

Artículo de Divulgación Científica

¿Cómo llueve cuando llueve en Atacama ?

Cerca de los 24°S y enfrentando la costa oriental de Sudamérica yace el desierto de Atacama, el más árido del planeta. El pueblo de Quillagua (21.6 6°S, 69 69°W), un oasis del Río Loa que nace en los Andes alimentando por la precipitación Altiplánica del verano, presenta la precipitación anual más pequeña de la que se tiene registro en el planeta (0.05 mm/ año, Middleton, 2001).

Los factores que explican la extrema sequedad del desierto son múltiples (ej. Rondanelli et al., 2015): (1) la posición de Atacama bajo la rama descendente de la circulación atmosférica conocida como la celda de Hadley (que explica la sequedad de otros desiertos subtropicales del planeta, como los de Sahara y Kalahari.) y (2) muchos otros factores que tienen su origen en las relativamente frías aguas que bañan la costa oriental de Sudamérica. Estas aguas frías están aparejadas a los vientos del sureste que terminan por converger en general al norte del Ecuador. Esto contrasta fuertemente con la costa oriental de Sudamérica a similares latitudes que Atacama, en donde lugares como Sao Paulo o Río de Janeiro experimentan frecuentes episodios de lluvia. La frialdad de la costa frente a Atacama tiene múltiples consecuencias; por una parte la estabilidad atmosférica, una medida que tan fácil o difícil resulta la mezcla turbulenta de aire, la cual se ve intensificada por las bajas temperaturas costeras. La estabilidad a su vez, contribuye al desarrollo de la capa de nubes del tipo estratocúmulos que se encuentra ubicada de manera semi-permanente frente a la costa de Chile y Perú. El efecto de los Andes sobre la sequedad es controversial, pues si bien hay un fuerte contraste en la precipitación a ambos lados de la cordillera y pareciera existir un efecto de “sombra de precipitación” hacia el lado Pacífico asociado al bloqueo por los Andes de la entrada de aire húmedo desde la Amazonía y el océano Atlántico, simulaciones efectuadas con modelos atmosféricos globales indican que el remover los Andes solo conseguiría hacer más extensa la zona árida hacia el Oeste (Garreaud et al., 2011).

Por otra parte, un efecto adicional de los Andes en la hiperaridez de Atacama, es el calentamiento de las laderas de los Andes, que contribuye a la existencia de un ciclo diario de descenso del aire que refuerza la sequedad durante las horas de la tarde, inhibiendo la posible convección forzada por el calentamiento diurno (Rutllant et al., 2003), típica de las latitudes tropicales. Este descenso de aire adicional, dificulta que el Monzón sudamericano, activo durante los veranos en el Altiplano Andino penetre con precipitación estival hacia la costa. Un extremo climático como la hiperaridez de Atacama, requiere de esta conjunción de factores todos apuntando en la misma dirección hacia la mayor sequedad atmosférica.

Entonces, las pocas veces que llueve, resultan ser de mayor importancia pues estas excepciones pueden ayudar a entender los factores que determinan las condiciones normales y climatológicas de hiperaridez. La pregunta “¿Cómo llueve cuando llueve en Atacama?” ilumina la pregunta más general respecto de cómo es que un lugar del planeta mantiene condiciones hiperáridas por cientos de años sin mayor alteración.



Dr. Roberto Rondanelli

Profesor en el Departamento de Geofísica, Universidad de Chile Centro del Clima y la Resiliencia, (CR)2

Profesor asistente del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile e investigador asociado del Centro del Clima y la Resiliencia CR(2). Sus intereses radican en el estudio de la dinámica del clima, en particular de la interacción mutua entre nubes, precipitación, vapor de agua y radiación. Durante sus estudios de doctorado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), EEUU, estudió la respuesta de la nubosidad y la precipitación respecto de la temperatura superficial del mar y su posible impacto en las realimentaciones climáticas en el clima de la tierra temprana. Actualmente trabaja en actividades de instrumentación meteorológica, desarrollando instrumentos y plataformas observacionales que permitan observaciones más flexibles y precisas de la atmósfera.

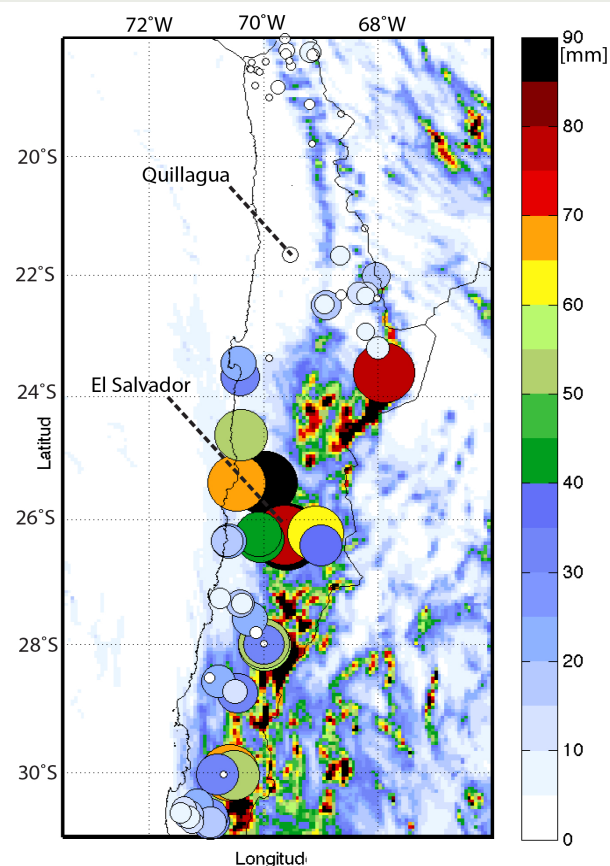


Figura 1: Distribución de la lluvia acumulada durante la tormenta del 24 al 26 de Marzo de 2015 en el Norte de Chile. Precipitación en mm totales, sombreado de color corresponde a una simulación numérica usando el modelo WRF (agradecimientos a Raúl Fuentes por efectuar la simulación). Los círculos corresponden a las estaciones pluviométricas disponibles.

¿Cómo llueve cuando llueve en Atacama ?

Roberto R.

Un caso excepcional reciente fue el de marzo de 2015. El día 24 comenzó a llover de manera tímida en la zona de la cuenca del Río Salado. En las estaciones cercanas a la mina El Salvador, se registraron valores de precipitación con una intensidad de hasta 10 mm/h y acumulaciones totales del orden de 10 a 20 mm. Otros 40 a 70 mm caerían durante el 25 de marzo, produciendo una crecida estimada que llegó a más de 1000 m³/s en la ciudad de Chañaral durante el día 25 (Wilcox et al., 2016), provocando la muerte de más de 30 personas y daños por cerca de US\$1500 millones (Kron, 2016), al tiempo que esta crecida puso a Chile dentro del "Top 10" en el triste resumen de los países con daños por catástrofes climáticas durante el año 2015 (Kreft et al., 2016). La distribución de las lluvias observadas y simuladas con un modelo numérico se presentan en la Figura 1. El oasis de Quillagua, recibió 4 mm, es decir, la precipitación equivalente a 80 años en solo 2 días.

¿Cuáles son los procesos físicos responsables de la precipitación de la tormenta?. Ciertamente, la causa más próxima puede atribuirse a la presencia de lo que se conoce como una baja segregada (conocida como "depresión aislada de niveles altos" en Perú), que consiste en una zona de aire más frío que se ubica en la tropósfera libre y que generalmente, tiene su origen en una masa de aire frío polar. Cuando ocurre una segregación se produce un ciclón en altura, este ciclón puede o no generar una circulación ciclónica en superficie. La figura 2 ilustra el proceso de segregación y la circulación ciclónica alrededor de la baja con el campo de vorticidad potencial. En este caso, la circulación ciclónica superficial ocurrió pero fue muy débil. Muchas bajas segregadas ocurren frecuentemente frente a la costa occidental de Sudamérica, sin generar ninguna alteración mayor en el tiempo atmosférico, y generalmente causando fuertes vientos y tormentas eléctricas en la alta cordillera.

Es así como la mera existencia de una circulación ciclónica no asegura la ocurrencia de precipitación, ni menos de la magnitud observada en Atacama durante Marzo de 2015. Asimismo, por muy intensa que sea la dinámica de un sistema, las condiciones locales ya discutidas, en particular un océano frío y poca disponibilidad de vapor de agua, hacen difícil la precipitación, aún en presencia de sistemas de mal tiempo que tengan el ascenso o la "dinámica seca" correcta.

La situación durante Marzo de 2015 presentaba la particularidad de la presencia de una anomalía de temperatura superficial del Mar frente a la costa de Perú, asociada al debilitamiento temporal de los vientos del sudeste (ej. Goubanova et al., 2015). Esta anomalía y en conjunto con una anomalía cálida en el Pacífico central, fueron la manifestación temprana del episodio de El Niño 2015-2016. La pregunta natural entonces es si ¿acaso esta lengua de agua más cálida pudiera tener algo que ver en la precipitación sobre la zona hiperárida?. En general, el vapor de agua que precipita sobre Chile proviene desde los trópicos, cruzando por miles de kilómetros sobre el océano Pacífico que está frío la mayor parte del tiempo. La temperatura del océano es importante pues es una variable que determina en parte la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera. A mayor temperatura el contenido de agua atmosférico aumenta en una proporción exponencial. Intentando responder la pregunta de cuánto influyó la calidez anormal de las costas de Perú en la

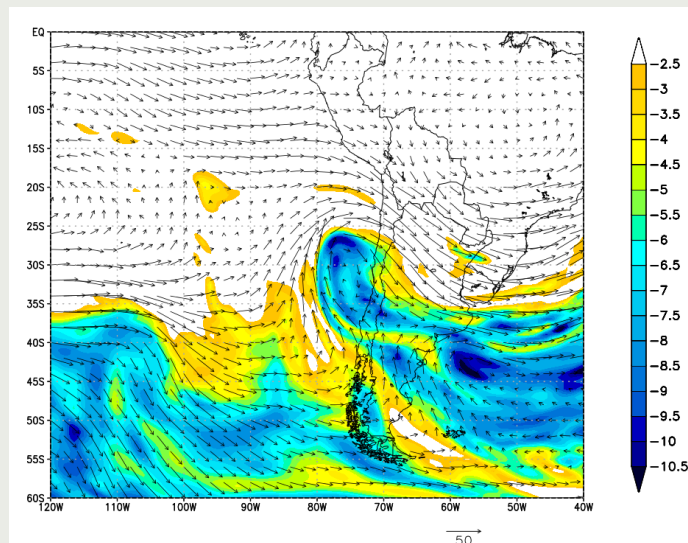


Figura 2: La figura ilustra los campos de viento y vorticidad potencial en una superficie isentrópica de 330 K. La vorticidad potencial es un trazador del flujo atmosférico. La figura ilustra el momento de la segregación del ciclón desde una vaguada profunda en el Atlántico el 25 de Marzo del 2015.

precipitación en la zona hiperárida, Bozkurt et al.(2016) diseñamos un experimento numérico mediante el cual, cambiando la temperatura en la zona frente a la costa de Perú en un modelo atmosférico pudimos comprobar primero, cómo en la simulación se redujo drásticamente la cantidad de vapor de agua transportado desde el Norte por la parte delantera de la baja segregada y seguidamente disminuyó la precipitación sobre el Desierto de Atacama, llegando en la zona hiperárida a desaparecer por completo. Es decir, bastó con restituir la temperatura a su valor climatológico, para que la lluvia no cayera sobre la zona hiperárida. Esta condición ocurrió principalmente por un cambio termodinámico, relacionado con la disponibilidad de vapor de agua, más que con un cambio dinámico, relacionado con una posible disminución del transporte desde el Noroeste.

Cabe hacer notar que además la tormenta ocurrió durante el periodo del año en que la temperatura superficial del mar es máxima, a finales del verano y principios del otoño del Hemisferio Sur. Es decir, además de la anomalía es necesario sumar dos elementos que intensificaron la severidad de la tormenta: en primer lugar el que la tormenta ocurriera a fines de Marzo con la máxima temperatura del año y por consiguiente con la máxima concentración de vapor de agua sobre el océano y en segundo término, al producirse con altas temperaturas, la línea de nieve se ubica entre los 4000 y 5000 metros durante la tormenta, lo que hizo que gran cantidad de precipitación cayera como lluvia y pasara rápidamente a los cauces de la región.

Para resumir, suele ser verdad que los elementos requeridos para producir un evento extremo como el ocurrido en Atacama, son múltiples, y todos deben apuntar en la misma dirección. En este caso, la disponibilidad de vapor de agua desde el Norte facilitó que la baja segregada organizara este vapor de agua en tormentas convectivas profundas que ocurrieron con inusual severidad sobre las pendientes de la cordillera occidental en las cuencas de los ríos Copiapó y especialmente El Salado. La baja segregada

generó la posibilidad de transportar el aire cálido y húmedo desde el norte y con la relativa inestabilidad en su parte delantera. Registros históricos y geológicos recopilados, hacen pensar que esta tormenta no tiene parangón al menos durante el Siglo XX. En el Siglo XIX llama la atención que las crónicas de Vicuña Mackenna (1877) indiquen el relato de una tormenta durante Julio de ese año: "lo que constituye la más notable peculiaridad del aguacero del 10 de Julio en Atacama, no es que lloviese en esas regiones cuando en el sur había escampado totalmente ... sino que su marcha fuera inversa , de norte a sur, como si el núcleo generador hubiese estado en el desierto en latitudes donde jamás llueve".

Durante el 2017 retornaron a la costa del Perú las condiciones anómalas de temperatura similares a las observadas durante 2015, aunque sin la presencia de las intensas anomalías del Pacífico Central. Los ojos estuvieron puestos durante Febrero y Marzo en la posibilidad de una baja segregada que lograra organizar este transporte y pudiera generar una prematura repetición del evento 2015. Afortunadamente para la región de Atacama, esta repetición no ocurrió. No existió una perturbación importante que pudiese organizar tormentas de la magnitud de la gran

tormenta de Atacama 2015, salvo por lo que ocurrió a fines de Febrero de 2017 cuando una circulación ciclónica débil, ubicada cerca de los 33°S logró transportar vapor de agua, en forma de una lengua pegada a la costa y de manera similar a Marzo de 2015. Este transporte consiguió elevar el contenido de agua precipitable por sobre los 40 mm (cerca del triple de su valor climatológico) a lo largo de la costa entre el Sur de Perú y hasta Santiago (a una latitud de 33°S). Una serie de tormentas cálidas durante el día 25 produjeron aluviones cuyo origen está todavía en disputa pues también parece haber un aporte de vapor de agua desde el Atlántico como es típico de las tormentas de Verano en los Andes subtropicales (Viale y Garreaud, 2014). Sin embargo, los altísimos valores de agua precipitable a lo largo de la costa y la simultaneidad de las tormentas en una extensa franja Andina hacen sospechar nuevamente que la mano del aporte de vapor de agua desde la costa de Perú estuvo presente, si no como la causa próxima al menos como un factor catalizador de la convección sobre los Andes en estos episodios que causaron la suspensión del suministro de agua para millones de personas en el Centro de Chile.

Referencias

Barrett, B. S.; Campos, D. A.; Vicencio Veloso, J. & Rondanelli, R. (2016) Extreme temperature and precipitation events in March 2015 in central and northern Chile. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.

Bozkurt, D.; Rondanelli, R.; Garreaud, R. & Arriagada, A. (2016) Impact of Warmer Eastern Tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama Floods. *Monthly Weather Review*, 144, 4441-4460.

Goubanova, K., Illi, S., Dewitte, B., Takahashi, K., (2015): Variaciones intraestacionales de la temperatura superficial del mar en la costa del Perú. *Bol. Técn. El Niño IGP*, 2 (9), 4-8.

Kron, W. (2016) Floods in the Atacama Desert (Munich Re) <https://www.munichre.com/topics-online/en/2016/topicsgeo2015/floods-in-the-atacama-desert>

Garreaud, R. D.; Molina, A. & Farias, M. (2010). Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier, 292, 39-50.

Kreft, Sö.; Eckstein, D. & Melchior, I. (2017) Global climate risk index: Who suffers most from extreme weather events Weather-related loss events in 2015 and 1996 to 2015, 2016 .

Middleton, N. (2003) *Going to Extremes Pan Books*, 129.

Rondanelli, R.; Molina, A. & Falvey, M. (2015) The Atacama Surface Solar Maximum *Bulletin of the American Meteorological Society, Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, 96, 405-418

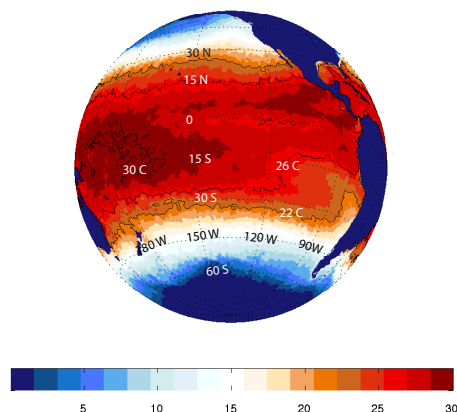
Rutllant, J. A.; Fuenzalida, H. & Aceituno, P. (2003) Climate dynamics along the arid northern coast of Chile: the 1997--1998 *Dinámica del Clima de la Región de Antofagasta (DICALIMA) experiment Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984--2012), 108

Viale, M. & Garreaud, R. (2014) Summer precipitation events over the western slope of the subtropical Andes *Monthly Weather Review*, 142, 1074-1092

Vicuña Mackenna, B. (1877) *El clima de Chile. Ensayo histórico* Buenos Aires, Francisco de Aguirre, 1977. 399P.

Wilcox, A.; Escarriaza, C.; Agredano, R.; Mignot, E.; Zuazo, V.; Otárola, S.; Castro, L.; Gironás, J.; Cienfuegos, R. & Mao, L. (2016) An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library.

(a) Temperatura superficial del Mar 23 Marzo, 2015



(b) Anomalía de TSM respecto de Marzo (1988-2011)

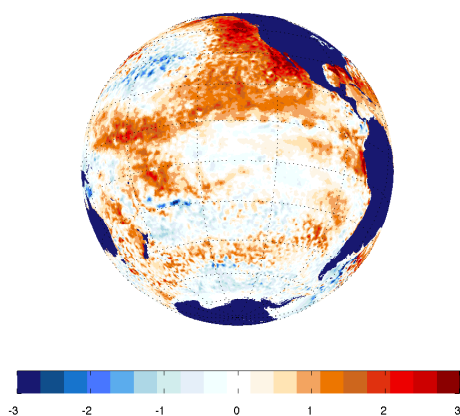


Figura 3 : (a) Distribución de la temperatura superficial del mar para el día 23 de Marzo de 2015 (datos infrarrojos, NOAA High Resolution Blended Analysis: Daily Values using AVHRR only). (b) Anomalías de Temperatura Superficial del Mar respecto de la climatología de Marzo (1988-2011) para Marzo 2015.