

# REVISIÓN DE VELOCIDADES DE VIENTO EXTREMAS EN TRES LOCALIDADES DEL SUR DE ARGENTINA<sup>1</sup>

Bruno Natalini<sup>2</sup> y Mario Bruno Natalini<sup>3</sup>

**Resumen:** La valoración de la acción del viento sobre un edificio en la etapa de diseño requiere conocer la magnitud de las máximas velocidades de viento a las que estará expuesta la estructura durante su vida útil. En la práctica profesional, esta información se extrae del llamado mapa de vientos, que es parte de los reglamentos nacionales de acción del viento sobre estructuras civiles. En Argentina, el reglamento pertinente es el CIRSOC 102. Si bien fue editado en 2005, el mapa de vientos que trae este reglamento se basa principalmente en información meteorológica del período entre 1970 y 1990. En este trabajo se discute la metodología usada para construir este mapa, a la luz de procedimientos más actualizados desarrollados en los últimos 20 años. Se ilustra la discusión aplicando algunos de estos nuevos procedimientos a registros de tres estaciones meteorológicas de zonas donde el clima está dominado por depresiones y se muestra la conveniencia de actualizar el mapa.

**Palabras claves:** codificación, viento, velocidades extremas.

## REVIEW OF EXTREME WIND SPEEDS IN THREE SITES OF SOUTHERN ARGENTINA

**Abstract:** The assessment of wind loads on a building during design requires knowing the maximum wind speed to which the structure will be exposed during its lifetime. Practitioners obtain this information from the so-called wind map, which is part of the national codes of practice of wind actions on civil structures. In Argentina, the relevant code is the CIRSOC 102. Although it was edited in 2005, the wind map of this code is based on meteorological data collected between 1970 and 1990. In this paper, the methodology used to build this map is discussed in view of more up-to-date procedures developed in the last 20 years. The discussion is illustrated by applying some of these newer procedures to records of three meteorological stations located in areas where the climate is dominated by depressions, and the convenience of updating the map is shown.

**Key words:** codification, extreme wind speeds, wind map.

## INTRODUCCIÓN

La valoración de la acción del viento sobre un edificio en la etapa de diseño requiere conocer la magnitud de las máximas velocidades de viento a las que estará expuesto la estructura durante su vida útil. Estas velocidades cuantifican la influencia de lo que en la literatura se conoce como “wind climate”, que es un término que no tiene todavía una traducción establecida en el idioma español, pero que se refiere a la parte del clima que tiene que ver con el viento. Dado que clima es la descripción estadística de un conjunto de variables meteorológicas tales como temperatura, presión atmosférica, humedad, etc., a lo largo de períodos de tiempo en la escala de décadas, “wind climate” es la descripción estadística de la velocidad de viento en períodos de tiempo de ese orden.

La influencia del “wind climate” se caracteriza por una velocidad de referencia, que es función de la localización geográfica del proyecto. En adelante se referirá a esta velocidad como Velocidad Básica de Diseño (VBD). Usualmente esta aparece en los reglamentos de acción del viento sobre las construcciones en lo que se conoce como mapa de vientos. Esta velocidad se puede especificar de diversas maneras. Por ejemplo, el reglamento CIRSOC 102 (INTI, 2005) lo hace como “velocidad de ráfaga de 3 segundos, en m/s, sobre terreno

<sup>1</sup> Artículo recibido el 13 de agosto de 2013 y aceptado para publicación el 14 de octubre de 2013.

<sup>2</sup> Profesor Adjunto, Universidad Nacional del Nordeste, Av. Las Heras 727, 3500 Resistencia, Chaco, Argentina. E-mail: bnatalini\_2000@yahoo.com.ar.

<sup>3</sup> Profesor Titular, Universidad Nacional del Nordeste, Av. Las Heras 727 (3500) Resistencia, Chaco, Argentina. E-mail: mnatalini@ing.unne.edu.ar.

para categoría de exposición C (campo abierto) y asociadas con una probabilidad anual 0.02 (período de recurrencia de 50 años)". La versión de 1994 del mismo reglamento lo hacía como "velocidad correspondiente al promedio de velocidad instantánea (pico de ráfaga) sobre intervalos de 3 segundos, en exposición abierta, a una altura normal de referencia de 10 m que tiene un período de recurrencia de un año"; es decir casi de la misma manera pero con diferente probabilidad de ser excedida. El código Eurocode (CEN, 2002) usa la "velocidad característica media de viento de diez minutos de duración, independiente de la dirección y época del año a diez metros por encima del suelo en terreno de campo abierto con vegetación baja tal como pasto y obstáculos aislados con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos"; siendo la probabilidad de excedencia anual en este caso igual a 0.02.

Independientemente del formato, los mapas de viento se construyen a partir de mediciones de velocidades de viento en estaciones meteorológicas. Esto hace que se puedan introducir errores durante el proceso de medición o al procesar los datos. El proceso de medición de velocidades de viento, sea cual fuere el procedimiento elegido, como cualquier proceso de medición, siempre tendrá asociada una incertidumbre, para la cual existen procedimientos estándares para cuantificarla, pero para ello, el sistema implementado debe ser apropiado. Aparte de esta incertidumbre, hay errores que aparecen al aplicar hipótesis que no siempre se cumplen o simplemente por fallas físicas del sistema de medición. Es la posible existencia de este tipo de errores la que se discutirá en este trabajo. Por otra parte, se tiene que existen varios procedimientos de determinación de valores extremos, algunos de los cuales son más adecuados que otros para inferir el valor de esa variable aleatoria que es la VBD, y que tienen asociados distintos niveles de error que son inherentes a cada procedimiento y que se originan en las diferentes hipótesis simplificativas que se aplican al formular cada procedimiento. En este artículo se incluye una discusión actualizada de estos métodos.

Para los ingenieros estructurales, la precisión de la determinación de la VBD es particularmente crítica. Cook et al. (2011) señalan que la incertidumbre de la VBD se combina con las incertidumbres de los coeficientes de presión, el factor de exposición, el factor de ráfaga y los errores de modelado. Como estos errores se combinan como suma de cuadrados y dado que el efecto de la incertidumbre de la VBD se duplica porque aparece en la ecuación de carga como una presión, la contribución de la incertidumbre de la velocidad de viento a la incertidumbre de la carga de diseño resulta en el rango de 70-80 % de la incertidumbre total de la carga.

El mapa de vientos del reglamento CIRSOC 102 es el resultado del trabajo de un grupo de expertos de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, que se remonta a principios de la década del '70 (Riera y Reimundin, 1970). El primer mapa de vientos, que figuró hasta la edición 1994, se hizo sobre la base de los trabajos de Riera, Viollaz, y Reimundin (1977) y Viollaz, Riera y Reimundin (1975). El mapa actual, que se propuso con la revisión de 1991, se basa en dos documentos: un reporte de Viollaz (1997), donde se calculan las Velocidades Básicas en aproximadamente 70 estaciones meteorológicas en Argentina, y un reporte de Altinger de Schwarzskopf (1997), donde se proponen las isolíneas que serían compatibles con los valores establecidos por Viollaz y con la física de los procesos atmosféricos sobre Argentina. En opinión de los autores del presente trabajo, la preparación de este mapa se hizo de la mejor manera posible para el estado del arte en la época, con los recursos materiales y humanos disponibles en Argentina.

Sin embargo, en los últimos años aparecen nuevos factores que permitirían mejorar significativamente la calidad del mapa de vientos. Existen nuevos procedimientos para estimar la VBD con mejor precisión, hay más información meteorológica que la tomada en cuenta por Viollaz (1997), y hay una nueva generación de académicos en condiciones de revisar una masa de datos disponible en distintos puntos de un territorio muy extenso.

En este trabajo se hace una revisión de los procedimientos de determinación de velocidades de viento extremas, sus ventajas y desventajas, y se presenta como ejemplo lo que ocurre al aplicar distintos métodos a los datos de tres estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, situadas en zonas donde el clima está dominado por depresiones extratropicales: Comodoro Rivadavia, Viedma y Santa Rosa. Se muestra como en todos los casos la variabilidad con los diferentes métodos es muy significativa.

## CONCEPTOS BÁSICOS

En esta sección se presentan brevemente algunos conceptos básicos necesarios para la discusión sobre VBD. Está más allá del alcance de este artículo desarrollar estos conceptos en detalle, que alternativamente se pueden encontrar en Cook (1985) o Holmes (2007), entre otros.

La velocidad de viento es una magnitud vectorial de comportamiento aleatorio. Una descripción completa de la velocidad de viento requiere conocer la magnitud de las componentes de la velocidad, a lo largo del tiempo, respecto de un sistema de referencia. Estrictamente, la velocidad instantánea es la velocidad medida en un intervalo de tiempo que tiende a cero. Como todo anemómetro tiene una inercia finita, cuando se habla de registros de velocidad, se trata de la velocidad media durante algún intervalo de tiempo, llamado tiempo de integración,  $\tau$ , tal que, por ejemplo,

$$\bar{u}_\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau u(t) dt \quad (1)$$

donde  $\bar{u}_\tau$  es la velocidad media en la dirección del eje  $x$ , durante el intervalo de tiempo  $\tau$ , y  $u(t)$  es la velocidad instantánea, en la dirección del eje  $x$ , en el instante  $t$ . El tiempo de integración de los registros de un anemómetro ultrasónico del tipo de los actualmente usados para investigación está en el orden de 1/32 de segundo. Se acepta comúnmente, quizás de forma demasiado complaciente, que los anemómetros de copa de cualquier marca, tipo y condición de mantenimiento, miden ráfagas de tres segundos. A partir de los trabajos clásicos de van der Hoven (1957), se acepta que velocidades medias sobre tiempo de integración entre 10 minutos y una hora son representativas del comportamiento del “wind climate”, sin que estén contaminadas por fluctuaciones debidas a la rugosidad del terreno. Los trabajos de van der Hoven introdujeron una de las principales hipótesis sobre las que descansa el edificio conceptual del análisis de cargas de viento sobre estructuras: para establecer la carga de diseño sobre un edificio, la influencia del clima puede evaluarse separadamente de la influencia de la capa límite atmosférica (Atmospheric Boundary Layer, ABL) y de las características del edificio.

Para construir un mapa de vientos, se parte de una colección de datos de velocidades de viento en distintas localizaciones geográficas. Para que los datos sean comparables se debe definir una altura sobre el terreno donde se realizan las mediciones, un tipo de terreno circundante y un tiempo de integración. Como se dijo anteriormente, estas variables están definidas de diferentes maneras en el CIRSOC 102 y en el Eurocode, y se pueden encontrar otras definiciones en otros reglamentos. Cuando algunos de los datos disponibles están medidos en condiciones diferentes a las deseadas, debe aplicarse algún modelo micrometeorológico para inferir el valor buscado. Debe notarse que los modelos micrometeorológicos dependen del tipo de fenómeno climático que causa el viento, siendo los más usados aquellos que describen las tormentas más estudiadas en la literatura: los vientos fuertes en estabilidad neutra, tales como los causados por ciclones extratropicales. Es importante tener siempre presente estas características fundamentales, porque se verá más adelante que la mayor o menor heterogeneidad de la información meteorológica disponible requerirá introducir un conjunto de hipótesis para hacer comparables los datos, que no son explícitas para los que no son expertos.

Una vez definidos los tres factores antes mencionados (tiempo de integración, altura y terreno), es posible determinar con buena precisión la función de distribución de probabilidad de velocidad de viento, a partir de unos pocos años de registros. Ahora bien, los instrumentos más usados en estaciones meteorológicas para medir velocidad de viento son los anemómetros de copa, colocados horizontalmente, junto con una veleta que indica la dirección cardinal de viento. Es decir que se mide la componente horizontal de la velocidad de viento, la cual varía continuamente de dirección. La función de distribución de probabilidades de esta variable aleatoria, es lo que se conoce como distribución de origen (“parent distribution”). Sintetizando, la distribución de origen es la distribución de probabilidades de la variable aleatoria  $V(\tau, z)$ , siendo:

$$V(\tau, z) = \{ \text{velocidad media horizontal de duración } \tau, \text{ a la altura } z \} \quad (2)$$

La correspondiente función de distribución acumulada (“cumulative distribution function”, CDF) representa la proporción de tiempo que la velocidad de viento está por debajo de un valor dado. El modelo más simple (Davenport, 1968) supone que las velocidades de viento en dos direcciones ortogonales cualesquiera tienen distribución Normal (gaussiana). Bajo esta hipótesis, la distribución de origen es una distribución de Rayleigh. Se ha observado con frecuencia que la distribución de la velocidad en una dirección dada no es Normal, por lo que se logra un mejor ajuste con una distribución de Weibull, de la cual la distribución de Rayleigh es un caso particular.

La distribución de origen es de interés en algunas aplicaciones de ingeniería, como por ejemplo para el análisis de fatiga, pero para el diseño estructural la variable relevante es la velocidad máxima observada  $V_T(\tau, z)$  durante un período de tiempo  $T$ , llamado período de observación. Valores usuales de  $T$  encontrados en reglamentos son 1; 25; 50 y 100 años.

$V_T(\tau, z)$  es una variable aleatoria cuyo comportamiento se puede describir por una función de distribución de probabilidades, o su CDF, que es el objeto de la Estadística de Valores Extremos. Llamando  $P_{V_T}$  a la función de distribución acumulada de  $V_T(\tau, z)$ , y  $P_V$  a la correspondiente a  $V(\tau, z)$ , se cumple que

$$P_{V_T} = (P_V)^N, \quad (3)$$

siendo  $N$  el número de ocurrencias independientes de la variable  $V(\tau, z)$  durante el período  $T$ . Por ejemplo, si se habla de velocidades medias horarias máximas anuales ( $T=1$  año,  $\tau=1$  hora), se observan 8776 valores de  $V$  en un año. Pero estos valores no son independientes entre sí. Davenport (1964) estimó el valor de  $N$  en alrededor de 160 para Gran Bretaña. La dificultad en determinar el valor de  $N$  con suficiente precisión, hizo que la determinación de  $P_{V_T}$  a partir de la distribución de origen no se use actualmente en forma directa, sino mediante alguno de los métodos que se discuten en la siguiente sección.

Para que la ecuación (3) sea válida, debe aceptarse también que cada valor de la muestra es la realización de la misma distribución de origen; o dicho de otra manera, que se han producido a partir del mismo mecanismo climático. Como se verá más adelante, el cumplimiento de esta última hipótesis es objeto de discusiones hasta el día de hoy.

Para un valor dado de velocidad, la función  $P_{V_T}$  nos da la probabilidad de que esa velocidad no sea superada en el período de observación  $T$ . La función

$$Q = 1 - P_{V_T} \quad (4)$$

da la probabilidad de que esa velocidad sea excedida durante el período  $T$  (probabilidad de excedencia). En la literatura se encuentra este mismo concepto presentado bajo la forma de su inversa

$$R = \frac{1}{Q} \quad (5)$$

donde  $R$  es llamado período de retorno.  $R$  se mide en número de períodos  $T$ . Por ejemplo, si el período de observación es anual, para una probabilidad de excedencia (anual) del 2%, el período de retorno es  $1/0.02 = 50$  años.

## MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD BÁSICA DE DISEÑO

La práctica universalmente instalada es estudiar las velocidades de viento anuales, para luego inferir velocidades para otros períodos de observación mediante la relación

$$P_{V_{T_2}} = (P_{V_{T_1}})^{\frac{T_2}{T_1}} \quad (6)$$

donde  $T_1 = 1$  año y  $T_2$  es cualquier otro período. De esta manera se cubren todas las variaciones estacionales. La ecuación (3) es una manera de encontrar la distribución exacta de la variable  $V_T(\tau, z)$ . Este procedimiento tiene la ventaja que se puede aplicar aun disponiendo de pocos años de registros, pero las dificultades encontradas para determinar el valor de  $N$  en cada caso hizo que el método cayera en desuso.

Las alternativas nacieron de la Teoría Asintótica de Distribuciones Extremas, que estudia las formas que toman las distribuciones de valores extremos cuando  $N$  tiende a infinito. Fisher and Tippett (1928) demostraron que cuando  $N$  tiende a infinito,  $P_{V_T}$  tiende a alguna de las tres distribuciones asintóticas que Gumbel (1958) llamó de Tipo I, Tipo II y Tipo III. Von Mises (1936) mostró que las tres formas se pueden reducir a una forma general

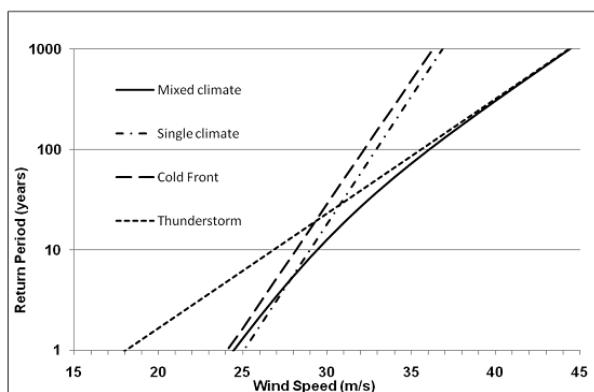
$$P_{V_T} = \exp \left\{ - \left[ 1 - k(V - U)/a \right]^{\frac{1}{k}} \right\} \quad (7)$$

donde  $U$  es el parámetro de localización y  $a$  es el parámetro de dispersión. La ecuación (7) actualmente se conoce como Distribución Generalizada de Valores Extremos (“Generalized Extreme Value Distribution”, GEV). El parámetro  $k$ , llamado factor de forma, determina cual de los tres tipos de distribución representa la GEV en cada caso particular. Cuando  $k < 0$  representa una Tipo II, si  $k > 0$  representa una Tipo III, y si  $k = 0$  representa una Tipo I.

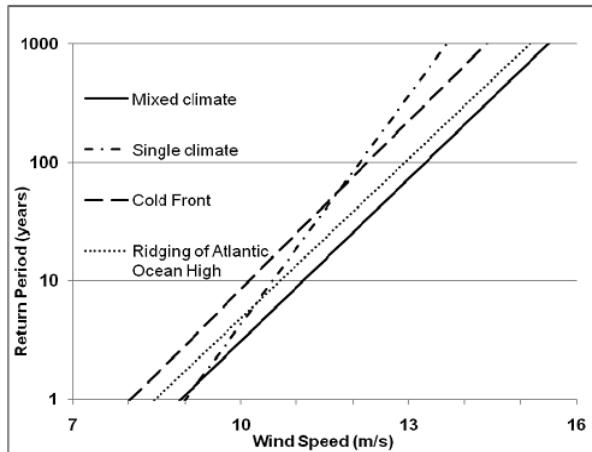
### Climas mixtos

Para elegir un método apropiado para la determinación de  $P_{V_T}$  debe distinguirse primero si el clima en el lugar es simple o mixto. Más apropiadamente, dado que se está interesado en los valores máximos, si los mecanismos climáticos que producen esos máximos, es decir los tipos de tormenta, son varios o uno solo. Los tipos de vientos más estudiados y de los cuales existe más información disponible son aquellos causados por ciclones extratropicales (depresiones), tales como las características tormentas de invierno (“winter gales”) en Europa, o ciclones tropicales en la etapa madura. Estos casos se conocen en la literatura como sistemas EPS (“Extended Mature Pressure System”). Se forman frentes cuyo tamaño es del orden de magnitud de varios centenares de kilómetros y tardan varias horas en pasar por un punto. El flujo de la ABL es tal que la velocidad media es horizontal y la turbulencia en la ABL se debe únicamente a la agitación mecánica producida por la rugosidad superficial. Un ejemplo típico de clima simple dominado por depresiones (o al menos generalmente aceptado de esta manera) es Gran Bretaña. La situación es diferente cuando se tiene por ejemplo que los mecanismos dominantes son los fenómenos convectivos, como en el caso de las tormentas eléctricas. En estos casos las tormentas son más localizadas, pudiendo afectar áreas desde unos pocos centenares de metros hasta algunas decenas de kilómetros. Típicamente la duración de una tormenta convectiva está en el orden de los 10 minutos, hay componentes verticales importantes y la turbulencia de la ABL se debe a la agitación mecánica y a convección. Gomes y Vickery (1978) propusieron un modelo sobre el cual se basan los procedimientos usados actualmente cuando se tiene climas mixtos. La determinación de la VBV en climas mixtos es un tema que excede el alcance del presente trabajo, el cual se refiere a climas simples. Para una tratamiento actualizado de este tema ver Riera y Nanni (1989), Cook, Harris y Whiting (2003), Harris (2009) y Kruger et al. (2012).

Sin embargo es necesario detenerse a ampliar un rasgo que tienen los climas mixtos porque afectarán las conclusiones de este trabajo. La Figura 1 muestra cuatro distribuciones de valores extremos de ráfagas máximas anuales en Uitenhage, Sudáfrica (Kruger et al., 2012). Las curvas se obtuvieron a partir de 11 valores. De esos 11 valores, la mayoría fue producto del pasaje de frentes fríos; pero precisamente los tres valores más extremos los causaron tormentas eléctricas. El resultado es que la curva de distribución de la VBV obtenida al aplicar el método de Gomes y Vikery (línea llena) da valores significativamente más altos que los que se obtendrían de aplicarse un método para clima simple (guiones y puntos) para períodos de retorno por arriba de los 100 años. En las figuras se pueden observar también las distribuciones correspondientes a cada mecanismo climático por separado. La misma tendencia se puede ver en la Figura 2, que corresponde a distribuciones de valores extremos de velocidades medias horarias máximas anuales en Malmesbury, Sudáfrica (Kruger et al., 2012). En este caso los extremos observados se deben al pasaje de frentes fríos (6 casos sobre 17) y a fuertes corrientes provenientes de celdas de alta presión (“ridging”) originados en el sistema de alta presión del océano Atlántico. Nuevamente se pone de manifiesto que tratar un clima mixto como si fuera simple lleva a una significativa subestimación de la VBV.



**Figura 1: Distribución de velocidad de ráfaga máxima anual en Uitenhage (Kruger et al., 2012).**



**Figura 2: Distribución de velocidad de viento media horaria máxima anual en Malmesbury (Kruger et al., 2012).**

### Climas simples

#### Métodos para máximas sub-anuales

Dentro de los métodos para climas simples, hay métodos para cuando se dispone de registros de máximas sub-anuales, por ejemplo, máximas mensuales o diarias, y para cuando sólo se dispone de la máxima anual. En la determinación de valores extremos, el número de muestras disponibles es un valor crítico, por lo que siempre es preferible aplicar un método de máximas sub-anuales, aumentando así el número de muestras disponibles para el cálculo. Los métodos de extremos sub-anuales más usados actualmente son el IMIS (“Improved Method of Independent Storms”) formulado originalmente por Cook (1982) y mejorado por Harris (1999), y el POT (Peak Over Threshold Method), derivado de los trabajos de Pickands (1975). El método POT aparece también citado en la literatura como CME (“Conditional Mean Exceedance Method”), y GPD/GEV (“Generalized Pareto Distribution/Generalized Extreme Value Distribution”). Ambos métodos, IMIS y POT, requieren contar con registros continuos y completos, no necesariamente de principio a fin, pero al menos por cada año. El uso del método POT en la determinación de la VBD ha sido severamente objetado en los últimos años por Harris y Cook y defendido por Simiu y Holmes, entre otros. La diferencia entre los métodos IMIS y POT es por un lado conceptual. El IMIS parte de la premisa que la distribución de extremos  $P_{V_T}$  es de Tipo I, mientras que el POT deja  $k$  como parámetro de ajuste, lo que resulta en algunos casos en que  $P_{V_T}$  tiene distribución de Tipo III. La objeción más seria al POT es que en algunos casos, al aplicar este procedimiento se obtienen distribuciones diferentes para las presiones dinámicas y las velocidades, lo que viola un axioma de la Teoría Asintótica de Distribuciones Extremas. En términos prácticos, los resultados inferidos con uno y otro método divergen para períodos de retornos altos, del orden de los 1000 años. En una primera aproximación, discutir sobre períodos de retornos de este orden podría parecer absurdo, pero la tendencia actual es a usar diseño por estados límites, ya sea en forma explícita como lo propone Kasperski (2009), o en forma implícita mediante coeficientes de seguridad. Kasperski (2009) propone períodos de retorno de hasta 2000 años para evaluar el Estado Límite Último para estructuras con funciones importantes después de un desastre, tales como hospitalares. El ASCE 7-10 (2010), que es el código sobre el que se basa el proyecto de actualización del reglamento CIRSOC 102 en preparación, establece períodos de retorno de 300, 700 y 1700 años, de acuerdo al destino de la edificación. En estos casos, la elección entre POT o IMIS deja de ser trivial, puesto que la distribución de Tipo III tiene un límite superior, por lo que conduce a valores de diseño más bajos. La discusión está actualmente abierta.

#### Métodos para máximas anuales

Cuando no se dispone de registros sub-anuales con la suficiente continuidad para aplicar IMIS o POT, se puede aplicar alguno de los métodos para extremos anuales simples, pero primero debe formularse alguna hipótesis sobre qué tipo de distribución tiene  $P_{V_T}$ . Una vez formulada la conjectura, el problema se reduce a la determinación de los parámetros de la distribución. De acuerdo a Harris (2009) no parece existir ejemplos genuinos de viento con distribución extrema de Tipo II. Alrededor de la década del '70 se discutió mucho sobre

el uso de la distribución de Tipo II, porque en muchos casos parecía existir un mejor ajuste a esta distribución; y dado que la Tipo II produce valores más conservadores, por seguridad se adoptó en varios reglamentos, entre ellos las primeras ediciones del CIRSOC 102 (Riera et al., 1977). De acuerdo a Cook (1985), Gomes y Vickery (1978) demostraron que la aparente convergencia a una distribución de Tipo II aparece cuando se procesan datos correspondientes a climas mixtos como si fueran simples. Por otra parte, Gumbel demostró que si la distribución de origen,  $P_x$ , de una variable aleatoria cualquiera  $x$  es exponencial, tal que,

$$P_x = 1 - \exp[-h(x)] \quad (8)$$

donde  $h(x)$  es una función positiva de  $x$  que se incrementa con  $x$  más rápido que el  $\ln(x)$ , es decir que

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left( \frac{\ln(x)}{h(x)} \right) = 0 \quad (9)$$

entonces la distribución asintótica de valores extremos será de Tipo I. La distribución de Weibull es un caso de distribución exponencial en el cual

$$h(x) = x^\omega \text{ con } \omega > 1 \quad (10)$$

Algunos autores argumentan sin embargo que lo que determina la forma de la distribución de valores extremos máximos es la cola del lado derecho de la distribución de origen; y como precisamente las colas representan eventos raros, es esta la parte menos definida de la distribución, por lo que podría ser posible que  $P_{V_T}$  tuviese distribución de Tipo III. Los intentos por ajustar valores extremos simples a la GEV representada por la ecuación (7) han sido cuestionados por las mismas razones que el método POT, pero con el agravante de sufrir severos problemas de convergencia, por lo que actualmente, si se va a aplicar un método de extremo simple, se toma como hipótesis que la distribución es de Tipo I.

Si se acepta que  $P_{V_T}$  es de Tipo I, la ecuación (7) se reduce a

$$P_{V_T} = \exp \left\{ -\exp \left[ -(V_T - U)/a \right] \right\} \quad (11)$$

donde el parámetro de localización  $U$  es la moda y  $1/a$  es llamado dispersión. El problema de la determinación de la VBD es por lo tanto cómo determinar los parámetros moda y dispersión en la ecuación (11) a partir de una muestra de extremos anuales.

De acuerdo a Cook (1985) se necesita por lo menos 20 años de registros para obtener estimaciones confiable (recuérdese que hay que esperar un año para agregar un solo valor a la serie); y no deberían usarse estimaciones a partir de extremos anuales si no se tienen por lo menos 10 años de registros. Cuando se trata de estimar parámetros con un número limitado de valores, la precisión del método de estimación se vuelve crucial. La calidad de un estimador se mide por su mayor o menor sesgo (“bias”) y por su eficiencia, cuantificada por su varianza. Idealmente, un estimador debería ser insesgado (“unbiased”) y con la menor varianza posible.

La forma más rápida en uso de estimar los parámetros es mediante el Método de los Momentos. En él se estiman los parámetros mediante las siguientes relaciones:

$$U \approx \mu - 0.5772a \quad (12)$$

$$a \approx \frac{\sigma\sqrt{6}}{\pi}, \quad (13)$$

donde  $\mu$  y  $\sigma$  son el valor medio y la desviación media de la muestra, respectivamente. Es este procedimiento el que usó Viollaz (1997) para el actual mapa de vientos de Argentina. La desventaja del método es que el sesgo y la eficiencia son difíciles de evaluar (Lieblein, 1954), por lo que en las últimas décadas las preferencias se volcaron hacia procedimientos provenientes de la Estadística de Orden.

El método propuesto originalmente por Gumbel (1958) y que en este trabajo llamaremos Gumbel Clásico, es un método gráfico en el cual: a) la serie de datos se ordena en orden creciente; b) se asigna un rango,  $m$ , a cada dato, correspondiéndole 1 a la velocidad más baja; c) para cada dato se estima un valor de probabilidad de no ser excedido aplicando:

$$p \approx \frac{m}{n+1} \quad (14)$$

siendo  $n$  la dimensión de la muestra; d) se calcula un valor de la variable reducida

$$y = \frac{V_T - U}{a} \quad (15)$$

mediante

$$y = -\ln(-\ln(p)) \quad (16)$$

e) se grafica  $y$  versus  $V_T$  y se ajusta una recta. La ordenada al origen de esa recta es la moda,  $U$ , y la pendiente es la dispersión,  $1/a$ . Originalmente el ajuste se hacía trazando la recta "a ojo" sobre papel, pero rápidamente se generalizó el uso de regresión lineal. El método de Gumbel Clásico se ha usado mucho para estimar la Velocidad Básica de Viento en el pasado; sin embargo la estimación por este procedimiento es sesgada, y actualmente, en palabras de Harris (2001) "Hopefully, no one would seriously consider this method for use now...".

Gringorten (1963) propuso una modificación muy simple al método de Gumbel Clásico, para reducir el sesgo. Consiste en reemplazar la estimación de la probabilidad  $p$  en la ecuación (14) por

$$p \approx \frac{m - 0,44}{n + 0,12} \quad (17)$$

y proceder luego de idéntica manera al método de Gumbel Clásico. Este procedimiento es válido sólo si la distribución es de Tipo I.

Lieblein (1954, 1974) propuso el método BLUE ("Best Linear Unbiased Estimator") que es insesgado y de mínima varianza. El BLUE obtiene los parámetros de la distribución multiplicando los datos por "pesos" y sumándolos. Lieblein desarrolló tablas de pesos para series de hasta  $n = 24$ , que se pueden encontrar en Cook (1985), donde hay también ejemplos de aplicación y un procedimiento para cuando  $n > 24$ . El método es fácil de aplicar, su eficiencia puede determinarse con precisión y Lieblein mostró que es mucho más eficiente que otros estimadores, incluido el Método de los Momentos.

Harris (1996) propuso un método insesgado equivalente en eficiencia al BLUE, pero que puede codificarse en un programa de computadora, lo que hace más cómodo el procesamiento de colecciones de datos provenientes de diferentes estaciones meteorológicas. Harris llamó a este método el método de Gumbel Modificado ("Modified Gumbel").

### **Precondicionamiento**

Algunos autores prefieren aplicar los métodos mencionados en la sección anterior a la variable elevada a algún exponente. En el contexto del análisis de velocidades de extremas de viento, a esta operación se le llama precondicionamiento de la variable. El precondicionamiento tiene que ver con lo que Harris (2009) señaló sobre que es axiomático que la distribución de la variable que resulta de elevar  $V(\tau, z)$  a cualquier exponente,  $\omega$ , mayor que cero, será diferente a la distribución de  $V(\tau, z)$  (que es la distribución de origen). Y también es una axioma que si la distribución de valores extremos máximos de  $V(\tau, z)$  (es decir la distribución de  $V_T(\tau, z)$ ) tiende a una Tipo I, la distribución de valores extremos máximos de  $V^{\omega}_T(\tau, z)$  también tenderá a una Tipo I. Como se explicó antes, ésta es la base del principal argumento contra el método POT.

La convergencia de la función  $P_{V_T}$  hacia la distribución asintótica de Tipo I depende del valor de  $N$ . Si la distribución de origen es una distribución de Rayleigh, aún con  $N = 10000$  habría una sobreestimación de la VBD causada por la baja tasa de convergencia. Recuérdese que para un período de observación anual,  $N$  es del

orden de 150. Cook (1985) mostró que este problema se puede sortear analizando la presión dinámica derivada de  $V_T(\tau, z)$  o directamente analizando  $V_T^2(\tau, z)$ . Cook (1985) explicó que aceptando que la distribución de origen es de Rayleigh, entonces la variable  $V^2(\tau, z)$  tendrá distribución Exponencial, que también es un caso particular de distribución de Weibull, y por lo tanto sus extremos tienden a una Tipo I, pero con una tasa de convergencia muy rápida; de manera que para  $N = 100$  se logra una convergencia muy buena. Por esta razón, el código Británico de 1995 establecía como procedimiento estándar elevar al cuadrado los valores de la muestra de valores extremos.

Harris (1996) revisando la derivación de la distribución asintótica de Tipo I, según Cramer (Gumbel, 1958), a partir de una distribución de origen de tipo exponencial en el sentido de las ecuaciones (8), (9) y (10), llamó la atención sobre el sesgo que trae aparejado el truncamiento de una serie de Taylor en uno de los pasos, si  $N$  no tiende a infinito. Si la distribución de origen es de Weibull, este sesgo se elimina completamente si en lugar de trabajar con los extremos de la variable  $x$  (ver ecuación (10)), se trabaja directamente con los extremos de la variable  $x^\omega = h(x)$ . Como en Gran Bretaña el exponente de la distribución de Weibull en diferentes estaciones está entre 1.7 y 2.5, hace que un valor de  $\omega = 2$  sea un valor representativo global que explica también la ventaja de trabajar con el cuadrado de las velocidades cuando de Gran Bretaña se trata.

Más recientemente, Cook y Harris (2004) propusieron una distribución general penúltima de Tipo I, que en rasgos generales equivale a trabajar con la variable  $V^\omega(\tau, z)$ .

## CALIDAD DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS

Barton y Allsop (2009) llamaron la atención sobre los problemas que encontraron en varios puntos del planeta al verificar la calidad de la información meteorológica utilizada en la predicción de vientos extremos, y calificaron la situación de alarmante. Más recientemente, Lombardo (2012) señaló similares inconsistencias pero referido a los datos en USA. En opinión de los autores del presente trabajo, la mayoría de estas observaciones son pertinentes al caso de Argentina. Riera, Viollaz y Reimundin (1977), cuando se preparó el primer mapa de viento para el CIRSOC 102, ya señalaron la posible existencia de estos problemas. Durañona (2012) los documentó en el caso de Uruguay. Riera y Nanni (1989) también plantearon dudas sobre la efectividad de aplicar modelos cada vez más sofisticados a registros meteorológicos sobre los que no se tiene adecuado control, y propusieron como alternativa el criterio de agrupamiento. Este criterio consiste en agrupar registros de estaciones que están en zonas con características climatológicas similares. Para su correcta aplicación, se precisa un método de análisis objetivo para identificar las zonas con parámetros semejantes. Existen varios métodos de análisis provenientes de la climatología, entre ellos, los que se aplicaron para producir el mapa de vientos extremos de Sudáfrica, que se pueden consultar en Kruger et al. (2012).

Aventurando una lista de los factores que deberían verificarse antes de proceder al procesamiento de datos meteorológicos, citamos:

### Tiempo de integración y continuidad de los registros

En algunas estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), lo que aparece como velocidad media es la media de 10 minutos de duración, más cercana a la hora. Claramente, esta no es la media horaria; y si se desea determinar extremos de media horaria, se deben aplicar factores de corrección. Debe notarse también que bajo esta modalidad se registran 1/6 de los máximos de 10 minutos de duración. Cabe preguntarse qué ocurre con los otros 5/6. Si en el lugar las tormentas de tipo convectivo son relevantes, la probabilidad de no registrar las velocidades medias máximas supera a la probabilidad de registrarlas, en estos casos.

El mapa de viento de Argentina se hizo en base a velocidades de ráfaga de 3 segundos, dado que la media horaria no es adecuada para derivar las velocidades extremas que se producen durante tormentas convectivas (Riera et al., 1977). Al leal saber y entender de los autores de este trabajo, no existen pruebas de que lo que el SMN reporta como picos de ráfaga corresponda efectivamente a tiempos de integración de 3 segundos. Además, existen estaciones donde los registros no son continuos, por lo que aun cuando los instrumentos midiesen ráfagas de tres segundos, habría que aplicar factores de corrección para tener en cuenta los máximos no registrados.

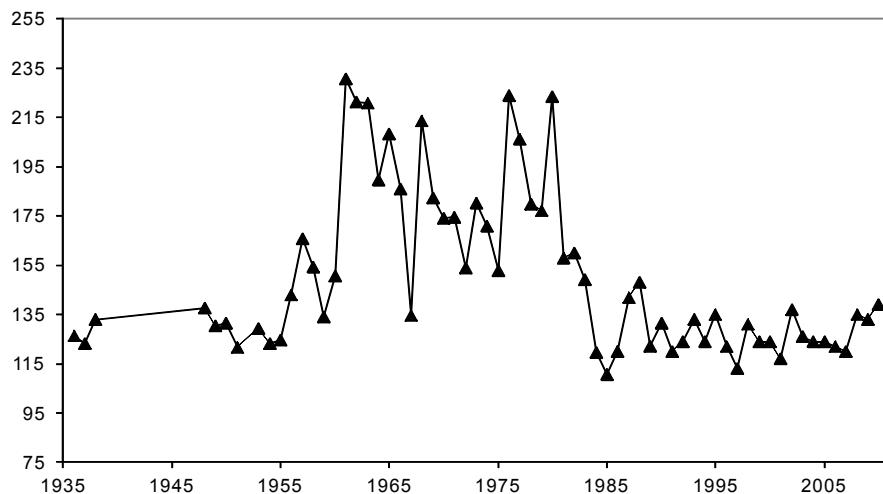
### Exposición

Los anemómetros del SMN están a 10 m de altura, generalmente en aeropuertos, por lo que la categoría del terreno es de campo abierto. Sería conveniente verificar caso por caso que estas condiciones se cumplen. La

verificación de la categoría de exposición, con la disponibilidad de imágenes satelitales que hay hoy en día, no presenta mayores dificultades. Pero la verificación de la altura, o la presencia de edificios o árboles cercanos requieren una constatación en el lugar.

### **Historia de las condiciones de operación**

Las visitas a las estaciones dan también la oportunidad de reunir información relevante sobre las condiciones de operación a lo largo de los años. Se debería registrar los cambios de emplazamiento de los anemómetros, los cambios en los equipos de medición, la existencia y condiciones de funcionamiento de equipos generadores de electricidad de emergencia, los cambios en los protocolos de medición, y todo detalle que pueda explicar variaciones en el comportamiento de las series, tal como las que se observan en la Figura 3, entre los años 1961 y 1980.



**Figura 3: Picos de ráfaga máximos anuales de velocidad de viento, en km/h, en la estación meteorológica de Comodoro Rivadavia, Provincia de Chubut, Argentina.**

### **EJEMPLOS**

El mapa que aparece en la Figura 1 A de la última edición del CIRSOC 102 (2005) se hizo a partir de las determinaciones de la VBD en alrededor de 70 puntos del territorio nacional donde hay estaciones del SMN. La determinación se hizo para: “velocidad de ráfaga de 3 segundos, en m/s, sobre terreno para categoría de exposición C (campo abierto) y asociadas con una probabilidad anual 0.02 (período de recurrencia de 50 años)”. Viollaz (1997) ajustó una distribución de Tipo I, aplicando el Método de los Momentos, a series de valores máximos anuales, registrados principalmente entre 1967 y 1990. Los valores del mapa no son los que resultan de usar la moda y dispersión calculados localmente, si no de estimar primero una desviación estándar,  $\sigma$ , global para todo el país, para luego calcular un  $\sigma$  promedio entre el local y el global; y con este valor estimar una moda y una dispersión que son las que se utilizaron finalmente. Es un criterio vagamente emparentado con el de agrupamiento.

En las Tablas 1 a 3 se presentan valores de picos de ráfaga con probabilidad de excedencia anual 0.02, calculados a partir de las mismas series que usó Viollaz (1997) aplicando el Método de los Momentos, el Método de Gumbel Clásico y el BLUE de Lieblein, a las series de velocidades y a las series de velocidades elevadas al cuadrado (con precondicionamiento), en Comodoro Rivadavia (Provincia de Chubut), Viedma (Provincia de Río Negro) y Santa Rosa (Provincia de La Pampa). Se eligieron estas localidades por estar situadas en una zona donde las velocidades máximas están dominadas por depresiones (Altinger de Schwarzkopf, 1997), y por lo tanto la aplicación de métodos para climas simples sería una buena aproximación. También se incluyen en la tabla los valores calculados sobre las series actualizadas hasta 2010.

**Tabla 1: Pico de ráfaga con probabilidad de excedencia anual 0.02 calculado con diferentes procedimientos a partir de mediciones en Comodoro Rivadavia, en m/s.**

<b>Comodoro Rivadavia</b>				
Método	Sin precondicionamiento		Con precondicionamiento	
	1936-1990	1936-2010	1936-1990	1936-2010
Momentos	<b>69.4</b>	65.3	66.6	63.4
Gumbel Clásico	71.5	66.4	68.0	64.0
Lieblein	68.1	60.7	<b>64.3</b>	58.7

**Tabla 2: Pico de ráfaga con probabilidad de excedencia anual 0.02 calculado con diferentes procedimientos a partir de mediciones en Viedma, en m/s.**

<b>Viedma</b>				
Método	Sin precondicionamiento		Con precondicionamiento	
	1970-1986	1970-2010	1970-1986	1970-2010
Momentos	<b>63.8</b>	56.4	59.1	53.6
Gumbel Clásico	68.5	58.5	62.2	55.1
Lieblein	67.5	57.3	<b>60.0</b>	52.8

**Tabla 3: Pico de ráfaga con probabilidad de excedencia anual 0.02 calculado con diferentes procedimientos a partir de mediciones en Santa Rosa, en m/s.**

<b>Santa Rosa</b>				
Método	Sin precondicionamiento		Con precondicionamiento	
	1959-1990	1959-2010	1959-1990	1959-2010
Momentos	<b>53.3</b>	49.6	52.3	48.9
Gumbel Clásico	55.7	51.1	52.8	48.9
Lieblein	51.5	47.3	<b>47.7</b>	43.5

Se observa en todos los casos que no precondicionar la variable lleva a una sobreestimación, sea cual sea el método aplicado, lo que está de acuerdo con la teoría. El método de Gumbel Clásico da siempre los valores más altos, pero debe recordarse que esta es una estimación sesgada. La observación más importante es que de acuerdo a la revisión bibliográfica, la mejor estimación se logra con el BLUE de Lieblein aplicado a la variable precondicionada; y esta estimación arroja en todos los casos valores menores. En términos de carga de diseño (proporcional al cuadrado de la VBD), la sobreestimación introducida al usar el Métodos de los Momentos sin precondicionar la variable, es de de 16.5% en Comodoro Rivadavia, 13.1 % en Viedma y 24.9% en Santa Rosa. Es notable la reducción que se alcanza al incluir los registros de los últimos veinte años. En estos casos la sobreestimación es de 39.8% en Comodoro Rivadavia, 46.0% en Viedma y 50.1% en Santa Rosa.

Dado estos resultados, está claro que existe la posibilidad de reducir muy significativamente las cargas de diseño invirtiendo recursos a investigación en el área de análisis de velocidades extremas de viento. Debe señalarse categóricamente que no debe concluirse de los datos aquí presentados que podría formularse un nuevo mapa simplemente reprocesando la información e incluyendo los nuevos registros disponibles. Disminuir cargas de diseño es una operación que debe hacerse con mucho cuidado, dado que lo que está en juego es la seguridad de personas y bienes. Es esperable que las cargas disminuyan al incluir nuevos datos, al precondicionar la variable y al usar métodos insesgados de mínima varianza; pero también es esperable un incremento si se usan métodos para climas mixtos, tal como muestran las Figuras 1 y 2. Además, en tanto no se constate la calidad de los datos estación por estación, la validez de cualquier resultado que se obtenga va a ser cuestionable. La caracterización de la calidad de los datos es una tarea que ya se está realizando en Uruguay (Durañona, 2013) y comienza a hacerse en el nordeste de Argentina.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una revisión de procedimientos de determinación de velocidades de viento máximas para su uso en códigos. En este primer paso la revisión se orientó a métodos para climas donde los extremos son causados por un solo mecanismo climático, que se admite es la situación en la parte menos habitada de nuestro país. Es intención de los autores avanzar luego a los procedimientos para climas mixtos.

Se observa que el mapa de vientos actualmente en uso en el reglamento argentino CIRSOC 102 se hizo a partir de ajustar una distribución de Tipo I a velocidades máximas anuales de picos de ráfaga, usando el Método de los Momentos, y aplicando una idea que sugiere el criterio de agrupamiento, aunque estuvo lejos de aplicarse con el rigor necesario. Para exemplificar las variaciones que podrían esperarse si se aplicaran otros procedimiento, se tomaron los registros que usó Viollaz (1997) y se recalcularon las Velocidades Básicas de Viento. Se mostró que de aplicarse el BLUE y precondicionando la variable, las cargas de diseño se reducirían sensiblemente. También se recalcularon los valores incluyendo los registros de los últimos 20 años, lo que redujo aun más los valores estimados de la VBD.

Los autores del presente trabajo juzgan que en vista de los avances que se dieron en las últimas décadas en los procedimientos de determinación de velocidades de viento extremas, y teniendo en cuenta que se dispone de 20 años más de registros meteorológicos que los usados para hacer el mapa de vientos de Argentina actualmente en vigencia, debe actualizarse el mapa, lo que redundará en un importante beneficio para toda la sociedad. Para ello, se propone caracterizar la calidad de los datos y aplicar, siempre que se pueda, las correcciones pertinentes; separar los datos conforme a los tipos de tormentas que causaron las velocidades registradas y usar modelos para climas mixtos; usar siempre que sea posible métodos de pico sub-anuales y agrupar los datos de zonas climatológicamente similares, pero con criterios claros y exhaustivos como los planteados por Riera y Rocha (1998) o Kruger et al. (2012).

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los editores de la revista “Wind and Structures”, quienes autorizaron la reproducción de las figuras que aquí aparecen como Figuras 1 y 2. Este trabajo es resultado de actividades financiadas por la ANPCyT a través del Proyecto PICTO-UNNE 2011-0187, la Universidad Nacional del Nordeste y CONICET.

## REFERENCIAS

- Altinger de Schwarzkopf, M. L. (1997). “Fundamentos Meteorológicos que Sustentan el Trazado de Isolíneas de la Velocidad Básica de Viento  $V_o$  en el Mapa de la Fig. 4 del Reglamento CIRSOC 102”, Informe Interno, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Buenos Aires, Argentina.
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2010). *ASCE 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*, Reston, Virginia, USA.
- Burton, M. D. y Allsop, A. C. (2009). “Predicting design wind speeds from anemometer records: some interesting findings.” *Proceedings of the 11th Americas Conference on Wind Engineering* (CD-ROM), AAWE, San Juan, Puerto Rico.
- Comité Européen de Normalisation (CEN) (2002). “Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions”, Draft prEN 1991-1-4.6:2002, Brussels, Belgium.
- Cook, N. J. (1982). “Towards better estimation of extreme winds”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 9, pp. 295-323.
- Cook, N. J. (1985). “The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures, Part 1: Background, Damage Survey, Wind Data and Structural Classification”, Building Research Establishment Report, London, UK.
- Cook, N. J. y Harris, R. I. (2004). “Exact and general FT1 penultimate distributions of extreme wind speeds drawn from tail-equivalent Weibull parents”, *Structural Safety*, Vol. 26, pp. 391-420.

- Cook, N. J., Harris, R. I. y Whiting, R. (2003). "Extreme wind speeds in mixed climates revisited", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 403–422.
- Cook, R., Griffis, L., Vickery, P. y Stafford, E. (2011). "ASCE 7-10 Wind loads", *Proceedings of the Structures Congress 2011*, ASCE, Las Vegas, Nevada, pp. 1440-1453.
- Davenport, A. G. (1964). "Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 28, pp. 187-196.
- Davenport, A. G. (1968). "The dependence of wind loads on meteorological parameters", *Proc. of the International Research Seminar on Wind effects on Buildings and Structures*, University of Toronto Press, Ottawa, Canada, Vol. 1, pp. 19-82.
- Durañona, V. (2012). "Actualización de la estadística de vientos extremos para Uruguay", *Memorias del II Congreso Latinoamericano de Ingeniería de Viento* (CD-ROM), ALIV, La Plata, Argentina.
- Durañona, V. (2013). "Highest wind gusts in Uruguay: characteristics and associated meteorological events", *Proc. 12th Americas Conference on Wind Engineering (12ACWE)* (CD-ROM), AAWE, Seattle, USA.
- Fisher, R. A. y Tippett, L. M. C. (1928). "Limiting forms of the frequency distributions of the largest or smallest number of a sample", *Proc. Cambridge Philos. Society*, Vol. 24, pp. 180–190.
- Gomes, L. y Vickery, B. J. (1978). "Extreme wind speeds in mixed climates", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 2, pp. 331-344.
- Gringorten, I. I. (1963). "A plotting rule for extreme probability paper", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, pp. 813-14.
- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, New York.
- Harris, R. I. (1996). "Gumbel re-visited - a new look at extreme value statistics applied to wind speeds", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 59, pp. 1-22.
- Harris, R. I. (1999). "Improvements to the 'method of independent storms'", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 80, pp. 1-30.
- Harris, R.I. (2001). "The accuracy of design values predicted from extreme value analysis", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 153-164.
- Harris, R. I. (2008). "The macrometeorological spectrum-a preliminary study", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 12, pp. 2294-2307.
- Harris, R. I. (2009). "XIMIS, a penultimate extreme value method suitable for all types of wind climate", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, pp. 271–286.
- Holmes, J. D. (2007). *Wind Loading of Structures*, Taylor & Francis, New York.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) (2005). "CIRSOC 102: Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones", Buenos Aires, Argentina.
- Kasperski, M. (2009). "Specification of the design wind load - A critical review of code concepts", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, pp. 335-357.
- Kruger, A.C., Goliger, A.M., Retief, J.V. y Sekele, S.S. (2012). "Clustering of extreme winds in the mixed climate of South Africa", *Wind and Structures*, Vol. 15, No. 2, pp. 87-109.
- Lieblein, J. (1954). "A New Method of Analysing Extreme-Value Data", NACA Tech Note 3053, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D.C., USA.
- Lieblein, J. (1974). "Efficient Methods of Extreme-Value Methodology", Report NBSIR 74 602, National Bureau of Standards, Washington, D.C., USA.

- Lombardo, F. T. (2012). "Improved extreme wind speed estimation for wind engineering applications", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 104-106, pp. 278–284.
- Pickands, J. (1975). "Statistical inference using extreme order statistics", *Annals of Statistics*, Vol. 3, pp. 119-131.
- Riera, J. D. y Nanni, L. F. (1989). "Pilot study of extreme wind velocities in a mixed climate considering wind orientation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 32, pp. 11-20.
- Riera, J. D. y Reimundin, J. C. (1970). "Sobre la Distribución de Velocidades Máximas de Viento en la República Argentina", Informe I-70-3, Laboratorio de Ensayos de Estructuras, Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- Riera, J. D. y Rocha, M. M. (1998). "Load definition for wind design and reliability assessments: Extreme wind climate", *Wind Effects on Buildings and Structures*, Riera & Davenport, Eds., A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 15-38.
- Riera, J. D., Viollaz, A. J. y Reimundin, J. C. (1977). "Some recent results on probabilistic models of extreme wind speeds", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 2, No. 3, pp. 271-287.
- Shellard, H. C. (1965). "The estimation of design wind speed", *Proceedings of the 1st International Conference on Wind effects on buildings and Structures*, Publisher: HMSO, London, UK.
- Van der Hoven, I. (1957). "Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour", *Journal of Meteorology*, Vol. 14, pp. 160-164.
- Viollaz, A. J. (1997). "Estimación de las velocidades de recurrencia de vientos en la República Argentina", Informe Técnico, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Buenos Aires, Argentina.
- Viollaz, A. J., Riera, J. D., y Reimundin, J. C. (1975). "Estudio de la distribución de velocidades máximas de viento en la República Argentina", Informe I-75-1, Laboratorio de Ensayos de Estructuras, Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- Von Mises, R. (1936). "La distribution de la plus grande des n valeurs", *Revue Mathematique De l'Union Inter Balkanique*, Vol. 1, pp. 1-20.