

# IMPACTOS EN LA PRECIPITACIÓN DEL NORTE DE CHILE DE LOS REGÍMENES DE TIEMPO SEGÚN EL GEOPOTENCIAL DE 500 HPA ENTRE 1966 Y 2015

Óliver MESEGUER-RUIZ<sup>1,2</sup>, Nicola CORTESI<sup>3</sup>, José A. GUIJARRO<sup>4</sup>, Pablo SARRICOLEA<sup>2,5</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ciencias Históricas y Geográficas, Universidad de Tarapacá*

<sup>2</sup>*Grup de Climatologia, Universitat de Barcelona*

<sup>3</sup>*Barcelona Supercomputing Center*

<sup>4</sup>*Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*

<sup>5</sup>*Departamento de Geografía, Universidad de Chile*

**omeseguer@academicos.uta.cl, nicola.cortesi@bsc.es, jguijarrop@aemet.es, psarricolea@uchilefau.cl**

## RESUMEN

El norte de Chile se caracteriza por ser un clima desértico, englobando parte del desierto de Atacama, y por tener un gradiente altitudinal muy marcado como consecuencia de una orografía compleja. Sin embargo, de forma notablemente concentrada, en esta región se da una estación lluviosa que tiene lugar en los meses estivales del hemisferio austral. Es de especial interés determinar qué mecanismos se dan en altura (500 hPa) que proporcionan la humedad necesaria para la ocurrencia de las lluvias. Para ello, se han calculado las anomalías pluviométricas estacionales de 161 estaciones meteorológicas ubicadas en el norte de Chile (17°S a 29°S) y se han puesto en relación con las anomalías barométricas detectadas en el geopotencial de 500 hPa. Se determinaron 4 agrupaciones de regímenes de tiempo, las cuales mostraron impactos diferentes en los distintos observatorios, demostrando respuestas diferenciadas en función de la latitud y de la altitud de los mismos.

**Palabras clave:** Desierto de Atacama, Precipitación, Regímenes de tiempo, Alta de Bolivia.

## ABSTRACT

Northern Chile is characterized by a desert climate, encompassing part of the Atacama Desert, and having a very marked altitudinal gradient because of a complex orography. However, in a remarkably concentrated way, in this region a rainy season takes place in the summer months of the Southern Hemisphere. It is of special interest to determine which mechanisms are given in height (500 hPa) that provide the necessary humidity for the occurrence of rains. For this, the seasonal rainfall anomalies of 161 meteorological stations located in the north of Chile (17°S to 29°S) have been calculated and have been related to the barometric anomalies detected in the 500 hPa geopotential. Four cluster of weather regimes were determined, which showed different impacts in the different observatories, demonstrating differentiated responses according to the latitude and altitude of them.

**Key words:** Atacama Desert, Precipitation, Weather Regimes, Bolivian High

## 1. INTRODUCCIÓN

La precipitación en el norte de Chile presenta una elevada irregularidad a escala estacional e interanual (Romero et al., 2013). Se trata de una de las regiones más áridas del mundo, y, por lo tanto, la disponibilidad hídrica es un tema clave para los hacedores de políticas a cargo de la gestión regional (Sarricolea y Romero, 2015). El comportamiento de la precipitación en esta área está regulado por diversos factores que se evidencian a diversas escalas temporales, desde diaria a multidecadal (Falvey y Garreaud, 2005; Valdés-Pineda et al., 2017). La variabilidad interanual de las precipitaciones está principalmente explicada por el ENSO, asociando períodos húmedos a su fase fría y períodos secos a su fase cálida (Valdés-Pineda et al., 2015). A nivel estacional, las precipitaciones en el norte de Chile en el verano austral (estación húmeda, de diciembre a marzo) responden a un exceso de calor latente en la atmósfera y a la intensa radiación incidente en el suelo, que genera inestabilidad vertical del aire y, posteriormente, actividad convectiva (Sarricolea y Romero, 2015). Todo esto causa la configuración en niveles altos del Alta de Bolivia, la cual activa el monzón sudamericano, pero también áreas donde la estación seca es absoluta, sin ningún registro de precipitación. De este modo, el carácter húmedo o seco de un año en concreto viene determinado por el carácter de la estación húmeda. Por lo tanto, hay una clara necesidad de mejorar el entendimiento de la naturaleza de la precipitación regional en el norte de Chile, que se encuentra al origen de la disponibilidad hídrica en una de las regiones más secas del mundo.

Las regiones áridas son más sensibles al cambio climático (Donat et al., 2016) ya que sus consecuencias pueden tener mayores implicaciones severas en los procesos naturales y en los sistemas económicos. En el área de estudio (desde los 17°S a los 29°S), las tendencias generales de calentamiento tienen implicaciones directas en el ciclo hidrológico (Held y Soden, 2006), acentuando la situación de sequía permanente (Sarricolea et al., 2017a). Esta situación enfrenta un escenario de aumento de demanda de agua asociado al desarrollo económico del país, al aumento de la población en las áreas urbanas y, muy especialmente, al auge de la actividad minera en el desierto de Atacama.

Por este motivo, la confianza de las proyecciones futuras de las precipitaciones en este área aparece como uno de las preocupaciones prioritarias para la adecuada implementación de políticas y gestiones por parte de los gobiernos locales. En este sentido, los cambios espaciales proyectados muestran consistencia entre los diferentes modelos a escalas macro, pero muestran gran incertidumbre en escalas de detalle. El patrón consistente se caracteriza por aumentos de la precipitación en altas latitudes y en regiones húmedas y por una disminución de la precipitación en las regiones secas (Kirtman et al., 2013), pero no aparece consistencia alguna en áreas elevadas y secas, que se localizan en las áreas limítrofes en las que aumenta y disminuye la precipitación, como es el caso del área de estudio (Figura 1).

Chile ha adoptado una agenda a corto plazo (2017-2022) para adaptarse al cambio climático, asumiendo que las precipitaciones aumentarán en el norte del País

(Gobierno de Chile, 2015), ignorando el hecho de que los modelos utilizados por el IPCC que marcan una tendencia positiva de las cantidades de precipitación (CRUTS) no son capaces de diferenciar la variabilidad climática de los forzamientos externos, incluso identificando magnitudes de la tendencia inferiores al propio error del modelo (Hartmann et al., 2013). Este hecho se explica principalmente por el déficit de observaciones en el área de estudio (Sarricolea y Romero, 2015; Trenberth et al., 2007), por lo que no es posible implementar modelos con una resolución suficiente que puedan llevar a cabo proyecciones confiables. Además, la compleja orografía del norte de Chile (Figura 1) está en oposición con la resolución espacial de los modelos. Para mejorar la confianza de las proyecciones, se propone evaluar los impactos de la circulación atmosférica en la precipitación al relacionar regímenes de tiempo con anomalías de la precipitación.

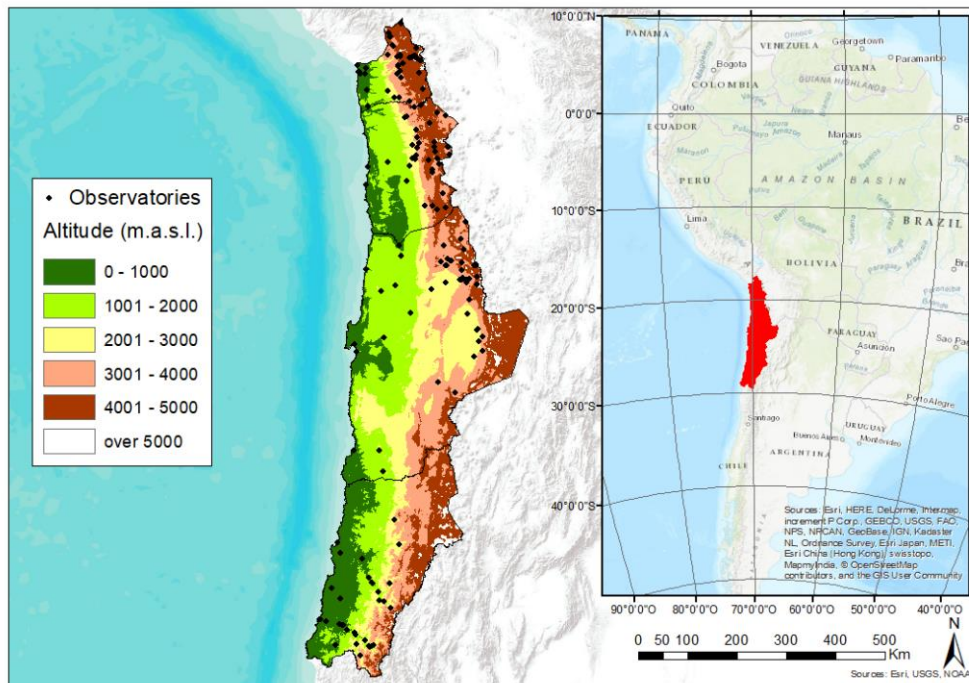


Fig. 1. Área de estudio y localización de las estaciones meteorológicas observadas.

Los patrones de tiempo diarios de escala regional que caracterizan la circulación atmosférica pueden ser agrupados en un número restringido de regímenes de tiempo (WRs). Los WRs sinópticos han sido ampliamente aplicados a múltiples estudios en el hemisferio norte (Fereday, 2017; Roller et al., 2016), en los que se muestran relaciones con los patrones de teleconexión como la NAO (Raymond et al., 2017) y con las anomalías climáticas regionales, principalmente temperaturas y cantidades de precipitación. Los WRs se definen clasificando una variable que ayuda a caracterizar la circulación troposférica, como la altura geopotencial, la presión atmosférica a nivel del mar o el campo de vientos. Los cambios en la frecuencia mensual de los WRs en las áreas extratropicales determinan buena parte de la variabilidad de las anomalías

mensuales de la precipitación, con la excepción de regiones o periodos en los que la circulación de gran escala se encuentra menos relacionada con la precipitación local, especialmente en áreas con una compleja orografía (Salameh et al., 2009), o en el verano del hemisferio norte (Dükeloth y Jacobeit, 2003). La circulación tropical está dominada por otros patrones, y la interpretación de las implicaciones de los WRs es menos clara, pero aun así puede ser aplicada (Vigaud y Robertson, 2017).

En el hemisferio sur, se han aplicado estudios sobre regímenes de tiempo principalmente a Australia y al Pacífico occidental (Lorrey y Fauchereau, 2017; Wilson et al., 2013). Se mostró que algunos WRs se asocian a condiciones húmedas, mientras que otros a condiciones secas. Los WRs mostraron una fase de bloqueo según el ciclo estacional con un grado de coherencia moderado. La correlación entre estos WRs y los campos de precipitación global según datos de reanálisis indican que existe una fuerte conexión entre los patrones regionales de tiempo y los cambios en la posición media de la Zona de Convergencia del Pacífico Sur (SPCZ). También aparecen impactos notables en la precipitación según cambios en la frecuencia de los WRs en el Pacífico suroccidental. Las investigaciones de los WRs pueden ayudar a superar las incoherencias existentes entre los modelos globales y regionales en las áreas con una baja densidad de observaciones en el contexto de escenarios futuros de cambio climático.

En el presente trabajo se comprueba el impacto de los WRs identificados en el geopotencial de 500 hPa en las anomalías de la precipitación estacional.

## 2. MÉTODOS

Se utilizaron los datos de 161 estaciones meteorológicas del área de estudio, con datos de precipitación diaria desde el 1 de enero de 1966 hasta el 31 de diciembre de 2015, pertenecientes a las bases de datos de la Dirección Meteorológica de Chile y a la Dirección General de Aguas. El control de calidad se llevó a cabo mediante el paquete de R *Climatol* 3.0 (Guijarro, 2016), que utiliza los valores normalizados del dato de precipitación más cercano para crear series de referencia para cada estación. Las diferencias entre las series observada y de referencia se utilizan para comprobar su calidad mediante la detección de outliers, así como su homogeneidad mediante el test de SNHT (Alexandersson, 1986). Al mismo tiempo, al deshacer la normalización de las series de referencia, se obtienen estimaciones que permiten rellenar los datos faltantes en las series.

Las anomalías estacionales de la precipitación y diarias del geopotencial de 500 hPa se obtuvieron a partir de las climatologías de las respectivas bases de datos previamente filtradas con una regresión polinómica LOESS, de tal manera que se consideró el ciclo anual y se suavizó la variabilidad de corto plazo (Mahlstein et al., 2015). Antes de clasificar los WRs, las anomalías del geopotencial de 500 hPa de la malla diaria fueron ponderadas a partir del coseno de la latitud con el fin de asegurar que cada área tenga el mismo peso superficial en cada celda. Se ha utilizado el producto del proyecto NCEP/NCAR Reanalysis (Kalnay et al., 1996) entre 1966 y 2015 para determinar los diferentes WRs a 500 hPa. Se trata de una de las bases de datos más completas y físicamente consistentes para el Hemisferio Sur, se considera como homogéneo para el estudio de la circulación a gran escala en el período

estudiado. Las clasificaciones de WRs para Sudamérica no son frecuentes (Solman y Menéndez, 2003), aunque sí se han llevado a cabo clasificaciones de tipos sinópticos (Sarricolea et al., 2017b). Los WRs se han puesto en relación con el clima local tal y como se ha explicado anteriormente.

Se aplicó un análisis cluster a las anomalías del geopotencial de 500 hPa (eliminando previamente su tendencia a largo plazo) para clasificar los WRs (Hart et al., 2006). Se obtuvieron 4 clasificaciones. La metodología más extendida para este tipo de clasificación se basa en algoritmos de agrupación no lineales (Fereday et al., 2008, Dawson et al., 2012). La más utilizada de estas técnicas es el algoritmo de k-medias (Hartigan y Wong, 1979), que se aplicó en el presente trabajo. Se utilizaron 23 criterios diferentes para determinar el número óptimo de conjuntos o clusters (Charrad et al., 2015). La Figura 2 representa la distribución del número de criterios en función del número de conjuntos para clasificar los WRs. El número máximo de criterios se halla en correspondencia de 3 o 4 conjuntos. Se utilizaron finalmente 4 conjuntos para evaluar los impactos en la precipitación.

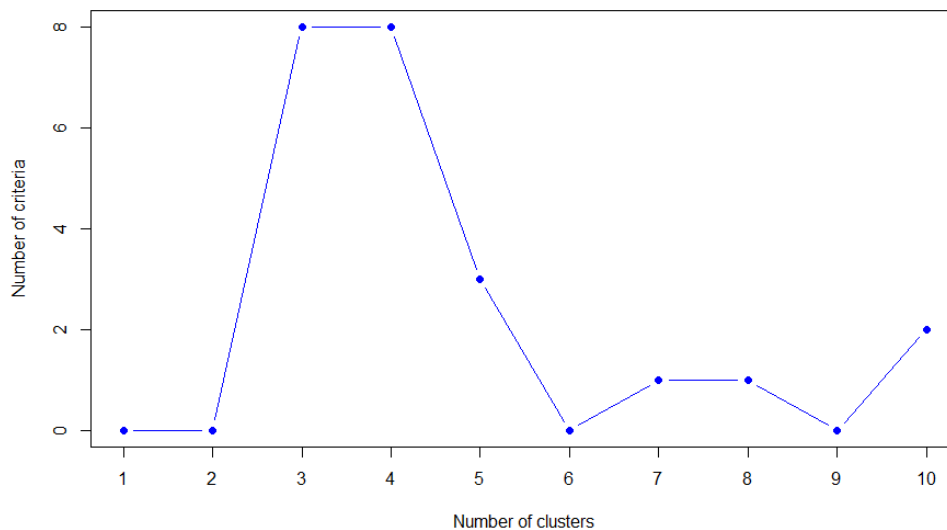


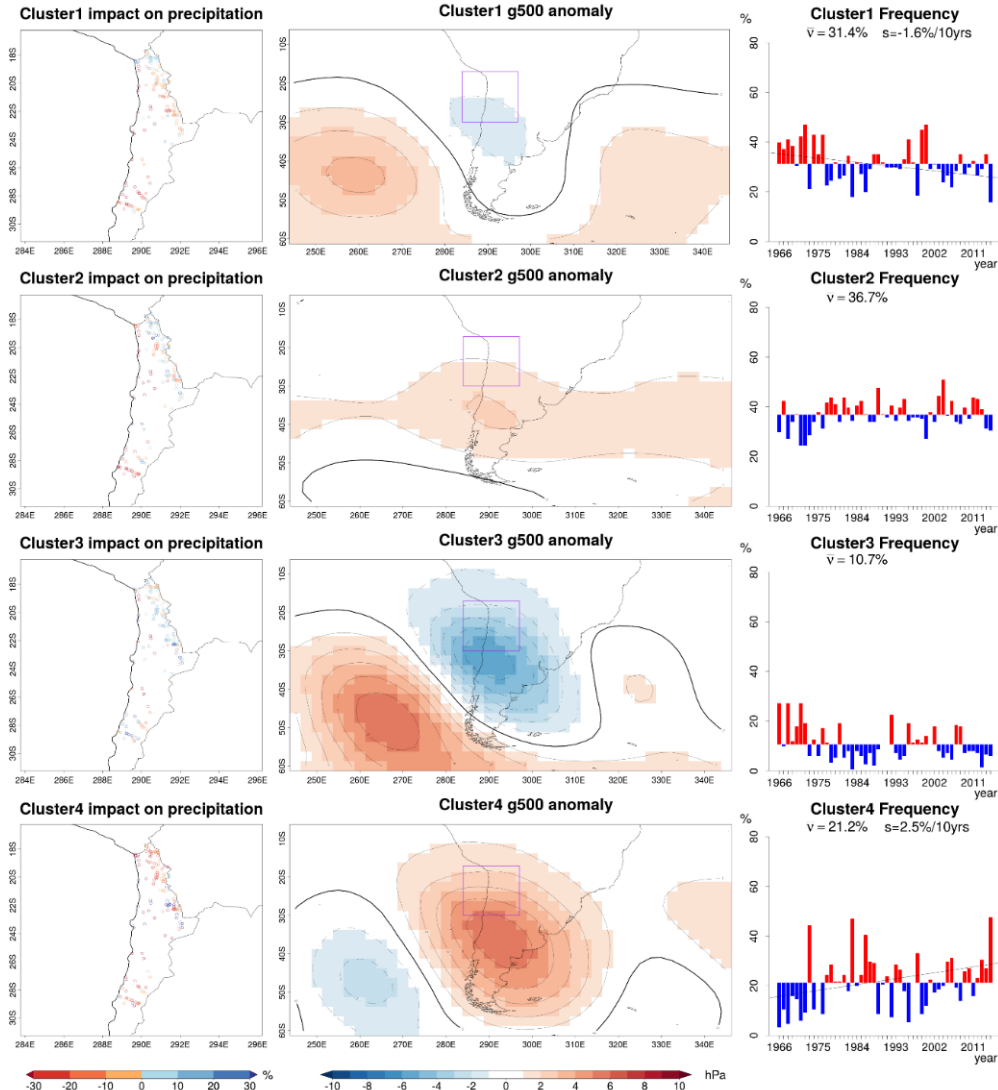
Fig. 2. Número ideal de conjuntos en función del número de criterios considerado.

### 3. RESULTADOS

Se evaluaron los impactos de los 4 conjuntos de WRs en las anomalías pluviométricas de cada estación meteorológica del área de estudio (Figura 3).

El primer conjunto de regímenes de tiempo WR1 ocurre en el 31,4 % de los días y su frecuencia tiene una tendencia significativa (95% según el test de Mann-Kendall) de -1,6%/década para el período 1966-2015. Este primer régimen de tiempo se caracteriza por presentar una anomalía negativa leve (-2 a -3 hPa) centrada en el cono sur de Sudamérica, y dos anomalías positivas, una en el Atlántico Sur (+2 hPa) y otra más marcada en el Pacífico Suroriental (+3 a +4 hPa). Se configura de esta manera una situación de vaguada en altitud. Se caracteriza por presentar impactos negativos

en la mayoría de las estaciones del área de estudio, de ente el -10% y -30% en la mayoría de las estaciones, con la excepción de un número muy limitado de estaciones en el extremo norte, donde genera un impacto positivo de hasta el 10%.



*Fig. 3. Anomalías del geopotencial de 500 hPa de cada régimen, el impacto de cada uno de ellos en la precipitación de las estaciones meteorológicas y su frecuencia en el periodo 1966-2015. El marco morado indica el área empleada por el análisis cluster.*

El segundo régimen de tiempos WR2 ocurre en el 36,7% de los días y no presenta ninguna tendencia significativa en el período estudiado. Se caracteriza por presentar una banda longitudinal de anomalía del geopotencial positiva centrada entre los 38°S

y los 40°S, leve en toda el área (1 a 2 hPa) pero ligeramente más acentuada en el cono sur sudamericano, a los 40°S y 70°W (de 2 a 3 hPa). El WR2 genera impactos positivos en las precipitaciones del interior del norte del área de estudio, así como en algunas estaciones en el interior de la zona central y meridional, pudiendo generar anomalías positivas de hasta el 30%. Por otro lado, genera asimismo anomalías negativas en toda el área litoral (hasta el -10%), pudiendo llegar a ser muy marcadas en el extremo meridional del norte de Chile (de hasta el -30%).

El tercer tipo de regímenes de tiempo WR3 ocurre en el 10,7% de los días, y tampoco presenta ninguna tendencia significativa en su distribución de frecuencias para el período 1966-2015. El WR3 presenta una marcada anomalía negativa (-5 hPa) centrada ligeramente al sur del área de estudio, a los 31°S, así como una anomalía positiva en el Pacífico suroriental (+5 hPa), en una posición más meridional, centrada en los 50°S. Provoca impactos positivos (del +10% al +30%) en la mayoría de las estaciones del área de estudio, a lo largo de todo el desarrollo latitudinal, excepto en aquellas estaciones costeras del extremo norte, donde se dan algunos impactos ligeramente negativos (nunca superiores a -10%).

El cuarto régimen de tiempo WR4 ocurre en el 21,2% de los días, y presenta una frecuencia con una tendencia positiva significativa del 2,5% por década. Este régimen configura una situación en altura opuesta al anterior. Presenta una anomalía positiva ligeramente al sur del área de estudio (centrada en el paralelo 38°S) de entre 6 y 7 hPa, y una leve anomalía negativa (-3 hPa) en el Pacífico suroriental centrada a los 48°S. Este WR4 genera anomalías negativas en casi la totalidad del área de estudio, con la excepción del interior del área cercana al trópico de Capricornio, alrededor de los 23°S. En el resto de estaciones, las anomalías negativas dominan (de -10% a -30%).

#### 4. DISCUSIÓN

En este estudio se ha clasificado el geopotencial a 500 hPa en el norte de Chile de diciembre a marzo en cuatro regímenes de tiempo. El WR1 se asocia a una situación de vaguada, y los impactos negativos son los que predominan en casi la totalidad del área de estudio. La configuración de este WR iría asociado a un fortalecimiento del Anticiclón del Pacífico Suroriental (APSO), acentuando la situación de bloqueo frente a los flujos del oeste. La anomalía negativa ligeramente al sur del área de estudio generaría flujos del norte que explicarían los impactos positivos en las estaciones ubicadas al norte y los impactos negativos en el resto de estaciones que se encontrarían en una situación de sotavento respecto a la Cordillera de los Andes. Este régimen presenta un retroceso en la frecuencia, por lo que coincidiría parcialmente con las proyecciones consideradas por el Gobierno de Chile (2015) para su agenda 2017-2022. Por la disposición eminentemente longitudinal de la anomalía positiva del geopotencial de 500 hPa representada en el WR2, esta situación correspondería eminentemente con un fortalecimiento de la corriente en chorro subtropical. Los impactos positivos en las estaciones del interior del norte del área de estudio podrían deberse a que bajo esta situación se acentuarían los movimientos verticales que dan lugar a movimientos convectivos que se producen en la cordillera de los Andes y en el Altiplano en los meses estivales y que están en el origen de la precipitación (Sarricolea y Romero, 2015). La configuración sinóptica que se da en el WR3 viene

asociada con un fortalecimiento a 500 hPa del APSO y la aparición de una baja presión en el mismo nivel sobre el cono sur. De esta manera, se produce una advección con dirección SW-NE en altura. Esta baja presión a 500 hPa vendría asociada a movimientos de ascenso que generarían inestabilidad y anomalías positivas en las precipitaciones en la mayoría del área de estudio. Este WR no presenta ninguna tendencia en su frecuencia, por lo que no es posible afirmar que este tipo de situaciones se haya hecho más frecuente en los últimos años, ni tampoco que se vaya a dar un aumento de las cantidades de precipitación asociadas a estas situaciones. Este régimen coincidiría con la situación señalada por Sarricolea y Romero (2015) de situaciones de verano asociadas a los movimientos ascendentes por las elevadas temperaturas que alcanza la superficie. El WR4 genera un impacto negativo en la anomalía de precipitación de la mayor parte de las estaciones meteorológicas consideradas. Esta situación en altura coincide con una situación inversa a la habitual donde domina el APSO, configurándose flujos desde el continente hacia el océano, lo que explica el descenso de las precipitaciones.

En definitiva, se evidencia la importancia del análisis sinóptico para conocer el comportamiento de determinadas variables meteorológicas de las cuales no se disponen de observaciones suficientes para elaborar proyecciones confiables. Conviene considerar, para futuros trabajos, un análisis temporal más fino, considerando el comportamiento de los WRs a nivel estacional.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores quieren agradecer el apoyo del proyecto FONDECYT 11160059 (Gobierno de Chile) y del Grupo de Climatología (2014SGR300, Generalitat de Catalunya).

#### **REFERENCIAS**

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Int J Climatol*, 6, 661–675. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Charrad, M., Ghazzali, N., Veronique, B., Niknafs, A. (2015). Determining the Best Number of Clusters in a Data Set. Recuperado de: <https://cran.r-project.org/web/packages/NbClust/NbClust.pdf>
- Dawson, A., Palmer, T.N., Corti, S. (2012). Simulating regime structures in weather and climate prediction models. *Geophys Res Lett*, 39, L21805. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2012GL053284>
- Donat, M., Lowry, A., Alexander, L., O’Gorman, P., Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nat Clim Change*, 6, 508–513. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE2941>
- Dunkeloth, A., Jacobeit, J. (2003). Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948–1998. *Int J Climatol*, 23, 1843–1866. doi: <https://dx.doi.org/10.1002/joc.973>
- Falvey, M., Garreaud, R. (2005). Moisture variability over the South American Altiplano during the South American Low Level Jet Experiment (SALLJEX)



- observing season. *J Geophys Res*, 110, D22105. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2005JD006152>
- Fereday, D., Knight, J.R., Scaife, A.A., Folland, C.K. (2008). Cluster Analysis of North Atlantic – European Circulation Types and Links with Tropical Pacific Sea Surface Temperatures. *J Climate*, 21(1), 3687–3703 .doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2007JCLI1875.1>
- Fereday, D. (2017). How persistent are North Atlantic/European sector weather regimes?. *J Climate*. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0328.1>
- Gobierno de Chile. (2015). Plan de Adaptación al Cambio Climático. Santiago: Departamento de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente.
- Guijarro, J.A. (2016). Package “climatol” Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products). Recuperado de: <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>
- Hart, M., DeDear, R., Hyde, R. (2006). A synoptic climatology of tropospheric ozone episodes in Sydney, Australia. *Int J Climatol*, 26, 1635-1649. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1332>
- Hartigan, J., Wong, M. (1979). Algorithm AS 136 A K-Means Clustering Algorithm. *J Roy Stat Soc C-App*, 28(1), 100-108. doi: <http://dx.doi.org/10.2307/2346830>
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., Zhai, P.M. (2013) Observations: Atmosphere and Surface. In Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 159-254). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Held, I.M., Soden, B.J. (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *J Climate*, 19, 5686-5699. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Wollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc*, 77, 437-471. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Kirtman, B., Power, S.B., Adedoyin, J.A., Boer, G.J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F.J., Fiore, A.M., Kimoto, M., Meehl, G.A., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., van Oldenborgh, G.J., Vecchi, G., Wang, H.J. (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp.

- 953-1028). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Lorrey, A.M., Fauchereau, N.C. (2017). Southwest Pacific atmospheric weather regimes: linkages to ENSO and extra-tropical teleconnections. *Int J Climatol*. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5304>
- Mahlstein, I., Spirig, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C. (2015). Estimating daily climatologies for climate indices derived from climate model data and observations. *J Geophys Res-Atmos*, 120, 2808-2818. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/2014JD022327>
- Raymond, F., Ullmann, A., Camberlin, P., Oueslati, B., Drobinsky, P. (2017). Atmospheric conditions and weather regimes associated with extreme winter dry spells over the Mediterranean basin. *Clim Dyn*. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-017-3884-6>
- Roller, C.D., Qian, J.H., Agel, L., Barlow, M., Moron, V. (2016). Winter Weather Regimes in the Northeast United States. *J Climate*, 29, 2963-2980. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0274.1>
- Romero, H., Smith, P., Mendonça, M., Méndez, M. (2013). Macro y mesoclimas del altiplano andino y desierto de Atacama: desafíos y estrategias de adaptación social ante su variabilidad. *Rev Geogr Norte G*, 55, 19-41. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022013000200003>
- Salameh, T., Drobinski, P., Vrac, M., Naveau, P. (2009). Statistical downscaling of near-surface wind over complex terrain in southern France. *Meteorol Atmos Phys*, 103(1-4), 253–265. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00703-008-0330-7>
- Sarricolea, P., Romero, H. (2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Rev Geogr Norte Gd*, 62, 169-183. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022015000300010>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M.J., Meseguer-Ruiz, O. (2017a). Climatic Regionalisation of Continental Chile. *J Maps*, 13(2), 66-73. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., Martín-Vide, J., Outeiro, L. (2017b). Trends in the frequency of synoptic types in central-southern Chile in the period 1961–2012 using the Jenkinson and Collison synoptic classification. *Theor Appl Climatol*. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2268-5>
- Solman, S.A., Menéndez, C.G. (2003). Weather regimes in the South American sector and neighbouring oceans during winter. *Clim Dyn* 21, 91-104 .doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-003-0320-x>
- Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B., Zhai, P. (2007). Observations: surface and atmospheric climate change. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 235-336). Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- Valdés-Pineda, R., Valdés, J.B., Diaz, H.F., Pizarro-Tapia, R. (2015). Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in

- South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *Int J Climatol*, 36, 2979-3001. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4532>
- Valdés-Pineda, R., Cañón, J., Valdés, J.B. (2017). Multi-decadal 40- to 60-year cycles of precipitation variability in Chile (South America) and their relationship to the AMO and PDO signals. *J Hydrol.* doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.031>
- Vigaud, N., Robertson, A.W. (2017). Convection regimes and tropical-midlatitude interactions over the Intra-American Seas from May to November. *Int J Climatol*, 37, 987-1000. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5051>
- Wilson, L., Manton, M.J., Siems, S.T. (2013). Relationship between rainfall and weather regimes in south-eastern Queensland, Australia. *Int J Climatol*, 33, 979-991. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3484>