

27 y 28 de junio de 2019 - Ciudad Universitaria, Córdoba

## EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN CÓRDOBA, ARGENTINA, ENTRE 1951 Y 2010

Antonio de la Casa

Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba  
Ing. Agr. Félix Aldo Marrone 746, Ciudad Universitaria. (5000) Córdoba, Argentina  
delacasa@agro.unc.edu.ar

### Resumen

La variación que experimentó la velocidad media del viento (VV) entre 1951 y 2010 en el territorio central de la Argentina se describe a partir de la información de cuatro estaciones meteorológicas (Río Cuarto Aero (RC), Marcos Juárez Aero (MJ), Pilar Observatorio (PI) y Villa Dolores Aero (VD)) de la red de superficie del Servicio Meteorológico Nacional. Asimismo, los cambios ocurridos se evaluaron en su tendencia temporal con el método no paramétrico de Theil-Sen, considerando dos series de tiempo de valores mensuales y anuales: una originada a partir de datos diarios con registros entre 1968 y 1991; y la otra conformada con datos medios de seis periodos de 10 años consecutivos que comienza en 1951-1960 y termina en 2001-2010. Los valores medios anuales de VV en RC y MJ, de 4,5 y 3,9 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, casi duplican a los de PI y VD, de 2,4 y 2,1 m s<sup>-1</sup>, respectivamente. No obstante, todos los lugares presentan el mismo régimen estacional, con valores mínimos en otoño y máximos en primavera. Durante el periodo 1968-1991 se registró una disminución significativa de la VV media anual en MJ, PI y VD. La intensidad del viento en estos lugares también mostró un comportamiento decreciente. Este cambio de mediano término sólo en MJ se sostiene a largo plazo y, con un nivel ligeramente de menor seguridad, en VD. Con una tasa de -0,05 m s<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, la VV en MJ se ha aproximado actualmente a los valores de PI y VD. En PI, por su parte, la tendencia de largo plazo presenta pendiente nula, indicando un régimen de VV de carácter estacionario. Este mismo comportamiento estacionario se presenta en RC, donde no se encontró evidencia significativa de la tendencia en ninguno de los dos periodos analizados. De esta forma, el sitio de mayor régimen de VV no ha modificado su potencial de aprovechamiento eólico a lo largo del tiempo, ni su influencia más ostensible sobre la demanda evaporativa de la atmósfera. La evaluación de cambio climático demanda utilizar series de tiempo que posean la mayor extensión posible.

Palabras clave: tendencia; Theil-Sen; estacionario

### Abstract

The variation experienced by the average wind speed (VV) in the central territory of Argentina between 1951 and 2010 is described from data of four surface meteorological stations (Río Cuarto Aero (RC), Marcos Juárez Aero (MJ), Pilar Observatorio (PI) and Villa Dolores Aero (VD)) from the Servicio Meteorológico Nacional network. Likewise, changes occurred were evaluated in their temporal trend with Theil-Sen's nonparametric method, assessing two monthly and annual time series: one originated from daily data between 1968 and 1991; and the other with average data of six periods of 10 consecutive years beginning in 1951-1960 and ending in 2001-2010. The average annual VV of RC and MJ, of 4.5 and 3.9 m s<sup>-1</sup>, respectively, almost double those of PI and VD, of 2.4 and 2.1 m s<sup>-1</sup>, respectively. However, all sites have the same seasonal regime, with minimum values in autumn and maximum in spring. During the 1968-1991 period, there was a significant decrease in the average annual VV in MJ, PI and VD. The intensity of the wind in these places also showed a decreasing behavior. This medium-term change is only sustained in the long term in MJ and, less likely, in VD. With a rate of -0.05 m s<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, the VV in MJ has now approached those values of PI and VD. In PI, on the other hand, the long-term trend presents a null slope, indicating a steady-state VV regime. The same stationary behavior was determined in RC, where no significant evidence of temporal change was found in any of the periods analyzed. In this way, the site with the highest VV regime has not modified its wind potential over time, nor its most obvious influence on the

evaporative demand of the atmosphere. The climate change evaluation demands the use of time series that have the greatest possible extension.

Key words: trend; Theil-Sen; stationary

## 1. Introducción

La velocidad del viento (VV) es una variable meteorológica que, aparte de su eventual aprovechamiento energético (Holt and Wang, 2012), tiene un fuerte impacto ambiental. Además de estar vinculada directamente con la capacidad erosiva del aire en movimiento, desempeña un papel relevante sobre las condiciones hidrológicas de un territorio al influir en la demanda evaporativa de la atmósfera (DEA). En este sentido, es una de las 4 variables fundamentales que el método de Penman-Monteith utiliza a los efectos de estimar la tasa de evapotranspiración potencial (EP) o de referencia (ET<sub>o</sub>) (Allen et al., 1998), el indicador más generalizado para expresar la DEA.

Contrariamente a las expectativas generales sobre un aumento de la evaporación supeditado al incremento de la temperatura del aire, tanto la evaporación como la EP o ET<sub>o</sub> han registrado disminuciones desde la década de 1950 en diferentes regiones del mundo (Chattopadhyay y Hulme, 1997; Thomas, 2000; Lawrimore y Peterson, 2000; Golubev et al., 2001; Roderick y Farquhar, 2002; 2004; Hobbins et al., 2004; Liu et al., 2004; Liu and Zheng, 2004; Chen et al., 2005; Xu et al., 2006). Este fenómeno, al que se lo denominó "paradoja de la evaporación de tanque" (Brutsaert y Parlange, 1998), describe una aparente contradicción referida a la disminución que ha experimentado la evaporación en un contexto donde la temperatura del aire está en aumento.

Una de las razones que explica la inconsistencia de las tendencias de ET<sub>o</sub> se debe a que algunos estudios de cambio climático utilizan ecuaciones empíricas para determinar su valor basadas en la temperatura o la radiación solar, que no consideran en absoluto la influencia de otros parámetros climáticos críticos como la radiación neta, la velocidad del viento o el déficit de presión el vapor. Esta omisión puede producir tendencias y magnitudes incompletas o artificiales de ET (McKenney y Rosenberg, 1993; Donohue et al., 2010; McVicar et al., 2012).

A diferencia de las condiciones más cálidas del sistema climático en la actualidad, otras variables del ciclo hidrológico, como la precipitación y la evapotranspiración, tienen un comportamiento menos predecible, que no acompaña necesariamente al aumento térmico ocurrido y muestra un mosaico geográfico particular en cada región (Turrall et al., 2011).

En una exhaustiva revisión a escala global, McVicar et al. (2012) señalan que la disminución de la VV en superficie se encuentra muy extendida en todo el mundo. Confirman asimismo que prevalecen en general tasas decrecientes de la demanda atmosférica de agua y destacan la contribución que la VV ha tenido en la disminución de las tasas de evaporación.

Guo et al. (2011) reportan que la mayoría de las estaciones en China han experimentado un debilitamiento significativo en los vientos medios anuales y estacionales durante el período entre 1969 y 2005. Por su parte, Romanić et al. (2015) analizaron mediciones meteorológicas de cinco estaciones sinópticas ubicadas en Serbia durante un período de 62 años (1949-2010) y determinaron tendencias negativas estadísticamente significativas de la velocidad anual del viento en todas ellas.

Las observaciones de la red de tanques de evaporación en el Uruguay, como así también los datos estimados por modelos muestran una alta variabilidad interanual de la DEA, en tanto la tendencia temporal de los valores estacionales y anuales no resulta estadísticamente significativa. Dado que la DEA muestra una alta sensibilidad a los cambios en la humedad relativa y la duración del brillo solar, la falta de tendencias significativas en las observaciones y estimaciones de DEA sobre Uruguay se vinculó a la tendencia no significativa encontrada para estas variables meteorológicas durante el período desde 1973 hasta 2014 (Vicente-Serrano et al., 2017). En el centro de la Argentina, justo en la misma zona latitudinal de Uruguay, la evaluación de la tendencia de ET<sub>o</sub> mostró un generalizado comportamiento estacionario entre 1941 y 2010, mientras que la precipitación aumentó durante el mismo período en casi toda esta región (de la Casa and Ovando, 2014; de la Casa et al., 2018).

El objetivo del trabajo fue analizar información disponible acerca de la velocidad del viento en el territorio central de la Argentina y determinar en particular los cambios que esta variable ha experimentado a lo largo del tiempo. Complementariamente, la influencia de los cambios en la intensidad del viento se proyecta sobre la variación de la tasa de ET<sub>o</sub>.

## 2. Materiales y Métodos.

### 2.1 Datos

Se analizaron datos de velocidad (intensidad) de viento (VV) registrados en 4 estaciones que integran la red de superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), cuya ubicación geográfica se presenta en la Figura 1. Los registros se presentaron disponibles en dos escalas temporales de diferente carácter, una meteorológica y otra climática.

#### 2.1.1 De escala meteorológica.

Estos datos corresponden a una base de datos horarios y diarios, con registros disponibles desde el 1 de enero de 1968 hasta el 31 de diciembre de 1991. De acuerdo a la rutina de observación durante este periodo, en las estaciones meteorológicas se realizaron primero 3 y luego 4 lecturas por día de la VV. A partir de estos valores se obtuvo el valor medio diario. Los valores diarios se promediaron luego a escala mensual y anual. Los valores de la intensidad del viento se evaluaron a partir de dos indicadores. Uno se refiere al valor máximo diario registrado en un intervalo de tiempo que, en este caso, corresponde al periodo anual. El otro se estableció contabilizando la cantidad de días en el año con valores diarios de VV superiores a  $5 \text{ m s}^{-1}$  (Romanić et al. (2015)).

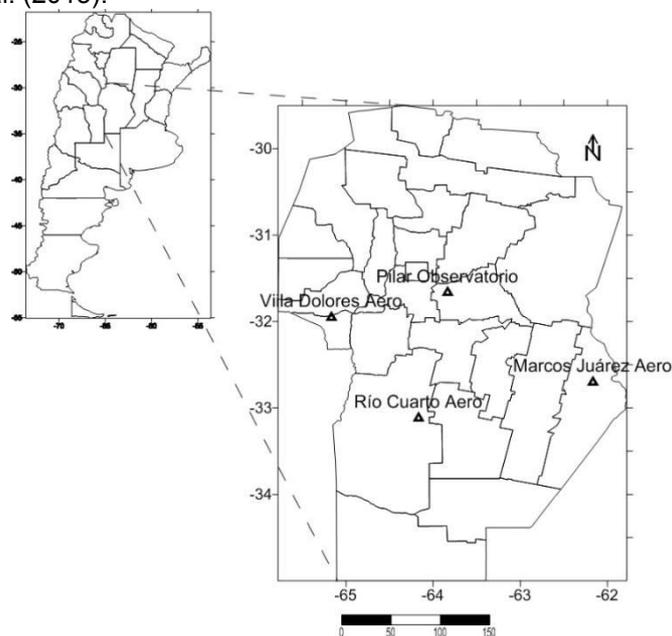


Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

#### 2.1.2 De escala climática

Para las mismas estaciones meteorológicas, se utilizaron registros mensuales y anuales de la VV que el SMN difunde en promedios correspondientes a periodos de 10 años consecutivos. La disponibilidad de información comprende 6 décadas subsiguientes desde 1951, de modo tal que el primer registro es del periodo 1951-1960, el segundo es de 1961-1970, y sucesivamente hasta finalizar en 2001-2010. Se verificó para 1971-1980 y 1981-1990 que los promedios mensuales y anuales de 10 años se corresponden con la información de carácter meteorológica original.

### 2.2 Evaluación de la tendencia temporal

El procedimiento que se utilizó para determinar la existencia de tendencia en las series de tiempo de la VV fue el método no paramétrico de Theil-Sen (de la Casa et al., 2018). Respecto al método clásico de mínimos cuadrados, este procedimiento tiene un comportamiento más robusto ya que resulta menos afectado por datos atípicos. La prueba se basa en que al obtener el conjunto de pendientes simples de cada par  $(n(n-1)/2)$  pares en total) de mediciones distintas en la serie de tiempo (conocida como el conjunto de pendientes por pares), el valor promedio

de este conjunto de pendientes ( $m$ ) se aproximaría a la verdadera pendiente desconocida. Para  $n$  pares de datos, el método para obtener la pendiente es:

$$q_i = \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$q$  mediana =  $m_{(n+1)/2}$  si  $n$  es un número impar;

$q$  mediana =  $[m_{(n/2)} + m_{(n+2)/2}]/2$  si  $n$  es número par.

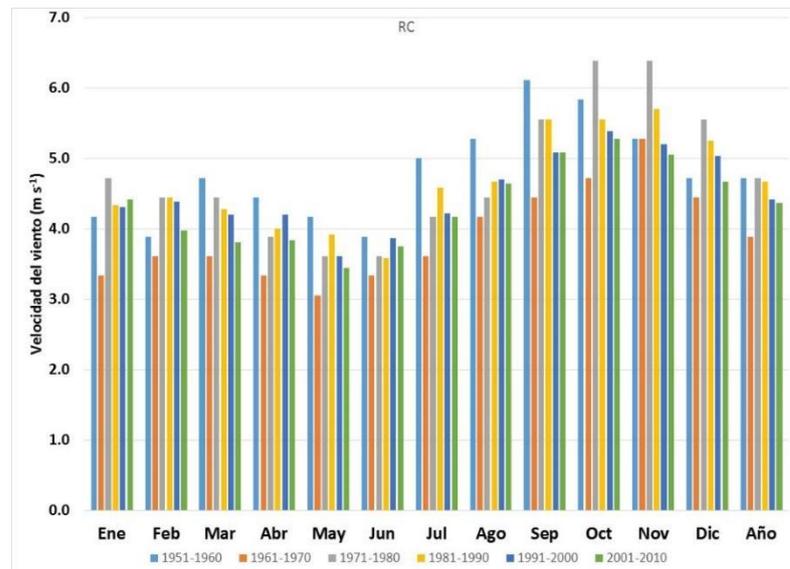
Donde  $x_j$  y  $x_k$  son los valores de la serie de VV en los momentos  $j$  y  $k$  ( $j > k$ ), respectivamente.

Dado que es una prueba no paramétrica, en lugar de tomar un promedio aritmético se utiliza el valor de la pendiente mediana del conjunto de pares como el estimador de la pendiente de la población desconocida. Al tomar la pendiente del par mediano en lugar de la media, las pendientes del par extremo (debido a uno o más valores atípicos u otros errores) se ignoran y tienen un impacto pequeño o insignificante en el estimador de la pendiente final.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Variación de los valores decenales de la velocidad del viento entre 1951 y 2010

Los valores medios mensuales y anuales de la velocidad del viento en las estaciones meteorológicas de la región central de la Argentina se presentan en la Figura 2 que, desde arriba hacia abajo, se presentan ordenadas de mayor a menor intensidad media. Los valores de cada mes y año corresponden a las sucesivas décadas desde 1951-1960 hasta 2001-2010.



V Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. Mar del Plata, Argentina, 2008,

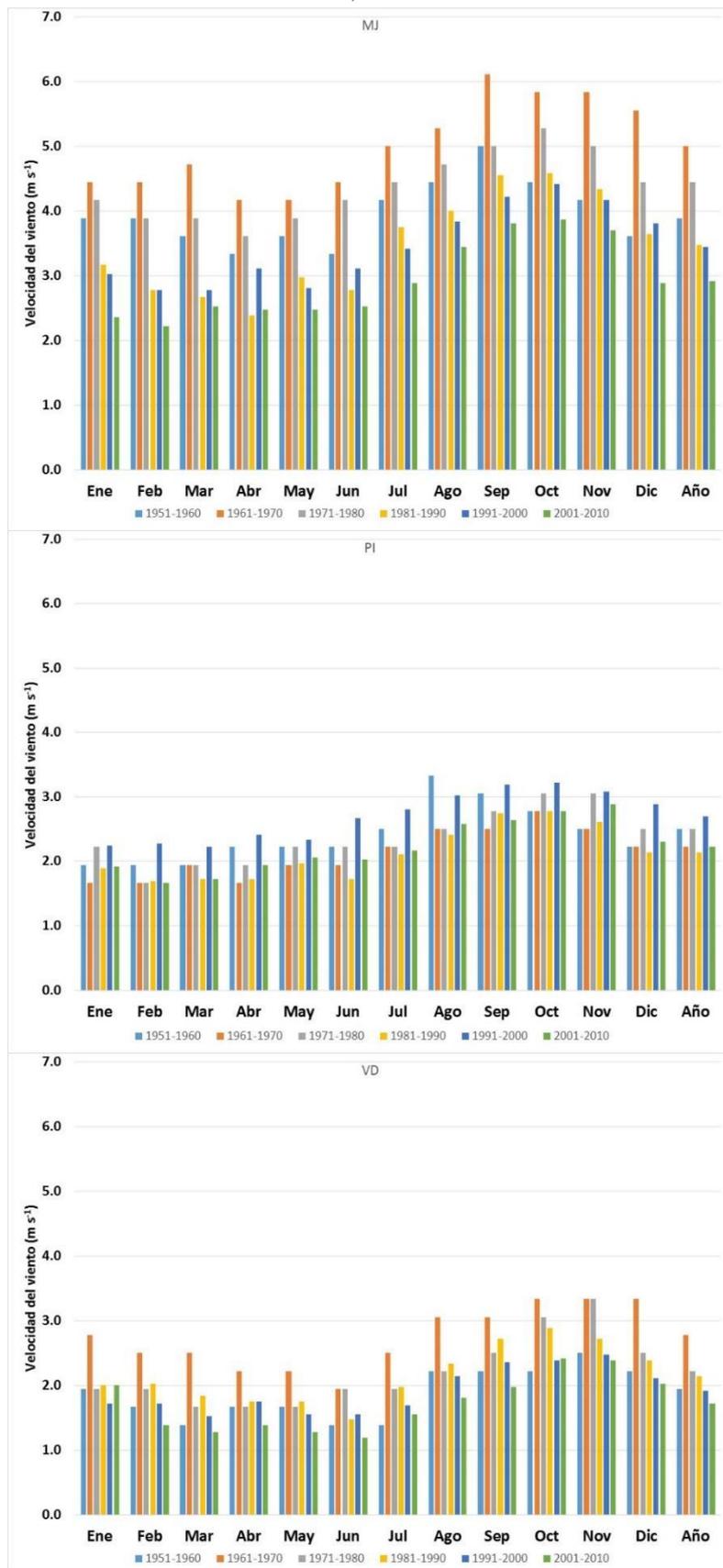


Figura 2. Valores medios mensuales y anuales de la velocidad del viento para 6 décadas sucesivas entre 1951 y 2010 en las estaciones Río Cuarto Aero (RC), Marcos Juárez Aero (MJ), Pilar Observatorio (PI) y Villa Dolores Aero (VD).

Con respecto a la magnitud del régimen de velocidad media, las estaciones muestran marcadas diferencias entre sí, siendo los valores ostensiblemente superiores en RC y MJ, con valores medios anuales para el periodo completo de 4,5 y 3,9 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, duplicando a los de PI y VD, de 2,4 y 2,1 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, de manera sistemática en todas las estaciones del año durante los 6 periodos decanales. No habiendo encontrado información fehaciente al respecto, tampoco se puede descartar que estas discrepancias de VV entre las distintas estaciones obedece a la diferente altura de localización del anemómetro. Por otra parte, todas las estaciones muestran un comportamiento estacional similar, con valores mínimos en abril, mayo o junio (otoño), y máximos entre agosto y noviembre (primavera). La ocurrencia de valores de menor intensidad en otoño y más elevados en primavera es similar al régimen estacional que la VV presenta en China bajo la influencia del Monzón (Guo et al., 2011).

### 3.2 Análisis de la tendencia temporal

El capítulo se presenta separado en dos partes. La primera corresponde al análisis de la serie de mayor detalle (conformada por datos diarios obtenidos a partir de registros horarios), pero más acotada temporalmente (entre 1968 y 1991). Además de los valores medios, esta serie permite analizar los cambios en la intensidad del viento. La segunda corresponde a la evaluación de los valores medios mensuales y anuales de carácter decanal (10 años). Si bien se trata de datos agregados, el periodo bajo análisis entre los años 1950 y 2010 es más prolongado, que le confiere un carácter climático más exhaustivo.

#### 3.2.1 Cambio de los valores medios anuales entre 1968 y 1991

De acuerdo a la Figura 2, la variación de la VV a lo largo del año acusa un comportamiento estacional en la región, con un mínimo en otoño y un máximo en primavera. De esta forma los periodos que se someten al análisis de tendencia, además del valor anual, fueron los datos del mes de octubre para representar los valores medios más altos y del mes de abril para representar los valores medios de menor intensidad. La Figura 3 presenta los resultados del análisis de tendencia de T-S para los valores de la intensidad media anual en las 4 estaciones analizadas.

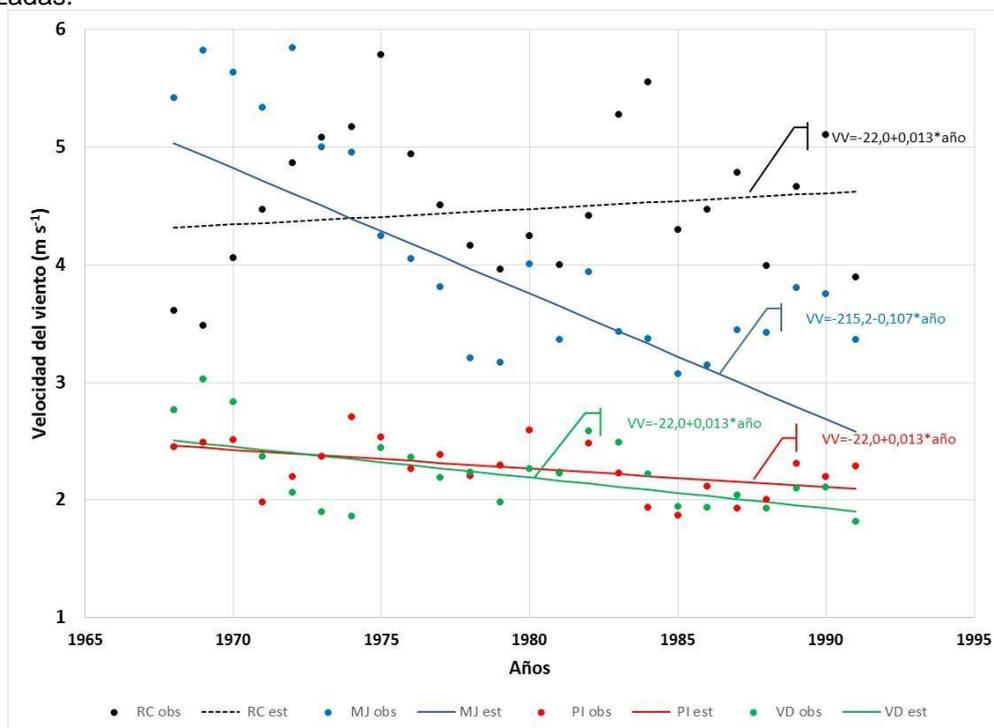


Figura 3. Variación de la velocidad media anual del viento entre 1968 y 1991 en Córdoba, y las rectas de ajuste lineal obtenidas con el método de Theil-Sen. Las líneas continuas presentan significación estadística ( $P < 0,05$ ).

Excepto en RC, donde la tendencia de los valores anuales muestra un comportamiento creciente que no alcanza significación estadística, el resto de los sitios analizados presentan valores de VV decrecientes de carácter significativo durante el periodo entre 1968 y 1991 (Tabla 1). Estos resultados confirman en cierta forma las conclusiones de McVicar et al. (2012) acerca de la tendencia generalizada de VV a disminuir, aunque de manera geográficamente parcial ya que no comprende a Río Cuarto, tanto cuando se analizan los valores anuales como cuando se consideran los valores de octubre y abril. Al evaluar la estación del año de mayor intensidad, si bien la tendencia es decreciente en todas las estaciones meteorológicas, sólo en MJ y VD alcanzan un carácter significativo. Durante la estación de mayor calma, únicamente MJ presenta en el mes de abril una tendencia negativa significativa.

Tabla 1. Resultados de la prueba de tendencia de Theil-Sen (T-S) a los valores medios de velocidad del viento anual y para los meses de octubre y abril en distintas estaciones de Córdoba, Argentina, entre 1968 y 1991. Para  $n=24$ , la cantidad de pendientes evaluadas es 276.

Parámetros	Estación meteorológica			
	RC	MJ	PI	VD
	<b>Año</b>			
Pendiente de Theil-Sen	0.0134	<b>-0.107</b>	<b>-0.016</b>	<b>-0.0263</b>
Intercepción de Theil-Sen	-21.96	<b>215.2</b>	<b>33.87</b>	<b>54.19</b>
M2'	98.49	171.2	171.2	171.2
LCI al 95% de pendiente (0.025)	-0.0304	-0.153	-0.0293	-0.0424
LCS al 95% de pendiente (0.975)	0.056	-0.0633	-0.00231	-0.00792
	<b>Octubre</b>			
Pendiente de Theil-Sen	-0.0446	<b>-0.0905</b>	-0.0204	<b>-0.0474</b>
Intercepción de Theil-Sen	93.9	<b>184</b>	43.45	<b>96.81</b>
M2'	98.49	171.2	98.5	171.2
LCI al 95% de pendiente (0.025)	-0.115	-0.144	-0.0558	-0.0994
LCS al 95% de pendiente (0.975)	0.0133	-0.0175	0.00755	-0.00437
	<b>Abril</b>			
Pendiente de Theil-Sen	0.0328	<b>-0.12</b>	-0.0116	-0.00847
Intercepción de Theil-Sen	-61.24	<b>239.7</b>	24.77	18.49
M2'	98.5	171.2	98.52	98.49
LCI al 95% de pendiente (0.025)	-0.00996	-0.155	-0.0309	-0.0385
LCS al 95% de pendiente (0.975)	0.075	-0.0845	0.005	0.0265

Referencias: LCI es el Límite crítico inferior; LCS es el límite crítico superior; Significativas ( $P < 0,05$ ) pendientes e intercepción en cursiva y negrita.

Guo et al. (2011) establecieron la disminución de la VV en China durante el período entre 1969 y 2005 que, como principal causa climática, atribuyen al debilitamiento de la fuerza del gradiente de presión en la troposfera inferior. Superpuesto a este efecto climático también señalan la influencia de la creciente urbanización. Por su parte, Romanić et al. (2015) determinaron en Serbia una disminución significativa en los vientos medios anuales y estacionales. En este caso, señalan la influencia de la circulación sinóptica, la temperatura del aire y el debilitamiento de la alta Siberiana como causas probables de este comportamiento.

### 3.2.2 Cambio de la intensidad del viento entre 1968 y 1991

Por la falta de mediciones directas, un indicador utilizado para evaluar la intensidad del viento fue el valor máximo diario de VV registrado en un intervalo anual. El otro índice se determinó totalizando la cantidad de días al año con valores diarios de VV superiores a  $5 \text{ m s}^{-1}$  (Romanić et al. (2015)). Los resultados del análisis de tendencia se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la prueba de tendencia de Theil-Sen (T-S) a valores anuales de intensidad del viento (VVx: máximo valor diario de VV; VV>5: N° de días con VV superior a  $5 \text{ m s}^{-1}$ ) en distintas estaciones de Córdoba, Argentina, entre 1968 y 1991. Para  $n=24$ , la cantidad de pendientes evaluadas es 276.

Parámetros	Estación meteorológica			
	RC	MJ	PI	VD
	<b>VVx</b>			
Pendiente de Theil-Sen	-0.00628	<b>-0.136</b>	-0.0066	-0.109
Intercepción de Theil-Sen	26.7	<b>282.1</b>	21.63	227.6
M2'	99.38	171.1	99.44	98.5
LCI al 95% de pendiente (0.025)	-0.094	-0.212	-0.115	-0.208
LCS al 95% de pendiente (0.975)	0.00361	-0.0643	0.00883	0.0314
	<b>VV&gt;5</b>			
Pendiente de Theil-Sen	0.75	<b>-5.586</b>	<b>-0.828</b>	<b>-1.272</b>
Intercepción de Theil-Sen	-1342	<b>11161</b>	<b>1664</b>	<b>2553</b>
M2'	98.52	171.1	171.1	171.1
LCI al 95% de pendiente (0.025)	-1.721	-7.618	-1.444	-1.873
LCS al 95% de pendiente (0.975)	2.707	-2.854	-0.244	-0.5

Referencias: LCI es el Límite crítico inferior; LCS es el límite crítico superior; Significativas ( $P<0,05$ ) pendientes e intercepción en cursiva y negrita.

La evidencia de ambos indicadores confirma una reducción de la intensidad del viento en MJ durante el periodo analizado, en tanto para PI y VD sólo la disminución que acusa la frecuencia de días con vientos fuertes señala una merma significativa de la intensidad. Si bien en RC la pendiente de Theil-Sen es negativa, la misma no alcanza nivel significativo.

### 3.2.3 Cambio de los valores medios decanales entre 1951-1960 y 2001-2010

Las series de tiempo de la velocidad media anual observados durante 6 décadas consecutivas y la tendencia lineal que el procedimiento de Theil-Sen estima respectivamente en cada lugar se presentan en la Figura 4. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 3.

A grandes rasgos se observa que en la región prevalece una disminución de VV pero, a diferencia de los resultados de la Figura 3, sólo en MJ mantiene un carácter significativo que ratifica el comportamiento entre 1968 y 1991. Con una tasa de disminución de largo plazo de  $-0,05 \text{ m s}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , en MJ la VV presenta actualmente valores que se asemejan a los de PI y VD. Esta reducción supone que la demanda evaporativa de la atmósfera ha disminuido de una manera notoria y, al menos en esta estación, aporta evidencia que avala la explicación de McVicar et al. (2012) sobre la merma generalizada a escala mundial de la tasa de ETo. De hecho, la tasa de VD de  $-0,017 \text{ m s}^{-1} \text{ año}^{-1}$  resulta similar al promedio general que McVicar et al. (2012) obtienen ( $-0,014 \text{ m s}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) cuando consideran estudios que analizan más de 30 sitios y un periodo superior a 30 años de datos. Por su parte, la disminución promedio de la VV para 652 estaciones en China alcanza un valor de  $-0,018 \text{ m s}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Guo et al., 2011).

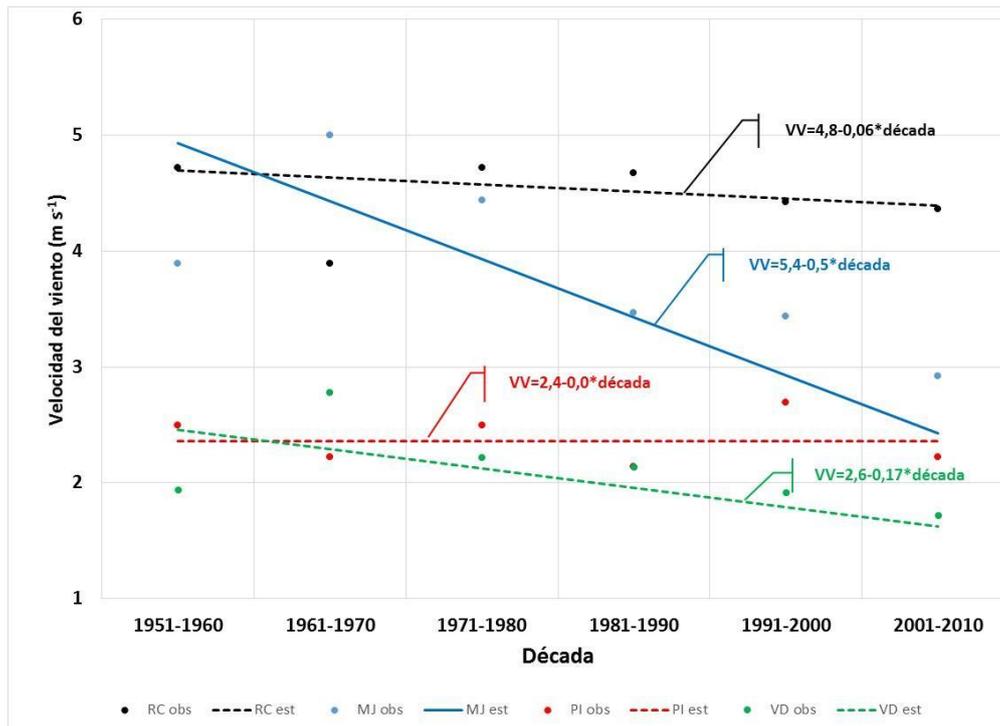


Figura 4. Variación de la velocidad del viento media anual durante las 6 décadas desde 1951-1960 hasta 2001-2010 en Córdoba, y las rectas de ajuste lineal obtenidas con el método de Theil-Sen. La línea de trazo continuo presenta significación estadística ( $P < 0,05$ ).

El análisis estadístico de RC mantiene el carácter no significativo, si bien en el largo plazo presenta una tendencia a disminuir, contrario al comportamiento creciente determinado entre 1968 y 1991. De esta forma, la estación con el régimen de VV más alto entre los sitios analizados no ha modificado a lo largo del tiempo su potencial de aprovechamiento eólico, ni tampoco su influencia más notable sobre el poder evaporativo de la atmósfera.

Por su parte, en el transcurso de todo el periodo analizado PI muestra una marcada constancia de la velocidad media anual del viento, dando a entender que la disminución entre 1968 y 1991 resultó sólo una alteración de mediano plazo. Algo similar se interpreta de la información de VD, donde la disminución entre 1968 y 1991 pierde su significación cuando se analiza el lapso completo de 60 años. Sin embargo, la disminución es evidente y probablemente aceptable con un nivel de probabilidad ligeramente más alto.

El comportamiento de la VV media en abril y octubre no presenta evidencia de cambio de largo plazo en ninguna de las estaciones evaluadas de la región. El contraste entre los resultados del análisis que surge al comparar series de tiempo de distinto periodo de registro, en este caso un lapso intermedio más breve entre 1968 y 1991, con respecto a la información del periodo más prolongado entre 1951 y 2010, es una alerta en los estudios de cambio climático basados en series de tiempo relativamente cortas por la existencia de oscilaciones de mediano y largo plazo de las variables atmosféricas (de la Casa and Nasello, 2010; de la Casa et al., 2018). Además, otro aspecto que debe ser considerado es la cantidad de estaciones meteorológicas objeto de análisis, en procura de lograr un alcance geográfico más extendido, y la conveniencia que compartan los mismos criterios de observación. Otro aspecto necesario de considerar en estudios climáticos de largo plazo son los cambios suscitados por la urbanización, como así también las alteraciones del entorno en la proximidad de las estaciones meteorológicas (Patra et al., 2018).

Tabla 3. Resultados de la prueba de tendencia de Theil-Sen (T-S) a los valores medios de velocidad del viento anual y los meses de octubre y abril en distintas estaciones de Córdoba,

Argentina, para 6 décadas sucesivas desde 1951-1960 hasta 2001-2010. Para  $n=6$ , la cantidad de pendientes evaluadas asciende a 15.

Parámetros	Estación meteorológica			
	RC	MJ	PI	VD
	<b>Año</b>			
Pendiente de Theil-Sen	-0.06	<b>-0.5</b>	0	-0.167
Intercepción de Theil-Sen	4.755	<b>5.43</b>	2.36	2.623
M2'	2.377	11.88	2.471	2.284
LCI al 95% de pendiente (0.025)	-0.214	-0.707	-0.322	-0.311
LCS al 95% de pendiente (0.975)	0.154	-0.0534	0.128	0.0463
	<b>Octubre</b>			
Pendiente de Theil-Sen	-0.11	-0.43	0	-0.213
Intercepción de Theil-Sen	5.86	6.015	2.78	3.402
M2'	2.284	2.284	3.154	2.284
LCI al 95% de pendiente (0.025)	-0.736	-0.607	-0.079	-0.329
LCS al 95% de pendiente (0.975)	0.264	0.032	0.135	0.172
	<b>Abril</b>			
Pendiente de Theil-Sen	-0.02	-0.313	0.025	-0.056
Intercepción de Theil-Sen	4.015	4.317	1.853	1.906
M2'	2.284	2.284	2.377	2.471
LCI al 95% de pendiente (0.025)	-0.336	-0.819	-0.382	-0.301
LCS al 95% de pendiente (0.975)	0.259	0.112	0.246	0.0337

Referencias: LCI es el Límite crítico inferior; LCS es el límite crítico superior; Significativas ( $P<0,05$ ) pendientes e intercepción en cursiva y negrita.

#### 4. Conclusiones

La velocidad del viento media anual en RC y MJ es de  $4,5$  y  $3,9$   $m\ s^{-1}$ , respectivamente, valores que casi duplican a los de PI y VD, de  $2,4$  y  $2,1$   $m\ s^{-1}$ , respectivamente. En toda la región el régimen estacional del viento es similar, presentando valores mínimos en otoño y máximos en primavera.

El análisis de los cambios que experimentó la velocidad del viento a lo largo del tiempo es dispar en la región. Durante el periodo 1968-1991 se manifiesta una disminución significativa tanto de la velocidad media como de la intensidad del viento en MJ, PI y VD, pero sólo en MJ el cambio de mediano término se sostiene durante todo el periodo analizado entre 1951 y 2010 y, con menor seguridad, en VD. La tasa de disminución alcanza un valor notable de  $-0,05$   $m\ s^{-1}$  año<sup>-1</sup> en MJ y se reduce a  $-0,017$   $m\ s^{-1}$  año<sup>-1</sup> en VD.

En PI, por su parte, la línea de tendencia de largo plazo presenta una pendiente nula, indicando un régimen de la velocidad del viento de carácter estacionario. El mismo comportamiento estacionario también fue determinado en RC, donde no se encontró evidencia significativa de cambio temporal en ninguno de los periodos analizados de mediano y largo plazo. Así como RC no ha modificado su potencial de aprovechamiento eólico a lo largo del tiempo, mantiene asimismo su influencia preponderante sobre la demanda evaporativa de la atmósfera.

La evaluación de cambio climático demanda utilizar series de tiempo con la mayor extensión posible, como así también una red de estaciones suficientemente amplia. Por último, es necesario confirmar la elevación de los anemómetros y las condiciones de entorno en las respectivas estaciones meteorológicas para descartar la influencia de estos factores sobre la información presentada.

#### Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.

V Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. Mar del Plata, Argentina, 2008,

- Brutsaert, W., Parlange, M.B., 1998. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature* 396, 30.
- Chattopadhyay, N., Hulme, M., 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agric. For. Meteorol.* 87(1), 55–73.
- Chen, D.L., Gao, G., Xu, C.-Y., Guo, J., Ren, G.Y., 2005. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman–Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Clim. Res.* 28(2), 123–132.
- de la Casa A.C., Nasello O.B., 2010. Breakpoints in annual rainfall trends over Córdoba, Argentina. *Atmos. Res.* 95, 419–427.
- de la Casa, A.C., Ovando, G.G., 2014. Climate change and its impact on agricultural potential in the central region of Argentina between 1941 and 2010. *Agric. For. Meteorol.* 195–196, 1–11.
- de la Casa, A.C., Ovando, G.G., Díaz, G.J., 2018. Secular variation of rainfall regime in the central region of Argentina. *Atmos. Res.* 213, 196–210.
- Donohue, R.J., McVicar, T.R., Roderick, M.L., 2010. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *J. Hydrol.* 386(1–4), 186–197.
- Golubev, V.S. et al., 2001. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. *Geophys. Res. Lett.* 28(13), 2665–2668.
- Guo, H., Xu, M., Hu, Q. 2011. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005. *Int. J. Climatol.* 31: 349–358.
- Hobbins, M.T., Ramírez, J.A., Brown, T.C., 2004. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous US: paradoxical or complementary? *Geophys. Res. Lett.* 31(13), L13503.
- Liu, C.M., Zeng, Y., 2004. Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River Basin. *Water Int.* 29(4), 510–516.
- Holt, E., Wang, J. 2012. Trends in wind speed at wind turbine height of 80m over the contiguous United States using the North American regional reanalysis (NARR). *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51:2188–2202.
- Lawrimore, J.H., Peterson, T.C., 2000. Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States. *J. Hydrometeorol.* 1(6), 543–546.
- McKenney, M.S., Rosenberg, N.J., 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agric. For. Meteorol.* 64, 81–110.
- McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N.M., Mescherskaya, A.V., Kruger, A.C., Rehman, S., Dinpashoh, Y., 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology* 416–417, 182–205.
- Patra, S., Sahoo, S., Mishra, P., Chandra Mahapatra, S., 2018. Impacts of urbanization on land use /cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of Urban Management* 7, 70–84
- Roderick, M.L., Farquhar, G.D., 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science* 298(5597), 1410–1411.
- Roderick, M.L., Farquhar, G.D., 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *Int. J. Climatol.* 24(9), 1077–1090.
- Romanić, D., Čurić, M. Jovičić, I.; Lompar, M. 2015. Long-term trends of the 'Koshava' wind during the period 1949–2010. *International Journal of Climatology*, 35(2):288–302.
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324):1379–1389.
- Theil, H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III. *Nederl. Akad. Wetensch., Proc.*, 53:386–392, 521–525, 1397–1412.
- Thomas, A., 2000. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *Int. J. Climatol.* 20, 381–396.
- Turrall, H., Burke, J., Faurès, J.-M. 2011. Climate change, water and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), ISSN 1020-1203, 36.
- Vicente-Serrano, S.M., Bidegain, M., Tomas-Burguera, M., Dominguez-Castro, F., El Kenawy, A., McVicar, T.R., Azorin-Molina, C., López-Moreno, J.I., Nieto, R., Gimeno, L., Giménez, A., 2017. A comparison of temporal variability of observed and model-based pan evaporation over Uruguay (1973–2014). *Int. J. Climatol.* DOI: 10.1002/joc.5179
- Xu, C.Y., Gong, L., Jiang, T., Chen, D., Singh, V.P., 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *J. Hydrol.* 327 (1–2), 1–93.