

ACTUALIZACIÓN DE LA ESTADÍSTICA DE VIENTOS EXTREMOS PARA URUGUAY

Valeria Durañona^a

^a*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, CP 11200, Montevideo, Uruguay, valeriad@fing.edu.uy, <http://www.fing.edu.uy/imfia/>*

Palabras clave: vientos extremos, estadística de extremos, ciclones extratropicales, corrientes descendentes, frentes, norma UNIT 50-84.

Resumen. En Uruguay el viento ocasiona daños de manera relativamente frecuente a distintos tipos de estructuras y pone en riesgo a la población, lo cual amerita contar con una caracterización adecuada de los eventos que producen las mayores velocidades de viento, así como con una descripción estadística actualizada de las velocidades de los vientos extremos.

La estadística de vientos extremos oficial uruguaya está dada en el Anexo 13.4 de la norma UNIT 50-84 Acción del viento sobre construcciones, la cual se obtuvo a partir de las máximas ráfagas de viento medidas entre 1906 y 1970 por un anemógrafo instalado 6m por encima del techo de un edificio de 43m de altura, ubicado en el antepuerto de Montevideo. Debido a la exposición no estándar de este anemógrafo, a la distribución estadística de extremos supuesta para obtener las velocidades extremas que no concuerda con la actualmente sugerida en normas internacionales y regionales, y a la necesidad de incorporar medidas de velocidad de viento de los últimos 40 años, en la sección 5 de este trabajo se presenta una actualización de la estadística de vientos extremos de Uruguay, utilizando 35 años de datos de viento horarios medidos en el aeropuerto internacional de Carrasco.

Por otra parte, desde 2008 se cuenta con un conjunto de estaciones meteorológicas que cubren gran parte del país y miden una serie de variables meteorológicas cada 10 minutos a distintas alturas, entre las que se encuentran la velocidad y dirección del viento. Este conjunto de estaciones permiten analizar los tipos de evento responsables de las velocidades de viento más intensas que tienen lugar en Uruguay y sus principales características, lo cual se presenta en las secciones 6 y 7.

Como principales conclusiones de este trabajo se encontró que la estadística de vientos extremos de la velocidad media en 10 minutos para Montevideo se puede describir mediante una distribución de tipo Gumbel, y que el pasaje de frentes fríos con actividad convectiva intensa influye de manera significativa al clima de vientos extremos de Uruguay. Otros eventos responsables de vientos extremos que también producen corrientes descendentes en Uruguay son los frentes cálidos con actividad convectiva y las tormentas convectivas intensas aisladas. Dentro de los eventos que producen velocidades elevadas durante mayor tiempo en un sitio determinado se encuentran los ciclones extratropicales y otros eventos asociados a la presencia de sistemas de alta y baja presión cerca de Uruguay.

1 INTRODUCCIÓN

En Uruguay el viento causa daños de distinto tipo de manera relativamente frecuente, tal como se señala en Durañona (2011). Cuando se registran daños en alguna parte del país, se suele informar de ráfagas de viento ($U_{\text{ráf}}$) de 80km/h o superiores en algún sitio cercano. Los daños que más comúnmente se indican son voladuras parciales o totales de techos livianos, rotura de ramas y troncos y caída de árboles. La caída de ramas y árboles suele producir daños en el tendido eléctrico y de telefonía, generando interrupciones en el sistema de energía eléctrica y de telefonía fija, sin mencionar el riesgo de electrocución que representa para la población la caída de cables de electricidad. Las ramas y troncos caídos, y otros elementos transformados en proyectiles por el viento pueden también lesionar personas y causar daños materiales adicionales a construcciones y vehículos.

Con velocidades crecientes o de igual valor pero sostenidas en el tiempo la caída de cables y postes de electricidad se hace más extensiva, se producen daños en cartelería, edificios livianos como galpones, invernaderos o viviendas precarias; daños en otras estructuras más robustas como silos, líneas y torres de media y alta tensión, estaciones de servicio, etc. Es relativamente frecuente que se informe al menos una vez al año de ráfagas de 120km/h o superiores, y dependiendo del tipo y trayectoria del evento de viento intenso que las genere se pueden producir daños en embarcaciones de distinto porte, pérdidas en cantidad y calidad de cultivos, árboles frutales, montes forestales, etc.

Existen distintos tipos de eventos que producen ráfagas de viento elevadas, y a lo largo de los últimos años se ha constatado la importancia de tener en cuenta el efecto de eventos de vientos extremos generados por convección intensa, y la consiguiente ocurrencia de corrientes descendentes, en el diseño y funcionamiento de líneas de alta tensión (Durañona y Cataldo, 2009), en el desarrollo de seguros agropecuarios por viento (Durañona y Cataldo, 2007) y de otros seguros por viento, así como en la selección y operación de aerogeneradores (Durañona, 2012a). Así mismo, la Intendencia Municipal de Montevideo se encuentra fiscalizando el diseño y estado de las antenas de porte que se tienen instaladas en la ciudad por el riesgo que representa para la población el efecto de vientos intensos sobre ellas, mientras que la Dirección Nacional de Energía del Ministerio de Industria, Energía y Minería (DNE-MIEM) desea impulsar de manera ordenada la instalación de colectores solares en el país, con un diseño del sistema y su sujeción que reduzcan posibles daños por viento.

Por las razones expuestas anteriormente, se vuelve cada vez más importante el poder contar con una caracterización de los eventos de viento intensos que representan los mayores riesgos y causan la mayor parte de los daños por viento en el país, así como con una estadística de vientos extremos actualizada.

2 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS PARA CARACTERIZAR VIENTOS EXTREMOS Y MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE SUS PARÁMETROS

Tal como se presenta en Palutikof et al., 1999, existe una serie de distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas para describir la estadística de vientos extremos de un sitio determinado, así como un conjunto de métodos para la estimación de sus parámetros.

La teoría clásica de valores extremos (Fisher y Tippett, 1928) demuestra cómo para muestras suficientemente largas de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d), la distribución de probabilidad de sus extremos converge, al dividir la muestra en submuestras suficientemente largas y cuando la cantidad de datos tiende a infinito, a uno de tres tipos de distribuciones de probabilidad: la distribución tipo I o Gumbel, la tipo II o Frechet, ó la tipo III o Weibull. Estas tres familias de distribuciones fueron combinadas en

una única distribución por Von Mises, la cual actualmente se conoce como la distribución de extremos generalizada (GEV, por sus siglas en inglés). Esta distribución tiene la siguiente función de distribución acumulativa:

$$F(x) = e^{\left[-(1-k \cdot y)^{1/k}\right]} \quad k \neq 0 \quad (1)$$

$$F(x) = e^{\left[-e^{(-y)}\right]} \quad k = 0 \quad (2)$$

donde k es el parámetro de forma que determina el tipo de distribución de valores extremos. La distribución de tipo I presenta $k=0$, mientras que a la tipo II le corresponde valores de k negativos y a la tipo III, positivos. La variable reducida, y , se define como:

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

donde μ es el parámetro de localización y σ el parámetro de escala.

Cuando se cuenta con series relativamente largas, generalmente se utiliza la distribución GEV o la distribución de Pareto generalizada (GPD) para modelar el comportamiento de los valores extremos de la velocidad del viento (Palutikof et al., 1999). Cook (1985) recomienda utilizar series de al menos 20 años de longitud para obtener los valores de los parámetros de la distribución con una confiabilidad adecuada. En casos de series largas, la distribución más comúnmente elegida para estudios de vientos extremos es la distribución de tipo I aplicada a los máximos anuales. Una ventaja fundamental de esta distribución es que se deben tomar muy pocas decisiones para la estimación de sus parámetros. Por otra parte, si se cometiera el error de seleccionar una distribución de tipo I cuando una de tipo III representara de manera más adecuada a los datos de viento extremos, los errores resultantes llevarían a una sobrestimación de las velocidades de diseño para los periodos de retorno seleccionados, con lo cual se estaría del lado de la seguridad. De cualquier manera, se pueden utilizar tests estadísticos tanto para verificar la aleatoriedad de la serie de valores extremos, como el test de correlación de rangos de Spearman o el test de rachas de subidas y bajadas; así como su bondad de ajuste, o sea, verificar que la distribución de probabilidad seleccionada describa adecuadamente el comportamiento estadístico de los valores extremos, tales como el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) o el test χ^2 (Durañona y Perera, 2003).

Como presenta Palutikof et al. (1999), dentro de los métodos para estimar los parámetros de la distribución Gumbel se tiene tanto métodos gráficos como numéricos, siendo los más comunes dentro de estos últimos el método de los momentos (PWMs) y el método de máxima verosimilitud (ML). El método de ML introduce sesgos despreciables para muestras de longitudes de entre 30 y 100 elementos (Palutikof et al., 2002) y provee estimaciones de parámetros al utilizar la distribución GPD mucho más estables sobre todo un intervalo de valores umbrales (Brabson y Palutikof, 2000).

En algunos casos existen expresiones analíticas que permiten estimar los valores de los parámetros de la distribución de probabilidad seleccionada, mientras que en otros se debe recurrir a softwares específicos. En el presente trabajo se utilizó el programa Matlab para estimar los parámetros de la distribución de probabilidad seleccionada y realizar tests estadísticos de aleatoriedad y bondad de ajuste.

3 ESTADÍSTICA DE VIENTOS EXTREMOS OFICIAL URUGUAYA

La estadística de vientos extremos oficial uruguay está dada en el Anexo 13.4 de la norma

UNIT 50-84 Acción del viento sobre construcciones. Ésta se obtuvo a partir de las máximas velocidades de ráfaga medidas entre 1906 y 1970 por un anemógrafo instalado 6m por encima del techo de un edificio de 43m de altura ubicado en el antepuerto de Montevideo. Por otra parte, para obtener la velocidad de referencia se supuso una distribución de probabilidad de tipo Frechet, de acuerdo al estado de conocimiento en el momento de la redacción de la norma, mientras que actualmente existe un consenso más o menos establecido de que una distribución de tipo Gumbel representa de manera más adecuada el clima de vientos extremos tanto en gran parte del mundo como regionalmente (Holmes, 2007; ISO 4354; CIRSOC 102, entre otras referencias). La bondad de ajuste de la distribución Gumbel a datos de viento extremos medidos en el aeropuerto internacional de Carrasco, Montevideo también pudo comprobarse durante un análisis que se realizó a las velocidades de viento más intensas para la dirección de viento que produce las velocidades más elevadas en Uruguay (Durañona y Perera, 2003).

La exposición no estándar del anemógrafo utilizado para obtener la estadística de vientos extremos actualmente vigente, tanto por su ubicación como por su altura (WMO, 2006), la posible influencia del edificio sobre el que se encontraba instalado y de su entorno en las medidas de velocidad, y la distribución estadística de extremos supuesta para la obtención de las velocidades de diseño para el país, sumadas a la necesidad de incorporar medidas de velocidades de viento de los últimos 40 años ameritan sin lugar a dudas una revisión de la estadística de vientos extremos dada por la norma UNIT 50-84.

4 SERIES DE DATOS DE VIENTO UTILIZADAS

4.1 Datos de viento medidos en el aeropuerto internacional de Carrasco, Montevideo

La serie de medidas de viento actual más extensa del país corresponde a las medidas realizadas en el aeropuerto internacional de Carrasco, Montevideo desde el año 1960 a la fecha de la velocidad media, $\overline{U}_{10min}$, y dirección del viento de los últimos 10 minutos de cada hora.

Durante 2011 la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) de Uruguay permitió a la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República digitalizar esos datos, cuya mayoría se encontraba únicamente en papel, y contar con acceso a los metadatos de las distintas estaciones y anemómetros que han funcionado en el aeropuerto de Carrasco desde 1960.

El dato de viento en sí mismo carece de valor si no se conoce las condiciones en las que fue adquirido (Aguilar et. al., 2003). Principalmente se debe contar con información sobre la altura del anemómetro utilizado para la medición, las características del entorno del mismo en todas las direcciones de viento, el tiempo y método por el cual se promedian las medidas, así como el tipo y estado del instrumento. Es común que con el correr de los años cambie la ubicación del anemómetro, se modifique su entorno, cambie el tipo y/o modelo de anemómetro utilizado o el método de adquisición y registro de los datos. Todos estos cambios pueden afectar los valores de velocidad registrados y es necesario contar con los detalles de esta información de manera adicional al dato de viento (metadato), para poder tener en cuenta la influencia de estos factores en los valores de velocidad medidos.

A modo de ejemplo, en la Figura 1 se presenta la evolución de la velocidad media anual medida en una estación meteorológica ubicada en Nueva Zelanda, y su vinculación con cambios en el entorno de la estación y en la ubicación del anemómetro. Se puede observar la gran variabilidad en los valores de velocidad anuales registrados, la cual se debe a la influencia del entorno del anemómetro en la velocidad del viento medida y no a cambios

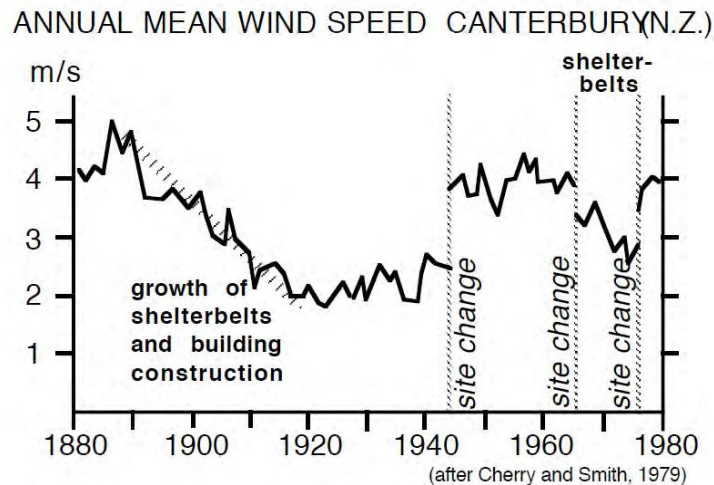


Figura 1: Variación de la velocidad media anual en una estación debido a cambios en su entorno y en su localización

climáticos, como podría concluirse si no se contara con el metadato (Wieringa, 1996).

A partir de información obtenida de distintas fuentes se pudo reconstruir el historial de las medidas de velocidad realizadas en el aeropuerto internacional de Carrasco de 1960 a la fecha, observándose que éstas se han realizado principalmente en cuatro ubicaciones dentro del predio del aeropuerto, tal como indica la Figura 2. En ese periodo se presentaron cambios en la ubicación del anemómetro, en su altura, en su entorno, cambios de instrumental, y en los sistemas y métodos de registro de la velocidad y dirección del viento. Todos estos cambios se tuvieron en cuenta para generar una base de datos de viento homogénea, realizándose las correcciones necesarias a los datos con la información obtenida.



Figura 2: Ubicación de los principales anemómetros utilizados en el aeropuerto internacional de Carrasco de 1960 a la fecha, imagen de 2004 tomada de Google Earth

En el primer periodo de medición, de 1960 a 1976, el anemómetro se encontraba sobre la Torre de control de esa época, midiendo a 24m de altura. En el resto de los periodos la altura de medición correspondió a 10m sobre el suelo. En Durañona, 2012b se presenta en detalle las características de cada ubicación del anemómetro y los metadatos asociados.

La estadística de vientos extremos es muy sensible a inhomogeneidades en la serie (Wieringa, 1996), por lo que se hace necesario contar con series de velocidad homogéneas, no influenciadas por cambios del entorno cercano o de la ubicación del anemómetro, entre otras condiciones. Para tener en cuenta diferencias tanto en la altura de medida como en el tipo de terreno que se tenía corriente arriba para cada sector de viento en cada periodo de medición, se llevaron todas las medidas a una exposición de referencia correspondiente a 10m de altura y longitud de rugosidad $z_0 = 0.03\text{m}$, propia de un terreno rural, utilizando una distribución de velocidad media en altura de tipo logarítmica, tal como se presenta por ejemplo en Holmes (2007) o Simiu y Scanlan (1986), entre otros. Para ello se consideraron las diferentes alturas y longitudes de rugosidad z_0 que presentaban los terrenos corriente arriba de cada ubicación del anemómetro de referencia en cada periodo y para cada sector de viento. Los sectores de viento utilizados corresponden a los indicados en la Figura 2.

Analizando el entorno del anemómetro para cada periodo de medición, se estimaron los valores de z_0 siguiendo distintas recomendaciones. De esta manera se llegó a dos conjuntos de z_0 que actuarían como límites inferior y superior de los valores de z_0 correspondientes a la exposición de los anemómetros que han medido en la estación de Carrasco. En la mayoría de los casos se supuso un valor del plano de desplazamiento nulo $d=0\text{m}$, y cuando fue necesario se estimó este valor como el 80% de la altura de los elementos presentes en el entorno del anemómetro. Ambos conjuntos de z_0 se presentan en las Tablas 1 y 2.

Sector\Periodo	1960-1976	1977-1994	1995-2006	2007-2009
1	0.1	0.03	0.03	0.03
2	0.1	0.25	0.1	0.03
3	0.1	0.1	0.1	0.03
4	0.1	0.1	0.1	0.03
5	0.1	0.03	0.1	0.03
6	0.1	0.03	0.03	0.03
7	0.1	0.03	0.03	0.03
8	0.03	0.03	0.03	0.03

Tabla 1: Conjunto de valores de z_0 mínimos (m)

Sector\Periodo	1960-1976	1977-1994	1995-2006	2007-2009
1	0.1	0.1	0.1	0.25
2	0.1	0.5	0.25	0.25
3	0.25	0.25	0.25	0.1
4	0.25	0.5	0.25	0.25
5	0.25	0.25	0.25	0.25
6	0.25	0.25	0.25	0.25
7	0.1	0.03	0.03	0.03
8	0.03	0.03	0.1	0.1

Tabla 2: Conjunto de valores de z_0 máximos (m)

Entre los años 1960 a 2009 de datos de viento analizados, algunos años debieron ser descartados por una serie de razones: algunos no se encontraban completos, en otros no se pudo localizar el registro original de los datos para verificar la calidad de los mismos, mientras que en otros se verificó que los datos habían sido digitados previamente utilizando factores de conversión de unidades que introducían un porcentaje de error que no era admisible a los efectos de la realización del presente estudio. Así mismo, se pudo comprobar que en un conjunto de años de datos horarios de velocidad media y dirección que ya poseía la Facultad de Ingeniería, UDELAR, los datos digitados correspondían al promedio entre $\bar{U}_{10\text{min}}$ y $U_{\text{ráf}}$, invalidando el uso de esos datos de viento para el presente estudio. Por estas razones se trabajó con los siguientes 35 años de datos de viento: 1960 a 1967, 1969, 1970, 1972 a 1978 y 1992 a 2009.

4.2 Datos de viento medidos por la red de monitoreo de UTE y DNE

La Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE), ha venido implementando desde 2008 una Red de monitoreo de viento motivada por la prospección del recurso eólico, e instalando gradualmente estaciones meteorológicas que han ido cubriendo gran parte del país. Por otra parte la DNE-MIEM se encuentra desarrollando un Programa para impulsar la energía eólica en Uruguay, para lo cual también ha instalado una serie de estaciones de medición de viento en el país, seleccionando para su instalación zonas que no habían sido cubiertas anteriormente por la red de UTE. En ambos casos las estaciones realizan un registro de una serie de variables meteorológicas cada 10 minutos, guardando de manera automática la media, desviación estándar, valor máximo y mínimo de la velocidad, dirección del viento y temperatura cada 10 minutos, y en algunos casos, adicionalmente de la humedad y/o radiación solar.

Las ventajas principales de estos datos respecto a los de Carrasco es que, además de cubrir gran parte del país, se tienen medidas en intervalos de 10min que cubren de manera completa cada hora, además de registrar velocidad media registran velocidad máxima ($U_{\text{ráf}}$), presentan medidas simultáneas de temperatura (en algunos casos, adicionalmente de humedad y/o radiación solar), y que se tiene en la gran mayoría de las estaciones anemómetros a dos o incluso a tres alturas. Por otro lado, estas series presentan a lo sumo 4 años de medida, y en algunos casos, unos pocos meses, y al ser su finalidad la prospección del recurso eólico, son pocas las estaciones que cuentan con un anemómetro a 10m de altura, siendo las alturas en general mayores, llegando en algunos casos a medir a 100m de altura. Como se presentará más adelante, para poder comparar los resultados obtenidos en las estaciones estudiadas se interpolaron las velocidades a una altura común, encontrándose que prácticamente todas las estaciones presentaban anemómetros por debajo y por encima de 45m, por lo que se seleccionó esta altura para realizar las interpolaciones.

Para realizar los análisis que se presentan en este trabajo se utilizaron estaciones de ambas redes que presentaban entornos planos, sin obstáculos y en general correspondientes a terrenos rurales. La ubicación de las estaciones utilizadas se indica en la Figura 3.

Estas estaciones presentan periodos de mediciones que van desde los 4 años a algunos meses de longitud, generalmente poseen dos anemómetros, ubicados entre los 10 y los 100m de altura, dos veletas y al menos un termómetro. En unos pocos casos también realizan medidas de humedad y/o radiación solar.



Figura 3: Ubicación de los principales anemómetros utilizados en Carrasco de 1960 a la fecha, imagen de 2004 tomada de Google Earth

5 ESTADÍSTICA DE LA VELOCIDAD MEDIA EN 10 MINUTOS

Por las razones indicadas en la sección 2, se seleccionó la distribución de extremos GEV para modelar el comportamiento estadístico de las velocidades máximas anuales $\bar{U}_{10min}$ medidas en Carrasco en los 35 años seleccionados, homogeneizadas como se indicó en la sección 4.1, y se utilizó el programa Matlab para estimar los parámetros de dicha distribución y verificar que la distribución Gumbel representaba de manera adecuada a los valores extremos de velocidad.

El programa Matlab permite estimar tanto los parámetros de la distribución GEV (k , μ y σ), como los parámetros de la distribución Gumbel (μ y σ) en la que se fija $k=0$. En ambos casos Matlab utiliza el método de ML para estimar dichos parámetros. Estas estimaciones se realizaron para los dos conjuntos de z_0 presentados en la sección 4.1, tanto discriminando por dirección, como trabajando con todas las direcciones juntas. En la Tabla 3 se presenta para los

conjunto de z_0 indicados en las Tablas 1 y 2, los resultados de los parámetros de ambas distribuciones tomando los valores máximos de velocidad anual sin discriminar por dirección. En esta tabla, las columnas k^- y k^+ representan respectivamente los límites inferior y superior para k , con una confianza del 95%. Para ambos conjuntos de z_0 se observa que $k=0$ pertenece al intervalo de confianza del 95%, por lo que la hipótesis de que la distribución de probabilidad de las velocidades extremas es en ambos casos de tipo I o Gumbel sería adecuada.

Adicionalmente se realizaron los tests estadísticos mencionados en la sección 2. Por una parte se utilizó el test de rachas de subidas y bajadas y el test de correlación de rangos de Spearman para verificar que los datos utilizados (los valores máximos de velocidades anuales de $\bar{U}_{10min}$, homogeneizadas a partir de ambos conjuntos de z_0) fueran aleatorios. En ambos casos el test de rachas no pudo descartar la hipótesis de que la muestra era aleatoria, mientras que para el primer conjunto de z_0 , el test de Spearman detectó cierta falta de aleatoriedad en la muestra. Al analizar para ese caso la gráfica de los valores máximos anuales se encontró cierta tendencia en los mismos (decreciente), y luego de restar esa tendencia a los datos el test de Spearman no pudo rechazar la hipótesis de aleatoriedad. Se debe mencionar que anteriormente también se había hallado una tendencia decreciente en los valores de velocidad máxima para la dirección oeste-suroeste (Durañona y Perera, 2003).

A partir de allí se volvió a trabajar con las velocidades máximas anuales homogeneizadas originalmente y se estimaron los parámetros suponiendo una distribución Gumbel. Se puede observar en la Tabla 3 que los valores así hallados de μ y σ no difieren significativamente de los hallados suponiendo una distribución GEV. A continuación se utilizó el test de K-S y el test χ^2 para analizar la hipótesis de que la distribución Gumbel representa adecuadamente el comportamiento estadístico de ambos conjuntos de velocidades máximas anuales. Como también se indica en la Tabla 3, en ambos casos ninguno de los tests pudo rechazar dicha hipótesis.

	Distribución GEV					Tests de aleatoriedad		Distribución Gumbel			
	k	μ	σ	k^-	k^+	Test de rachas	Test de Spearman	μ	σ	Test de K-S	Test χ^2
zo mín	0.15	67.8	9.4	-0.13	0.43	√	-	68.6	10.0	√	√
zo máx	0.095	80.8	10.4	-0.34	0.53	√	√	81.3	10.9	√	√

Tabla 3: Estimaciones de los parámetros de la distribución GEV y Gumbel, y resultados de los tests estadísticos, para los dos conjuntos de z_0 considerados

Por todo lo anteriormente expuesto se puede afirmar que la distribución Gumbel modela adecuadamente a los valores máximos de $\bar{U}_{10min}$ medidos en el aeropuerto de Carrasco. Este resultado es similar al presentado en Durañona y Perera (2003) para una dirección particular de viento. Las velocidades $\bar{U}_{10min}$ para Carrasco con periodos de retorno de 20, 50 y 100 años se presentan en la Tabla 4 para ambos conjuntos de z_0 .

Si bien tanto la norma uruguaya de acción del viento sobre las construcciones UNIT 50-84, como el Reglamento argentino CIRSOC 102 presentan valores de la velocidad en 3 segundos (U_{3s}) y no de $\bar{U}_{10min}$, con periodos de retorno de 20 y 50 años, respectivamente, se puede intentar comparar los resultados obtenidos indicados en la Tabla 4 con los presentados en ambas normas.

Velocidades de diseño (km/h)	20 años	50 años	100 años
zo mín	98	108	115
zo máx	114	124	131

Tabla 4: Velocidades $\bar{U}_{10\min}$ para distintos periodos de retorno y conjuntos de zo

La norma uruguaya toma como velocidad de referencia la U_{3s} a 10m de altura para un terreno plano, abierto y sin obstáculos (terreno rural) para un periodo de retorno de 20 años, la cual corresponde a 43.9 m/s para la zona donde se encuentra ubicado el aeropuerto internacional de Carrasco. El valor de $\bar{U}_{10\min}$ presentado en este trabajo para un periodo de retorno de 20 años estaría comprendido entre 98km/h (27.2 m/s) y 114km/h (31.7m/s) según lo indicado en la Tabla 4, por lo que para que los resultados estuvieran de acuerdo con la norma UNIT 50-84 los factores de ráfaga, definidos como $U_{3s} / \bar{U}_{10\min}$ deberían tomar valores entre 1.6 y 1.4. El Reglamento CIRSOC 102 presenta la relación esperada entre una velocidad promediada en t segundos y la velocidad promediada en 1 h en su Figura C-1. A partir de esa figura se obtendría $U_{3s} / \bar{U}_{10\min} \cong 1.42$, valor del orden de los factores de ráfaga necesarios para que los resultados obtenidos en este trabajo estén de acuerdo con la norma uruguaya. Este factor de ráfaga es similar al valor que sugiere Cook (1985) para un terreno rural a 10m de altura. Se debe indicar que los factores indicados en Cook (1985) fueron obtenidos para flujos tipo Capa Límite Atmosférica (CLA), y como se verá en la sección 6, los eventos que causan las mayores ráfagas en Uruguay no corresponden a este tipo de flujo, sino que están mayormente asociados al pasaje de frentes fríos con actividad convectiva intensa, donde el flujo es muy diferente a un flujo tipo CLA, por lo que debería analizarse los factores de ráfaga que se tienen durante ese tipo de evento.

Por otra parte, el Reglamento argentino CIRSOC 102 indica para zonas de Argentina cercanas a Uruguay, U_{3s} con periodos de retorno de 50 años de entre 46 y 48m/s. Los valores de $\bar{U}_{10\min}$ presentados en este trabajo para un periodo de retorno de 50 años estarían comprendidos entre 108km/h (30 m/s) y 124km/h (34.4m/s) según lo indicado en la Tabla 4, por lo que para que los resultados fueran equivalentes se debería considerar factores de ráfaga, de entre 1.6 y 1.33. Nuevamente los resultados obtenidos en este trabajo serían similares a los presentados por CIRSOC si se tomaran factores de ráfaga como los indicados para flujos tipo CLA.

6 EVENTOS QUE CAUSAN LAS MAYORES VELOCIDADES DE RÁFAGAS EN URUGUAY

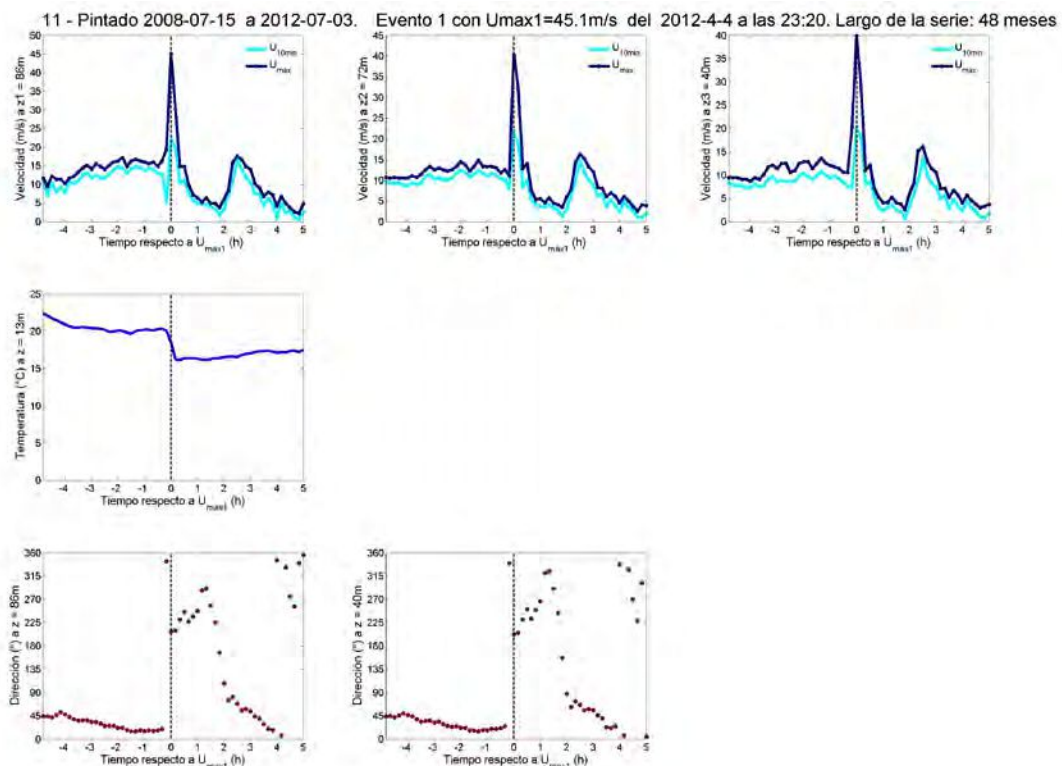
Como un primer acercamiento para caracterizar los eventos que causan los vientos extremos más intensos en Uruguay, se procedió a analizar las velocidades $U_{ráf}$ medidas en las estaciones indicadas en la Figura 3. Como criterio para identificar eventos de viento intenso se impuso que se midiera a cualquier altura valores de $U_{ráf}$ mayores a 80 km/h (22.2m/s), ya que se encontró que esa velocidad representa un valor umbral para el comienzo de daños por viento (Durañona, 2011).

Analizando los cuatro casos que presentaron las ráfagas más intensas en cada estación se encontró que en el 80% de ellos la máxima ráfaga se producía en el momento en que la temperatura descendía, en un 4% de los casos, cuando la temperatura aumentaba, mientras que en el 16% de los casos la temperatura no presentaba variación. Por otra parte, un 80% de los casos presentaron cambios apreciables en la dirección de viento en el momento en que se

registraba la máxima ráfaga, correspondiendo un 50% a cambios abruptos de dirección, y un 30% a cambios graduales. El restante 20% de los casos no presentaba cambios apreciables en la dirección del viento. En cuanto a la dirección del viento en los casos en los que se tenía cambios de direcciones importantes al registrarse la máxima ráfaga, ésta provenía del cuadrante Sur-Oeste en el 80% de los casos, del cuadrante Nor-Oeste en el 10% y del Sur-Este en el 5%. Los casos que no presentaban cambios de dirección del viento significativas presentaban ráfagas intensas del Oeste y del Este del orden del 30% para cada una de estas direcciones, y luego del Sur-Oeste y Sur, con cerca del 15% para cada dirección.

Adicionalmente se analizaron los siete casos que produjeron alguna de las cuatro ráfagas más intensas en el mayor número de estaciones de la red de UTE – DNE-MIEM. Estos casos ocurrieron en más del 80% durante situaciones de actividad convectiva intensa asociada mayormente al pasaje de frentes fríos sobre el país del suroeste al noreste. En un caso el frente frío se movió de oeste a este, mientras que en un par de casos el frente se estacionó sobre Uruguay, produciendo incluso al menos un tornado. En el caso restante la situación meteorológica se debió al pasaje de un gran sistema de nubes, asociado a una onda frontal sobre el país, y a un gran sistema de baja presión en niveles medios y altos de la atmósfera (Celemin, 2011), también asociado a actividad convectiva muy intensa sobre el país.

Analizando la evolución temporal de la velocidad del viento se pudo constatar que cuando se presenta actividad convectiva intensa, gran parte de los eventos se pueden clasificar en cuatro categorías: 1- picos muy pronunciados en la velocidad, generalmente asociados a descensos en la temperatura y cambios en la dirección del viento, donde el aumento y descenso de la velocidad se produce en media hora o menos; 2 – picos pronunciados en la velocidad, también generalmente asociados a descensos en la temperatura y cambios en la dirección del viento, donde el aumento y descenso de la velocidad se produce en una hora o menos; 3 – incrementos abruptos de la velocidad con descenso gradual en varias horas; 4 – incrementos y descensos de la velocidad que ocurren en pocas horas. En la Figura 4 se presenta ejemplos de los casos 1 y 3 mencionados.



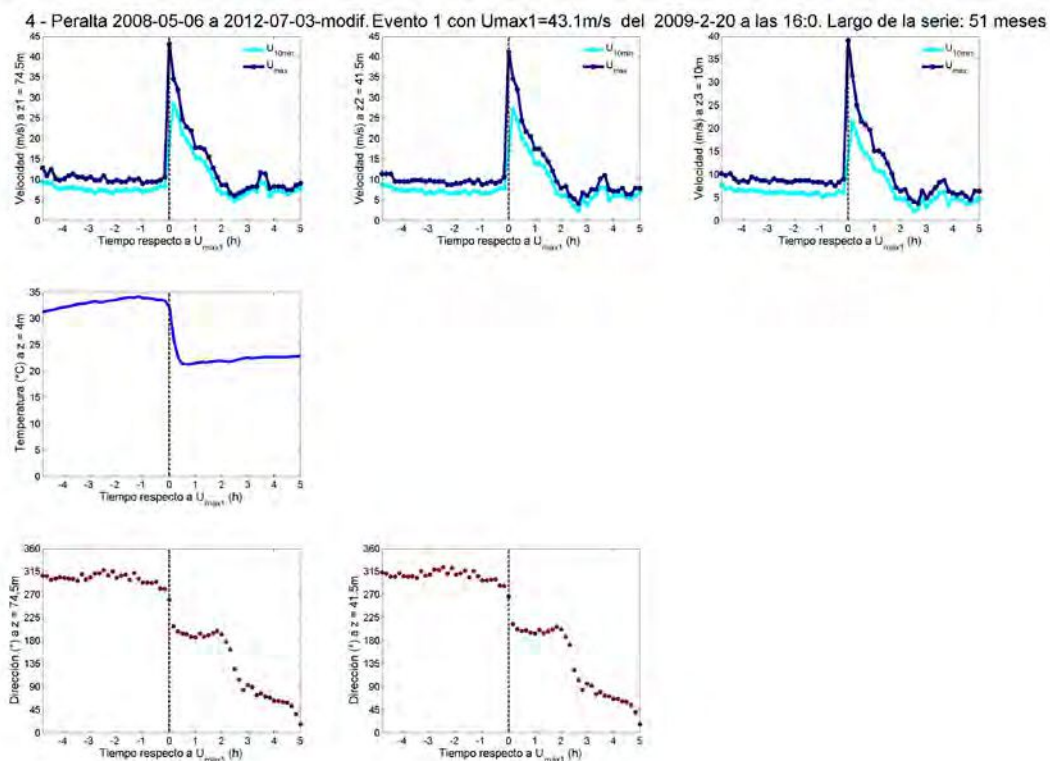


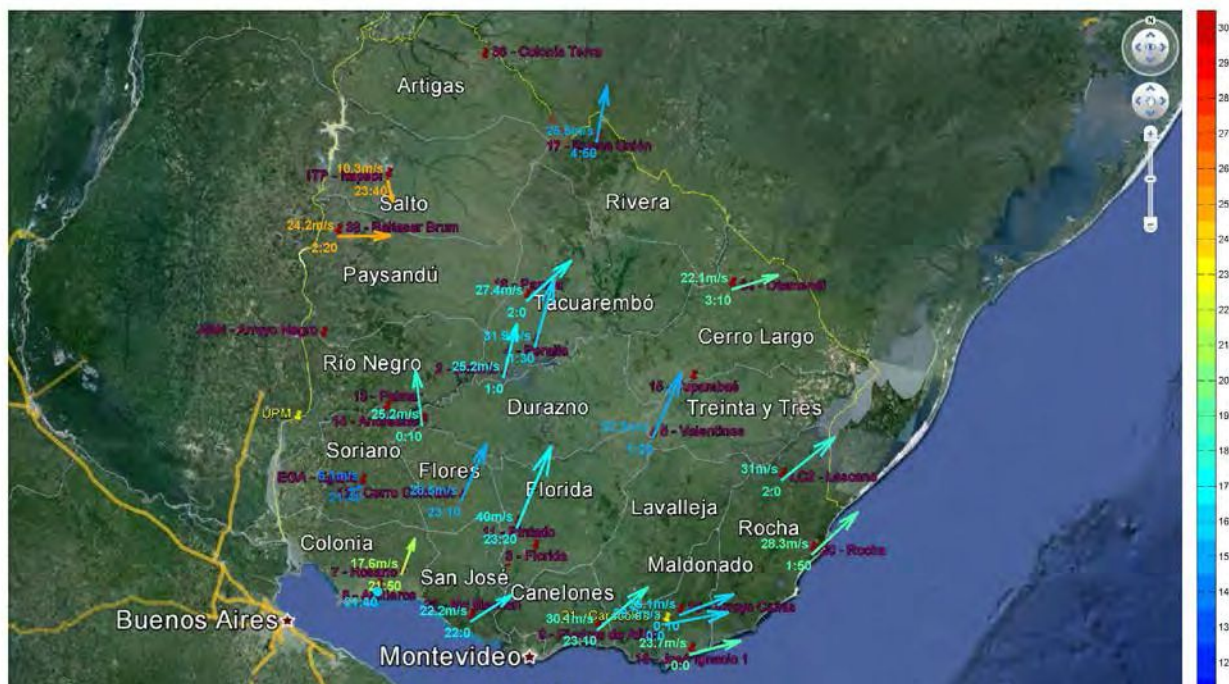
Figura 4: Evolución temporal de la velocidad, temperatura y dirección del viento durante dos tipos de eventos que producen las mayores ráfagas sobre Uruguay

En ambos casos indicados se puede observar la gran correlación en altura tanto de $U_{ráf}$ como de $\bar{U}_{10min}$ incluso entre las alturas 10 y 74.5m que presenta el segundo caso, y cómo estos eventos también producen registros importantes de $\bar{U}_{10min}$ incluso a 10m de altura. A modo de ejemplo, los factores de ráfaga asociados a los dos eventos indicados en la Figura 4 correspondieron a 2 y 2.9, a 40 y 10m de altura, respectivamente, calculados en el intervalo de 10 min donde ocurría $U_{ráf}$ máxima. Se observa que en el segundo caso, la máxima $\bar{U}_{10min}$ se registra luego de la máxima $U_{ráf}$.

Por otra parte, la Figura 5 presenta los valores máximos de $U_{ráf}$ interpolados a una altura de 45m para cada estación analizada, durante el pasaje de un frente frío intenso y organizado sobre Uruguay el 4/4/2012, y de un ciclón extratropical intenso el 19/9/2012. Para cada estación se indica una hora, un valor de velocidad y un vector. La hora corresponde al momento en que se registró el valor máximo de $U_{ráf}$ en cada estación, la dirección del vector corresponde a la dirección que presentaba el viento a esa hora, y su módulo representa el valor máximo de $U_{ráf}$ alcanzado. El color del vector corresponde a la temperatura que se tenía a la hora en que se registró la máxima ráfaga. A la derecha de cada gráfico se puede observar la temperatura correspondiente a cada color.

En ambos casos (y en otros) se realizó una animación del pasaje de cada tormenta sobre el país, notándose en el primer caso cómo el pasaje del frente frío sobre una estación producía las mayores ráfagas, ya que simultáneamente cambiaba el color y el módulo del vector. En este caso, luego del pasaje del frente las velocidades decrecían rápidamente, produciendo picos en la velocidad más o menos pronunciados, como el indicado en la Figura 4 para Pintado, y la temperatura se mantenía baja. En esa figura se puede observar también la trayectoria del frente, del suroeste al noreste, demorando aproximadamente unas 7 horas en atravesar el país. Las máximas ráfagas provinieron del cuadrante suroeste y presentaron una

Ráfagas máximas de los días 4 y 5 /4 /2012 (interpoladas a 45m). Vráf máxima = 40 m/s en estación 11-Pintado



Ráfagas máximas del día 19/9 /2012 (interpoladas a 45m). Vráf máxima = 35.6 m/s en estación 8-Artilleros

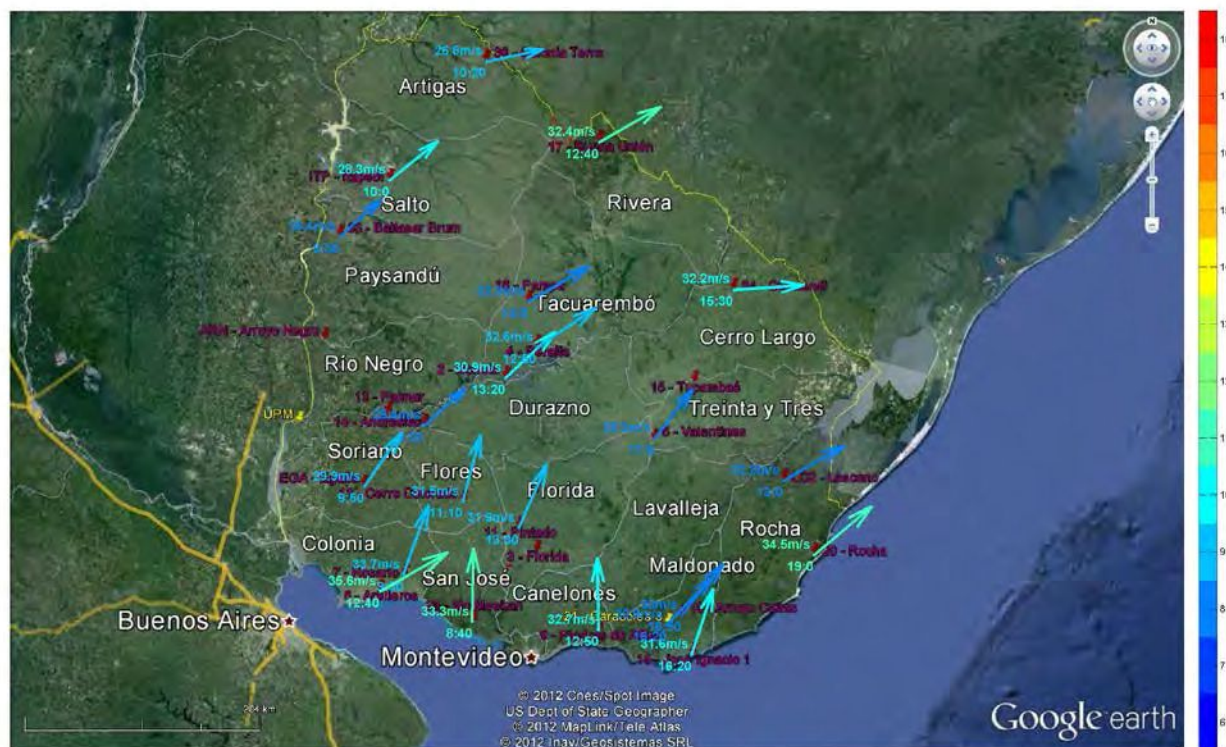


Figura 5: Algunos tipos de eventos que producen ráfagas intensas sobre Uruguay

variabilidad importante, tomando valores entre 20 y 40 m/s, con los mayores valores registrados en el centro-este del país.

Por su parte, las horas indicadas en el segundo caso muestran cómo el ciclón extratropical del 19/9/2012 se trasladó sobre Uruguay del noroeste al sureste, demorando cerca de 9 horas en atravesar el territorio nacional. En este caso la velocidad en cada estación se mantuvo elevada durante horas, y la variabilidad que presentan las ráfagas sobre el país es menor, tomando valores entre 25 y 36 m/s, con los mayores valores registrados en general sobre la costa sur y este del país.

Aunque los eventos presentados en la Figura 5 son meteorológicamente diferentes, en ambos casos las máximas ráfagas provienen del sector sur-oeste, característica típica para ambos tipos de eventos. La dirección de traslación y la duración de las velocidades elevadas encontradas en los casos presentados también son representativas de estos tipos de eventos.

Luego de analizar una serie relativamente extensa de eventos que presentaron ráfagas elevadas, utilizando figuras como las Figuras 4 y 5, la situación sinóptica asociada e imágenes satelitales se pudo concluir que los eventos que producen las mayores ráfagas en Uruguay corresponden en su mayoría a corrientes descendentes asociadas a frentes fríos, tanto al trasladarse como al estacionarse sobre el país, al pasaje de frente cálidos o a la ocurrencia de tormentas convectivas aisladas; así como a eventos que producen durante más tiempo velocidades elevadas sobre una estación determinada. Cuando esto último ocurre, en general en gran parte del país se registran ráfagas intensas durante una serie de horas. Esta última clase de eventos pueden deberse tanto a ciclones extratropicales que se intensifican durante el pasaje sobre Uruguay, o a otras situaciones sinópticas que producen vientos intensos en la región, como el viento pampero, los cuales dependen de la ubicación relativa de sistemas de alta y baja presión respecto a Uruguay (Celemín, 1984). Se pudo observar también que hacia el noroeste del país se tienen más eventos de ráfagas intensas de corta duración que en el sureste, donde se registran más eventos de ráfagas intensas de mayor duración, que se mantienen durante horas. Sin embargo, en todo el territorio nacional las ráfagas más intensas registradas a 45m de altura corresponden a situaciones de convección intensa.

7 EVENTOS QUE CAUSAN LAS MAYORES VELOCIDADES MEDIAS EN 10 MINUTOS EN URUGUAY

Para analizar los eventos que producen las mayores velocidades medias en 10 minutos en Uruguay se procedió a homogeneizar los datos, interpolando nuevamente las velocidades medias y de ráfagas en todas las estaciones a 45m de altura y utilizando series de años completos.

En este caso se tomó como velocidad umbral una velocidad $\bar{U}_{10min}$ de 60km/h y se analizaron los casos que producían valores de $\bar{U}_{10min}$ a 45m de altura mayores a ese valor umbral. Se observó que dentro de los eventos que producen las mayores velocidades medias en 10 minutos, aquellos asociados a una actividad convectiva intensa eran nuevamente relevantes. Se notó también una tendencia a tener mayor número de casos asociados a actividad convectiva intensa al noroeste del país que en el sureste, donde aparecían mayor número de eventos de mayor escala temporal. Así mismo, en todas las estaciones se obtuvo mayor proporción de eventos de mayor escala temporal que en el caso en que se analizaron los eventos que produjeron ráfagas mayores a 80km/h, como era de esperar.

8 CONCLUSIONES

Como se mostró en la sección 5, la estadística de vientos extremos de la velocidad media

en 10 minutos para Montevideo se puede describir mediante una distribución de tipo Gumbel.

En la sección 6 y 7 se pudo comprobar que dentro de los eventos que causan tanto las ráfagas como las velocidades medias en 10 minutos más intensas en el país se encuentran las corrientes descendentes producidas principalmente por el pasaje o estacionariedad sobre el país de frentes fríos con actividad convectiva intensa, y en menor proporción, por frentes cálidos y tormentas convectivas intensas aisladas. Otros eventos que producen velocidades elevadas en un sitio determinado durante una mayor escala temporal también son relevantes para el clima de vientos extremos de Uruguay. Dentro de estos se encuentran los ciclones extratropicales y otros asociados a la presencia de sistemas de alta y baja presión cerca de Uruguay.

Si se utilizan los factores de ráfaga propuestos en la bibliografía para flujos tipo CLA, los valores de velocidad con distintos periodos de retorno hallados en la sección 5 se comparan relativamente bien con los valores propuestos de ráfagas en 3s por la norma UNIT 50-84 y por el Reglamento CIRSOC 102.

Como se vio en las secciones 6 y 7, los eventos que producen las ráfagas más intensas sobre Uruguay, así como los valores más elevados de $\bar{U}_{10\min}$, al menos a 45m de altura, corresponden a situaciones de convección intensa sobre el país, los que en muchos casos presentan factores de ráfaga más elevados que los propuestos para flujos tipo CLA. Por esta razón sería recomendable realizar un estudio más profundo de los factores de ráfaga que se registran a distintas alturas durante los diferentes eventos que producen velocidades intensas sobre Uruguay, estudiar el perfil de velocidades durante estos eventos, y en particular, analizar medidas de velocidad a 10m de altura en distintas zonas del país, para lo cual se debería contar con mayor número de anemómetros instalados a esa altura.

A pesar de que sería muy valioso poder realizar los estudios planteados en el párrafo anterior, una de las conclusiones más importantes del trabajo presentado es que el pasaje de frentes fríos con convección intensa sobre el país influye de manera significativa al clima de vientos extremos de Uruguay, tanto al considerar las velocidades de ráfaga como las velocidades medias en 10 minutos.

9 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible si no se hubiera contado con el acceso a los datos de viento de la DNM, UTE y de la DNE-MIEM y a los metadatos asociados. A estos organismos y a las personas que lo hicieron posible van mis mayores agradecimientos. La red de medición de la DNE pertenece al Programa de Energía Eólica, con financiamiento del Fondo para Medio Ambiente Mundial (GEF) y administración del PNUD, a los que hago extensivo el agradecimiento. Deseo agradecer también a mi director de tesis de doctorado, Christopher Baker, a mi director académico, José Cataldo, a Gustavo Necco y a Jon Wieringa, por sus valiosos aportes y discusiones sobre distintos aspectos presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C. Wieringa, J., Guidance on Metadata and Homogenization, WMO, 2003.
- Brabson, B.B. and Palutikof, J.P., 2000, Tests of the Generalized Pareto Distribution for Predicting Extreme Wind Speeds. *J. Appl. Meteor.*, 39, 1627–1640.
- Celemín, A.H., <http://meteo-practica.blogspot.com/2011/10/mar-de-nubes-en-el-centro-de-argentina.html>, 2011.
- Celemín, A.H., *Meteorología Práctica*, Edición del autor, Mar del Plata, Argentina, 1984.

- CIRSOC, Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones, CIRSOC 102, 2005.
- Cook, N.J., *The designer's guide to wind loading of structures*, Building Research Establishment, UK, 1985.
- Durañona, V., *Tesis de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada: "Evaluación de túneles de viento"*, Facultad de Ingeniería, UDELAR, 2003.
- Durañona, V., Wind impact on Uruguay: vulnerability to extreme winds and estimation of their risk, *13th International Conference on Wind Engineering*, Amsterdam, 2011.
- Durañona, V., Clima de vientos extremos de Uruguay y su efecto en la selección y operación de aerogeneradores, III Jornadas de Energía Eólica, Montevideo, Uruguay, 2012a.
- Durañona, V., Digitación, análisis y homogeneización de datos de viento de Carrasco realizados por Facultad de Ingeniería, informe para la DNM, 2012b.
- Durañona, V. y Cataldo, J., Descripción del clima de vientos extremos en el área metropolitana entre los meses de octubre a abril y su relación con la caída de frutos, informe para el Banco de Seguros del Estado, Facultad de Ingeniería, UDELAR, 2007.
- Durañona, V. and Cataldo, J., Analysis of severe storms in Uruguay and their effect on high voltage transmission lines, *Proceedings of the 11th Americas Conference on Wind Engineering*, San Juan, Puerto Rico, 2009.
- Durañona, V. y Perera, G., Extreme wind speed distribution of WSW direction for Montevideo, Uruguay, *Conference Preprints of the 11th International Conference on Wind Engineering*, 2-5 junio 2003, Lubbock, Texas, U.S.A., Volume 1, 229–236, 2003.
- Fisher, R.A. and Tippet, L.H.C., Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample, *Proc. Cambridge Philos. Soc*, 24:180–190, 1928.
- Holmes, J.D., *Wind loading of structures*, Spon Press, USA and Canada, 2nd ed, 2007.
- ISO 4354, 2009. Wind actions on structures, 2nd ed.
- Palutikof, J.P., Brabson, B. B., Lister, D. H. and Adcock, S.T., A review of methods to calculate extreme wind speeds, *Meteorol. Appl.*, 6, 119–132, 1999.
- Palutikof, J.P., Holt, T., Brabson, B.B. and Lister, D., Methods to Calculate Extremes in Climate Change Studies, 2002.
- Simiu and Scanlan, 1986. *Wind Effects on structures: An introduction to wind engineering*, John Wiley & Sons, 2nd ed, NY.
- Wieringa, J., Representativity of wind extremes, *Hydrology of disasters*, 19-40, V.P. Singh, publ. Kluwer, Dordrecht, 1996.
- UNIT 50-84 *Norma para Acción del viento sobre construcciones*, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2^a. Revisión, 1984.
- WMO-N°8, Guide to meteorological instruments and methods of observation, Chapter 5: Measurement of Surface Wind, World Meteorological Organization, draft 7th ed., 2006.