

Modelización del sistema Tierra a escala kilométrica: nuevo paradigma para la predicción climática

por Andrew Gettelman¹, Bayler Fox-Kemper², Gregory Flato³, Daniel Klocke⁴, Detlef Stamer⁵, Bjorn Stevens⁴ y Pier Luigi Vidale⁶

La modelización del clima global ha avanzado mucho en los últimos 50 años. Los modelos simples de equilibrio de energía evolucionaron a los modelos de circulación general de baja resolución y estos a su vez a los modelos del sistema Tierra acoplados que tenemos hoy en día. Estos últimos incluyen muchas esferas como la atmósfera, el océano o la criosfera, así como la química y la biología del ciclo de carbono y la hidrología del ciclo del agua y pueden proyectar en líneas generales el clima del futuro. Sin embargo, los impactos más costosos del cambio climático se manifestarán mediante extremos locales y regionales como los debidos a la meteorología extrema, con sequías plurianuales e inundaciones por elevación del nivel del mar combinadas con mareas de tempestad, que estos modelos no pueden proyectar. Pero la adaptación al cambio requiere información local sobre estas amenazas. Esos imperativos impulsan un nuevo tipo de modelo local y regional del sistema Tierra. Estos modelos de escala kilométrica tienen escalas horizontales inferiores a 10 kilómetros (< 10 km). Los avances en computación abren la posibilidad de realizar simulaciones globales a escala kilométrica con un horizonte secular en los próximos cinco años, pero hay varios retos por delante.

Conceptualmente, los modelos climáticos y los modelos de predicción numérica del tiempo (PNT) son similares: a menudo comparten un núcleo dinámico y parametrizaciones críticas como la radiación y la turbulencia. La complejidad y la fidelidad de la representación de los procesos físicos en los modelos climáticos son similares o superiores a las de los modelos de PNT. Muchos centros globales, como la [Oficina Meteorológica del Reino Unido](#) (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte), el [Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio](#) (ECMWF) o el [Servicio Meteorológico de Alemania](#), tienen modelos unificados que pueden simular el tiempo o el clima usando asimilación de datos en el contexto de la predicción meteorológica. Sin embargo, las escalas de tiempo más largas

que son de interés en la modelización climática demandan una circulación oceánica activa, una biosfera terrestre en evolución, una hidrosfera, una criosfera y balances equilibrados de carbono y energía global. Estos componentes son necesarios para simular cómo cambiarán la humedad del suelo, el permafrost, el hielo marino y la cobertura de nieve.

Los conjuntos de modelos climáticos, tales como los que se describen en el artículo “Proyecciones climáticas en la próxima fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados” de este número del *Boletín*, han sido usados repetidamente para crear proyecciones de gran escala del clima global. Como resultado, las líneas básicas de los climas futuros son conocidas y generalmente aceptadas. Sin embargo, los impactos regionales y locales de esos climas siguen teniendo grandes incertidumbres motivadas por la incertidumbre propia de los modelos (incertidumbres estructurales y procesos no representados) y por la variabilidad natural, que desempeña un papel importante en la escala regional. La modelización de escala kilométrica promete un número menor de procesos no representados y una modelización regional más precisa.

Actualmente empiezan a percibirse riesgos e impactos climáticos en todo el mundo con las contribuciones relativas de peligro (fenómeno meteorológico), exposición (escala de las infraestructuras humanas) y vulnerabilidad (resiliencia o ausencia de esta) cambiando rápidamente a medida que evolucionan las actividades humanas. Los impactos se observan ya en episodios locales extremos. Entre ellos, las temperaturas y precipitaciones extremas debidas al bloqueo atmosférico, como la ola de calor de 2021 del Pacífico noroccidental en América del Norte; el aumento en la rápida intensificación de los ciclones tropicales, como el huracán Otis en 2023; y las inundaciones de origen pluvial, ribereño o criosférico, como el desbordamiento repentino de un lago

1 [Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste](#), Estados Unidos de América

2 [Departamento de Ciencias de la Tierra, Medioambientales y Planetarias](#) (DEEPS), Universidad de Brown

3 [Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático de Canadá](#) (ECCC)

4 [Instituto Max Planck de Meteorología](#)

5 [Centro para la Investigación del Sistema Tierra y la Sostenibilidad](#) (CEN), Universidad de Hamburgo

6 [Centro Nacional de Ciencias Atmosféricas](#) (NCAS), Departamento de Meteorología, Universidad de Reading

glaciar en la India en 2023. Se espera que la frecuencia e intensidad de muchos peligros y exposiciones aumente con el tiempo pero el objetivo es reducir los impactos aumentando la resiliencia mediante la adaptación. Optimizar esa adaptación para afrontar los extremos futuros conlleva un nuevo planteamiento.

En el pasado, la gran potencia de cálculo requerida para la modelización solo permitía simulaciones climáticas de baja resolución global. Debido a estas limitaciones, los modelos solo eran capaces de resolver ciclones extratropicales y muchos elementos como los sistemas meteorológicos tropicales tenían que parametrizarse. Para suplir la necesidad de información local los modelos meteorológicos de mesoescala se adaptaron para funcionar como “modelos climáticos regionales” y a veces incluso se acoplaron con el océano local o con la dinámica del hielo marino para reproducir climas marítimos y polares. Estos modelos climáticos regionales abordaron la carencia de información de escala local acerca de fenómenos meteorológicos extremos e impactos debidos al cambio climático y son todavía hoy una aproximación común en estudios de adaptación.

Las condiciones de contorno para los modelos regionales se obtienen a partir del cambio climático global que se simula con modelos de clima de gran escala o con históricos meteorológicos perturbados por el cambio climático promedio de modelos de gran escala. El enfoque regional hace suposiciones fundamentales sobre el sistema climático y, por lo tanto, tiene limitaciones inherentes. Por ejemplo, los modelos climáticos de escala regional crean implícitamente una ruptura cuando reducen la escala de los forzamientos procedentes de los modelos globales para definir condiciones de contorno regionales. Más aún, estos modelos regionales no pueden propagar hacia escalas superiores fenómenos pequeños con capacidad para generar impactos

climáticos. Por ejemplo, los remolinos oceánicos de mesoescala tienden a generar tormentas de mesoescala en áreas extratropicales, mientras que a gran escala es la atmósfera la que tiende a controlar la variabilidad oceánica. Estos efectos se observan solo en sistemas acoplados y sus consecuencias de gran escala como la orientación de las trayectorias de las borrascas y los flujos atmósfera-océano solo pueden detectarse en modelos de áreas grandes con resolución mesoescalar o superior. Los modelos regionales no pueden simular estos efectos de propagación de fenómenos hacia las escalas superiores.

Además, los esfuerzos de modelización regional son todavía de baja resolución (10 a 25 km de resolución horizontal), lo que resulta insuficiente para simular muchos fenómenos que producen extremos regionales. Finalmente, los modelos climáticos regionales a menudo son elaborados a medida para una región particular, por lo que las pruebas y su aplicación quedan limitadas más allá de esa región.

Una nueva clase de modelos

Esta nueva clase de modelos regionales y globales del sistema Tierra a escala kilométrica simula de manera verosímil la dinámica del tiempo extremo y sus factores determinantes en grandes áreas. En la figura 1 puede verse el ejemplo de una simulación de prueba de un modelo global con resolución horizontal de 1,25 km: a la izquierda está la primera foto completa de la Tierra tomada por el Apolo 17 en 1972 (la “canica azul”), a su lado aparece la simulación realizada por el modelo global. Pero estos modelos son computacionalmente costosos. Actualmente podemos ejecutar modelos globales de 10 km a lo largo de siglos, modelos globales atmosféricos u oceánicos de 3 km a lo largo de unos pocos años, y modelos atmosféricos globales de 1 km



Figura 1. A la izquierda, la primera imagen global de la Tierra desde el espacio tomada por astronautas del Apolo 17 el 7 de diciembre de 1972. A la derecha, imagen visible de satélite simulada a partir del modelo ICON de 1,25 km, inicializado con campos de reanálisis del 5 de diciembre de 1972 (simulaciones producidas por el Instituto Max Planck de Meteorología (MPI-M) con el apoyo del Centro alemán de estudios climáticos (DKRZ) y visualizada por NVIDIA).

a lo largo de unos días, pero estas capacidades están cambiando rápidamente.

La disponibilidad de recursos de computación a exaescala (capaz de realizar 1018 operaciones en coma flotante por segundo), una importante fracción de la cual está destinada a aplicaciones de meteorología y clima, ofrece unas oportunidades sin precedentes. En los próximos cinco años serán factibles para muchos hacer simulaciones globales de 3 km con un horizonte de 100 años. Los significativos avances en los programas informáticos y la eficiencia computacional han sido tanto o más importantes que los avances en el suministro de equipamiento informático.

A escala kilométrica, la orografía y la batimetría pueden reproducir aspectos importantes que controlan el clima en la pequeña escala. El aumento de la resolución elimina la necesidad de parametrizar muchos procesos por los que la comunidad ha luchado para encontrar tratamientos estadísticos adecuados. Ahora es posible resolver los sistemas meteorológicos que influyen en los trópicos y en las tormentas de verano de pequeña escala de las regiones extratropicales con los mismos planteamientos que se usan para resolver las grandes borrascas extratropicales. En el océano, una resolución de 10 a 25 km permite inestabilidades internas de mesoescala, pero las escalas próximas a 3 km también permiten frentes e inestabilidades oceánicas de submesoescala que pueden interactuar con importantes franjas de la criosfera como la Zona de Hielos Marginales y las plataformas de hielo que refuerzan la cubierta helada de la Antártida.

Por supuesto, no todo podrá resolverse dado que los procesos turbulentos de pequeña escala en el océano y la atmósfera o la evapotranspiración en las hojas todavía requerirán tratamientos más aproximados e inciertos. Con una resolución de escala kilométrica se representan explícitamente procesos importantes como los movimientos verticales en la atmósfera que impulsan la física de nubes, los frentes y los remolinos oceánicos de submesoescala, las fracturas en el hielo marino y las plataformas de hielo. Aunque trabajar a escalas kilométricas traerá consigo nuevos desafíos para representar escalas aún no resueltas, permitirá desarrollar vínculos más estrechos con las comunidades dedicadas a la observación en las mismas escalas.

Estudios comparativos recientes entre modelos oceánicos de escalas kilométricas muestran que los elementos de gran escala que afectan a la trayectoria de las tormentas y al acoplamiento aire-mar (por ejemplo, la separación de la corriente del Golfo) son mucho más consistentes que en modelos de menor resolución. La variabilidad interna también es sustancialmente mayor en estos modelos ricos en remolinos. La figura 2 ilustra la velocidad de la corriente superficial oceánica y la cobertura de nieve a partir de la simulación de 1 km de la figura 1. Un estudio reciente ha demostrado que la variabilidad oceánica de mesoescala en regiones extratropicales, ahora resuelta en estos modelos, excita la variabilidad atmosférica marítima a diferencia de lo que ocurre a gran escala, donde es la atmósfera la que

impulsa al océano. Cerca de la escala de rejilla, no obstante, estos modelos exhiben una gran diversidad en intensidades de turbulencia. Esto se debe a que pequeños rasgos de submesoescala, importantes para el acoplamiento aire-mar y la biogeoquímica, aún no quedan resueltos en escalas kilométricas y permanecen altamente sensibles a las parametrizaciones.

Se necesitan modelos amplios que integren impactos climáticos a escala regional, lo que puede tener implicaciones globales. Por ejemplo, las interacciones críticas entre el calentamiento de los océanos y las plataformas de hielo antártico, que generan incertidumbre acerca de la posibilidad de una elevación súbita del nivel del mar y el colapso del retorno meridional, se tratarán directamente en escalas de resolución kilométrica. Sin embargo, eso requerirá representaciones de coberturas de hielo y glaciares. Otros impactos, como las inundaciones debidas a precipitaciones extremas, necesitarán una representación de las interacciones atmósfera-superficie, de la humedad del suelo y el desplazamiento de las aguas subterráneas, y de los suelos congelados en climas fríos. El hielo marino, en la escala kilométrica o más fina, puede requerir una representación diferente de la de escalas mayores. La inclusión de tales fenómenos puede precisar mejoras o alteraciones en componentes existentes para las aplicaciones de escala kilométrica, la representación de procesos no presentes actualmente, o incluso el desarrollo de nuevos componentes del modelo (por ejemplo, ríos, oleaje), pero ofrece la oportunidad de colaborar más estrechamente con las comunidades observacionales que trabajen con escalas similares.

Hay muchas áreas críticas que requieren desarrollo en estos modelos por lo que se necesitan equipos multidisciplinares.

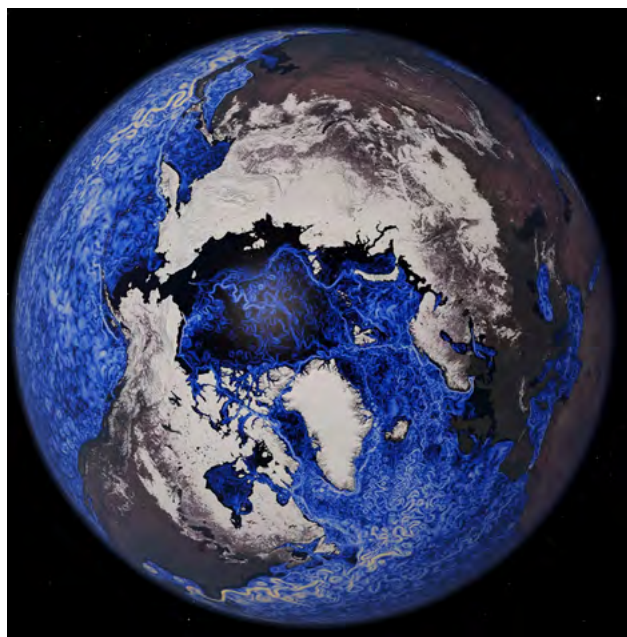


Figura 2. Remolinos oceánicos y cobertura de nieve a partir de la simulación del modelo ICON de la figura 1 (MPI-M, DKRZ y NVIDIA).

En el océano, los modelos de escala kilométrica resuelven directamente los remolinos de mesoescala que son importantes en la generación de extremos oceánicos y atmosféricos en escalas pequeñas. Una mejora en la resolución de la compleja batimetría de estrechos importantes en la circulación oceánica resolvería las regiones de afloramiento críticas para las pesquerías costeras y para la simulación verosímil de consecuencias locales de El Niño/La Niña-Oscilación del Sur (ENOS). Con una resolución más alta se resuelven las islas pequeñas, permitiendo la evaluación directa de impactos relacionados en el nivel del mar y los ecosistemas de coral. La superficie del terreno en alta resolución puede resolver ahora la evolución del agua desde la atmósfera hasta el interior del suelo y de vuelta a la superficie, posibilitando una hidrología compleja. Debe representarse el flujo lateral de agua bajo la superficie. Los modelos de hielo marino en la escala kilométrica pueden representar grandes fracturas y polinias y resolver explícitamente procesos de la zona marginal de hielo.

Los modelos regionales están también avanzando hacia las escalas kilométricas. A este respecto cabe señalar iniciativas llevadas a cabo en muchas regiones, como África y Sudamérica, favorecidas por colaboraciones en centros del [Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte](#) y los [Estados Unidos de América](#) respectivamente. Los enfoques híbridos, donde un modelo global contiene una región de alta resolución anidada para mantener la fidelidad mientras se reduce la carga computacional, pueden también acelerar el desarrollo y el uso de modelos de escala kilométrica, lo que puede aportar los beneficios de una escala kilométrica global para algunas aplicaciones pero a un coste reducido, como puente hacia la escala kilométrica plena.

Oportunidades

Los modelos del sistema Tierra de escala kilométrica presentan una nueva oportunidad para hacer progresos sustanciales en lugar de incrementales en la comprensión de los climas extremos, los cambios de circulación, y sus impactos locales en la sociedad. Estos modelos no resuelven todos los problemas pero remedian muchos de ellos que han experimentado escasos avances en el pasado como la resolución de la organización mesoescalar de las tormentas, que es crítica para evaluar extremos de precipitación. De manera significativa, los problemas que estos modelos no resuelven se plantean ahora en términos que nos permiten abordarlos. Por ejemplo, los modelos de escala kilométrica, como los modelos de PNT, pueden compararse más fácilmente con abundantes observaciones de fenómenos meteorológicos en lugar de limitarse a plantear la evaluación estadísticamente. Nuevas fuentes de datos, como el radar activo y el lidar en el espacio, se están posicionando a la escala que requieren estos modelos.

Los modelos regionales habilitan un acceso más sencillo a la información, en una escala comparable a las observaciones, pero truncan la interacción entre escalas y con frecuencia no abarcan suficientemente los procesos del sistema

Tierra. Por ejemplo, tanto los modelos regionales como los meteorológicos carecen a menudo de equilibrios adecuados de radiación, ciclos de carbono, acoplamiento con el océano y la criosfera, etc. Además, el refinamiento regional a escala kilométrica, incorporado en los modelos globales, puede proporcionar buena parte de los beneficios a un coste mucho más asequible, y pueden rellenarse los huecos con modelización regional limitada, respaldada por simulaciones globales.

La importancia de los extremos representativos, los cambios de circulación y las necesidades sociales de información acerca de los impactos locales del clima requiere además contar con nuevos paradigmas para el uso y el análisis de estos modelos. El desarrollo aprovecha los nuevos paradigmas de ciencia abierta, datos abiertos, ciencia de datos y aprendizaje automático para acelerar los modelos y progresar. El trabajo conjunto y más allá de las ciencias físicas —involucrando así más pueblos y naciones cuya capacidad de modelización está infradesarrollada— ofrece grandes oportunidades. Algunos centros de modelización climática han asumido colaboraciones de esta naturaleza y trabajan activamente con una amplia variedad de partes interesadas.

Responder al desafío

Los modelos del sistema Tierra de escala kilométrica afrontan muchos desafíos. Uno de los problemas consiste en procurar datos observacionales adecuados que puedan servir como condiciones iniciales y de contorno (particularmente en el océano, la criosfera y el subsuelo continental). Luego, aunque los modelos de alta resolución tienen el potencial de reducir notablemente el error y mejorar la representación de procesos, las simulaciones cortas actuales dificultan la verificación de componentes lentos; los componentes rápidos como la atmósfera pueden verificarse, de manera similar a los modelos PNT, sobre el tiempo pasado. Los métodos de asimilación de datos ofrecen interesantes posibilidades para la inicialización de componentes lentos (océano) en los modelos de escala kilométrica. Además del formidable reto computacional que supone la integración de los modelos está el desafío de operar y analizar sus salidas de escala kilométrica. Estos desafíos exigen la adopción simultánea de varios paradigmas.

Como ocurre con todos los nuevos tipos de modelo, los de escala kilométrica expanden las fronteras de la investigación humana. Los planteamientos computacionales tradicionales han llegado a su límite, especialmente en lo que respecta a la eficiencia energética. El uso de aceleradores de hardware (como las unidades de proceso gráfico) y emuladores con métodos de inteligencia artificial/aprendizaje automático empieza a agilizar significativamente la integración y el análisis, reduciendo su coste. Los métodos de inteligencia artificial/aprendizaje automático habilitarán nuevos enfoques en la emulación, la compresión y asimilación de datos y la aceleración de procesos. Estos planteamientos novedosos serán necesarios para dotar de utilidad a los modelos. El procedimiento tradicional basado en ejecutar un modelo

climático una vez, guardarlo todo, y después transferir las salidas a otra parte para su análisis no es sostenible. Hay demasiados datos para el almacenamiento a largo plazo o para transferirlos a tantos sistemas diferentes. En proyectos como [DestineE](#) (Europa) y [Pangeo](#) (Estados Unidos de América) se están desarrollando nuevos flujos de trabajo y métodos de análisis para permitir a usuarios de todo el mundo la interacción con lo que de otra manera sería una cantidad de datos abrumadora. Proyectos como [NextGEMS](#) (Unión Europea), junto con el establecimiento de infraestructuras de acceso comunitario a través de instalaciones como [JASMIN](#) (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte) y [DKRZ](#) (Alemania), también exploran formas en las que crear espacios públicos en la esfera digital (una nube pública) que permitan compartir los beneficios de estas nuevas oportunidades.

Los modelos de escala kilométrica acoplados con modelos de sistemas humanos nos permitirán proporcionar un espectro de información mucho más rico. Tendrán que identificarse métodos para hacer llegar de manera regular la mejor información a la gente que la necesita. El cambio climático está aquí, y sabemos mucho al respecto, pero está todo codificado en nuestros modelos. Esa información tiene que ser descodificada y entregada a las comunidades que la necesitan. Por ejemplo, los modelizadores podrían aprender de los sistemas de datos desarrollados para distribuir observaciones de satélite en escalas kilométricas similares, incluyendo datos aportados en la nube ([Google Earth Engine](#) podría ser un ejemplo en el sector privado). Conforme nos aproximamos a la escala kilométrica se abre una gran oportunidad para desarrollar enfoques comunes y estandarizar la provisión de información como servicios climáticos operativos.

¿Qué se está haciendo para mejorar?

En la actualidad, los modelos de escala kilométrica se desarrollan rápidamente. Hay nuevos paradigmas de computación que permiten separar aspectos técnicos y científicos, lo que haría menos complejo y más universal el desarrollo y el avance de los modelos. Los nuevos paradigmas para la creación, el archivo y el análisis de los datos evolucionan rápidamente hacia un modelo “justo a tiempo” en el que solo se crean los datos necesarios y se accede a ellos allí donde se calculan, sin necesidad de copiarlos.

Los modelos de escala kilométrica proporcionan una forma activa de crear futuros hipotéticos basada en metodologías comunes y estructuras de análisis. Además, mientras se construyen estos modelos es imperativo desarrollar la transición hacia la operatividad en la entrega de datos, con objetivos rigurosos en los productos, desarrollados conjuntamente con las partes interesadas, y con las correspondientes pruebas y validaciones. Estos esfuerzos necesitan del soporte de una investigación decidida.

El Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP) puede promover, desarrollar y proporcionar esa red troncal de investigación. Por ejemplo, su actividad [faro Mundos Digitales](#) ayuda a avanzar en el desarrollo, el análisis y la investigación en modelos de escala kilométrica, a saber todos los componentes del sistema Tierra —atmósfera, suelo, océano y criosfera— así como el sistema humano. El objetivo es ayudar a coordinar las actividades de investigación que darán soporte al uso operativo de los modelos climáticos globales y regionales de alta resolución. El nuevo proyecto central [Modelización y observación del sistema Tierra](#) reunirá a observadores y modelizadores para compartir experiencias en materia de archivo, análisis (por ejemplo, la inteligencia artificial) y uso compartido de bases de datos de petaescala y exaescala.

La interacción con las partes interesadas respecto a la información climática avanza con la aplicación de modelos de escala kilométrica en casos de estudio individuales. Pero hacen falta mejores estructuras para la puesta en marcha de servicios climáticos que proporcionen la información climática que la sociedad demanda. Por todo el mundo hay varios ejemplos de entrega regular y validada de datos climáticos operativos, como las normas para la difusión de alertas meteorológicas tempranas que tienen en cuenta los impactos. Se requiere un desarrollo continuado para la información a escala kilométrica. El concepto de los [motores de virtualización de la Tierra](#), por ejemplo, propone un marco novedoso para la entrega de información climática, con acceso mejorado a la nube a través de infraestructuras públicas y avances en la interoperabilidad de aplicaciones informáticas y datos.

Los modelos de escala kilométrica pueden satisfacer necesidades sociales fundamentales en una simulación de extremos que considere la interacción de todas las escalas y que pueda verificarse con observaciones avanzadas. Así mismo pueden liberar la capacidad de desarrollo cooperativo de servicios climáticos con partes interesadas a escala regional y local, aprovechar al máximo las oportunidades de computación a exaescala y ser pioneros en el acceso a un espacio público abierto para los datos climáticos.