

1 **TENDENCIAS EN LA PRECIPITACIÓN EN TUCUMÁN BAJO EFECTO** 2 **DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

3 **Flavia M. Bazzano**^{1,2}, **Teresita Heredia**³, **Ana G. Elías**^{2,3}, **César M. Lamelas**⁴ y **Jorge Forciniti**⁴

5 ¹Laboratorio de Construcciones Hidráulicas, FACEyT, UNT

6 ²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET

7 ³Laboratorio de Física de la Atmósfera, Dpto. de Física, FACEyT, UNT

8 ⁴Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres

10 **Autor correspondiente: Flavia Marcela Bazzano, fbazzano@herrera.unt.edu.ar**

RESUMEN

13 La evidencia empírica, así como las simulaciones, indican que el calentamiento global induciría un
14 aumento en la humedad del aire y en la intensidad de las precipitaciones en algunas regiones del
15 planeta. Tal es el pronóstico para la provincia de Tucumán comprendida entre las latitudes 26,1°S y
16 27,8°S y longitudes 64,8°W y 66,0°W que se encuentra en una región geográfica intermedia entre
17 tropical y subtropical. Es allí donde, a partir de los registros diarios de lluvia de 20 estaciones, se
18 analizaron las tendencias en la precipitación total anual, máxima diaria y número de días con
19 precipitación mayor al percentil 95. El análisis se realiza en el período de registro coincidente de las
20 estaciones (1973 a 2015), extendiéndose a un período mayor (1954 a 2016) en las 3 estaciones
21 donde la información lo permite. Las tendencias significativas negativas predominan en la región
22 tanto en los totales anuales como en la cantidad de episodios intensos en el período 1973 a 2015.
23 Sin embargo, en las estaciones con periodos más extensos prevalecen las tendencias positivas
24 significativas. No se observan tendencias significativas en los máximos diarios anuales, excepto en
25 una estación. El análisis estadístico de las series históricas realizado representa una importante
26 herramienta que colabora en la toma de decisiones a fin de mitigar los efectos del cambio climático
27 en la región.

29**Palabras clave:** Precipitación, Tendencias a largo plazo, Cambio climático

30 **LONG TERM-TRENDS IN RAINFALL OVER TUCUMAN UNDER THE**
31 **EFFECT OF CLIMATE CHANGE**

32

33

ABSTRACT

34The empirical evidence, as well as the simulations, indicates that the global warming would induce
35an increase in the humidity of the air and in the intensity of precipitations in some regions of the
36planet. Such is the forecast for the province of Tucumán in the area within latitudes 26.1 ° S and
3727.8 ° S and longitudes 64.8 ° W and 66.0 ° W, located in an intermediate geographical region
38between tropical and subtropical. From the daily rainfall records of 20 stations in Tucuman, trends
39in total annual precipitation, maximum daily and number of days with precipitation greater than the
4095th percentile were analyzed. Significant negative trends predominate over a few positive ones
41obtained in the region, both in the annual totals and in the number of intense episodes in the period
421973 to 2015. However, in the stations with longer periods prevail significant positive trends. On
43the other hand, in the annual daily maximum series prevail non-significant trends. The statistical
44analysis of the historical series is an important tool that collaborates in the decision making to
45mitigate the effects of climate change in the region.

46

47**Key words:** Rainfall, Long term-trend, Climate change

48

49 **1) INTRODUCCIÓN**

50El cambio climático representa una alteración en el clima manifestado por modificaciones en las
51condiciones medias de sus distintos componentes, como la temperatura y la precipitación, o bien

52 transformaciones en la forma en que ellos varían (o ambos factores a la vez), persistiendo la
53 anomalía por un período extendido, se trate de décadas o un período aún mayor. Dichos cambios
54 pueden deberse a procesos naturales, como cambios astronómicos o geológicos, o por efectos
55 antropogénicos que modifican la composición natural de la atmósfera. Esto último ha sido mostrado
56 ya en varios estudios donde se indica, en las últimas décadas, un incremento cuasi lineal en la
57 concentración de CO₂ en la atmósfera (IPCC, 2007; Trenberth, 2011; Fu et al., 2013). Se proyecta
58 que los cambios percibidos en la actualidad persistirán al menos durante este siglo, considerando un
59 amplio rango de escenarios posibles para futuras emisiones de gases de efecto invernadero, aún bajo
60 supuesto de reducción de emisiones (IPCC, 2007).

61 El aumento en la temperatura global ha sido materia de numerosos ensayos, al observarse un
62 incremento de aproximadamente ~0,8°C desde 1880 (IPCC, 2014). Se estima que el calentamiento
63 global producirá un aumento de la humedad atmosférica ya que la capacidad de contener agua de la
64 atmósfera aumenta en ~7% por °C de aumento de temperatura. De acuerdo con reportes del IPCC,
65 durante el siglo 20 el vapor de agua atmosférico aumentó alrededor de un 5% en la atmósfera sobre
66 los océanos. Sin embargo, las anomalías en la precipitación no se dan de manera uniforme en el
67 planeta (Trenberth, 2011; IPCC, 2014) sino que se espera una redistribución latitudinal de la
68 variable, con incrementos en las latitudes más altas, decrecimientos en los sub-trópicos y posibles
69 cambios en los trópicos debido al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (Zhang
70 et al., 2007). Son notables las tendencias positivas en América del Norte, Eurasia y América del
71 Sur, mientras que los resultados son opuestos en el Mediterráneo, sudeste de Asia y África
72 (Trenberth, 2011). De igual forma, las tendencias a largo plazo de las precipitaciones intensas
73 presentan una gran variabilidad geográfica (Seneviratne et al., 2012).

74 Haylock et al. (2006), en un extenso análisis de precipitación media y extrema de estaciones de
75 América del Sur, mostraron que, para el Norte y Centro de Argentina tanto la precipitación media
76 como la extrema presentan una tendencia a aumentar. Años más tarde, Skansi et al. (2013)
77 observaron tendencias positivas en varios índices representativos tanto de la precipitación
78 acumulada anual como de la magnitud y frecuencia de ocurrencia de valores extremos calculados
79 promediados regionalmente en la porción sur del continente al este de la cordillera de los Andes.

80Sin embargo, al analizar el comportamiento local de dichos índices en diversos puntos de medición,
81los resultados mostraron un predominio de tendencias no significativas, con una alternancia de
82valores positivos y negativos que evidencian la gran variabilidad en las tendencias en la
83precipitación en la región. En particular, en la provincia de Tucumán los estudios antecedentes
84demuestran la existencia de una tendencia cuasi – lineal creciente en la precipitación anual en el
85período 1930 a 2000 (Minetti *et al.*, 2003). Por su parte, Medina y Minetti (2004) postulan que el
86incremento de la lluvia total anual observado se asocia a un cambio en los extremos diarios de
87precipitación, que también manifiesta una tendencia positiva creciente en la segunda mitad del siglo
88pasado en Tucumán.

89A partir de los registros diarios de lluvias registrados en 20 estaciones ubicadas en la provincia de
90Tucumán, abarcando el período 1973 - 2015, se analizan en el presente trabajo las tendencias en la
91precipitación extrema y el patrón espacial de las mismas. El resultado obtenido se contrasta contra
92el observado en 3 estaciones en un período de registro más extenso desde 1954 hasta 2016. La
93comprensión de distribución espacial de las tendencias a largo plazo en la precipitación en la región
94se torna esencial para el desarrollo de estrategias para la adaptación y mitigación de los impactos
95del calentamiento global, donde su análisis cobra gran importancia en tanto se involucra materias
96tan diversas como son la generación de energía, prevención de inundaciones, obras de regulación de
97caudales, planes de emergencia temprana, entre otros.

98 **2) DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

99 A. SISTEMA EXPERIMENTAL

100El régimen de precipitación dominante en Tucumán es subtropical (Prohaska, 1976), con una alta
101concentración de la precipitación, ocurriendo en el período octubre - marzo más del 80% de las
102lluvias anuales. El período lluvioso coincide con la estación monzónica en América del Sur
103(Marengo *et al.*, 2012; Boers *et al.*, 2015). Los factores determinantes en la generación de
104precipitaciones son la depresión continental con gran influencia en los procesos de transporte-
105convergencia de humedad hacia el continente, el calentamiento continental y el régimen estacional
106de la presión atmosférica (Minetti y Vargas, 2005). Además, es importante señalar la influencia de

107la corriente en chorro en capas bajas activa o jet subtropical durante el verano, que actúa sobre la
108ladera este de los Andes transportando humedad desde Amazonas hacia la región norte de
109Argentina, Paraguay, Uruguay y el sur de Brasil (Doyle y Barros, 2002). Estudios previos
110evidenciaron que las condiciones ambientales generadas por el ingreso del jet más allá de los 25°S
111son altamente favorables a la intensificación de la precipitación (Nicolini et al., 2002), existiendo
112además una notable coincidencia entre la posición del núcleo del jet y la región con tendencias
113positivas en la precipitación en el país (Castañeda, 1995).

114La gran variabilidad climática que posee la provincia de Tucumán, producto de la influencia de los
115cordones montañosos que la atraviesan, genera regiones con condiciones hídricas bien diferenciadas
116en una superficie que apenas supera los 20000 km². Es así como las lluvias afectadas por la
117topografía presentan un gradiente en dirección Este-Oeste muy pronunciado desde la provincia de
118Santiago del Estero. En esta región de pie de monte, el hombre asentó su principal actividad, la
119agricultura. Precisamente por ser un gradiente importante de precipitación, la superficie bajo cultivo
120es heterogénea, ya que en cortas distancias las características agroecológicas cambian en forma
121significativa. Ascendiendo en esta dirección, se alcanza un máximo pluvial entre 1000 y 1500msnm,
122al encontrarse los vientos húmedos con una sierra de ladera simple de gran altura como es la Sierra
123del Aconquija donde se superan los 2000mm anuales de lámina precipitada. El análisis en dirección
124Sur-Norte es más complejo por la alternancia entre cumbres y valles de diversa elevación presentes
125al NE de Tucumán. En este caso las sierras de La Ramada y Medina por su escasa elevación, que no
126llega a los 1000 msnm promedio, no alcanzan a producir un máximo importante de precipitación
127que apenas supera los 900 mm sobre la sierra de La Ramada y los 800 mm en la sierra de Medina.
128Posteriormente sobre la ladera de las Cumbres Calchaquíes en Trancas-Tucumán, las
129precipitaciones apenas alcanzan los 700-800 mm (Minetti y Vargas, 2005) (Figura 1).

130 B. DATOS UTILIZADOS

131Se consideraron aquellas estaciones con registro en el período 1973 a 2015. Los datos registrados
132fueron provistos por distintas fuentes constituidas por organismos estatales y entes privados:

Meteorología

- 133 • Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC): ente autárquico que
134 forma parte del Ministerio de Desarrollo Productivo de la provincia. Centraliza la
135 información pluviométrica de la provincia, tanto mediante su propia red de medición como
136 las aportadas por otras fuentes.
- 137 • Dirección de Recursos Hídricos (DRH): organismo provincial descentralizado con
138 dependencia funcional del Ministerio de Desarrollo Productivo. Cuenta con su red de
139 medición de precipitación.
- 140 • Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SRHN): interviene en la elaboración y
141 ejecución de la política hídrica nacional. Se puede acceder a su base de datos que cuenta con
142 registros provenientes de estaciones propias, así como de otros organismos
143 (<http://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/rh-base.php>).
- 144 • Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA): organismo descentralizado,
145 dependiente del [Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca](#) de la Nación.
- 146 • Ingenios azucareros: conservan registros de las precipitaciones diarias en forma continua a
147 través del período estudiado, se incluyen los aportados por el Ingenio Concepción.

148 Los pluviómetros utilizados son manuales y su emplazamiento sigue los lineamientos propuestos
149 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para asegurar que cuenten con la exposición
150 necesaria para el correcto registro de la precipitación.

151 El análisis fue realizado basado en años hidrológicos, que en la provincia de Tucumán comienzan el
152 primero de septiembre y finalizan el 31 de agosto del siguiente año. En lo sucesivo se menciona a
153 cada año hidrológico por el segundo año que lo conforma, a saber, si un año comienza el 1 de
154 setiembre de 1974 y finaliza el 31 de agosto de 1975, se lo denominará 1975.

155 Para verificar que no haya habido un cambio de posición o de instrumental que genere cambios
156 significativos en los registros se realizaron curvas de doble masa de la precipitación acumulada
157 contrastando el resultado de cada estación con la sumatoria de las estaciones vecinas y verificando
158 el ajuste a una única recta (Aparicio Mijares, 1999). El resultado obtenido para las estaciones
159 escogidas fue bueno, manifestado por un coeficiente R^2 superior 0,98 en todos los casos (Figura 2).
160 Para la determinación de los índices se consideraron sólo aquellos años hidrológicos que no

161 presentaban faltantes en el período noviembre – marzo, donde ocurre entre el 50 y el 80% de la
162 precipitación. Las series de máximos y totales anuales pasaron exitosamente las pruebas estadísticas
163 de homogeneidad. En cuanto al control de calidad de los datos se verificó que no existan fechas
164 duplicadas o fuera de secuencia en las series diarias. Se hicieron controles de rango fijo,
165 inspeccionando que no existan datos negativos o mayores que el máximo histórico registrado en la
166 región (300 mm en un día). Además, se realizó un control de tipo variable, estableciendo umbrales
167 que definen valores sospechosos para cada mes del año. Para definir estos umbrales se utiliza la
168 siguiente fórmula (González-Rouco et al., 2001, Veiga et al., 2013):

$$169 \quad P_0 = Perc 75 + n \cdot r_i$$

170 donde Perc75 es el percentil 75 de los valores diarios de precipitación para todos los registros
171 correspondientes a cada mes, r_i es el rango intercuartil para el mes calculado como la diferencia
172 entre el percentil 75 y el 25 y n es un factor que multiplica a r_i . Se verificó que cada valor que
173 quedara por fuera de este límite corresponda a un día de excesiva precipitación en las estaciones
174 vecinas, de forma de no eliminar los máximos registrados de interés para el presente trabajo. En
175 caso de no existir coherencia se eliminó el valor dudoso de la serie.

176 En búsqueda de las tendencias debidas a cambios en la frecuencia de eventos extremos, o a una
177 variación en su magnitud, se consideró la precipitación máxima diaria anual (PMD) para detectar
178 variaciones en la intensidad, y el número de días por año con precipitación mayor al percentil 95
179 (NP95). La determinación del percentil 95 fue realizada en el período de referencia 1973 a 2015 en
180 cada una de las estaciones, excluyendo los días con precipitación nula. También se analiza la
181 variación en los totales anuales precipitados (PTA).

182 3) ANÁLISIS DE TENDENCIAS

183 Para detectar tendencias se utilizó la prueba de Mann-Kendall, ampliamente utilizada en series
184 temporales climáticas e hidrológicas (Hamed, 2008). La principal ventaja de la prueba es que al ser
185 no paramétrica no requiere que los datos estén distribuidos normalmente.

Meteoro logica

37

39

186 Para una serie de tiempo $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ el estadístico de la prueba de Mann-Kendall viene dado
187 por:

$$S = \sum_{i < j} \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i < x_j \\ 0 & \text{si } x_i = x_j \\ -1 & \text{si } x_i > x_j \end{cases} \quad (0)$$

188 donde i y j son posiciones secuenciales dentro de la serie de tiempo y se cumple que $i < j$

189 El signo de $(x_j - x_i)$ es igual al signo de la diferencia de rango de cada dato. Esto quiere decir que
190 S depende no del valor de x sino de su rango, y que no se afecta por la distribución de los datos.
191 Bajo suposición de independencia de los datos, la varianza de S viene dada por (Kendall, 1975):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (0)$$

192 donde n es el número de observaciones.

193 Esta varianza se reduce cuando hay observaciones iguales (o rangos empatados) en las series de
194 datos, siendo:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (0)$$

195 Donde m es el número de grupos con observaciones equivalentes y t es el número de datos con
196 igual valor en cada uno de los grupos mencionados.

Meteoro logica

42

44

197Para muestras grandes ($n > 10$) como la de nuestro caso, se asume que S se distribuye normalmente,
198con lo que la significancia estadística puede ser determinada a través del estadístico estandarizado Z
199que tiene una distribución normal:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (0)$$

200La sustracción o adición de la unidad es una corrección que tiene en cuenta que S es una variable
201discreta y que consideramos una distribución continua (Kendall, 1975).

202Cuando la serie temporal esta autocorrelacionada, la prueba puede presentar errores en dos sentidos:
203si la serie analizada tiene autocorrelación positiva la varianza del estadístico de la prueba S es
204subestimada, aumentando así la probabilidad de detección de tendencia, presentándose el efecto
205inverso en series con autocorrelación negativa (López *et al.*, 2007).

206Hamed y Rao (1998) proponen una prueba de Mann – Kendall modificada para series
207autocorrelacionadas basada en la corrección de la varianza de S en función del número efectivo de
208observaciones. La varianza modificada es:

$$\text{Var}^*(S) = \text{Var}(S) \times \left[1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \times \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2) \rho_S(i) \right] \quad (0)$$

209donde n es el número total de observaciones y $\rho_S(i)$ es la autocorrelación en los rangos de las
210observaciones.

211Para cuantificar la tendencia utilizamos el estimador no paramétrico de Sen (1968) dado por:

$$\beta = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall i > j \quad (0)$$

212 donde i y j son posiciones secuenciales dentro de la serie de tiempo y β representa la mediana de las
213 pendientes existentes entre todos los pares de datos.

214 Teniendo en cuenta que el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero, como el
215 CO_2 por ejemplo, es prácticamente lineal al menos en las últimas décadas, los posibles efectos sobre
216 variables climáticas debieran corresponder a tendencias lineales en el tiempo. Es por ello, que
217 incorporamos el análisis de tendencias lineales obtenidas mediante mínimos cuadrados ordinarios
218 (MCO), además de caracterizarse por una mayor simplicidad lo que facilita su interpretación.

219 4) RESULTADOS

220 La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos en el análisis de tendencias en el período 1973 – 2015
221 según los métodos descritos. Para los tres índices estudiados, la mayoría de las tendencias
222 calculadas no son significativas estadísticamente y en algunas estaciones presentan valores nulos.
223 En particular para los totales anuales (PTA) se observa que 6 estaciones presentan tendencias
224 significativas, siendo 5 de ellas negativas. En el índice NP95 se tiene un resultado similar, aunque
225 en este caso los 6 resultados significativos son negativos. La correspondencia entre las tendencias
226 en la PTA y las observadas en NP95, no se manifiesta de igual forma para los valores máximos
227 anuales (PMDA) que solo presenta 1 valor significativo negativo. Por otra parte, el análisis de
228 tendencias en el período 1954 – 2016 sólo fue posible en 3 estaciones donde se cuenta con un
229 registro más extenso (Tabla 3). El resultado obtenido fue opuesto al descrito anteriormente en la
230 PTA, presentándose en la estación Potrero del Clavillo y Quebrada Los Sosa una tendencia
231 significativa positiva y un valor próximo al nulo de carácter no significativo en la EEAOC. En el
232 caso de la PMDA sólo es significativa la tendencia positiva en la estación Quebrada Los Sosa,
233 mientras que las observadas en las series NP95 son siempre no significativas. Adicionalmente, se
234 analiza la serie completa de la EEAOC por ser la única con un registro de 107 años (Tabla 4). El
235 resultado es positivo en todos los casos, siendo significativos tanto los obtenidos en PTA y en NP95,

236a diferencia de lo observado en el período 1954 – 2016 donde el resultado no es significativo. El
237resultado descrito anteriormente indica que las tendencias observadas las series en el período 1973 –
2382015 no son representativas del comportamiento a largo plazo en la región, pues representan una
239merma inmersa en un aumento de mayor escala, evidenciada en las series de mayor longitud de
240registro (Figura 4).

241La distribución espacial de los resultados en el índice PTA para el período 1973 – 2015 (c) presenta
242uniformidad en el territorio siendo la gran mayoría de resultados negativos. Esto contrasta con los
243valores análogos alcanzados en el período 1954 – 2016 que diagnostican un significativo
244incremento en los totales precipitados en la zona pedemontana con tendencia prácticamente nula en
245la llanura, donde solo se observa dicho incremento al analizar la serie completa (Figura 4c). El
246gráfico correspondiente al índice NP95 presenta una distribución irregular de incrementos y mermas
247en la provincia, donde preponderan los valores no significativos aún en el período 1954 – 2016
248(Figura 5b). De la misma manera que para los acumulados anuales, el aumento en el número de días
249con precipitaciones muy intensas (mayores al percentil 95) deviene significativo en la llanura al
250considerar la extensa serie que inicia en 1911(Tabla 4). Finalmente, la PMDA presenta alternancia
251de tendencias incrementales y mermas no significativas en su gran mayoría entre 1973 a 2015 y solo
252un valor significativo positivo en la estación Quebrada Los Sosa para el período 1954 – 2016,
253resultado que no se repite en la serie más larga analizada.

254 5) DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

255Para el estudio regional de las tendencias en la precipitación en la provincia de Tucumán se
256consideraron 3 índices (PTA, PMDA, y NP95) a fin de evaluar posibles cambios tanto en los totales
257anuales como en el comportamiento de las lluvias más intensas. El análisis involucró solo aquellas
258estaciones con registro en el período 1973 a 2015 de forma de poder realizar una comparación. Esto
259resultó en una distribución heterogénea de las estaciones con concentración alrededor de la ciudad
260capital y de la zona de mayor productividad agrícola. Por otra parte, se extendió el análisis al
261período entre 1954 a 2016 en las 3 estaciones que contaban con la información necesaria.
262Finalmente, la extensa serie de 107 años de la EEAOC fue considerada a fin de contrastar con los
263análisis anteriormente mencionados en períodos más breves.

264 De acuerdo con los resultados presentes en la bibliografía, Tucumán se encuentra en una zona de
265 transición en cuanto a las estimaciones de tendencias a largo plazo. Zhang et al., (2007) observan
266 tendencias positivas en la precipitación acumulada anual para la franja latitudinal correspondiente a
267 Tucumán (20° S a 30°S), tanto en los valores observados como en los provenientes de los distintos
268 modelos climáticos de simulación. Además, el aumento en el número de eventos extremos en la
269 segunda mitad del siglo 20 ha sido demostrado en varias regiones (Trenberth et al., 2011), incluso
270 donde se redujeron los totales anuales. Por su parte, en los resultados obtenidos por Skansi *et al.*
271 (2013) predominan las tendencias no significativas en la precipitación en la región estudiada, donde
272 se alternan resultados positivos y negativos.

273 Las tendencias positivas pronosticadas en los trabajos mencionados, tanto en los totales anuales
274 como el número de episodios intensos, concuerdan con los resultados obtenidos en varias de las
275 estaciones analizadas en el período 1954 a 2016 y en el más extenso que abarca más de 100 años.
276 Esta situación fue disímil para el lapso más breve, donde los resultados fueron dispares y
277 evidenciaron un decrecimiento significativo en gran parte de las series estudiadas. En aquellas
278 donde se disponía de mayor información, se verificó que se trataba de período parcial de
279 decrecimiento en una serie con tendencia general positiva de largo plazo, como puede verse en la
280 Figura 4. La tendencia negativa observada a partir de ~1970 podría deberse al efecto de forzantes
281 naturales, que compensarían los efectos del cambio climático mediante variaciones en las
282 fluctuaciones climáticas. Sería conveniente entonces, en trabajos futuros, analizar los posibles
283 forzantes de la precipitación (naturales y antropogénicos) en nuestra región, y la interacción entre
284 ellos para poder determinar claramente sus roles y efectos.

285 La escasez de series históricas de precipitación y su distribución irregular dificultan arribar a
286 conclusiones definitivas a cerca de las tendencias a largo plazo en la precipitación extrema. Más aún
287 si se tiene en cuenta que al ser los eventos extremos poco frecuentes, serán pocos los datos
288 disponibles para asegurar su alteración en 30 años de registro. La verosimilitud de las conclusiones
289 derivadas de los análisis de datos depende de la calidad y cantidad de datos, así como del análisis
290 realizado, con lo que mientras más extraordinario sea el evento más difícil será asegurar la
291 presencia de tendencias a largo plazo. Se destaca la importancia de continuar investigando las

61Artículo en edición

62

**Meteoro
logica**

63

64

292tendencias en la precipitación con series largas y completas, dado que los resultados de las pruebas
293estadísticas realizadas colaborarían en la formulación de medidas de adaptación a través de la
294generación de estrategias apropiadas tanto en el manejo de excedentes hídricos como en la
295regulación de los recursos hídricos.

296AGRADECIMIENTOS

297Los autores agradecen a la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, a la Dirección
298de Recursos Hídricos de la provincia de Tucumán y a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la
299Nación por los datos aportados para este trabajo y al proyecto PIP 294 – CONICET dirigido por
300Gustavo A. Mansilla por su colaboración. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto: PIUNT
301E541 y PICT 2011-1008.

302 6) REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

303Aparicio Mijares, F. J., 1999: Fundamentos de Hidrología de Superficie. 1a. Ed.). México:
304Limusa.

305Boers, N., Barbosa, H.M.J., Bookhagen, B., Marengo, J.A., Marwan, N. y Kurths, N., 2015:
306Propagation of Strong Rainfall Events from Southeastern South America to the Central Andes.
307Journal of Climate, 28, 7641-7658.

308Castañeda, M. E., 1995: La influencia de algunos aspectos de la circulación sobre Argentina, en la
309climatología de la precipitación (tesis doctoral). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
310Universidad de Buenos Aires, Argentina.

311Doyle, M y Barros, V., 2000: Relación entre la precipitación estival y patrones de circulación. CD-
312ROM of the XI Brazilian Congress of Meteorology. Rio de Janeiro, Brazil. Brazilian
313Meteorological Soc., 5 pp.

314Fu, G., Yu, J., Yu, X., Ouyang, R., Zhang, Y., Wang, P., Liu, W. y Min, L., 2013: Temporal
315variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009. Journal of Hydrology, 487, 48–59.

65

13

316**González-Rouco, J.F., Jiménez, J.L., Quesada, V. y Valero, F., 2001:** Quality Control and
317Homogeneity of Precipitation Data in the Southwest of Europe. *Journal of Climate*, 14(5): 964-978.

318**Hamed K. H. y Rao, A.R., 1998:** A modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data.
319*Journal of Hydrology*, 204, 182-196.

320**Hamed, K.H., 2008:** Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the
321scaling hypothesis, *Journal of Hydrology*, 349, 350– 363, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.009.

322**Haylock, M.R., Peterson, T.C., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y.M.T., Baez, J.,**
323**Barros, V.R., et al., 2006:** Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and
324Links with Sea Surface Temperature, *Journal of Climate*, 19, 1490-1512.

325**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007:** The Physical Science Basis.
326Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel
327on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.
328Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New
329York, NY, USA.

330**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012:** Managing the Risks of Extreme
331Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups
332I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D.
333Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor,
334and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA,
335582 pp.

336**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014:** Climate Change 2014: Synthesis
337Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the
338Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer
339(eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

340**Kendall, M.G., 1975:** Rank Correlation Methods. Griffin, London, UK.

341**López, P. M.; Seoane, R. S.; Fornero, L. A.; Rodríguez, J. L. y Nuñez M. S., 2007:** Análisis de
342Tendencia en Series Autocorrelacionadas. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina.

343**Marengo, J.A., Liebmann, B., Grimm, A.M., Misra, V., Silva Dias, P.L., Cavalcanti, I.F.A.,**
344**Carvalho, L.M.V., Berbery, E.H., Ambrizzi, T., Vera, C.S., Saulo, A.C., Nogues-Paegle, J.,**
345**Zipser, E., Seth, A. y Alves, L.M., 2012:** Recent developments on the South American monsoon
346system. *Int. J. Climatol.*, 32, 1–21. doi:10.1002/joc.2254

347**Medina, E. R. y Minetti, J. L., 2004:** El salto climático y su impacto en la frecuencia de
348precipitaciones máximas diarias en San Miguel de Tucumán. X Reunión y LV Latinoamericana de
349Agrometeorología. Mar del Plata, Argentina.

350**Minetti, J.L., Vargas, W.M., Poblete, A.G., Acuña, L.R., Casagrande, G., 2003:** Non-linear
351trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999,
352*Atmósfera*, 16, 119-135.

353**Minetti, J. L. y Vargas W. M., 2005:** Circulación Regional en el Noroeste Argentino y
354Condiciones del Tiempo Asociadas. Cap. 4 en *El Clima en el NOA*. 410 páginas. ISBN: 987-9390-
35566-0. Edit. Magna. S Miguel de Tucumán. Tucumán. Argentina.

356**Nicolini, M., C. Saulo, J. C. Torres, and P. Salio, 2002:** Enhanced precipitation over southeastern
357South America related to low-level jet events during austral warm season. *Meteorologica*, 27, 59–
35870.

359**Prohaska, F., 1976:** The Climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. In *Schwerdtfeger, W. (ed.),*
360*Climates of Central and South America. World Survey of Climatology*, Elsevier, Amsterdam, 13-73.

361**Sen, P.K., 1968:** Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Am. Statist.*
362*Assoc.*, 63, 1379–1389.

363**Seneviratne, S.I., et al., 2012:** Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural
364Physical Environment, in IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to*

Meteoro logica

77

79

365Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the
366Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J.
367Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M.
368Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 109-230.

369Skansi, M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J., Bentancur, O., Castellón
370Geier, Y., Correa Amaya, R., Jácome, H., Malheiros Ramos, A., Rojas C., Max Pasten, A.,
371Sallons Mitro, S., Villaroel Jiménez C., Martínez, R., Alexander, L. y Jones P. 2013: Warming
372and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South
373America. *Global and Planetary Change* 100 (2013) 295–307.

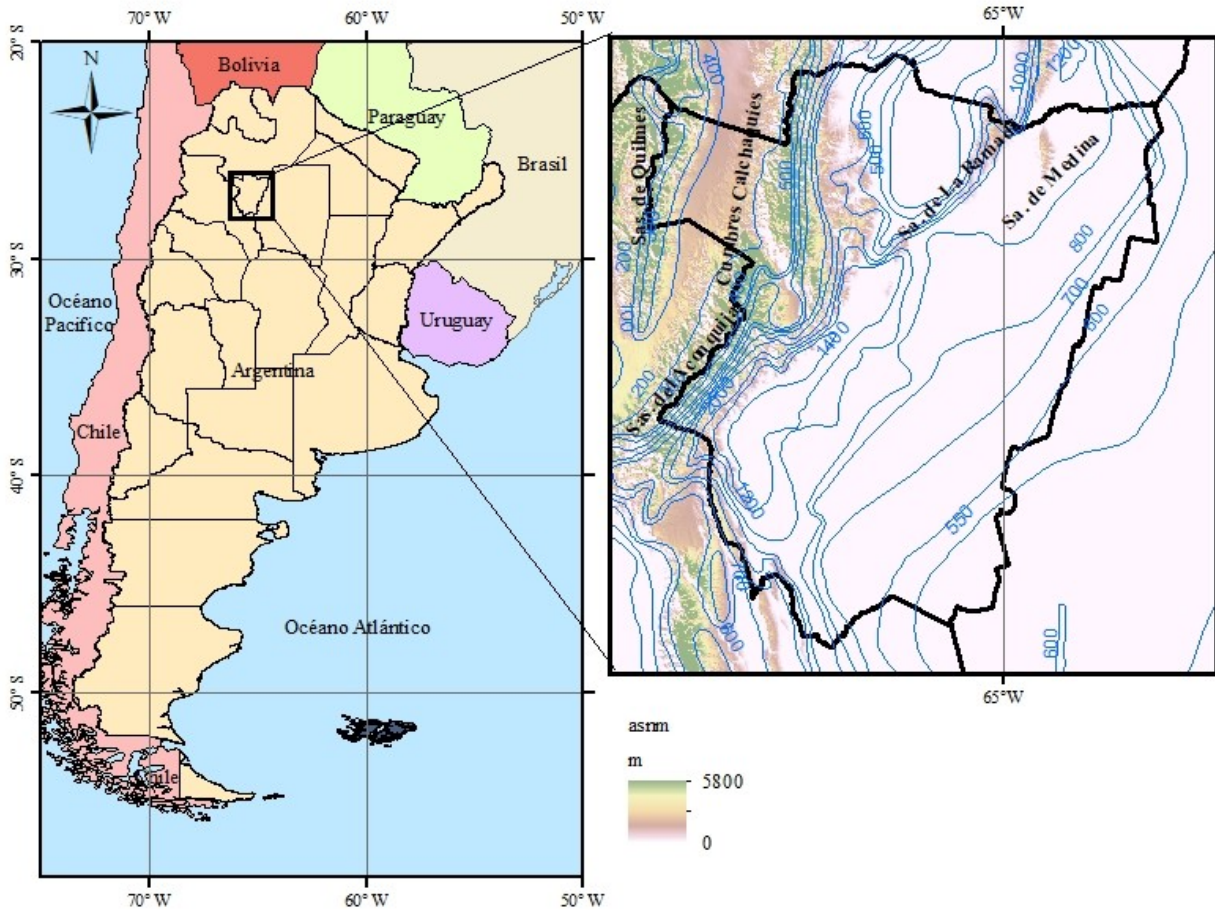
374Trenberth, K.E., 2011: Changes in precipitation with climate change, *Clim. Res.*, 47, 123–138,
375doi: 10.3354/cr00953.

376Veiga, H., Herrera, N., Skansi, M. y Podestá, G., 2013: Descripción de controles de calidad de
377datos climáticos diarios implementados por el Cetro Regional del Clima para el Sur de América del
378Sur. Serie de Reportes Técnicos – Reporte Técnico CRC – SAS 2014 – 002.

379Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., Lambert, H., Gillett, N.P., Solomon, S., Stott, P.A. y
380Nozawa, T., 2007: Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*
381448, doi:10.1038/nature06025, 2007.

382

Meteorología

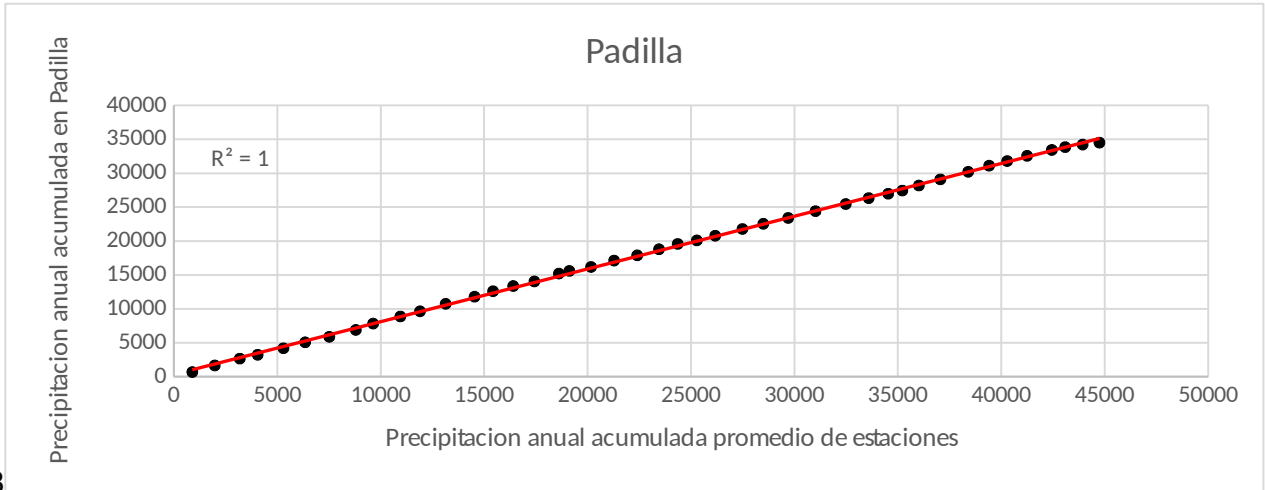


385 Figura 1.- Sistema Experimental: Isoyetas representativas de la Precipitación Media Anual y principales accidentes
386 orográficos.

Meteorología

87

89



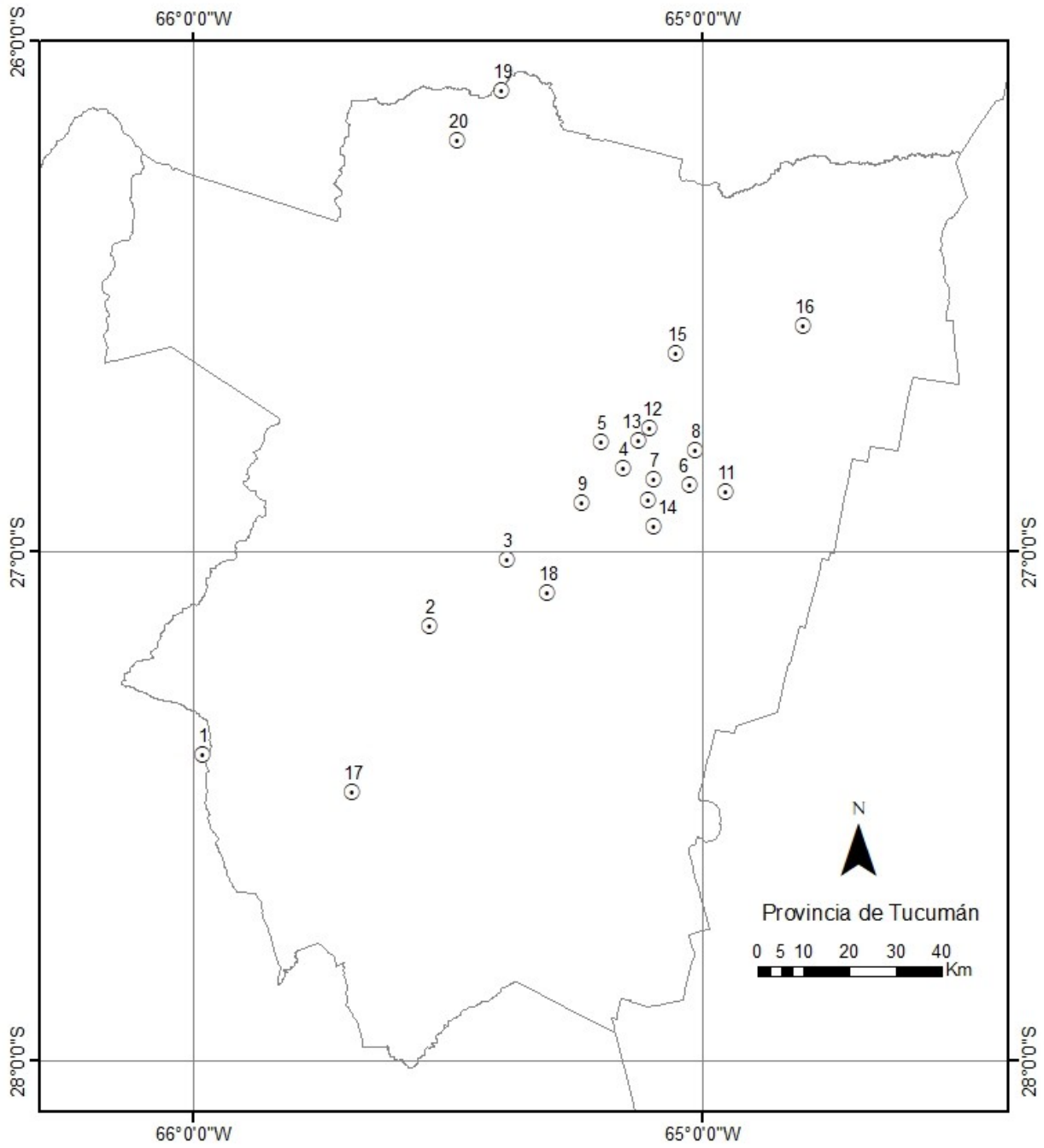
389 **figura 2.-** Curva de Doble Masa para verificar cambios en el instrumental

390

Meteorología

92

94



391

Meteoro logica

97

99

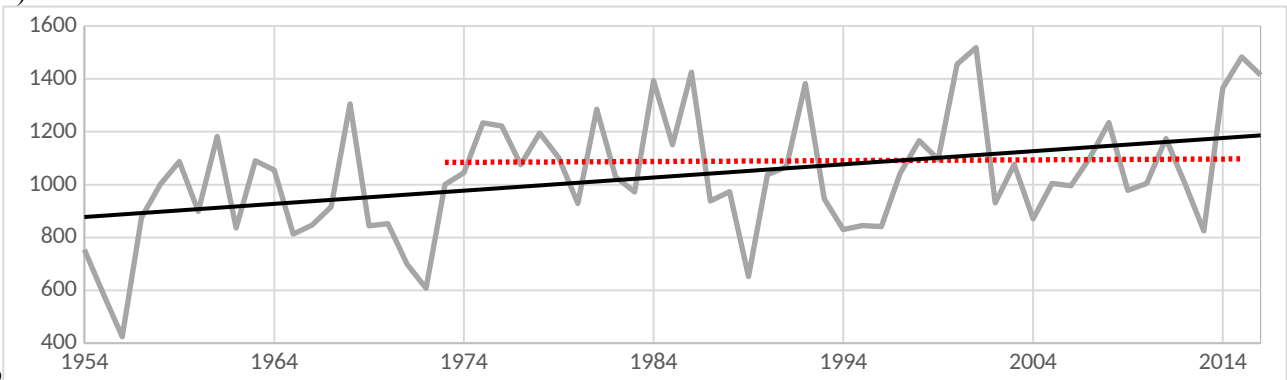
392**Figura 3.-** Estaciones pluviométricas con registro en el período 1973 a 2015 en la provincia de
393Tucumán.

Meteorología

102

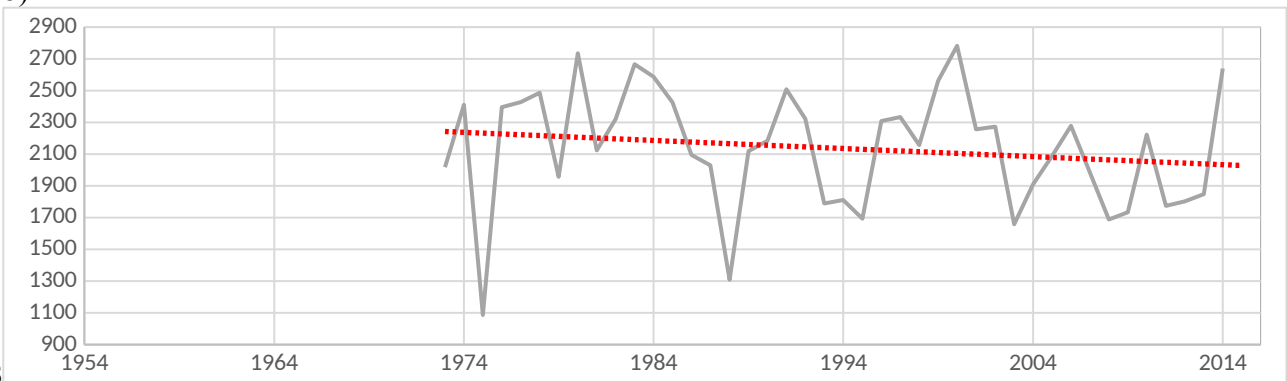
104

395a)



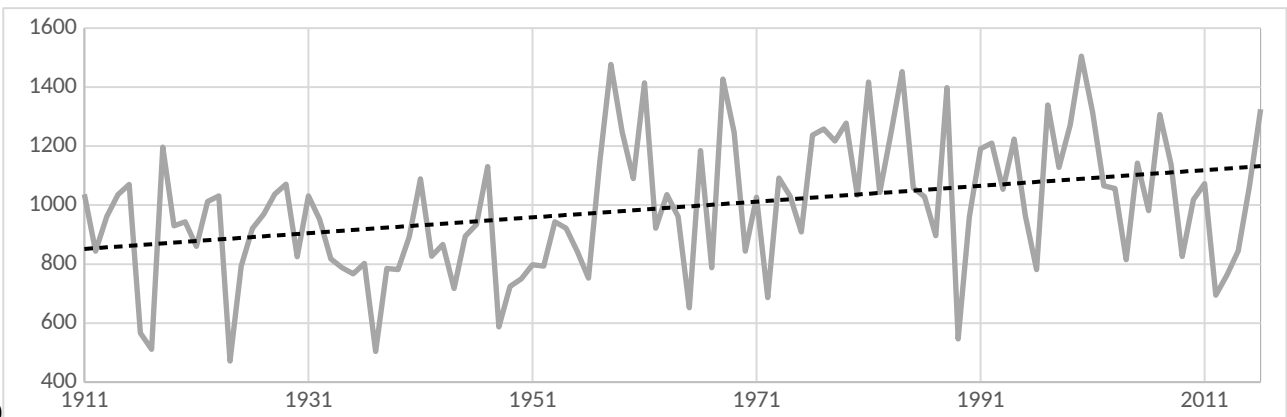
396

397b)



398

399c)

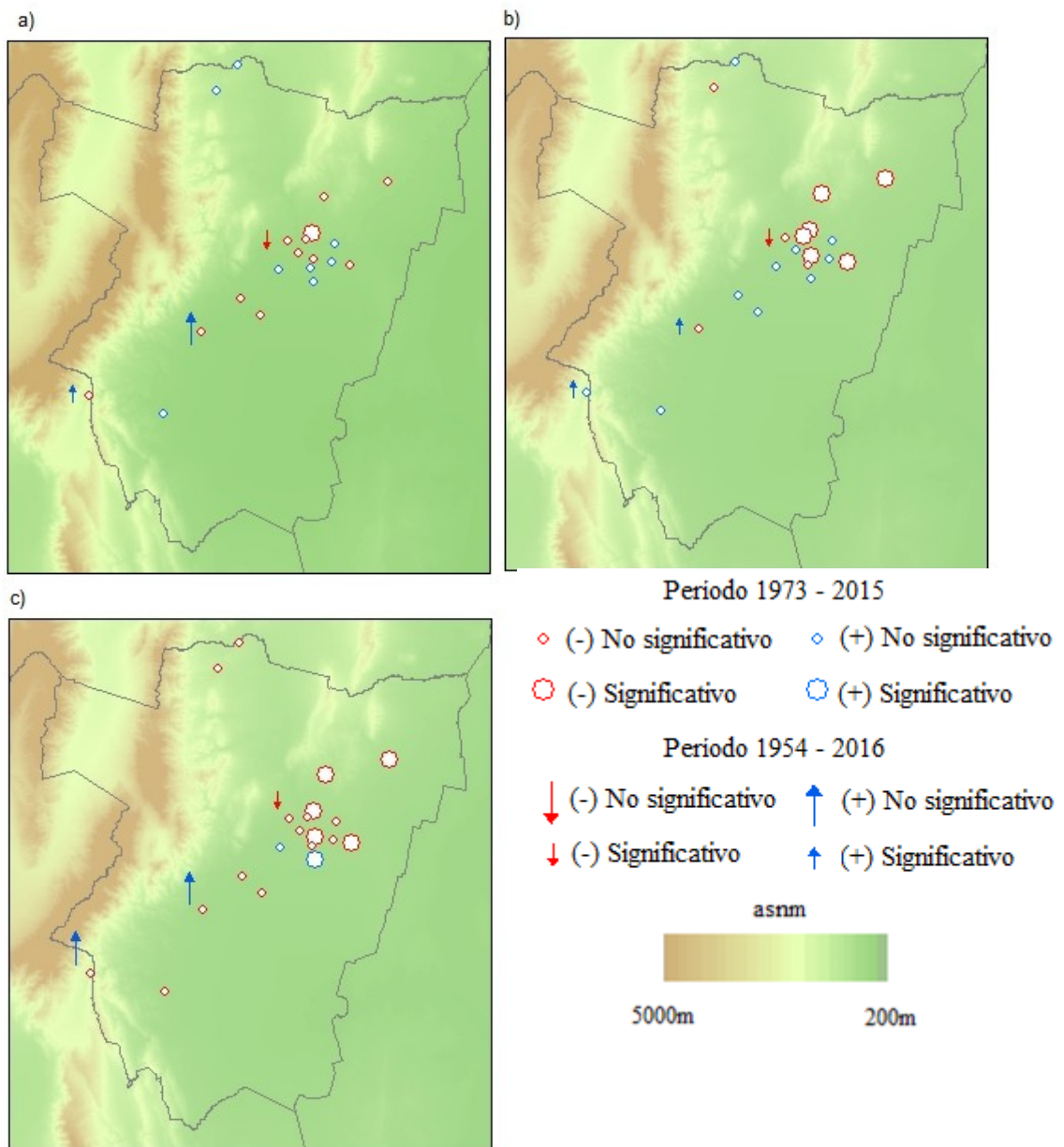


400

401Figura 4.- Contraste de tendencias lineales en las series de precipitación total anual en el período 1973 a 2015 (línea roja
402de puntos) y 1954 a 2016 (línea negra llena) en a) Estación Potrero del Clavillo, b) Estación Quebrada Los Sosa y c)
403Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. En la última se agrega además la tendencia observada en la
404serie completa de 1911 a 2016 (línea negra de trazos).

405

105



407 Figura 5.-Distribución de las tendencias obtenidas mediante la prueba Sen en los índices de precipitación: (a) 408 precipitación total anual. (b) número de días con precipitación superior al percentil 95 y (c) máxima precipitación diaria 409 anual

411 Tabla 1.- Estaciones pluviométricas seleccionadas en la provincia de Tucumán.

N°	Estación	Latitud	Longitud	Inicio	Fin	FUENTE
1	Potrero del Clavillo	-27,401	-65,978	1954	2017	SRHN
2	Los Sosa	-27,147	-65,533	1954	2017	SRHN
3	Padilla	-27,018	-65,379	1968	2014	INTA
4	Ingenio Concepción	-26,839	-65,152	1973	2015	Ingenio Concepción
5	EEAOC	-26,787	-65,196	1911	2017	EEAOC
6	San Luis	-26,872	-65,021	1973	2015	Ingenio Concepción
7	Maravilla	-26,861	-65,091	1973	2015	Ingenio Concepción
8	Lote 9-10	-26,803	-65,010	1973	2014	Ingenio Concepción
9	San Pedro	-26,906	-65,233	1973	2015	Ingenio Concepción
10	General Paz	-26,900	-65,104	1973	2015	Ingenio Concepción
11	Lolita	-26,885	-64,951	1973	2012	Ingenio Concepción
12	La Calera Ingenio	-26,760	-65,101	1973	2012	Ingenio Concepción
13	Piedritas	-26,784	-65,123	1973	2012	Ingenio Concepción

116 Artículo en edición

**Meteoro
logica**

117

119

14	San Miguel	-26,952	-65,092	1973	2012	Ingenio Concepción
15	El Sunchal	-26,614	-65,048	1975	2014	DRH
16	Villa Benjamín Araoz	-26,558	-64,799	1977	2015	DRH
17	Santa Ana	-27,473	-65,683	1973	2015	EEAOC
18	Dique San Carlos	-27,083	-65,300	1973	2015	DRH
19	El Brete	-26,097	-65,392	1975	2015	DRH
20	Chulcas	-26,195	-65,478	1975	2010	DRH

412

Meteorología

122

124

413 Tabla 2.- Tendencias calculadas en el período 1973 a 2015 en las series de precipitación total anual, máximos diarios
414 anuales y número de días con precipitación superior al percentil 95 con mínimos cuadrados ordinarios (MCO), la
415 prueba no paramétrica de Sen (β_{Sen}), la prueba de Mann – Kendall (p_{MK}) y la misma modificada ($p_{MK\ mod}$). El sombreado
416 corresponde a las tendencias significativas al 5% .

Estación	Total anual				Máximos diarios				Días con precipitación > P95			
	Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia	
	MCO	β_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$	MCO	β_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$	MCO	B_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$
1	-0,025	-1,382	0,862	0,862	-0,520	-0,135	0,477	0,398	0,044	0,000	0,154	0,154
2	-8,719	-11,308	0,217	0,323	-0,139	-0,262	0,653	0,653	-0,031	-0,040	0,169	0,169
3	-3,798	-3,882	0,109	0,109	-0,263	-0,319	0,255	0,205	-0,014	0,000	0,508	0,508
4	-0,630	-0,750	0,745	0,745	-0,505	-0,174	0,544	0,544	-0,006	0,000	1,000	1,000
5	-4,608	-5,100	0,112	0,071	-0,435	-0,213	0,362	0,362	-0,034	-0,043	0,193	0,193
6	-2,486	-3,382	0,169	0,169	-0,129	0,222	0,688	0,688	-0,011	0,000	0,734	0,734
7	0,375	-0,588	0,849	0,819	0,188	0,000	0,973	0,971	0,010	0,000	0,596	0,547
8	-7,579	-8,636	0,019	0,019	-0,564	-0,261	0,224	0,224	-0,041	-0,036	0,049	0,049
9	4,493	5,194	0,145	0,097	0,676	0,560	0,357	0,357	0,004	0,000	0,889	0,907
10	-1,805	-2,000	0,492	0,492	0,335	0,167	0,616	0,616	-0,038	-0,037	0,112	0,112
11	-5,880	-5,889	0,039	0,039	-0,437	-0,400	0,338	0,338	-0,105	-0,107	0,000	0,000
12	-7,321	-7,867	0,022	0,022	-1,433	-0,938	0,015	0,015	-0,079	-0,071	0,003	0,000
13	-5,495	-4,667	0,113	0,113	-0,354	-0,150	0,498	0,242	-0,103	-0,095	0,000	0,000
14	6,564	7,615	0,040	0,040	0,549	0,571	0,230	0,230	-0,019	0,000	0,439	0,439
15	-9,090	-6,900	0,173	0,000	-1,274	-0,500	0,276	0,276	-0,068	-0,048	0,052	0,047
16	-10,552	-15,000	0,011	0,011	-0,091	-0,385	0,817	0,817	-0,080	-0,077	0,004	0,004
17	-6,591	-7,500	0,427	0,427	0,352	0,375	0,342	0,342	-0,036	0,000	0,272	0,496
18	-3,645	-3,967	0,355	0,355	-0,399	-0,448	0,342	0,342	-0,036	0,000	0,248	0,146
19	-0,957	-2,591	0,561	0,561	0,690	0,308	0,495	0,591	0,011	0,000	0,570	0,570
20	-2,394	-1,967	0,314	0,186	0,331	0,333	0,615	0,456	-0,066	-0,056	0,061	0,061

417

418

Meteoro logica

127

129

419 Tabla 3.- Tendencias calculadas en el período 1954 a 2016 en las series de precipitación total anual, máximos diarios
420 anuales y número de días con precipitación superior al percentil 95 con mínimos cuadrados ordinarios (MCO), la
421 prueba no paramétrica de Sen (β_{Sen}), la prueba de Mann – Kendall (p_{MK}) y la misma modificada ($p_{MK\ mod}$). El sombreado
422 corresponde a las tendencias significativas al 5%.

Estación	Total anual				Máximos diarios				Días con precipitación > P95			
	Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia	
	MCO	β_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$	MCO	β_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$	MCO	B_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$
1	4,975	3,670	0,009	0,031	0,047	0,042	1,000	1,000	0,0275	0,020	0,079	0,110
2	8,567	7,400	0,011	0,049	0,745	0,743	0,010	0,002	0,0180	0,000	0,412	0,368
5	-0,138	-0,517	0,827	0,789	0,000	-0,021	0,841	0,781	-0,0134	0,000	0,462	0,468

423

424

132

134

425 Tabla 4.- Tendencias calculadas en el período 1911 a 2016 en las series de precipitación total anual, máximos diarios
 426 anuales y número de días con precipitación superior al percentil 95 con mínimos cuadrados ordinarios (MCO), la
 427 prueba no paramétrica de Sen (β_{Sen}), la prueba de Mann – Kendall (p_{MK}) y la misma modificada ($p_{MK\ mod}$). El sombreado
 428 corresponde a las tendencias significativas al 5%.

Estación	Total anual				Máximos diarios				Días con precipitación > P95			
	Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia	
	MCO	β_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$	MCO	β_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$	MCO	B_{Sen}	p_{MK}	$p_{MK\ mod}$
5	2,290	2,606	0,002	0,002	0,08	0,084	0,480	0,480	0,019	0,015	0,049	0,047

429

430