

## RESUMEN

Mientras escribo estas líneas, parte de Europa Central se encuentra sumida en una serie de intensas lluvias que, en menos de dos días, han provocado el desbordamiento de los ríos, causando inundaciones y dañando infraestructuras, propiedades y ocasionando numerosas víctimas. El número de estos eventos extremos, además de suponer un gran impacto en pérdidas económicas y humanas han venido incrementándose desde hace décadas, ¿Cómo está sucediendo esto? y ¿Cuál es la relación que guardan estas precipitaciones extremas y el incremento de las temperaturas como consecuencia del cambio climático?

Para abordar estas preguntas, considere la siguiente versión simplificada de un evento de lluvia convectiva. Imaginemos una columna de aire, parte de la atmósfera, con una nube en su interior; Cerca de la superficie, el aire fluye hacia la columna y comienza a ascender verticalmente. Mientras gana altura, el aire se enfría, hasta que, a cierto nivel el vapor de agua contenido se condensa en forma de pequeñas gotas de agua. A partir de este nivel, la base de la nube, la masa de aire continua ascendiendo mientras la cantidad de agua condensada sigue aumentando, de modo que las pequeñas gotas de agua van aumentando de tamaño. Finalmente, cuando crezcan lo suficiente, se producirán precipitaciones y, en el caso más extremo, el agua acumulada en la nube alcanzará la superficie en forma de lluvia. Siguiendo este modelo conceptual, una forma de aumentar la cantidad de precipitación sería aumentando el contenido de humedad del aire que entra en la nube.

En este caso, la relación Clausius-Clapeyron (CC) juega un papel importante, debido a que, describe la capacidad de retención del agua en el aire con respecto a su temperatura. Si la humedad relativa se mantiene climatológicamente estable con el calentamiento global, entonces la cantidad de humedad contenida en la atmósfera aumentará a una tasa de alrededor el 7% por cada grado que incremente la temperatura. En efecto, se encontró que, a nivel global, las cantidades extremas de precipitación diaria están limitadas por esta tasa de cambio. Sin embargo, a nivel local estas precipitaciones extremas, basadas en escalas de tiempo por hora y sub-hora, parecen mostrar tasas más altas que las dictadas por la relación Clausius-Clapeyron. Este fenómeno es denominado comúnmente como “super CC-scaling”. Para explicar este comportamiento, una teoría común sugiere que si la cantidad de humedad aumenta, la cantidad de energía liberada a través de la condensación en una corriente ascendente convectiva se intensificará. Esto dará lugar a corrientes ascendentes más fuertes y, en última instancia, a una convergencia de humedad más fuerte en la columna de la nube.

A pesar de que las estaciones de observación de precipitaciones extremas, en intervalos breves de tiempo, pueden mostrar el fenómeno super CC-scaling, el proceso exacto detrás de este fenómeno aún se desconoce. Además de esto, no está del todo claro cómo las características de los eventos convectivos individuales, como el tamaño y la intensidad de la precipitación, responderán a una atmósfera más cálida y húmeda. En

esta tesis hemos utilizado los datos del radar de lluvia abarcando los Países Bajos a completo y aislando los eventos convectivos individuales con un algoritmo de seguimiento. Posteriormente, investigamos las estadísticas en tamaño e intensidad de los eventos de lluvia en el momento que alcanzan su intensidad máxima. Los resultados de este análisis muestran que la extensión espacial y la intensidad de los eventos convectivos extremos están estrechamente relacionadas. Ambas características aumentan conjuntamente, lo que significa que los eventos de lluvia más fuertes son generalmente más grandes. En condiciones más cálidas y húmedas, el tamaño de los eventos aumenta rápidamente a temperaturas del punto de rocío por encima de los 15 grados centígrados; El fenómeno super CC-scaling se encuentra al incluir todos los eventos en el análisis. Sin embargo, los eventos más grandes son cruciales para mantener este fenómeno a temperaturas más altas. De esta forma, aparecen tasas de precipitación mejoradas en toda el área del evento.

Para estudiar más a fondo la dinámica de los extremos de precipitación convectiva en un entorno controlado, hemos utilizado el modelo LES (large eddy simulation). Este modelo puede ejecutarse a una resolución lo suficientemente alta para resolver los procesos que son necesarios para desarrollar la formación de tormentas eléctricas a pequeña escala. Además, es posible tener en cuenta las influencias que dependen del tiempo en el dominio de la simulación, como un perfil de viento a gran escala y la convergencia. Aquí, aplicamos una configuración de caso idealizada, pero realista, que es representativa de las fuertes lluvias torrenciales que suceden en los Países Bajos; Simulamos el caso base, así como una serie de experimentos con cambios de temperatura y humedad siguiendo el supuesto de humedad relativa constante. Para estudiar las características de los eventos de lluvia, agrupamos áreas continuas con precipitación en células de lluvia. En base a lo anterior, podemos confirmar la relación entre el tamaño y la intensidad de las células de lluvia. En simulaciones más cálidas y húmedas, las células de lluvia crecen, volviéndose más intensas en toda su área; El número de grandes eventos aumenta a costa de eventos más pequeños; Estos resultados dibujan una imagen consistente, junto con el estudio basado en las observaciones mencionadas anteriormente.

Hasta ahora, hemos considerado los eventos de precipitación como entidades bastante aisladas entre sí. Sin embargo, otro factor que puede influir en la magnitud de estos eventos, sería el proceso de organización convectiva. Por ejemplo, compare una celda convectiva aislada con un sistema convectivo de mesoescala que puede verse como un grupo de múltiples tormentas eléctricas. Este último puede mostrarse como una forma más organizada de un evento de precipitación convectiva. En este caso, la extensión horizontal de los dos tipos, difiere alrededor de un factor de diez. Las dinámicas locales inducidas por el fenómeno denominado "cold pools" juegan un papel clave en la formación de eventos más organizados. Estos eventos (cold pools) se originan por la evaporación de las gotas de lluvia en la atmósfera, lo que provoca un enfriamiento de las masas de aire que, intensifica la fuerza de la corriente descendente debido a su densidad relativamente más alta; En la superficie, la corriente descendente se extenderá horizontalmente a decenas de kilómetros de distancia. Este efecto es tangible, por ejemplo, al observar una tormenta eléctrica cercana. La masa de aire en movimiento, relativamente densa, disloca verticalmente el aire circundante y puede desencadenar la formación de nuevas nubes convectivas; El efecto es aún más fuerte cuando dos o más de los fe-

nómenos mencionados anteriormente chocan entre sí. Además, las denominadas cold pools transportan y acumulan humedad a regiones confinadas, que representan el lugar idóneo para el desarrollo de nuevos eventos convectivos.

Además del efecto de este fenómeno (cold pools) en la formación y organización de los eventos de lluvia convectiva, poco se sabe acerca de cómo estos procesos cambian en un clima más cálido. Cómo responde la dinámica de este fenómeno en estas condiciones y cómo esto se relaciona con las características de la precipitación se considera aún, una pregunta abierta. Para profundizar en esto, usamos una configuración del modelo LES similar a la del caso mencionado anteriormente; También repetimos los experimentos con un ambiente más cálido y húmedo. De manera similar al método mencionado anteriormente sobre el agrupamiento de células de lluvia, aplicamos la misma técnica a campos de temperatura y humedad de bajo nivel para identificar las denominadas cold pools y áreas relativamente húmedas, los denominados parches de humedad (“moist patches”).

Hemos visto que el aumento del tamaño e intensidad de las células de lluvia en condiciones más cálidas y húmedas tienen una fuerte correlación con el tamaño y la velocidad de propagación de las cold pools. Esto, a su vez, se relaciona bien con el tamaño y la cantidad de humedad contenida en los anteriormente denominados parches de humedad. Estas correlaciones sugieren un ciclo de retroalimentación, en el que este fenómeno (cold pools) que se originan en eventos de lluvia débiles y distribuidos inicialmente de manera bastante aleatoria, causan una mayor variabilidad en el campo de humedad de bajo nivel, desencadenando eventos que se encuentran más organizados y de mayor intensidad. Por lo tanto, la dinámica del fenómeno cold pools puede mejorar la disponibilidad de humedad local y el suministro a los eventos de lluvia de nueva formación sin una convergencia adicional a gran escala. De un grupo separado de experimentos, deducimos que la convergencia mejorada a gran escala por sí sola solo afecta el área de la celda de lluvia, pero no la intensidad.

Sin embargo, ¿se mantienen estos hallazgos en un escenario más realista de calentamiento climático? Por ejemplo, se sabe que la humedad relativa disminuirá debido al calentamiento climático en muchas regiones terrestres; Además, se espera que la atmósfera no se caliente uniformemente con la altura. Debido a la convección, el perfil de temperatura seguirá un cambio cercano a una tasa de caída adiabática húmeda, lo que conducirá a una atmósfera más estable. El diseño de nuestro experimento aplica estos principios y se crean grupos de simulación separados para ambas situaciones. Encontramos que una humedad relativa reducida con el aumento de la temperatura, generalmente amplifica aún más los eventos de precipitación, la dinámica de las denominadas cold pools y los parches de humedad. Esto resalta la humedad relativa, además de intensificar la precipitación, como otro factor que controla la tasa de evaporación de las gotas de lluvia y, en última instancia, la fuerza de las cold pools. A pesar de este efecto de amortiguación, las condiciones más estables con un aumento de la temperatura aún conducen a eventos de lluvia más intensos y más grandes que se asocian con una dinámica más intensa de los denominados cold pools y parches húmedos.

Finalmente, los resultados presentados en esta tesis muestran que los eventos de precipitación convectiva extrema exhiben una fuerte respuesta al calentamiento climático y resaltan la importancia de la dinámica a pequeña escala en este contexto. Esto

debe tenerse en cuenta para predecir mejor los futuros eventos extremos.