

CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS QUE PRODUCEN LA RÁFAGA MÁXIMA ANUAL EN RESISTENCIA Y CORRIENTES, ARGENTINAClaudia Palese¹, Jorge L. Lassig¹ y Bruno Natalini^{2,3}¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue²Faculta de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste³CONICET

(Manuscrito recibido el 12 de abril de 2019, en su versión final el 13 de agosto de 2019)

RESUMEN

El objetivo de este estudio es clasificar los mecanismos que generaron la ráfaga máxima anual registrada en las estaciones meteorológicas ubicadas en los aeropuertos de Resistencia y Corrientes, según tres tipos de separación: (i) las tormentas convectivas de otros mecanismos; (ii) los vientos sinópticos de los no sinópticos; y (iii) la tormentas convectivas de aquellas que estuvieron asociadas al pasaje de un frente frío. Se contó con los registros de la libreta meteorológica de las estaciones del período 1968 - 2016. Las series de datos se acondicionaron generando la serie llamada superestación. Para la separación tipo (i) se inspeccionaron los datos horarios de las libretas meteorológicas; para la tipo (ii) se utilizaron los reanálisis NCEP/NCAR e imágenes satelitales térmicas; y para la tipo (iii) se recurrió a la herramienta Biplot en el contexto del análisis canónico discriminante para determinar las regiones clasificatorias. Los resultados muestran que la ráfaga máxima anual producida por tormentas tiene una ocurrencia de 96,1 % frente a otros mecanismos; 93,5 % corresponden a viento no sinóptico; y por último 62,3 % fueron clasificadas como convección no asociada al pasaje de un frente frío. Se concluye que las localidades no están sometidas a clima eólico mixto, sino que la ráfaga máxima anual se debe a un clima eólico simple correspondiente a actividad convectiva intensa que produce tormentas de las cuales un tercio estuvieron asociadas al pasaje de un frente frío y dentro de este tercio una estuvo relacionada con una sistema de baja presión cerrado ubicado en el norte de Argentina.

Palabras clave: ráfaga máxima anual, superestación, clasificación de mecanismos meteorológicos, NEA.

CLASSIFICATION OF MECHANISMS THAT PRODUCE THE ANNUAL MAXIMUM WIND GUST IN RESISTENCIA AND CORRIENTES, ARGENTINA**ABSTRACT**

The aim of this study is to classify the mechanisms that produced the maximum annual gust recorded in the meteorological stations of the airports of Resistencia and Corrientes. Three separation criteria were applied: (i) the convective storms vs. other mechanisms; (ii) the synoptic vs. non-synoptic; and (iii) the convective storms vs. those that were associated with the passage of a cold front. The available data

sets were the Daily Registers of the stations from 1968 – 2016. The data series were conditioned to generate a series called superstation. For classification (i) the hourly measured data were inspected; for classification (ii) NCEP/NCAR reanalysis and thermal infrared remote sensing were used; and for classification (iii), the Biplot tool was used in the context of canonical variate analysis to determine the classificatory regions. The results show that the annual maximum gust produced by storms have an occurrence of 96.1 % compared to other mechanisms; 93.5 % correspond to non-synoptic wind; and 62.3 % were classified as convection not associated with the passage of a cold front. It is concluded that Corrientes and Resistencia are not subject to mixed wind climate, that is, the maximum annual gust is due to a simple wind climate corresponding to intense convective activity that produces storms, of which one third was associated with the passage of a cold front and within of this third, one was related to a closed low pressure system located in the north of Argentina.

Keywords: annual maximum gust, superstation, classification of meteorological mechanisms, NEA.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos utilizados para determinar la acción del viento en estructuras civiles requieren del análisis estadístico y probabilístico de los valores extremos de la velocidad del viento. La cuantificación del clima de vientos extremos no lo hacen los Ingenieros en forma individual. Es un proceso continuo realizado por equipos de investigadores que vuelcan periódicamente sus resultados a mapas llamados genéricamente “mapas de vientos extremos”. La valoración de las cargas de viento sobre estructuras para su dimensionamiento es parte de un proceso normalizado. Cada país o bloque regional cuenta con normas que describen paso a paso como debe hacerse esta valoración. Por ejemplo, en Argentina lo hace el CIRSOC 102 (CIRSOC 102, 2005), en la Unión Europea el ENV 1991 Parte 1.4, del cual a su vez se desprenden los anexos nacionales, en USA el ASCE 7, en Australia y Nueva Zelanda el AS/NZS 1170.2, etc. En cada una de estas normas hay uno u varios mapas de vientos extremos, que en el caso particular del CIRSOC 102 se llama mapa de Velocidad Básica de Viento, V_b . De una correcta estimación de la carga de viento de diseño depende la seguridad de la estructura durante su vida útil y la operatividad de la misma durante eventos críticos. Si se trata de edificios, está en juego

también la seguridad de sus ocupantes. Por otra parte, una sobreestimación de V_b , siendo parte de un proceso normado a nivel nacional, significa un exceso en el uso de materiales en cada estructura formal que se ejecuta; y por pequeña que sea la sobreestimación, termina teniendo un impacto en el conjunto de la economía. La carga de viento de diseño es proporcional al cuadrado de V_b , y por lo tanto cualquier sesgo en su estimación se propaga a la carga de diseño también al cuadrado. Estas son las razones detrás de los permanentes esfuerzos de cada país en mejorar sus mapas de vientos extremos.

El mapa de Velocidad Básica de Viento, V_b , del Reglamento CIRSOC 102 es el resultado del trabajo de un grupo de expertos de la Universidad Nacional de Tucumán, 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 del Reglamento, se hizo sobre la base de los trabajos de Riera, Viollaz y Reimundin (1977) y Viollaz y otros (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 V_b en 51 estaciones meteorológicas en Argentina, y un reporte de Altinger de Schwarzkopf (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. Las posibilidades de mejorar nuestro conocimiento del clima de vientos extremos pasa básicamente por: a) Incorporar series de datos generados en los últimos años, b) Aplicar procedimientos de procesamiento estadístico más sofisticados y c) Clasificar las velocidades de viento extremas de acuerdo a los mecanismos atmosféricos que originaron dichos eventos extremos. Se sabe que los dos primeros aspectos, si se aplican a las series de datos bajo la hipótesis de clima simple, llevan a una reducción de los valores de Vb. Recientes estudios sobre vientos extremos en la región Noreste de Argentina (NEA) muestran reducciones por encima del 20% en cargas de diseño cuando se usan series de datos actualizadas (Natalini y Natalini, 2018). También se sabe que incorporar el tercer aspecto conduce a un aumento de Vb. La situación actual para nuestro país se resume entonces en que el mapa vigente en el CIRSOC 102 sobreestima muy significativamente a Vb, lo que significa un sobre costo innecesario en cada estructura formal que se construye y no puede sacarse completo provecho de una actualización sin arriesgarse a subestimar a Vb, si no se aborda la separación de los valores extremos por tipo de mecanismo causante. Esta separación es sin embargo costosa, por lo que los antecedentes disponibles no son tan amplios como sería de esperar.

En un estudio realizado por Kruger y otros (2013) en Sudáfrica se muestra las diferencias entre los valores de la ráfaga máxima anual (RMA) cuando éstas se producen por el pasaje de un frente frío, o cuando son debidas a tormentas convectivas o cuando son originadas por la acción del sistema de Alta Presión Semipermanente del Océano Atlántico. Además, se presentan las distribuciones de probabilidades de la RMA según el mecanismo que le dio origen, como así también, las distribuciones de probabilidades cuando: (a) no se tiene en cuenta los mecanismos que las originaron, método del clima simple utilizando la distribución Gumbel; (b) se tienen en cuenta los mecanismos de producción de los máximos anuales, método del

clima mixto (Gomes y Vikery, 1977/1978). Las estimaciones de los cuantiles efectuadas con el método del clima mixto resultan ser mayores que los estimados por el método de Gumbel. Cuando se consideran períodos de retorno, Tr , mayores o iguales a 100 años las diferencias varían entre $0,3 \text{ m s}^{-1}$ y $2,8 \text{ m s}^{-1}$ (en algunas localidades la diferencia porcentual de la velocidades superó 9% si $Tr > 100$ años).

Por lo tanto, previo al análisis probabilístico de la RMA se debe identificar el mecanismo que la originó. Hay varios tipos de divisiones de los mecanismos que originan el viento extremo anual. Twisdale y Vickery (1992), Choi (1999), Choi y Hidayat (2002), Lombardo y otros (2009) y Solari y otros (2013) agruparon los valores extremos del viento en aquellos provocados por tormentas eléctricas, y por otro, los ocasionados por otros mecanismos. Riera y otros (1977) clasificaron en dos clases, los provocados por tormentas, llamado viento no sinóptico y los originados por depresiones migratorias, el viento sinóptico. Gomes y Vickery (1977, 1978) ampliaron la clasificación a eventos provocados por mecanismos de diferente naturaleza: depresiones extratropicales, tormentas, huracanes y tornados. Choi y Tanurdjaja (2002) separaron los eventos producidos por mecanismos de gran escala, los monzones, de los de pequeña escala, las líneas de inestabilidad y las tormentas. Kasperski (2002) introdujo la idea que, en climas templados en latitudes medias, los sistemas de tormentas no pueden separarse adecuadamente de las depresiones frontales e introdujo el mecanismo que llamó frentes de ráfagas, con propiedades intermedias.

La región NEA es la zona donde más se han estudiado los vientos extremos recientemente (Natalini y Natalini, 2018). En ella se cuenta con siete estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que cumplen los requisitos mínimos necesarios para producir valores de Vb aceptables para un código de seguridad de obras civiles. Las estaciones de los aeropuertos de Resistencia y Corrientes están muy cercanas y ubicadas en el conglomerado urbano más

importante de la región. En este contexto, este estudio tiene como objetivo clasificar los mecanismos que generaron la RMA registrada en las estaciones meteorológicas ubicadas en estas dos estaciones, como paso previo al estudio de otras zonas del país. Se abordaron tres tipos de separación: (i) las tormentas convectivas de otros mecanismos; (ii) los vientos sinópticos de los no sinópticos; y, por último, (iii) las tormentas convectivas asociadas o no al pasaje de un frente frío.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Este trabajo tiene por objetivo clasificar los mecanismos que originan el viento extremo anual. Se considera viento extremo anual al valor más alto de la ráfaga máxima diaria registrada en la libreta meteorológica en un año. Como es una exigencia metodológica que dicho valor máximo sea extraído de una serie anual completa de datos diarios, es decir, que estén los 365 registros de ráfaga máxima diaria (o 366 en año bisiesto), los años que no cumplieron con este requerimiento fueron excluidos del análisis.

2.1 Datos

2.1.1. Series de datos medidos disponibles

Se utilizaron los datos horarios de las libretas meteorológicas de las estaciones de medición ubicadas en los aeropuertos de Resistencia (27° 26' 51,02" S; 58° 45' 43,21" O; 62 m) y Corrientes (27° 27' 1,85" S; 59° 3' 9,35" O; 54 m) registrados desde el 01-01-1968 al 31-12-2016 que fueron provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

La cantidad de registros por día varía en ambas estaciones: en Resistencia hubo 4 observaciones diarias a las 03, 09, 15 y 21 horas entre el 01-01-1968 y el 31-12-1975, y luego 24 observaciones diarias hasta el final del período de estudio. En Corrientes hubo mucha variación, alternando entre 3 observaciones diarias (09, 15 y 21 horas) y 4 observaciones (03, 09, 15 y 21 horas) en el período 01-01-1968 y 31-12-1990.

Luego, 16 observaciones diarias entre las 06 y las 21 horas desde el 01-01-1991 al 11-02-1997, por último, 24 observaciones diarias hasta el final del período de estudio. Un registro horario tiene los siguientes campos: fecha, hora, temperatura, temperatura de rocío, humedad relativa, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, tipos de nubes, cantidad de cielo cubierto y fenómenos significativos.

También se usaron los registros diarios de la ráfaga máxima de ambas estaciones meteorológicas en el período 01-01-1968 al 31-12-2016 que también fueron provistos por el SMN. Un registro de los valores extremos diarios incluye la fecha, la intensidad y la dirección de la ráfaga máxima diaria. En el período 1995 a 2016 en Resistencia y de 1996 a 2016 en Corrientes el registro además contiene el horario en que se produjo la ráfaga máxima diaria, mientras que en el período 1968 a 1994 (1995) no se cuenta con este dato.

De la serie de máximos diarios de ráfaga se utiliza el evento de mayor valor en el año (RMA). Como es un requerimiento que el valor máximo anual sea extraído de una serie anual completa de datos diarios, los años 1985, 1992, 1993 y 2010 de Resistencia, y 1968, 1971, 1979, 1984 y 1987 de Corrientes fueron excluidos del estudio porque tienen faltantes. Por lo tanto, la serie de extremos de Resistencia cuenta con 45 registros y la de Corrientes con 44.

2.1.2. Serie de datos a analizar

Se generó un nuevo conjunto de datos para cada una de las estaciones constituido por un registro por año desde 1968 a 2016. Dicho registro incluye fecha y hora de ocurrencia, intensidad y dirección de la RMA y en forma contigua los campos incluidos en la libreta meteorológica de la hora más cercana a la de ocurrencia de la RMA, independientemente del valor del viento horario.

La serie de datos así generada tiene dos aspectos a mencionar. El primero es que, en el período

en el que se realizaban 3 o 4 observaciones al día, puede haber varias horas de diferencia entre la hora de ocurrencia de la ráfaga máxima y el horario con datos registrados en la libreta meteorológica. El otro aspecto es que desde 1968 hasta 1994 en Resistencia y hasta 1995 en Corrientes no se cuenta con el horario en que se produjo la ráfaga máxima, entonces, en estos casos se utilizó el registro de las variables de la libreta (temperatura, humedad, presión, nubosidad, etc.) correspondientes al de mayor velocidad del viento horaria de la fecha del extremo anual. En el caso de haber dos horarios consecutivos con la misma velocidad se tomó el primero.

Conjuntamente con los datos observados se valoraron los cambios que sufrieron las variables. Estos cambios fueron incluidos en la serie como las diferencias temporales en 6 y 24 horas de la presión, temperatura y humedad atmosféricas. Se tomaron los intervalos de 6 y 24 horas con la finalidad de poder utilizar la totalidad de los registros de las dos estaciones meteorológicas a lo largo de todo el período disponible (1968 – 2016). Estas anomalías alrededor del pico de la ráfaga también fueron utilizadas en Vallis y Loredou-Souza (2018).

El cálculo de los cambios temporales se realizó como se muestra abajo, en donde D indica la diferencia de: P, la presión atmosférica; T, la temperatura; Td, la temperatura de rocío y TPE, la temperatura potencial equivalente. El subíndice t0 señala la hora de la RMA (o la más cercana):

$$DP6 = P_{t0} - P_{t0+6}$$

$$DP24 = P_{t0} - P_{t0+24}$$

$$DT24 = T_{t0} - T_{t0+24}$$

$$DT - Td6 = (T - Td)_{t0} - (T - Td)_{t0+6}$$

$$DT - Td24 = (T - Td)_{t0} - (T - Td)_{t0+24}$$

$$DTPE24 = TPE_{t0} - TPE_{t0+24}$$

Las diferencias así calculadas se interpretan como una disminución de la presión después de ocurrido el evento cuando D P es positivo y viceversa con valores negativos. Cuando D T

es positiva indica disminución de la temperatura después de la hora del pico de la ráfaga; lo mismo con D TPE. Un valor positivo en D T-Td señala aumento de la humedad ambiente y un valor negativo que el ambiente se secó.

2.1.3. Superestación

Una de las prácticas utilizadas para extender la cantidad de registros en las series de RMA es la técnica llamada superestación que se describe en Peterka (1992). Esta tiene la finalidad de lograr precisión y garantizar una adecuada caracterización estadística y probabilística de dichos valores extremos.

Peterka (1992) expone que las distribuciones de las velocidades extremas pueden tener un error que llama de muestreo si se utilizan series con pocos registros. El autor sugiere que los registros de RMA de diferentes estaciones meteorológicas pueden unirse para formar una serie con mayor cantidad de registros llamada superestación con la que se producen mejores estimaciones.

Simiu y Filliben (1999) plantean que la técnica de la superestación debe usarse con mucho cuidado y que las series de datos que la forman deben satisfacer tres requisitos básicos:

- Homogeneidad micrometeorológica: se refiere a que las series deben provenir de estaciones meteorológicas que tengan la misma elevación y rugosidad aerodinámica superficial.
- Consistencia climática: las estaciones meteorológicas deben tener las mismas condiciones climáticas, es decir, deben tener las mismas características geográficas, por ejemplo, elevación, posición con respecto a los obstáculos orográficos, etc.
- Independencia estadística: los máximos anuales de las diferentes estaciones no deben estar correlacionados, es decir, la inclusión de una serie de datos sí correlacionada no proporcionará información nueva sobre el clima del viento extremo.

Fernández Lorenzo y Parnás (2016) plantean estos tres requisitos indicando que las estaciones componentes deben ser comparables en términos micro y macrometeorológicos y que los datos de cada estación componente deben ser mutuamente independientes.

Esta metodología fue utilizada por Peterka (1992) con mediciones de 29 estaciones individuales de un área de Estados Unidos de América con la finalidad de reducir los errores asociados a las series de pocos registros de la velocidad de RMA. Peterka y Shahid (1998) utilizaron superestaciones regionales para lograr el mapa de la velocidad de ráfaga extrema anual del país arriba mencionado.

Torrielli y otros (2011) combinaron datos de tres estaciones individuales de Italia para estimar los parámetros de la distribución de la población de referencia de velocidades medias, con resultados satisfactorios.

Las estaciones meteorológicas de Resistencia y Corrientes distan entre sí 28 km, ambas están instaladas en aeropuertos, por lo tanto, la rugosidad aerodinámica superficial es semejante en ambas, los sensores están instalados en ambas estaciones a 10 metros de altura sobre el nivel del suelo y la diferencia de elevación entre ambas es menor a 10 metros, con lo que se cumple el requisito de homogeneidad micrometeorológica. También, las dos localidades están sometidas al mismo régimen climático subtropical húmedo cumpliendo con la consistencia climática. Por lo tanto, ambas estaciones son comparables en términos micro y macrometeorológicos como se establece en Simiu y Filliben (1999) y en Fernández Lorenzo y Parnás (2016).

Para que los datos de cada estación componente de la superestación sean mutuamente independientes y así cumplir con el requerimiento de la independencia estadística, se utilizaron los siguientes criterios de selección de las fechas a incorporar:

- cuando una fecha coincide en las dos

estaciones se tomó sólo la de la ráfaga de mayor valor;

- se eliminaron las fechas consecutivas entre las cuales hay menos de 4 días.

Al unir los 45 registros de Resistencia con los 44 de Corrientes y aplicando los requisitos planteados por Simiu y Filliben (1999) y por Fernández Lorenzo y Parnás (2016) se logra la serie superestación que está formada por 77 registros. Cada uno de esos registros contiene los siguientes campos: fecha, hora, intensidad (VX) y dirección (DX) de la ráfaga máxima; T, Td, HR, P, D, V, D P24, D P6, D T24, D T-Td6, D T-T24 y D TPE24, cantidad y tipo de nubosidad y fenómenos significativos.

2.2 Tipos de agrupamiento de los mecanismos que produce la RMA

Como se expuso en la Sección 1 distintos autores propusieron diferentes formas de clasificar los mecanismos que producen la ráfaga de viento extrema anual. A continuación se especifican las tres formas de agrupamiento utilizadas en este trabajo.

Tormenta – Otro Mecanismo. La separación se efectúa inspeccionando directamente los datos de nubosidad y de fenómenos significativos de la serie superestación. Siguiendo la metodología propuesta en Lombardo y otros (2009) cuando hay tormenta informada en la columna de Fenómenos Significativos o cumulonimbos u otra nubosidad indicadora de fenómenos convectivos, en la columna de Tipo de Nubosidad Baja, esa fecha se la clasifica como Tormenta. En cualquier otro caso el evento es considerado como Otro Mecanismo.

Sinóptico – No sinóptico. En este trabajo se considera Viento Sinóptico a los eventos que se producen debido a la presencia y desplazamiento por la zona de estudio de un sistema de baja presión cerrado. Esta depresión que se genera en el centro norte de Argentina y alcanza su máximo desarrollo durante su desplazamiento o extensión hacia el sudeste es descripta en Seluchi

(1993) y es mencionada como productora de vientos muy fuertes sobre el litoral en Altinger de Schwarzkopf (1997). Cuando no se observa dicho sistema la fecha se clasifica como Viento No Sinóptico. La discriminación de los casos se realizó en forma manual o subjetiva mediante la inspección visual de los campos de las alturas geopotenciales y su evolución temporal. Los campos meteorológicos provienen del reanálisis del National Center of Environmental Prediction (NCEP/NCAR Reanalysis; Kalnay y otros, 1996), tienen resolución espacial horizontal de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ y resolución temporal de 6 horas en los niveles significativos.

Convección – Convección asociada a Frente Frío. En este agrupamiento se separan los eventos de convección asociados o no al pasaje de un frente frío por Resistencia y/o Corrientes. Los casos agrupados como convección pueden corresponder a tormentas de masa de aire o convección asociada a forzantes sinópticos como frente cálido o frente estacionario, entre otros. La convección que se produce en el noreste de Argentina es analizada en Zipser y otros (2006), Salio y otros (2007), Durkee y Mote (2010), Rasmussen y Houze (2011) y en Vidal (2014), entre otros. Para lograr este agrupamiento se utiliza el método del Análisis de Variables Canónicas efectuado a los datos de la superestación. Para asegurar la clasificación de los casos dudosos, también se recurrió a las salidas gráficas del NCEP/NCAR Reanalysis y a imágenes infrarrojas térmicas satelitales.

2.3 Análisis de Variables Canónicas

El objetivo de utilizar la técnica del Análisis de Variables Canónicas (para más de dos grupos) o Análisis Discriminante Canónico (ADC), para lograr la separación entre Convección no asociada al pasaje de un frente frío (C) y Convección asociada al pasaje de un Frente Frío (CFF), fue identificar las diferencias entre los dos grupos a partir de las variables medidas, incluidas en la serie de la superestación, e identificar las relaciones de esas variables dentro de ambos grupos (Cuadras, 2014). El ADC

estima funciones lineales, funciones o variables canónicas, a partir de las variables medidas realizando la separación de los grupos de eventos maximizando la varianza entre los grupos y minimizando la varianza dentro de los grupos (Cruz Castillo y otros, 1994).

El ADC requiere de una muestra de entrenamiento, es decir, se debe saber de partida a qué grupos pertenecen algunos componentes de la serie total. Luego se utiliza ADC con un objetivo de determinación, es decir, se busca un criterio que permita decidir sobre la vinculación a uno de los grupos de un componente nuevo, no perteneciente a la muestra de entrenamiento.

El análisis se implementó en ambiente R con el paquete BiplotGUI para datos multivariados en el contexto del modelo lineal multivariado (la Grange y otros, 2009). La representación Biplot tiene la ventaja de incorporar al mismo tiempo las variables y las observaciones en un mismo gráfico (Peña, 2002; Lorbes Medina y otros, 2014).

2.4 Muestra de entrenamiento

Para lograr la muestra de entrenamiento fueron clasificadas fechas de la RMA en el período 2004 a 2014. La cantidad de registros es 19 y corresponden al 25 % del total (77), diez son de la estación meteorológica de Corrientes y nueve de Resistencia. Se buscó identificar dos grupos: CFF: Convección asociada a Frente Frío, que se refiere a un evento en el cual la convección fue favorecida por el pasaje de un sistema frontal frío por las localidades; y C: Convección, que se considera un evento convectivo, es decir, sin la acción de un sistema frontal frío.

Para caracterizar las condiciones meteorológicas de las fechas del grupo de entrenamiento se utilizaron los campos del reanálisis 24 horas previas y posteriores al horario del pico de la RMA. También se utilizaron imágenes satelitales infrarrojas del canal 4 de los satélites de la serie GOES (NOAA/CLASS). La discriminación de

los casos C de los CFF se realizó en forma manual o subjetiva mediante la inspección visual y el análisis de los campos de las alturas geopotenciales y su evolución temporal.

Una vez clasificadas las fechas del grupo de entrenamiento se realizó un ADC con la finalidad de determinar en el plano principal la posición de las fechas en las dos regiones clasificatorias e identificar el valor que adquieren los ejes canónicos cuando se presenta la acción de un sistema frontal frío. También se analiza el error cometido.

2.5 Clasificación de casos no pertenecientes a la muestra de entrenamiento

El método de clasificación de los casos no pertenecientes a las muestras de entrenamiento consiste en ubicarlos uno por uno en el plano principal observando la región de clasificación a la cual pertenecen como se muestra, a modo de ejemplo, en la Figura 1 (a) una fecha clasificada como C y en la Figura 1 (b) una CFF.

Los casos en que la posición que se observa no es categórica, por ejemplo, el individuo cae en la separación de las dos regiones clasificatorias, a esa fecha se la identifica como clase dudosa y se recurre a las salidas gráficas del reanálisis y a las imágenes satelitales térmicas.

3. RESULTADOS

3.1 Clasificación de casos en Tormenta u Otro Mecanismo

En este tipo de agrupamiento se observa que la RMA producida por Tormenta y actividad convectiva son las que predominan, 96,1 %, 74 de los 77 registros. Las fechas clasificadas como Otro Mecanismo son: 10/10/1973, 15:00 horas, de Resistencia y 29/10/1974, 03:00 horas, y 19/09/2015, 12:00 horas, de Corrientes.

Respecto de los eventos clasificados como Otro Mecanismo, tanto en el caso de Resistencia como en el primero de Corrientes, no se realizaban

mediciones las 24 horas del día en esos períodos en ninguna de las dos estaciones meteorológicas. Tampoco hay registro de la hora en la que se produce la ráfaga máxima, por lo tanto, no hay certeza acerca de qué mecanismo produjo el evento, puesto que sí pudo haber tormenta y no tener la anotación de la observación del fenómeno. Otra forma de detectar las nubes convectivas es a través de las imágenes satelitales, sin embargo, este tipo de bases de datos no abarcan las fechas de estos eventos puesto que están disponibles desde Setiembre de 1993 del sensor GVAR-IMG/GOES y desde Noviembre de 1978 del sensor AVHRR/NOAA.

3.2 Clasificación de casos en Viento Sinóptico o No Sinóptico

De los casos analizados 6,5% corresponden a Viento Sinóptico, definido éste como la acción o desplazamiento por la zona de estudio de un sistema de baja presión cerrado. Las fechas correspondientes a Viento Sinóptico son 14/03/1972 15:00 hs, 03/11/1978 09:00 hs, 23/03/1990 14:00 hs, 28/04/1992 21:00 hs y 28/11/1994 10:00 hs y afectaron a Corrientes y Resistencia simultáneamente dada su escala espacial. Las 72 fechas restantes corresponden a Viento No Sinóptico.

La Figura 2 exhibe algunos de los campos analizados de las fechas que resultaron positivas de Viento Sinóptico. En ella se muestran las alturas geopotenciales del nivel de 1000 hPa en un horario cercano al de la ocurrencia de la RMA. Como se observa, la depresión se halla ubicada en la frontera entre Paraguay y Formosa. Esta depresión está asociada a la Baja de Chaco (BCH) que es descripta en Seluchi y Saulo (2012) y Seluchi y Garraud (2012). Produce fuerte advección de humedad y calor desde el norte o noreste sobre las localidades.

También se analizó la evolución temporal del sistema a través del cálculo de la diferencia ($hg_{tt+12hs} - hg_{tt}$) de la altura geopotencial del nivel de 925 hPa en horas posteriores y previas a la ocurrencia de la ráfaga, ésta se muestra en

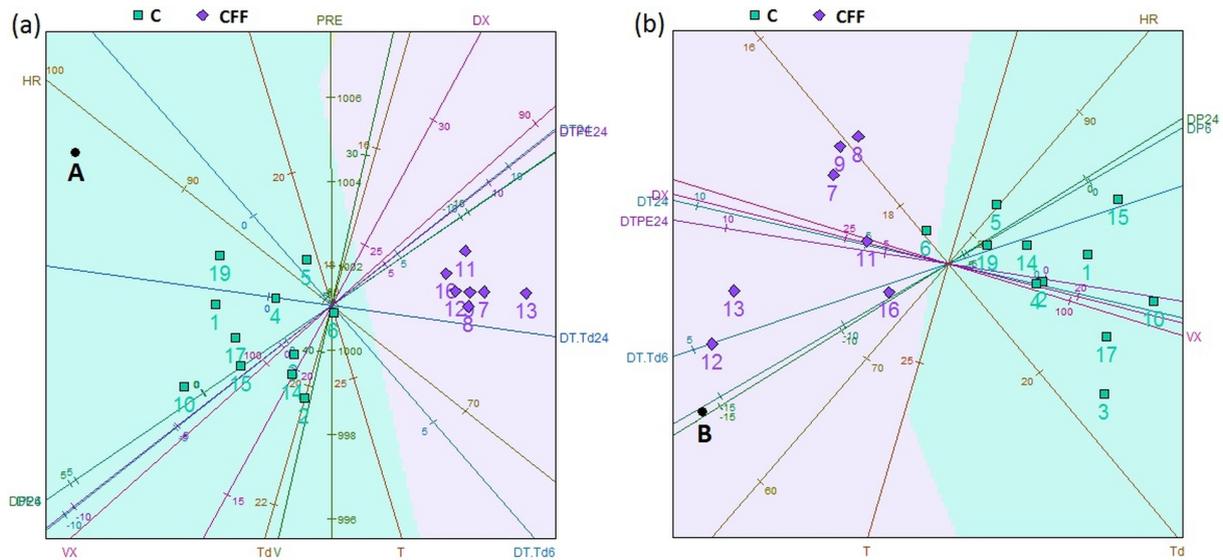


Figura 1: Ejemplo de posición en el plano principal de una fecha (individuo) no perteneciente a la muestra de entrenamiento. (a) A corresponde al 3/11/1978 a las 09:00 hs que está posicionado en la región C; y (b) B el 28/08/2002 a las 19:00 hs que pertenece a la región de clasificación CFF. El cambio en la posición de los ejes multivariados y la región clasificatoria se debe al cambio de las cargas en los ejes que introduce el nuevo individuo.

la Figura 3. En ella los valores negativos indican la disminución de la presión y viceversa con los positivos. Cuando se compara la Figura 2 con la Figura 3 se observa que en todos los casos la influencia del sistema de baja presión se desplaza hacia el este o sudeste respecto de su posición en horas previas a la de ocurrencia de la ráfaga máxima.

3.3 Clasificación de casos en Convección asociada o no al pasaje de un sistema frontal frío

3.3.1. Clasificación de las fechas de la muestra de entrenamiento

Las Figuras 4 y 5 constituyen ejemplos de cada una de las clases. La Figura 4 muestra las condiciones meteorológicas de una fecha clasificada como CFF. En la Figura 4(a), que corresponde a la altura geopotencial del nivel de 1000 hPa del 01-09-2010 a las 3:00 hs (6 UTC), se observa una depresión ubicada al sur de las Islas Georgias del Sur vinculada a un sistema frontal que se extiende en dirección sudeste-noroeste desde el Océano Atlántico hasta el continente,

allí se conecta con una depresión ubicada en el noreste de Argentina. La Figura 4(b), del campo de 500 hPa, muestra en el Océano Atlántico el eje de vaguada que acompaña el sistema frontal y el noreste del país afectado por la delantera de una vaguada en el Océano Pacífico. El contraste de las masas de aire se distingue en las Figuras 4(c) de temperatura y 4(d) de la humedad específica. Entre la Patagonia y el noreste de Argentina hay una diferencia de 24 K y 8 g vapor de agua/kg aire. El sistema nuboso asociado al frente frío se muestra en la Figura 4(e).

Por otro lado, la Figura 5 corresponde a una fecha clasificada como C. En la Figura 5(a) de la altura geopotencial del nivel de 1000 hPa del 29-11-2012 a las 3:00 hs (6 UTC) se observa la acción de un anticiclón sobre la costa de la provincia de Buenos Aires y el norte del país afectado por una depresión. La Figura 5(b) del campo de 500 hPa muestra la proximidad de una vaguada de onda corta a la Cordillera de los Andes y sobre el norte del país un gradiente débil de altura geopotencial. En la Figura 5(c) se observa que el norte argentino está dominado por

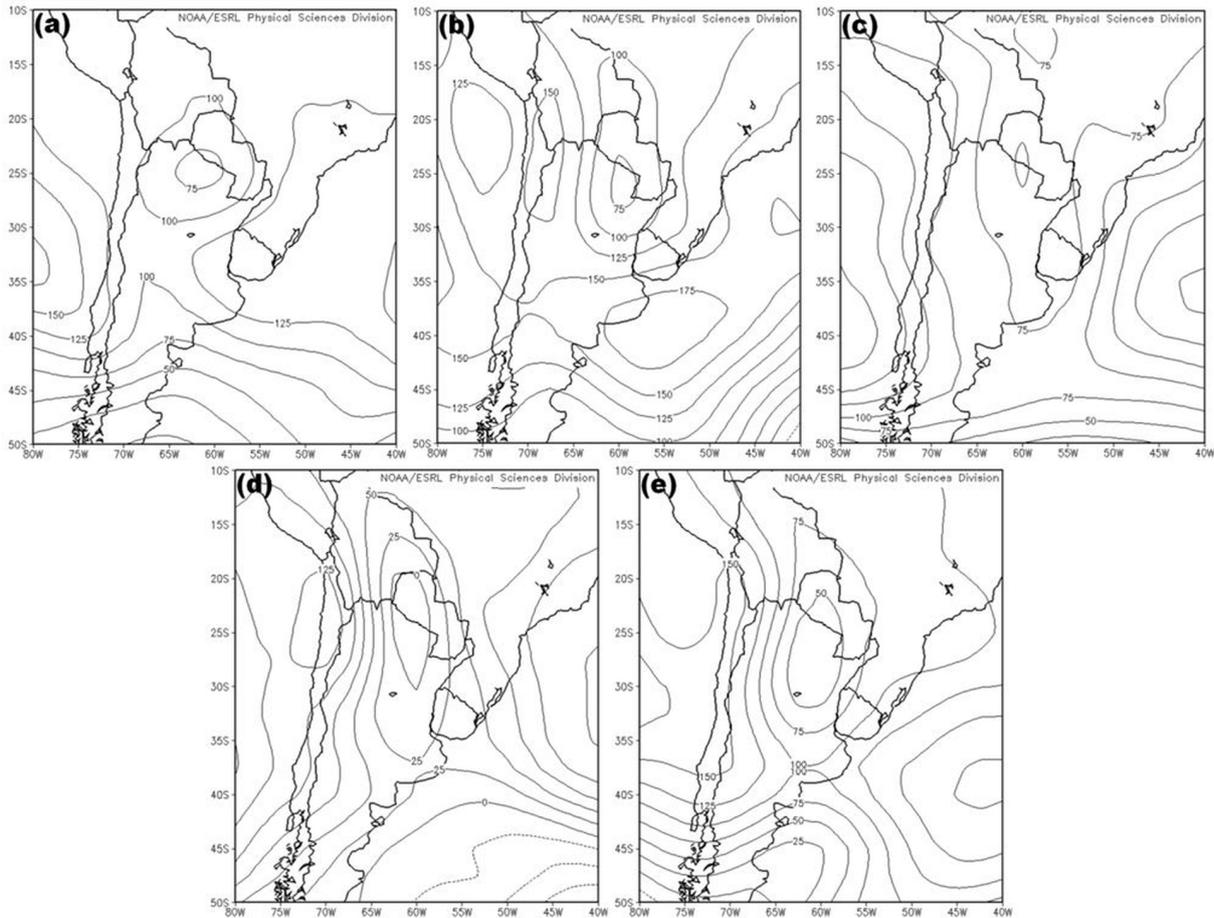


Figura 2: Altura geopotencial (m) del nivel de 1000 hPa. (a) 14/03/1972 15:00 hs, (b) 03/11/1978 09:00 hs, (c) 23/03/1990 15:00 hs, (d) 28/04/1992 21:00 hs, (e) 28/11/1994 09:00 hs.

temperaturas mayores a 300 K. La Figura 5(d) muestra en el noreste que la humedad específica varía entre 16 y 20 g vapor de agua/kg aire. El sistema nuboso que produce esta configuración se presenta en la Figura 5(e).

En la Tabla I se muestra el resultado de la clasificación de todas las fechas utilizadas como grupo de entrenamiento. Se incluyó una columna con una muy breve referencia de la situación sinóptica predominante, especialmente en el noreste de Argentina, en horario cercano al de ocurrencia de la RMA. Resultan once fechas clase C y ocho CFF.

Con el resultado anterior se confeccionó la Figura 6 que corresponde al diagrama Biplot con los eventos de la muestra de entrenamiento. Como

se observa el individuo 18, que corresponde a la RMA de Corrientes del 08/01/2014, presenta valores de las variables más parecidos al grupo de C, sin embargo, al ser clasificado mediante el análisis subjetivo de los campos sinópticos se confirma su asignación como CFF. En dicha Figura están delimitadas las dos regiones de clasificación que identifican a cada uno de los dos grupos. Estas regiones servirán para clasificar los eventos no incluidos en el grupo de entrenamiento.

Los valores medios que tienen los ejes discriminantes (las variables) en cada uno de los dos grupos se muestran en la Tabla II, salvo en los ejes de la dirección del viento que se indica la dirección más frecuente. Se observan dos aspectos, por un lado, las mayores diferencias

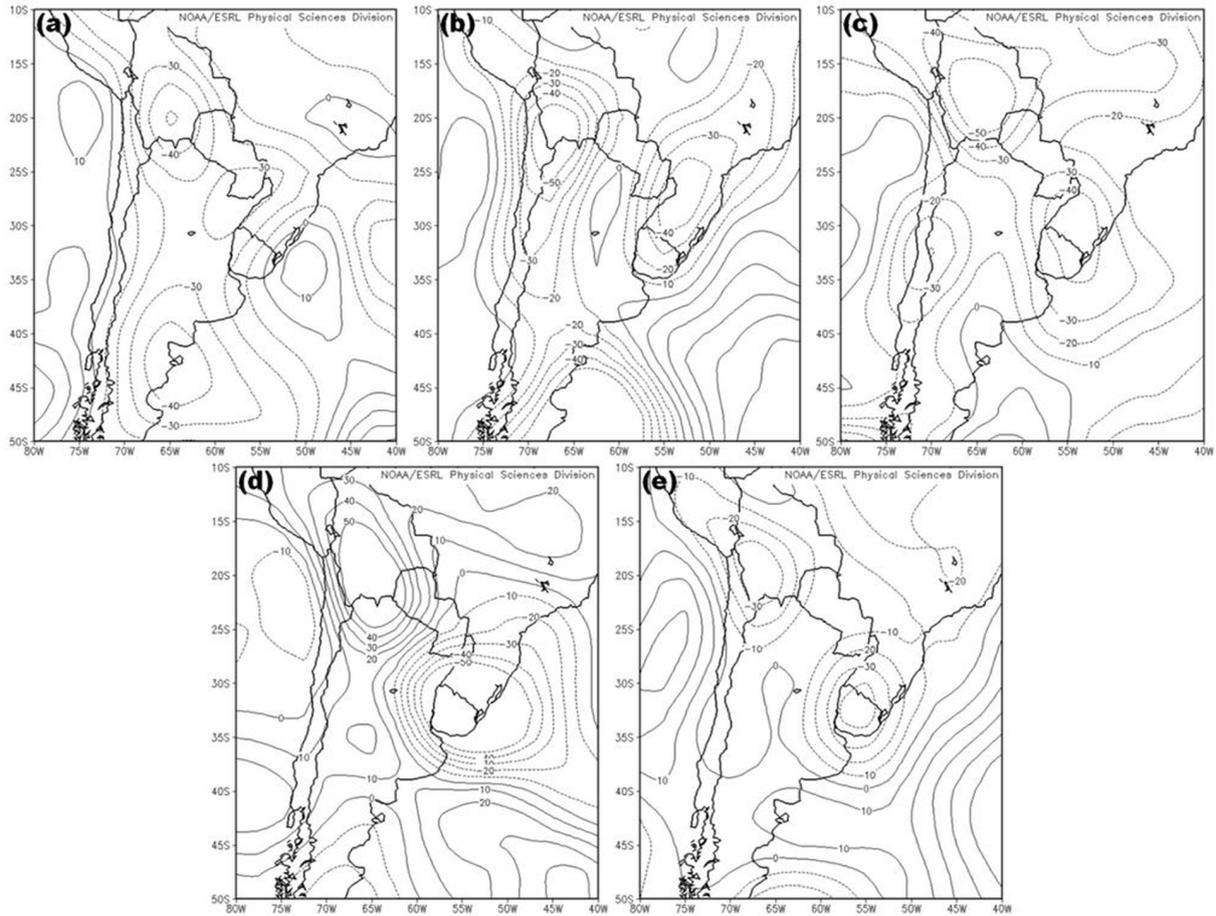


Figura 3: Variación (metros) en 12 horas de la altura geopotencial del nivel de 925 hPa. (a) 14/03/1972 diferencia entre las 21:00 y las 09:00 hs, (b) 03/11/1978 diferencia entre 15:00 y 03:00 hs, (c) 23/03/1990 diferencia entre 21:00 y 09:00 hs, (d) 28/04/1992 diferencia entre las 09:00 hs del 29 y las 21:00 hs del 28, (e) 28/11/1994 diferencia entre 15:00 y las 03:00 hs.

se producen en las variables que representan la evolución (diferencias) de las condiciones atmosféricas reinantes: presión, temperatura y humedad. El otro aspecto es que hay un ambiente más húmedo y con menor presión atmosférica cuando ocurren eventos clase C. Por otra parte, se observa que la diferencia entre los dos grupos de la velocidad horaria es $1,2 \text{ m s}^{-1}$ y que la diferencia de la ráfaga máxima es $1,4 \text{ m s}^{-1}$, ambas mayores en los casos C. Las direcciones prevalecientes son del sudoeste (240°) en eventos C y del sur (180°) en los CFF.

Se valoró en cada fecha el error cometido por el método del ADC comparando su resultado con los valores medidos. La distribución de

frecuencias del valor absoluto del error relativo porcentual cometido según los ejes canónicos de las diferencias (DP6, DP24, DT24, DT-Td6, DT-Td24 y DTPE24), que son los que tienen mayor variación entre clases, se muestra en la Figura 7(a). En ella se observa que 58% de las de las fechas, es decir, 11 de las 19, tienen errores inferiores a 15%. Cuando se consideran los errores de cada eje canónico resulta que el de menor error es el que evalúa la diferencia de presión, DP, y el de mayor error es el eje asociado a la anomalía de la humedad, DT - Td. En cada grupo el error general es 13% en la clase C y 16% en CFF.

En base a los resultados de la muestra de

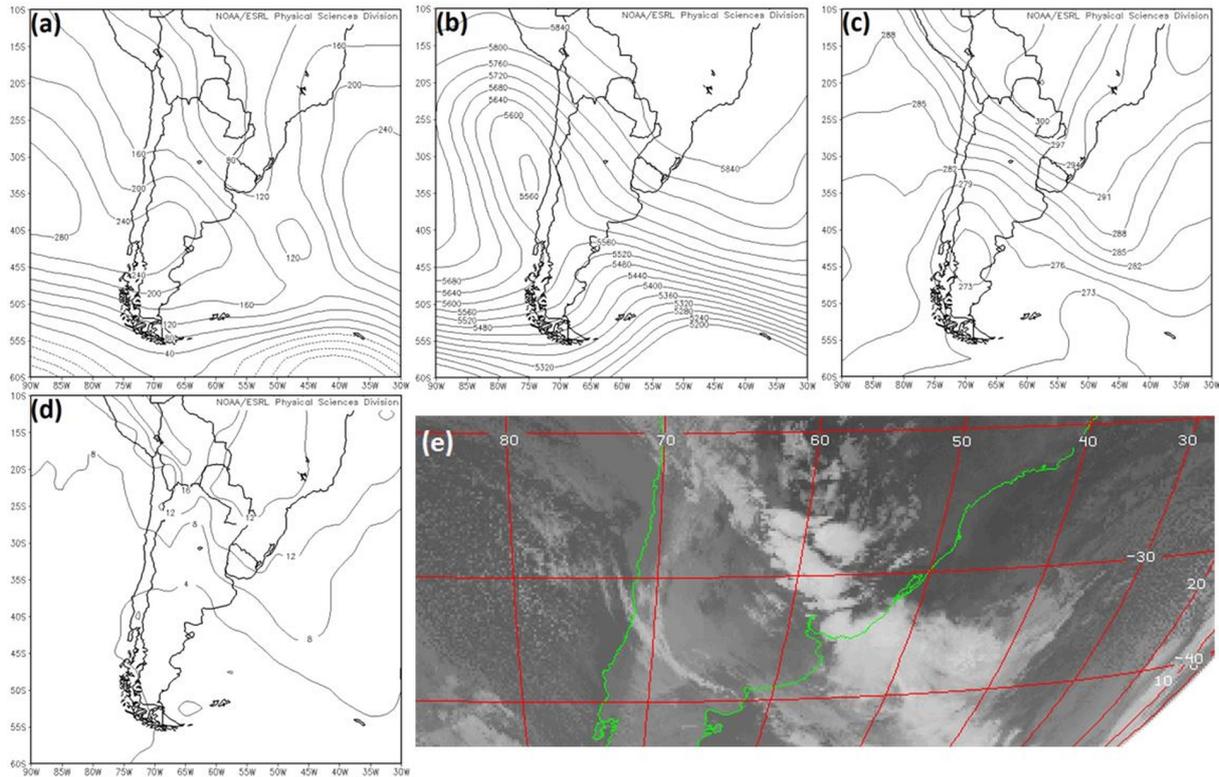


Figura 4: Campos correspondientes al 1° de Septiembre de 2010 a las 03:00 hs. (a) altura geopotencial (m) del nivel de 1000 hPa, (b) altura geopotencial (m) del nivel de 500 hPa, (c) temperatura (K) en 1000 hPa, (d) humedad específica (g vapor de agua/kg aire) en 1000 hPa, (e) imagen infrarroja del satélite GOES13 (canal 4) de las 00:00 hs.

entrenamiento se define sistema frontal frío cuando, en promedio y simultáneamente, en las 6 y/o 24 horas posteriores al evento la temperatura desciende más de 6,5 K, la presión atmosférica aumenta 9,0 hPa y la diferencia entre la temperatura y la temperatura de rocío, indicativa de la humedad del aire, aumenta en 3,0 K.

3.4 Clasificación de las fechas no incluidas en la muestra de entrenamiento

El resultado del análisis ADC se muestra en la Tabla III. De las 77 fechas, 48 (62,3%) fueron clasificadas C y 29 (37,7%) como CFF. En la Figura 8 se muestra el plano principal con todas las fechas. En ella se observa que 3 fechas clasificadas CFF (en azul: 33, 62 y 72) caen dentro de la región de C, y viceversa, con la fecha 58. Se analizaron los campos a escala sinóptica e imágenes satelitales para confirmar la

clasificación de estos cuatro individuos (o fechas).

Se calcularon los valores medios que tienen los ejes canónicos en cada grupo. Los resultados de la Tabla IV muestran que hay menores diferencias entre grupos en las variables que miden el estado de la atmósfera en el momento de la ráfaga; y mayores variaciones entre grupos en las variables que consideran las diferencias en 6 o 24 horas. Cuando ocurren eventos clase C el ambiente es un poco más húmedo y con mayor presión atmosférica que cuando ocurre CFF. Se nota poca diferencia en la temperatura y viento. El valor de la ráfaga máxima es $0,9 \text{ m s}^{-1}$ mayor en el grupo C. La dirección más frecuente de la ráfaga máxima es del sur (180°) en los eventos CFF y del sudoeste (240°) en los del grupo C.

Además, se observa que la temperatura aumenta, en promedio en 24 horas, 1,5 K cuando ocurre C

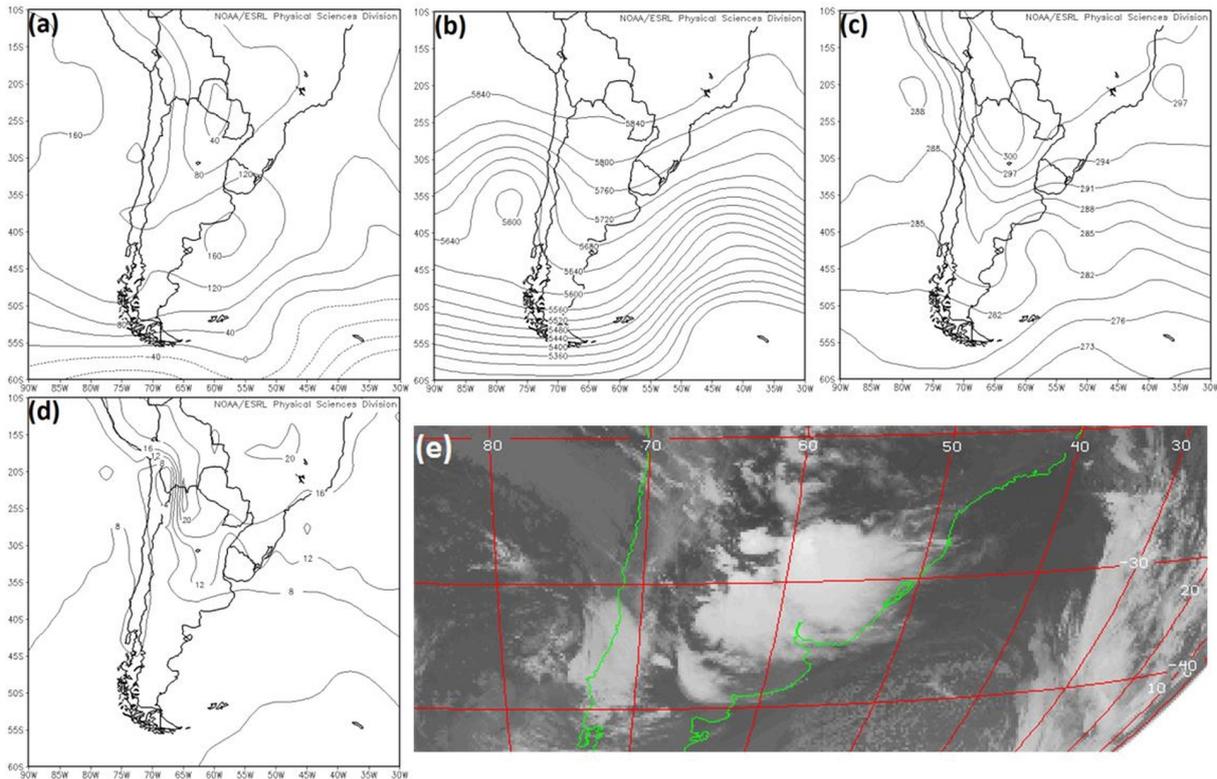


Figura 5: : Campos correspondientes al 29 de Noviembre de 2012 a las 03:00 hs. De (a) a (d) ídem Figura 1, (e) imagen infrarroja del satélite GOES13 (canal 4) de las 02:00 hs.

y disminuye 5,2 K cuando la ráfaga se produjo por CFF. La presión en 24 horas aumenta 10 hPa cuando hay CFF y, sólo 1,6 hPa en los casos C. La evolución de la humedad, evaluada con T-Td, muestra poco cambio tanto en las 6 como en las 24 horas posteriores a la ocurrencia de la RMA, los valores indican un ligero secamiento de la atmósfera (- 1,6 K en el grupo C y - 0,7 K en el grupo CFF).

El error cometido en las predicciones se observa en la Figura 7(b). En promedio 0,81 de las predicciones tiene errores inferiores a 15%. Cuando se consideran los errores de cada eje canónico resulta que el de menor error es el que evalúa la anomalía de presión, DP (6%), y el de mayor error es el eje asociado a la evolución de la temperatura, DT (13%). En cada grupo el error medio es 9% en la clase C y 12% en CFF.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La clasificación de los eventos de vientos intensos en familias homogéneas es utilizada para estudiar en ingeniería civil la acción del viento sobre las estructuras y para determinar la distribución de probabilidades de las velocidades extremas del viento y los efectos extremos que provoca. Los trabajos publicados en este tema tienden a clasificar las condiciones meteorológicas que produjeron la RMA (extremos independientes) con diferentes esquemas de agrupamiento, en general, separan los eventos producidos por tormentas convectivas de los producidos por sistemas de escala sinóptica. Esta separación se debe a que las características del viento en ambos grupos son distintas: las ráfagas producidas por tormentas tienen velocidades muy altas, mientras que las velocidades horarias son bajas; y viceversa, cuando el extremo anual se produce por otro mecanismo.

En este trabajo se agruparon los mecanismos que

Nº	Clase	Fecha	Hora	Descripción
1	C	17/02/2004	12	BNA extendida, inestabilidad (LI < - 4 K)
2	C	06/04/2004	23	BNA extendida, inestabilidad (LI < - 4 K), flujo del norte en niveles bajos
3	C	16/12/2005	18	BNA extendida hacia el este, flujo del norte en capas bajas, inestabilidad (CAPE > 1500 J/kg)
4	C	25/08/2006	22	BNA extendida hacia el sudeste, depresión relativa ubicada en las localidades estudiadas la madrugada del día 26, flujo norte intenso en niveles bajos (V > 15 m/s)
5	C	02/12/2006	21	BNA extendida hacia el este, flujo del norte en capas bajas, inestabilidad (CAPE > 3000 J/kg)
6	C	21/10/2007	2	BNA, flujo del noreste, inestabilidad (CAPE > 2500 J/kg)
7	CFE	12/08/2008	5	Gradiente horizontal de presión por anticiclón post frontal, Frente frío pasa a las 03 hs, convergencia en capas bajas
8	CFE	22/10/2008	5	Frente Frío, depresión relativa ubicada en las localidades estudiadas a las 03 hs, inestabilidad (CAPE > 1500 J/kg)
9	CFE	04/04/2009	13	Frente Frío, convergencia en capas bajas
10	C	26/12/2009	20	Centro y norte de Argentina dominado por sistema de baja presión térmico, fuerte inestabilidad especialmente a las 18 hs (CAPE > 4000 J/kg)
11	CFE	1/09/2010	0	Frente Frío, BNA extendida al sudeste y Anticiclón en el Océano Atlántico producen flujo del noreste en capas bajas
12	CFE	17/09/2011	3	Frente Frío, BNA extendida hacia el este (conectadas BNOA y BCH), depresión relativa ubicada en las localidades estudiadas a las 03 hs
13	CFE	30/11/2011	10	Fuerte gradiente horizontal de presión por Anticiclón en el centro del país y baja migratoria al este de Uruguay, Frente Frío
14	C	11/01/2012	17	BNA extendida hacia el este, convergencia en capas bajas, inestabilidad (CAPE < 2000 J/kg)
15	C	29/11/2012	2	BNA, inestabilidad (LI < - 3 K)
16	CFE	24/10/2013	3	Frente Frío, gradiente horizontal de presión por anticiclón post frontal ubicado en el centro del país, convergencia en capas bajas
17	C	31/10/2013	1	Flujo del noreste penetra hasta el norte de la Patagonia, profunda y extendida BNA e intenso Anticiclón en el Océano Atlántico, inestabilidad (LI < - 4 K)
18	CFE	08/01/2014	0	Frente Frío, convergencia en capas bajas
19	C	02/09/2014	6	BNA extendida hacia el este, flujo del norte en capas bajas, inestabilidad (LI < - 4 K; CAPE < 2000 J/kg)

Tabla 1: Clasificación de las fechas del grupo de entrenamiento. La enumeración de la primera columna corresponde a los puntos-individuos de la Figura 6. El horario de ocurrencia es en hora local. BNA: Sistema de baja presión en el norte del país. BNOA: Baja del Noroeste Argentino. BCH: Baja del Chaco. CFE: Convección asociada a Frente Frío. CAPE: Convective Available Potential Energy, LI: Lifted Index. V: vector velocidad en el nivel de 925 hPa.

originaron la RMA de Corrientes y Resistencia según tres esquemas clasificatorios analizando una serie de superestación formada por 77 registros. Cuando se observaron los datos horarios se encontró con la dificultad de series que no tienen las 24 horas de observaciones diarias en parte del período (1968-1975 en Resistencia; 1968-1997 en Corrientes) impidiendo el cálculo de los cambios de las variables hora a hora.

En el primer tipo de agrupamiento se separaron los eventos en originados por Tormenta de aquellos producidos por Otro Mecanismo

quedando en evidencia que lo que predomina en Corrientes y Resistencia son las tormentas convectivas puesto que de los 77 eventos analizados sólo 3 (3,9%) correspondieron a Otro Mecanismo.

En el segundo tipo clasificatorio se separaron los eventos de Viento Sinóptico de los de Viento No Sinóptico. Los eventos de viento sinóptico se definieron como aquellos producidos por una depresión en el norte de Argentina, frecuentemente ubicada en la frontera entre Paraguay y la provincia de Formosa, que con las horas se extiende a las ciudades estudiadas o

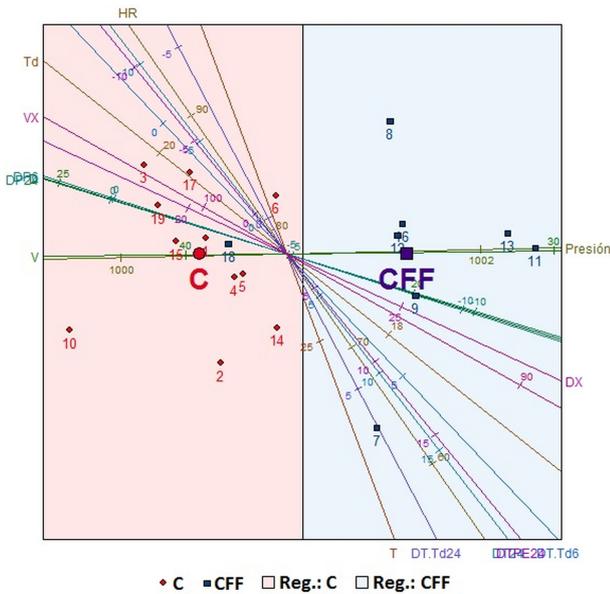


Figura 6: Posición en el plano principal de las fechas de la muestra de entrenamiento en función de los ejes multivariados. Sombreado cada una de las regiones de clasificación. Los números corresponden a los de la 1ª columna de la Tabla I. La posición media en el plano principal de cada grupo se indica con C de convección no asociada y CFF de convección asociada al pasaje de un sistema frontal frío.

desplaza a través de ellas. Estos eventos de escala sinóptica también están caracterizados por la ocurrencia de actividad convectiva. En este tipo de agrupamientos se concluye que la mayoría de los casos (93,5 %) son clasificados como Viento No Sinóptico. La cantidad de casos encontrados en este trabajo difiere de los reportados en Vallis y Loredou-Souza (2018) que encontraron 83 % de eventos no sinópticos cuando analizaron datos de estaciones meteorológicas automáticas y 100 % cuando utilizaron datos METAR y SYNOP de aeropuertos de Brasil, Argentina y otros países de Sudamérica. El algoritmo de detección que utilizaron incluía los cambios temporales de la temperatura, presión y temperatura de rocío. La diferencia entre los resultados de los autores mencionados y los de este trabajo se debe principalmente a las muestras analizadas, Vallis y Loredou-Souza (2018) analizaron 768 fechas, en el

Variable	Media Grupo C	Media Grupo CFF
T (K)	23,4	23,8
Td (K)	19,4	17,7
HR (%)	81,5	73,9
PRESIÓN (hPa)	1000,4	1001,5
D (°)	240	180
V (m s ⁻¹)	11,0	9,8
DP24 (hPa)	-2,6	-8,9
DP6 (hPa)	-2,7	-9,1
DT24 (K)	-0,4	6,5
DT-Td6 (K)	1,7	3,6
DT-Td24 (K)	0,03	2,3
DTPE24 (K)	-0,2	7,2
DX (°)	240	180 - 240
VX (m s ⁻¹)	27,6	26,2

Tabla II: : valores medios de las variables de cada uno de los grupos de la muestra de entrenamiento. En las direcciones del viento se muestra la más frecuente y no el promedio. D y V, dirección e intensidad del viento horario y DX y VX los correspondientes a la RMA.

período 2005 – 2015, con vientos cuya velocidad fue mayor o igual a 20 m s⁻¹, mientras que aquí se analizaron los eventos de la RMA (77 fechas).

El tercer esquema de clasificación separa la Convección no asociada a un sistema frontal frío de aquella que sí está asociada. Para ello se utilizó el método del análisis discriminante canónico como una metodología semiobjetiva en la que sólo la muestra de entrenamiento y los casos dudosos se clasifican en forma manual con los análisis de los campos meteorológicos y/o imágenes satelitales. En el resto de las fechas el resultado de la clasificación se obtiene de la inspección visual de la posición del evento en el plano principal de un ADC. Los resultados indican que 36 % de las fechas corresponden a tormentas convectivas asociadas a un sistema frontal frío, el 64 % restante son eventos producidos por convección no asociada a un frente frío. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Nicolini y Torres Brizuela (1998) en un estudio estadístico de vientos fuertes (>15,0 m/s) asociados a convección en Ezeiza y Resistencia. Cuando tipificaron las situaciones meteorológicas a escala sinóptica correspondientes a los casos más intensos (v >20 m/s) encontraron que,

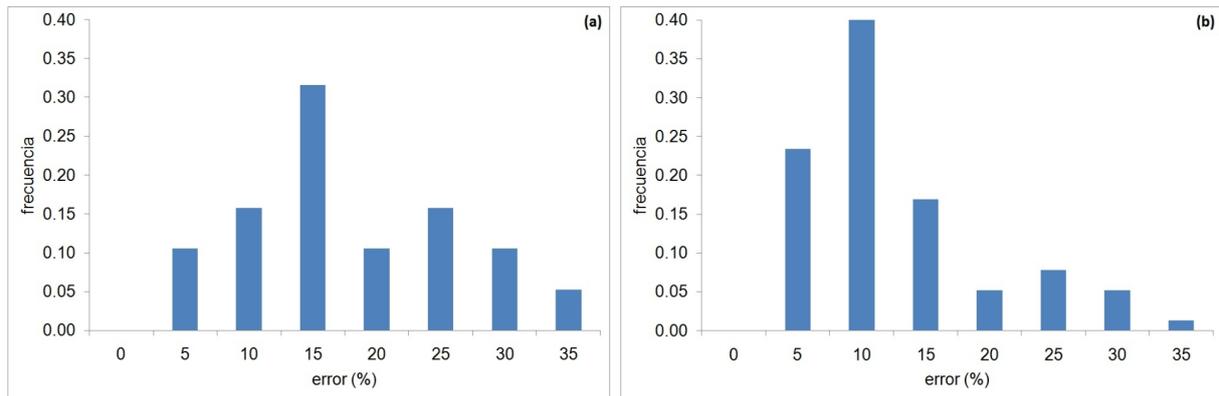


Figura 7: Distribución del valor absoluto del error relativo porcentual cometido con el método del ADC. (a) Muestra de entrenamiento. (b) Muestra total.

N°	Tipo	Fecha	Hora	
1	C	20/12/1968	9	R
2	C	07/01/1969	21	C
3	CFF	18/09/1970	21	C
4	C	11/12/1970	3	R
5	C	11/11/1971	15	R
6	C	14/03/1972	15	R
7	C	10/01/1973	21	C
8	C	10/10/1973	15	R
9	CFF	29/10/1974	3	C
10	C	02/03/1975	3	C
11	CFF	08/11/1975	21	R
12	C	15/12/1976	21	R
13	C	31/12/1976	21	C
14	CFF	27/11/1977	9	C
15	C	03/11/1978	9	C
16	C	09/12/1979	2	R
17	CFF	10/02/1980	6	R
18	C	25/10/1981	0	R
19	CFF	14/12/1981	21	C
20	C	12/09/1982	4	R
21	C	19/01/1983	15	C
22	C	24/01/1983	3	R
23	CFF	17/10/1984	8	R
24	CFF	18/05/1985	21	C
25	CFF	12/01/1986	15	C
26	C	11/03/1986	9	R
27	CFF	25/07/1987	23	R
28	C	22/10/1988	16	R
29	CFF	20/11/1988	21	C
30	C	03/02/1989	7	R
31	CFF	09/04/1989	21	C
32	C	23/03/1990	14	R
33	CFF	12/12/1991	1	R
34	C	19/12/1991	21	C
35	CFF	28/04/1992	21	C
36	C	02/05/1993	12	C
37	C	28/11/1994	10	C
38	CFF	09/01/1995	7	C
39	C	01/12/1995	2	R
40	CFF	05/10/1996	2	C
41	C	26/12/1996	0	R
42	CFF	19/04/1997	14	R
43	C	12/11/1997	7	C
44	C	18/02/1998	4	C
45	C	23/11/1998	23	R
46	C	22/02/1999	19	C
47	CFF	28/06/1999	13	R
48	C	12/01/2000	4	R
49	CFF	23/11/2000	23	C
50	C	24/09/2001	8	C
51	C	15/11/2001	23	R
52	C	08/04/2002	7	R
53	CFF	28/08/2002	19	C
54	CFF	22/12/2003	8	R
55	C	17/02/2004	12	R
56	C	06/04/2004	23	C
57	C	16/12/2005	18	C
58	C	25/08/2006	22	C
59	C	02/12/2006	21	R
60	C	21/10/2007	2	R
61	CFF	12/08/2008	5	R
62	CFF	22/10/2008	5	C
63	CFF	04/04/2009	13	C
64	C	26/12/2009	20	R
65	CFF	01/09/2010	0	C
66	CFF	17/09/2011	3	C
67	CFF	30/11/2011	10	R
68	C	11/01/2012	17	R
69	C	29/11/2012	2	C
70	CFF	24/10/2013	3	C
71	C	31/10/2013	1	R
72	CFF	08/01/2014	0	C
73	C	02/09/2014	6	R
74	C	19/09/2015	12	C
75	C	13/12/2015	3	R
76	C	26/02/2016	21	R
77	C	12/10/2016	22	C

Tabla III: Clase de evento que produjo la RMA registrada. La 1° columna indica la numeración utilizada en la Figura 8, la 2° columna el resultado de la clasificación: C es evento convectivo no producido por el pasaje de un frente frío y CFF es convección asociada a un sistema frontal frío, luego están la fecha y hora y por último, en la 5° columna la estación meteorológica, R de Resistencia y C de Corrientes.

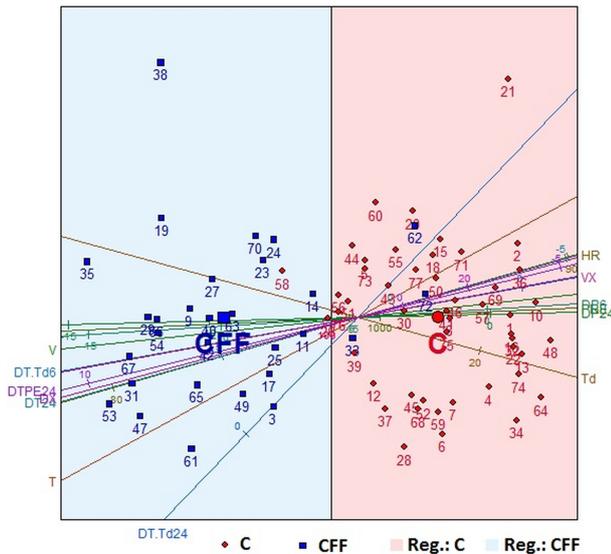


Figura 8: Posición en el plano principal de las fechas de la muestra superestación y ejes canónicos multivariados predictivos. Sombreado la región de cada clase. Los números corresponden a los de la 1ª columna de la Tabla III. La posición media en el plano principal de cada grupo se indica con C de convección y CFF para convección asociada a un frente frío y sus valores se muestran en la Tabla IV.

Variable	Media Grupo C	Media Grupo CFF
T (K)	22,3	23,3
Td (K)	20,1	19,6
HR (%)	88,2	82,9
PRESIÓN (hPa)	1000,9	998,0
D (°)	180	180
V (m s ⁻¹)	9,4	9,6
DP24 (hPa)	-1,6	-10,0
DP6 (hPa)	-1,6	-10,5
DT24 (K)	-1,5	5,2
DT-Td6 (K)	0,2	1,5
DT-Td24 (K)	-1,6	-0,7
DTPE24 (K)	-1,3	6,1
DX (°)	240	180
VX (m s ⁻¹)	28,3	27,4

Tabla IV: Ídem Tabla II del total de los 77 casos.

en Resistencia de los 22 casos que las autoras analizaron, 32 % (7 de 22) correspondieron al pasaje de un frente frío.

Las diferencias en 24 horas, desde la hora de la

ráfaga, muestran disminución de la temperatura (aumento de presión) en 5,2 K (10,0 hPa) en los eventos asociados a un frente frío que son comparables a los encontrados por Ferreira y Nascimento (2015).

Los errores de predicción de los eventos en función de los ejes multivariados, según la metodología usada del Biplot en el contexto del análisis canónico discriminante, fueron en promedio general de 10,5 % y se consideran adecuados.

El análisis de la interrelación entre los resultados muestra que de las 74 fechas clasificadas Tormentas como la causante de la RMA, 29 estuvieron asociadas al pasaje de un frente frío, y de estas 29 una sola estuvo relacionada con una depresión cerrada. De las 3 fechas restantes clasificadas como Otro Mecanismo el método del ADC efectuado a los datos medidos resultó que una corresponde a Convección asociada al pasaje de un frente frío y las otras dos a Convección no asociada.

La principal diferencia entre el segundo tipo de clasificación respecto del primero y tercero, es que éstos últimos se basan en el análisis de datos medidos en Resistencia y Corrientes.

Los tipos clasificatorios estudiados en este trabajo no tienen ventaja (o desventaja) uno sobre otro puesto que cada uno aborda un aspecto distinto del mecanismo que produce la ráfaga máxima anual. Sin embargo, dado que en Resistencia y Corrientes predomina la actividad convectiva como causante de la RMA el esquema de separación entre convección asociada o no a un frente frío proporciona mayor detalle.

La principal conclusión de este trabajo se refiere a que las localidades no están sometidas a clima eólico mixto, sino que la RMA se relaciona a un clima eólico simple dominado por actividad convectiva intensa que produce tormentas de las cuales sólo un tercio se asociaron al pasaje de un frente frío. Dentro de este tercio sólo una estuvo relacionada con una depresión cerrada ubicada

en el norte de Argentina (Viento Sinóptico).

Agradecimientos: Los datos de las libretas meteorológicas y los valores extremos diarios de Corrientes y Resistencia fueron brindados por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. Los autores agradecen a los revisores por sus comentarios y sugerencias. Este trabajo fue financiado con subsidios PI 04/I227 y PI 04/I228 de la Universidad Nacional del Comahue y PI 16 D005 de la Universidad Nacional del Noreste. Los autores agradecemos las valiosas sugerencias del Prof. Luis A. Arenas en la aplicación del ADC.

REFERENCIAS

- Altinger de Schwarzkopf, M. L. 1997. Fundamentos Meteorológicos que sustentan el trazado de Isolíneas de la velocidad básica de Viento del Reglamento CIRSOC 102-2005, Informe Interno, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Buenos Aires, Argentina (<https://www.inti.gob.ar/areas/servicios-industriales/construcciones-e-infraestructura/cirsoc/publicaciones>).
- Choi, E. C. C., 1999. Extreme wind characteristics over Singapore — an area in the equatorial belt. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 83, 61–69.
- Choi, E. C. C. y Hidayat, F. A., 2002. Gust factors for thunderstorm and non-thunderstorm winds. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 90, 1683 – 1696.
- Choi, E. C. C. y Tanurdjaja, A., 2002. Extreme wind studies in Singapore. An area with mixed weather system. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 90, 1611 – 1630.
- 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.
- Cruz Castillo, J. G., Ganeshanandam, S., Mackay, B. R., Lawes, G. S., Lawoko, C. R. O. y Woolley D. J. 1994. Applications of canonical discriminate analysis. *Hortscience*, 29 (10), 1115 - 1119.
- Cuadras, C. M., 2014. Nuevos Métodos de Análisis Multivariante. C.M.C. Editions. Barcelona. 305 págs.
- Durkee, J. D. y Mote, T. L. 2010. A climatology of warm-season mesoscale convective complex in subtropical South America, *International Journal of Climatology*, 30, 418 - 431.
- Fernández Lorenzo, I. y Parnás, V. B. E. 2016. Análisis de métodos de vientos extremos para calcular las velocidades básicas. *Revista Cubana de Ingeniería*. VII, 2, 15 – 25.
- Ferreira, V. y Nascimento, E. L., 2016. Convectively-induced severe wind gusts in southern Brazil: surface observations, atmospheric environment, and association with distinct convective modes. *Actas 28th Conference on Severe Local Storms*. Portland, USA. 11 pp.
- Gomes, L. y Vickery, B. J., 1977/1978. Extreme wind speeds in mixed climates. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2, 331 – 344.
- Kalnay, E. y coautores, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:437 – 471.
- Kasperski, M., 2002. A new wind zone map of Germany. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 90, 1271 – 1287.
- Kruger, A. C., Retief, J. V. y Goliger, A. M. 2013. Strong winds in South Africa: Part 1: Application of estimation methods. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. 55 (2), 29 – 45.
- la Grange, A., le Roux, N. y Gardner-Lubbe, S., 2009. BiplotGUI: Interactive Biplots in R. *J. Statistical Software*. 30, 12, 1 – 37.
- Lombardo, F. T., Main, J. A. y Simiu, E., 2009. Automated extraction and classification of thunderstorm and non-thunderstorm wind data for extreme-value analysis. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 97, 120 – 131.

- Lorbes Medina, J., Garcia-Orellana, Y., Pino, M. M. y Diaz, L., 2014. Análisis discriminante canónico con técnicas gráficas multivariadas aplicado a un diseño con dos factores. *AVANCES Investigación en Ingeniería* 11, 38 – 47.
- Natalini, B. y Natalini, M. B. 2018. Velocidades de viento extremas en el nordeste de Argentina. En prensa en *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*.
- Nicolini, M. y Torres Brizuela, M., 1997. Estadística de vientos Fuertes asociados a convección en Ezeiza y Resistencia y estudio numérico de los forzantes en un caso lineal. *Meteorológica*, 22, 19 – 35.
- Peña, D., 2002. Análisis de Datos Multivariantes. McGraw-Hill Interamericana de España S.L. 529 págs.
- Peterka, J. A. 1992. Improved extreme wind prediction for the United States. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 41, 533 – 541.
- Peterka, J. A. y Shahid, S. 1998. Design gust wind speeds in the United States. *Journal of Structural Engineering*. 124, 207 – 214.
- Rasmussen, K. L. y Houze, R. A. 2011. Orographic convection in subtropical South America as seen by the TRMM Satellite. *Monthly Weather Review*, 139, 2399 – 2420.
- 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., Viollaz, A. J. y Reimundin, J. C. 1977. Some recent results on probabilistic models of extreme wind speeds. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2, 271 – 287.
- Salio, P., M. Nicolini y E. J. Zipser, 2007. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. *Monthly Weather Review*, 135, 1290–1309.
- Seluchi, M. E., 1993, Estudio del comportamiento de los sistemas sinópticos migratorios en la Argentina. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina. 276 pp.
- Seluchi, M. E. y Garreaud, R. D., 2012. Campos médios e processos físicos associados ao ciclo de vida da Baixa do Chaco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 447 – 462.
- Seluchi, M. E. y Saulo, A. C., 2012. Baixa do Noroeste Argentino e Baixa do Chaco: características, diferenças e semelhanças. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 49–60.
- Simiu, E. y Filliben, J. J., 1999. Design gust wind speeds in the United States. *Journal of Structural Engineering*, 125, 1077-1080.
- Solari, G., De Gaetano, P. y Repetto, M. P., 2013. Wind Loading and Response of Structures in Mixed Climates, In: *Proceedings of The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Chennai, India.
- Torrielli, A., Repetto, M. P y Solari, G., 2011. Long-term simulation of the mean wind speed. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 90, 1139 – 1150.
- Twisdale, L. A. y Vickery, P. J., 1992. Research on thunderstorm wind design parameters. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 41, 545 – 556.
- Vallis, M. B. y Loredó-Souza, A. M., 2018. Identification and classification of synoptic and non-synoptic extreme events. *Actas de las XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Lima, Perú. 24 pp.
- Vidal, L. 2014. Convección extrema sobre Sudamérica: estructura interna, ciclos de vida e influencia de la topografía en la iniciación. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina. 275 pp.
- 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.

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.

Zipser, E.J., Cecil, D.J., Liu, C., Nesbitt, S.W. y Yorty, D.P. 2006. Where are the most intense thunderstorms on Earth? Bulletin of

the American Meteorological Society, 87, 1057 – 1071.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.