

# VELOCIDADES DE VIENTO EXTREMAS EN EL NORDESTE DE ARGENTINA<sup>1</sup>

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

Resumen: El mapa de vientos extremos del reglamento CIRSOC 102 fue actualizado en 1997 a partir de registros que comprenden el período 1967-1990. La información contenida en este mapa está representada por la Velocidad Básica de Viento,  $V$ . La contribución de la incertidumbre de  $V$  a la incertidumbre total de la carga de viento de diseño de un edificio o estructura, es dominante respecto a todas las otras variables que conforman la carga de viento. Algunos autores colocan esta contribución por arriba del 70%, lo que da una idea de la importancia de contar con estimaciones de  $V$  de buena calidad. Por esta razón, los mapas de vientos extremos son actualizados periódicamente. En este trabajo se presentan resultados de  $V$  calculados a partir de datos actualizados de siete estaciones meteorológicas en el nordeste de Argentina (región NEA). Los valores son sensiblemente más bajos que los del CIRSOC 102; una diferencia que se magnifica cuando se la evalúa a nivel de cargas de viento resultante. Los registros fueron depurados previamente de registros anuales incompletos o medidos con instrumentación inadecuada. Se presentan por primera vez para Argentina los intervalos de confianza del 95%. Se presentaron también valores de  $V$  consolidando algunas estaciones en superestaciones, observándose reducciones del intervalo de confianza de 30 a 50%.

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

## EXTREME WIND SPEEDS IN NORTH-EASTERN ARGENTINA

Abstract: The extreme wind map of the Argentinean code of practice CIRSOC 102 was updated in 1997 from records of the period 1967-1990. The information contained in this map is represented by the Basic Wind Speed,  $V$ . The contribution of the uncertainty of  $V$  to the whole uncertainty of the design wind load, of either a building or structure, is dominant with regard to the other variables that make up the wind load. Some authors assess this contribution to be above 70%, which underlines the importance of having good quality estimations of  $V$ . For this reason, the extreme wind maps are updated periodically. In this work, results of  $V$  calculated from updated records of seven meteorological stations in north-eastern Argentina (NEA region) are presented. The values turn out to be noticeably lower than those of the CIRSOC 102; a reduction that is magnified when evaluated in terms of resulting wind loads. The records have been previously depurated after a combined assessment of both the quality of the instrumentation and the completeness of every yearly record. 95% confidence limits are presented, being the first-time confidence limits are published for Argentina. Further values of  $V$  obtained after consolidating data of some stations in superstations are presented. Reductions of the confidence limits ranging 30% to 50% were observed.

**Keywords:** extremes wind speeds, wind map, codification.

## INTRODUCCIÓN

---

<sup>1</sup> Artículo recibido el 3 de marzo de 2018 y aceptado para publicación el 1 de junio de 2018.

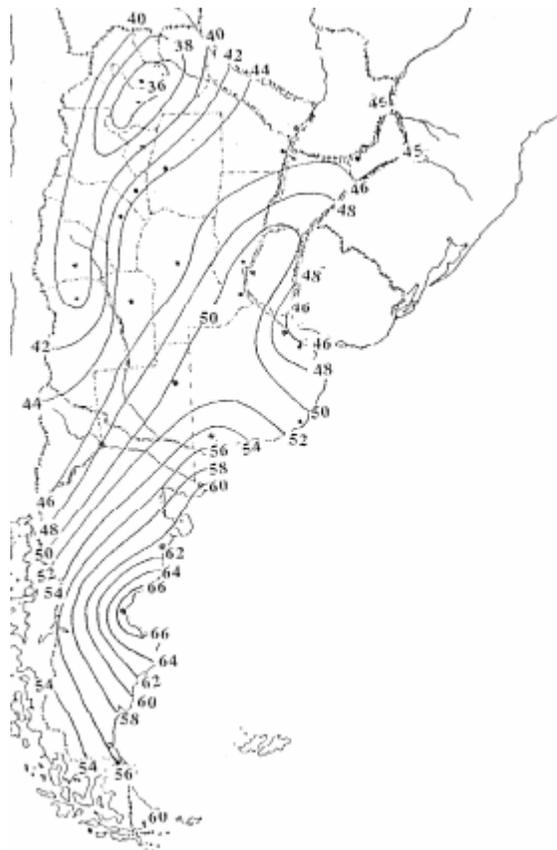
<sup>2</sup> Profesor Titular, Universidad Nacional del Nordeste/Investigador Adjunto, CONICET, Av. Las Heras 727 (3500) Resistencia, Chaco, Argentina, [bnatalini\\_2000@yahoo.com.ar](mailto:bnatalini_2000@yahoo.com.ar)

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

La Velocidad Básica del Viento,  $V$ , es un parámetro necesario en cualquier estimación de carga de diseño por acción del viento, sea cual sea el reglamento o el modelo que se aplique. Cualquier variación del valor de  $V$  se propaga a la carga de viento con el cuadrado del mismo, por lo que la contribución de la incertidumbre de  $V$  a la incertidumbre total de la carga de viento, es siempre un valor importante, cuando no dominante. Cook et al. (2011) hicieron una estimación de esta contribución que la coloca entre el 70 y el 80%. Las bases para abordar una estimación de este tipo fueron presentadas por Davenport (1983).

En las normas de acción del viento, en el caso de Argentina, el reglamento CIRSOC 102, los valores de  $V$  se especifican en un mapa conocido como mapa de vientos extremos. Dado el peso que tiene la incertidumbre de  $V$  sobre la incertidumbre total de la carga de viento, estos mapas se actualizan en forma periódica. El mapa del reglamento CIRSOC 102 (2005), actualmente vigente, fue actualizado en 1997 a partir de registros que comprenden el período 1967-1990. Hoy en día se cuenta con registros de velocidades de más del doble de longitud (temporal) y existe una variedad de métodos de procesamiento de valores extremos que no se disponían en 1995. Si además se toma en cuenta que hay una actualización en curso del reglamento CIRSOC 102 que, al tomar como base el reglamento ASCE 7-10, introducirá un cambio mayor al reemplazar el mapa de ráfagas de período de recurrencia de 50 años por tres mapas de períodos de 300, 700 y 1700 años, se aprecia la conveniencia de abordar una nueva actualización del mapa.

Diversos autores han revisado las distintas técnicas de determinación de valores de  $V$ . Para un primer acercamiento se dispone de los libros de Simiu y Scanlan (1996), Cook (1985) y Holmes (2015); y siempre es aconsejable leer la exhaustiva obra clásica de Gumbel (1958). Entre las discusiones más recientes están las de Torrielli et al. (2013) y Chiodi y Ricciardelli (2014), ambas en inglés, Natalini y Natalini (2013) y Lorenzo y Parnás (2016), en español. No todos los autores coinciden en sus opiniones, y una mención especial merecen los trabajos de Makkonen et al. (Makkonen, 2008; Makkonen et al., 2013a y 2013b), donde se presentan pruebas matemáticas que invalidarían muchos procedimientos extensivamente usados actualmente.



**Figura 1: Mapa de vientos extremos vigente en Argentina (Figura 1 A del CIRSOC 102/2005)**

El mapa de Argentina (Fig. 1) se basa en determinaciones de  $V$  en 51 puntos del territorio nacional donde hay estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Viollaz (1997) describe los detalles de cómo se hizo este trabajo. Posteriormente, Altinger de Schwarzkopf (1997) estableció las isolíneas que serían compatibles con los valores propuestos por Viollaz y con la física de los procesos atmosféricos sobre Argentina.  $V$  está definida en el CIRSOC 102 como “velocidad de ráfaga de 3 segundos en m/s a 10 m sobre el terreno para Categoría de Exposición C y están asociadas con una probabilidad anual de 0,02” (período de recurrencia de 50 años).

Todo mapa de viento se hace a partir de tomar una serie de decisiones que no están explícitas para el usuario. En este caso se tomaron las siguientes: a) Hacer una estimación a partir de máximos anuales; b) aceptar como hipótesis que la distribución de probabilidades de los valores extremos es de Tipo I; c) aceptar la hipótesis de que en cada estación, todos los valores máximos registrados fueron producidos por un mismo mecanismo meteorológico, es decir que el clima local es simple; d) aceptar como hipótesis que todos los valores máximos usados en la estimación provienen de series completas; e) aceptar como hipótesis que todos los anemómetros están emplazados a 10 m de altura en terreno de exposición C, sin obstáculos alrededor; f) aceptar como hipótesis que el instrumental de todas las estaciones contó con el mismo nivel de mantenimiento, era equivalente en calidad, tenía un tiempo de respuesta de tres segundos y contaba con suministro de energía ininterrumpida; g) usar el Método de los Momentos para estimar los parámetros de la distribución de probabilidades de las velocidades extremas de viento; y h) procesar la variable sin precondicionar.

La decisión más conflictiva entre las listadas anteriormente es considerar que los datos corresponden a un clima simple, cuando se sabe que el clima es mixto en la parte más poblada del país. Esto llevaría a una subvaloración de  $V$ . A su vez, algunos autores, por diferentes razones, coinciden en que el ajuste de datos a una distribución de Tipo I sobrestima a  $V$ . Para Harris (1996) la estimación es sesgada en tanto que el tamaño de la muestra no tienda a infinito. Cook (1985) afirma que si la distribución de origen (parent distribution) es una distribución de Rayleigh (que es un caso particular de la distribución de Weibull), la tasa de convergencia de una muestra finita de valores máximos hacia una distribución de Tipo I es muy baja y por lo tanto, con el rango de tamaño de muestra posible (entre 20 y 100 años), se produce un sesgo en la estimación. Simiu y Scanlan (1996) aceptan que la distribución de  $V$  está mejor representada por una distribución de Tipo III, y por lo tanto al ajustar una función de Tipo I, se produce una sobrevaloración. Lombardo et al. (2009) señalan que esta sobrevaloración compensa en alguna medida la subvaloración producto de la hipótesis de clima simple. Para poder aplicar métodos de estimación apropiados para climas mixtos es necesario contar con una clasificación de los datos conforme al tipo de fenómeno meteorológico que los causó. Esta clasificación es costosa de realizar y todavía no se dispone de ella para ningún set de datos extremos de Argentina, por lo que la hipótesis de clima simple debe ser forzosamente aceptada por ahora. Ante esta situación, sería imprudente cambiar la metodología usada por Viollaz si se aborda una actualización del mapa de vientos extremos de Argentina en el corto plazo.

En este trabajo se presentan los valores de  $V$  que resultan para la región NEA, es decir la zona definida por las provincias de Misiones, Chaco, Formosa y Corrientes, manteniendo las líneas principales de la metodología usada por Viollaz pero usando un set de datos de más del doble de longitud temporal y haciendo un control más estricto sobre la calidad de los datos e incluyendo intervalos de confianza. Se presentan también resultados agrupando estaciones en superestaciones.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Fuentes de datos**

En una primera etapa se seleccionaron diez estaciones del SMN que aparecen en la Tabla 1, como posible fuente de datos. Todas estas estaciones están en aeropuertos. Viollaz no usó datos de las estaciones de Puerto Iguazú, Bernardo de Irigoyen, Sáenz Peña ni Formosa. Se hicieron visitas de constatación a ocho de estas estaciones. Posteriormente se desestimaron como fuente las estaciones de Las Lomitas y Bernardo de Irigoyen, por no tener una instrumentación adecuada al procedimiento; y la de Saenz Peña, que aunque cuenta con instrumental apropiado, lo tiene en servicio desde 2012. Las siete estaciones que quedaron registran en forma continua las velocidades de ráfaga. Cada hora, se guarda la máxima velocidad de ráfaga y la velocidad media sobre diez minutos próxima a la hora.

**Tabla 1: Estaciones meteorológicas.**

| <b>NOMBRE</b>        | <b>Registros disponibles para este trabajo</b> | <b>Años excluidos del registro</b> |
|----------------------|--|------------------------------------|
| Puerto Iguazú        | 1965-2014                                      | 1965-1989.                         |
| Bernardo de Irigoyen | No disponía de instrumentación adecuada.       |                                    |
| Posadas              | 1956-2014                                      | 1956-1965, 1980, 2007.             |
| Formosa              | 1964-2014                                      | 1964-1965, 1968.                   |
| Las Lomitas          | No disponía de instrumentación adecuada.       |                                    |
| Corrientes           | 1961-2014                                      | 1984.                              |
| Monte Caseros        | 1950-2014                                      | 1951-1961, 1963-1965.              |
| Paso de los Libres   | 1965-2014                                      | 1965, 1968-1971.                   |
| Resistencia          | 1965-2014                                      | 1965, 1967, 1992-1993.             |
| Saenz Peña           | No disponía de instrumentación adecuada.       |                                    |

### Modelo de valores extremos

Como se explicó anteriormente, se adoptó una distribución de Gumbel o Fisher-Tippet Tipo I para representar a la distribución de probabilidades de  $\mathbf{V}$ . La Función de Distribución Acumulada (CDF por sus siglas en inglés: Cumulative Distribution Function) de los valores máximos de la velocidad de viento está dada entonces por la expresión:

$$P_{V_T} = \exp\{-\exp[-(V - \xi)/\theta]\} \quad (1)$$

donde  $P_{V_T}$  es la probabilidad de que el valor de velocidad  $\mathbf{V}$  no sea excedido en el período de observación  $T$ , en nuestro caso igual a un año. La Función de Distribución Acumulada (1) está completamente determinada por los parámetros  $\xi$ , que es la moda de la distribución, y  $\theta$ , que es un factor de escala, también llamado dispersión.

El Método de los Momentos estima estos parámetros mediante las siguientes relaciones:

$$\xi \cong \mu - 0,5772\theta \quad (2)$$

$$\theta \cong \frac{s\sqrt{6}}{\pi} \quad (3)$$

donde  $\mu$  y  $s$  son el valor medio y la desviación estándar de la muestra, respectivamente. El Método de los Momentos fue introducido por Gumbel (1935, 1941, 1958) y es uno de entre varios métodos existentes para estimar los parámetros  $\xi$  y  $\theta$ . La determinación de los intervalos de confianza se hace a partir de la desviación estándar de los errores de muestreo,  $SD(\mathbf{V}_T)$ ; dado que  $SD(\mathbf{V}_T)$  es la semiamplitud del intervalo de confianza del 68%,  $2 SD(\mathbf{V}_T)$  es la del intervalo del 95% y  $3 SD(\mathbf{V}_T)$  la del intervalo del 99%. La estimación de  $SD(\mathbf{V}_T)$  se hace mediante la expresión

$$SD(\mathbf{V}_T) = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[ \frac{\pi^2}{6} + 1,1396(y - 0,5772) \frac{\pi}{\sqrt{6}} + 1,1(y - 0,5772)^2 \right]^{1/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

siendo  $n$  el tamaño de la muestra, es decir el número de extremos anuales disponibles, e  $y$  la variable reducida

$$y = \frac{V - \xi}{\theta} \quad (5)$$

## RESULTADOS

En Tabla 2 se muestran los parámetros de la distribución de Tipo I.

**Tabla 2: Parámetros de la distribución de Tipo I [m/s].**

|                       | Viollaz,<br>estimación con $s$<br>global |          | Series originales de<br>Viollaz |          | Series actualizadas<br>y depuradas |          |
|-----------------------|--|----------|---------------------------------|----------|------------------------------------|----------|
|                       | $\xi$                                    | $\theta$ | $\xi$                           | $\theta$ | $\xi$                              | $\theta$ |
| Puerto Iguazú         | -  | -        | -                               | -        | 22,05                              | 3,65     |
| Posadas               | 25,54                                    | 4,18     | 25,97                           | 4,10     | 25,88                              | 3,37     |
| Formosa               | -  | -        | -                               | -        | 24,92                              | 3,52     |
| Corrientes            | 26,92                                    | 4,85     | 26,68                           | 4,44     | 25,20                              | 4,34     |
| Resistencia           | 27,92                                    | 4,01     | 27,84                           | 3,30     | 27,05                              | 3,28     |
| Monte Caseros         | 27,67                                    | 4,93     | 27,80                           | 4,46     | 27,28                              | 4,77     |
| Paso de los<br>Libres | 26,31                                    | 4,49     | 26,41                           | 4,27     | 26,59                              | 3,94     |

En las dos primeras columnas están los parámetros determinados por Viollaz usando un  $s$  que es el promedio entre la desviación estándar promedio de todo el país y la desviación estándar local. Estos son los parámetros que se usaron como base para calcular las velocidades que se volcaron al mapa del CIRSOC 102, aunque es importante señalar que los valores que efectivamente aparecen en el mismo no se corresponden exactamente, sino que son, en el caso del NEA, superiores. Los valores de la columna del medio son los que se obtienen de aplicar el Método de los Momentos a los extremos anuales que aparecen en las figuras del reporte de Viollaz y que serían las series originales. Estos valores deberían ser idénticos a los que Viollaz reporta como estimación local. En la mayoría de los casos los valores se acercan mucho, pero no siempre. La última columna muestra los resultados de aplicar el Método de los Momentos a todos los valores disponibles, después de depurar la serie.

Se puede ver que la estimación usando un  $s$  global produjo valores de  $\theta$  mayores que la estimación local, y valores de  $\xi$  a veces mayores, a veces menores. El efecto de esta diferencia sobre  $\mathbf{V}$  dependerá del período de retorno. Para períodos de retorno de unos pocos años, la diferencia en el valor de  $\xi$  tendrá un efecto dominante. Luego, a medida que se aumenta el período de retorno, el valor de  $\theta$  se vuelve dominante. Para los valores que se muestran en la tabla, ya para períodos de retorno de 50 años el efecto de  $\theta$  es dominante. La principal variación observada al usar las series actualizadas, es una reducción de  $\theta$ , salvo en el caso de Monte Caseros; lo que está de acuerdo con la afirmación de Cook (1985) sobre la reducción del sesgo de la estimación al disponer de mayor cantidad de datos.

La Tabla 3 muestra los valores de V que resultan de los parámetros de la serie actualizada y depurada.

**Tabla 3: Velocidades Básicas de Viento [m/s].**

|                    | 50 años    |                              | 300 años |                              | 700 años |                              | 1700 años |                              |
|--------------------|------------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|------------------------------|-----------|------------------------------|
|                    | CIRSOC 102 | Serie actualizada y depurada | VEA      | Serie actualizada y depurada | VEA      | Serie actualizada y depurada | VEA       | Serie actualizada y depurada |
| Puerto Iguazú      | 45,0       | 36,3                         | 53,1     | 42,8                         | 56,9     | 45,9                         | 61,0      | 49,2                         |
| Posadas            | 45,0       | 39,0                         | 53,1     | 45,1                         | 56,9     | 48,0                         | 61,0      | 51,0                         |
| Formosa            | 45,0       | 38,7                         | 53,1     | 45,0                         | 56,9     | 48,0                         | 61,0      | 51,1                         |
| Corrientes         | 46,0       | 42,1                         | 54,3     | 50,0                         | 58,2     | 53,6                         | 62,4      | 57,5                         |
| Resistencia        | 45,0       | 39,8                         | 53,1     | 45,7                         | 56,9     | 48,5                         | 61,0      | 51,4                         |
| Monte Caseros      | 49,0       | 45,9                         | 57,8     | 54,5                         | 62,0     | 58,6                         | 66,5      | 62,8                         |
| Paso de los Libres | 48,0       | 42,0                         | 56,6     | 49,0                         | 60,7     | 52,4                         | 65,1      | 55,9                         |

Se presentan valores para períodos de retorno de 50, 300, 700 y 1700 años. 50 años es el período que corresponde el mapa actual, que será reemplazado por tres mapas de 300, 700 y 1700 años, respectivamente. La razón de este cambio está en que los reglamentos CIRSOC se basan en los reglamentos de la American Society of Civil Engineering (ASCE). En 2010 ASCE hizo un cambio mayor en el conjunto de sus reglamentos, acentuando al paso de criterios de diseño por tensiones admisibles (AST por sus siglas en inglés: Allowable Stress Design) a criterios de estado límite (LFRD por sus siglas en inglés: Load Resistance Factored Design). Para la estimación de las cargas de viento esto significó el reemplazo del mapa de 50 años de período de recurrencia por tres mapas. El mapa de 300 años especifica la **V** para estructuras de Categoría I (clasificación de acuerdo a la Tabla A-1 del Apéndice A del CIRSOC 102), el de 700 años para las de Categoría II y el de 1700 años para las de Categoría III y IV. Al aumentar el período de recurrencia, los valores de **V** son mayores; esto se compensa con la eliminación del Factor de Importancia y con el cambio del valor del Factor de Carga de 1,6 a 1,0, para LFRD y 0,6 para ASD. En la Tabla 3 también se presentan los valores que están en el actual mapa (50 años); y bajo el nombre ‘Valor Equivalente Actual’ (VEA) los que surgen de aplicar la expresión

$$V^R = \sqrt{1,6 \times (V^{50})^2 I} \quad (6)$$

donde R es el período de recurrencia, I es el Factor de Importancia de la estructura y  $V^{50}$  es la V del CIRSOC 102. El Factor de Importancia será 0,87; 1 y 1,15 para 300, 700 y 1700 años, respectivamente. El Valor Equivalente Actual es aquel valor de **V** de período de recurrencia distinto de 50 años, que usando el modelo LFRD produce la misma carga de diseño que produce el reglamento actual, para una dada categoría de estructura.

La Tabla 4 muestra la reducción porcentual de cargas de diseño al usar los valores de **V** resultantes de las series actualizadas y depuradas.

**Tabla 4: reducción porcentual de cargas de diseño resultantes respecto al CIRSOC102-2005.**

|                    | <b>50 años</b> | <b>300 años</b> | <b>700 años</b> | <b>1700 años</b> |
|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Puerto Iguazú      | 35             | 35              | 35              | 35               |
| Posadas            | 25             | 28              | 29              | 30               |
| Formosa            | 26             | 28              | 29              | 30               |
| Corrientes         | 16             | 15              | 15              | 15               |
| Resistencia        | 22             | 26              | 27              | 29               |
| Monte Caseros      | 12             | 11              | 11              | 11               |
| Paso de los Libres | 23             | 25              | 25              | 26               |

La Tabla 5 muestra las semi-amplitudes de los intervalos de confianza del 95% para cada estación. La Fig. 2 muestra la media móvil de las velocidades máximas anuales sobre un período de integración de nueve años para cada estación. La Fig. 3, muestra los máximos anuales de todas las estaciones en un gráfico de Gumbel. Las posiciones de ploteo se determinaron conforme a la fórmula de Weibull:

$$y = \frac{m}{n + 1} \quad (7)$$

que es la expresión usada en los trabajos originales de Gumbel; y ha sido reivindicada por Makkonen como la única expresión correcta para determinar la posición de ploteo. En la expresión (7), m es la posición del extremo observado ( $1 < m < n$ ) una vez que la serie ha sido ordenada en orden creciente.

**Tabla 5: Semiamplitud del intervalo de confianza de 95%, en m/s, de  $V^R$  resultante de las series actualizadas y depuradas.**

|               | <b>50 años</b> | <b>300 años</b> | <b>700 años</b> | <b>1700 años</b> |
|---------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Puerto Iguazú | 6,0            | 8,7             | 10,0            | 11,4             |
| Posadas       | 4,1            | 5,9             | 6,8             | 7,7              |
| Formosa       | 4,2            | 6,1             | 7,0             | 7,9              |
| Corrientes    | 4,9            | 7,1             | 8,2             | 9,3              |
| Resistencia   | 3,7            | 5,4             | 6,2             | 7,0              |
| Monte Caseros | 5,4            | 7,9             | 9,0             | 10,2             |

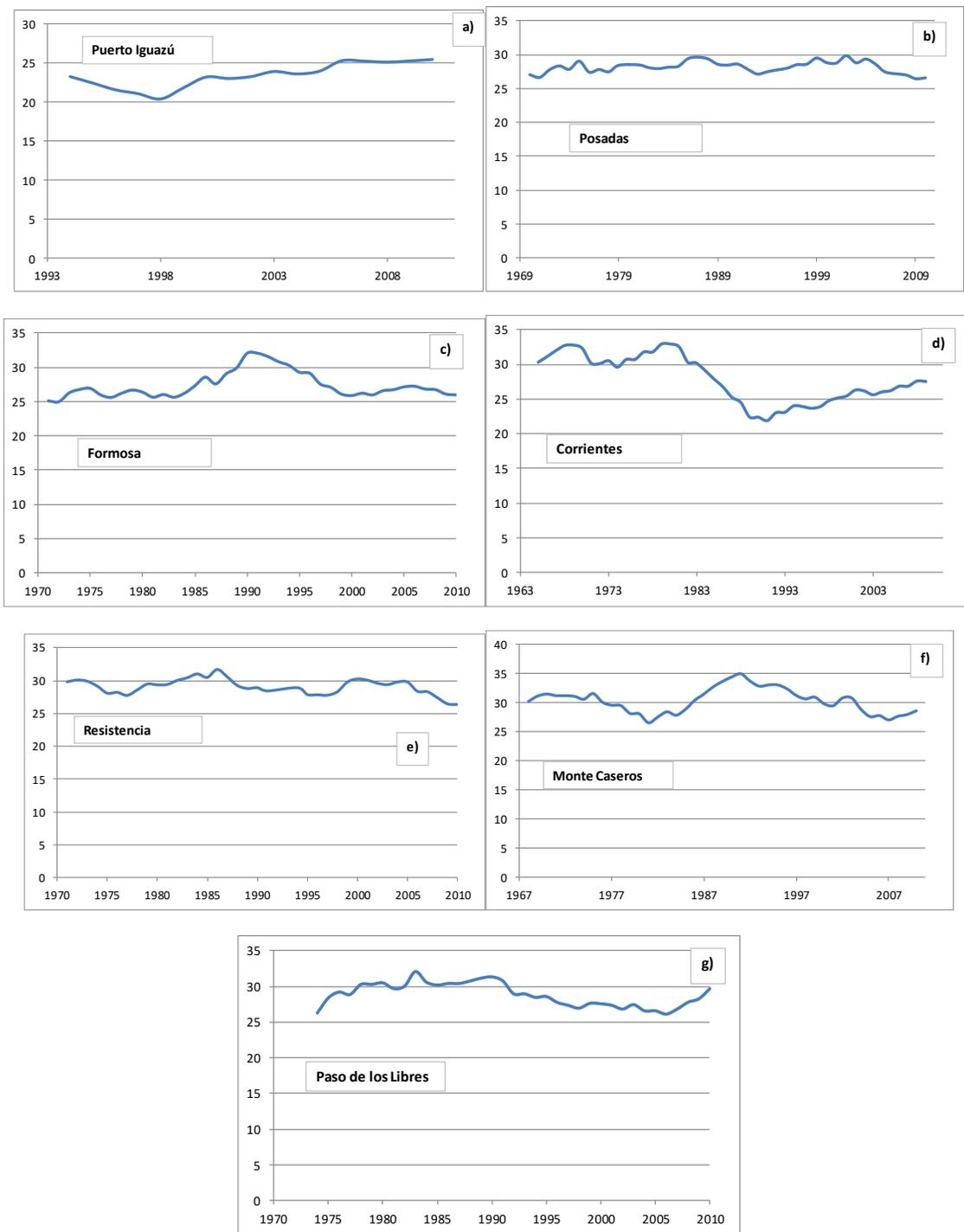
Paso de los Libres

4,5

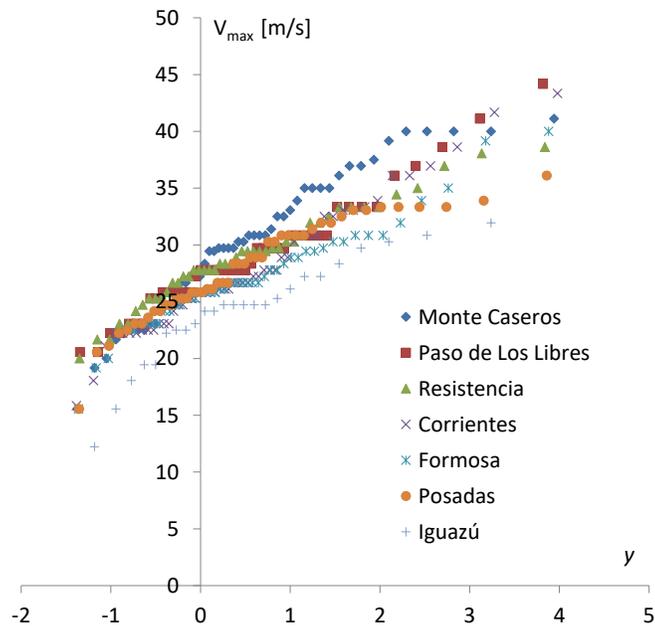
6,5

7,4

8,4



**Figura 2: Media móvil de la velocidad máxima anual sobre período de integración de nueve años en las estaciones del NEA.**



**Fig. 3: Velocidades de ráfaga máximas anuales en ejes de Gumbel.**

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para ordenar la discusión, se propone agrupar las estaciones de la siguiente manera. Grupo 1: Posadas, Resistencia y Formosa; Grupo 2: Paso de los libres y Corrientes; Grupo 3: Monte Caseros; Grupo 4: Puerto Iguazú.

### Grupo 1

Las estaciones de este grupo tienen dispersiones entre 3,28 y 3,52 m/s. Sus gráficos de la media móvil (Fig. 2) son horizontales. Las  $V$  que resultan de usar series actualizadas son cercanas entre sí y significativamente menores a las del CIRSOC 102 y a las VEA, resultando en reducciones de cargas de diseño entre el 26% y el 30%.

### Grupo 2

Las dispersiones de este grupo son un poco más altas que las del Grupo 1, situándose en casi 4 m/s la de Paso de los Libres y 4,34 m/s la de Corrientes. La estación Corrientes muestra una anomalía en la distribución de medias móviles: hasta 1983 son de un orden de magnitud mayor que durante el período posterior (Fig. 2d). Al igual que el Grupo 1, las  $V$  que resultan de usar series actualizadas son cercanas entre sí y significativamente menores a las del CIRSOC 102 y a las VEA; las reducciones de carga de diseño son del orden del 15% para Corrientes y del orden del 25% para Paso de los Libres.

### Grupo 3

Aquí hay una sola estación que es la de Monte Caseros. Es el único caso en que la dispersión resultante de la serie actualizada es mayor que la estimación local obtenida por Viollaz. Este comportamiento singular se explica por el registro de una serie de máximos muy altos que aparecen la década de 1990 que producen en el gráfico de la media móvil un corrimiento hacia valores más altos centrado en 1990 (Fig. 2f). Esta serie de eventos intensos causan un aumento de la dispersión de Monte Caseros que llega a 4,77 m/s. De todas maneras, el valor del CIRSOC 102 es tan alto que aun para este caso se observan reducciones de carga del orden del 11%.

La manifestación concentrada de un grupo de eventos severos en unos pocos años es un recordatorio de los riesgos que se corren al usar series de pocos años que no pueden reflejar la ocurrencia de estos fenómenos. El aumento de la

media móvil centrada en 1990 observada en Monte Caseros no es en sí mismo un comportamiento anómalo. Se puede observar que algo similar ocurrió en la estación Formosa (Fig. 2c).

#### Grupo 4

Aquí también hay una sola estación que es la de Puerto Iguazú. Se puede observar en la Fig. 3 que esta estación tiene un comportamiento diferente a las otras. Los valores de las máximas anuales son menores, lo que se refleja en una moda del orden de los 22 m/s mientras que para las otras estaciones es del orden de los 25 m/s. La dispersión es similar a las del Grupo 1. Se ha señalado en otro artículo que esta estación muestra una media móvil creciente en el tiempo (Natalini et al. 2016), lo cual es cierto si se toma la serie 1965-2014. Pero una vez quitados los valores anteriores a 1990, cuando la estación no disponía de anemómetro, la media móvil se muestra estable.

El cuadro general que muestra este agrupamiento de las estaciones no es conceptualmente incompatible con el mapa del CIRSOC 102 (Fig. 1). La principal diferencia es que no hay indicios que permitan sostener que las velocidades en el nordeste de Misiones sean del mismo orden de magnitud que las de Chaco, Formosa y el sur de Misiones. Pero considerando la escasa cantidad de datos que hay sobre esa región, es razonable mantener a la recomendación para esa zona al mismo nivel que el Grupo 1. La norma brasileña NBR 6123 (1988) muestra una isolínea de 50 m/s sobre el norte y el este de Misiones. Tampoco hay datos en ese mapa para sostener este valor, dado que la estación meteorológica más cercana a la provincia de Misiones, de las que se usaron para hacer ese mapa, está a más de 380 Km y a más de 2° de latitud hacia el norte. Recientes mapas de velocidades de viento extremas medias horarias (Sanabria y Carril, 2017), producidos a partir de reanálisis y de ensambles de simulaciones climáticas, soportan la hipótesis de que el nordeste de Misiones es una zona de velocidades más bajas que las del Grupo 1, así como la hipótesis de que en la zona centro-este de la Provincia de Corrientes, donde está Monte Caseros, es una zona de velocidades más altas.

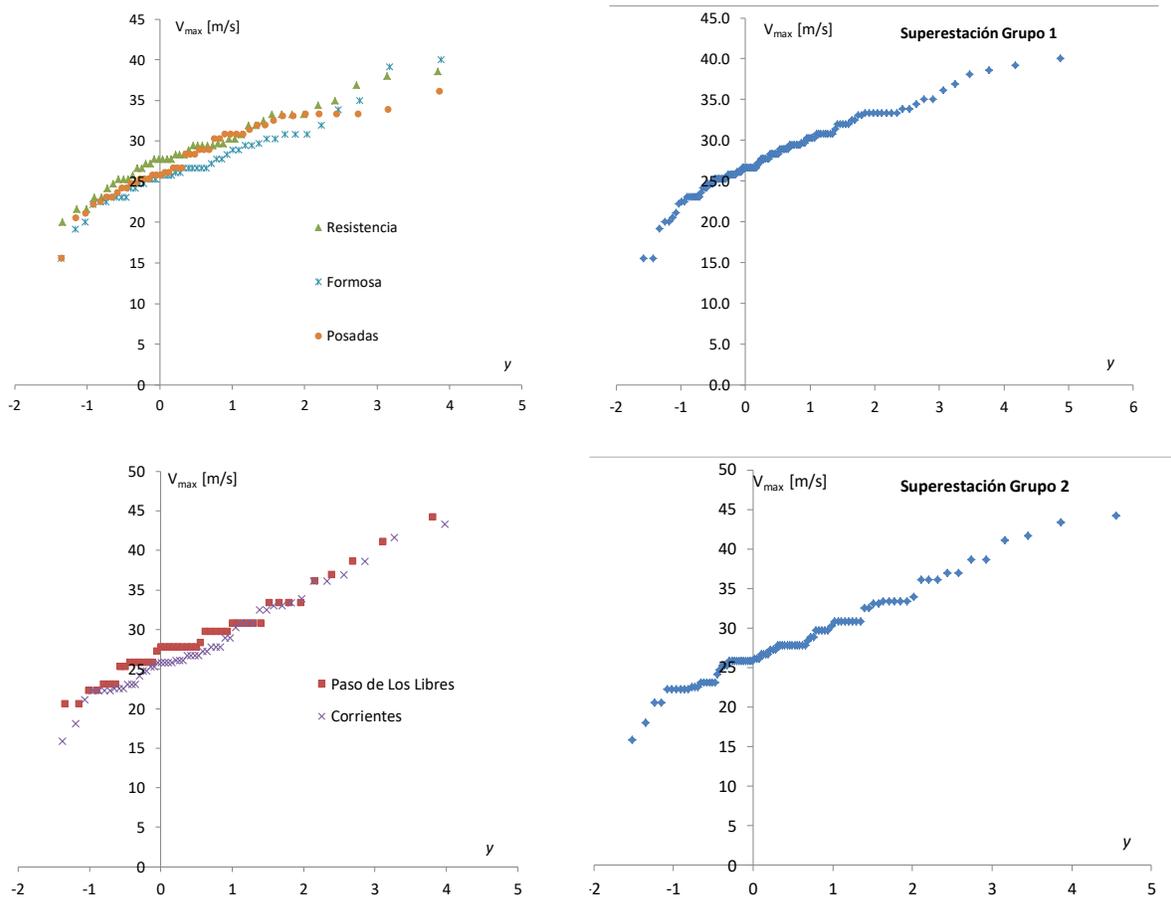
Para aceptar el agrupamiento aquí propuesto quedaría por explicar por qué las estaciones de Resistencia y Corrientes, que se encuentran a tan sólo 29 Km de distancia, muestran un comportamiento tan diferente. La diferencia en realidad es mínima, pero se magnifica por la sensibilidad que tiene el Método de los Momentos a la presencia de valores o muy altos o muy bajos. Si se recalculan los valores de dispersión y moda quitando de la serie de valores de Corrientes los correspondientes a los años 1966 y 1979, se obtiene  $\xi = 25,03$  m/s,  $\theta = 3,75$  y  $V^{50} = 39,7$  m/s, que como se ve, dejaría a Corrientes cerca de las estaciones del Grupo 1. Esos dos valores que hacen la diferencia corresponden a los registros de dos días sobre 19345 días. Pero en esos dos días, concretamente el 19 de septiembre de 1966 y el 9 de diciembre de 1979, ocurrieron tormentas con velocidades de ráfaga de 42 y 43 m/s; una intensidad nunca registrada en Resistencia.

#### **SUPERESTACIONES**

La decisión de Viollaz de usar una estimación parcialmente basada en un promedio de todo el país fue una medida prudente, y hasta donde se puede ver acertada, en un momento donde la longitud de las series estaba en el límite de lo admisible y mostraba un cuadro de variabilidad que había que suavizar de algún modo. Hoy en día no sería la mejor decisión, dado que se estaría agrupando en una sola zona climática una región que abarca varios tipos de clima. Para el NEA, visto los resultados aquí presentados, se podrían consolidar los datos de varias estaciones en “superestaciones”. De esta manera, no sólo se suavizan las diferencias entre estaciones, sino que se reducen las amplitudes de los intervalos de confianza. Para crear una superestación se agrupan los registros de estaciones que están en zonas de clima similar en un único registro de mayor longitud. De acuerdo a Simiu y Scanlan (1996), se deben cumplir dos condiciones para que la consolidación sea válida: las distribuciones de las poblaciones componentes tienen que ser idénticas y los registros deben ser mutuamente independientes. La primera condición se puede comprobar graficando en ejes de Gumbel los datos de las estaciones, tal como se muestra en los gráficos del lado izquierdo de la Fig. 4. Para asegurar la segunda condición, se fijó como criterio de independencia entre dos registros de diferentes estaciones que las fechas de ocurrencia de los mismos tengan una separación de por lo menos dos días. Luego se confrontaron las fechas en que se produjeron los máximos de cada año, se individualizaron los registros que no cumplen esta condición y en esos casos se conservó sólo el valor mayor.

En los gráficos del lado derecho de la Fig. 4 se muestran las series consolidadas en superestaciones en ejes de Gumbel; y la Tabla 6 muestra los parámetros de la CDF, los diferentes  $V^R$  y sus intervalos de confianza del 95%. Como era de esperar, la consecuencia más importante de la consolidación es que las semiamplitudes de los intervalos de

confianza se redujeron entre un tercio y un medio en relación a los valores sin consolidar, sin que se produzca un cambio significativo en los valores de  $V^R$ .



**Fig. 4:** Velocidades máximas anuales en ejes de Gumbel. A la izquierda, discriminados por estación, y a la derecha agrupados en superestaciones.

**Tabla 6:** parámetros de la CDF de las superestaciones, valores resultantes para diferentes períodos de retorno e intervalos de confianza del 95% [m/s].

|           | Superestación<br>Grupo 1 | Superestación<br>Grupo 2 |
|-----------|--------------------------|--------------------------|
| $\xi$     | 26,2                     | 26,0                     |
| $\theta$  | 3,4                      | 4,2                      |
| $V^{50}$  | $39,6 \pm 1,9$           | $42,3 \pm 2,8$           |
| $V^{300}$ | $45,7 \pm 2,8$           | $49,8 \pm 4,0$           |
| $V^{700}$ | $48,6 \pm 3,2$           | $53,3 \pm 4,6$           |

## CONCLUSIONES

Se presentaron en este trabajo resultados de Velocidades Básicas de Viento calculadas a partir de datos actualizados y depurados de 7 estaciones meteorológicas en el NEA, para períodos de retorno de 50, 300, 700 y 1700 años. Se utilizó el Método de los Momentos, siguiendo el procedimiento usado anteriormente por Viollaz. Se presentan por primera vez para nuestro país los intervalos de confianza del 95%. Se observó una tendencia muy marcada a la reducción de las cargas para el NEA en relación al mapa del CIRSOC 102. Se presentaron también valores de Velocidades Básicas de Viento consolidando algunas estaciones en superestaciones, observándose reducciones del intervalo de confianza de 30 a 50%.

Sintetizando lo discutido en este trabajo, se podría tomar como recomendación alternativa para el NEA, los valores de la superestación Grupo 1 para Misiones y este del Chaco y Formosa. Los de la superestación Grupo 2 para el oeste, centro y norte de Corrientes. Los de Monte Caseros para el sudeste de Corrientes. No se sugiere ninguna recomendación para el centro y oeste de las provincias de Chaco y Formosa hasta tanto se cuente con registros de velocidades de viento de suficiente calidad y longitud.

En este trabajo se cuidó mantener la consistencia metodológica, lo que incluyó una verificación y selección exhaustiva de las series de datos acorde a su calidad; tarea que es costosa pero necesaria. El Método de los Momentos, aunque a primera vista es muy acotado en relación al estado del arte, fue formulado por Gumbel como parte de una obra amplia y bien fundamentada. Aun siendo sencillo de aplicar posee una base sólida. La estrategia elegida por los autores del presente trabajo pasa por explotar el método enfocándose en la calidad de los datos antes que aplicar métodos cada vez más sofisticados a series de datos sobre los que no se tiene control. Dicho esto, se menciona que se está trabajando en formulaciones más complejas, pero que requieren más información, y más análisis.

Las magnitudes de las variaciones a nivel de carga que se presentaron, muestran que la inversión de recursos en esta área de estudio es conveniente dado el impacto que significan estas variaciones en el conjunto de la economía.

**Agradecimientos:** Los resultados aquí presentados se obtuvieron a partir de datos cedidos por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. El presente trabajo fue cofinanciado por subsidio PICTO-UNNE 2011-0187 de ANPCyT-UNNE, y subsidio PI N° 16-D005 de la UNNE.

## REFERENCIAS

- NBR 6123 (1988). "Forças Devidas ao Vento em Edificações", Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- Altinger de Schwarzkopf, M.L. (1997). "Fundamentos meteorológicos que sustentan el trazado de isolíneas de la velocidad básica de viento 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.
- Chiodi, R., Ricciardelli, F. (2014). "Three issues concerning the statistics of mean and extreme wind speeds", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 25, pp. 156-167.
- 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, 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.
- Cook, N.J., Harris, R.I. (2004). "Exact and general FT1 penultimate distributions of extreme wind speeds drawn from tail-equivalent Weibull parents", Structural Safety, Vol. 26, No. 4, pp. 391-420.

- CIRSOC 102 (2005). "Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones", Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Buenos Aires, Argentina.
- Davenport, A.G. (1983). "The relationship of reliability to wind loading" *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 13, NO. 1-3, pp. 3-27.
- Lorenzo, I.F., Parnás, V.B.E. (2016). "Análisis de métodos de vientos extremos para calcular las velocidades básicas", *Revista Cubana de Ingeniería*, Vol. 7, No. 2, pp. 15-25.
- Gumbel, E.J. (1935). "Les valeurs extrêmes des distributions statistiques", *Ann. Inst. Henri Poincaré*, Vol. 5, No. 2, pp. 115-158.
- Gumbel, E.J. (1941). "The return period of flood flows", *The annals of mathematical statistics*, Vol. 12, No. 2, pp. 163-190.
- Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of extremes*. Columbia Univ. Press, New York.
- Harris, I. (1996). "Gumbel re-visited - A new look at extreme value statistics applied to wind speeds", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 59, No. 1, pp. 1-22.
- Harris, R.I. (2006). "Errors in GEV analysis of wind epoch maxima from Weibull parents", *Wind and Structures*, Vol. 9, No. 3, pp. 179-191.
- Holmes, J.D. (2015). *Wind loading of structures*, Third Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Lombardo, F.T., Main, J.A., Simiu, E. (2009). "Automated extraction and classification of thunderstorm and non-thunderstorm wind data for extreme-value analysis", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 97, pp. 120–131.
- Makkonen, L. (2008). "Problems in the extreme value analysis", *Structural Safety*, Vol. 30, No. 5, pp. 405-419.
- Makkonen, L., Pajari, M., Tikanmäki, M. (2013a). 'Discussion on "Plotting positions for fitting distributions and extreme value analysis"', *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 927-929.
- Makkonen, L., Pajari, M., Tikanmäki, M. (2013b). 'Closure to "Problems in the extreme value analysis" (Struct. Safety 2008: 30: 405–419)', *Structural Safety*, Vol. 40, pp. 65-67.
- Natalini, B., Natalini, M.B. (2013). "Revisión de velocidades de viento extremas en tres localidades del sur de argentina", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 13, No. 2, pp. 235-248.
- Natalini, M.B. Natalini, B., Atencio, B.A., Zaracho, J.I. (2016). "Análisis de velocidades de viento extremas de 11 estaciones en Argentina – perspectivas para una actualización del mapa de vientos extremos", *Memorias de las XXIV Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, Buenos Aires, 28-30 de septiembre.
- Sanabria L.A., Carril A.F. (2017). "Mapas de vientos extremos en el sudeste de Sudamerica considerando el cambio climatico", *XI Convencion Int sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Simposio sobre riesgos de desastres y riesgos climaticos)*, La Habana, 3-7 de Julio 3-7.
- Simiu, E., Scanlan R. (1996). *Wind Effects on Structures*, Third Edition, John Wiley and Sons, New York.
- Torrielli, A., Repetto, M.P., Solari, G. (2013). "Extreme wind speeds from long-term synthetic records", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 115, pp. 22-38.

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.