

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (I)

E. RODRÍGUEZ CAMINO, METEORÓLOGO DEL ESTADO Y E. RODRÍGUEZ GUISADO, AEMET

1 Introducción

Los avances en los sistemas de observación, las mejoras en la comprensión y modelización de los distintos componentes del sistema terrestre y el aumento de las capacidades de cálculo han permitido en los últimos cuarenta años un continuo avance tanto en la predicción meteorológica como la climática por parte de los principales centros operativos de todo el mundo. La primera generación de sistemas dinámicos de predicción estacional se puso en operación a mediados de la década de 1990 tanto en EE.UU. por el *National Meteorological Service* como en Europa por el *European Centre for Weather Medium-Range Forecasts*. Estos sistemas constituyeron el germen de la sólida infraestructura de predicción estacional operativa que ha creado la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y otras iniciativas tales como el *Copernicus Climate Change Service (C3S)*, el *International Research Institute (IRI) for Climate and Society*, etc.

El desarrollo de las predicciones estacionales y la infraestructura asociada apunta a satisfacer la necesidad de información predictiva por parte de los usuarios en escalas de tiempo estacionales que pueda utilizarse para la toma de decisiones en sectores tales como la agricultura y la seguridad alimentaria, la salud, la energía, la gestión del agua, la asignación de recursos y el riesgo de catástrofes, etc. La información anticipada sobre las condiciones climáticas de las próximas estaciones permite a los usuarios minimizar los riesgos asociados a las condiciones climáticas adversas y maximizar los beneficios de las condiciones climáticas favorables.

En general se consideran cuatro fuentes de predecibilidad en el sistema climático: i) el conocimiento del estado inicial del sistema que es la fuente predominante en la predicción del tiempo; ii) el conocimiento de las condiciones de contorno del

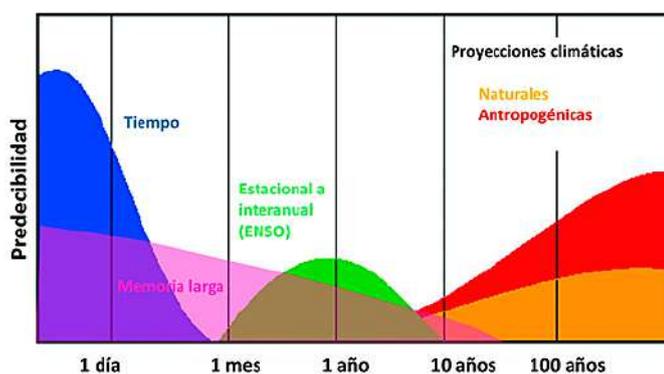
sistema y que pueden ser naturales (p.ej., grandes erupciones volcánicas) o antropogénicas (p.ej., aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero); iii) el conocimiento de los patrones de variabilidad (p.ej., ENSO); iv) el conocimiento de variables con memoria a largo plazo (p.ej., temperatura de los océanos, humedad del suelo, cobertura de nieve, etc.). Estas fuentes de predecibilidad permiten diseñar sistemas de predicción estacional tanto empíricos como dinámicos que las incorporan implícitamente. El esquema adjunto muestra las fuentes mencionadas

y convenientemente combinadas para poder proporcionar información útil a los usuarios. Finalmente, porque las salidas de los modelos deben integrarse en servicios climáticos específicos que permitan estimar la evolución a escala estacional de las variables relevantes para los diferentes tipos de usuarios y no solo la evolución de las variables climáticas como temperatura, precipitación, viento, etc.

2 Evolución histórica

Las precipitaciones asociadas a los monzones son fenómenos estacionales cuya variabilidad en la India y el sudeste asiático afecta a muchos millones de personas. De hecho, la devastadora hambruna que asoló la región a finales de la década de 1870 estimuló el desarrollo de la primera predicción estacional operativa en 1886 -realizada por Henry Francis Blanford, primer jefe del Departamento Meteorológico de la India- de la precipitación asociada al monzón de verano para la región que abarca toda la India y Birmania. La predicción se basaba en un método empírico que asociaba la extensión y el espesor variables de la nieve del Himalaya con las condiciones climáticas de las llanuras del noroeste de la India. Sir John Eliot, que sucedió a Blanford al frente del Departamento Meteorológico en 1895, aplicó métodos de análogos para la previsión estacional de las lluvias monzónicas de verano en la India.

Los esfuerzos por mejorar las predicciones estacionales continuaron con el siguiente director del Departamento Meteorológico de la India, Sir Gilbert T. Walker (1904-1924) que inició estudios sistemáticos para desarrollar técnicas objetivas de previsión estacional y también realizó estudios de las variaciones mundiales de parámetros meteorológicos, tales como precipitación, temperatura, presión, etc. La búsqueda de posibles predictores llevó a Walker a identificar



Fuentes de predecibilidad en el sistema climático.

Fuente: modificación sobre esquema original de K. Trenberth, NCAR.

y su importancia relativa en función de la escala temporal.

Sin embargo, la actual infraestructura operativa para las predicciones estacionales, a pesar de ser muy completa y compleja, se encuentra con serios impedimentos para su utilización por parte de los usuarios finales. En primer lugar, por la limitada pericia que tienen los sistemas de predicción estacional, consecuencia de su poca predecibilidad, sobre las latitudes medias y en la fachada euroatlántica en particular. En segundo lugar, porque la toma de decisiones a nivel local requiere información espacial en alta resolución mientras que los sistemas de predicción estacional globales actualmente disponibles no proporcionan esta necesaria alta resolución. En tercer lugar, porque las salidas directas de los modelos globales deben ser corregidas por sesgos, calibradas

tres patrones de fluctuación a gran escala de la presión: la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación del Pacífico Norte (NPO) y la Oscilación del Sur (SO). Walker también introdujo el concepto de correlación y regresión por primera vez en la previsión estacional para eliminar la subjetividad de las técnicas anteriores. La primera previsión objetiva oficial se emitió en 1909 para la precipitación estacional del monzón en toda la India, basada en la técnica de regresión. Walker realizó un trabajo pionero sobre la SO y publicó una técnica de predicción para la precipitación de los monzones en la India que contenía 22 predictores.

La SO, definida como la diferencia en la presión a nivel del mar entre Tahití y Darwin, se relacionó posteriormente con el calentamiento inusual de las aguas superficiales del Océano Pacífico tropical oriental, o El Niño, por Jacob Bjerknes en la década de 1960. Bjerknes, y posteriormente otros definieron estos fenómenos océano-atmósfera vinculados como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

Los episodios de El Niño de 1972/1973 y La Niña de 1973/1974 permitieron observar que las fases opuestas de ENSO



Sir Gilbert T. Walker (1868 - 1958).

Fuente: Wikipedia

tienen impactos significativos, y generalmente opuestos, en los patrones de temperatura y precipitación en todo el mundo y que estos impactos son más pronunciados en las regiones tropicales. El episodio de El Niño de 1982/1983 y

sus anomalías climáticas regionales asociadas permitieron que se reconociera al fenómeno acoplado océano-atmósfera de ENSO como el modo dominante de la variabilidad climática interanual de la Tierra. Estas observaciones, también respaldadas por estudios teóricos, sugerían que la capacidad de predicción en escalas de tiempo estacionales está relacionada con las condiciones de contorno del sistema climático que evolucionan lentamente, tales como la temperatura de la superficie del mar, la cobertura de la nieve, la humedad del suelo, la extensión del hielo marino, etc. La identificación de teleconexiones climáticas globales estadísticamente significativas asociadas al ENSO ha dado lugar a que los parámetros relacionados con ENSO, junto con otros impulsores del clima que varían lentamente, se utilicen como predictores en modelos de previsión empíricos/estadísticos para anomalías de temperatura y precipitación en superficie a gran escala. Los modelos estadísticos también han proporcionado una referencia para evaluar la habilidad de los modelos dinámicos de circulación general de última generación, ahora comúnmente utilizados, para predicción climática estacional.

3 Modelos numéricos

Los primeros pasos hacia la previsión climática estacional basada en modelos dinámicos fueron dados en 1956 por Norman Phillips que había sido reclutado por Von Neumann para trabajar en el Instituto de Estudios Avanzados (Princeton, EE.UU.) con el ordenador ENIAC. Phillips desarrolló un modelo baroclínico de dos niveles para simular patrones mensuales y estacionales de la circulación troposférica inaugurando una nueva era en la ciencia climática ya que por primera vez se pudo deducir el clima de la Tierra a partir de un modelo numérico.

Unos años después (1963), Cecil Leith desarrolló un modelo completo para la simulación atmosférica que incluía múltiples niveles que abarcaban la troposfera y la estratosfera inferior además de una representación del ciclo hidrológico y de las nubes y que puede considerarse como el primer modelo de circulación general atmosférico en el sentido actual del término. Posteriormente otros grupos de investigación se esforzaron por seguir desarrollando modelos de cir-

culación general. Zebiak y Cane (1987) predijeron por primera vez la variabilidad de ENSO con un modelo dinámico simple de océano-atmósfera acoplado. El establecimiento del programa internacional sobre los Océanos Tropicales y la



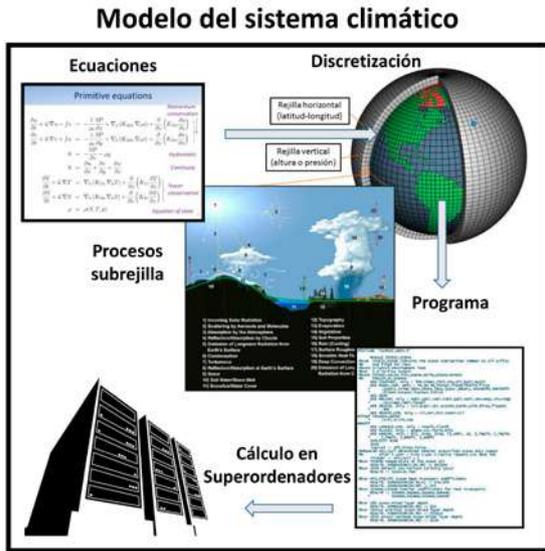
Norman Phillips (1923 - 2019).

Fuente: MIT Museum

Atmósfera Global (TOGA) que duró diez años (1985-1994) y la implantación de un sistema de observación del océano en el Pacífico ecuatorial, condujeron al desarrollo de los actuales y sofisticados sistemas operativos de predicción estacional. La capacidad de predicción de los modelos dinámicos ha mejorado notablemente durante las últimas décadas, principalmente debido a los avances en la estimación de las condiciones oceánicas y atmosféricas iniciales, así como a los avances en la física de los modelos y en la capacidad de cálculo. El carácter caótico del sistema climático por el que una pequeña incertidumbre en la condición inicial puede conducir a cambios sustanciales en la predicción estacional y la necesidad de comunicar la incertidumbre en la predicción más allá del alcance determinista -de aproximadamente una semana- dio lugar a la introducción de los enfoques probabilísticos y de los métodos de predicción por conjuntos tanto para la predicción meteorológica como climática (y estacional en particular).

Los modelos globales distan todavía mucho de reproducir todas las características atmosféricas, en particular cuando se realizan predicciones extendidas a escala estacional -o más largas- con ellos se observa que, una vez sobrepasado el alcance determinista (1-2 semanas), la evolución de los diferentes miembros de un

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (I)



Sistema climático real



Esquema de los modelos climáticos

ensemble generado con un mismo modelo no se ajustan a la climatología observada sino que muestran una deriva patente: las simulaciones extendidas con modelos globales tienden a definir una climatología propia de cada modelo y que es distinta de la observada. De hecho, las integraciones a escala estacional deben ser siempre corregidas por esta deriva de los modelos hacia su propia climatología. Una predicción estacional viene, por tanto, determinada por el conjunto de simulaciones que constituyen un *ensemble* (y que permiten hacer una predicción probabilística) y un conjunto de retro-predicciones (*hindcast*) suficientemente largo (al menos 20 - 30 años) para determinar la climatología del modelo. Las predicciones estacionales con frecuencia se expresan en forma de anomalías referidas a la propia climatología del modelo con el que se han realizado. Cuando se precise disponer de valores absolutos, y no de anomalías, para las predicciones estacionales éstas deben ser corregidas por sesgos y/o calibradas con la ayuda de observaciones.

En consecuencia, un sistema dinámico operativo típico de predicción estacional se basa en un conjunto (*ensemble*) de simulaciones realizadas con un único modelo que se inician a partir de unas condiciones iniciales que muestrean las condiciones observadas y que permiten realizar una predicción probabilística. Esta predicción basada en un *ensemble* debe siempre acompañarse de un conjunto de retro-predicciones (*hindcast* en la literatura sajona) también de alcance estacional -que con los medios de cálculo

actualmente disponibles suelen abarcar al menos 20 años- basadas también en ensembles que permiten definir -al menos aproximadamente- la climatología del modelo.

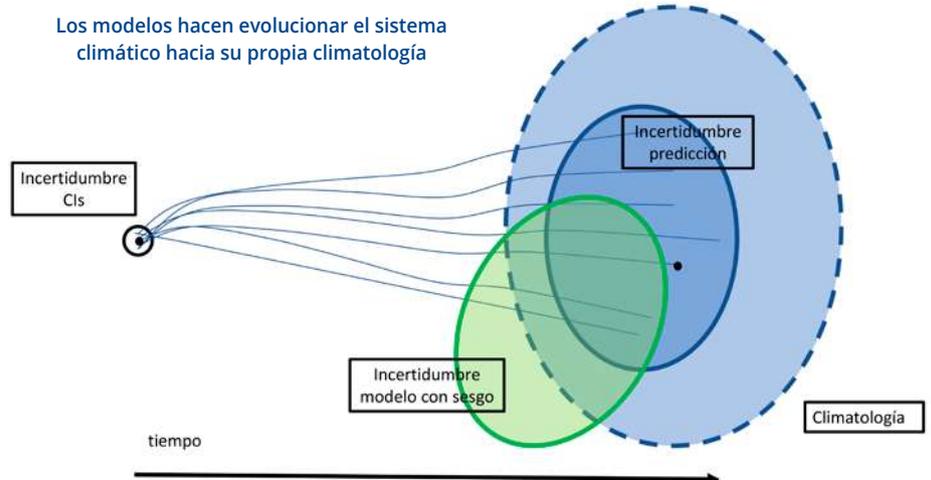
Actualmente coexisten diferentes estrategias para muestrear las condiciones observadas y generar un *ensemble* de simulaciones con un único modelo. Una estrategia consiste en generar un conjunto pequeño (por ejemplo, de 4 miembros) todos los días y -para inflar el tamaño del conjunto- combinar todos los pronósticos producidos durante una ventana de varios días. De esta forma los diferentes miembros del *ensemble* poseen diferentes alcances ya que muestrean las condiciones iniciales en una cierta ventana temporal (*lagged ensemble*) Otra estrategia consiste por el contrario en generar un conjunto grande de miembros correspon-

dientes a un mismo instante del sistema climático (*burst ensemble*). Existen también estrategias híbridas que combinan las dos anteriores. Ambas estrategias tienen ventajas e inconvenientes y no está claro cuál es la óptima aunque deben siempre tenerse en cuenta a la hora de interpretar las predicciones.

Finalmente, debe indicarse que los diferentes sistemas de predicción estacional basados en un modelo dinámico pueden a su vez combinarse para generar un *ensemble* multi-modelo que generalmente posee una mayor pericia que los sistemas basados en un único modelo dinámico.

4 La OMM y los RCOF

El episodio de El Niño de 1997/1998, el más fuerte del siglo XX, proporcionó una muestra de los efectos de las variaciones climáticas en el plazo estacional y del valor potencial de su previsión. Este episodio también coincidió con el éxito de la campaña de observaciones oceánicas a lo largo del Pacífico ecuatorial y el desarrollo de varios modelos de predicción oceánica utilizando estos datos oceánicos. Poco antes de este episodio (1996) se habían establecido por la OMM los Foros Regionales de Perspectivas Climáticas (RCOF, por sus siglas en inglés). Estos foros tienen carácter operativo y reúnen, bien presencial o virtualmente, a expertos -nacionales, regionales e internacionales- en materia de clima, para analizar y evaluar la información climática disponible a escala estacional y finalmente elaborar la predicción estacional mediante consenso de todos los participantes. Los RCOF reúnen a países con características clima-



tológicas comunes para garantizar coherencia en el acceso y la interpretación de la información climática. También a través de la interacción con los usuarios de sectores económicos clave de cada región y con responsables políticos, los RCOF evalúan las posibles implicaciones de las predicciones estacionales en los sectores socioeconómicos más relevantes de la región que abarca cada RCOF. El foro para la región mediterránea (MedCOF) que abarca 34 países está coordinado desde su creación en 2013 por AEMET (<http://medcof.aemet.es>). A su vez MedCOF incluye y coordina dos RCOF subregionales: uno que abarca principalmente la región SE de Europa (SEECOF) y otro que engloba a los países mediterráneos del norte de África (PRESANORD).

El procedimiento actual seguido en las sesiones de MedCOF -y de la mayoría de los RCOF existentes- para generar predicciones estacionales se basa en el análisis de la información disponible por parte de los expertos participantes, en su discusión y finalmente en la elaboración de una predicción estacional consensuada en forma de producto gráfico para la región. Este procedimiento se basa principalmente en el análisis de las fuentes de predecibilidad: i) análisis de las condiciones oceánicas actuales y de su evolución estimada por distintos sistemas de predicción disponibles; ii) análisis de impulsores a escala estacional (patrones de variabilidad y su evolución, memoria asociada a subsistemas y variables de evolución lenta, forzamientos externos (p.ej., grandes erupciones volcánicas)); iii) análisis de la circulación atmosférica actual y su evolución estimada por los distintos sistemas de predicción; iv) predicción de los parámetros climáticos (temperatura y precipitación) en función de la evolución más probable de la circulación atmosférica; v) resumen y mapas de síntesis. Este procedimiento eminentemente subjetivo presenta varios inconvenientes que han sido ampliamente identificados. El proceso de predicción no es rastreable ni reproducible (las previsiones realizadas en temporadas anteriores no pueden ser reproducidas por un grupo

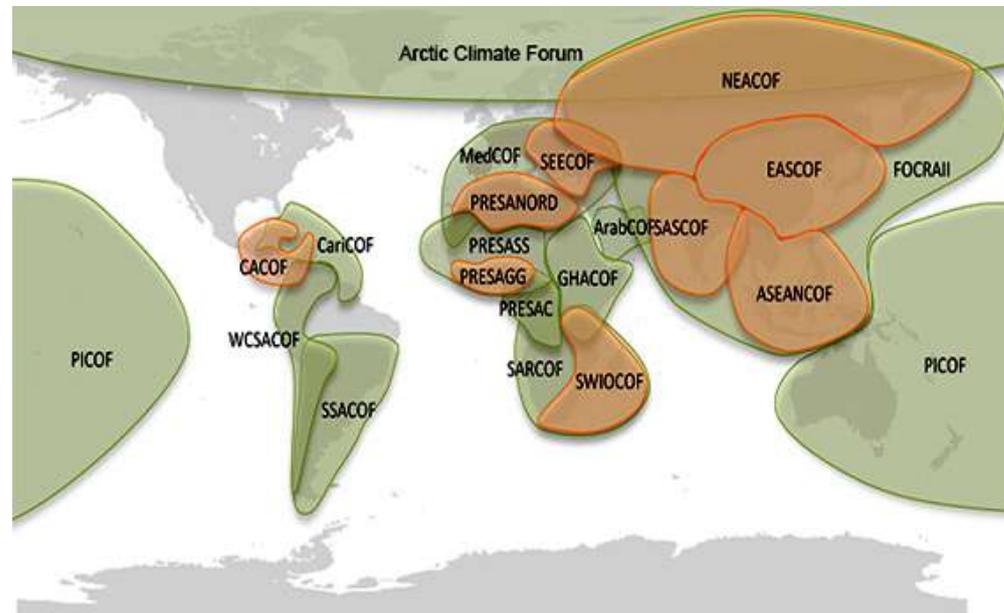
de predicción diferente). Las predicciones no están disponibles en forma digitalizada y, por tanto, apenas pueden utilizarse para el desarrollo posterior de servicios basados en predicciones estacionales. Esta última limitación representa un grave obstáculo para su uso. Además, la generación de productos gráficos -y no numéricos- para las predicciones probabilísticas estacionales impide la verificación de las predicciones utilizando procedimientos e índices de verificación estandarizados.

Típicamente, por tanto, un RCOF analiza los impulsores del clima y la evolución estimada de la circulación atmosférica y de los principales parámetros climáticos proporcionada por los distintos sistemas de predicción disponibles. Es

nes probabilísticas (basadas en terciles) de precipitación de los 8 modelos que integran el sistema C3S de predicción estacional y su combinación con ponderación equiprobable. Este ejemplo muestra una gran similitud entre las diferentes predicciones que no se suele dar habitualmente y que hace mucho más compleja su combinación en forma de una única predicción estacional.

El producto final de una predicción por consenso generada en el marco de los RCOF en la que se combina toda la información disponible son figuras como las que se muestran más abajo para el caso de MedCOF.

Tras 20 años de predicciones estacionales operativas basadas en un pro-



Los RCOF actualmente existentes. Fuente: OMM

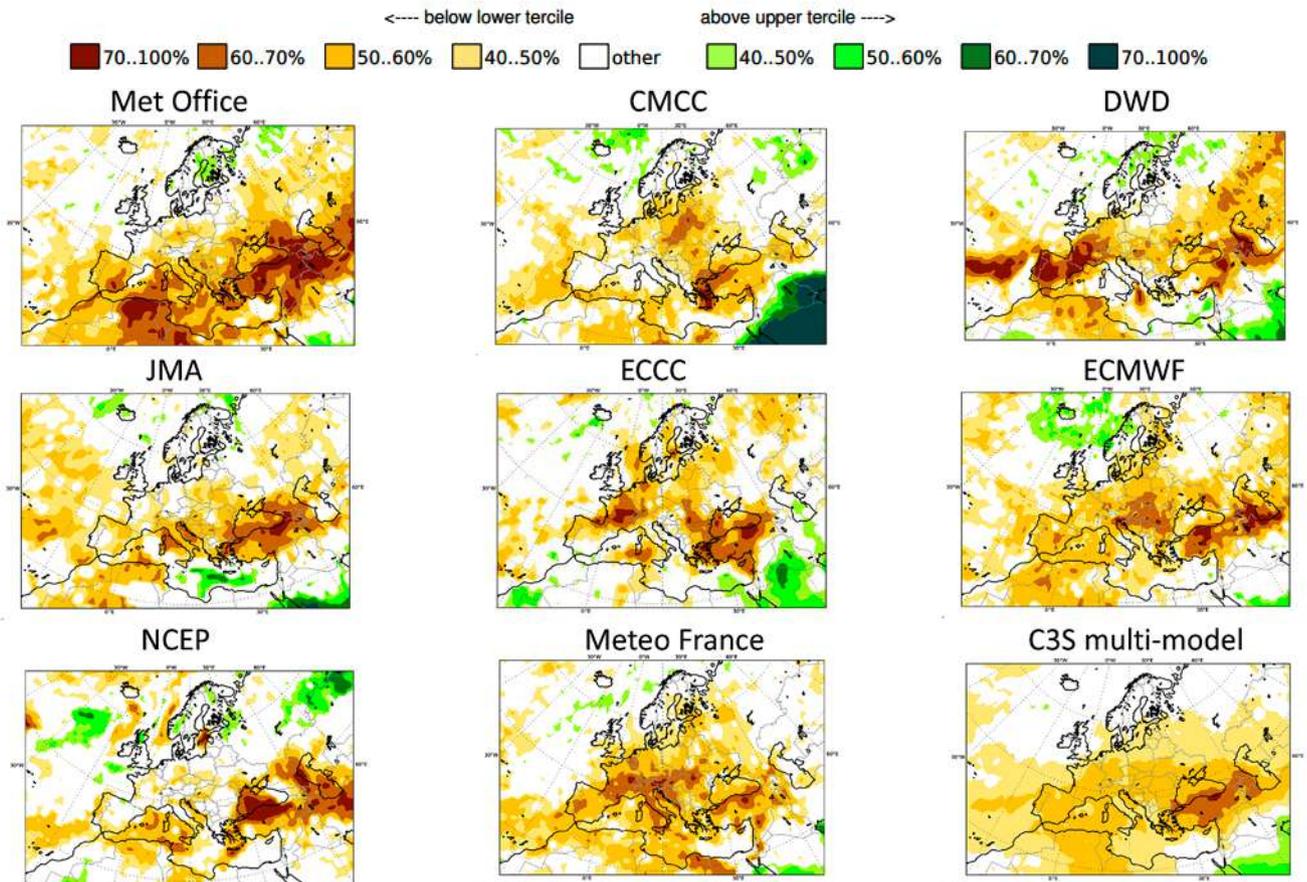
ta evolución para regiones y estaciones con poca predecibilidad suele mostrar gran disparidad entre los diferentes sistemas de predicción. Consiguientemente, durante las sesiones de los RCOF, los expertos se encuentran ante el dilema de combinar las diferentes fuentes de información de forma ponderada -o no en función de diferentes criterios, como por ejemplo la diferente pericia de los sistemas. Actualmente, este pesado o ponderación para combinar la información procedente de los diferentes sistemas o bien se hace de forma subjetiva o bien directamente se asigna de forma automática un igual peso para todos los sistemas de predicción. La figura adjunta muestra el conjunto de prediccio-

cedimiento de consenso, la OMM está actualmente impulsando una transición a procedimientos objetivos que generen adicionalmente datos numéricos utilizables para su posterior aplicación en servicios climáticos basados en las predicciones estacionales. El grado de subjetividad que hay actualmente en todo el proceso durante el análisis de los forzadores climáticos, de las estimaciones de cada sistema dinámico y/o empírico de predicción estacional y su combinación final mediante un procedimiento basado en el consenso es lo que se pretende sustituir por un sistema objetivo y automatizable. Los elementos y procedimientos de esta transición serán objeto de una segunda parte de esta contribución.

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (I)

Probabilidad del tercil más probable de precipitación

(JJA 2022, CI nominales 01/05/2022)



Predicciones del tercil más probable de precipitación para junio-julio-agosto de 2022 basadas en los 8 sistemas operativos de predicción estacional integrados en C3S y su combinación (en esquina inferior derecha). Fuente: https://climate.copernicus.eu/charts/c3s_seasonal

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la OMM y a todo el equipo que participa en el Foro Mediterráneo de Perspectivas Climáticas (MedCOF) tanto por el trabajo conjunto operativo como metodológico a lo largo de los últimos diez años que ha permitido progresar en el desarrollo de la predicción operativa sobre la región mediterránea. Agradecimiento extensivo a todos los participantes en el proyecto ERA4CS MEDSCOPE dedicado a

mejorar el conocimiento sobre la predictibilidad a escala estacional sobre el Mediterráneo, a generar herramientas de pos-proceso para predicciones estacionales y a desarrollar y evaluar servicios climáticos sobre la misma región.

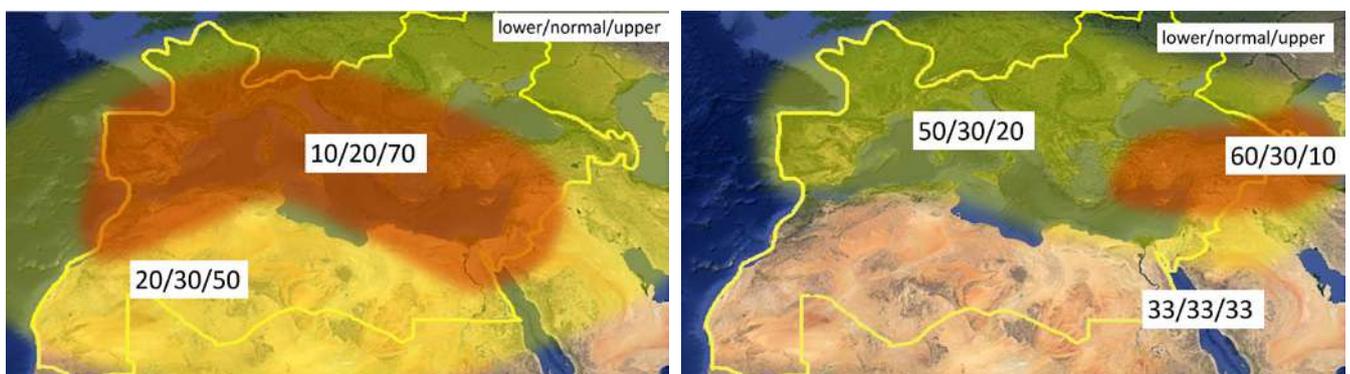
Referencias y lecturas adicionales

● WMO, 2015: Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months. WMO

No. 1156. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3546

● WMO, 2020: Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting. WMO-No. 1246. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10314

● Rodríguez Camino, E., Rodríguez Guisado, E., Sánchez García, E., Franco Manzano, F., Pastor Saavedra, M.A., 2018: Iniciativa MedCOF de predicción estacional consensuada. 6º Simposio Nacional de Predicción, AEMET, <https://dx.doi.org/10.31978/639-19-010-0.641>



Ejemplo de predicción estacional por consenso de temperatura (izquierda) y de precipitación (derecha) basada en terciles para el verano (JJA) de 2022 realizada por MedCOF. Fuente: <http://medcof.aemet.es/>

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (II)

E. RODRÍGUEZ CAMINO, METEORÓLOGO DEL ESTADO Y E. RODRÍGUEZ GUIADO, AEMET

1 Introducción

En la primera parte de esta contribución se ha llegado hasta el establecimiento a fines de la década de 1990 por parte de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) de los Foros Regionales de Perspectivas Climáticas (RCOF, de sus siglas en inglés) para apoyar la implantación operativa de las predicciones climáticas, principalmente a escala estacional. Tras 20 años de desarrollo de los RCOF, la OMM realizó en 2017 una revisión integral del funcionamiento de los mismos para examinar todos los aspectos relacionados con la generación, interpretación y difusión de las predicciones estacionales regionales, a la luz de los recientes avances científicos en este campo y de la mayor disponibilidad y accesibilidad de información climática, con el fin último de acordar la senda de evolución de unos RCOF mejorados y sostenibles. En esta revisión se recomendó la incorporación de predicciones estacionales objetivas que sirvan de apoyo a los RCOF con una colección de productos ampliada, basada en prácticas operativas estandarizadas. Además, se hicieron las siguientes recomendaciones adicionales específicas sobre la senda a seguir para mejorar las operaciones RCOF: i) promover un mayor acceso y utilización de los datos del *ensemble* multi-modelo del centro líder de la OMM para predicciones extendidas de la OMM (LC-LRFMME, de sus siglas en inglés; <https://www.wmolc.org>) que facilitan la producción de pronósticos objetivos por parte de los centros climáticos regionales (RCC, de sus siglas en inglés) de la OMM; ii) los RCC continuarán guiando/coordinando el proceso RCOF; iii) crear mecanismos de retroalimentación en las sesiones del RCOF para proponer mejoras en su funcionamiento; iv) ampliar la cartera de productos RCOF; v) promover vínculos más estrechos de los RCC y RCOF con la comunidad de investigación; etc. (WMO 2017).

Con la formalización de los centros mundiales de producción (GPC, de sus siglas en inglés) de la OMM para pronósticos extendidos en 2006 y el LC-LRFMME en 2009, la infraestructura para los pro-

nósticos estacionales operativos alcanzó un estado de madurez suficiente. En la actualidad, los 14 GPC designados por la OMM proporcionan pronósticos estacionales mensualmente. Los datos de estos pronósticos son recopilados por el LC-LRFMME (a su vez, centro designado por la OMM), que produce un pronóstico estacional consolidado basado en un método multi-modelo. La combinación de los GPC y el LC-LRFMME constituye una base sólida y con autoridad para la provisión de pronósticos estacionales a escala global y es también un elemento para la preparación de pronósticos estacionales específicos para regiones, países y localidades individuales.

Sin embargo, el simple hecho de disponer de diferentes predicciones estacionales procedentes de una variedad de sistemas operativos de predicción procedentes de los GPC y su recopilación y combinación a través del portal del LC-LRFMME no es suficiente. Por esta razón, la OMM ha recomendado seguir un enfoque estratégico estandarizado utilizando la información global proporcionada por estas entidades para desarrollar pronósticos estacionales adaptados a necesidades específicas de regiones o países (WMO 2020). Este enfoque estratégico estandarizado se resume en un conjunto de principios, recomendaciones y orientación técnica general, todo diseñado para facilitar el desarrollo de pronósticos estacionales a nivel regional y nacional basados en los pronósticos estacionales producidos a escala global.

2 Limitaciones del actual procedimiento de predicción por consenso

El procedimiento actual seguido en las sesiones de MedCOF (RCOF para la región mediterránea) para la producción de pronósticos estacionales por consenso tiene varios inconvenientes que han sido ampliamente identificados. En primer lugar, el proceso de pronóstico no es rastreable ni reproducible (los pronósticos realizados en temporadas anteriores no pueden ser

replicados por un grupo de predicción diferente). Además, las predicciones por consenso no están disponibles en forma digitalizada y, por tanto, difícilmente pueden utilizarse para el desarrollo de servicios climáticos basados en dichas predicciones estacionales. Esta limitación representa un serio obstáculo para su uso. Algunos servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales (SMHN) y otras instituciones de investigación de la región desarrollan y operan sistemas operativos de predicción estacional que les permiten desarrollar y producir servicios climáticos basados en dichos sistemas, mientras que para muchos otros que no disponen de tales sistemas, el desarrollo de servicios se enfrenta con serias dificultades. La producción de datos de predicción estacional en lugar de los productos gráficos resultantes del enfoque por consenso sin duda estimulará la explotación de los pronósticos estacionales con nuevos servicios posteriores.

Desde un punto de vista operativo, el enfoque de consenso para generar pronósticos estacionales hace inviable asegurar la verificación de los pronósticos de acuerdo con los estándares establecidos (WMO 2018). El seguimiento de la calidad del pronóstico podría usarse para monitorear las mejoras en la calidad a lo largo del tiempo y/o verificar la mejora (o el deterioro) de los pronósticos estacionales sintetizados producidos por MedCOF con respecto a los resultados de diferentes sistemas de predicción estacional disponibles. El cálculo y seguimiento de los índices de verificación garantiza y cuantifica el valor añadido de las predicciones MedCOF sobre otros sistemas disponibles. La verificación de las predicciones aumentará igualmente el uso y la credibilidad de los pronósticos estacionales MedCOF.

Los recursos disponibles de una amplia variedad de fuentes (p. ej., GPC, WMO LC-LRFMME, Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S, de sus siglas en inglés)) actualmente no se explotan completamente para extraer de manera óptima su potencial de predicibilidad a escalas temporales estacionales. Los sistemas de predicción estacional poseen una pericia

diferente según las regiones, las estaciones y las variables. Se necesita un análisis profundo de la evaluación regional -al menos para las fuentes de información más creíbles- para hacer una selección inicial de modelos previa a su combinación en un sistema multimodelo.

Existe una clara necesidad de un protocolo MedCOF para la cuantificación de la evaluación regional de los diferentes sistemas de predicción disponibles en términos de forzadores (*drivers*), patrones de variabilidad/regímenes meteorológicos y teleconexiones. La simulación correcta de características a gran escala debe considerarse una prioridad al analizar la calidad de los sistemas individuales de predicción estacional. Idealmente, la evaluación de estos sistemas debería llevarse a cabo y resumirse mediante métricas bien definidas que permitan una selección automática de modelos para cada estación en la región mediterránea.

3 Nuevo enfoque objetivo

Como se ha visto en la parte I, un sistema dinámico operativo típico de predicción estacional se basa en un conjunto (*ensemble*) de simulaciones realizadas con un único modelo que se inicializan a partir de unas condiciones iniciales que muestrean las condiciones observadas y que permiten realizar una predicción probabilística. No obstante, cada modelo -como se comentó también en la parte I- evoluciona hacia su propia climatología -distinta de la observada- introduciendo un cierto error sistemático o sesgo al generar dichas simulaciones, por lo que cada predicción basada en un ensemble debe siempre acompañarse de un conjunto de retro-predicciones (*hindcast*) también de alcance estacional (que suelen abarcar al menos 20 años con los medios de cálculo actualmente disponibles). Dichas retro-predicciones, basadas también en ensembles, permiten definir -al menos aproximadamente- la climatología del modelo, y sirven como referencia para interpretar las predicciones. La figura 1 muestra la predicción por conjuntos (de *n* miembros para el *ensemble*) realiza-

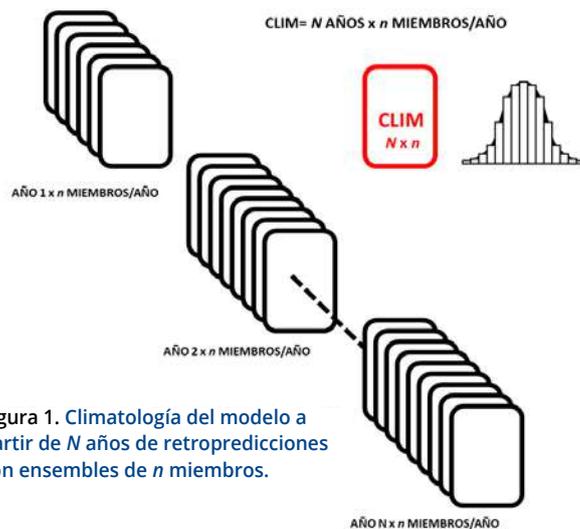


Figura 1. Climatología del modelo a partir de *N* años de retropredicciones con ensembles de *n* miembros.

da para cada mes del período abarcado (*N* años) por el *hindcast*. De esta forma se tiene una climatología del modelo para cada mes de *N x n* años.

En definitiva, una predicción estacional operativa consta: 1) de un *ensemble* de predicciones que permiten realizar una predicción probabilística y 2) de la climatología del modelo determinada a partir de un *hindcast*.

La OMM recomienda un procedimiento para el desarrollo de predicciones estacionales a nivel regional y nacional que se basa en los pasos mostrados en la figura 2. Se parte de las diferentes predicciones generadas por los GPC. El primer paso en el proceso consiste en elegir los modelos GPC que estarán disponibles y seleccionar los modelos que se utilizarán de forma consistente en la región. Luego, los pronósticos de cada modelo deben corregirse debido a las diferencias entre la climatología real y la climatología simulada por un modelo. Existen dos principa-

les categorías de correcciones para los errores sistemáticos de los modelos: i) corrección de sesgos, por la que se ajustan las propiedades del clima simulado para que encajen con las del clima observado sin hacer referencia a la calidad o pericia de la predicción, es decir, sin comparar directamente observaciones con retro-predicciones; y ii) calibración, por la que se modifican los valores previstos para optimizar la pericia de la retro-predicción comparando éstas con las observaciones. Finalmente los diferentes sistemas y miembros se combinan utilizando un método multi-modelo. Además, pue-

de finalmente hacerse una reducción de escala (*downscaling*) o regionalización para incrementar la resolución horizontal de las predicciones. El proceso de desarrollo de las predicciones encapsula el concepto básico de flujo de información desde el nivel global al regional y al nacional.

Como se observa en la figura 2 se parte de una colección de predicciones basadas en ecuaciones dinámicas procedentes de diferentes sistemas operativos de predicción estacional (aunque también pueden utilizarse sistemas de predicción empíricos). La OMM recomienda partir de los sistemas de predicción procedentes de los 14 GPC. El C3S, por su parte, compila en su portal (<https://climate.copernicus.eu/seasonal-forecasts>) una colección de integraciones procedentes de 8 modelos globales que constituyen un subconjunto de los modelos de la OMM. Existen también otros portales que recopilan colecciones de diferentes sistemas de predicción para generar predicciones basadas

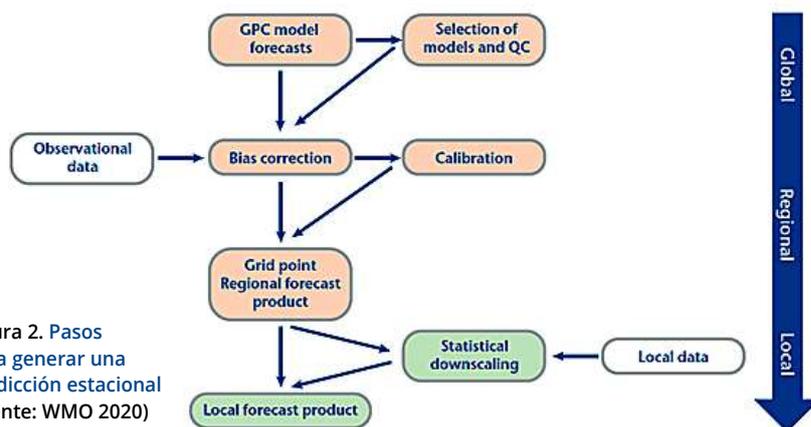


Figura 2. Pasos para generar una predicción estacional (fuente: WMO 2020)

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (II)

en ensembles multi-modelo (véase en (WMO 2020) las diferentes fuentes de información disponibles).

Tanto las predicciones estacionales procedentes de sistemas individuales (que a su vez se basan en ensembles) como las procedentes de un multi-modelo para la latitudes medias -y para la península ibérica en particular- muestran una gran discrepancia entre sí y además poseen una pericia muy marginal, y frecuentemente restringida a ciertas ventanas de oportunidad, comparada con la predicción basada en la climatología, por lo que la selección de los modelos y de los miembros que integren el ensemble será crítico para mejorar la pericia de las predicciones estacionales. Por ventanas de oportunidad entendemos las estaciones, las regiones o los estados particulares del sistema climático que poseen una predecibilidad y pericia altas.

4 Puesta en operación de la predicción estacional objetiva

La práctica actual en los RCOF para realizar predicciones estacionales por consenso, como se muestra en la figura 3, pone especial énfasis en el análisis de las fuentes de predecibilidad (incluyendo las condiciones oceánicas actuales y su posible evolución, los impulsores del clima a escala estacional, las teleconexiones, etc.), de la circulación atmosférica actual y su evolución simulada por los distintos sistemas de predicción buscando siempre la consistencia entre la evolución simulada por los modelos y la canónica (basada en la climatología) asociada a los distintos impulsores a escala estacional. A continuación se propone, basado en el anterior análisis, la probable evolución atmosférica expresada en forma de patrones de variabilidad y/o

regímenes meteorológicos con la correspondiente predicción de temperatura y precipitación basada en la climatología.

El nuevo procedimiento objetivo, tal y como se está implementando en MedCOF, pone especial énfasis en la selección de los sistemas que posteriormente se van a combinar para generar la predicción regional. Para tal selección se prestará especial atención a la capacidad de los diferentes sistemas para simular los impulsores, patrones de variabilidad y teleconexiones que son relevantes en las diferentes estaciones para la región de interés. El nuevo procedimiento también incluye la corrección de los sistemas seleccionados, su regionalización y finalmente su combinación y presentación en forma de una rejilla que proporcione datos para posteriores aplicaciones y para realizar una verificación objetiva estandarizada.

Actualmente no hay un acuerdo generalizado sobre la mejor forma de postprocesar las predicciones estacionales procedentes de diferentes sistemas de predicción estacional. Generalmente, una combinación multi-modelo proporciona más pericia que el mejor de los sistemas de predicción individuales. Además la compensación de errores hace que esta combinación multi-modelo mejore la consistencia y la fiabilidad (véanse en (WMO 2018) los atributos de la bondad de las predicciones). Por otra parte, la predicción multi-modelo tiende a tener una pericia comparable a la que se tiene con un sistema basado en un modelo tras su calibración. Los sistemas de predicción multi-modelo tienden a beneficiarse menos de la calibración que los sistemas basados en modelos individuales. Los efectos de la combinación multi-modelo y de la calibración varían grandemente entre zonas geográficas, variables y modelos considerados (Doblas-Reyes et al. 2005).

Para poner en operación un sistema de predicción estacional basado en la combinación de información de diferentes sistemas utilizando procedimientos objetivos y susceptibles de ser automatizados es necesario determinar los objetivos y fines de dicha predicción (Hemri et al. 2020). Una opción para combinar las diferentes fuentes de información (opción 1 en la figura 4) es generar mapas probabilísticos (p.ej., basados en terciles) de temperatura y precipitación. En este caso se puede partir de las probabilidades proporcionadas por cada sistema individual y promediarlas a continuación (con o sin ponderación). Esta opción no genera miembros individuales que puedan a su vez ser utilizados para servicios climáticos posteriores en la cadena de producción. Si lo que se pretende es poner el foco en las aplicaciones de la predicción estacional, en este caso habría que seguir otro procedimiento (opción 2 en la figura 4) en el que se partiría de los miembros de cada sistema individual convenientemente corregidos para generar un gran ensemble que integre todos los miembros de los sistemas individuales. Los miembros de este gran ensemble proporcionarían los datos necesarios para alimentar las aplicaciones posteriores (p.ej., hidrológicas, agrícolas, energéticas, etc.)

Tampoco hay suficiente acuerdo sobre la ponderación de los sistemas multimodelo y de los miembros individuales de un sistema basado en un único modelo. Las limitaciones impuestas por un muestreo insuficiente derivado de periodos de retro-proyecciones que raramente superan los 30 años hace que los intentos de métodos más complejos de ponderación de multi-modelos y de miembros de sistemas basados en un único modelo hayan sido hasta ahora muy limitados.

La falta de consenso científico para postprocesar de forma operativa las predicciones estacionales hace que se plantee un abanico de posibles estrategias. En un contexto regional, MedCOF está desarrollando una estrategia para la región mediterránea que se basa en los siguientes puntos para avanzar en la predicción estacional operativa:

- Dos líneas sucesivas de desarrollo para la combinación de los distintos sistemas provenientes de los diferentes GPC. Inicialmente se comenzaría proporcionando solamente datos por ca-

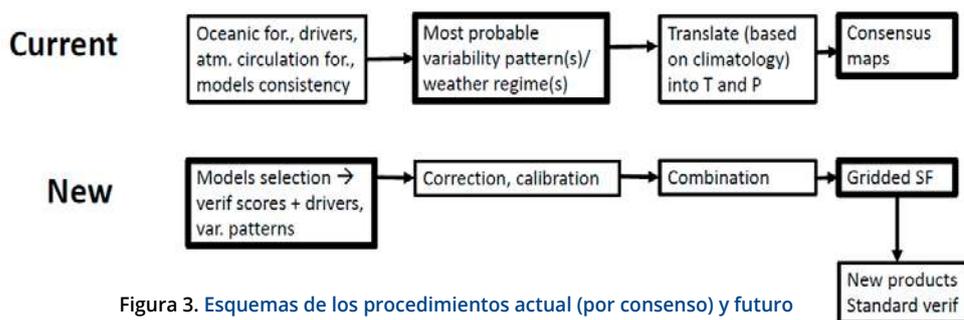


Figura 3. Esquemas de los procedimientos actual (por consenso) y futuro (objetivo) para la predicción estacional regional operativa (fuente: MedCOF)

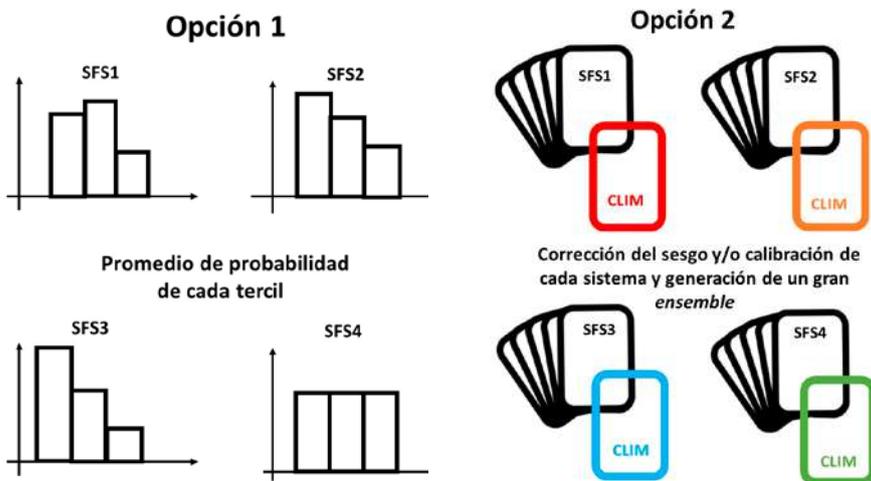


Figura 4. Opciones para combinar predicciones estacionales procedentes de diferentes centros operativos

tegorías probabilísticas (p.ej., terciles). Para ello se procedería a promediar las probabilidades de cada categoría suministradas por los diferentes sistemas contribuyentes. Esto permitiría una rápida implementación. En una segunda etapa, se proporcionarían los miembros del ensemble compuesto a partir de los diferentes sistemas lo que precisaría de su corrección/calibración previa y de alguna estrategia para su combinación. Esta segunda línea es más adecuada para el desarrollo de posteriores servicios climáticos complejos.

- El nuevo procedimiento objetivo se iniciará en paralelo con el actual procedimiento por consenso para facilitar la transición y para comparar ambos enfoques.

- Como los modelos C3S poseen más características comunes entre sí -resolución espacial/temporal, periodo mínimo de retro-predicciones, fecha de emisión, número de miembros mínimo en el ensemble tanto de retro-predicciones como de predicciones operativas, etc.- que los modelos del LC LRFMME, se partirá inicialmente de esta colección de sistemas para su posterior selección.

- Para la selección de modelos se prestará especial atención a la capacidad de los mismos para simular los patrones de variabilidad, forzadores y teleconexiones relevantes en cada estación sobre el dominio mediterráneo. Para esta selección se incorporarán mediante su objetivación los métodos basados en el conocimiento experto que actualmente se utilizan en el procedimiento de consenso.

- Como actualmente la mayoría de los periodos de retro-predicción no alcan-

zan los 50 años, es muy improbable que los métodos de combinación que utilizan ponderación de los miembros mejoren los resultados basados en igual peso para las diferentes estaciones. En consecuencia, se comenzarán las operaciones utilizando pesos iguales y al mismo tiempo se progresará en el desarrollo de métodos más avanzados basados en la ponderación de miembros y modelos.

- Se calcularán los índices de verificación estándar en los periodos de retro-predicción para monitorear la progresión de las mejoras de las sucesivas versiones del sistema de procesado MedCOF y su comparación con los sistemas individuales de los GPC.

- Se explotarán de forma operativa los resultados del proyecto MEDSCOPE (<https://www.medscope-project.eu>). El proyecto MEDSCOPE ha desarrollado conocimiento y herramientas para apoyar específicamente las tareas asociadas a la implementación de la predicción estacional objetiva operativa en la región mediterránea.

- Se procederá a una distribución racional de las tareas entre los nodos RCC de las Asociaciones Regionales I y VI de la OMM conjuntamente con las principales instituciones de investigación que participan en MedCOF y que han participado en el proyecto MEDSCOPE (p.ej., CMCC, BSC, AEMET).

- Dado el diferente nivel de desarrollo y experiencia en predicción estacional operativa dentro de la región MedCOF, se promoverán eventos que faciliten el intercambio y transferencia de conocimientos e información en la región.

5 Maximizando la pericia mediante los servicios climáticos

Por servicio climático se entiende habitualmente la provisión de información climática para ayudar en la toma de decisiones en sectores afectados por las condiciones climáticas. El servicio climático debe responder a las necesidades de los usuarios, debe estar basado en información, experiencias y procedimientos científicamente demostrados y, finalmente, debe requerir el compromiso y colaboración entre usuarios y suministradores. Aunque hay muchas definiciones de servicios climáticos, todas tienen frecuentemente en común la idea de generación de información climática a medida de las necesidades de cada usuario que facilite la toma de decisiones mediante productos adaptados en forma de aplicaciones móviles, aplicaciones web o cualquier otro tipo de presentación amigable. La transformación de los datos climáticos en productos específicos que faciliten el proceso de toma de decisiones en los sectores afectados por las condiciones climáticas consiste en una serie de pasos que se esquematizan en la figura 5 (Mañez Costa et al. 2021). La variabilidad climática en diferentes escalas temporales juega un papel relevante en muchos sectores sensibles al clima. En particular, la estimación de la variabilidad a escala estacional es especialmente demandada por sectores tales como el agrícola, hidrológico, energético, etc. Aunque se han producido mejoras en la pericia de las predicciones climáticas a escala estacional durante su desarrollo en los últimos 20 años, estas predicciones tienen todavía una pericia baja en las latitudes extratropicales y en Europa en particular. Como resultado de esta baja pericia, las predicciones de los diferentes sistemas tienden a mostrar una falta de consistencia entre sí que ha impedido hasta ahora la utilización automática de las salidas de los modelos.

Muchos servicios climáticos sectoriales comparten los pasos mostrados en la figura 5. Partiendo de la salidas de un único modelo o de una combinación de ellos, se procede a corregir, calibrar, regionalizar y combinar los datos para extraer y sintetizar la información climática relevante a escala estacional. El siguiente paso consiste en la aplicación de mode-

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (II)

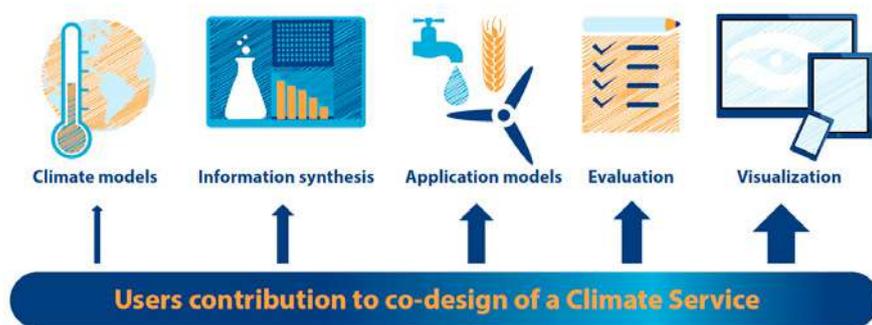


Figura 5. Pasos en la generación de servicios climáticos basados en predicciones climáticas

los de aplicación que traducen la información climática en forma de variables o indicadores definidos por los usuarios como, p.ej., producción de una cosecha (expresada en toneladas por Ha), aporte de agua a un embalse, factor de capacidad para la energía eólica etc. Finalmente, se generan productos basados en estos indicadores (bien sean probabilísticos o deterministas) que se presentan en forma visual. La pericia de cualquier indicador generado debe idealmente ser verificada en una colección de retro-predicciones que al menos abarque un periodo de 20-30 años. Esta verificación nos permitirá estimar la fiabilidad de estos indicadores para su utilización en un proceso de toma de decisiones. Los diferentes pasos conducentes a la generación de un servicio climático expresado en forma de un indicador sectorial específico normalmente contribuyen a mejorar la pericia de la predicción estacional de las variables climáticas básicas (como temperatura, precipitación, viento, etc.). El paso de síntesis de los datos climáticos que corrige, regionaliza y combina diferentes fuentes de información contribuye a mejorar la pericia de las variables climáticas previstas, como también lo puede hacer el modelo de aplicación que expresa la información climática en forma de indicadores sectoriales. Los modelos de aplicación utilizan información adicional como características fisiográficas muy detalladas en el caso de modelos hidrológicos o como la memoria climática acumulada en el caso de los modelos de crecimiento de especies vegetales. Todos estos pasos contribuyen a mejorar acumulativamente la pericia de las predicciones a escala estacional. Puede verse un ejemplo de la pericia mejorada en los sucesivos pasos conducentes a generar un servicio climático en Sánchez-García et al. (2022).

6 Consideraciones finales

La implementación de las predicciones estacionales operativas objetivas para los RCOF es una recomendación de la OMM (decisión 9 del 72º Consejo Ejecutivo). Para ello la OMM ha desarrollado una infraestructura adecuada basada en el establecimiento de GPC, RCC, RCOF que prestan apoyo a los SMHN. La OMM también ha desarrollado guías con recomendaciones para facilitar la transición hacia la predicción estacional objetiva, incluidos los niveles regionales y nacionales.

MedCOF ha sido el principal beneficiario del proyecto MEDSCOPE cuyos principales objetivos han sido: i) el aumento del conocimiento de las fuentes de predecibilidad a escala estacional en la región mediterránea; ii) desarrollo de herramientas avanzadas para sintetizar la información climática disponible de diferentes GPC; iii) desarrollo y evaluación de servicios climáticos basados en predicciones estacionales.

Como no hay un consenso generalizado para postprocesar las salidas de los modelos combinando las diferentes fuentes de información, Med-COF ha generado discusiones y documentos internos que proporcionan una hoja de ruta para generar predicciones estacionales operativas objetivas para la región mediterránea. Esta hoja de ruta plantea implementar inicialmente soluciones sencillas que se irán actualizando a medida que se vaya alcanzando consenso científico para el postproceso de las salidas de los modelos estacionales.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la OMM y a todo el equipo que participa en MedCOF tanto por el trabajo conjunto operativo como metodoló-

gico a lo largo de los últimos 10 años que ha permitido progresar en el desarrollo de la predicción operativa sobre la región mediterránea. Agradecimiento extensivo a todos los participantes en el proyecto ERA4CS MEDSCOPE dedicado a mejorar el conocimiento sobre la predecibilidad a escala estacional sobre el Mediterráneo, a generar herramientas de postproceso para predicciones estacionales y a desarrollar y evaluar servicios climáticos sobre la misma región.

Referencias

- Doblas-Reyes, F.J., Hagedorn, R., Palmer, T., 2005: The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting-II. Calibration and combination. *Tellus A Dyn Meteorol Oceanogr* 57(3):234-252. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i3.14658>
- Hemri, S., Bhend, J., Liniger, M. A., Manzanos, R., Siebert, S., Stephenson, D. B., Gutiérrez, J. M., Brookshaw, A., Doblas-Reyes, F. J., 2020: How to create an operational multi-model of seasonal forecasts? *Climate Dynamics*, 55(5-6), 1141-1157. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05314-2>.
- Máñez Costa, M.; Oen, A.M.P.; Neset, T.-S.; Celliers, L.; Suhari, M; Huang-Lachmann, J-T.; Pimentel, R.; Blair, B.; Jeuring, J.; Rodríguez-Camino, E.; Photiadou, C.; Jerez Columbié, Y.; Gao, C.; Tudose, N.-C.; Cheval, S.; Votsis, A.; West, J.; Lee, K.; Shaffrey, L.C.; Auer, C.; Hoff, H.; Menke, I.; Walton, P.; Schuck-Zöllner, S., 2021. Co-production of Climate Services. CSPR Report No 2021:2, Centre for Climate Science and Policy Research, Norrköping, Sweden. This report is part of the CSPR Report Series (ISSN 1654-9112) No. 2021:2 ISBN 978-91-7929-199-0 (PDF). <https://doi.org/10.3384/9789179291990>
- Sánchez-García, E., Abia, I., Domínguez, M., Voces, J., Sánchez, J.C., Navascués, B., Rodríguez-Camino, E., Garrido, M.N., García, M.C., Pastor, F., Dimas, M., Barranco, L., Ruiz del Portal, C., 2022. Upgrade of a climate service tailored to water reservoirs management. *Clim. Serv.*, 25, 100281, <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100281>
- WMO, 2015: Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months. WMO No. 1156. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3546
- WMO, 2017: Global RCOF review meeting report. WMO Workshop Rep., 56 pp., http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/meetings/documents/rcofs2017/Report_RCOF_Review_2017_final.pdf
- WMO, 2018: Guidance on Verification of Operational Seasonal Climate Forecasts. WMO-No. 1220. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4886
- WMO, 2020: Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting. WMO-No. 1246. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10314