

# Predictibilidad del clima en la estratosfera

por Alexey Karpechko<sup>1</sup>, Fiona Tummon<sup>2</sup> y la Secretaría de la OMM<sup>3</sup>

Con el fin de predecir con precisión la evolución día a día de los sistemas meteorológicos, se necesita una descripción detallada del estado inicial de la atmósfera. Por lo tanto, se requiere contar con una buena evaluación de las condiciones atmosféricas reales. La predictibilidad de la atmósfera, asociada a su estado inicial, se encuentra, sin embargo, limitada a aproximadamente 10 días. Más allá de este límite solo se pueden predecir las propiedades estadísticas de las condiciones atmosféricas. De estas, el estado medio de la atmósfera en un cierto período de tiempo y la probabilidad de ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos son quizás las más relevantes para la sociedad.

Esta predictibilidad es posible debido a que el estado de la atmósfera es sensible a otros componentes del sistema climático que varían en escalas de tiempo más lentas que el tiempo atmosférico y que, por lo tanto, condicionan la evolución de la atmósfera hacia un estado preferido. Estos componentes incluyen, por ejemplo, la temperatura de la superficie del mar, la humedad del suelo, la cobertura de nieve y la extensión del hielo marino.

Los sistemas meteorológicos se encuentran y se desarrollan en la troposfera (la capa inferior de la atmósfera). Por encima de esta capa se halla la estratosfera, que, como su nombre indica, es altamente estratificada, estable y seca. No está directamente implicada en el desarrollo diario del tiempo meteorológico. Sin embargo, las condiciones estratosféricas imponen restricciones sobre la variabilidad del tiempo y del clima, y, por lo tanto, se puede extender la

predictibilidad más allá del límite de 10 días, de la misma manera que para la temperatura de la superficie del mar o para la capa de hielo. El papel que desempeña la estratosfera en el sistema climático global constituye uno de los focos de investigación que coordina el SPARC (Procesos estratosféricos-troposféricos y su función en el clima), un proyecto básico del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC).

Fundado en 1992, el proyecto SPARC ha coordinado durante más de dos décadas actividades de investigación de alto nivel relacionadas con la comprensión de los procesos del sistema Tierra. SPARC promueve y facilita actividades internacionales de investigación de vanguardia sobre la forma en que los procesos químicos y físicos de la atmósfera interactúan con el clima y el cambio climático y, en particular, lidera la organización de una variedad de proyectos centrados en muchas cuestiones relacionadas con la predictibilidad atmosférica. Los recientes avances en la investigación sobre el sistema acoplado estratosfera-troposfera inspiraron la redacción de este breve resumen acerca de cómo y cuándo la estratosfera ofrece predictibilidad climática, que debería ser de interés para un público más amplio preocupado por la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático.

## La estratosfera y sus efectos sobre la corriente en chorro

En latitudes medias, la estratosfera se encuentra en altitudes de entre 10 y 50 km aproximadamente por encima de la superficie terrestre. En los trópicos, la estratosfera comienza un poco más alto, a una altitud de unos 18 km. La característica dominante de la

<sup>1</sup> Instituto Meteorológico Finlandés

<sup>2</sup> Oficina Internacional de Proyectos para SPARC

<sup>3</sup> Boram Lee, funcionario científico principal, Programa Mundial de Investigaciones Climáticas

estratosfera en invierno es un vórtice circumpolar frío rodeado de fuertes vientos del oeste que forman un chorro polar nocturno. La fuerza de este chorro es variable; a veces se caracteriza por vientos excepcionalmente fuertes, mientras que en otras ocasiones es anormalmente débil. Cuando el chorro polar nocturno se debilita, los vientos del oeste pueden a veces revertirse en forma de vientos del este. Durante estos períodos, el vórtice polar se calienta varias decenas de grados y puede alejarse del polo, llegando incluso a dividirse en trozos más pequeños. Estos períodos se denominan calentamientos estratosféricos súbitos. Durante el verano, predominan los vientos del este y la temporada es dinámicamente estable, con escasa variabilidad, excepto los lentos cambios estacionales.

Las condiciones anómalas en los patrones de circulación estratosférica pueden afectar a todo el espesor de la atmósfera hasta la superficie terrestre. Las características troposféricas fundamentales que son sensibles a la fuerza del chorro polar nocturno estratosférico son la posición media del chorro troposférico del oeste (la llamada "corriente en chorro" o "*jet stream*") y las trayectorias de los temporales que se propagan a lo largo de este chorro.

Cuando el chorro polar nocturno estratosférico es anormalmente débil, las trayectorias de los temporales se desplazan hacia el ecuador. Esto permite las intrusiones de masas de aire árticas y continentales frías en zonas con un clima más templado. En el hemisferio norte, este tipo de invasiones de aire frío por lo general se produce en el norte de Europa y en el este de Estados Unidos de América. En el caso contrario, cuando el chorro polar nocturno es anormalmente fuerte, las trayectorias de los temporales se mueven hacia los polos y transportan temperaturas suaves y aire húmedo hacia el norte de Eurasia. Una vez que la estratosfera en invierno se desplaza hacia condiciones anómalas, puede tardar varias semanas antes de regresar a la normalidad. Esta persistencia de las anomalías estratosféricas ayuda a mantener la circulación troposférica y el clima de superficie en estados anómalos y, por lo tanto, contribuye a mejorar la predictibilidad.

Por lo tanto, cuando la estratosfera en invierno se encuentra en un estado anómalo, las condiciones climáticas de latitudes medias se hacen más predecibles.

En los casos extremos, como los calentamientos estratosféricos súbitos, son posibles predicciones precisas de temperaturas medias y de probabilidad de intrusiones de aire frío para alcances de hasta dos meses. Se pueden hacer predicciones extendidas ya sea mediante sistemas dinámicos inicializados o incluso utilizando métodos estadísticos. Pero, ¿cuál es la causa de estas anomalías estratosféricas?, y, ¿las podemos predecir una estación, o incluso, un año antes?

El principal mecanismo que produce anomalías en la circulación estratosférica es la acción sobre el estado medio de la estratosfera de los grandes remolinos atmosféricos generados por la topografía y por la heterogeneidad térmica en la superficie terrestre. Estos remolinos pueden propagarse hacia arriba hasta la estratosfera en forma de ondas de escala planetaria solo cuando los vientos estratosféricos son del oeste. Esta es la razón por la que las condiciones estratosféricas son variables durante el invierno, pero no durante el verano, cuando los vientos son del este. Una amplificación o atenuación de la magnitud de las ondas planetarias climatológicas, que están siempre presentes en la troposfera, conduce respectivamente a un debilitamiento o fortalecimiento del chorro polar nocturno.

Los factores que controlan la generación y propagación de las ondas planetarias son numerosos, lo que hace que la predicción exacta de la evolución de la estratosfera dependa en gran medida de las condiciones iniciales, tal como ocurre en la troposfera. Por lo tanto, la predictibilidad de las condiciones estratosféricas anómalas está, en la mayoría de los casos, limitada a aproximadamente 10 días, que es lo mismo que para los sistemas meteorológicos. Sin embargo, puede ser posible predecir la probabilidad de ocurrencia de eventos estratosféricos extremos antes del comienzo del invierno.

## Ondas planetarias

Algunos de los factores que influyen en la generación y propagación de las ondas planetarias son predecibles con mucha anticipación. Por ejemplo, la variabilidad de las temperaturas de la superficie del mar afecta a la generación de las ondas planetarias en la troposfera. El fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) en



*Ilustración esquemática del acoplamiento entre la estratosfera y la troposfera en invierno.*

*(Izquierda) El flujo anómalo de la onda planetaria se propaga hacia arriba y calienta el vórtice polar estratosférico. (Centro) Las condiciones estratosféricas cálidas influyen en la posición de la corriente en chorro en la troposfera y (derecha) producen anomalías en el tiempo meteorológico en superficie en diferentes partes del hemisferio norte.*

el Pacífico tropical es tal vez el patrón más notable de la variabilidad de la temperatura superficial del mar. Durante la fase cálida del ENOS, denominada El Niño, el flujo de la onda planetaria en la estratosfera del hemisferio norte durante el invierno se ve generalmente realzado y, por tanto, también aumenta la probabilidad de ocurrencia de calentamientos estratosféricos súbitos. Como la fase de ENOS es predecible con varios meses de antelación, hay oportunidad de predecir con acierto las anomalías de los vórtices estratosféricos y, en consecuencia, el clima de la superficie.

Puede que el ENOS sea el controlador superficial más notable de la variabilidad a gran escala de las ondas planetarias en escalas de tiempo estacionales, pero no es el único. Determinados estudios sugieren que otros modos de variabilidad de la temperatura de la superficie del mar, como la Oscilación Multidecenal Atlántica o la Oscilación decenal del Pacífico, así como anomalías en la extensión del hielo marino ártico durante el otoño, también pueden influir en la intensidad del vórtice polar. Sobre los continentes, la cubierta de nieve también crea contrastes térmicos a gran escala y, por lo tanto, contribuye a la generación de ondas planetarias y, potencialmente, a perturbar el chorro polar nocturno.

### El ciclo solar y los grandes volcanes

La periodicidad de 11 años en la actividad solar abre la posibilidad de las predicciones climáticas aún a más largo plazo. Los estudios sugieren que durante los inviernos con alta actividad solar, el chorro polar nocturno tiende a ser más fuerte, mientras que las temperaturas en las proximidades de la superficie en latitudes medias septentrionales son más suaves. Lo contrario ocurre en años con baja actividad solar. Esto

se produce debido a un calentamiento diferencial de la estratosfera por la absorción de la radiación solar ultravioleta por parte del ozono, lo que crea gradientes de temperatura del ecuador al polo y afecta a la propagación de las ondas planetarias y su interacción con el chorro polar nocturno. Este proceso parece ser el ingrediente básico del mecanismo que controla la modulación del ciclo solar del clima.

Las inyecciones de aerosoles en la estratosfera tropical por las grandes erupciones volcánicas pueden también crear fuertes gradientes de temperatura meridional, reforzando así el chorro polar nocturno y dando lugar a inviernos suaves en el norte de Eurasia, aunque tales acontecimientos masivos son raros.

### Los trópicos y los polos

Otro factor importante que afecta a la propagación de las ondas planetarias en la estratosfera es la dirección de los vientos estratosféricos sobre el ecuador. En la estratosfera ecuatorial, los vientos van alternando entre el oeste y el este en un período de aproximadamente 28 meses, fenómeno conocido como la oscilación cuasibienal (QBO). El chorro polar nocturno se debilita durante la fase de vientos del este de la QBO y se refuerza durante la fase de vientos del oeste. La modulación del chorro polar nocturno por la QBO afecta también a la posición del chorro troposférico y, por lo tanto, al clima de la superficie. Los modelos climáticos actuales pueden predecir con precisión la fase de la QBO hasta con dos años de antelación, hecho que mejora la predictibilidad del clima de la superficie en ciertas regiones.

No son solo los fenómenos de origen natural los que hacen que la estratosfera contribuya a la predictibilidad



*El transbordador espacial Endeavour en órbita a más de 200 millas de altitud y extendiéndose sobre la estratosfera y la mesosfera. La capa de color naranja es la troposfera, donde se genera y está contenido todo el tiempo meteorológico y las nubes que normalmente vemos y experimentamos. Esta capa de color naranja da paso a la estratosfera blanquecina y luego a la mesosfera. (Fuente: NASA/STS-130 Shuttle Mission).*

del clima. El agujero de ozono antártico, causado por la reducción del ozono debido a sustancias químicas en su mayoría de origen antrópico, ha cambiado drásticamente el clima del hemisferio sur durante las últimas décadas. Estos cambios incluyen, por ejemplo, el enfriamiento del continente antártico, el calentamiento de la península antártica, un desplazamiento hacia los polos de las trayectorias de los temporales, el reforzamiento de la corriente circumpolar del océano Antártico e, incluso, un desplazamiento hacia los polos de la precipitación subtropical. A medida que la concentración de las sustancias que merman el ozono está disminuyendo como resultado de la prohibición internacional de su producción (Protocolo de Montreal), cabe esperar que muchos de estos cambios se reviertan alrededor de la mitad del siglo XXI. Esto puede tanto mitigar como reforzar los cambios que se producen debido a los aumentos en las concentraciones de gases de efecto invernadero.

### Un sistema complejo

Aunque la estratosfera constituye solo una pequeña fracción de la masa atmosférica, es un componente clave de la predictibilidad del clima más allá de la escala de tiempo de unos pocos días. Algunos factores climáticos, como la QBO, el ciclo solar o los cambios en el ozono estratosférico, interactúan con el clima directamente en la estratosfera. Otros, como el ENOS, afectan directamente al clima en la troposfera, aunque también tienen implicaciones estratosféricas, ampliando así su impacto e influencia sobre el clima en regiones lejanas a través de teleconexiones, y mejorando la predictibilidad. La precisión de las predicciones a largo plazo del clima en superficie derivada de la predictibilidad de la estratosfera es ciertamente modesta en la mayoría de los casos, pero incluso

este nivel de precisión es útil para muchos usuarios finales y aplicaciones. Un ejemplo radica en el uso de las predicciones estacionales del hielo marino para guiar el transporte en el mar Báltico.

### El futuro

¿Qué caminos seguiremos para sacar más provecho de la predictibilidad de la estratosfera? Todavía quedan muchas preguntas por responder y muchos problemas por resolver. Una mejor comprensión y representación en los modelos climáticos de los factores que contribuyen a la generación de ondas planetarias y su interacción con la circulación estratosférica es básico para mejorar la predictibilidad del clima en escalas de tiempo desde semanas a meses.

Resolver algunos de estos problemas requiere elevar el nivel superior de los modelos utilizados para la predicción del clima por encima de la estratosfera y permitir la generación interna de la QBO en los modelos. Varios centros de modelización del clima en todo el mundo ya han incorporado estos cambios en sus modelos operativos de pronóstico. Por otra parte, incorporar mejor las señales del ciclo solar y la variabilidad del ozono estratosférico puede requerir también una representación explícita de las interacciones entre la química y el clima en los modelos. Esto tiene el potencial de mejorar la predictibilidad en escalas de tiempo de una estación e incluso más.

La colaboración internacional entre grupos de investigación y centros de modelización del clima es de suma importancia para resolver problemas científicos y de modelos, mejorando así las predicciones climáticas.

***Las referencias están disponibles en la versión en línea***