

**Caracterización meteorológica de la tormenta del 24 al 26 de marzo de 2015
en Atacama y Antofagasta
ROBERTO RONDANELLI**

Muchas gracias por la invitación a esta jornada. Si bien nosotros los meteorólogos no somos ingenieros, en general, muchos tenemos formación de ingeniero anterior, algunos tienen formación hidráulica. Me parece estamos emparentados de alguna forma, con la genealogía que mencionaron antes. Boussinesq, en particular, el “abuelo” de Don Pancho J, era también meteorólogo en su tiempo libre, y en meteorología estudiamos la aproximación de Boussinesq que se aplica a la atmósfera también.

Yo quería hablar un poco de lo que nosotros entendemos, el grupo de colegas que están ahí mencionado, lo entendemos de la física de este evento, de las características que tuvo, de su excepcionalidad, etcétera. Fue un evento que generó mucho interés en nuestra comunidad, en particular, en los que somos como un poco maniáticos del tiempo y de los eventos extremos, así que rápidamente se ensambló un grupo de gente que sin un proyecto de investigación ni siquiera, empezamos a mirar la tormenta y pronto también empezaron a llegar las solicitudes de investigación de parte de los organismos del estado y de consultoras que estaban estudiando este tema.

Así que tenía muchas motivaciones de mirar esta tormenta y lo que hemos estado haciendo, desde algunos días antes de que ocurriera. Este es un poco resumen de lo que sucedió: esta es la precipitación acumulada entre el 24 y 26 de marzo de 2015. Esta es la climatología de la precipitación en esta zona y como ustedes pueden apreciar, estamos en la zona hiperárida acá, hay precipitación relativamente notable en la cordillera, por supuesto, en el altiplano y también en el sur de Chile.

Pero la zona en cuestión es una zona donde caen a lo más 60 mm, 40 mm en los valles e incluso estamos en la zona hiperárida donde caen menos de 1 mm al año. Lo que sucedió en estos tres días de marzo fue que tuvimos en un evento precipitación que acumuló hasta 100 mm, especialmente en la zona de la cuenca del Río Salado. La estación de Quillagua, por ejemplo, que es una estación de la DGA y DMC es considerada como la estación más seca del mundo, en donde no hay un acuerdo pero aparentemente el valor está entre 0.05 mm y 0.5 mm por año y la precipitación que cayó en este lugar durante la tormenta fueron 4 mm, que es el equivalente a unos 20 o 80 años de precipitaciones en Quillagua.

Ahora, ¿por qué hay un pluviómetro en Quillagua? Probablemente ustedes lo sabrán mejor que yo, pero la cosa es que hay un pluviómetro en Quillagua y esto muestra la importancia de tener pluviómetros en zonas donde no llueve, que parece muy paradójico.

Este es un video motivacional sólo para que recordemos la magnitud del evento, un video que tomó alguien en la cuenca del Río Salado. Es en El Salado, y aquí pueden

ver casas, camiones... esto es morbo a esta altura un poco, pero es solo un recordatorio, así que voy a continuar con la física de la tormenta.

Sabemos que llovió en la zona hiperárida, incluso en los lugares donde no hay pluviómetros, porque resulta que es cierto que no tenemos radares superficiales, pero curiosamente, hay dos radares espaciales que tuvieron dos pasadas durante la tormenta y los radares espaciales muestran precipitación instantánea, en el momento de la pasada, en milímetros por hora. En el momento en que está el radar mirando en este en este caso corresponde a un poco después de que llovió en Cine Inca, Intelec, Rio Copiapó en Pastillo, la primera vez, el primer pulso de precipitación.

Si se fijan bien, en esta parte de la cuenca, hubo dos pulsos de precipitación uno el día 24 y un segundo puso mucho más duradero el día 25 con valores de precipitación máxima de aproximadamente 10 mm/h, y esos valores de precipitación medida por los pluviómetro son consistentes con los valores de precipitación que muestra también la imagen del radar, que es única, porque obviamente estos no radares existían antes y tampoco llueve en esta zona así que mirar esta imagen paga el hecho de que existan estos radares.

Ustedes pueden ver que se concentra la precipitación en esta nube convectiva, que es una nube convertida que curiosamente no tiene topes demasiado altos y sabemos eso también porque el radar no solamente tiene una imagen bidimensional sino también entrega información en la vertical, sobre la reflectividad de las gotas de lluvia en la nube.

Así que uno puede ver incluso donde se está produciendo la precipitación al interior de las nubes en el radar, y curiosamente hay una segunda imagen: este es el radar que se llama TRMM, el anterior era el GPM. El TRMM ya no está, el satélite terminó de operar a principios de abril del año 2015, es decir, pocos días después de la tormenta. Pero al final de su vida útil, alcanzó a tomar una imagen de la tormenta en otro momento, esto es en un momento posterior, está justo cerca del máximo de precipitación en la zona de Paranal y Taltal.

Ustedes pueden ver que en la zona costera de la región de Antofagasta se concentran también los ecos de radar, muy intensos, en la zona costera, con topes de nube también relativamente bajo. Eso tiene una consecuencia respecto a la estimación de la precipitación por parte del producto satelital: cuando uno ocupa productos satelitales que tiene su estimación de precipitación basada en los datos del tope de la nube, si las nubes son relativamente bajas, si son someras, hay una subestimación de la precipitación. En este caso, el radar muestra la precipitación real porque está midiendo la reflectividad.

A mí me gusta esta forma de mirar la tormenta, que una forma bastante meteorológica, el campo que les estoy mostrando acá, se llama la vorticidad potencial, pero la gracia la vorticidad potencial es que es un trazador conservativo, es como si uno echara una gota de fluido y mirara cómo ese fluido se dispersa en

la atmósfera. Aquí pueden ver gráficamente por qué éstas se llaman bajas segregadas: la idea de las bajas segregadas, es que baja se segrega de la fuente de alta vorticidad potencial o vorticidad potencial ciclónica, que se encuentra al sur, por lo general, cerca del polo.

Entonces ustedes pueden ver ahí que cada vez es “más cortito” lo que une la baja con su fuente de vorticidad polar, que está acá del otro lado, en Argentina, hasta que finalmente se suelta; y el día 25, por ejemplo, ahí está la baja segregada en todo su esplendor con su circulación ciclónica en torno al mínimo de vorticidad potencial. La circulación ciclónica recordemos que nos va a traer aire desde la zona ecuatorial en la parte delantera de la baja segregada y va a traer aire desde el sur de su la parte trasera. Noten también acá esta intrusión de aire relativamente desde latitudes bajas en la parte trasera de este anticiclón, que eso también va a ser relevante en un momento más.

Las condiciones de gran escala durante la tormenta, ¿cómo fueron? Si uno piensa simplemente la temperatura del océano, esta tiene una cierta inercia térmica. El máximo calentamiento oceánico debiera ocurrir en el verano, o más bien el máximo de radiación solar ocurre en diciembre, cerca del solsticio, pero el océano tiene una inercia, así que las temperaturas máximas del océano no ocurren en diciembre sino que ocurren más bien hacia finales de la estación de verano. Tienen que un desfase de unos dos mes más o menos.

Entonces sucede que al mismo tiempo que la temperatura era relativamente alta en esta zona, anómalamente alta, estamos cerca del máximo anual de temperatura, en una caja cercana enfrente a la costa peruana. Esta es la serie de temperatura superficial del mar desde junio del año 2014 hasta cerca de junio del año 2015. El máximo climatológico ocurre entre febrero y marzo del año 2015, y el máximo ocurrió justo durante el desarrollo de la tormenta y ocurrió también anómalamente alto con respecto a la climatología.

¿Por qué eso es importante? Porque la cantidad de vapor de agua que tiene la atmósfera disponible para producir precipitación, está muy ligada a la temperatura superficial del mar en las zonas tropicales al menos, así que una anomalía de temperatura superficial del mar, uno la podría ver también como una anomalía de la cantidad de vapor de agua sobre la superficie del océano. Y eso es lo que pasó acá: si ustedes se fijan, en el día 22 tenemos gran cantidad de vapor de agua y frente a la costa peruana, anómalamente alta cantidad de vapor de agua debido también al anómalamente alto valor de la temperatura superficial del mar.

En el momento en que la circulación de la baja segregada alcanza la zona en cuestión, entonces la baja segregada es capaz de transportar este vapor de agua desde la zona norte y alimenta al evento de precipitación. Entonces la primera pregunta que uno se plantea como meteorólogo, tratando de separar la física de este fenómeno es: ¿acaso el control este fenómeno es termodinámico o dinámico? ¿Qué quiere decir esto? ¿Es que en realidad el vapor de agua anómalamente alto fue el que produjo la tormenta o es que en realidad este era un evento extremo

dinámico en que la baja segregada era tan intensa que la velocidad vertical, etcétera, la profundidad de la baja fue la que explicó finalmente el evento? O ninguno de los dos, o un tercero.

La manera que tiene uno de hacer esto y éste un trabajo que ya se publicó, que lo lideró Ph.D. Deniz Bozkurt del CR2, es que uno puede cambiar las condiciones en un modelo y alterar la temperatura superficial del mar, frente a la costa de Perú. Es decir, esta anomalía de temperatura superficial del mar que se observó durante la fecha de la tormenta, uno la remueve y trata de ver la consecuencia en el modelo de remover esa temperatura superficial del mar. Lo que sucede es que en este mapa se muestra la cantidad agua precipitable que existe ahora en el modelo modificado a esta temperatura climatológica en donde uno removió la anomalía temperatura superficial del mar.

Aquí está el agua precipitable y acá está la diferencia de agua precipitable entre la simulación normal (la simulación de control, en donde uno hace cosas tal cual cómo ocurrieron) y la simulación en donde uno cambió de la temperatura superficial del mar. Hay una diferencia sustancial en la cantidad de vapor de agua que hay en esta zona de acá, que es como una lengua, donde efectivamente el agua se transportó. La conclusión de este estudio es que el aumento anómalo de la temperatura superficial del mar frente a la costa chileno peruana explica la precipitación en la zona hiperárida y explica también en parte alta precipitación que tuvimos en la zona del Río Salado.

Así que esa anomalía en la temperatura superficial del mar – que no explicamos de donde vino, por ahora - también sumado con que el momento del año en donde ocurre la tormenta es muy malo, porque es el momento donde hay mayor temperatura superficial del mar. Esas dos cosas sumadas explican la precipitación la zona hiperárida.

¿De dónde viene efectivamente la anomalía de presión o la baja segregada en cuestión? ¿Cómo es que se formó una baja segregada tan al norte de la zona en donde generalmente se forman? Lo que vemos acá es el campo de radiación de onda larga emergente, en colores, mientras que en contorno está la altura geopotencial. Ahora estas son cosas que entienden los meteorólogos, pero la altura geopotencial es básicamente la altura una superficie en la atmósfera: uno puede ver estas anomalías de geopotencial como ondas que se propagan en la atmósfera.

Lo que sucede es que existe - y es bien sabido – un mecanismo de teleconexión, en donde anomalías de la convección o del calentamiento en la atmósfera tropical, se transportan como ondas de gran escala hacia las latitudes polares, ondas alternantes de alta, baja, alta y baja presión. Es un mecanismo que está más o menos que claro que ocurre en los modelos desde los años 80 y que fue estudiado para Chile también y para Sudamérica; y que general controla mucho los patrones de teleconexión que nosotros vemos durante la época del niño.

Recuerdan que este año 2015, un año del niño, en donde la temperatura superficial del mar en la zona del niño 3-4 era anómalamente alta también. Esta es una imagen un poco antigua, del paper original probablemente, de Horel y Wallace (1981), en donde se muestra que, dado un calentamiento tropical acá, se produce una serie de ciclones y anticiclones que propagan hacia el polo.

Esta imagen es de un poco antes de la tormenta, en donde se puede ver claramente a ojos descubiertos, sin hacer un promedio, ni climatología, ni estadística, se puede la teleconexión. Yo me convencí rápido de que ese era el mecanismo y me costó me costó un poco más convencer a René [Garreaud], pero en esta figura se muestra efectivamente como se propaga la onda y se puede ver el peak, y si uno sigue el peak uno obtiene aproximadamente la velocidad de grupo de la onda de Rossby, que es la onda teórica que se propaga del trópico hacia el polo y esa velocidad de grupo coincide con la velocidad de grupo teórica de acuerdo a la escala de las cosas que estamos mirando (la magnitud el calentamiento).

No sólo eso, la propagación de la onda coincide con la máxima amplitud jamás registrada de una onda tropical que se llama la oscilación de Madden-Julian, que es onda estacional que tiene un periodo de 60 días, que también es una onda que produce, según la literatura y estudios de Rutllant y colegas, produce también efectos de la precipitación en Chile central. Esta fue la amplitud de la oscilación de Madden-Julian que se ha registrado desde que se registra la amplitud (1974).

Tenemos la pistola. Sabemos que una pistola de alto calibre y tenemos también el cuerpo del delito, tenemos también evidencia de que este anticiclón es el más grande en el registro como anomalía de altura geopotencial en el sur.

¿Qué tiene que ver eso con la baja segregada? Bueno, una vez que uno tiene un anticiclón acá una alta de bloqueo, ella es capaz de advectar vorticidad potencial negativa de la fuente. Se observa en este trabajo de Renwick and Revell (1999) que también después de cierto tiempo se obtiene una anomalía negativa de geopotencial sobre Chile norte central.

Parece muy claro que la baja segregada también es producto de este reforzamiento de este patrón de teleconexión y que finalmente la dinámica de la onda tiene que ver con un gatillante tropical muy, muy lejano. En un párrafo del paper de Rutllant y Fuenzalida (1991) se reconoce este mecanismo como uno que probablemente ayuda durante eventos sinópticos de precipitaciones en Chile central.

En la amplitud de Madden-Julian, es el máximo alguna vez registrado en amplitud y acá hay un histograma de la anomalía de altura geopotencial y lo que sucede es que el día 24 de marzo (es decir, un día antes de la tormenta), está la anomalía más alta alguna vez registrada y excede incluso el percentil el 0.01, para todos los días del registro de radiosonda en la estación de Punta Arenas.

Finalmente este evento también tiene su correlato como un evento de máxima temperatura en la antártica, relacionado también con la circulación del anticiclón de

bloqueo. Fue la temperatura más alta registrada por ejemplo en la historia de base Arturo Prat desde 1957.

Otro aspectos que no quisiera dejar de mencionar (y con esto termino) es que la baja segregada también fue una baja anómalamente cálida en altura, entonces como promedio de bajas segregadas que ocurren en este sector, esta es el perfil de baja segregada promedio y durante todos los días de la tormenta la baja segregada estuvo unos 4° o 5° más alto que el promedio. Así que también la cantidad, el tamaño efectivo de la cuenca que recibió precipitación del tipo agua líquida, fue mucho mayor que lo que ocurre normalmente con este tipo de precipitación.

En el histograma acumulativo del flujo de vapor de agua, también es el máximo que se ha registrado en este caso calculándolo con el radiosondeo de Antofagasta, es decir, la cantidad de vapor de agua que se transporta en la columna fue la más alta que se registrado alguna vez.

Aquí hay una especie de diagrama de latitud de la altura de la isoterma y en general ustedes pueden ver que durante el día la isoterma estuvo muy alta, pero en los días que efectivamente cayó precipitación no bajó del 4000 m, sobretodo en esa zona acá entre los 26° S, 25°S, que es en la cuenca del Río Salado efectivamente.

Quiero terminar con un párrafo del libro del “Clima de Chile” de Vicuña Mackenna en donde dice lo siguiente, al hablar de un temporal de julio de 1877: “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, ni que durase más de doce horas cada uno sus aguaceros, sino que su marcha fuera inversa, de norte a sur, como si su núcleo generador hubiese estado en el desierto, es decir, en latitudes donde jamás llueve”. Esta descripción de Vicuña Mackenna , más esta carta del ministro del interior le da uno a sospechar de que el evento de julio de 1877 fue también una baja segregada, y por la magnitud del evento es probablemente el evento más fuerte anterior al evento del 2015 en esa zona. Según los colegas geólogos, este no fue tan fuerte como el del 2015.

Preguntas

¿Con respecto a la precipitación, cuánto fue el periodo de retorno?

Esa una buena pregunta pero yo no sabría responderla completamente. Cuando uno mira una estación en particular, ocurre que lluevan 50 mm o 60 mm por día en Copiapó y eso ocurre con cierta frecuencia, y el periodo retorno de esa precipitación puede ser tres o cuatro años. ¿Pero es justo decir que el periodo retorno de la tormenta son tres o cuatro años cuando no solamente llovió 40 mm en Copiapó sino que también llovieron 100 mm al interior de Chañaral, 40 mm en Chañaral, 60 mm en Taltal?

Creo que lo que se necesita más bien es una definición metodológica del periodo de retorno una tormenta completa y respecto de eso, en el registro de los pluviómetros desde el año 40, no hay ninguna tormenta en donde lloviera en tantas

estaciones al mismo tiempo, en tres días, por ejemplo. Si esa es una medida del periodo de retorno no lo sé, pero también tenemos hasta esta medida anecdótica como por ejemplo, que aparentemente la línea de ferrocarril entre Chañaral y el Salvador nunca se había destruido en su totalidad, había tenido daños parciales pero no sabía estudio en su totalidad como ocurrió efectivamente marzo de 2015. Esa línea de ferrocarril es la segunda más antigua del país, data del año 1880 aparentemente, así que en ese periodo de tiempo tampoco hubo una crecida tan fuerte como la que hubo en marzo, y por lo tanto esta medición de tiempo de retorno basado en una sola estación resulta media engañosa.

¿Cuál es tu conclusión o tu intuición, si este tipo de evento, en donde tantas variables extremas se mezclan, tanto precipitación como temperatura y otras, puede repetirse con mayor frecuencia de lo histórico en el futuro dado el contexto del cambio climático? ¿Hay algún indicio al respecto?

Yo me declaro bastante ignorante respecto de esa pregunta. Lo único que podría contestar de manera razonable son dos cosas: una es que la frecuencia de la baja segregada aparentemente ha aumentado y de eso tenemos evidencia en papers del 2005, pero también tenemos una tesis de un alumno de magister año que vuelve a documentar la misma tendencia de aumento continuada desde fines de los 90 más o menos hasta ahora.

Eso por un lado en la tendencia de la baja segregada y por otro lado el aumento de la temperatura superficial del mar por efecto del cambio climático, ese es el detonante termodinámico así que ese también está aumentando. Y hasta ahí nomás podríamos llegar.