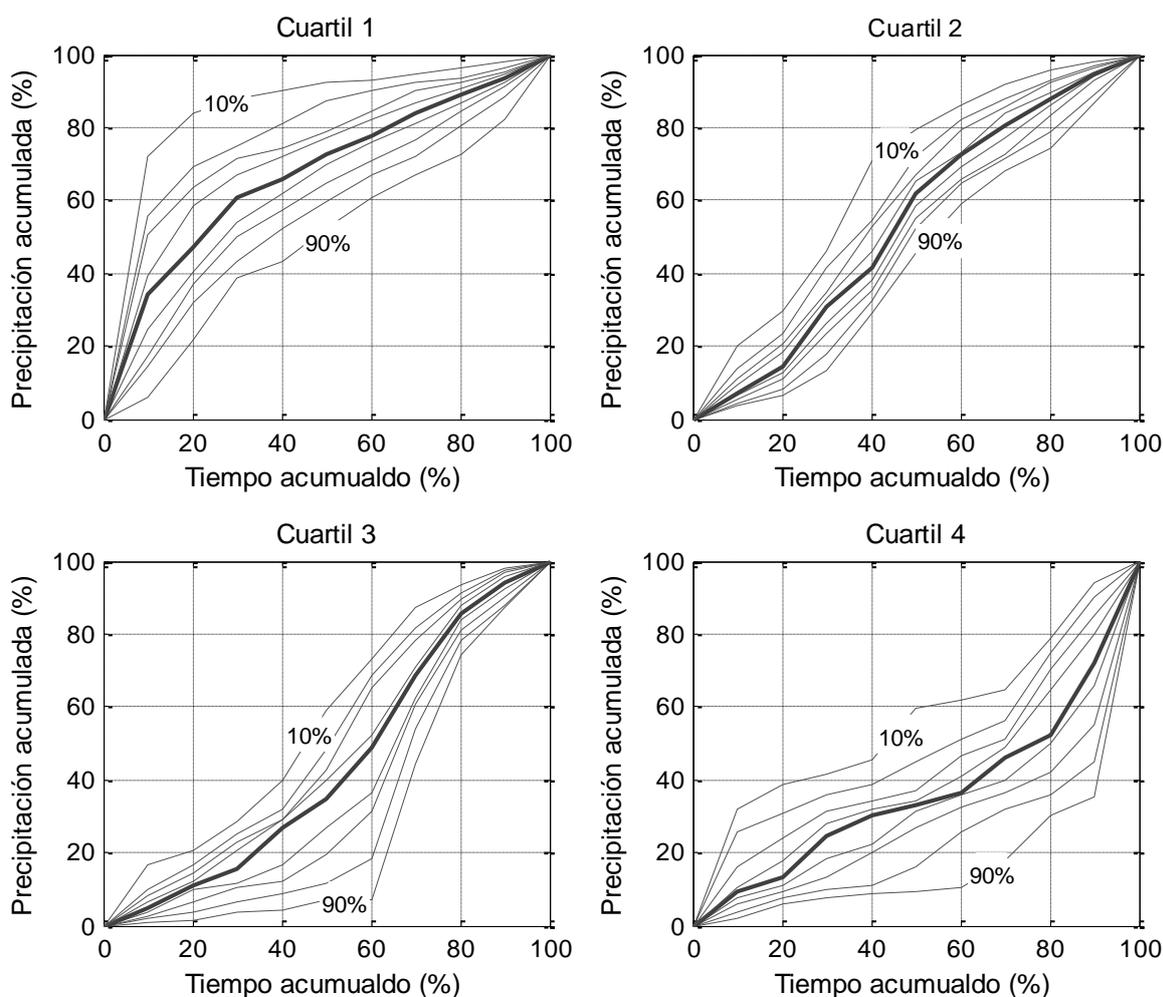
- Huff
- Pilgrim & Cordery
- Chukwuma y Schwab

Dichas metodologías fueron aplicadas utilizando el conjunto de 170 tormentas identificadas y procesadas de los registros de la estación Prado. Los criterios para su aplicación así como los resultados obtenidos se presentan a continuación.

### a) Método de Huff

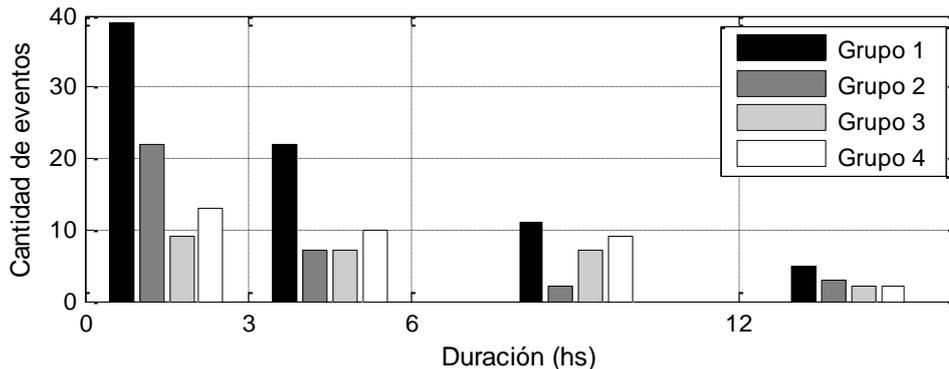
El método de Huff fue aplicado agrupando las tormentas según la posición temporal (cuartil) de la máxima intensidad. Se obtuvo así, para cada grupo, un conjunto de hietogramas adimensionales asociados a diferentes probabilidades.

En la Figura siguiente se presentan las curvas de probabilidad obtenidas para cada grupo. Cada curva indica la probabilidad de que el patrón observado caiga a la izquierda de la curva. Se destaca con una línea más gruesa la curva de probabilidad 50%. De las 170 tormentas, se tiene que un gran porcentaje (45%) caen en el grupo 1, distribuyéndose el 55% restante en partes prácticamente iguales entre los grupos 2, 3 y 4.



**Figura 5-7 Curvas de probabilidad de la distribución temporal acumulada de la lluvia (Método de Huff) para cada grupo definido en función del cuartil en el que ocurre la máxima intensidad**

Para visualizar la frecuencia de cada grupo en función de la duración de la tormenta se presenta, en la Figura 5-8, un histograma de frecuencias por rango de duración. Se observa un gran predominio de tormentas del grupo 1 para duraciones menores a 6 hs, no siendo tan notorio el predominio de ningún grupo para duraciones mayores.



**Figura 5-8: Histograma de agrupación para cada rango de duración**

Siguiendo las recomendaciones de Huff para la selección del histograma de diseño, se sugiere utilizar las curvas correspondientes al primer cuartil, por ser las mismas las más frecuentes, sobre todo para duraciones menores 6 horas. Para la mayoría de los casos es razonable utilizar, para el diseño, la curva correspondiente al 50% de probabilidad, ya que las restantes curvas representan una proporción relativamente menor de las tormentas pertenecientes a cada cuartil. Sin embargo, dichas curvas pueden ser de utilidad si se desea estimar el caudal de diseño dado por la ocurrencia de tormentas con condiciones inusuales (por ejemplo la curva del 10%). En la sección 5.4 se analizan los resultados de utilizar las diferentes curvas.

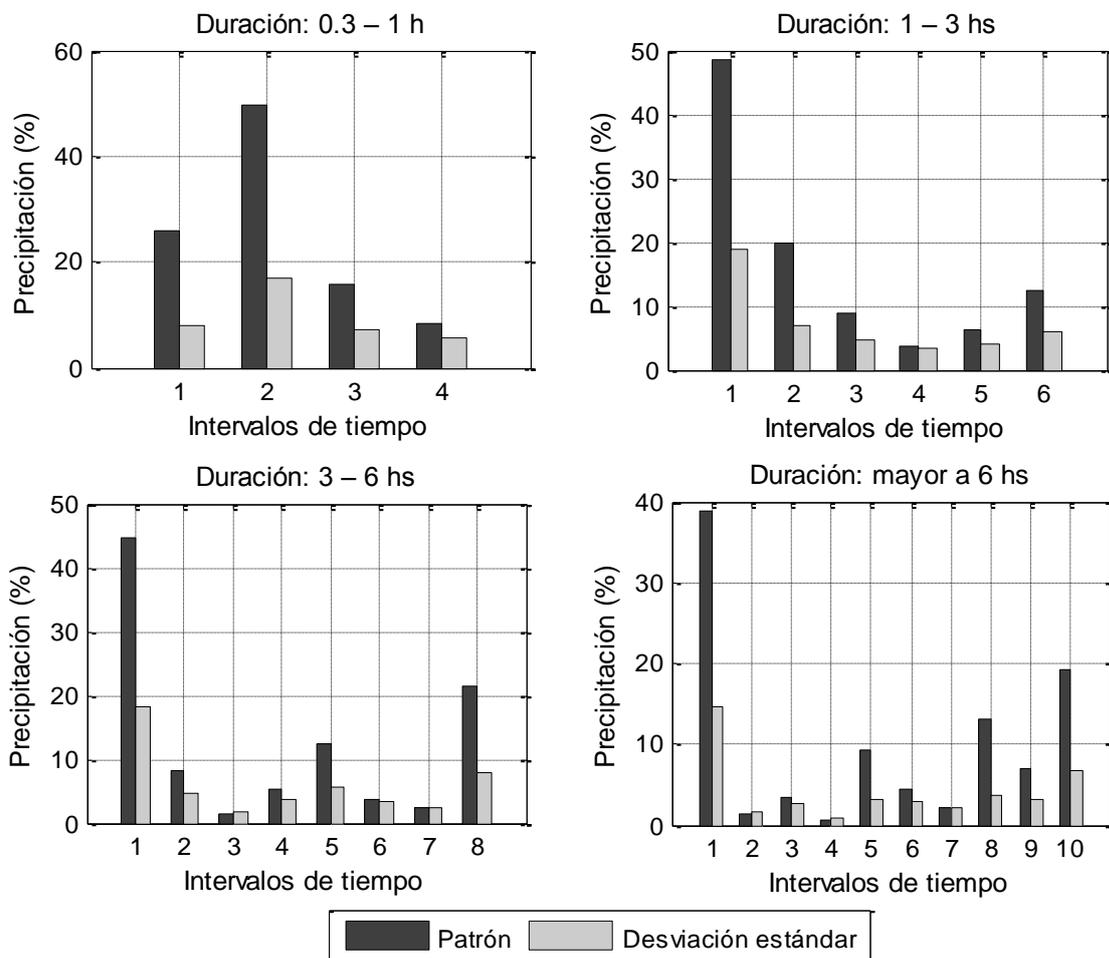
### b) Método de Pilgrim & Cordery

Para aplicar el método de Pilgrim & Cordery se clasificaron las tormentas en 4 grupos según su duración, de acuerdo a la Tabla 5-1. En dicha Tabla se presenta también la cantidad de tormentas y el histograma adimensional obtenido para cada grupo. Se observa que las tormentas fueron discretizadas en diferente cantidad de intervalos temporales, en función de su duración.

En la Figura 5-9 se presentan, gráficamente, los histogramas adimensionales y su desviación estándar.

**Tabla 5-1: Hietograma adimensional para cada rango de duración**

Duración	Nº de tormentas	Nº de intervalos	Precipitación (%) en cada intervalo									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.3 – 1 h	33	4	26.0	49.8	15.9	8.4						
1 – 3 hs	42	6	48.7	19.8	8.9	3.8	6.3	12.5				
3 – 6 hs	47	6	44.8	8.2	1.4	5.4	12.5	3.7	2.6	21.4		
> 6 hs	39	12	38.9	1.5	3.3	0.7	9.3	4.5	2.3	13.0	7.1	19.4



**Figura 5-9: Hietogramas adimensionales obtenidos para cada rango de duración**

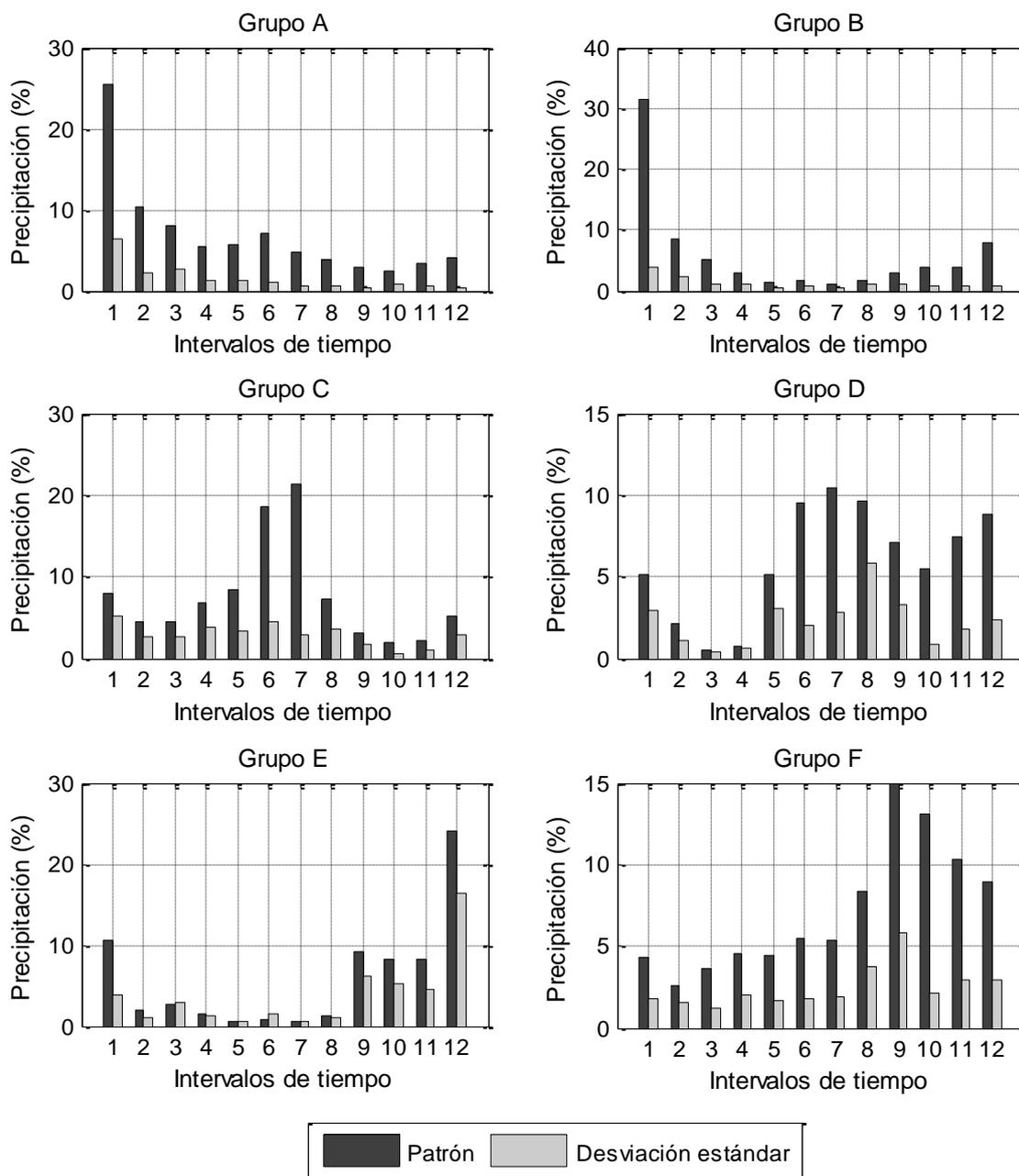
Se observa en todos los casos un patrón de precipitación avanzado, con la intensidad máxima en el primer o segundo intervalo temporal.



### **c) Método de Chukwuma & Schwab**

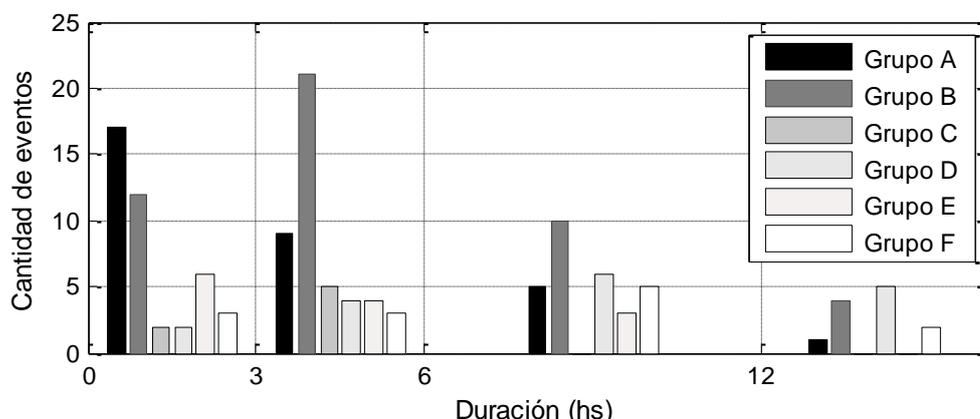
Para aplicar el método de Chukwuma & Schwab se discretizaron las tormentas en 12 intervalos temporales y se clasificaron en 6 grupos de acuerdo a la Figura 5-10. Cabe mencionar que para aplicar esta metodología fueron utilizadas únicamente las tormentas de duración mayor o igual 1 h (para poder construir los 12 intervalos), teniendo así un total de 129 tormentas.

En la Figura siguiente se presenta el patrón de precipitación obtenido para cada grupo y su desviación estándar. El 61% de las tormentas corresponden a los grupos A y B, demostrando nuevamente la mayor frecuencia de patrones avanzados. El 39% restante se distribuye equitativamente entre los demás grupos.



**Figura 5-10: Hietogramas adimensionales obtenidos para cada rango de duración**

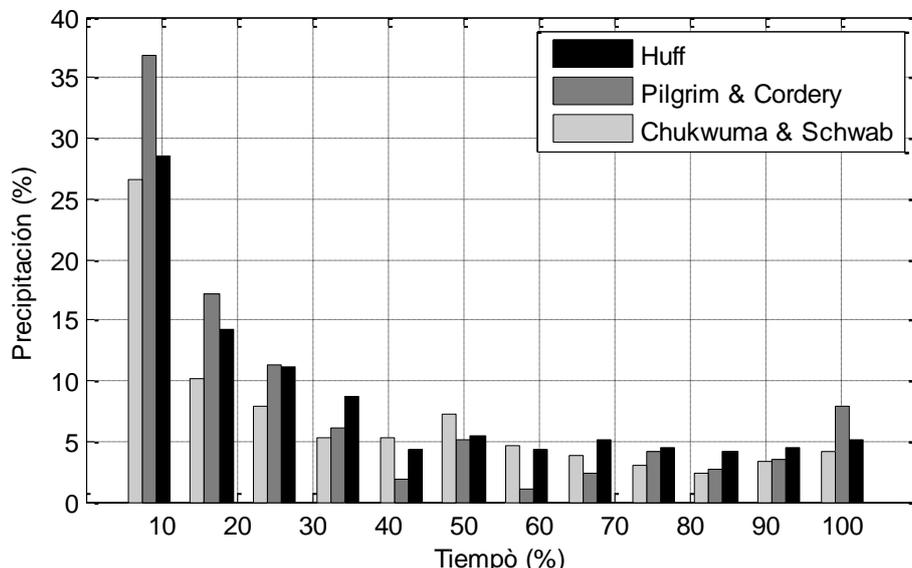
En la Figura 5-11 se presenta un histograma de frecuencias de los 6 grupos para cada rango de duración de tormentas. En concordancia con las frecuencias obtenidas para los grupos del método de Huff, se observa un gran predominio de los grupos A y B para tormentas de duración menor a 6 hs, no identificándose un predominio tan marcado para duraciones mayores.



**Figura 5-11: Histograma de agrupación para cada rango de duración**

### 5.3.1 Comparación de metodologías

En la Figura siguiente se presenta una comparación de los hietogramas adimensionales de mayor probabilidad de ocurrencia obtenidos por las diferentes metodologías, con el objetivo de evaluar la consistencia entre las mismas. El hietograma del método de Huff corresponde a la curva de 50% de probabilidad del grupo 1, el hietograma del método de Pilgrim & Cordery corresponde al rango de duración de 1 a 3 hs y el hietograma del método de Chukwuma & Schwab corresponde al del grupo A.



**Figura 5-12: Comparación de los hietogramas adimensionales más frecuentes obtenidos por las diferentes metodologías**

Se observa una distribución temporal de precipitación muy similar en los 3 casos, presentando un patrón avanzado con la intensidad máxima localizada en el primer intervalo temporal. En función de estos resultados, se seleccionan las curvas de Huff para realizar

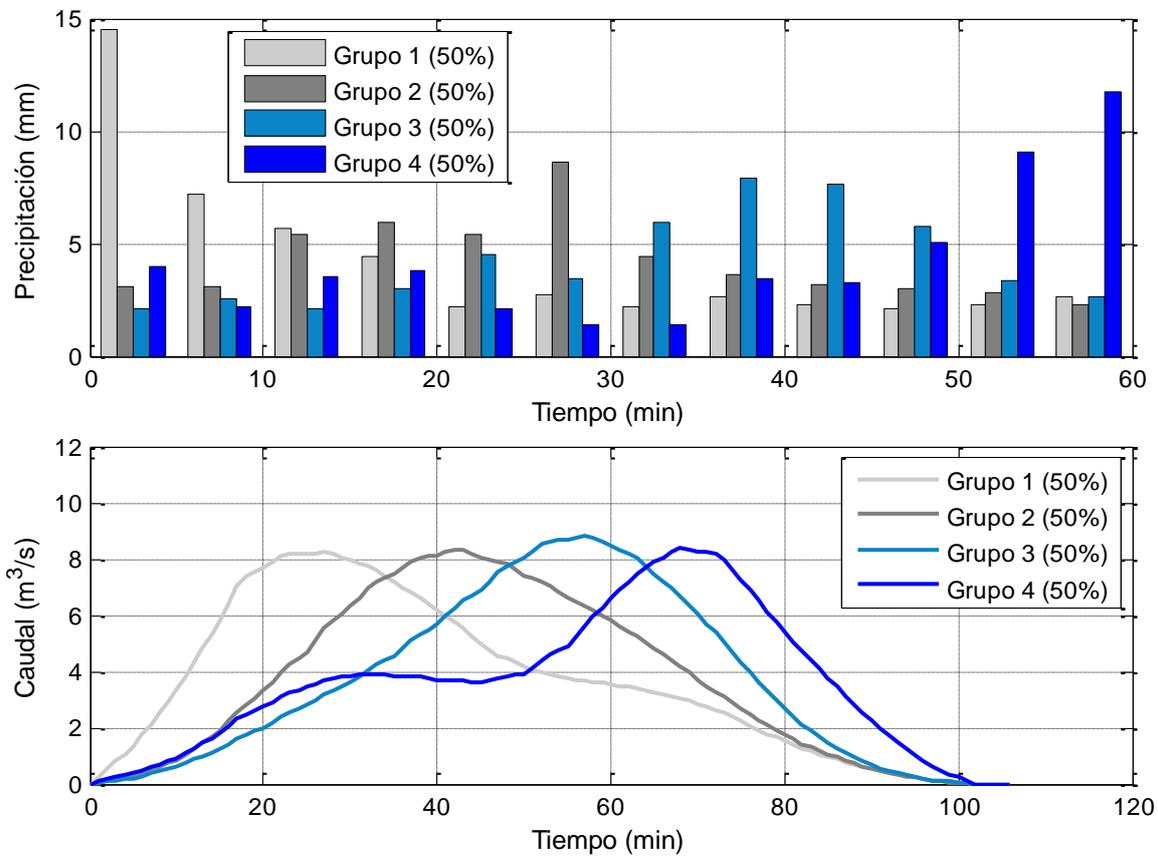
análisis posteriores, ya que las mismas contienen un espectro más completo en cuanto su probabilidad de ocurrencia.

## **5.4 Análisis de las tormentas de diseño obtenidas y comparación con la de la IM**

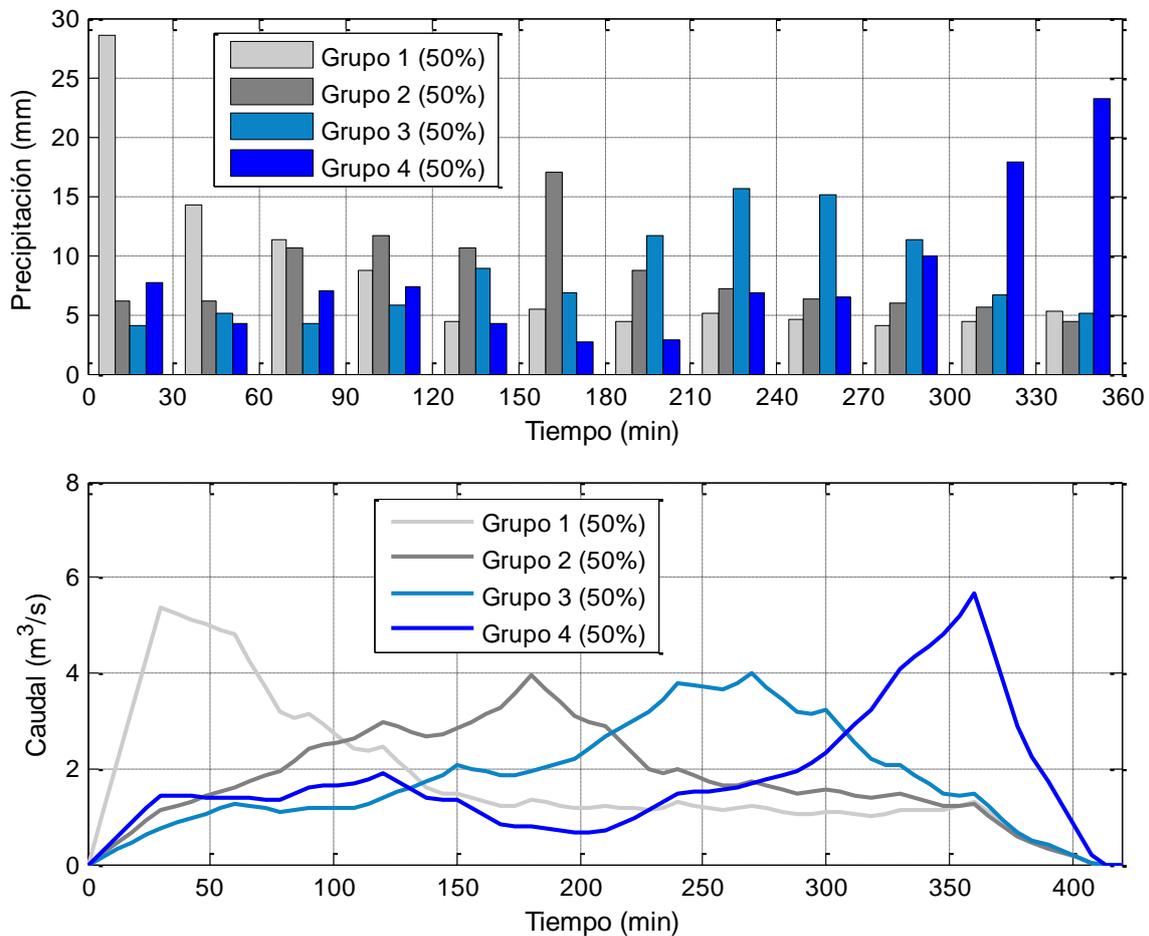
Con el objetivo de evaluar la representatividad del hietograma de diseño utilizado por la IM para el diseño de obras hidráulicas en Montevideo, se realizó una comparación entre dicho hietograma y los hietogramas de diseño obtenidos con las curvas de Huff. Dicha comparación incluyó además una comparación entre los hidrogramas de crecida resultantes de cada tormenta. Para determinar los hidrogramas de crecida se consideró una cuenca de tipo urbana de 100 ha y tiempo de concentración de 25 minutos, en la cual se aplicó el método de Caredas (basado en el método racional y el hidrograma unitario triangular) para de 10 años de período de retorno y diferentes duraciones. La precipitación total de cada evento se obtuvo de las curvas IDF actualizadas en este proyecto.

En primer lugar se analizaron los hietogramas y los hidrogramas resultantes de la curvas de 50% de probabilidad de Huff (por considerarse las mismas características de cada grupo) para duraciones de entre 1 y 6 hs. Se obtuvo que para duraciones del orden de 1 hora o menores, todos los hidrogramas resultantes son muy similares (Figura 5-13), mientras que para duraciones mayores las curvas características de los grupos 1 y 4 arrojan caudales máximos algo mayores que las de los grupos 2 y 3 (Figura 5-14). Esto último responde a que los hietogramas de los grupos 1 y 4 poseen las mayores intensidades de precipitación. Si se consideran diferentes cuencas (con diferentes tiempos de concentración) y diferentes duraciones de tormentas se obtienen resultados relativos muy similares, siendo la relación entre ambos parámetros la que define el comportamiento.

Los hietogramas correspondientes al Grupo 1, además de ser los más frecuentes, con la metodología utilizada, son los que arrojan mayores caudales de diseño (junto con los hietogramas del Grupo 4).



**Figura 5-13: Hietogramas de diseño característicos (50%) obtenidos por Huff para cada grupo e hidrogramas resultantes para una duración de 1 h**

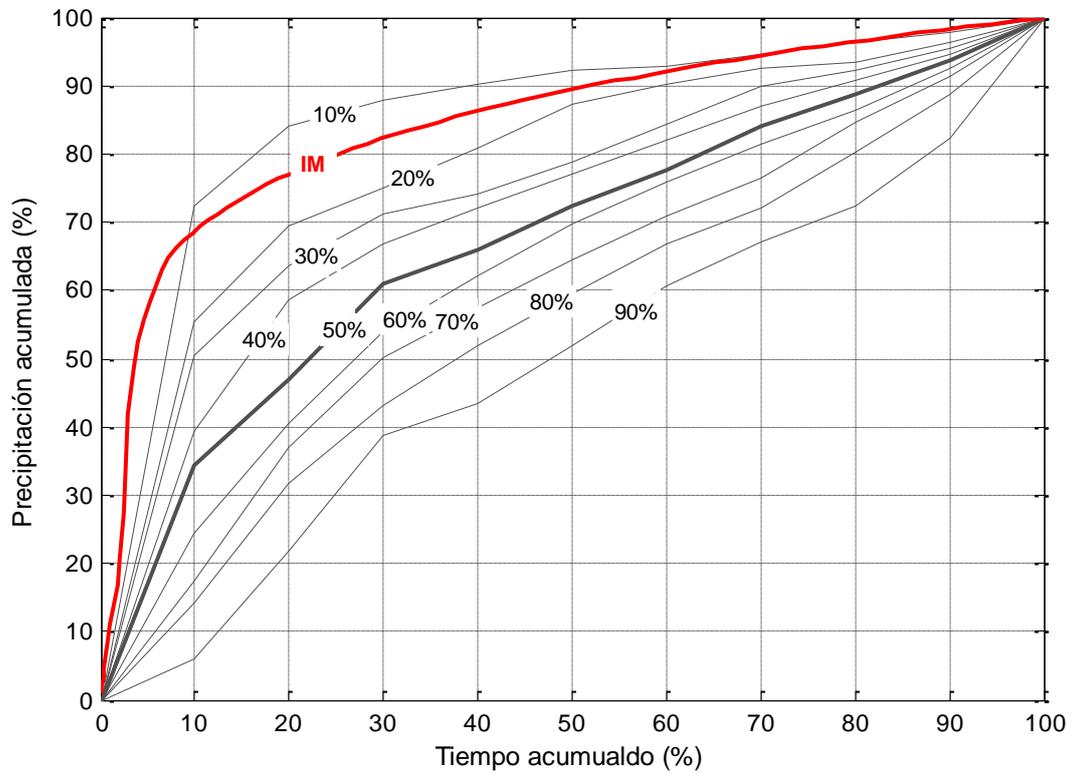


**Figura 5-14: Hietogramas de diseño característicos (50%) obtenidos por Huff para cada grupo e hidrogramas resultantes para una duración de 6 h**

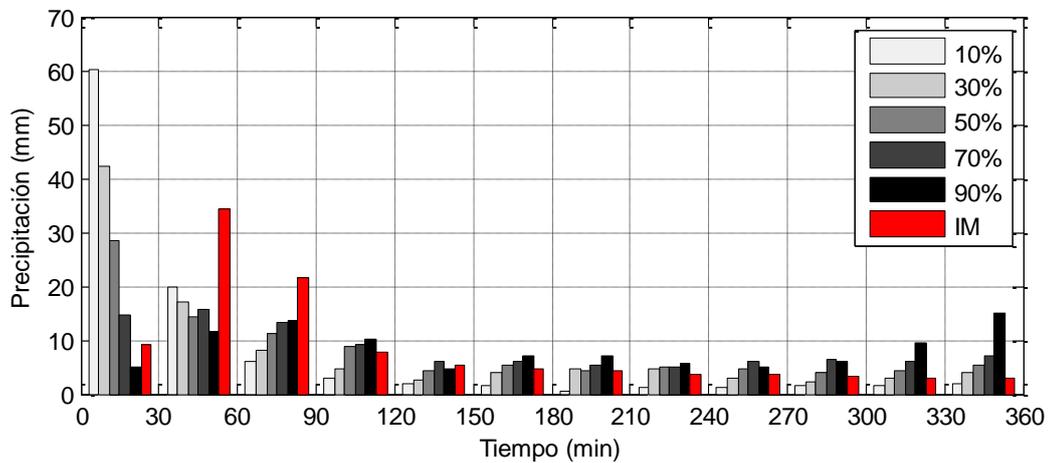
Luego, con el objetivo de evaluar la representatividad de la tormenta de diseño utilizada en la IM, en la Figura siguiente se presenta la curva de precipitación acumulada correspondiente a la tormenta de diseño de la IM junto con las curvas de Huff correspondientes al Grupo 1 (ya que la tormenta de la IM corresponde, dada su forma, al Grupo 1).

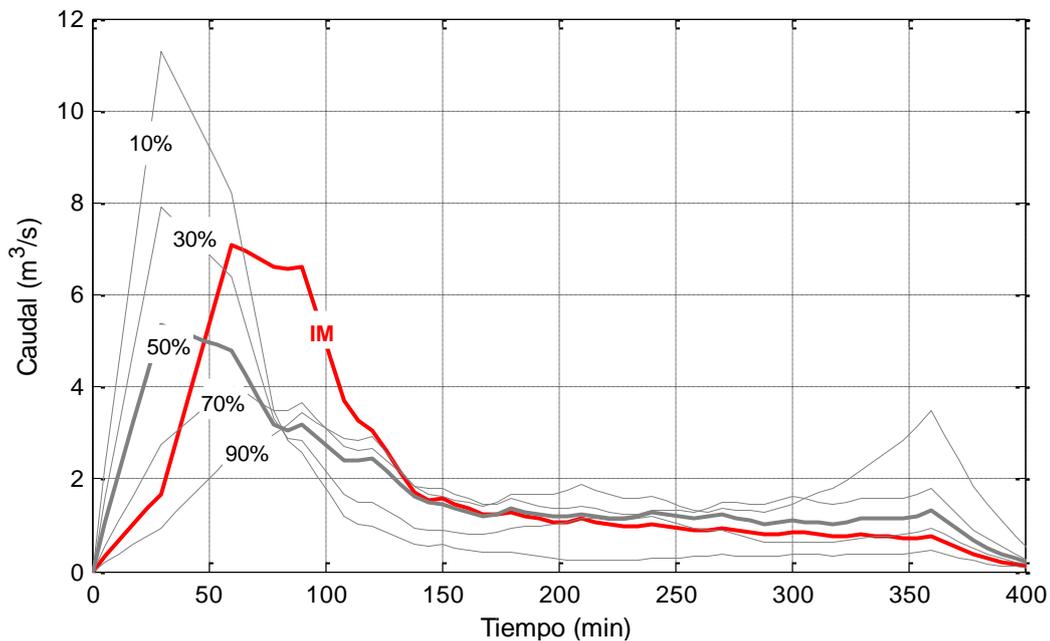
Luego, en la Figura 5-16 se presentan los hietogramas y los hidrogramas resultantes de las curvas de 10, 30, 50, 70 y 90% de probabilidad del Grupo 1 de Huff en comparación con el de la IM. Se observa que la tormenta de la IM se encuentra comprendida entre las curvas de 10 y 30% de probabilidad aproximadamente, siendo estas las que arrojan los mayores caudales máximos dentro del Grupo 1.

Cabe mencionar que la tormenta de la IM consiste en una tormenta anidada (para cada intervalo temporal, la intensidad máxima corresponde a la máxima intensidad para un  $T_r$  dado, ya que se obtiene de las curvas IDF), mientras que los patrones obtenidos por el método de Huff no cumplen con dicha propiedad



**Figura 5-15: Curvas de precipitación acumulada: Tormenta IM vs Tormentas de diseño obtenidas por el método de Huff (Cuartil 1)**





**Figura 5-16: Hietogramas de diseño obtenidas por el método de Huff (Cuartil 1) en comparación con el hietograma de la IM e hidrogramas resultantes**

Los resultados obtenidos demuestran que la tormenta utilizada por la IM genera caudales máximos de diseño cercanos a los obtenidos con las tormentas de diseño más extremas (en términos del caudal máximo generado) generadas a partir del registro pluviográfico y las curvas de Huff.

## 5.5 Resumen y Conclusiones

Con el objetivo de caracterizar la distribución temporal de precipitación en las tormentas registradas en Montevideo y analizar su impacto en la estimación de hidrogramas de diseño de obras hidráulicas, se aplicaron diferentes metodologías para determinar hietogramas de diseño en base a datos históricos. Para ello se utilizaron datos pluviográficos registrados y digitalizados en la estación Prado (Montevideo) en el período 1968-2005, a partir de los cuales se identificaron y procesaron 170 tormentas con intensidad máxima de 10 minutos mayor a 40 mm/h aproximadamente (valor correspondiente a un período de retorno algo mayor a 1 año).

Los hietogramas característicos de las tormentas registradas obtenidos por las diferentes metodologías resultaron consistentes, por lo que seleccionaron las curvas de precipitación acumulada propuestas por Huff para realizar análisis posteriores, ya que las mismas contienen un espectro más completo en cuanto su probabilidad de ocurrencia. Se tiene así 4 grupos de curvas de precipitación acumulada asociadas a diferentes probabilidades de ocurrencia. Cada grupo se diferencia según si la intensidad máxima se da en el primer, segundo, tercer o cuarto cuartil temporal. Cabe mencionar que la mayoría de las tormentas

registradas (45%) caen en el grupo 1, distribuyéndose el 55% restante en forma equitativa entre los demás grupos.

A partir de dichas curvas se analizaron los hidrogramas resultantes de utilizar diferentes tormentas de diseño. Para ello se aplicó el método de Caredas sobre una cuenca de tipo urbana de 100 ha sobre la cual se consideraron tormentas de diseño de diferente duración y 10 años de período de retorno.

En primer lugar se compararon los hidrogramas generados por las tormentas dadas por las curvas de 50% de probabilidad de los diferentes grupos, por considerarse las mismas características de cada grupo. Se obtuvieron hidrogramas generados similares para los 4 grupos, acentuándose relativamente los caudales máximos correspondientes a los grupos 1 y 4 a medida que la duración de la tormenta sobrepasa excesivamente el tiempo de concentración.

Luego, con el objetivo de evaluar la representatividad de la tormenta de diseño utilizada por la IM en la actualidad para el diseño de obras hidráulicas, se realizó una comparación entre los hidrogramas del Grupo 1 de Huff y la tormenta de diseño de la IM (la cual tiene una duración fija de 6 hs y su máximo en el primer cuartil). Los resultados obtenidos demuestran que la tormenta utilizada por la IM genera caudales máximos de diseño cercanos a los obtenidos con las tormentas de diseño más extremas (en términos del caudal máximo generado) generadas a partir del registro pluviográfico y las curvas de Huff.

En función de lo anterior y de la importancia que tiene para la IM utilizar tormentas de diseño anidadas (que permita modelar conjuntos de subcuencas de diferentes tiempos de concentración con la misma tormenta) se entiende razonable seguir utilizando las tormentas de diseño actuales (las generadas con las curvas de Huff no cumplen con dicha propiedad).

## 5.6 Pasos futuros

Se sugiere realizar el análisis de Grimaldi y Serimaldi (2006). Saber cuál es la probabilidad conjunta de que simultáneamente se tenga la máxima intensidad y la máxima precipitación total, tiene valor para el diseño de obras.

A partir de la información que se generará con la red de pluviógrafos a instalar por la IM, se puede realizar un análisis para cada estación y regionalizar a nivel departamental, es decir, proponer diferentes hidrogramas según región. Además, se entiende necesario extender la serie de datos pluviográficos de Montevideo, de forma tal de obtener una mayor cantidad de eventos extremos para la obtención de los hidrogramas de diseño.



## 6 INCIDENCIA DEL CAMBIO Y/O VARIABILIDAD CLIMÁTICA

### 6.1 Introducción

El aumento en el nivel medio del mar a escala global es una de las amenazas asociadas al cambio climático. El reciente informe del IPCC-AR5 confirma un aumento en el nivel medio del mar de 0.19 m (con intervalo de confianza entre 0,17 y 0,21 m) para el período 1901-2010, pero con una tasa creciente en el tiempo que se estima en 3.2 mm/año (con intervalo de confianza entre 2.8 y 3.6 mm/año) para el período más reciente de 1993 a 2010. Los estudios internacionales proveen además de escenarios de evolución del nivel medio del mar –con su incertidumbre- durante el siglo XXI, los cuales se mencionan en la Sección 6.7.

Por otro lado, es conocido que los niveles de marea en la bahía de Montevideo, de interés para la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM), están determinados por una serie de factores entre los cuales el nivel medio del mar es sólo una componente. Aún filtrada la marea astronómica, la marea meteorológica depende fuertemente del campo de vientos, sobre todo en los eventos extremos que son más relevantes para la IMM. Más aún, es de interés de la IMM conocer sobre la ocurrencia combinada de período de marea alta y precipitación intensa.

Los registros de marea máxima en Montevideo presentan una evolución bastante más errática en el tiempo que la evolución del nivel medio del mar, lo cual vuelve más complejo el diagnóstico del pasado y la posibilidad de elaborar escenarios a futuro. Esta dificultad es típica de la reducción de escala de lo global a lo regional y local, donde las incertidumbres crecen debido a la relevancia de procesos locales que, en la media global, se cancelan.

La dificultad anterior se ve acentuada por la escasez –en términos relativos- de datos de la calidad, frecuencia y longitud suficiente para analizar los procesos físicos que determinan el nivel de marea máxima en la bahía de Montevideo.

Es así que la elaboración de escenarios sobre el nivel de marea en Montevideo presenta una serie de desafíos metodológicos que surgen de la combinación de limitantes en el conocimiento y en la disponibilidad de datos relevantes.

El trabajo que aquí se presenta pretende sentar las bases para la elaboración de escenarios de nivel de marea máxima en Montevideo. Para ellos se utiliza toda la información y la capacidad de modelación disponible. En todo momento se precisa el alcance de las conclusiones que se pueden sacar con firmeza y su incertidumbre.

A continuación se relaciona el nivel de marea en MVD en relación a la evolución regional y global (Sección 6.2), el campo de viento y presión superficial en la región (Sección 6.3) y la precipitación diaria en Montevideo (Sección 6.4). En la Sección 6.5 se analizan una serie de eventos extremos seleccionados, cuya evolución temporal se examina en la Sección 6.6. La Sección 6.7 explora el potencial uso de escenarios de modelos climáticos para la

elaboración de escenarios de marea máxima y, por último, se resumen las conclusiones en la Sección 6.8.

## **6.2 Nivel de marea en Montevideo y nivel del mar**

Como fuera anunciado en la introducción, esta sección se limita a analizar las variaciones ocurridas en el nivel del mar en el pasado, en diversas escalas espacio-temporales, buscando entender mejor sus orígenes de modo de poder decir algo sobre su probable evolución futura.

Primeramente, en la Sección 6.2.1, se hace una mirada de largo plazo de los registros centenarios disponibles en la bahía de Montevideo: mínimos, medias y máximos anuales. En la Sección 6.2.2 se busca explorar la relación entre lo local (en MVD), regional (en dominio a definir) y global, en base a los mismos registros en la bahía y a reanálisis disponibles de niveles medios globales desde 1950. Recién en la Sección 6.2.3 se pasa al análisis de eventos puntuales y su caracterización a partir de registros horarios en MVD de aproximadamente 40 años. Por último, en la sección 6.2.4 se presenta un ejercicio de modelación que intenta arrojar alguna luz sobre la influencia del nivel medio del mar a escala regional en los niveles en la bahía. La relación del nivel del mar en Montevideo con otras variables meteorológicas de interés se abordará recién en la Sección 6.3 (campos de viento y presión atmosférica) y 6.4 (precipitación).

### **6.2.1 Análisis secular de nivel del marea en Montevideo**

El largo registro de nivel en la bahía desde principios del siglo XX permite analizar variaciones de muy largo plazo como la esperada en asociación a aumentos en el nivel medio del mar por el calentamiento global. Como limitante, cabe señalar que dicho registro se limita a valores anuales de marea mínima, media y máxima (ver Figura 6-1).

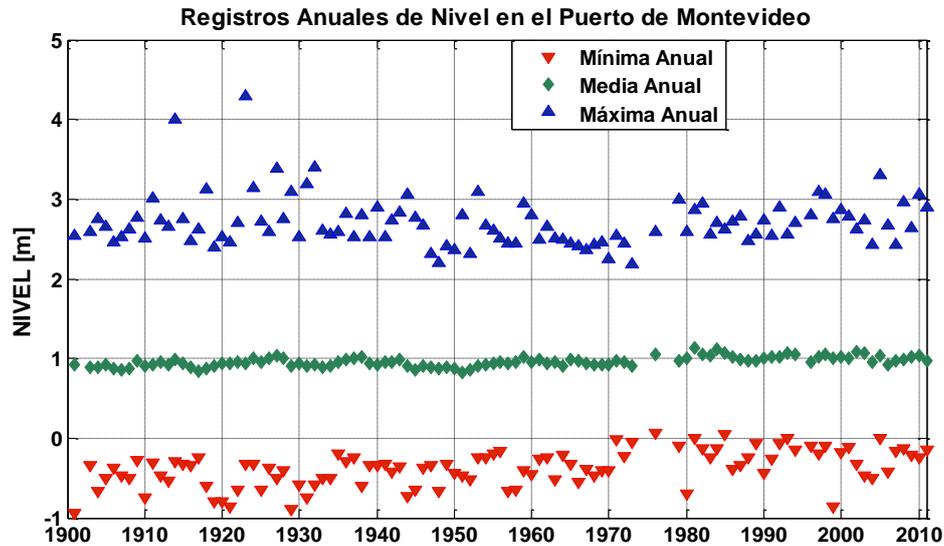
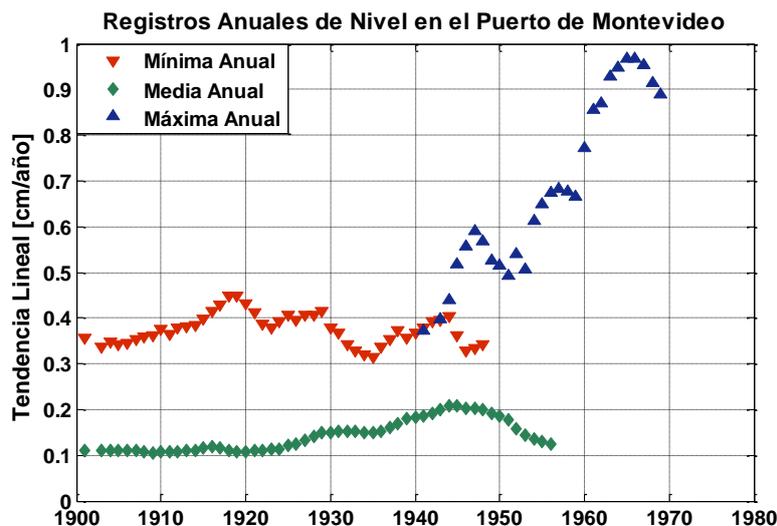


Figura 6-1: Nivel máximo, medio y mínimo anual en la bahía de Montevideo de 1901 a 2011.

Los análisis de tendencias sufren, más allá de la metodología usada, de la arbitrariedad del período seleccionado. En series con variabilidad en múltiples escalas como típicamente son las climáticas, es común observar tendencias significativas en ciertos sub-períodos que se desvanecen en otros. Es una expresión de la dificultad de separar la variabilidad multidecádica de la de más largo plazo. Para abordar este problema se realizaron análisis de tendencia para todos los sub-períodos del tipo 19XX-2011. Para cada año del siglo XX, se calculó por un lado la tendencia lineal de la serie (mínima, media y máxima de marea en Montevideo) hasta el final del registro y la significación estadística de dicha tendencia según el test de Kendall-Mann. La Figura 6-2 muestra dichos resultados solo para aquellos casos en que la significación es mayor al 99%.



**Figura 6-2: Tendencia lineal de nivel máximo, medio y mínimo anual en Montevideo para períodos 19XX (indicado por abscisa)-2011. Solo se muestran tendencias significativas al 99% según Kendall-Mann.**

Son varios los comentarios que surgen de la Figura 6-2, aunque pocas las conclusiones firmes, para lo cual será necesario recurrir a información adicional. Destacamos:

- Todas las tendencias significativas son positivas.
- El comportamiento de la mínima y media anual del nivel del mar en Montevideo son semejantes en lo que respecta a las tendencias. Ambas muestran tendencias significativas si se consideran períodos desde antes de aproximadamente 1950 hasta hoy y se pierde dicha significación si el período comienza luego de mitad del siglo pasado. La magnitud de las tendencias son bastante estables aunque disímiles: 0,1 a 0,2 cm/año en el caso de las medias y 0,3 a 0,4 cm/año en el caso de las mínimas.
- El comportamiento de los eventos máximos de marea es muy diferente (en lo que refiere a las tendencias de largo plazo) de lo descrito en el punto anterior para mínimas y medias. Siendo que existe un período de registros muy altos en la primera década del siglo, no surgen tendencias significativas (ni positivas ni negativas) si consideramos todo el registro. Solo se registran tendencias positivas para períodos iniciados entre 1940 y 1970 y finalizados en 2011. Las magnitudes son crecientes desde 0,4 a 1,0 cm/año. Las tendencias se vuelven no significativas considerando períodos más cortos.

Como conclusiones parciales basadas en las observaciones anteriores se puede decir que:

- Los resultados son consistentes con una tendencia de aumento del nivel del mar subyacente en todas las variables.
- Dicha tendencia se superpone a variaciones en otras frecuencias que son particularmente amplias en el caso de los máximos y están totalmente fuera de fase con medias y mínimos sugiriendo mecanismos físicos totalmente distintos.

### 6.2.2 Análisis Global – Regional – Local

En esta sección recurrimos a datos de altura media del mar, intentando relacionar la variación local (en la bahía de Montevideo) con la regional y global. La disponibilidad de datos nos obliga a concentrarnos en el período 1950-2001.

Las Figuras 6-3 y 6-4 muestran, respectivamente, las tendencias del nivel medio del mar en cada punto de una región amplia del Atlántico Sudoccidental y las correlaciones con el nivel medio en Montevideo según registro en la bahía.

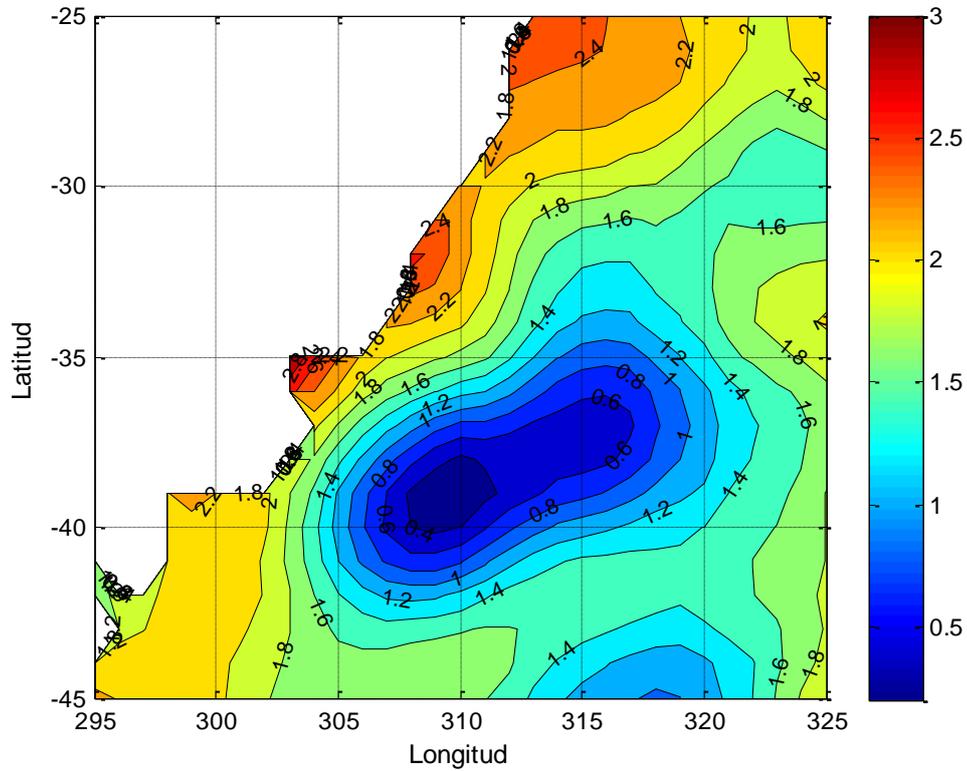
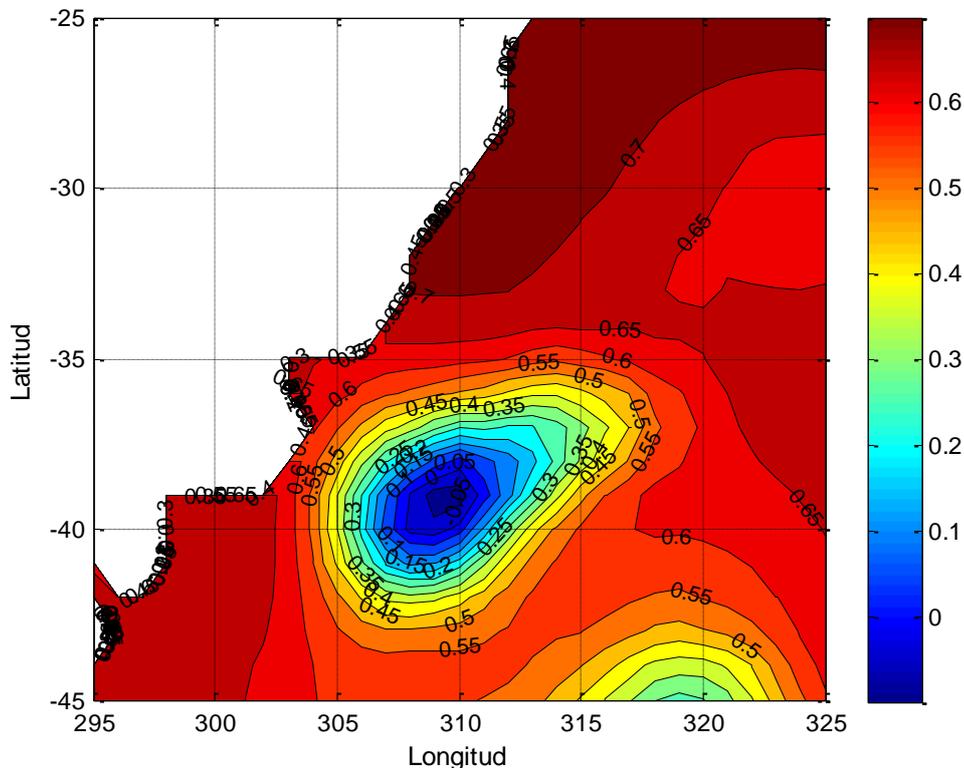


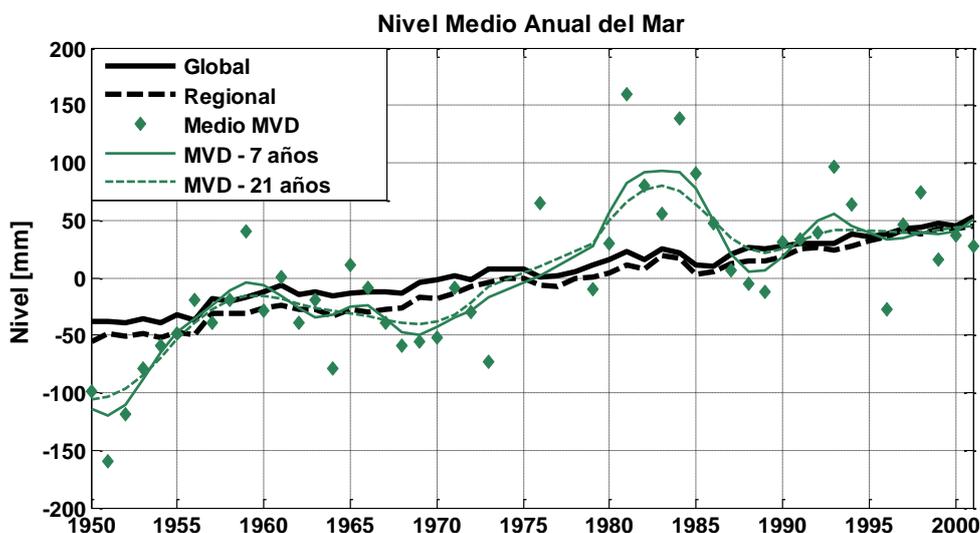
Figura 6-3: Tendencia lineal (mm/año) de nivel medio del mar para el período 1950-2001.



**Figura 6-4: Correlación entre nivel medio del mar en Montevideo y en la región para el período 1950-2001.**

La tendencia es positiva y la correlación con Montevideo significativa en todo el dominio salvo en una región al sureste del Río de la Plata con tendencias y correlaciones con Montevideo casi nulas. Salvo dicho mínimo relativo, no se aprecian mayores variaciones en la correlación, por lo que se toma dicho dominio para hacer un promedio regional. Vale hacer notar que los registros costeros (en particular el de Montevideo) son utilizados en el reanálisis por lo que no es deseable tomar una región demasiada pequeña donde el registro de Montevideo (contra el cual se querrá comparar) pese significativamente.

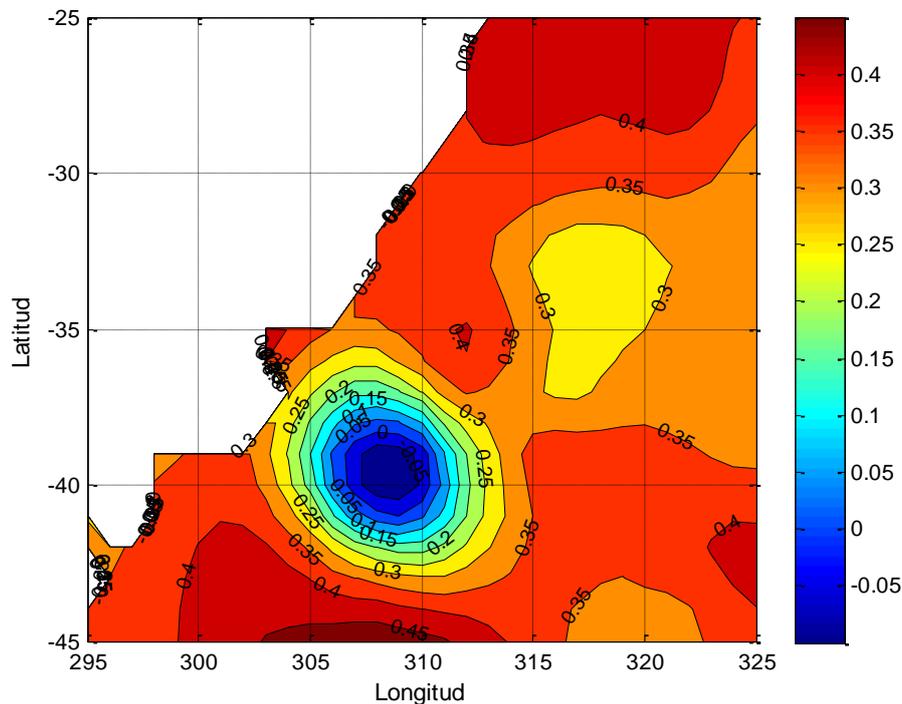
La Figura 6-5 compara el registro regional de nivel medio del mar con el global y con el observado en Montevideo. Este último muestra variaciones interanuales mucho mayores como es de esperar, por lo que además del dato anual, se agregan curvas filtradas con filtros binomiales e 7 y 21 puntos. En dicho filtrado se usan datos de años anteriores a 1950 y posteriores a 2001. En caso de datos faltantes, se distribuye el peso de dicho año entre los restantes en forma proporcional a los pesos que filtro indica.



**Figura 6-5: Nivel medio del mar global, regional (en dominio de las Figs. 3.3 y 3.4) y en Montevideo (valores anuales y con filtros binomiales de 7 y 21 años respectivamente).**

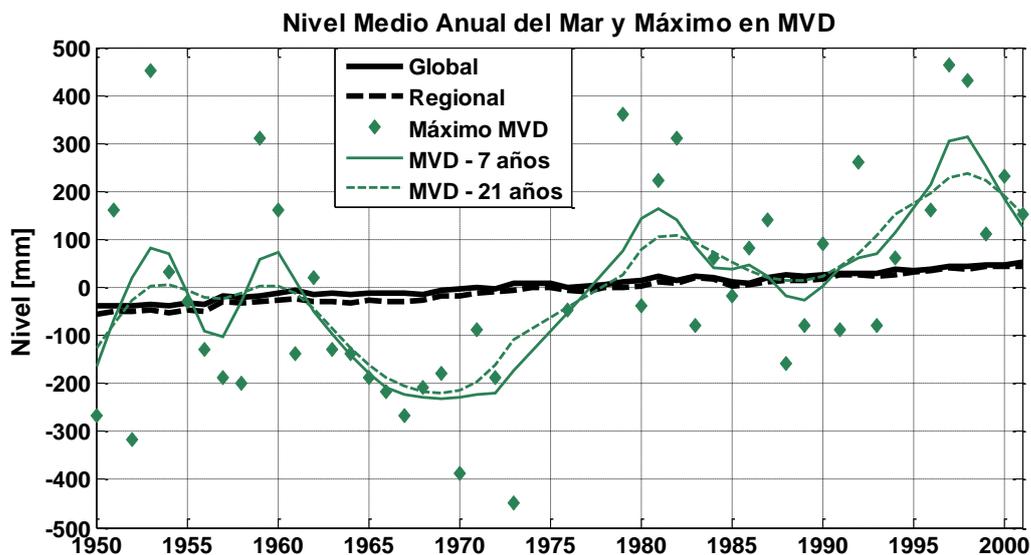
La tendencia lineal para el período es 0,19 cm/año para la media global, 0,17 cm/año para la regional (la correlación entre la media global y regional es 0,99) y 0,27 año para la local (en la bahía de Montevideo). Hay que recordar que en el caso de Montevideo, y tal cual se indicó en la Figura 6-2, el valor de la tendencia lineal depende significativamente del período exacto considerado. Este no es el caso en los niveles medios regionales y globales donde, como es de esperar, la evolución es más monótona y aproximadamente lineal. En el caso de Montevideo se verifica una variación interanual y también interdecadal, esta última sobrevive en gran medida el filtrado. Más allá de la variabilidad en dichas escalas temporales, el registro acompaña la tendencia regional con valores de pendiente semejantes a los encontrados en Losada et al (2013). La correlación entre el nivel medio en Montevideo y la media regional es 0,66. El mismo aumenta a 0,80 y 0,86 si se consideran las series filtradas con filtros binomiales de 7 y 21 años respectivamente.

A continuación analizamos hasta qué punto la evolución del nivel medio regional afecta los máximos observados en Montevideo. Para ello la Figura 6-6 (equivalente a la 6-4) muestra la correlación entre el máximo anual en Montevideo y el medio en cada punto del dominio regional. Se observa una estructura espacial del campo de correlación semejante al de la Figura 6-4, pero con valores sustancialmente menores, indicando nuevamente (como en las conclusiones parciales de la Sección 6.2.1) que se detecta una influencia menor del nivel medio en los eventos de máxima marea, pero que hay otros factores de importancia incidiendo.



**Figura 6-6: Correlación entre nivel máximo anual en Montevideo y medio en la región para el período 1950-2001.**

Por último, la Figura 6-7 (análoga a 6-5) la evolución en el período del nivel medio regional y global contra el máximo anual en Montevideo bruto y filtrado con filtros binomiales de 7 y 21 años con idéntica metodología que en el caso anterior.



**Figura 6-7: Nivel medio del mar global, regional (en dominio de las Figs. 3.3 y 3.4) y máximo en Montevideo (valores anuales y con filtros binomiales de 7 y 21 años respectivamente).**

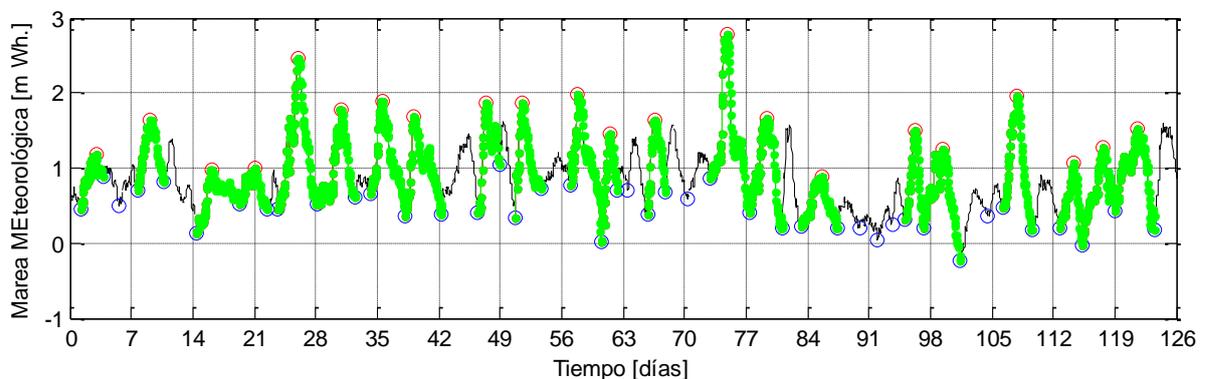
Tanto las variaciones anuales como las decadales (que sobreviven el filtrado) del nivel máximo en Montevideo son notorias y dominan la varianza de la serie. La correlación con la media regional es sensiblemente menor (0,34) que en el caso del nivel medio, mientras que para las series filtradas es 0,52 y 0,61 respectivamente.

La tendencia lineal en el período considerado es de 0,56 cm/año pero es necesario evaluar este valor en el contexto de la Figura 6-2. Vale mencionar que Losada et al. (2013) encuentra tendencias de 0,40 cm/año aproximadamente valores máximos en un punto representativo de la región.

### 6.2.3 Definición y análisis de eventos máximos y mínimos en registro horario en Montevideo

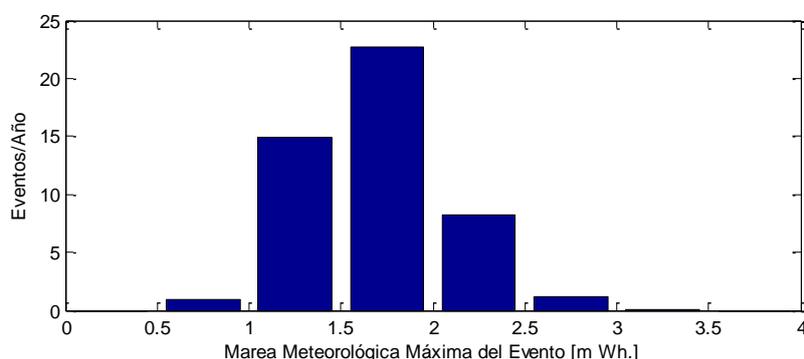
Se definen las mareas meteorológicas máximas (mínimas) utilizando una ventana móvil de  $N$  días. Cuando el máximo (mínimo) de la ventana coincide con el centro de la ventana se identifica dicho valor como el máximo (mínimo) de la marea meteorológica alta (baja).

Luego se define un evento de marea meteorológica como el ciclo mínimo-máximo-mínimo. En la definición de los eventos de marea meteorológica se utilizó ventana móvil de 5 días para determinar los máximos y ventana móvil de 2 días para determinar los mínimos.

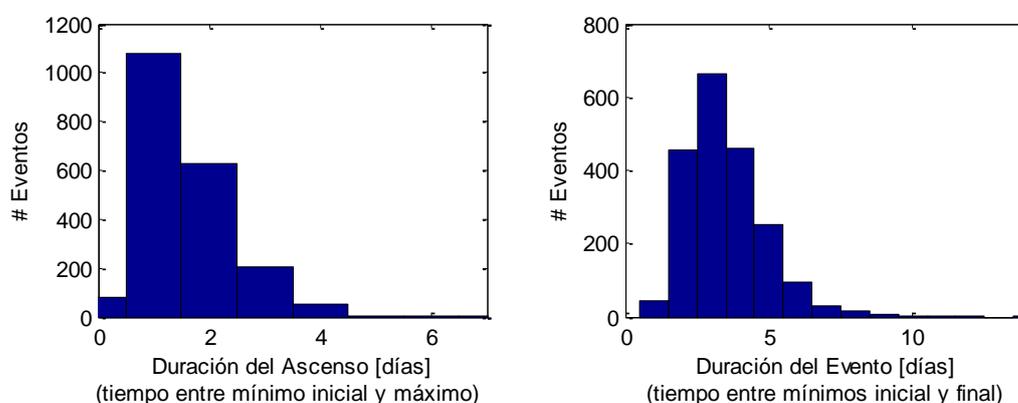


**Figura 6-8: Ejemplo de serie de eventos de marea meteorológica, definidos según lo descrito en la sección 3.3.**

La Figura 6-8 presenta un tramo de la serie temporal de marea meteorológica, señalando los eventos de marea identificados en dicho tramo. La Figura 6-9 presenta el número medio de eventos de marea por año según el máximo nivel de marea alcanzado. La Figura 6-10 presenta los histogramas de duración de los ascensos y de duración total de los eventos.



**Figura 6-9: Eventos de marea por año según rango de valores máximos alcanzados (en metros respecto al cero Wharton).**



**Figura 6-10: Izquierda: histograma de la duración de los ascensos (tiempo entre mínimo inicial y máximo de un evento). Derecha: histograma de la duración de los eventos (tiempo entre mínimos inicial y final).**

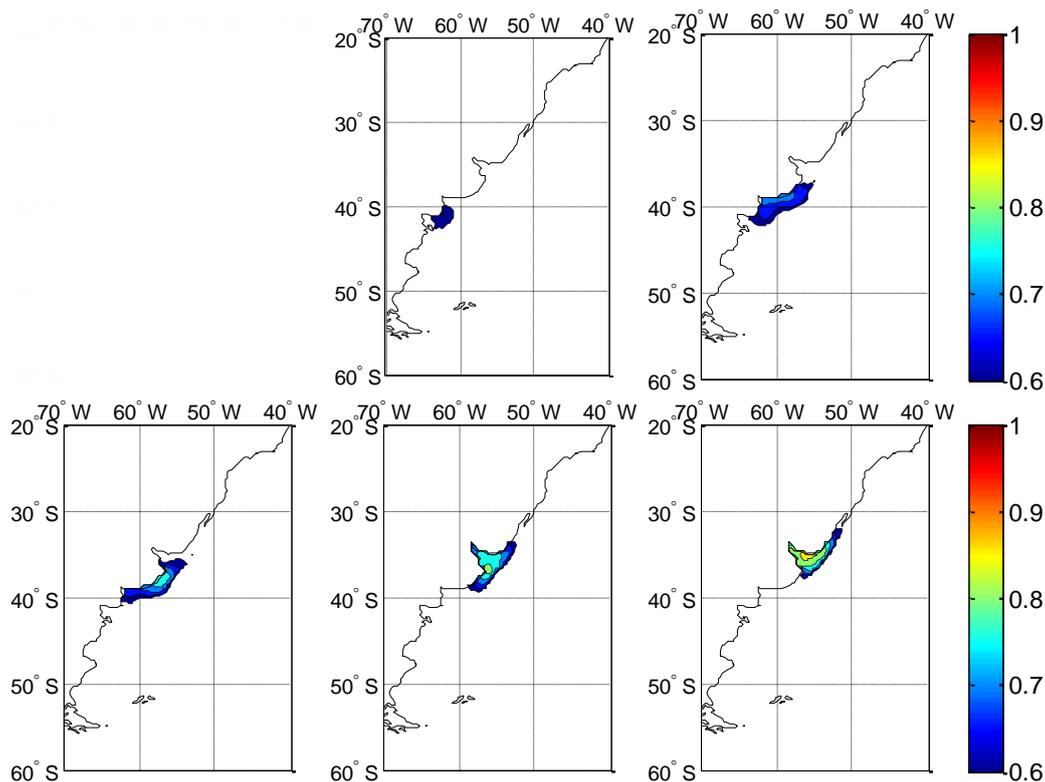
## 6.3 Nivel de marea en Montevideo, viento y presión en superficie

### 6.3.1 Identificación de patrones asociados con marea meteorológica en Montevideo y su interpretación

#### a) Marea meteorológica en Montevideo y en la región

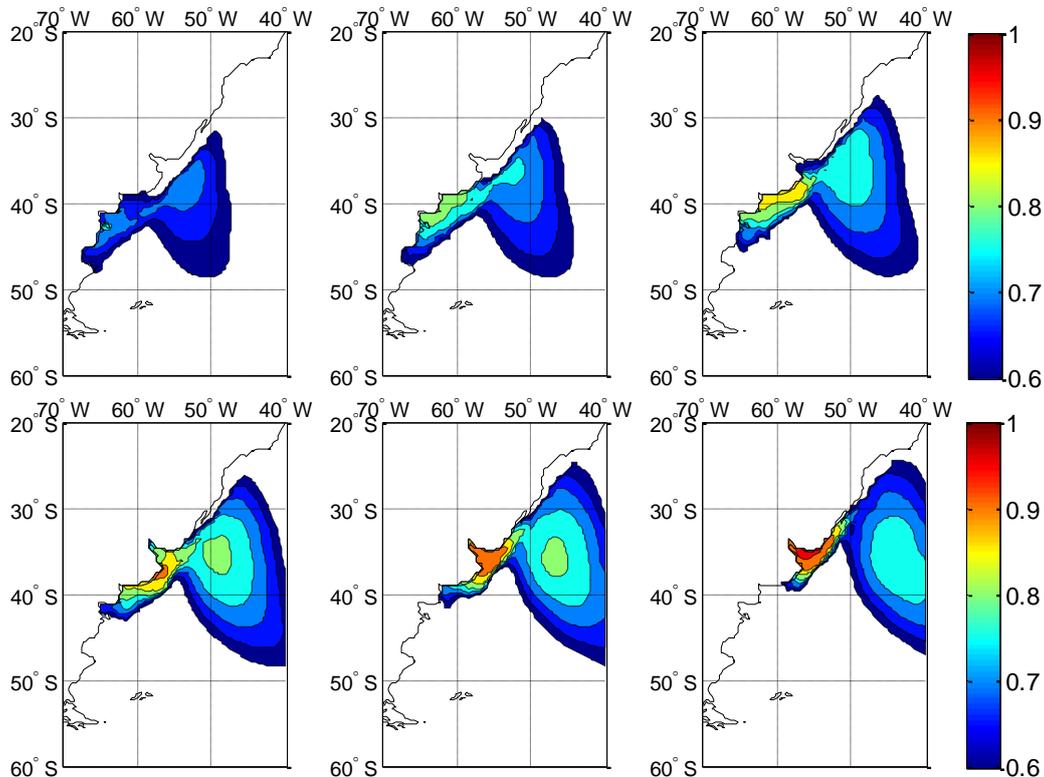
Se calcula la correlación lineal entre la serie de marea meteorológica en Montevideo y la serie de marea meteorológica DAC en cada uno de los puntos del dominio negro de la Figura 2-11. La correlación se calcula para desfases entre 0 y 30 horas, tomados cada 6 horas (paso temporal de los datos DAC).

En la Figura 6-11 se presenta los resultados obtenidos usando todos los datos de marea meteorológica. En este caso no se obtienen correlaciones mayores a 0,6 para desfase 30 horas. Para el resto de los desfases analizados sí se obtienen regiones de correlación mayor a 0,6, siempre dentro de la plataforma continental. Se alcanza, para desfase de 6 horas, correlaciones máximas de aproximadamente 0,8. La zona de máxima correlación se desplaza de S a N sobre la plataforma continental.



**Figura 6-11: Correlación lineal entre marea meteorológica de Montevideo y nivel de marea obtenido de DAC, para desfase entre 24 hrs. (arriba izq.) y 0 hrs. (abajo). Todos los datos.**

En la Figura 6-12 se presentan los resultados obtenidos al calcular la correlación únicamente para los instantes en que se tiene un evento de marea meteorológica alta o baja, estimados éstos con ventana móvil de 5 días según se describe en el apartado 6.2.3. En este caso se observa que las correlaciones obtenidas son más altas y que se alcanzan correlaciones mayores a 0,6 fuera de la plataforma continental. La máxima correlación alcanzada para desfase de 6 horas y 12 horas es de aproximadamente 0,9. Al igual que en el caso anterior se observa que la zona de máxima correlación se desplaza de S a N; en este caso sin embargo existen dos zonas de correlación claramente diferenciadas: por un lado se observa una zona de alta correlación en la plataforma continental, y por otro lado se observa una zona más extendida de alta correlación fuera de la plataforma, la cual se encuentra al NE de la zona anterior y presenta correlaciones más bajas.



**Figura 6-12: Correlación lineal Marea Meteorológica de Montevideo con campo DAC para desfase entre 30 hrs. (sup. izq) y cero (inf. der.). Solamente máximos y mínimos tomados con ventana móvil de 5 días (185 mínimos y 187 máximos; aprox. 12 máximos y 12 mínimos por año).**

Dadas las dimensiones, la ubicación y el movimiento relativo de estas dos zonas, las mismas se asocian a eventos de marea meteorológica generados por viento en la plataforma continental y a eventos de marea meteorológica generados por presión fuera de la plataforma continental. Estas observaciones se confirman más adelante, al calcular la correlación entre el nivel de marea meteorológica en Montevideo y la presión de superficie y el viento.

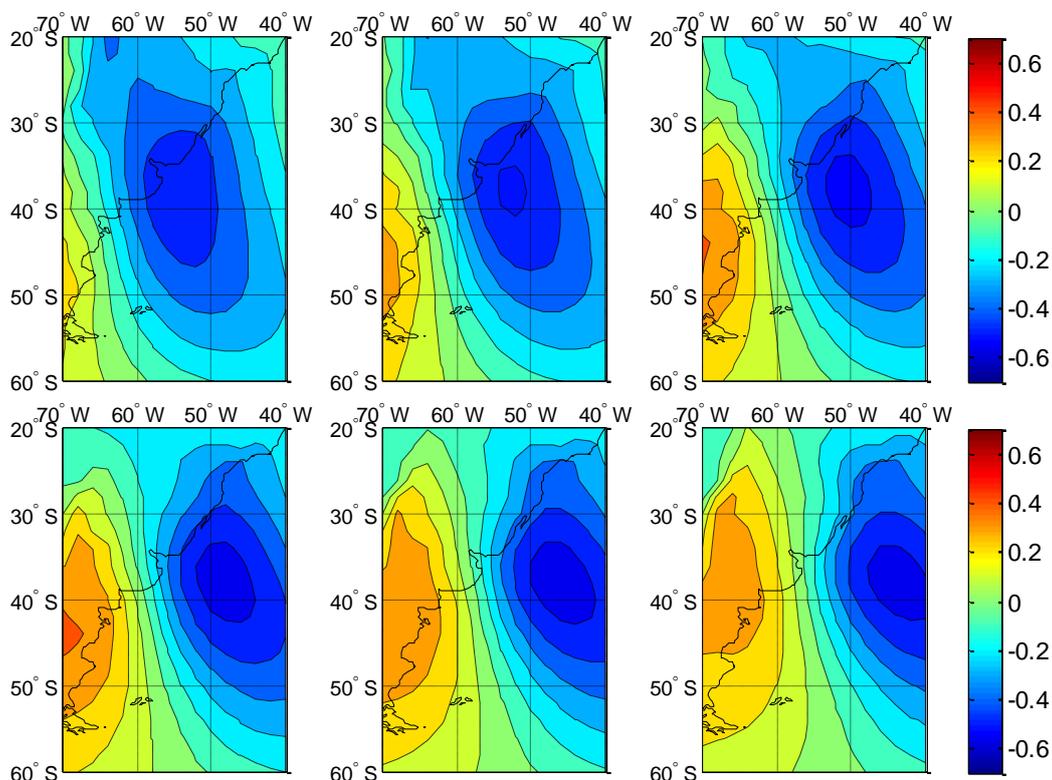
#### **b) Marea meteorológica en Montevideo y campos de presiones**

Se calcula la correlación lineal entre las series temporales de presión de superficie y marea meteorológica para cada uno de los nodos del dominio marcado en negro en la Figura 2.2, considerando desfases de entre 0 y 30 horas. El cálculo se hace por un lado considerando todos los datos y por otro considerando únicamente los instantes de marea máxima y mínima, estimados éstos con ventana móvil de 5 días.

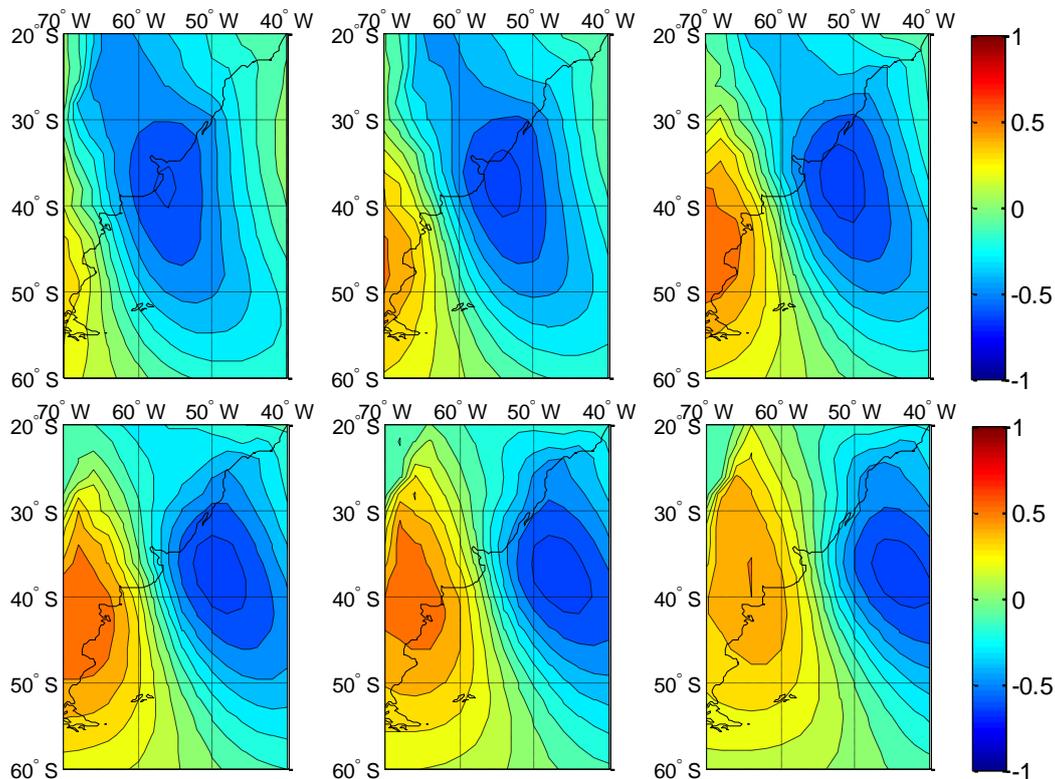
Las Figuras 6-13 y 6-14 presentan los campos de correlación obtenidos con toda la serie y con la serie de máximos y mínimos respectivamente. Ambos campos son muy similares,

aunque se obtienen correlaciones más altas utilizando únicamente los instantes de marea meteorológica máxima y mínima.

En la Figura 6-14 se observa además que las mareas meteorológicas altas (bajas) en Montevideo están asociadas a un sistema de baja (alta) presión localizado sobre el Río de la Plata unas 30 horas antes de que ocurra el máximo (mínimo) de la marea meteorológica, el cual se traslada aproximadamente  $10^\circ$  en dirección E en las siguientes 30 horas, seguido por un sistema de alta (baja) presión que, ubicado 24 horas antes del máximo (mínimo) en la zona sur de Argentina, se traslada en dirección NE hasta ubicarse en la provincia de Buenos Aires al momento del máximo (mínimo) de la marea meteorológica.



**Figura 6-13: Correlación lineal Marea Meteorológica MVD con campo MSLP para desfase entre 30 hrs. (sup. izq) y cero (inf. der.), con paso cada 6 hrs. Todos los datos.**



**Figura 6-14: Correlación lineal Marea Meteorológica MVD con campo MSLP para desfase entre 30 hrs. (sup. izq) y cero (inf. der.), con paso cada 6 hrs. Solamente niveles máximos y mínimos obtenidos con ventana de 5 días.**

Al momento de ocurrir el máximo (mínimo) de la marea meteorológica los puntos de máxima correlación lineal con la presión de superficie se ubican a una misma latitud (aproximadamente 38°S) y en longitudes aproximadas 44°W y 64°W.

**Tabla 6-1: Correlaciones lineales máximas y mínimas entre la presión de superficie en la región negra de la Figura 2-11 y la marea meteorológica en Montevideo.**

Desfase Datos	0	6	12	18	24	30
<b>Todos</b>	0,36	0,38	0,42	0,41	0,35	0,26
	-0,55	-	-	-	-	-
<b>Max/Min</b>	0,50	0,55	0,58	0,58	0,52	0,39
	-0,65	0,66	0,65	0,64	0,63	0,61

### c) Marea meteorológica en Montevideo y campos de viento

Se calcula la correlación lineal entre las series temporales de viento y la marea meteorológica de Montevideo para cada uno de los nodos del dominio señalado en rojo en la Figura 2-11, considerando desfases de entre 0 y 30 horas.

Dado un nodo  $j$  y un desfase  $l$ , se define el vector correlación lineal  $(\rho_{j,l}, \theta_{j,l})$  entre el viento y la marea meteorológica como:

$$\rho_{j,l} = \max_{\theta} \{\rho(\eta_{met}, W_{j,l,\theta})\}$$

$$\theta_{j,l} = \operatorname{argmax}_{\theta} \{\rho(\eta_{met}, W_{j,l,\theta})\}$$

en donde  $\eta_{met}$  es el nivel de marea meteorológica en Montevideo,  $W_{j,l,\theta}$  es la componente del viento en dirección  $\theta$  en el nodo  $j$  y con desfase  $l$ , y  $\rho(x, y)$  es la correlación lineal entre las series  $x$  e  $y$ .

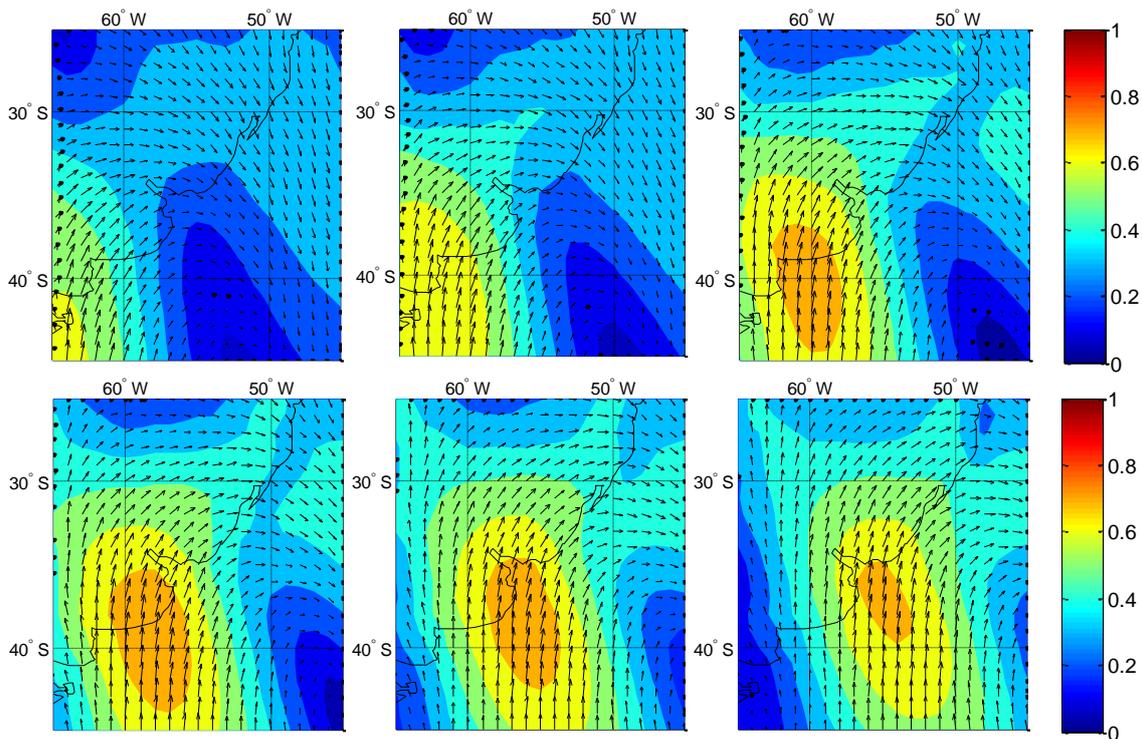
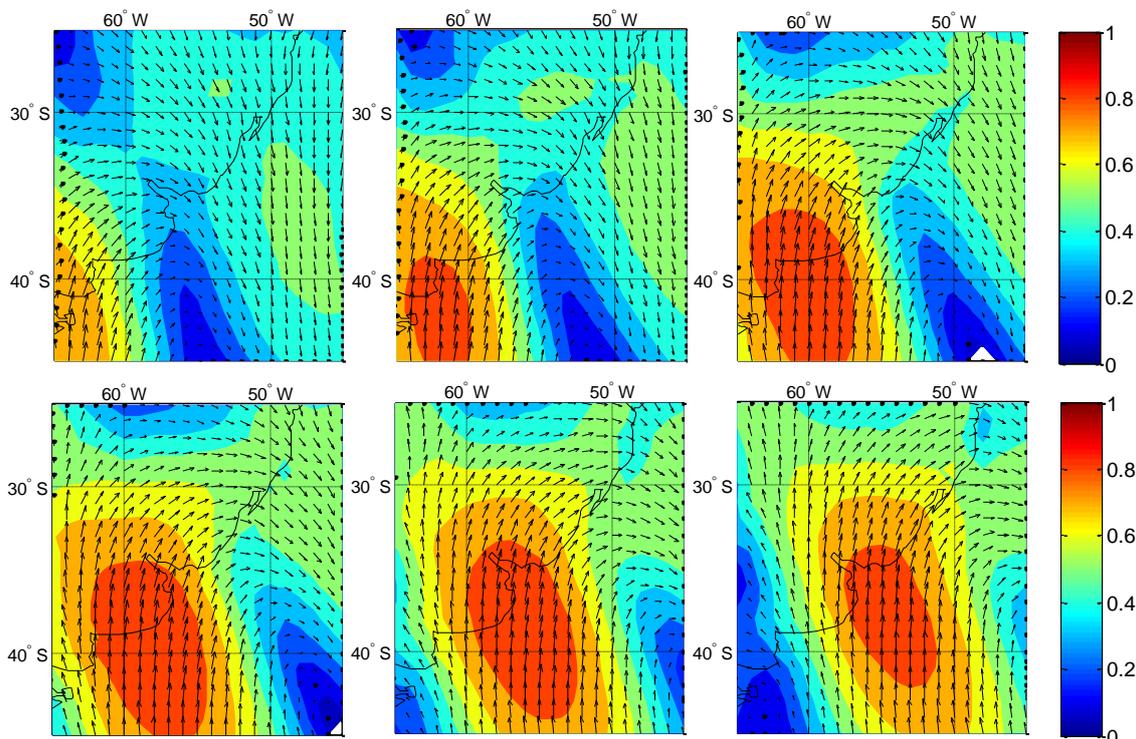


Figura 6-15: Correlación lineal Marea Meteorológica MVD con campo de viento a 10 m para desfase entre 30 hrs. (sup. izq) y cero (inf. der.), con paso cada 6 hrs. Todos los datos.



**Figura 6-16: Correlación lineal Marea Meteorológica-MVD con campo de viento a 10 m para desfase entre 30 hrs. (sup. izq) y cero (inf. der.), con paso cada 6 hrs. Solamente máximos y mínimos obtenidos con ventana de 5 días.**

Las Figuras 6-15 y 6-16 presentan los resultados obtenidos al estimar el vector correlación lineal considerando todos los datos de nivel (Fig. 6-15) y únicamente los máximos y mínimos obtenidos con ventana móvil de 5 días (Fig. 6-16).

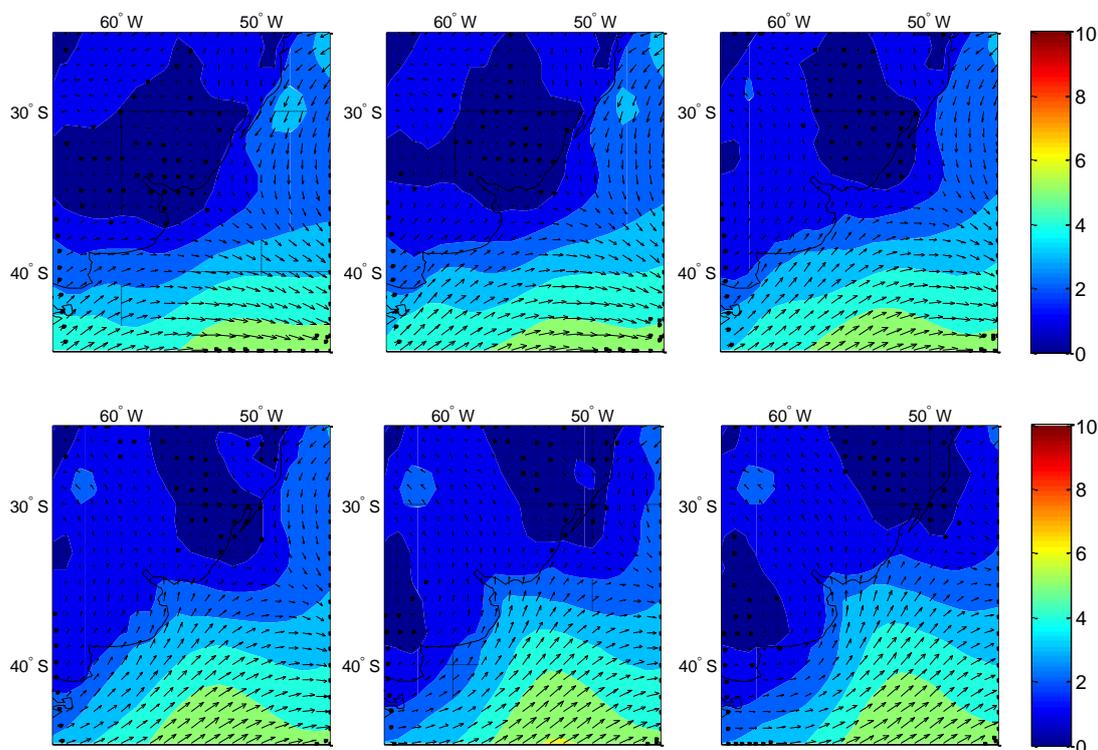
Para todos los datos se obtienen correlaciones lineales máximas de 0,72 con desfase 0 y 0,77 con desfase 6 y 12 horas.

Para los máximos y mínimos se obtienen correlaciones lineales máximas de 0,86 para desfase 0 y 0,89 y 0,88 para 6 y 12 horas respectivamente.

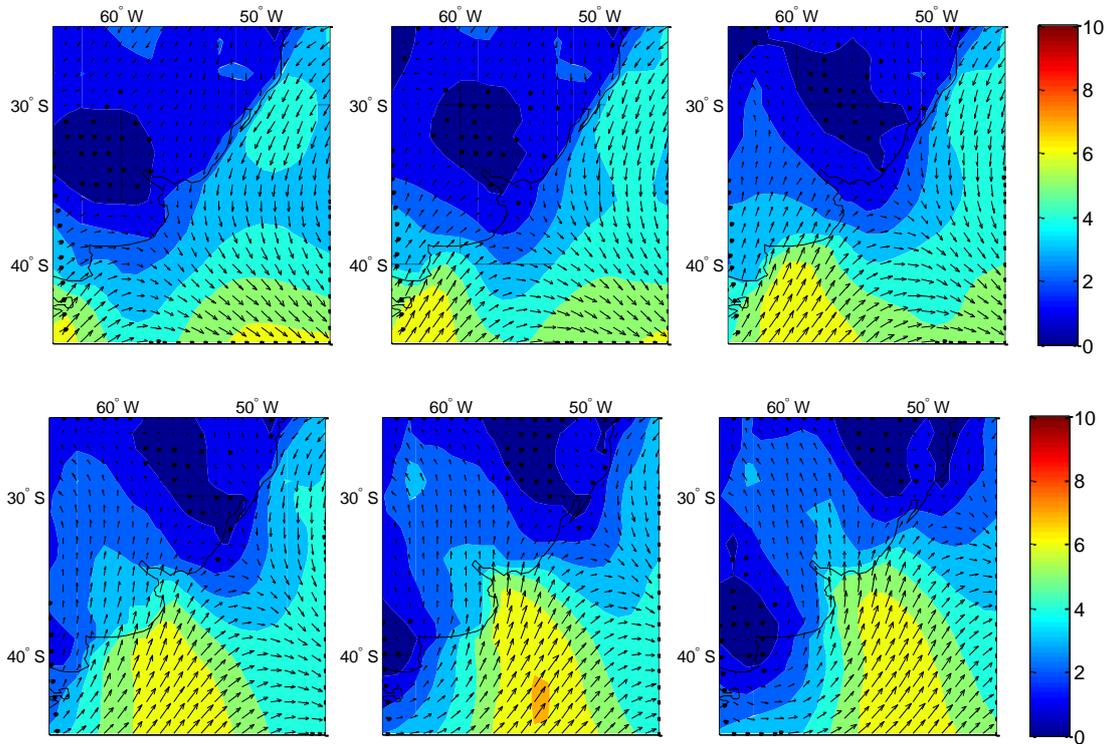
**Tabla 6-2: Correlaciones lineales máximas entre el viento a 10 m en la región roja de la Figura 2-11 y la marea meteorológica en Montevideo.**

Desfase Datos	0	6	12	18	24	30
Todos	0,72	0,77	0,77	0,74	0,69	0,62
Max/Min	0,86	0,89	0,88	0,87	0,84	0,78

Las Figuras 6-17 y 6-18 presentan los campos de viento compuestos con todos los instantes de nivel de marea meteorológica mayor al nivel medio (Fig. 4.7) y con todos los instantes de marea meteorológica máxima (Fig. 4.8), considerando desfases entre 0 y 30 horas.



**Figura 6-17: Campo compuesto de vientos a 10 m correspondientes a todos los instantes con marea meteorológica mayor a la media. Desfase entre 30 hrs. (sup. izq) y cero (inf. der.), con paso cada 6 hrs. Velocidades en m/s.**



**Figura 6-18: Campo compuesto de vientos a 10 m correspondientes a las mareas meteorológicas máximas obtenidas con ventana móvil de 5 días. Desfase entre 30 hrs. (sup. izq) y cero (inf. der.), con paso cada 6 hrs. Velocidades en m/s.**

### 6.3.2 Elaboración de índice asociado a extremos de marea en Montevideo en base al campo de vientos

Se construye el índice  $IDMM$  proyectando los campos instantáneos de viento sobre los campos de correlación de la Figura 6-16 El índice se calcula como

$$IDMM = \frac{1}{N_p} (C'W)$$

en donde  $N_p$  es el número de nodos de viento en el dominio rojo de la Figura 2-11,  $C'$  es la matriz de correlaciones sobre la que se proyectan los campos de viento y  $W$  es la matriz con la serie temporal de campos de viento, siendo

$$C = \begin{bmatrix} C_0 \\ \vdots \\ C_l \\ \vdots \\ C_L \end{bmatrix}; C_l = \begin{bmatrix} \rho_{l,1} \cos(\theta_{l,1}) \\ \vdots \\ \rho_{l,j} \cos(\theta_{l,j}) \\ \vdots \\ \rho_{l,N_P} \cos(\theta_{l,N_P}) \\ \rho_{l,1} \text{sen}(\theta_{l,1}) \\ \vdots \\ \rho_{l,j} \text{sen}(\theta_{l,j}) \\ \vdots \\ \rho_{l,N_P} \text{sen}(\theta_{l,N_P}) \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} W_{0,1} & \dots & W_{0,N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{L,1} & \dots & W_{L,N_T} \end{bmatrix}; W_{l,t} = \begin{bmatrix} U_{t-l,1} \\ \vdots \\ U_{t-l,j} \\ \vdots \\ U_{t-l,N_P} \\ V_{t-l,1} \\ \vdots \\ V_{t-l,j} \\ \vdots \\ V_{t-l,N_P} \end{bmatrix}$$

donde  $l = 0, \dots, L$  son los desfases temporales considerados (en este caso  $L = 5$  correspondiente a 30 horas de desfase),  $t = 1, \dots, N_T$  son los instantes de tiempo (en este caso el paso temporal es 6 horas),  $j = 1, \dots, N_P$  son los nodos del dominio,  $\rho_{j,l}$  es la correlación lineal entre la componente del viento de dirección  $\theta_{l,j}$  en el nodo  $j$  y la marea meteorológica en Montevideo, considerando desfase temporal  $l$ . Los valores  $\rho_{j,l}$  y  $\theta_{l,j}$  son los de máxima correlación lineal calculados en 4.1.3 y graficados en la Figura 4.6.

La Figura 6-19 presenta los valores del índice contra los valores simultáneos de la marea meteorológica, considerando todos los datos (puntos azules) y considerando únicamente los instantes de máxima y mínima marea meteorológica (puntos rojos). El coeficiente de correlación lineal entre el índice y la marea meteorológica es 0,81. El coeficiente de correlación teniendo en cuenta únicamente los máximos y mínimos de marea es 0,89.

La Figura 6-20 presenta, a modo de ejemplo, un tramo de las series temporales del índice y de la marea meteorológica, señalando con círculos los valores máximos y mínimos identificados, para cada serie, con ventana móvil de 5 días. Se observa que en general los máximos y mínimos de la marea meteorológica se pueden asociar a máximos y mínimos del índice. Sin embargo no siempre los instantes de máximo y mínimo de las dos series son coincidentes.

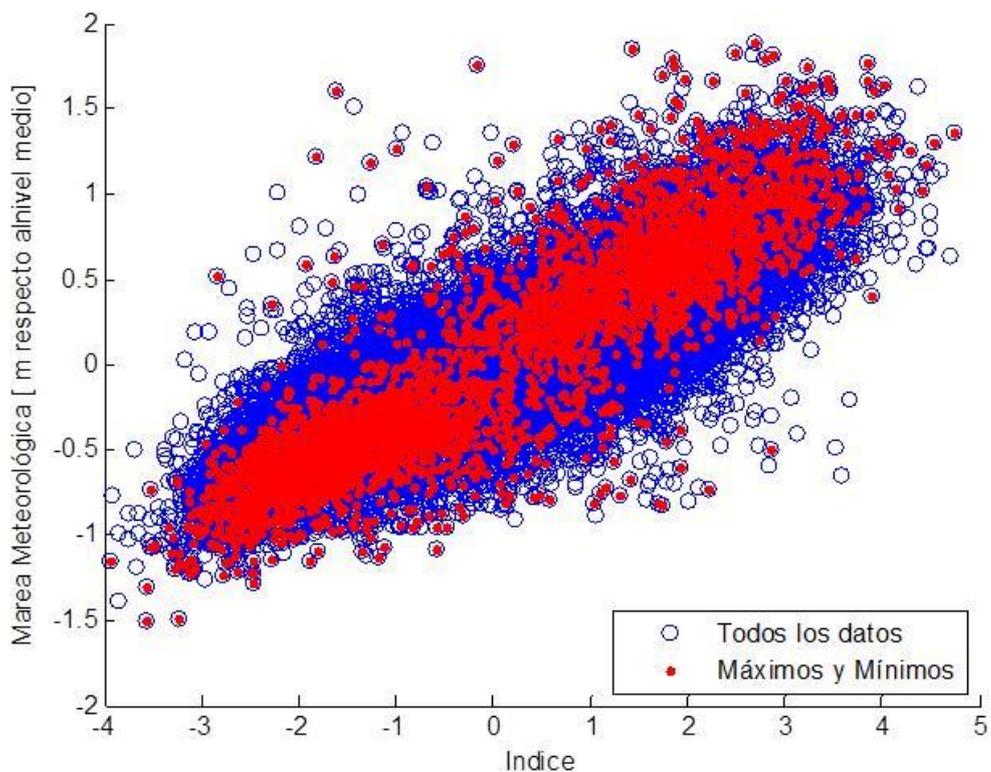


Figura 6-19: Valores del índice contra valores de marea meteorológica en Montevideo.

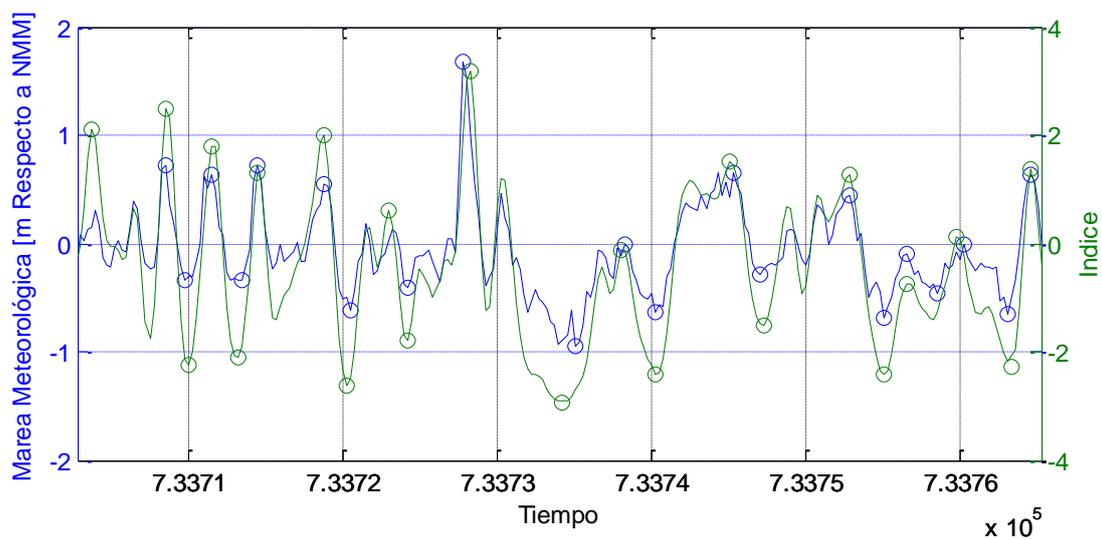
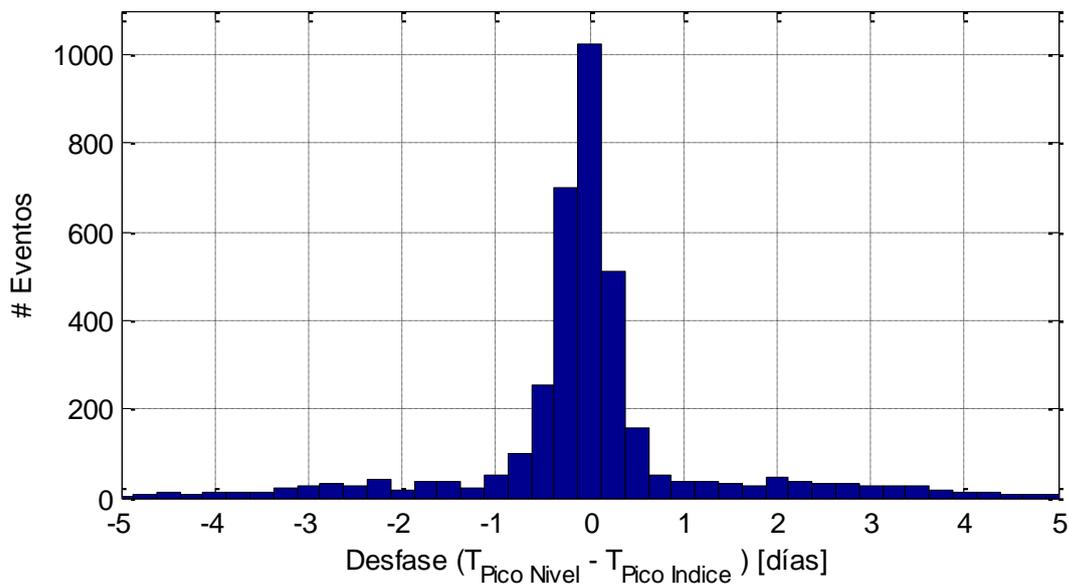
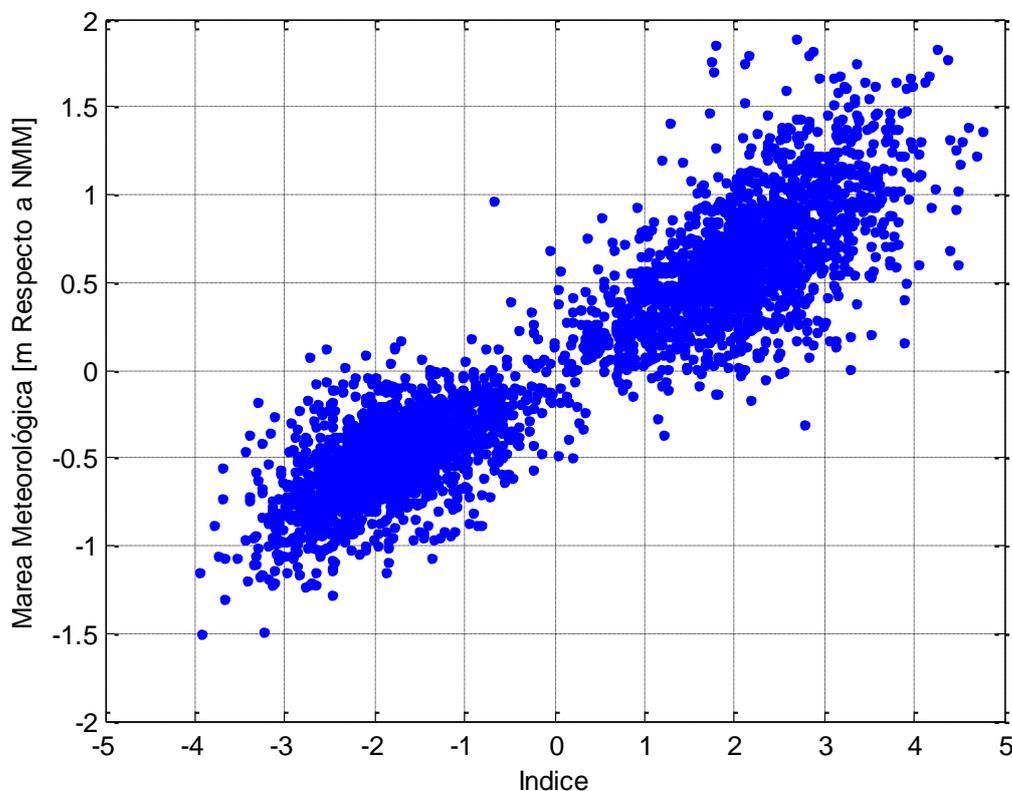


Figura 6-20: Ejemplo de la serie temporal de marea meteorológica y del índice.

La Figura 6-21 presenta el histograma de desfases temporales entre los máximos y mínimos de la serie de marea meteorológica y los máximos y mínimos más cercanos de la serie del índice. Se observa que la mayoría de los casos el desfase es +/- 12 horas. La Figura 6-22 presenta el gráfico de los máximos y mínimos de marea meteorológica y los máximos y mínimos del índice más cercanos. Se observa que existen dos grupos de valores, correspondientes a los máximos (tanto la marea como el índice son mayores a cero) y a los mínimos (marea e índice menores a cero). La correlación lineal entre los dos conjuntos de datos es 0,93.

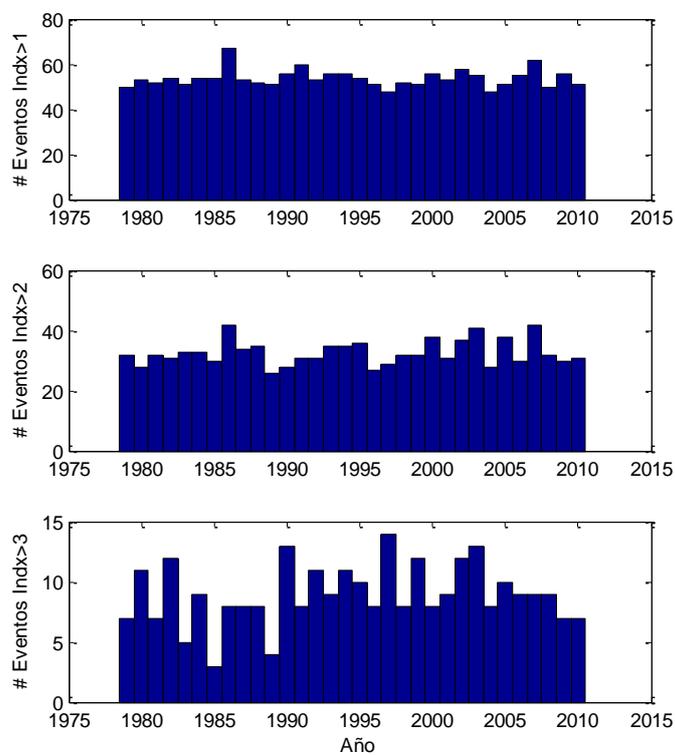


**Figura 6-21: Histograma de desfase entre los picos (máximos y mínimos) de marea meteorológica y los del índice. Para ambas series se utiliza una ventana de 5 días para identificar los picos.**

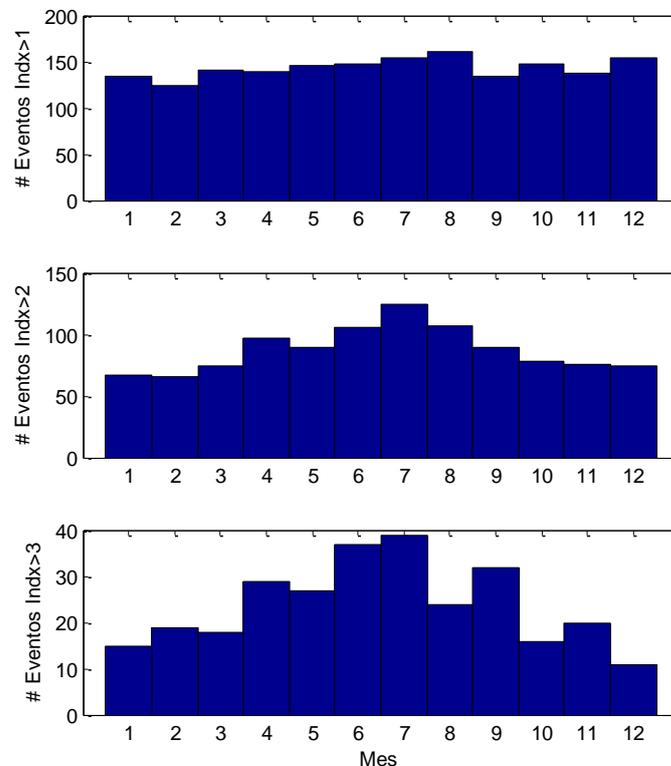


**Figura 6-22: Valores máximos y mínimos de la marea meteorológica graficados contra los valores máximos y mínimos del índice más cercanos. Para ambas series se utiliza una ventana de 5 días para identificar los picos.**

Por último, las Figuras 6-23 y 6-24 presentan el número de eventos máximos del índice por año y por mes que exceden los umbrales 1, 2 y 3.



**Figura 6-23: Número de eventos máximos por año del índice por encima de los umbrales 1 (arriba), 2 (medio) y 3 (abajo).**



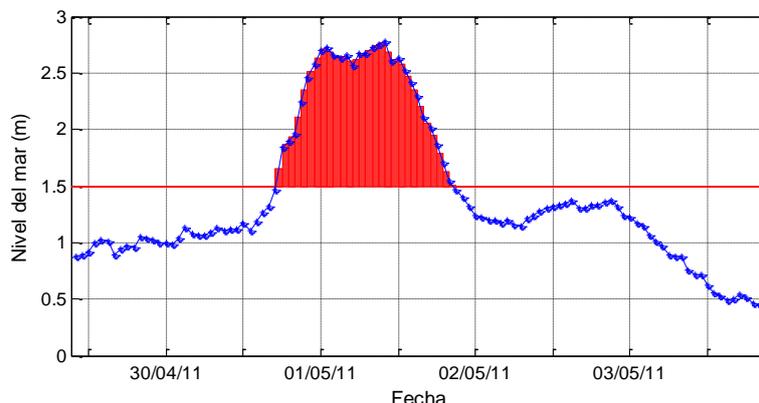
**Figura 6-24: Número de eventos máximos por mes del índice por encima de los umbrales 1 (arriba), 2 (medio) y 3 (abajo). El número de eventos es el total entre 1979 y 2010.**

## 6.4 Nivel de marea y precipitación en Montevideo

### 6.4.1 Precipitación asociada a eventos extraordinarios de marea en Montevideo

Con el objetivo de analizar la ocurrencia conjunta de eventos de marea y eventos de precipitación en Montevideo, se identificó, para cada evento de marea definido en la sección 6.2.3, la precipitación simultánea registrada en el pluviómetro Prado durante el período 1981-2001. Se obtuvo que para el 86% del total de eventos de marea (339) comprendidos en el período 1981-2001, se registró precipitación en el pluviómetro Prado.

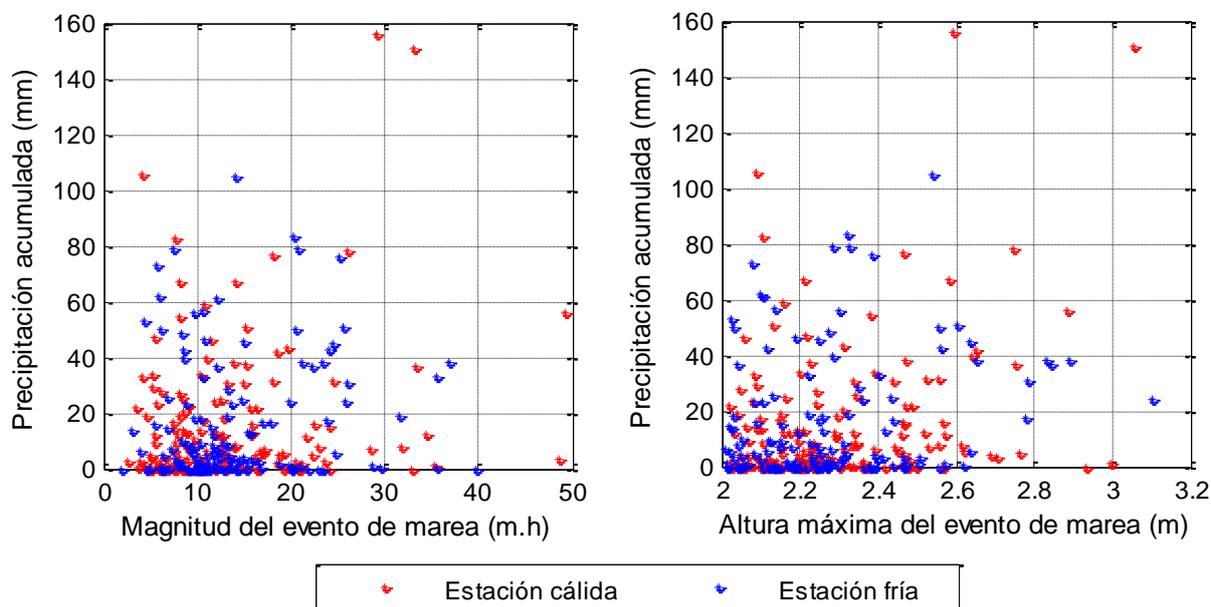
Se define la magnitud de cada evento de marea como el área por encima del umbral de 1.5 m, intentando capturar tanto la intensidad como la duración del evento (ver Figura 6-25).



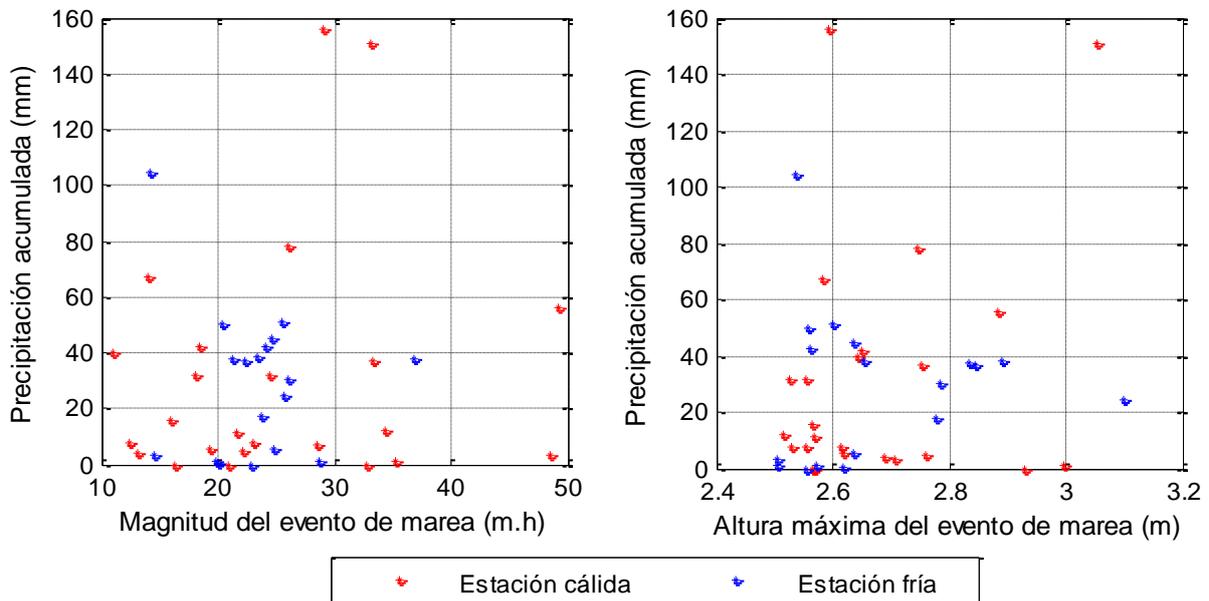
**Figura 6-25: Definición de magnitud de un evento de marea.**

En la Figura 6-26 se presenta, para dichos eventos, la precipitación registrada dentro de las 48 hs previas a la fecha de máximo nivel del mar del evento de marea en función de la magnitud del evento de marea y de la altura máxima alcanzada por el mismo, diferenciándose por color según la época del año en la que ocurrieron.

Luego, en la Figura 6-27 se presentan las mismas gráficas pero para una selección de eventos de marea más extremos, cuya altura máxima alcanzada supera los 2.5 m. En este caso se obtuvo un total de 46 eventos de marea comprendidos en el período 1981-2001, de los cuales para 42 eventos (91%) se registró precipitación simultánea mayor a cero.



**Figura 6-26: Precipitación acumulada (48 hs previas al máximo de marea) vs magnitud y altura máxima de los eventos de marea en el período 1981-2011**



**Figura 6-27: Precipitación acumulada (48 hs previas al máximo de marea) vs magnitud y altura máxima de los eventos de marea con altura máxima superior a 2.5 m en el período 1981-2011**

Se observa una gran dispersión en todos los casos, obteniéndose los mayores coeficientes de correlación durante los meses de verano (Tabla 6-3). Si bien se distingue que los dos eventos de mayor precipitación ocurren en la estación cálida y los dos de mayor magnitud en la estación fría, no hay una clara separación por estación entre los eventos en ninguna de las dimensiones: precipitación, altura máxima, magnitud.

**Tabla 6-3: Correlación estacional entre la magnitud/altura máxima de los eventos de marea y la precipitación acumulada las 48 hs previas al máximo de marea**

Todos los eventos

Parámetro	Dic-Feb (83)	Mar-May (80)	Jun-Ago (52)	Set-Nov (76)
Magnitud	0.336	0.075	0.038	0.157
Altura máxima	0.335	0.143	0.156	0.302

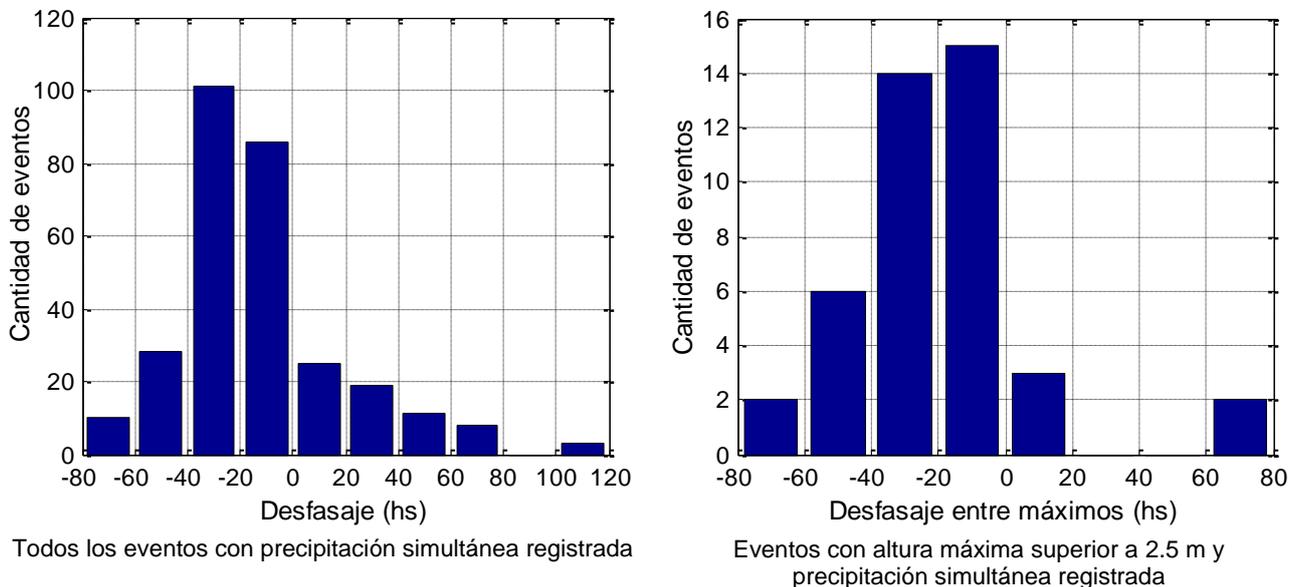
Eventos con altura máxima superior a 2.5 m

Parámetro	Dic-Feb (10)	Mar-May (14)	Jun-Ago (8)	Set-Nov (10)
Magnitud	0.490	-0.132	0.069	0.002
Altura máxima	0.339	-0.055	0.207	0.455

*Nota: Entre paréntesis se indica la cantidad de eventos en cada estación.*

Para cada evento de marea con registro de precipitación simultánea mayor a cero, se determinó el desfase entre el evento de marea y el evento de precipitación, como la diferencia (en horas) entre la fecha en que se da el máximo registro de precipitación y la hora en que se da el máximo nivel del mar. En la figura siguiente se presenta la distribución

del desfase, para ambos grupos de eventos. Se observa que en la mayoría de los casos, el evento de precipitación ocurre entre 0 y 60 hs antes que el evento de marea.



**Figura 6-28: Distribución del desfase (hs) entre los eventos de precipitación y los eventos de marea, valores negativos indican que la precipitación antecede al pico de marea.**

#### 6.4.2 Análisis de selección de eventos extremos de precipitación y marea en Montevideo

Con el fin de obtener una visualización detallada de algunos eventos más extremos, se realizó una selección aún más reducida definida por los eventos que cumplen con alguna de las siguientes condiciones:

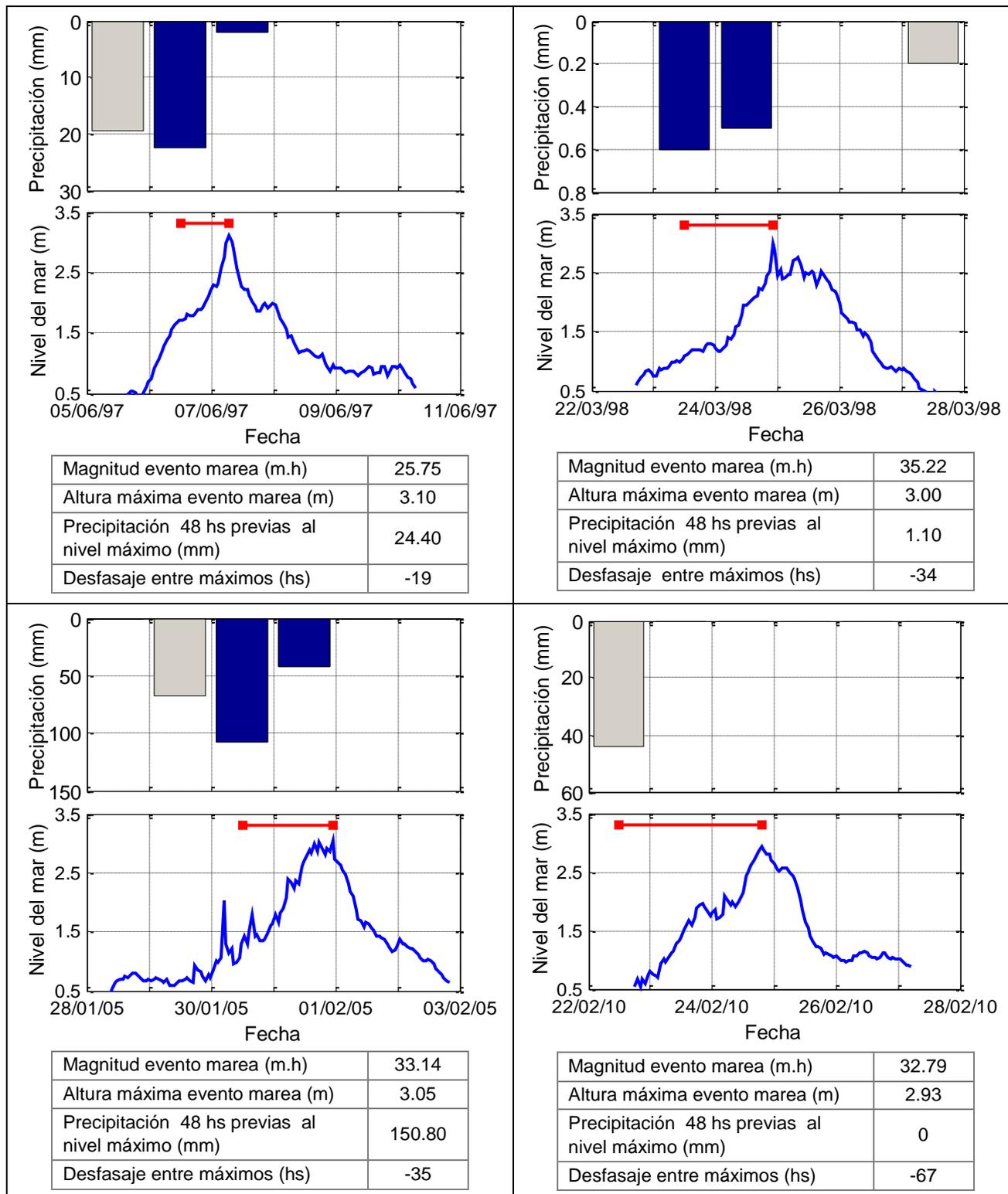
- Altura máxima mayor a 2.9 m.
- Magnitud mayor a 40 m.h.
- Precipitación registrada (durante las 48 hs previas a la hora de máximo nivel de marea) mayor a 100 mm.

En las figuras siguientes se presenta la evolución de dichos eventos de marea superpuesta con la evolución de precipitación diaria registrada en el pluviómetro Prado, así como los parámetros característicos de cada evento. Las barras azules indican la precipitación registrada durante las 48 hs previas al máximo nivel del evento de marea, mientras que las barras grises indican la precipitación registrada durante todo el evento de marea. La línea roja muestra el desfase calculado entre el evento de precipitación y el evento de marea.



**Tabla 6-4: Fecha de los nueve eventos seleccionados según criterio de selección**

<b>NivelMax &gt; 1,9 m</b>	<b>Magnitud &gt; 40 m.h</b>	<b>Precip 48 hrs &gt; 100 mm</b>
07/06/1997 (1)	27/03/1982 (5)	08/02/1993 (7)
24/03/1998 (2)	09/03/1987 (6)	20/04/1993 (8)
01/02/2005 (3)		17/10/1993 (9)
24/02/2010 (4)		01/02/2005 (10=3)



**Figura 6-29: Evolución de los eventos de marea con altura máxima mayor a 2.9 m. El evento del año 2005 también cumple con la condición de precipitación mayor a 100 mm.**

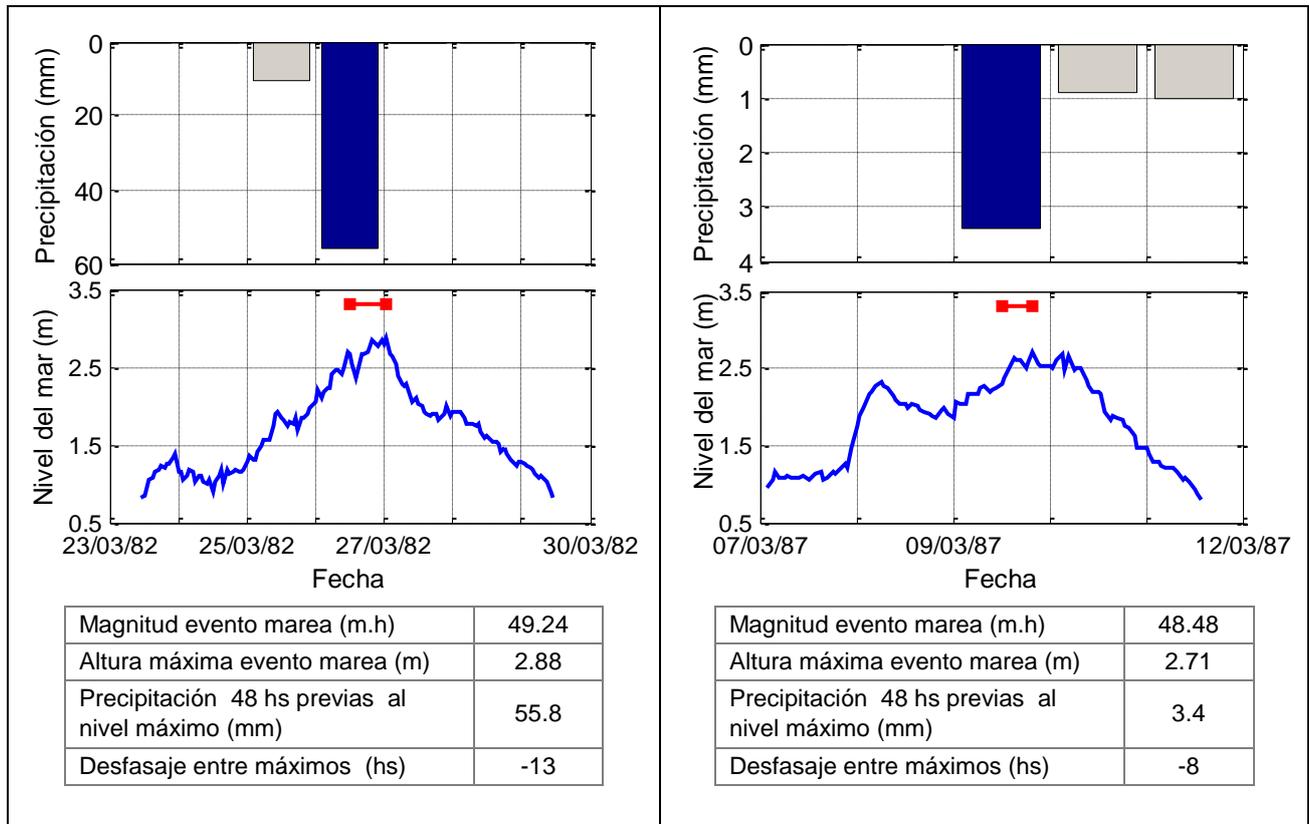


Figura 6-30: Evolución de los eventos de marea con magnitud mayor a 40 m.h.

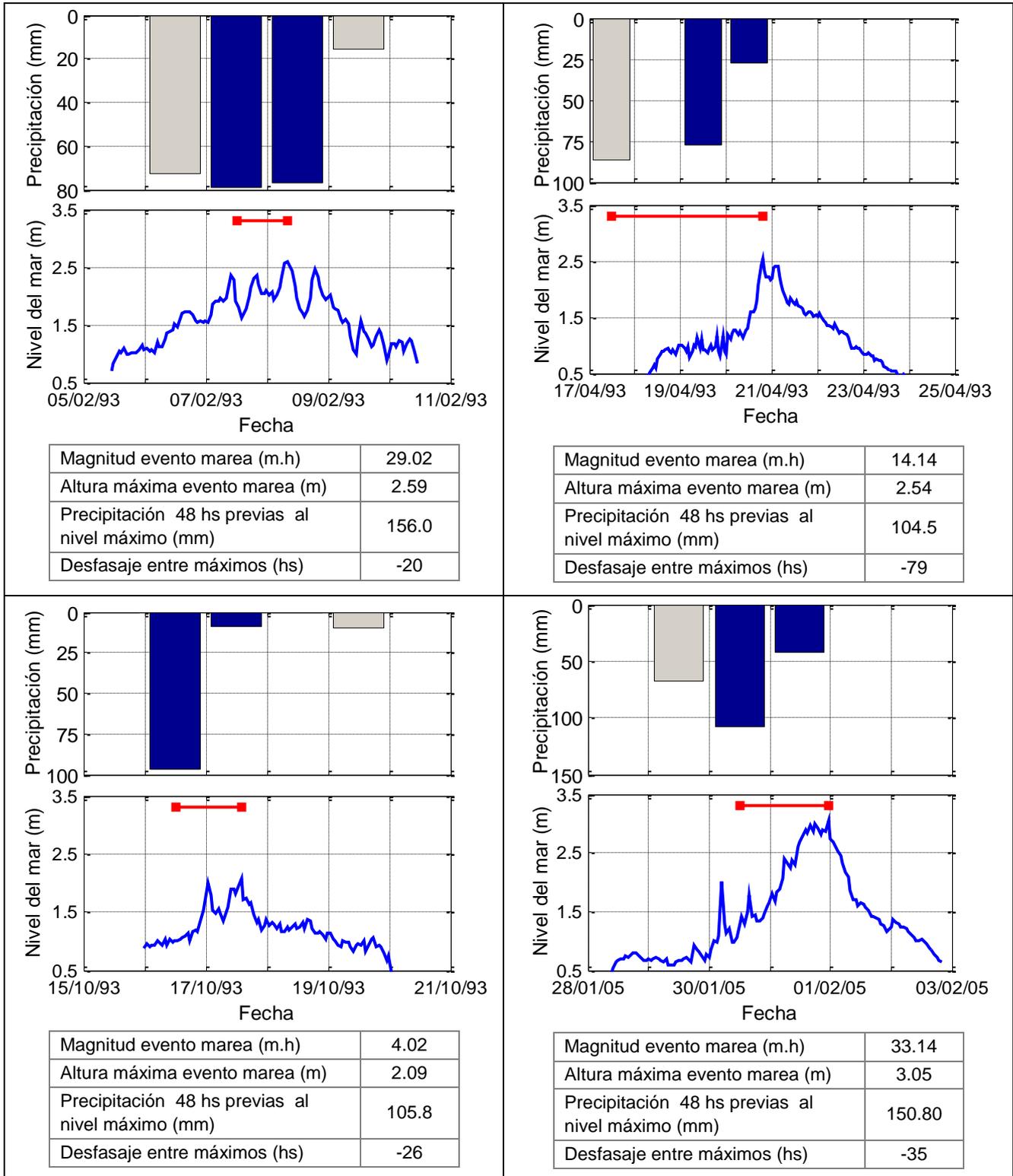


Figura 6-31: Evolución de los eventos de marea con precipitación (48 hs previas al máximo de marea) mayor a 100 mm



## **6.5 Patrones atmosféricos asociados a eventos extremos de marea en Montevideo**

### **6.5.1 Análisis de casos extremos seleccionados**

En las Figuras 6-32 a 6-40 se presenta, para cada uno de los nueve eventos seleccionados (ver Tabla 6-4), el campo de viento en el momento de marea meteorológica máxima (inferior derecha) y los campos con desfase hasta 30 horas (superior izquierda) tomados cada 6 horas.

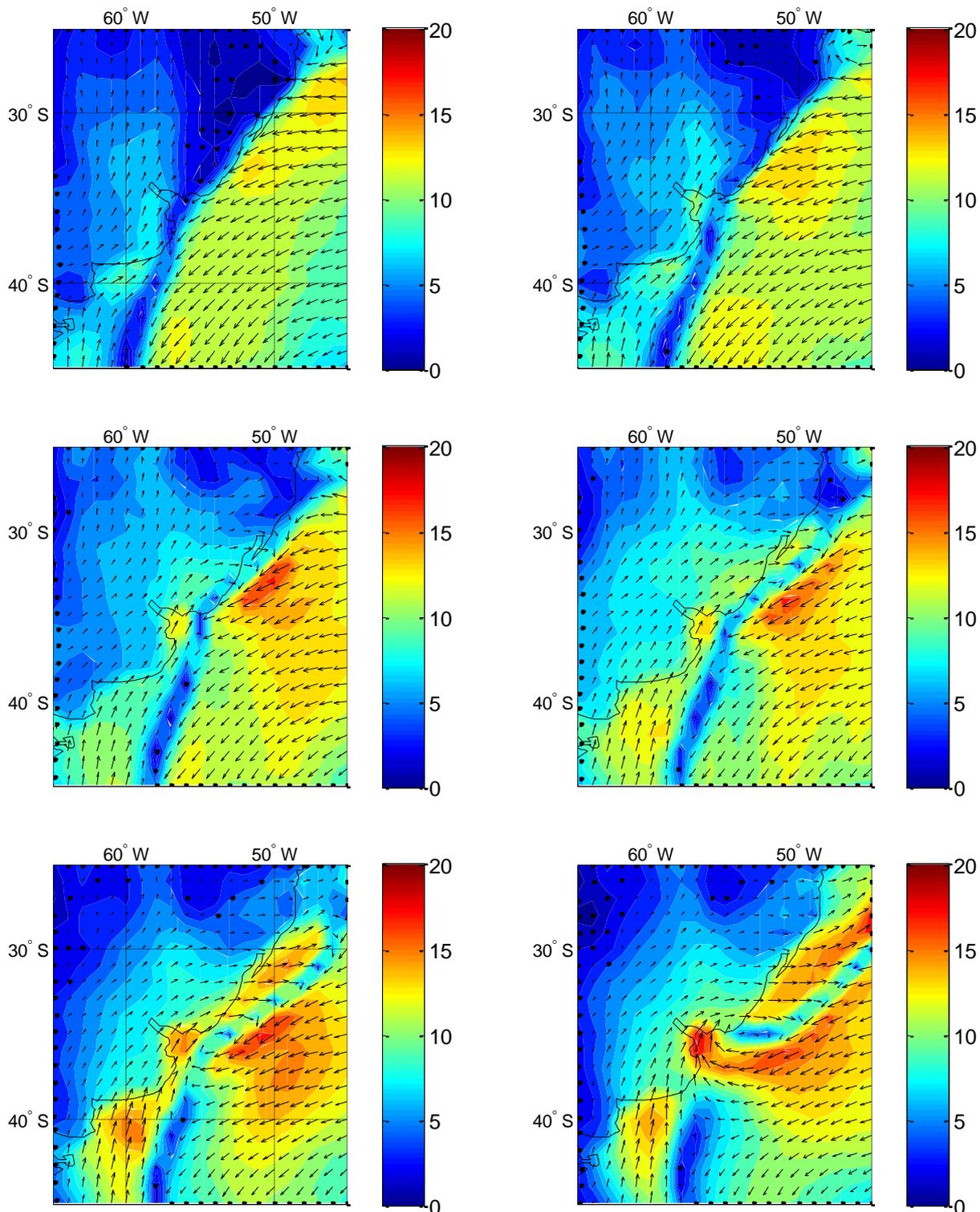


Figura 6-32: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento del 7/6/1997. (Máximo mayor a 2,9 m Wh). Intensidad en m/s indicado en barra de color.

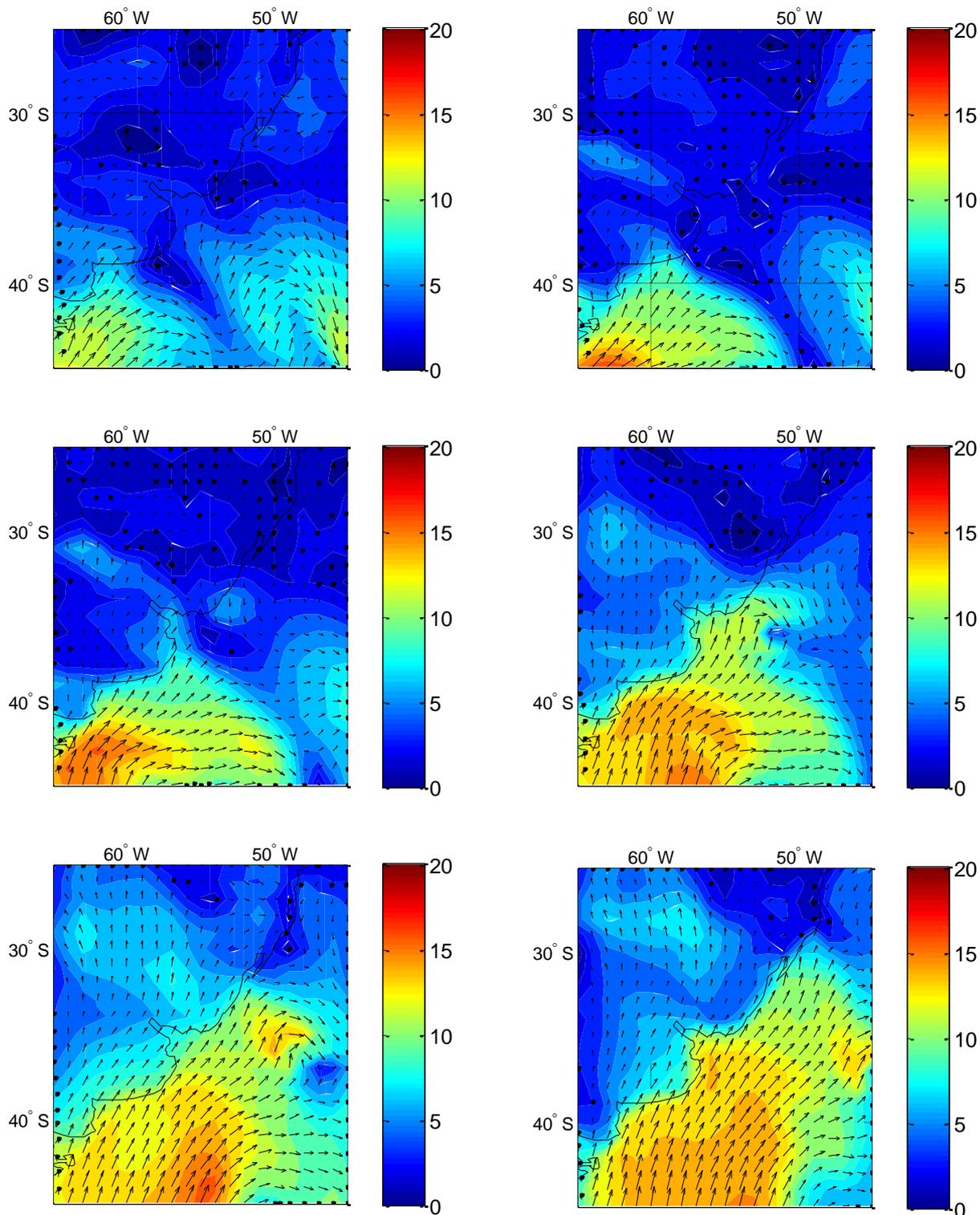
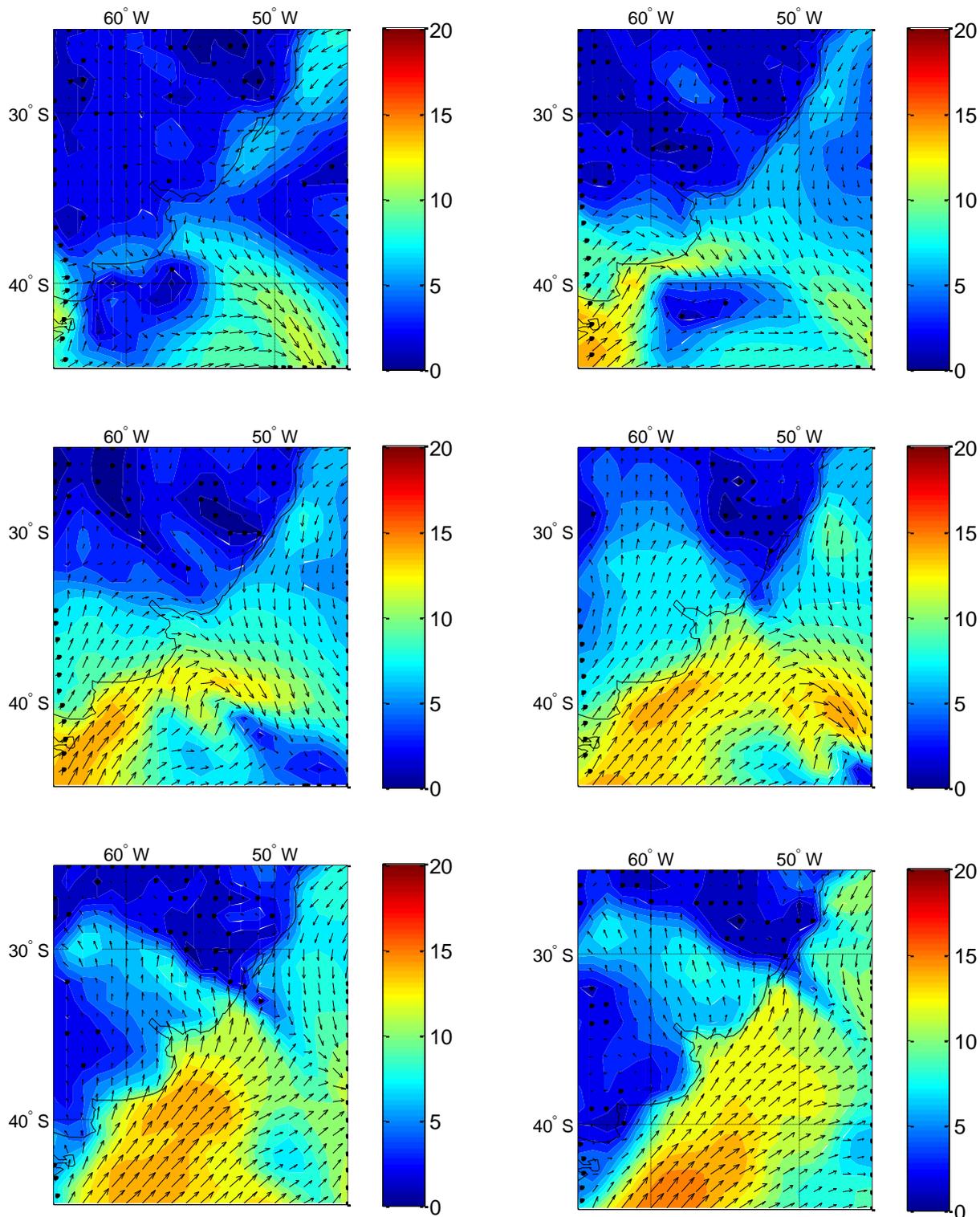


Figura 6-33: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento del 24/3/1998. (Máximo mayor a 2,9 m Wh). Intensidad en m/s indicado en barra de color.



**Figura 6-34: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento 01/02/2005. (Máximo mayor a 2,9 m Wh). Intensidad en m/s indicado en barra de color.**

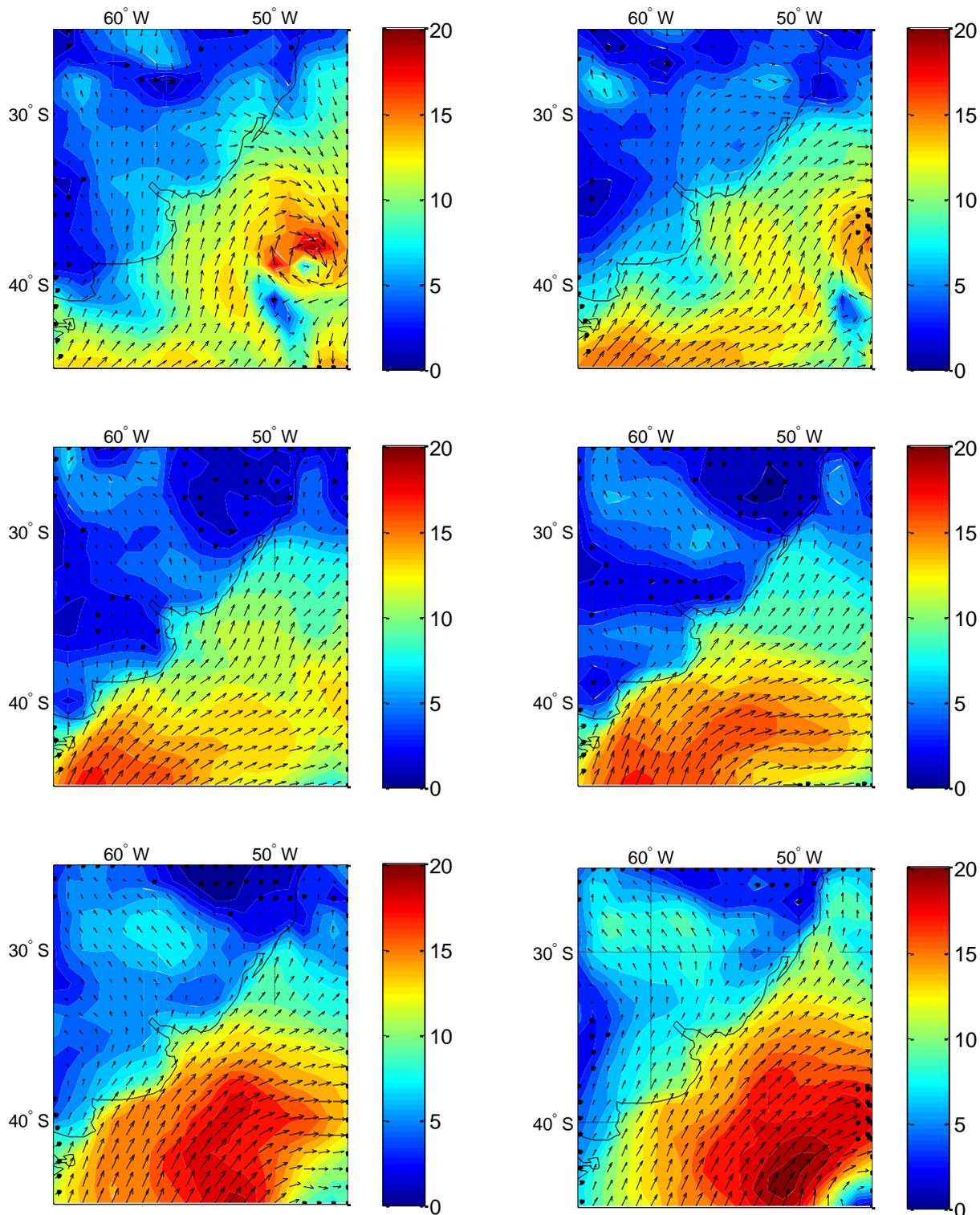
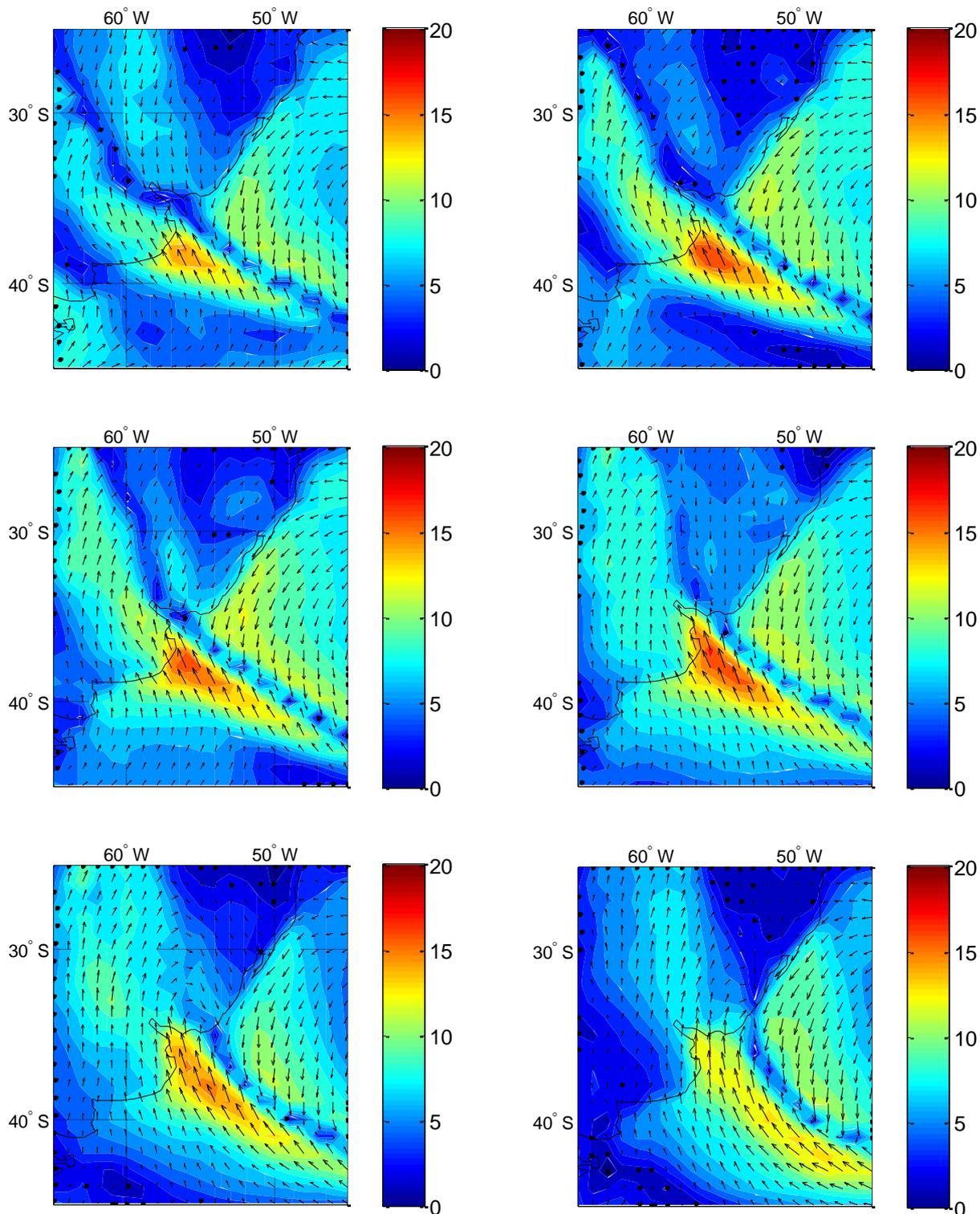
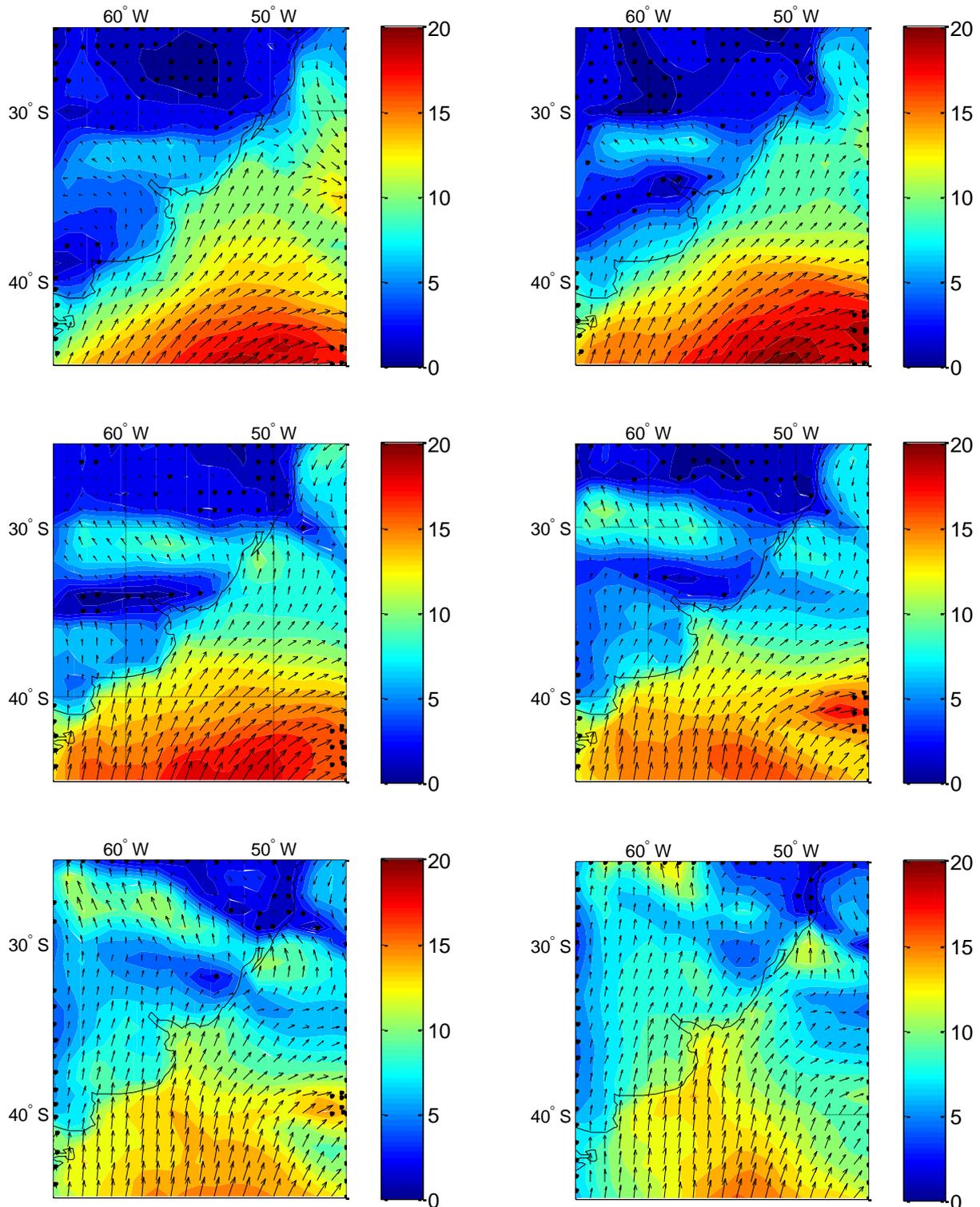


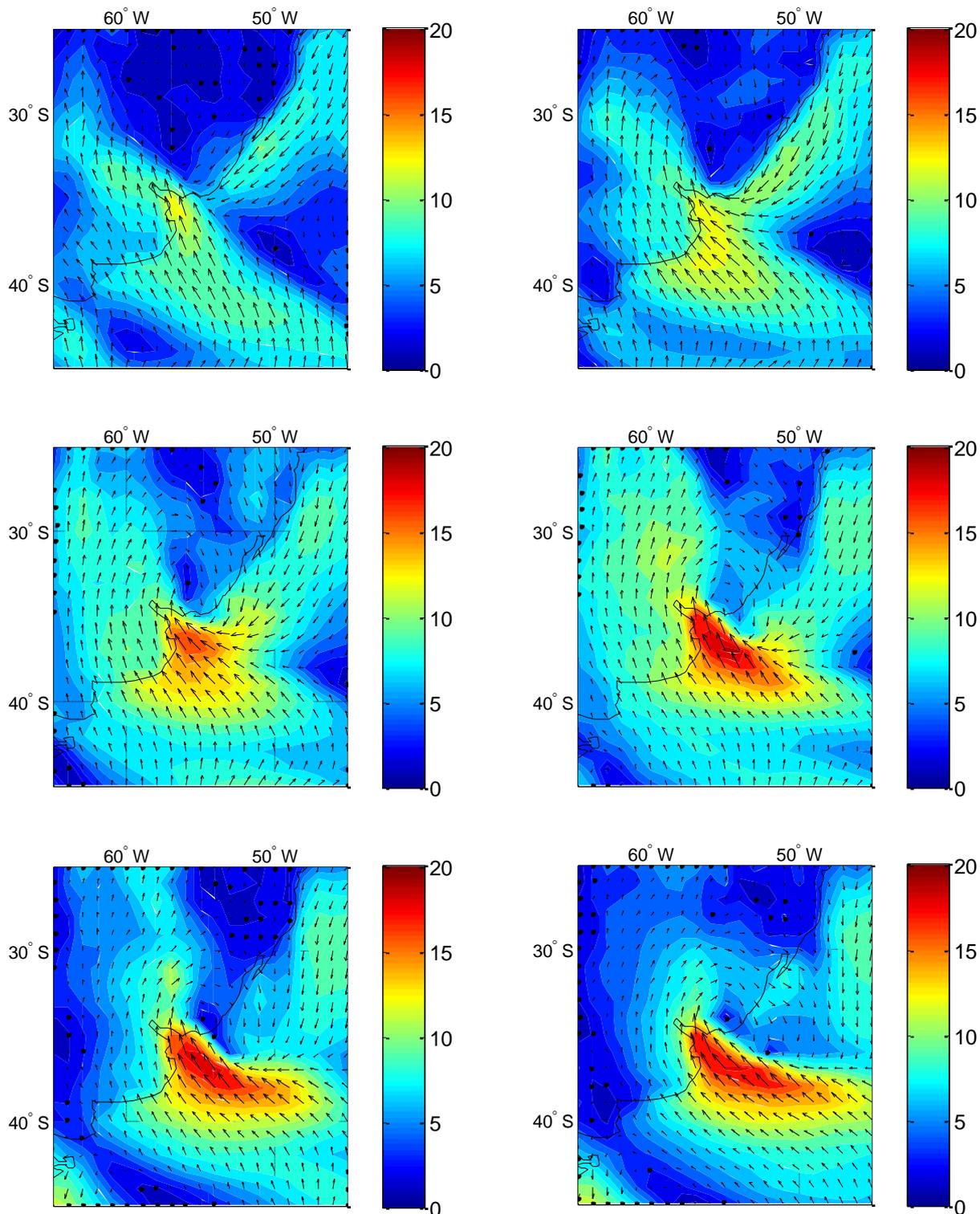
Figura 6-35: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento del 24/2/2010. (Máximo mayor a 2,9 m Wh). Intensidad en m/s indicado en barra de color.



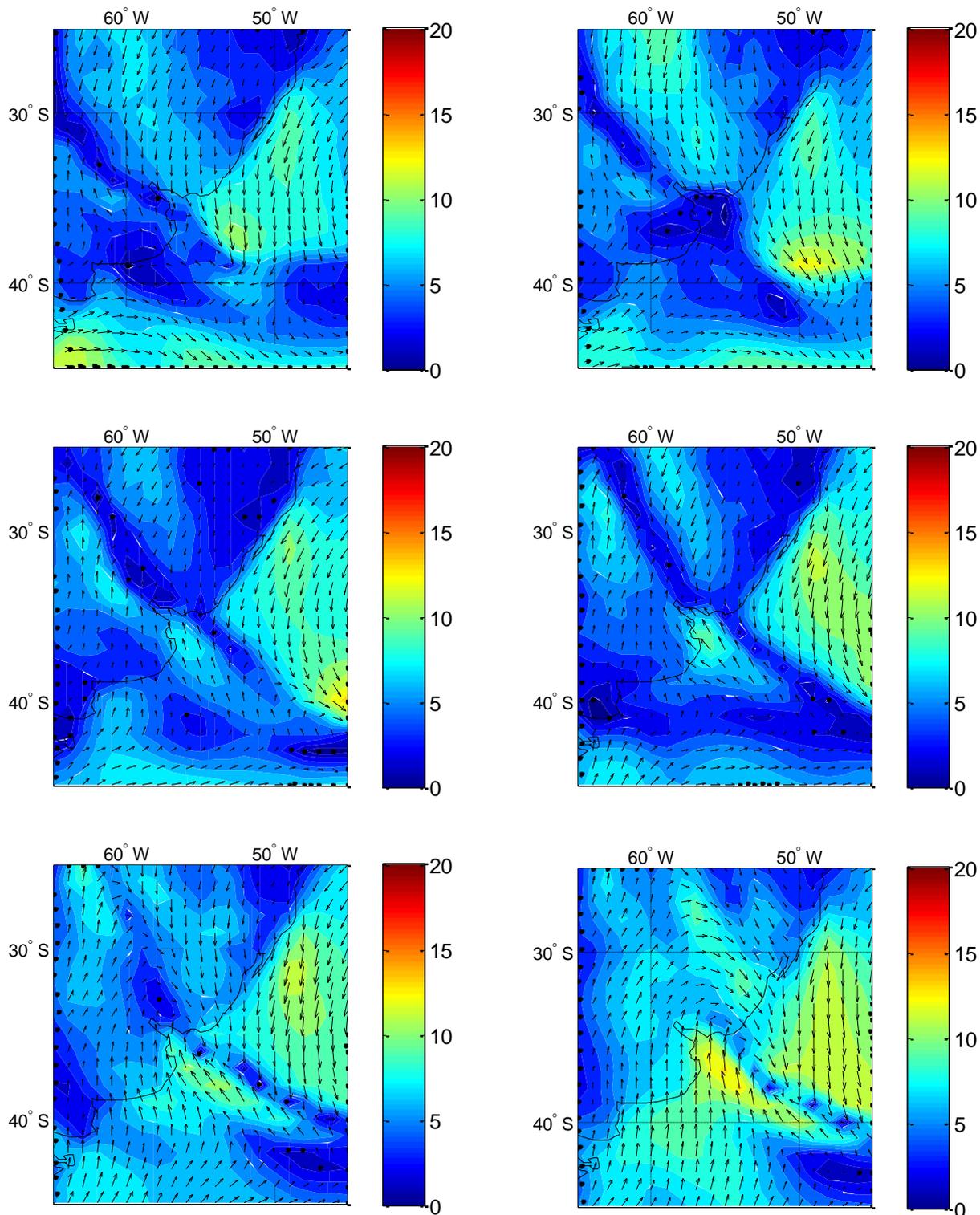
**Figura 6-36: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento del 27/3/1982. (Mayor a 40 m.hr). Intensidad en m/s indicado en barra de color.**



**Figura 6-37: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento del 9/3/1987. (Mayor a 40 m.hr). Intensidad en m/s indicado en barra de color.**



**Figura 6-38: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento del 8/2/1993. (Precipitación mayor a 100 mm). Intensidad en m/s indicado en barra de color.**



**Figura 6-39: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento del 20/4/1993. (Precipitación mayor a 100 mm). Intensidad en m/s indicado en barra de color.**

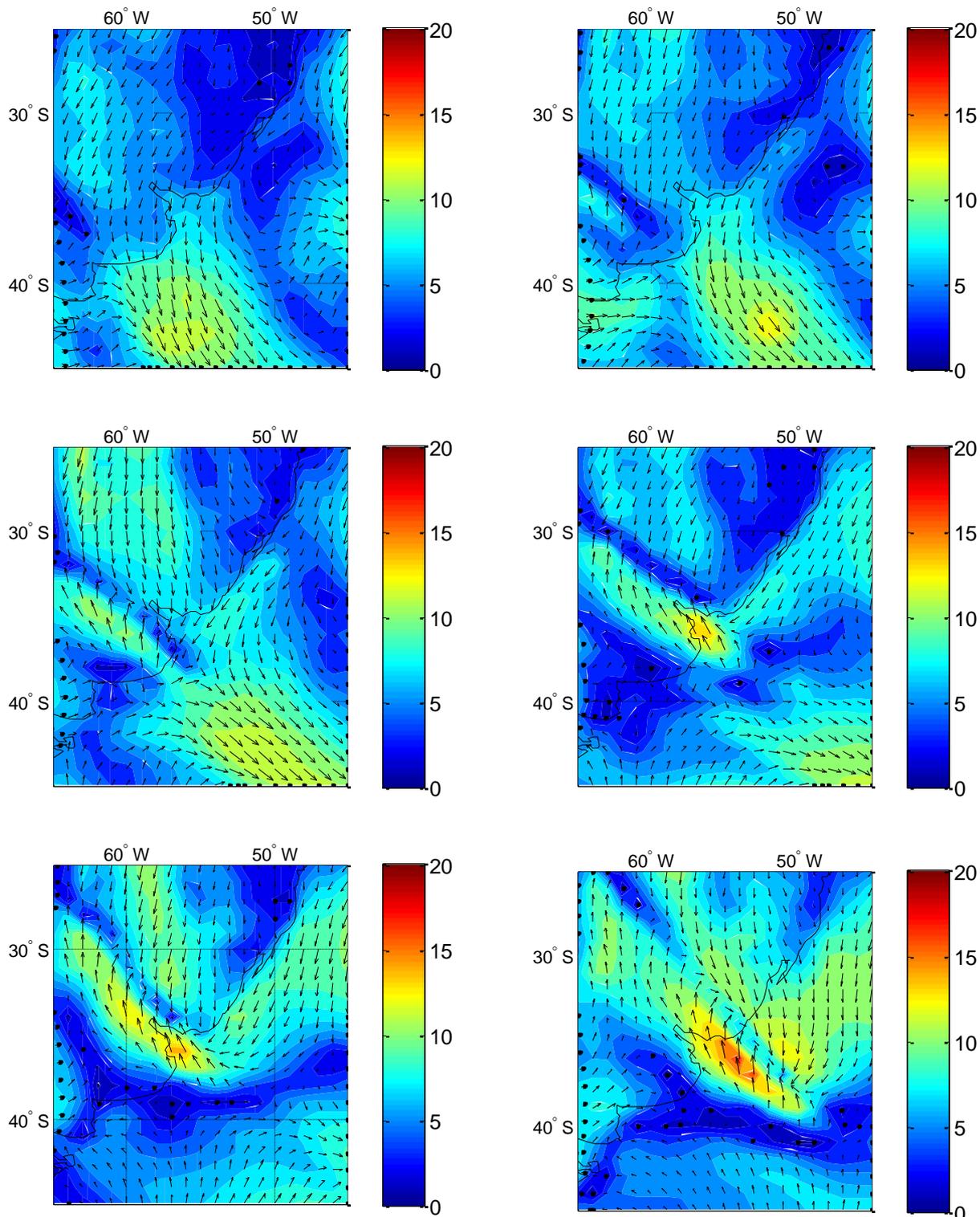
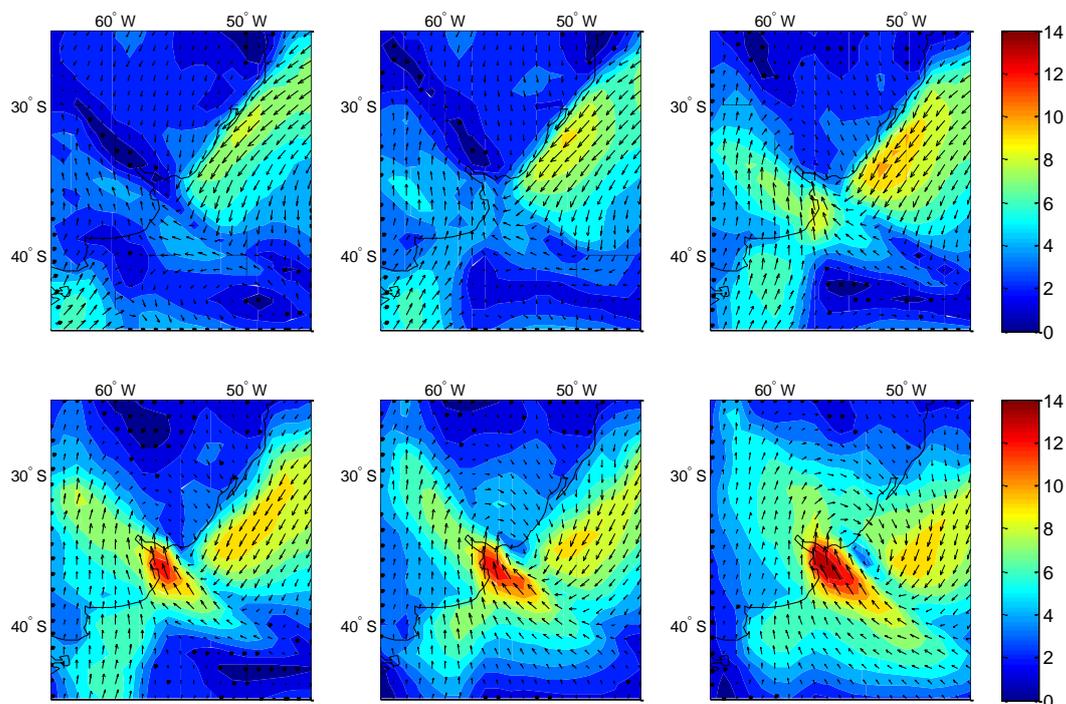


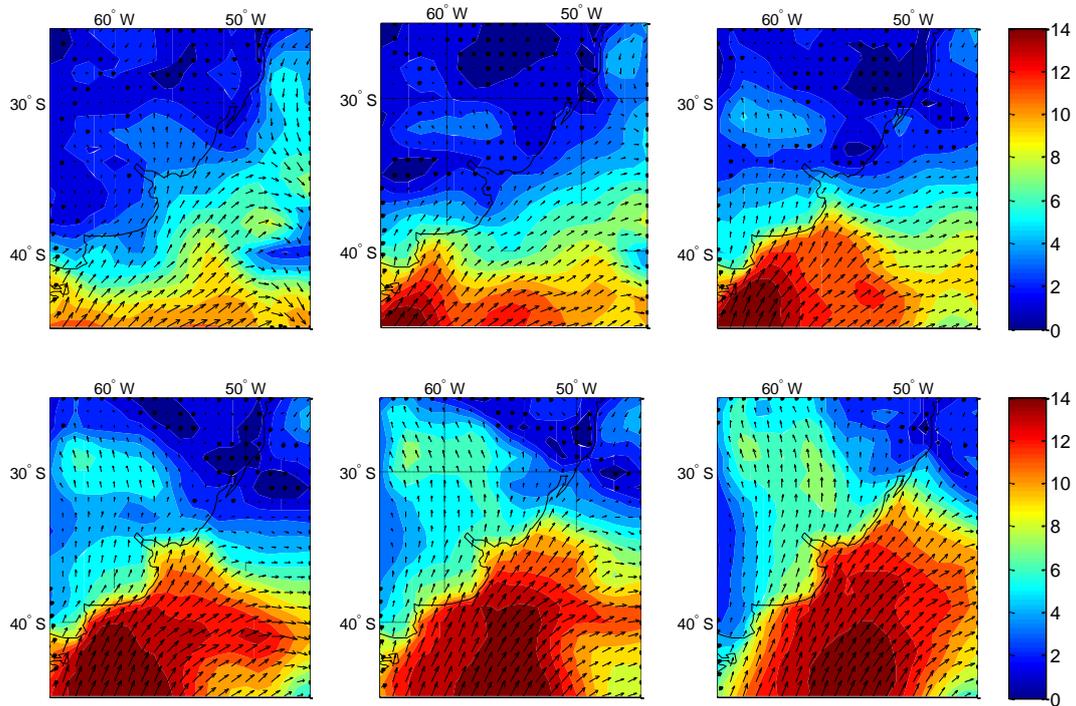
Figura 6-40: Campos de viento (con antelaciones de 30, 24, 18, 12, 6 y 0 hora) del evento del 17/10/1993. (Precipitación mayor a 100 mm). Intensidad en m/s indicado en barra de color.

Del análisis de los campos de viento de estos nueve eventos, se desprende que los mismos presentan dos patrones claramente diferenciados. Los eventos 1, 5, 7, 8 y 9 están caracterizados por la formación de un ciclón que se estaciona en la costa sur uruguaya profundizándose en el momento de máxima marea, lo cual genera fuertes vientos del S-SE entrantes al estuario. Los eventos 2, 3, 4 y 6, por otra parte, se caracterizan por un frente (asociado a un sistema de baja presión sobre el océano) que se desplaza de suroeste a noreste dejando fuertes vientos del SW a su paso sobre la plataforma continental argentina. En estos últimos casos, el frente pasa por el Río de la Plata al menos 12 horas antes de la hora del máximo de marea, momento en el cual el viento es del SW y no del S-SE como en el primer grupo.

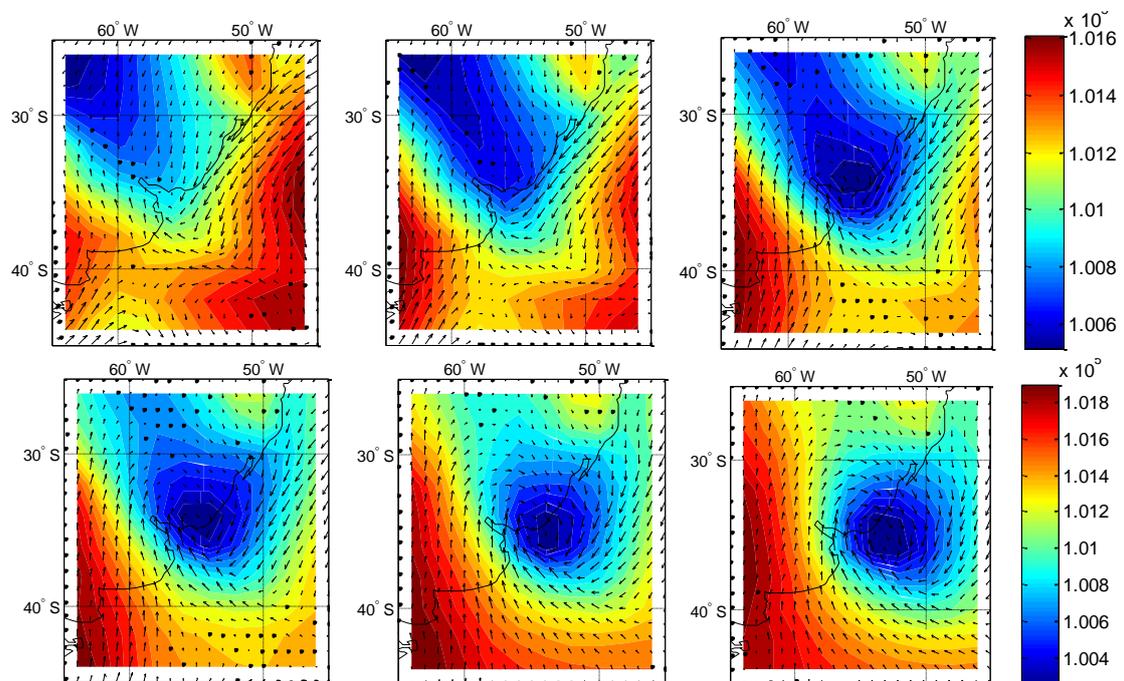
Las Figuras 6-41 y 6-42 presentan los campos compuestos del vector y amplitud de viento para estos dos conjuntos de eventos, mientras que las Figuras 6-43 y 6-44 presentan los correspondientes campos compuestos del vector viento y presión a nivel de mar.



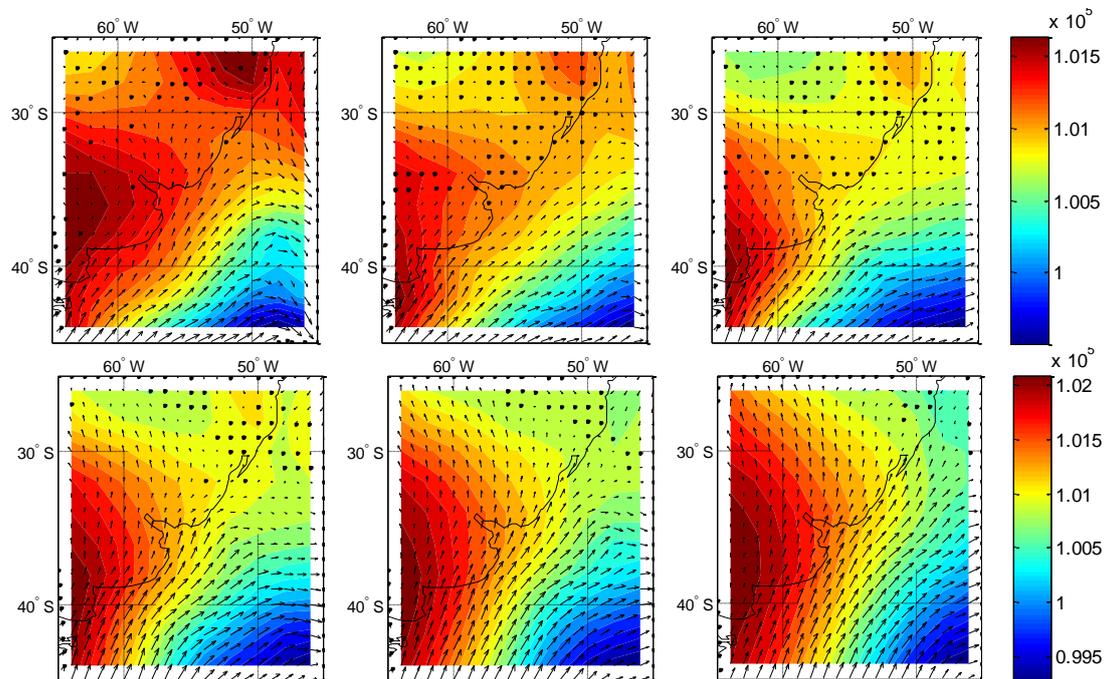
**Figura 6-41: Campo compuesto del viento a 10m –intensidad en m/s y dirección- para los eventos (1, 5, 7, 8 y 9).**



**Figura 6-42: Campo compuesto del viento a 10m –intensidad en m/s y dirección- para los eventos (2, 3, 4, 6).**



**Figura 6-43: Campo compuesto del viento a 10 m de altura y presión a nivel de mar para los eventos (1, 5, 7, 8 y 9).**

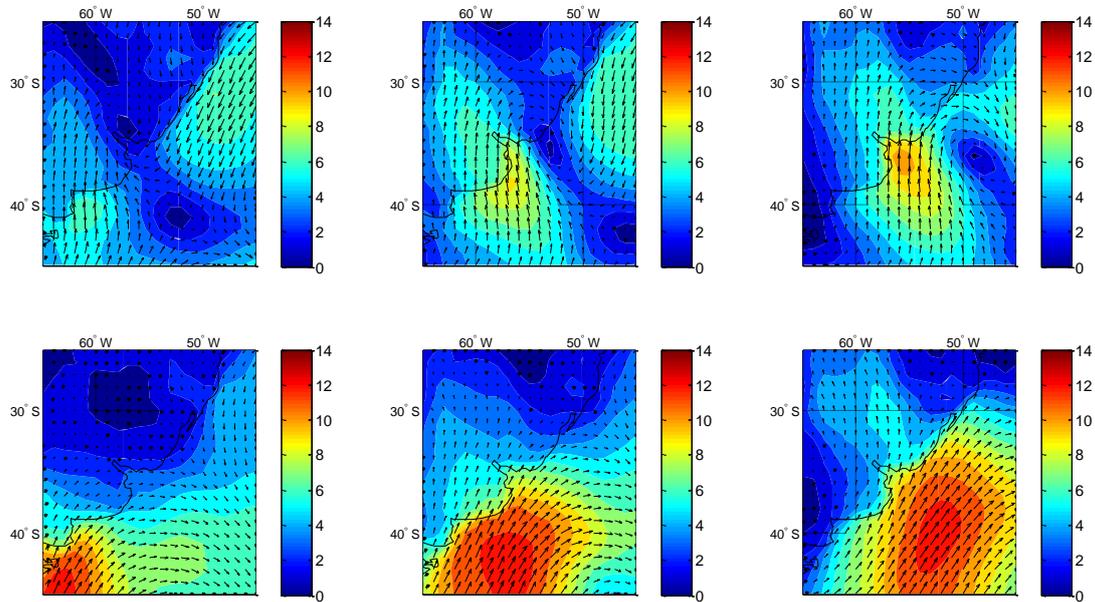


**Figura 6-44: Campo compuesto del viento a 10 m de altura y presión a nivel de mar para los eventos (2, 3, 4, 6).**

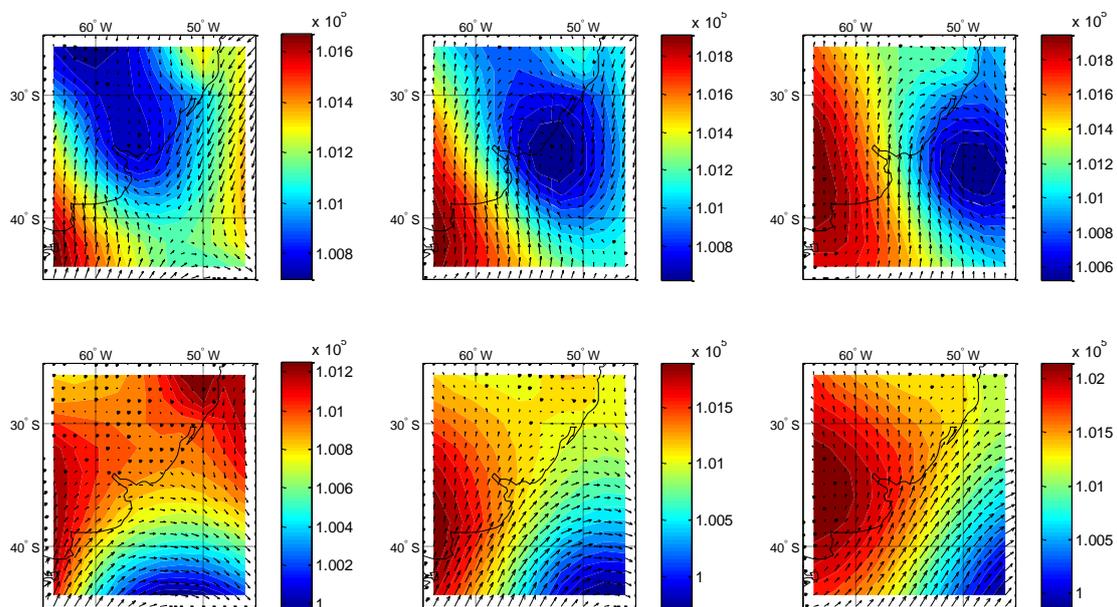
## 6.5.2 Análisis de aglomerados

Para verificar la robustez de los grupos hallados a partir de la selección de 9 eventos extremos, se utilizó la metodología de agrupamiento (*k-means*) para identificar dos grupos a partir de los campos de viento correspondientes a todos los máximos y mínimos de marea meteorológica, con desfases 0, 12 y 24 horas. En este análisis se tomaron en cuenta únicamente los máximos de marea meteorológica mayores a 2m Wh., (cuantil de 80% de los máximos de marea meteorológica).

Para cada uno de los grupos identificados se grafica el campo medio de vientos y presiones (Figuras 6-45 y 6-46). Se observa que el aglomerado 1 coincide con el primer grupo de eventos en la sección anterior consistiendo en un evento de ciclo-génesis cuasi-estacionaria en la boca del estuario que en el momento de máxima marea genera vientos del S-SE entrantes al estuario. El aglomerado 2, semejante al segundo grupo de eventos de la sección anterior, se caracteriza por un frente que se desplaza de SW a NE generando a su paso intensos vientos sostenidos del SW sobre la desembocadura del estuario del Plata.



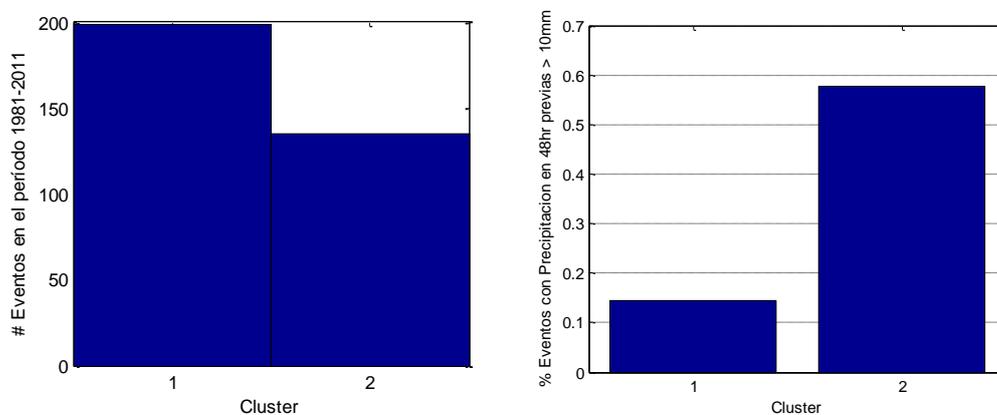
**Figura 6-45: Campo medio del grupo 1 (arriba) y del grupo 2 (abajo), correspondientes a desfase 24 horas (izquierda), 12 horas (centro) y 0 horas (derecha) respecto al instante de máxima marea meteorológica. Los colores corresponden a velocidad de viento y las flechas a velocidad y dirección de viento.**



**Figura 6-46: Campo medio del grupo 1 (arriba) y del grupo 2 (abajo), correspondientes a desfase 24 horas (izquierda), 12 horas (centro) y 0 horas (derecha) respecto al instante de**

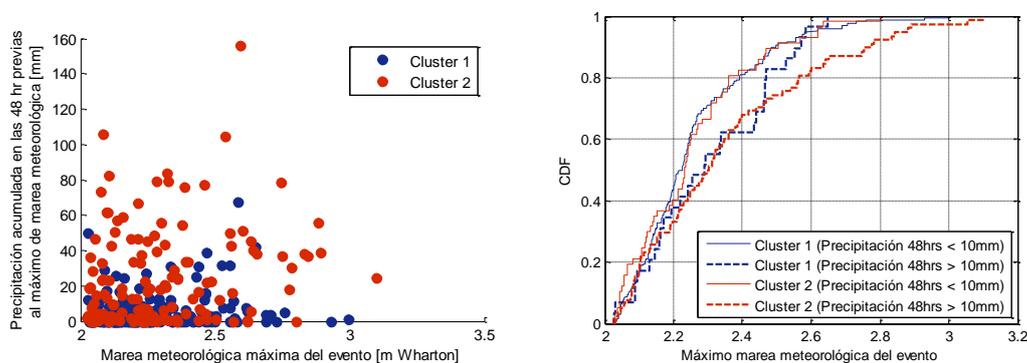
**máxima marea meteorológica. Los colores corresponden a la presión de superficie y las flechas a la velocidad y dirección de viento.**

La Figura 6-47 presenta el número de eventos en cada aglomerado (gráfico izquierdo) y la frecuencia con que se registran precipitaciones mayores a 10 mm en las 48 horas previas al máximo de marea meteorológica para cada uno de los grupos. Por un lado se observa que el grupo 1 es más frecuente que el grupo 2: aproximadamente 60% de los eventos con marea meteorológica máxima mayor a 2 m Wh. pertenecen al grupo 1. Por otro lado se tiene que la probabilidad de registrar lluvias mayores a 10 mm en las 48 horas previas al máximo nivel es baja en el grupo 1 (aproximadamente 15%) y alta en el grupo 2 (aproximadamente 55%).



**Figura 6-47: Izquierda: Número de eventos de marea alta en cada grupo. Derecha: frecuencia de eventos con precipitación mayor a 10mm en la 48 horas previas en cada grupo.**

La Figura 6-48 presenta el gráfico de los eventos en los ejes nivel máximo-precipitación en 48 horas previas, diferenciando según el grupo al que pertenecen (izquierda) y la distribución de probabilidad acumulada empírica obtenida para cada grupo, diferenciando entre eventos con precipitación en 48 horas previas mayor y menor a 10 mm (derecha).



**Figura 6-48: Izquierda: Pico de marea meteorológica contra precipitación acumulada en 48 horas previas, separando por grupo. Derecha: CDF de pico de marea para cada grupo, diferenciando entre eventos con precipitación mayor y menor a 10mm en las 48 horas previas.**

## 6.6 Distribución temporal de eventos extremos

En las secciones anteriores se determinaron los eventos de marea extrema para las últimas décadas con datos horarios definiendo la altura máxima y magnitud (integral de altura en la duración) máxima del evento.

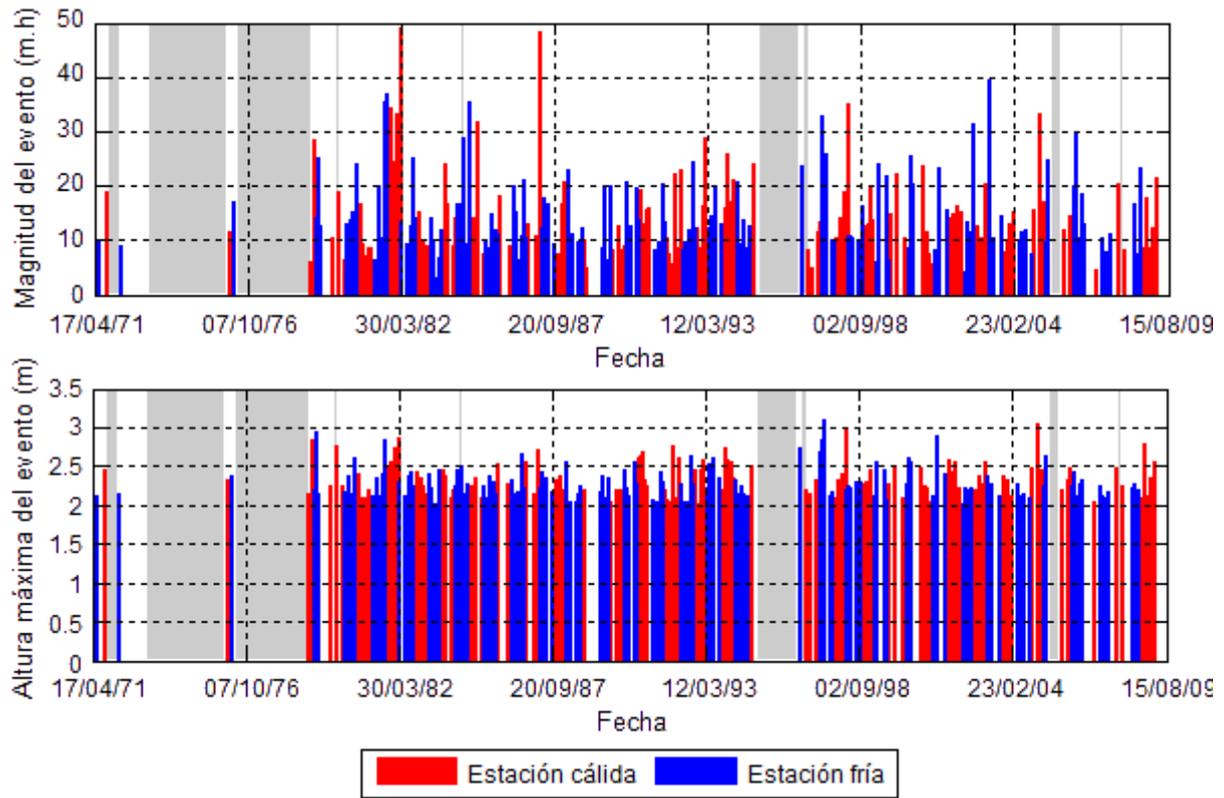
También se definieron dos clusters del campo regional de viento en superficie asociados a los eventos extremos de marea en la bahía de Montevideo. Este registro, proveniente del reanálisis está disponible en períodos similares.

Es de interés, entonces, analizar la distribución temporal de dichos eventos. El análisis será solo exploratorio pues la corta longitud de los datos y la presencia de algunos agujeros impiden estudiar en detalle las variaciones multianuales de los mismos. De todos modos la visualización de la evolución temporal de los eventos extremos y de la frecuencia de los clusters de circulación regional en superficie y su comparación brindan información relevante.

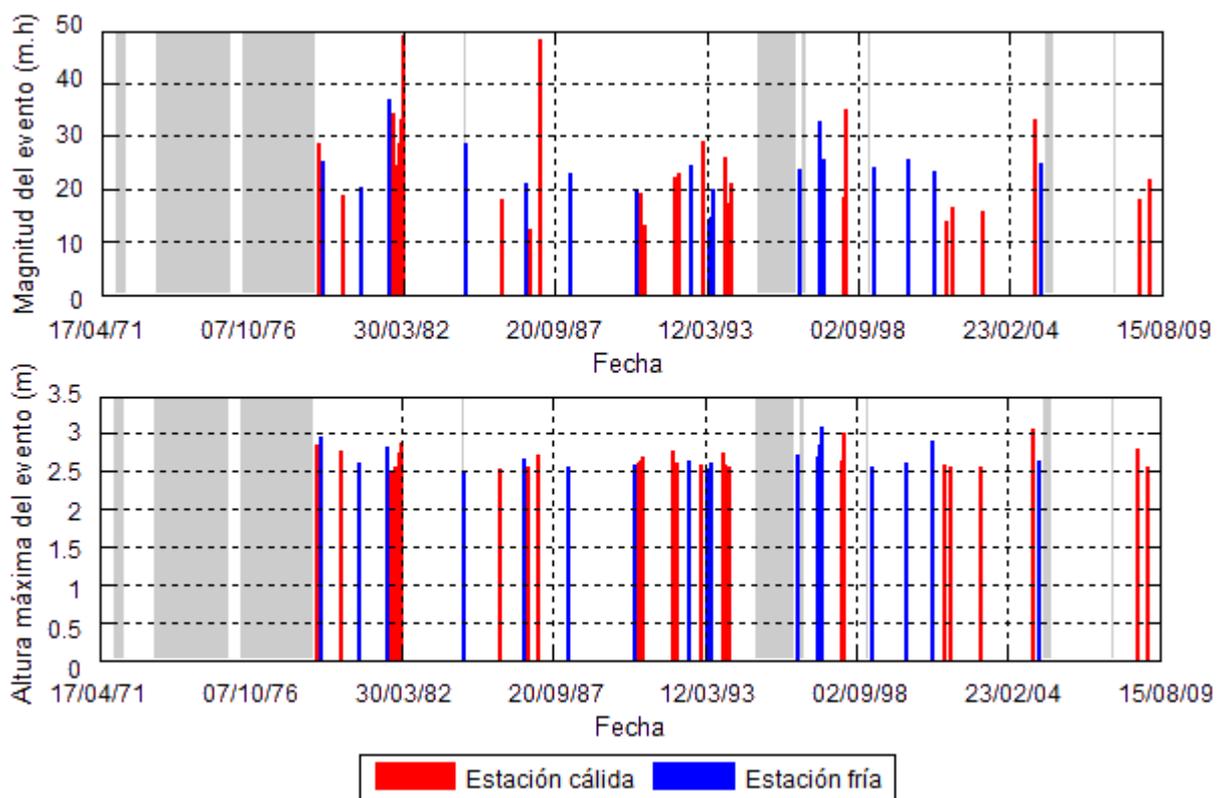
### 6.6.1 Nivel de marea en Montevideo

La Figura 6-49 muestra todos los eventos (altura máxima y magnitud) en el período distinguiendo la estación cálida (Oct-Mar) de la fría (Ara-Set), mientras que la Figura 6-50 muestra otro tanto pero limitando a aquellos eventos que superaron los 2.5 m en la bahía de Montevideo.

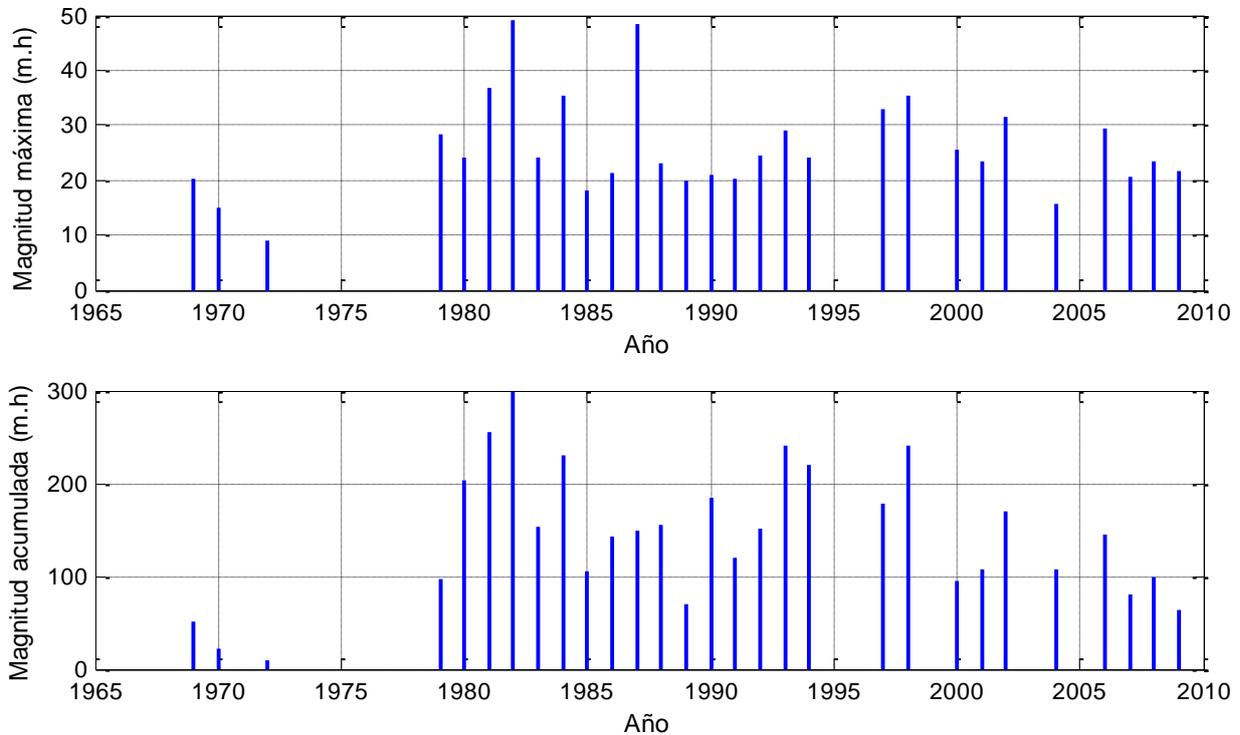
Para apreciar mejor las variaciones anuales, las Figuras 6-51b y 6-52 acumulan la magnitud de los eventos de cada año, mientras que la Figura 6-51a muestra la máxima magnitud del año; en ambos casos se tiene un valor por cada año con datos faltantes menor al 20%.



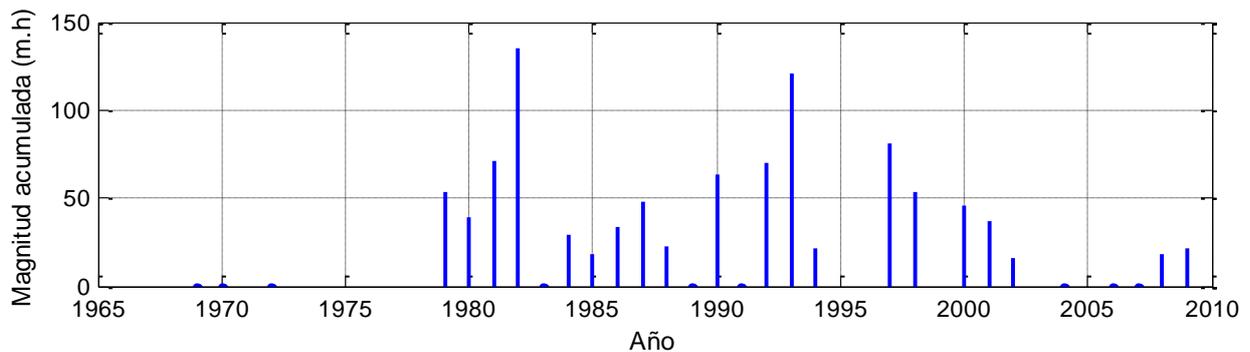
**Figura 6-49: Evolución temporal de los eventos de marea registrados en la bahía de Montevideo, distinguiendo la temporada en que ocurrieran: cálida (rojo) y fría (azul). El sombreado gris indica ausencia de datos.**



**Figura 6-50: Evolución temporal de los eventos de marea registrados en la bahía de Montevideo con altura máxima mayor a 2.5 m, distinguiendo la temporada en que ocurrieran: cálida (rojo) y fría (azul). El sombreado gris indica ausencia de datos.**



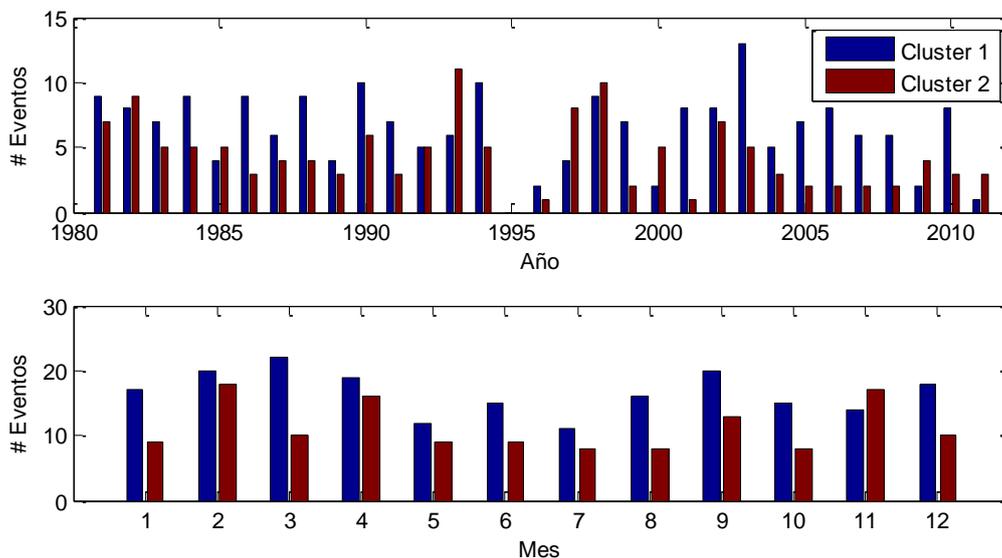
**Figura 6-51: Evolución temporal de la magnitud de los eventos máximos anuales de marea y de la magnitud acumulada de anual de todos los eventos registrados en Montevideo en el período 1969-2011. Se seleccionan aquellos años con cantidad de datos faltantes menor al 20%.**



**Figura 6-52: Evolución temporal de la magnitud acumulada anual de los eventos de marea en Montevideo con altura máxima mayor a 2.5 m en el período 1969-2011. Se seleccionan aquellos años con cantidad de datos faltantes menor al 20%.**

## 6.6.2 Índice en base al campo de vientos

La Figura 6-53 presenta el número de eventos en cada una de los grupos (clusters) hallados en la Sección 6.5.2 por año (arriba) y por mes (abajo).



**Figura 6-53: Eventos de marea por año (arriba) y por mes (abajo) en cada uno de los grupos.**

Como es natural, se aprecia cierta relación entre el panel superior de la Figura 6-53 y las Figuras 6-51 y 6-52, pero se evidencia también que la discontinuidad en los datos dificulta análisis ulteriores.

El ciclo anual de los eventos muestra la estructura de doble pico en las estaciones intermedias que seguramente hereda de la frecuencia e intensidad de tormentas en la región. No parece haber una distinción clara en este sentido entre los dos grupos.

Por último, la frecuencia de cada grupo muestra alta variabilidad interanual, de características disímiles entre ambas series. Dicha variabilidad sirve de escenario de base del clima actual en relación a una medida directamente relacionada con eventos extremos de marea y que puede entonces ser comparado con su equivalente en escenarios climáticos. Dichas medida, además, es susceptible de ser razonablemente bien simulada por modelos climáticos pues depende de patrones de escala considerable.

## 6.7 Escenarios

En esta sección se propone un camino para el uso de los escenarios climáticos producidos en el marco del IPCC-AR5 para dar alguna información sobre escenarios de niveles de marea máxima. El uso directo de las salidas de simulaciones de modelos globales del clima en aspectos locales afectados por el clima es una práctica peligrosa pues se amplifican las incertidumbres asociadas a fenómenos de escalas espacio-temporales no resueltas por dichos modelos. El desarrollo del índice de la circulación regional en superficie asociado a patrones espacio-temporales más conducentes a generar situaciones de marea alta en la bahía de Montevideo tiene justamente la motivación de salvar esas diferencias de escalas, de alguna manera funciona como una relación de reducción de escala (downscaling).

Se aprovecha el hecho que la nueva generación de simulaciones públicamente disponibles para IPCC-AR5 tiene salidas de campos cada 6hs, lo que permite capturar la escala sinóptica, tal cual es simulada por los modelos, condición imprescindible para estimar situaciones proclives a generar marea alta. Dichos campos de viento están asociados al desarrollo de tormentas baroclínicas, a su vez asociados a la posición del chorro subtropical en altura, componente primordial de la circulación general de gran escala en extra-trópicos. Por lo tanto, hay razones para pensar que los modelos globales puede ser capaces de detectar eventuales sesgos en dichos campos. Igualmente se plantea una metodología que comienza por validar las simulaciones del modelo en el clima actual contra los reanálisis, previo a buscar sesgos en un escenario futuro.

En la Sección 6.7.2 se detalla un ejemplo en este sentido que abre la puerta a estudios más extensos con otros modelos y escenarios que están siendo disponibilizados en estos momentos por la comunidad internacional. Previo a eso, en la Sección 6.7.1 se presentan los escenarios para nivel medio del mar que surgen del reciente informe del IPCC-AR5.

### 6.7.1 Nivel medio del mar

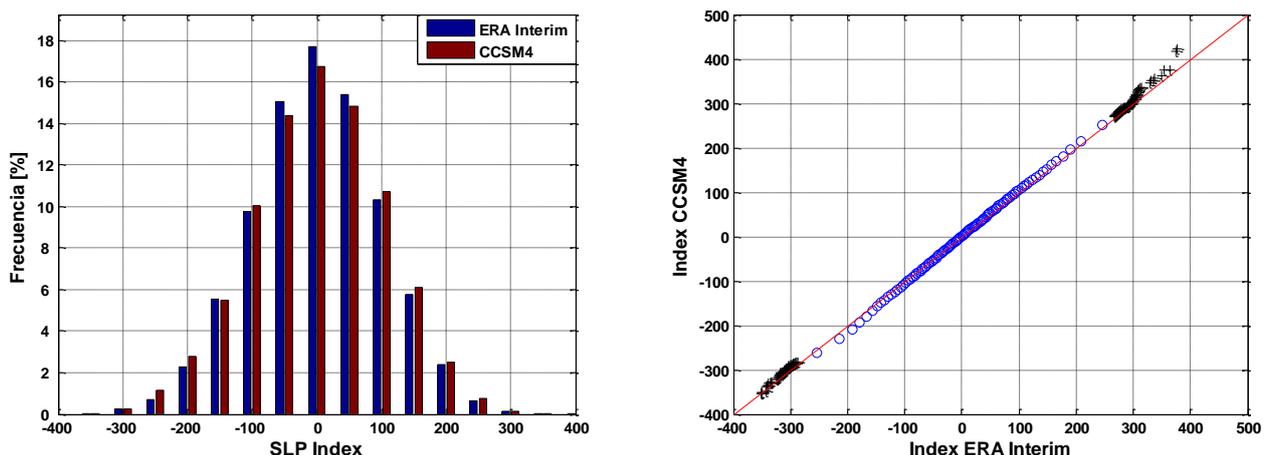
El 27 de setiembre 2013 fue publicado el Resumen para los Tomadores de Decisión del Grupo de Trabajo #1 del IPCC-AR5. Allí se resume el consenso actual sobre escenarios de nivel medio del mar que, naturalmente, están condicionados a las Trayectorias representativas de concentraciones (RCP en inglés). Allí se indica que el grado de confianza en las proyecciones de nivel medio del mar ha aumentado respecto al informe anterior (AR4) debido a las mejoras en la comprensión de los mecanismos físicos involucrados que se refleja en el mayor acuerdo entre modelos.

Dependiendo del escenario, o RCP, el rango de aumento del nivel medio del mar para el período 2081-2100 respecto del período 1986-2005 varía entre 0.26 a 0.55 m (RCP2.6), 0.32 a 0.63 m (RCP4.5), 0.33 a 0.63 m (RCP6.0) y 0.45 a 0.82 m (RCP8.5). El rango total esperado, incluyendo la incertidumbre asociada a la trayectoria, es de 0.26 a 0.82 m. La tasa de crecimiento varía entre 2 a 3 mm/año actualmente y 8 a 16 mm/año para el escenario más pesimista a fin del siglo.

## 6.7.2 Índice atmosférico asociado a eventos extremos de marea

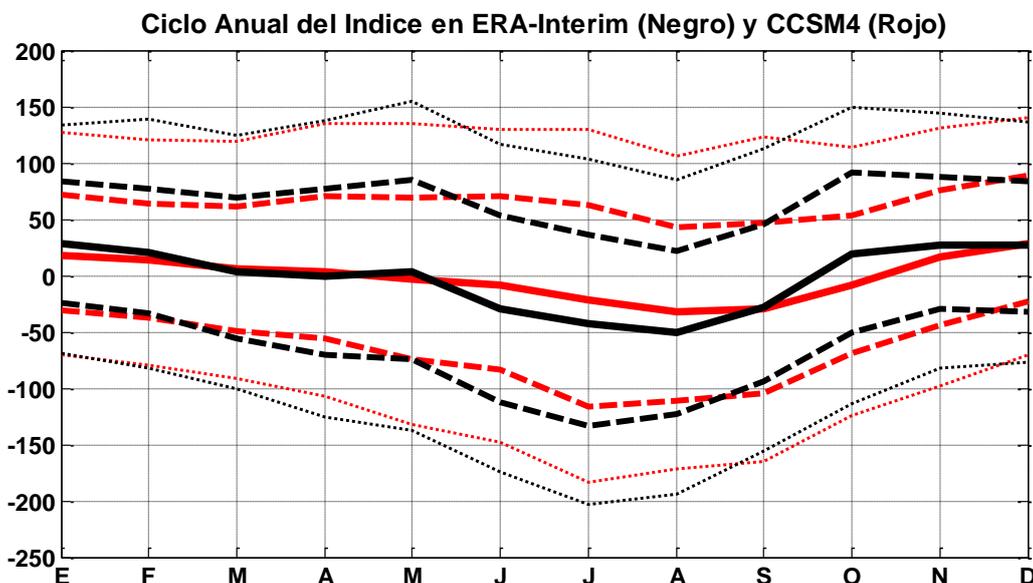
Se empezó por verificar que las simulaciones con el CCSM4 para el clima presente (experimento AMIP 1979-2008) reproducía satisfactoriamente el índice atmosférico en un sentido estadístico. Para ello se compararon las distribuciones del índice respecto a las que surgen del análisis del ERA-Interim. Se tomó, para ello, el patrón espacio temporal de de presión en superficie del ERA-Interim (Figura 6-13) y se proyectó las salidas del CCSM4 (previo cambio de grilla) sobre dichos patrones que, por construcción, describen el campo regional de presión en superficie en las 30 horas previas a los eventos de máxima marea en Montevideo.

En la Figura 6-54 se comparan los histogramas resultantes y la correspondencia de percentiles, como también de los 100 valores extremos (mínimos y máximos). En todos los casos se comprueba que el ajuste es muy bueno por lo que se puede decir que el CCSM4 reproduce satisfactoriamente la frecuencia e intensidad de sistemas que inciden en la marea regional.



**Figura 6-54: Comparación de las distribuciones del índice atmosférico relacionado con eventos de marea alta en el ERA-Interim (tal cual fuera desarrollado en la Sección 4) y en la simulación para clima contemporáneo (AMIP, 1979-2008 para el modelo CCSM4). a) Distribuciones. b) Comparación de percentiles 0.5 a 99.5 (círculos azules) y 100 casos más extremos de ambos signos para cada base de datos (cruces negras).**

Por último se comprobó el ajuste ciclo anual del índice entre el ERA-Interim y el CCSM4, la Figura 6-55 muestra la mediana, los percentiles 25 y 75 (intervalo intercuartil) y percentiles 10 y 90 (deciles extremos). Al examinar la estacionalidad, se verifican pequeños desajustes entre los índices de ambos modelos, pero se mantiene en general una muy buena representación del CCSM4 del clima observado en el reanálisis en lo que respecta a este índice.

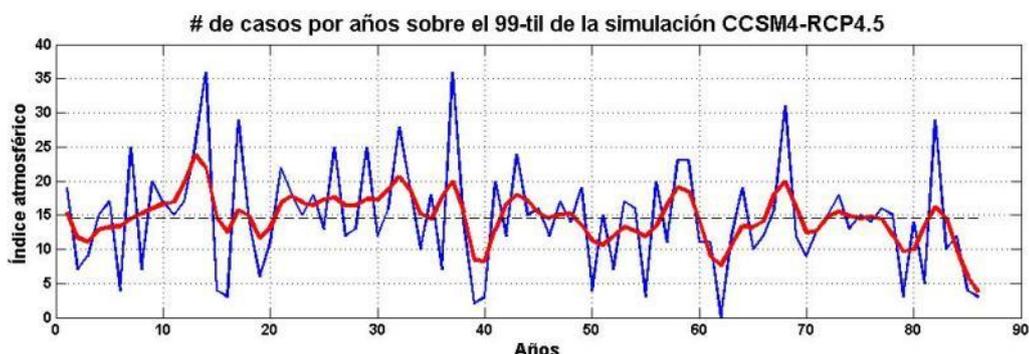


**Figura 6-55: Ciclos anuales de la mediana (sólido), cuartiles (rayado) y deciles (punteado) inferiores y superiores de del índice atmosférico relacionado con eventos de marea alta en el ERA-Interim (definido en la Sección 4, en negro) y en la simulación para clima contemporáneo (AMIP, 1979-2008 para el modelo CCSM4, en rojo).**

Por último, se repitió la operativa con los campos de presión en superficie cada 6 horas que surgen de las simulaciones con el CCSM4 en un escenario climático intermedio (RCP4.5) del 2006 al 2100. Se debieron eliminar nueve años en la década del 2060 por datos faltantes, por lo que el total de años disponibles es 86 años, que se presentan como consecutivos, ignorando aquellos años eliminados.

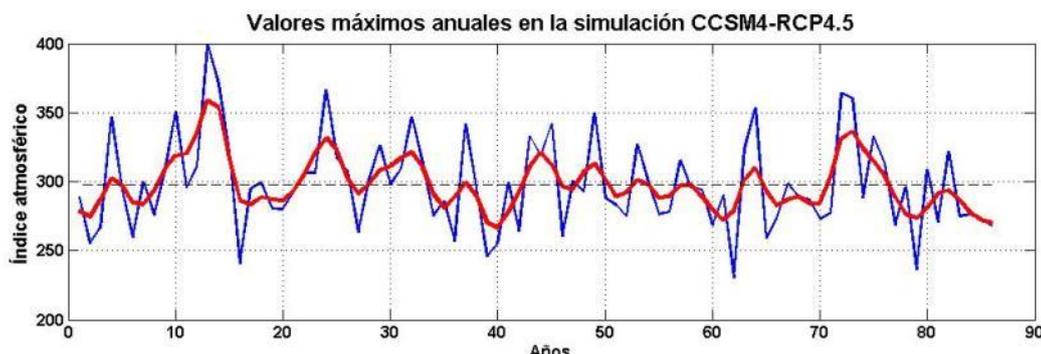
De nuevo, los estadísticos generales de toda la distribución del índice (no se muestra) resultan muy similares al clima presente. Lo que interesa fundamentalmente es evaluar la existencia o no de tendencias en los valores extremos del mismo que son los que inciden en la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos.

La Figura 6-56 muestra el número de casos en cada uno de los 86 años de la serie en que el índice supera el percentil 99 de la misma considerada en su conjunto. El promedio debe dar 14,6 casos por año ( $365 \cdot 4 / 100$ ). La serie azul muestra una tendencia negativa pero no significativa (90,1% según test de Manm-Kendall); la tendencia de la serie filtrada (con filtro binomial de 5 puntos) es también negativa con significancia de 99,4%.



**Figura 6-56: Número de casos por año (trazo azul continuo), promedio (trazo negro discontinuo) y filtro binomial móvil de 5 años (trazo rojo continuo) en que el índice atmosférico en las simulaciones del CCSM4-PCR4.5 se encuentra por sobre el 99 percentil de la serie de los 86 años (2006-2100 menos años faltantes).**

Resultados muy similares se obtienen examinando los máximos anuales del índice (Figura 6-57), cuya serie también presenta tendencia negativa no significativa (80,1% según Mann-Kendall) que pasa a ser significativa (97,1% según el mismo test) luego de filtrada (binomial 5 puntos)



**Figura 6-57: Serie de máximos valores anuales (trazo azul continuo), promedio (trazo negro discontinuo) y filtro binomial móvil de 5 años (trazo rojo continuo) del índice atmosférico en las simulaciones del CCSM4-RCP4.5..**

Se probaron otros estadísticos análogos para caracterizar la frecuencia e intensidad de eventos extremos del índice, obteniendo siempre resultados análogos, a saber, tendencias decrecientes poco significativas si no son previamente sujetas a filtros multianuales.

## 6.8 Resumen y conclusiones

Las tendencias de marea media en Montevideo son en general positivas aunque se verifican variaciones decadales moderadas que inciden en los ajustes lineales y cálculos de significación dependiendo del período considerado. A menos de dichas variaciones decadales, acompañan aproximadamente las tendencias regionales y globales, y muestran hoy día magnitudes del orden de 0,2 cm/año (en acuerdo con Losada et al. 2013).

Por el contrario, las series de máximo de marea en Montevideo presentan variaciones decadales muy importantes que distorsionan los ajustes lineales y dificultan los cálculos de significación de las tendencias. Filtrando dichas variaciones, la evolución de más largo plazo parece acompañar la tendencia de los valores medios. Si se restringe la serie a los últimos 60 años, entonces sí surgen tendencias positivas significativas, con coeficientes de ajuste lineal que van desde 0,4 (valor que propone Losada et al. 2013) a 1,0 cm/año. Sin embargo, es difícil justificar la extrapolación de dichas tendencias a futuro, más allá de la subyacente evolución de los niveles medios.

Previo a elaborar escenarios futuros del nivel de marea en Montevideo es necesario entender las causalidades asociadas a las variaciones ya observadas. En el caso de la componente de marea media, que aproximadamente acompaña –filtradas las variaciones multianuales- el nivel regional y global, la relación es clara. Además, la comunidad internacional provee de escenarios de nivel medio del mar que, si bien presentan una incertidumbre importante, son confiables. En ese sentido y para escenarios intermedios de la evolución de las emisiones, se estima un aumento en el nivel medio del mar de 0.32 a 0.63 m hacia fin del siglo.

En el caso de los eventos de marea máxima no hay posibilidad de hacer extrapolaciones simples a futuro. Dichos eventos están asociados a eventos extremos de viento ocasionados a su vez a tormentas extratropicales de origen baroclínico. Se examinó en detalle dicha relación en base al registro horario de marea en Montevideo y los reanálisis del ERA-Interim. En base a dicho análisis se elaboró un índice de la circulación regional en superficie a escala sinóptica que mejor correlaciona con eventos extremos de marea. Dicho índice se puede construir a partir de la variación espacio temporal del campo de vientos (o alternativamente de presiones superficiales) cada 6 horas y muestra una muy fuerte asociación con los eventos de máxima marea.

Dicho índice constituye una suerte de reducción de escala (downscaling) entre la circulación atmosférica regional en superficie y la marea local en Montevideo y sienta las bases de un posible esquema de elaboración de escenarios de marea máxima, adicionales a los escenarios de nivel medio.

Para ello es necesario primero validar la capacidad de los modelos climáticos globales usados en el IPCC-AR5 de representar adecuadamente los patrones atmosféricos asociados a altos valores del índice a la vez que reproducir “estadísticamente” las variaciones temporales del mismo. Es decir, que la distribución de probabilidad simulada



para el clima presente sea semejante a la observada (en los reanálisis). Este paso se verificó para el caso del modelo CCSM4 obteniendo resultados altamente satisfactorios lo cual es muy promisorio para respaldar la metodología.

Una vez cumplido ese paso, se puede verificar si los escenarios climáticos a futuro presentan distribuciones sesgadas de dicho índice atmosférico y –en base a la relación encontrada con los extremos de marea en Montevideo- generar un escenario probable de marea máxima a futuro.

Se realizó dicho ejercicio para el CCSM4 (ya validado para el clima presente) y un escenario intermedio, el RCP4.5. Los resultados para este caso particular muestran leves tendencias decrecientes en la distribución de extremos del índice (conducente a menor probabilidad de casos extremos de nivel de marea) pero los mismos no son claramente significativos.

En definitiva, los resultados muestran como muy promisorios la metodología de definición de un índice atmosférico que puede ser representado adecuadamente por los modelos climáticos globales y que a la vez captura la actividad sinóptica en las escalas espacio-temporales más asociadas a los eventos de marea alta en Montevideo.

El ejercicio exploratorio debe ser ampliado a diversos modelos y escenarios en cuanto estos estén disponibles para los campos requeridos (presión o vientos en superficie cada 6 horas). De este modo se podrá llegar a resultados más robustos a modelos particulares. Así se podrá confirmar o rebatir las tendencias decrecientes (pero poco significativas) en la probabilidad de altos valores del índice que se encontró con el análisis presentado en este informe.



## 7 BIBLIOGRAFÍA

### Capítulo 3

Aparicio Mijares, F.J., 1988. "Fundamentos de hidrología de superficie". Editorial Limusa. Grupo Noriega Editores. ISBN: 958-18-3014-8.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1994. "Hidrología Aplicada". Editorial McGraw-Hill Interamericana, S.A. ISBN: 958-600-171-7.

DINASA, 2009. "Manual de diseño de sistemas de aguas pluviales urbanas". Versión 1.0. MVOTMA. DINASA. ISBN: 978-9974-7619-4-9.

Genta, J.L., Charbonnier, F., Rodríguez Fontal, A., 1998. "Precipitaciones máximas en el Uruguay". Congreso Nacional de Vialidad.

Gianoni, A., 1973. "Meteorología. Precipitación pluvial y desagüe". *Revista de Ingeniería*, 49-53.

Intendencia Municipal de Montevideo. 1994. Plan Director de Saneamiento Urbano. Anexo I: Meteorología e Hidrología.

Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., Manetas, A., 1998. "A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships". *Journal of Hydrology*, 206, pp 118-135.

Leon Harter, H., Moore, A., 1968. "Maximum likelihood estimation, from doubly censored samples, of the parameters of the first asymptotic distribution of extreme values". *Journal of the American Statistical Association*, 63 (323) pp. 889-901.

Rodríguez Fontal, A., 1980. "Ecuaciones y ábacos para drenaje, desagüe de aeropuertos, autopistas y zonas urbanas, diques de tierra y defensa ante inundaciones". Boletín de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Vol.XIV, N° 2.

Rodríguez Fontal, A., 1984. "Fórmulas lluvia-duración-retorno-riesgo en las ocho subregiones del Uruguay (Aplicación a la agricultura)". Agua en la agricultura No. 2.

Stedinger, J., Vogel, R., Foufoula-Georgiou, E., 1993. "Frequency analysis of extreme events". *Handbook of Hydrology* de David R. Maidment, Cap. 18. (edit. Mc Graw-Hill)

Stephens, M.A., 1977. "Goodness of Fit for the Extreme Value Distribution". *Biometrika*, 64, No. 3, pp. 583-588

Terra, E., 1977. "Lluvias intensas en Montevideo". *Revista de Ingeniería*, No. 23, 31-41.

Terra, E., 1977. "Lluvias intensas en Montevideo". Erratas de lo publicado en el ejemplar No 23. *Revista de Ingeniería*, No. 25, 69-70.



Universidad de la República. 2004. "Hacia una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Uruguay", Comisión Social Consultiva. Mesa de Recursos Hídricos.

Zamanillo, E., Larenze, G. Tito, M.J., Pérez, M., Garat, M.E, 2008. "Tormentas de diseño para la Provincia de Entre Ríos". Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia. ISBN: 978-950-42-0109-0.

### Capítulo 5

Bonta, J. V., and Shahalam, A., 2003. "Cumulative storm rainfall distributions: comparison of Huff curves." *Journal of Hydrology (NZ)*, 42(1), pp 65-74.

Bonta, J. V., 2004. "Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amount". *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5), pp 641-653.

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., 1988. "*Applied Hydrology*", McGraw-Hill, New York.

Restrepo, R. J. and Eagleson, P. S., 1982. "Identification of independent rainstorms," *Journal of Hydrology*, Vol. 55, pp 303-319.

Pilgrim, D. H. and Cordery, I., 1975. "Rainfall temporal patterns for design floods," *Journal of the Hydraulics Division*, 101(HY1), ASCE, pp 81-95.

Keifer, C. J. and Chu, H. H., 1957. "Synthetic storm pattern for drainage design," *Journal of the Hydraulics Division*, 83(HY4), ASCE, paper 1332, pp 1-25.

Parrett, Charles, 1998a. "Characteristics of extreme storms in Montana and methods for constructing synthetic storm hyetographs," *Water Resources Investigations Report 98-4100*, U. S. Geological Survey.

Huff, F.A., 1967. "Time distribution of rainfall in heavy storms," *Water Resources Research*, 3(4), pp 1007-1019.

Chuckwuma, G. O. and Schwab, G. O., 1983. "Procedure for developing design hyetographs for small watersheds," *Transactions ASAE*, 26(5), pp 1386-1389.

Veneziano, D. and Villani, P., 1999. "Best linear unbiased design hyetograph". *Water Resources Research*, 35(9), pp 2725-2738.

Yen, B. C. and Chow, V. T., 1980. "Design hyetographs for small drainage structures," *Journal of the Hydraulics Division*, 106(HY6), ASCE pp 1055-1076.

Preul, H. C. and Papadakis, C. N., 1973. "Development of design storm hyetographs for Cincinnati, Ohio." *Water Resources Bulletin*, 9(2), AWRA, pp. 291-300.



## Capítulo 6

IPCC-AR5, 2013: Twelfth Session of Working Group I Approved Summary for Policymakers. Summary for Policymakers. IPCC WGI AR5 SPM-1, 27 setiembre 2013.

[http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM\\_Approved27Sep2013.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf)

Losada I. J, B.G. Reguero, F.J. Méndez, S. Castanedo, A.J. Abascal, R. Mínguez, 2013: Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean. Global and Planetary Change 104 (2013) 34–50. [www.elsevier.com/locate/gloplacha](http://www.elsevier.com/locate/gloplacha)