



**CONAMA10**  
CONGRESO NACIONAL  
DEL MEDIO AMBIENTE

**COMUNICACIÓN TÉCNICA**

## **Condiciones de contorno en modelos climáticos regionales: revisión histórica y tendencias.**

Autor: José David García Callejas

Institución: Asociación de Ciencias Ambientales (ACA)

e-mail: [j.david.garcia.callejas@gmail.com](mailto:j.david.garcia.callejas@gmail.com)



## RESUMEN

En esta comunicación técnica se introducirá el tema de la modelización meteorológica y climática, comenzando por una introducción sobre los tipos de modelos numéricos que existen, sus campos de aplicación, y las características más importantes de cada tipo de modelo. Se hará hincapié en los modelos climáticos regionales, dada su gran aceptación actual y las variantes que existen; una vez introducido el contexto, se estudiarán las condiciones de contorno usadas en modelos regionales, y la comunicación se centrará en las condiciones de contorno laterales, examinando su desarrollo en la literatura, las técnicas más aceptadas hoy día, y los pros y contras que presenta cada propuesta.

**Palabras Clave:** Modelos climáticos, condiciones de contorno, relajación, nudging espectral

## Introducción

El clima puede definirse, de manera clásica, como la sumatoria de los fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto determinado de la superficie terrestre. Es importante resaltar que el “estado medio” de la atmósfera se considera de manera habitual para un periodo de entre 30-50 años. Los fenómenos meteorológicos, por tanto, serán aquellos cuya escala temporal sea inferior a este intervalo. Desde los primeros pasos del hombre sobre la Tierra, la especie humana ha intentado conocer y anticipar fenómenos atmosféricos; hoy día, la investigación científica en este aspecto gravita invariablemente sobre las simulaciones computacionales que aproximan, a través de métodos numéricos, la solución de las ecuaciones primitivas del flujo atmosférico global.

La modelización numérica de procesos climáticos es, por tanto, una herramienta fundamental para la comprensión y la predicción de futuras variaciones climáticas a todas las escalas, y es un campo en franca progresión, tanto por la cantidad de grupos de investigación especializados en él como por el constante aumento en la capacidad computacional de los ordenadores actuales, que permiten aumentar la complejidad y resolución de los procesos simulados.

Existen varios tipos de modelos climáticos, que se diferencian en la propia visión que sus creadores tienen sobre los fenómenos climáticos. La definición clásica de clima antes mencionada nos muestra el clima como resultante de una serie de fenómenos atmosféricos, y en consecuencia, existen multitud de modelos climáticos que son meramente simulaciones globales de circulación atmosférica. Otra serie de definiciones más amplias del clima hacen referencia al estado de los componentes del sistema climático, es decir, los componentes que de una u otra manera influyen en el clima a gran escala. Estos componentes serían (Claussen et al. (2002)): el mundo abiótico o geosfera, y la biosfera, la cual se divide de nuevo en atmósfera, hidrosfera, criosfera, pedosfera y litosfera. Esta visión del clima como un sistema complejo lo hace difícil de simular de manera realista, por su propia naturaleza caótica, pero existen modelos que intentan aproximarse a esta integración de subsistemas (Modelos del sistema Tierra de complejidad intermedia, EMIC por sus siglas en inglés, y también modelos del sistema Tierra, ESM).

---

\* Dpto. de Física, Universidad de Alcalá de Henares. [josedavid.garcia@alu.uah.es](mailto:josedavid.garcia@alu.uah.es)

## Modelos globales, regionales y sistémicos

Los modelos climáticos globales tienen como objetivo simular el devenir del clima en toda la superficie terrestre, y su uso es muy apropiado y fiable para la simulación de fenómenos a gran escala, como la circulación general de la atmósfera o los océanos, y para patrones continentales de temperatura o precipitación. Su resolución efectiva, el grado de detalle espacial que pueden alcanzar en las predicciones, está hoy día en el orden de los 100 km (Rummukainen (2010)). Existen modelos globales atmosféricos, modelos globales oceánicos, y modelos acoplados, que simulan ambos sistemas junto con sus interacciones, y son por tanto los más complejos en su tipo y también los más usados actualmente. Su desventaja más evidente es la enorme carga de computación que acarrearán este tipo de simulaciones, haciéndolas en general impracticables para resoluciones espaciales elevadas y para periodos de tiempo de más de unos cientos de años.

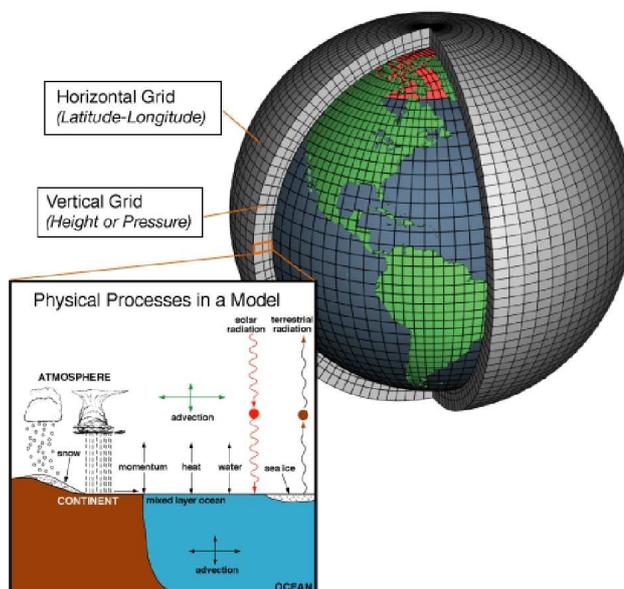


Figura 1: esquema de un modelo global (según NOAA)

Los modelos regionales nacieron para superar el problema de la resolución espacial de los modelos globales, centrando la simulación en un área determinada de la superficie terrestre, que oscila habitualmente entre simulaciones específicas para la superficie de un país hasta continentes enteros (Figura 2). Dichos modelos necesitan para su funcionamiento datos climáticos relativos a los bordes de la región a simular, y esta información puede ser proporcionada por un modelo climático global (en lo que se denomina acoplamiento de modelos o “nesting”) o bien por reanálisis de observaciones directas cuando se simulan tiempos pasados.

El aumento de resolución espacial que se consigue con los modelos regionales (actualmente, existen simulaciones de menos de 10 km de resolución) conlleva una representación mucho más adecuada de hitos geográficos como cadenas montañosas, lagos, ríos, etc., dando lugar a sistemas locales de circulación, precipitación, etc. Las simulaciones realizadas con los RCM pueden tomarse a su vez como información de partida para simulaciones globales, en un acoplamiento de doble sentido. Como es obvio, esta información proporcionada por los modelos regionales complementa la proporcionada por los modelos globales, y permite un mayor detalle en estudios conducentes, por ejemplo, a evaluar los efectos de un posible cambio climático en una región determinada.

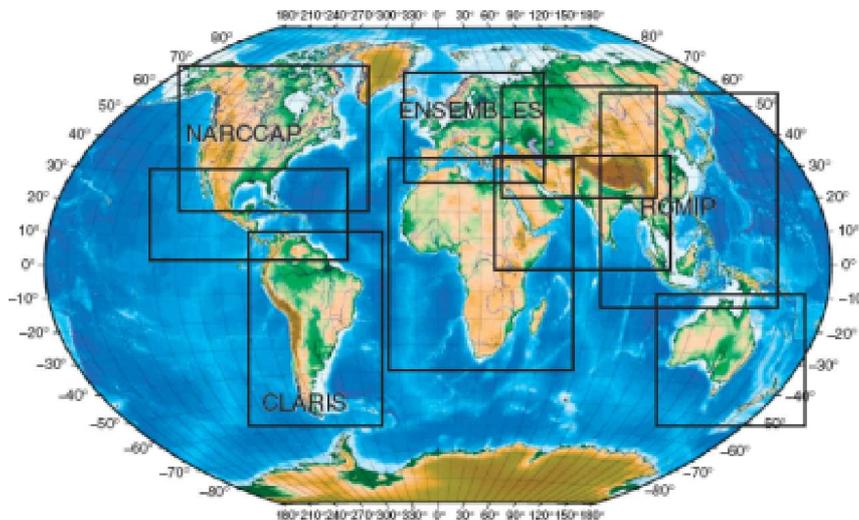


Figura 2: algunos dominios usados por los RCM (Rummukainen (2010))

Este tipo de modelos cuasi-deductivos, ya se ha dicho, tienen un alto coste computacional, y no predicen explícitamente las interacciones entre los diferentes componentes del sistema clima. Para llenar ese vacío, se postulan los ESM y los EMIC, que contienen - si bien en manera más reducida - todos los procesos físicos incluidos en los modelos regionales o globales, y además las ya mencionadas interacciones entre componentes, principalmente en forma de procesos biogeoquímicos. Los modelos del Sistema Tierra, ESM, suelen tener una base física, computacional, más fuerte que los EMIC, los cuales son pensados, en su mayoría,

para simulaciones de varios cientos de años e incluso milenios, con el objetivo de evaluar las variaciones del sistema clima a escalas mayores que los modelos globales, la retro-alimentación entre sus componentes, o la importancia relativa de cada componente en las tendencias globales.

En los siguientes apartados, se intentará indagar, de manera no matemática siempre que sea posible, en las particularidades de los modelos climáticos regionales, y especialmente de los modelos atmosféricos.

## Características generales de los modelos climáticos regionales

### Espacio de simulación

El espacio en el que operan las ecuaciones primitivas de dinámica de fluidos en los modelos atmosféricos regionales es el cubo tridimensional limitado, en su base, por la orografía terrestre, y en sus lados y su techo, por los límites escogidos para la simulación. En el caso de los modelos oceánicos, los bordes de las simulaciones son aun más claros. Las variables a simular dependen del modelo en cuestión, pero todos los modelos atmosféricos incluyen al menos el contenido en vapor de agua y/o agua líquida (nubes), la temperatura, y las velocidades zonal y meridional del viento para cada nivel vertical.

La abstracción física que permite la simulación numérica de las variables consideradas se denomina "grid" o malla. Se trata de la división del espacio tridimensional en secciones (rectangulares o de otro tipo), en cada una de las cuales se calcula un punto de las variables. Las coordenadas verticales pueden estar referenciadas en altura con respecto a una superficie de referencia, o con respecto a alguna propiedad atmosférica (e.g. temperatura potencial, densidad, presión: nivel vertical de 900 hPa, 700 hPa, etc.). Las coordenadas horizontales, por su parte, suelen ser bien polares, bien planares.

Existen diferentes esquemas espaciales para el cálculo de las variables pronósticas en cada celda de una malla determinada, en la figura 3 se esquematizan las mallas denominadas de Arakawa (Arakawa & Lamb (1977)), las más usadas históricamente.

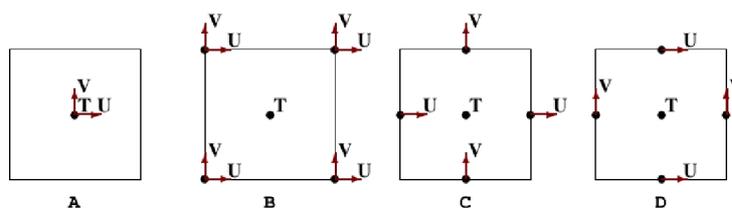


Figura 3: Mallas de Arakawa y las diferentes formas de representar velocidades en una celda

La gran mayoría de los modelos atmosféricos actuales permiten escoger además del ancho y largo de la malla, el número de niveles verticales que tendrá, es decir, la

altura vertical de la simulación. Estas decisiones afectarán de forma irremediable tanto a la eficiencia como a la calidad de la simulación (Wu et al. (2005)): el dominio debe ser lo suficientemente amplio como para permitir:

- la generación de procesos meteorológicos de escala local y regional
- la correcta aplicación de las técnicas destinadas a mitigar los errores sistemáticos en condiciones de contorno laterales, comentadas más adelante.

A su vez, las dimensiones del dominio no deben implicar un excesivo tiempo de computación. El espacio geográfico contenido en el dominio también juega un papel importante: es aconsejable que los dominios regionales no dividan hitos geográficos susceptibles de generar o influir de manera significativa en fenómenos meteorológicos, como cadenas montañosas o grandes lagos. Estos lugares de especial importancia deberían siempre incluirse por completo en el dominio, o bien dejarse fuera por completo, para evitar la generación de resultados erróneos. En la figura 4, se aprecian las importantes diferencias en la simulación de la precipitación media mensual al variar las dimensiones del dominio en un experimento con el modelo regional RAMS. Esta problemática se debe, en buena medida, a la baja eficacia de la técnica de relajación comentada más adelante para atenuar los errores en la generación de perturbaciones a gran escala (longitudes de onda de 1000 km o más).

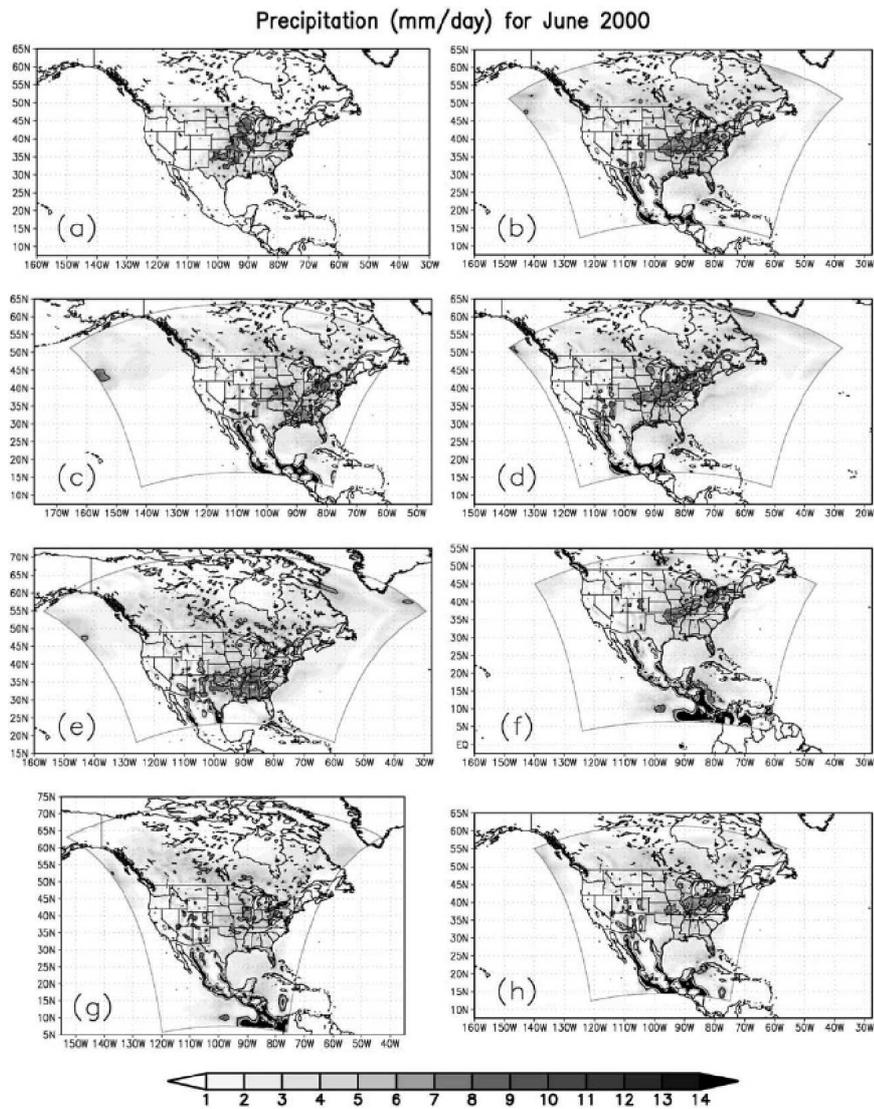


Figura 4: Variación en la precipitación simulada por el modelo RAMS, en función del dominio escogido (Miguez-Macho et al. (2004))

## Representación de la superficie terrestre

Además de las coordenadas horizontales y verticales, y la física atmosférica del modelo, es necesario representar de alguna manera la interacción entre atmósfera y superficie terrestre, específicamente los procesos que transfieren masa, momento y energía entre ambos sistemas (Levis (2010)). En estas interacciones juegan un papel principal dos actores de la biosfera: las plantas, gracias a su metabolismo que implica trasiego de energía y materia desde capas inferiores del suelo a la atmósfera, y viceversa; y el hombre, que a través de cambios en el uso del suelo es capaz de alterar los ciclos naturales de regulación del clima.

- Plantas: toman parte en procesos biogeofísicos (cálculo del albedo, evapotranspiración) y biogeoquímicos (ciclos de elementos o compuestos minerales). La inclusión de la cubierta vegetal en modelos regionales toma como variables el LAI (Leaf Area Index, índice de área foliar), SAI (Stem Area Index, índice de área leñosa), altura de la cubierta vegetal y fracción de cada celda cubierta por vegetación. La evolución de estas variables puede ser
  1. estática, tomando la vegetación como una constante de la superficie. Para ello basta con incluir en el modelo un archivo referenciado al dominio en el que se esté trabajando, con los valores de las variables mencionadas para cada celda.
  2. dinámica, cuando la cubierta vegetal varía de acuerdo a la producción primaria neta, calculada a partir de la fotosíntesis efectiva.

Para modelos climáticos regionales, dado su alcance temporal, probablemente es suficiente una representación dinámica como la mencionada de la cubierta vegetal. Existen, en el ámbito de los modelos del Sistema Tierra, investigaciones muy interesantes sobre representaciones que incluyan la generación de suelo, dispersión realista de semillas, eventos extremos, plagas, etc.

- Hombre: Las alteraciones producidas en los usos del suelo por el género humano tienen una influencia varios órdenes de magnitud mayor que la vegetación natural en el sistema clima en los últimos dos siglos, y como tal, existen grandes esfuerzos por intentar incluir dichas alteraciones en los modelos climáticos. Sin embargo, actualmente, hasta nuestro conocimiento, ningún modelo regional incluye específicamente cambios dinámicos en los usos del suelo. El ámbito en el que se tienen en cuenta estas interacciones es, de nuevo, el de los modelos del Sistema Tierra, y en todo caso, modelos económicos y sociológicos. Esta exclusión de los modelos regionales tiene razones de peso: el sistema socioeconómico necesita una enorme cantidad de inputs para su modelización, variables que en su mayoría escapan al ámbito

de los modelos climáticos regionales (económicas, demográficas, etc.). Además, tal y como ocurre con modelos dinámicos de vegetación, el intervalo temporal en el que se mueven los modelos regionales probablemente no permita apreciar los cambios en el sistema clima producidos por el cambio en los usos del suelo u otras prácticas humanas.

## Métodos numéricos y errores sistemáticos

Los métodos numéricos más usados para estimar las variables pronósticas, tanto en modelos globales como en modelos regionales, se pueden dividir en tres grandes familias: Métodos de diferencias finitas, métodos de transformación espectral, y métodos de elementos finitos. Un análisis de cada grupo de métodos está fuera del alcance del presente escrito (véase, por ejemplo, Mesinger (1997)). En todo caso, todos los métodos presentan ventajas e inconvenientes, y por supuesto, ninguno de ellos está libre de errores en la prognosis.

Los modelos regionales presentan esencialmente dos tipos de errores sistemáticos, capaces de ser reducidos en mayor o menor medida, pero inevitables por naturaleza (Misra (2007)): Los errores inherentes a las soluciones numéricas del modelo y aquellos debidos a las condiciones de contorno. El primer tipo de errores puede deberse a la parametrización de los procesos físicos, a los algoritmos numéricos, etc.

El hecho de que los modelos regionales se “alimenten” con datos que no son coherentes con la resolución o el esquema físico del modelo da lugar a los errores sistemáticos del segundo tipo, y para adaptar los datos externos al esquema del modelo regional se utilizan las denominadas condiciones de contorno laterales, una serie de transformaciones numéricas que intentan reducir el error sistemático de la interfase datos externos - modelo regional. Existen al menos cinco fuentes de error relacionadas con las condiciones de contorno, según Warner et al. (1997):

- La resolución del modelo global es menor que la del modelo regional (o, en su caso, de los reanálisis de observaciones directas), por lo que para dar valores a los puntos frontera del modelo regional se hace necesario algún método de interpolación. Además de la resolución de los modelos, se ha comprobado que no existe un conjunto de condiciones de contorno locales que garantice una solución única y estable para modelos hidrostáticos, lo que puede influir decisivamente en la simulación (Marchesiello et al. (2001)).
- Incluso si la resolución del modelo global y regional fueran hipotéticamente similares, la calidad de la simulación regional vendrá determinada de antemano por la calidad de la simulación global que se proporcione como forzamiento.

- La solución del modelo regional puede verse afectada por las restricciones numéricas que imponen las condiciones de contorno a las longitudes de onda de las variables pronósticas.
- Se pueden producir fenómenos espúreos en las inmediaciones del borde de la simulación que pueden influenciar la solución regional interior. Estos fenómenos pueden tomar la forma de gradientes o retroalimentaciones entre el dominio regional y el global.
- Por último, pueden existir modos de gravedad inerciales que pueden igualmente dificultar la interpretación de la solución.

## Condiciones de contorno laterales

Los problemas mencionados suelen mitigarse usando técnicas pragmáticas, dada la complejidad teórica y computacional de resolverlos mediante criterios estrictamente matemáticos. Se intenta, por tanto, evitar en la medida de lo posible que los efectos de los errores sistemáticos en el borde del dominio se propaguen al interior del mismo. A continuación revisaremos las técnicas de relajación y “nudging” espectral, probablemente las dos técnicas más ampliamente usadas en este campo.

### Técnicas de relajación

Las técnicas históricamente más importantes para la definición de las condiciones de contorno laterales, usadas en buena parte de los modelos regionales actualmente en funcionamiento, son las técnicas de “relajación”, cuya propuesta inicial se debe a H.C. Davies en su pionero trabajo de 1976 “A lateral boundary formulation for multi-level prediction”. En estos métodos, un coeficiente de relajación se añade de manera continua a las variables generadas por el modelo, para adecuarlas al forzamiento provisto por el modelo global. Este coeficiente, como es de esperar, se aplica únicamente en las cercanías del borde del dominio, en una zona de “buffer”.

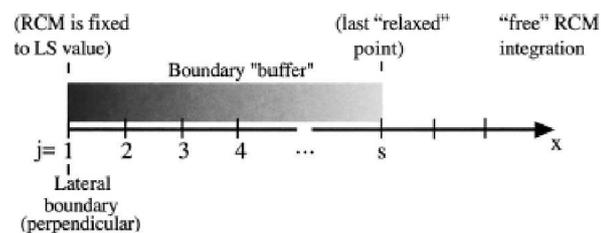


Figura 5: Esquema del procedimiento de relajación, según Marbaix et al. (2003), donde: RCM = modelo regional, LS = valor del forzamiento en el borde del dominio

Como se ha comentado, los esquemas usados comúnmente para la especificación de condiciones de contorno en la frontera no presentan una solución analítica única y estable; la técnica de relajación permite minimizar este problema por su propia formulación.

Existen dos tipos de coeficientes de relajación: el coeficiente de relajación newtoniano y el coeficiente difusivo de relajación. Tomando como base la ecuación de una variable prognóstica  $u$ , omitiendo el resto de términos:

$$\delta u / \delta t = \dots - N(u - \tilde{u}) - D \nabla^2 (u - \tilde{u})$$

donde  $u$  es una variable prognóstica en el modelo regional, y  $\tilde{u}$  es el valor correspondiente en los datos de forzamiento,  $N$  es el coeficiente newtoniano de relajación, y  $D$  es el coeficiente difusivo. Existirán tantos coeficientes newtonianos y difusivos como puntos haya en la zona de buñer, teniendo ambos mayor peso cuanto más cerca del borde del dominio nos encontremos. Como se observa, estos términos se toman sobre la diferencia de valores del modelo regional y los datos de forzamiento; de esta manera, solo existe relajación de los datos cuando los valores regional y global difieren significativamente. Además, es posible hacer una distribución de pesos de los coeficientes lineal, parabólica, exponencial o de cualquier otro tipo.

Es posible aplicar uno o ambos términos de relajación; en Marbaix et al. (2003) se postula que el uso de ambos términos es redundante, y que los mejores resultados se consiguen solamente con el coeficiente difusivo. Este término se basa en la idea de minimizar las ondas de los flujos salientes del dominio, en función de su longitud de onda, amortiguando en mayor medida las ondas cortas y reduciendo por tanto la reflexión espúrea que aparece con la relajación.

La elección del número de puntos de buñer, así como del valor de los coeficientes de relajación para cada punto, es en buena medida un problema práctico, casi de ensayo - error, dependiente de las particularidades numéricas de cada modelo regional, pero en general se suelen escoger entre 5 y 10 puntos del dominio para actuar de buñer, distribuciones exponenciales, y los valores recomendados para los términos  $N$  y  $D$  oscilan entre 0.5 y 0.9.

Esta familia de técnicas tienen como principal problema el ya expuesto en la figura 4: en la práctica, amortiguan de manera efectiva las variaciones de pequeña escala, pero no resuelven adecuadamente ondas sinópticas, que son reflejadas desde la zona de buñer al interior del dominio regional. Estas ondas de gran escala interfieren con la circulación simulada por el modelo regional, y añaden ruido a la información procedente de los datos globales. Para solucionar este problema, han surgido en la última década una serie de técnicas que intentan evitar que el modelo regional interfiera en la solución de los procesos sinópticos.

## Nudging espectral

El verbo nudge, en inglés, significa “golpear ligeramente con el codo” o bien, “acomodar, dirigir hacia”. No es fácilmente traducible en este caso, pero al igual que las técnicas de relajación, se trata de “acomodar” las variables regionales a los datos globales, en este caso con un enfoque diferente. Se basa en la idea de que el clima a escala regional se encuentra condicionado tanto por las condiciones atmosféricas a gran escala como por características regionales, geográficas o de otro tipo. En este sentido, los modelos regionales que aplican estas técnicas, se fuerzan para cumplir con las condiciones de contorno globales y además para conservar los flujos de gran escala que provienen de los datos globales y se dan dentro del área de integración. Por tanto, esta técnica presupone que los flujos globales que se introducen como forzamiento son esencialmente correctos, y no deberían ser modificados por el modelo regional. (ver Von Storch et al. (2000) para un desarrollo completo de la técnica sobre el modelo atmosférico regional REMO).

Al ser un método que intenta mantener los flujos de gran escala y a la vez, permitir que el modelo regional sea capaz de reproducir los procesos regionales, el coeficiente de nudging o “acomodamiento” es capaz de actuar con mayor intensidad en las capas altas de la atmósfera, en las que los procesos a gran escala tienen mayor importancia que los regionales. La distribución vertical de pesos del coeficiente de nudging puede ser exponencial, como en Von Storch et al. (2000), de otro tipo, o incluso constante en todos los niveles verticales, como en Kanamaru & Kanamitsu (2007); y el método puede aplicarse sobre todas las variables pronósticas o un subgrupo de ellas.

En Kanamaru & Kanamitsu (2007) se actualiza el método descartando las perturbaciones medias de temperatura y humedad, y corrigiendo además las diferencias en los datos de topografía usados en el modelo global y el modelo regional, que originan resultados erróneos para los niveles de presión. Esta actualización es denominada por los autores Scale-Selective Bias Correction, SSBC, y en su artículo proporciona mejores resultados que el nudging espectral por sí solo.

Este método, en su forma original o en la actualización de Kanamaru y Kanamitsu, puede mejorar significativamente la modelización de la precipitación, al no verse afectada la dinámica regional por flujos a gran escala simulados erróneamente por el modelo regional. Es conveniente su uso para dominios del orden de miles de kilómetros o mayores (Miguez-Macho et al. (2004)). Sin embargo, ello no evita que sea necesario también utilizar técnicas de relajación: sin la atenuación de los datos a pequeña escala que proporciona esta técnica, las simulaciones pueden volverse inestables. Por tanto, las dos técnicas introducidas son necesarias y complementarias, y su estudio y mejora suponen una parte muy importante de los avances en simulación climática regional.

## Referencias

- Arakawa, A., & Lamb, V.R. 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods of computational physics*, 17, 174–265.
- Claussen et al., M. 2002. Earth System Models of Intermediate Complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models. *Climate Dynamics*, 18, 579–586.
- Kanamaru, H., & Kanamitsu, M. 2007. Scale-Selective Bias Correction in a downscaling of global analysis using a regional model. *Monthly weather review*, 135, 334–350.
- Levis, S. 2010. Modeling vegetation and land use in models of the Earth System. *WIREs climate change*, Wiley online library.
- Marbaix, F., Gallee, H., Brasseur, O., & van Ypersele, J.P. 2003. Lateral boundary conditions in regional climate models: a detailed study of the relaxation procedure. *Monthly weather review*, 131, 461–479.
- Marchesiello, P., McWilliams, J.C., & Shchepetkin, A. 2001. Open boundary conditions for long-term integration in regional oceanic models. *Ocean modelling*, 3, 1–20.
- Mesinger, F. 1997. Dynamics of limited-area models: formulation and numerical methods. *Meteorology and atmospheric physics*, 63, 3–14.
- Miguez-Macho, G., Stenchikov, G.L., & Robock, A. 2004. Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *Journal of geophysical research*, 109.
- Misra, V. 2007. Addressing the issue of systematic errors in a regional climate model. *Journal of climate*, 20, 801–818.
- Rummukainen, M. 2010. State-of-the-art with regional climate models. *WIREs climate change*, 1, 82–96.
- Von Storch, H., Langenberg, H., & Feser, F. 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Monthly weather review*, 128, 3664–3673.

Warner, T., Peterson, R., & Treadon, R. 1997. A tutorial on Lateral Boundary Conditions as a basic a potentially serious limitation to regional numerical weather prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2599–2617.

Wu, V., Lynch, A., & Rivers, A. 2005. Estimating the uncertainty in a regional climate model related to initial and lateral boundary conditions. *Journal of climate*, 18, 917–933.