

Gestión de la calidad del aire y predicción del tiempo durante los Juegos Olímpicos de Pekín de 2008

por Jianjie Wang¹, Xiaoye Zhang², Tom Keenan³ y Yihong Duan⁴

Introducción

Los XXIX Juegos Olímpicos se celebraron en Pekín del 8 al 24 de agosto de 2008. Más de 10 000 atletas procedentes de 204 países, territorios o regiones participaron en ellos. Este acontecimiento fue excepcional desde una perspectiva histórica por su dimensión, variedad de eventos deportivos y de actividades relacionadas con ellos, operaciones de infraestructuras municipales y actividades diarias del público en general. Más de 1,7 millones de voluntarios se encargaron de prestar un amplio abanico de servicios. El análisis de los datos meteorológicos históricos muestra que los emplazamientos olímpicos, a finales del verano, están expuestos a importantes riesgos por tormentas con intensas lluvias, rayos, fuertes vientos y granizo. El tiempo apacible también puede presentar desafíos, como por ejemplo la niebla, la calima o unas condiciones estables y de calor, que son menos propicias para la dispersión de los contaminantes atmosféricos y pueden dar lugar a una mala calidad del aire.

Por consiguiente, los servicios meteorológicos afrontaron importantes retos a la hora de minimizar los impactos negativos de los fenómenos perjudiciales. Para que los Juegos fueran un éxito, se tuvo que hacer frente a múltiples desafíos relacionados con la meteorología y la calidad del aire. Para ello, China y sus socios internacionales emprendieron una serie de soluciones sin precedentes

relacionadas con la gestión de la contaminación atmosférica, la vigilancia y la predicción meteorológica.

En la dirección http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin_en/index_en.html se dispone de un informe más detallado.

Gestión y medidas relacionadas con la calidad del aire

El gobierno municipal de Pekín adoptó algunas normas destinadas a reducir temporalmente las emisiones para garantizar una buena calidad del aire durante los Juegos Olímpicos y Paralímpicos, y también a fin de cumplir el compromiso adquirido para poder albergar los Juegos. Se prohibió el tráfico por las carreteras de Pekín a alrededor de 300 000 vehículos "con distintivo amarillo" desde el 1 de julio hasta el 20 de septiembre de 2008 (dos días después de la conclusión de los Juegos Paralímpicos de 2008), y se paralizaron todas las actividades relacionadas con la construcción. Además, se redujo el tráfico estableciendo que todos los vehículos de Pekín con placas de matrícula que terminaran en cifra impar/par tendrían permitida la circulación únicamente en los días impares/pares desde el 20 de julio al 20 de septiembre. Asimismo, se adoptaron medidas de reducción de las emisiones, centradas principalmente en la combustión del carbón.

De junio a septiembre de 2008 la Administración Meteorológica de China (CMA) dirigió una campaña de análisis y vigilancia en tiempo real, ininterrumpida y extensa, de apoyo a la logística de los Juegos y también posibilitó la realización de una evaluación única de los efectos producidos por los intentos de mejorar la calidad del aire (Zhang y otros, 2008). En la operación de vigilancia se hizo un seguimiento de las concentraciones de partículas de PM₁₀ y PM_{2,5} en el aire, incluyendo las fracciones de aerosol de sustancias orgánicas, sulfato, nitrato y amonio en las concentraciones de PM₁, carbono negro, espesor óptico del aerosol, ozono y otros gases reactivos entre los que se incluyen el óxido nítrico, el dióxido de nitrógeno, el óxido de nitrógeno, el carbono y el dióxido de azufre. La vigilancia en tierra se reforzó con medidas del espesor óptico de los aerosoles y del dióxido de nitrógeno en columna a partir de la recuperación de información satelital y del análisis de los procesos meteorológicos y sus características. La vigilancia se llevó a cabo en tres estaciones urbanas situadas a diferentes alturas y en cuatro estaciones rurales.

Durante el período de los Juegos, en Pekín disminuyeron drásticamente algunos agentes contaminantes atmosféricos. Los análisis pusieron de relieve que esta reducción no estaba relacionada únicamente con la aplicación de las medidas de control, sino que también estaba fuertemente vinculada a las condiciones meteorológicas. Concretamente, la región subtropical de altas presiones se encontraba al sur, por lo que las condiciones meteorológicas de Pekín estaban dominadas por la interacción de una vaguada que, en el seno de los vientos del oeste, se

1 Oficina Meteorológica de Pekín, Administración Meteorológica de China, Pekín

2 Academia China de Ciencias Meteorológicas, Administración Meteorológica de China, Pekín

3 Centro de Investigación del Servicio Meteorológico, Servicio Meteorológico, Melbourne (Australia)

4 Centro Meteorológico Nacional, Administración Meteorológica de China, Pekín

desplazaba frecuentemente hacia el este, más un anticiclón continental frío, con días de nubes y claros o con chubascos. Tras extraer las estimaciones del cambio en las concentraciones como consecuencia de las condiciones meteorológicas, los análisis arrojaron que la eliminación de los automóviles con distintivo amarillo después del 1 de julio de 2008 había producido reducciones de: alrededor del 40 por ciento en las concentraciones de diversos gases reactivos vinculados a los vehículos a motor; el 15-25 por ciento en las concentraciones de partículas de PM_{10} ; alrededor del 25-30 por ciento en las concentraciones de carbono negro relacionado con el tráfico; y el 25-40 por ciento en la concentración de partículas orgánicas y nitrato.

La introducción de las normativas sobre la restricción de los vehículos a motor con placas de matrícula impares/pares desde el 20 de julio de 2008 produjo una reducción adicional de un 15-20 por ciento aproximadamente en las concentraciones de varios gases reactivos. Aunque las concentraciones totales de partículas de PM_{10} aumentaron ligeramente, el carbono negro, las partículas orgánicas y los nitratos se redujeron entre un 6 y un 20 por ciento. Sin embargo, los productos de amonio y los sulfatos se incrementaron alrededor de un 10 por ciento, mientras que la concentración de ozono creció un 30 por ciento.

Antes de los Juegos, y durante el desarrollo de los mismos, la CMA ofreció predicciones a dos días vista de partículas de PM_{10} , visibilidad y ozono al gobierno municipal de Pekín y, posteriormente, a la Oficina Meteorológica de Pekín y a la Oficina Municipal de Protección del Medio Ambiente de la misma ciudad. Los predictores utilizaron el Modelo ambiental y químico atmosférico unificado de la CMA (CUACE) en el sistema de predicción de calimas y ozono. Se trata de un sistema unificado de modelización de la química atmosférica y el medio ambiente que puede acoplarse fácilmente con diferentes modelos meteorológicos y climáticos para diversas escalas temporales y espaciales. Para esta aplicación concreta, el CUACE se acopló íntegramente con el modelo de predicción MM5, con una resolución horizontal de 54 km en Asia y Europa oriental. Las condiciones iniciales y de contorno se obtuvieron a partir del modelo operativo de predicción global a medio plazo del CMA. El CUACE comprendía un

módulo químico para gases, conversiones de gas a partículas, aerosoles orgánicos secundarios y aerosoles.

Partiendo del inventario de emisiones regionales del CMA extraído de Cao (2006), el modelo CUACE se ejecutó en tiempo real desde el 1 de julio hasta el 30 de septiembre. Todos los días se suministraron productos a dos días vista, en media de 12 horas e intervalos de 2 horas de PM_{10} , ozono y visibilidad para Pekín como guía para la predicción (Figura 1) en los pronósticos de tres a siete días vista de las condiciones meteorológicas estabilizadas teniendo en cuenta un parámetro que relaciona la calidad del aire con las condiciones del tiempo (índice Plam). Este índice se calculó a partir de la relación entre las concentraciones de PM_{10} y datos meteorológicos fundamentales obtenidos con los datos estivales de Pekín y sus áreas colindantes entre 2000 y 2007. Los datos meteorológicos se refieren, entre otras variables, a la temperatura del aire, la humedad relativa, el viento, la presión atmosférica, la visibilidad, la nubosidad, la evaporación, la estabilidad del aire y un breve historial de los fenómenos meteorológicos de los días precedentes. Los índices Plam más altos y la mala calidad del aire ($> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3 PM_{10}$) estaban asociados a temperaturas altas, humedad elevada, velocidad del viento más

baja y tiempo estable. La Figura 1 muestra un ejemplo del uso del índice Plam. A cada uno de los emplazamientos situados fuera de Pekín se le asignó una ponderación en el Plam según la velocidad y dirección del viento en comparación con la llegada de la masa de aire a Pekín. Un valor más alto del índice Plam en un lugar situado en las zonas colindantes con Pekín pone de manifiesto que las condiciones meteorológicas en esa área favorecerían el transporte de agentes contaminantes hacia Pekín.

Proyectos de demostración del Programa Mundial de Investigación Meteorológica de la OMM

Bajo los auspicios de la CMA, el Centro de servicios meteorológicos para los Juegos de Pekín (BOMSC) pudo dar servicios meteorológicos "característicos y de alto nivel" de forma satisfactoria. Estos servicios se basaron en una predicción meteorológica operativa y en unos sistemas de alerta así como en las plataformas interactivas hombre-máquina. Tras una evaluación preliminar, los servicios meteorológicos prestados

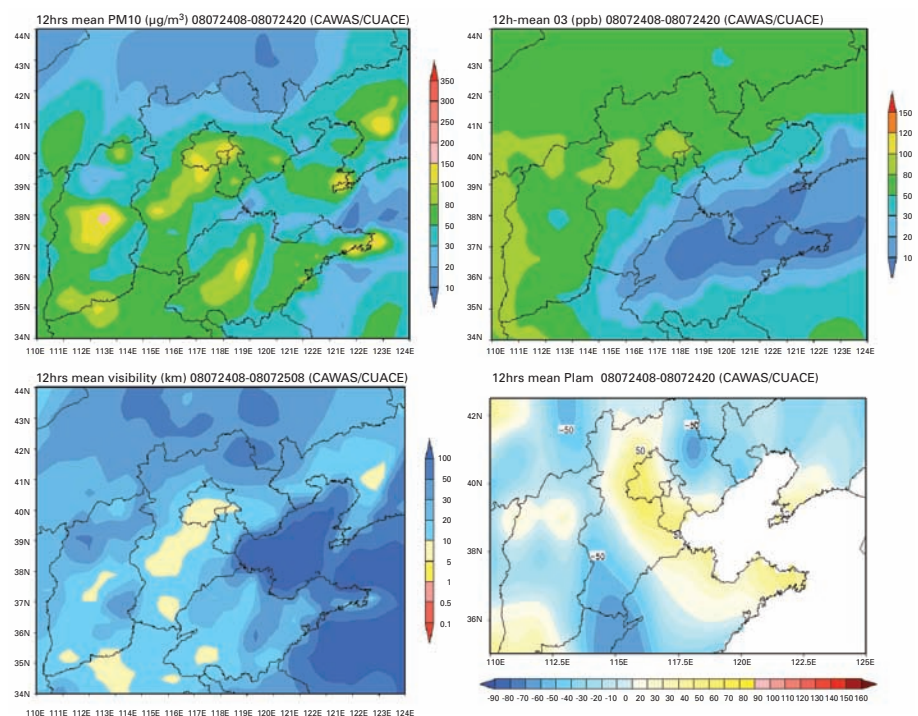


Figura 1 – Guía de predicción a 12 ó 24 horas de la concentración de PM_{10} , visibilidad y ozono, así como índice Plam, para Pekín y sus zonas colindantes según el modelo CUACE del Centro de observación y servicios atmosféricos de la CMA, comenzando a las 08 BTC del 24 de julio de 2008

en el seno de este entorno tan complejo y desafiante desde el punto de vista meteorológico obtuvieron una aceptación pública del 93,1 por ciento. Estas posibilidades se desarrollaron y probaron con bastante antelación, movilizando los recursos y la experiencia meteorológica nacional, y utilizando una cooperación internacional eficaz. Los proyectos de demostración del Programa Mundial de Investigación Meteorológica (PMIM) de la OMM constituyen dos ejemplos de esta colaboración internacional.

Teniendo en cuenta el proyecto OMM/PMIM de los Juegos Olímpicos de Sídney de 2000, la CMA diseñó los planes necesarios en 2003 con el fin de contar con un Proyecto de demostración de predicciones del PMIM (B08FDP) y con un Proyecto de investigación y desarrollo (B08RDP) que ofreciesen apoyo técnico a los servicios meteorológicos y a la predicción del tiempo durante los Juegos Olímpicos y Paralímpicos de Pekín de 2008.

Sistemas de predicción inmediata participantes

BJ-ANC (Oficina Meteorológica de Pekín y Centro Nacional de Investigación de la Atmósfera (CNIA) de los Estados Unidos)

CARDS (Servicio Meteorológico de Canadá)

GRAPES-SWIFT (Academia China de Ciencias Meteorológicas)

STEPS y TIFS (Servicio Meteorológico de Australia)

SWIRLS (Observatorio de Hong Kong, China)

NIWOT (CNIA)

MAPEL (Universidad McGill de Canadá y Weather Decision Technologies de Estados Unidos)

Tabla 1 – Datos suministrados al proyecto B08FDP en el verano de 2008 por parte de la Oficina Meteorológica de Pekín

| Tipo de dato | N.º de estaciones y localización | Frecuencia de actualización |
|----------------------|--|-----------------------------|
| Radar Doppler | 4; con sincronización de tiempo | 6 minutos |
| EMA | 106; en Pekín y alrededores | 5 minutos |
| Radiosonda | 5; en Pekín y alrededores | 6 horas |
| Perfilador de viento | 1; en Pekín | 6 minutos |
| PNT-RUC | Resolución horizontal de 3 km, abarcando Pekín y zonas colindantes | 3 horas |
| Satélite-FY2C | 1 | 30 minutos |
| Rayos | 1 en Pekín y 2 en la provincia de Hebei | Tiempo real |

El objetivo general del proyecto B08FDP era el de demostrar y cuantificar los beneficios de una predicción inmediata (dentro de un plazo de 0 a 6 horas, especialmente en el margen de tiempo de 0 a 2 horas), centrándose en la predicción de fenómenos meteorológicos de gran impacto y empleando la tecnología y los conocimientos científicos más avanzados. Este proyecto estuvo dirigido a desarrollar, aplicar y demostrar sobre el terreno los sistemas de predicción inmediata para las tormentas convectivas a nivel local y a utilizar los productos obtenidos a partir de estos sistemas con fines de predicción operativa y de realización de evaluaciones de los beneficios socioeconómicos para los usuarios finales. En el cuadro adjunto se mencionan los ocho sistemas de predicción inmediata que participaron.

El proyecto B08FDP se desarrolló durante tres años y medio, con dos pruebas en los veranos de 2006 y 2007 destinadas a mejorar los sistemas y a optimizar los algoritmos individuales de extrapolación de tormentas, estimación cuantitativa de la precipitación, generación de productos y otras tareas. Las pruebas de campo también permitieron que los sistemas pudieran adaptarse a los datos locales, a los cálculos y al entorno de red. El Servicio Meteorológico de Australia desarrolló un sistema de verificación de predicciones en tiempo real, que fue transferido a la Oficina Meteorológica de Pekín. A mediados de julio de 2008 todos estos sistemas cumplían los requisitos de demostración. Estaban prestos y dispuestos para recibir y procesar, en tiempo real, los datos de observación local frecuentes y multivariados (véase la Tabla 1), y para generar productos destinados a la predicción (véase la Tabla 2) y a la verificación en tiempo real.

Con el fin de determinar las dificultades técnicas surgidas durante las diferentes fases de la implantación, y para analizar las soluciones, identificar a los grupos de trabajo responsables y estudiar las estrategias y cronologías de las actividades principales, se celebraron tres seminarios internacionales y varias conferencias telefónicas. Los aspectos técnicos fundamentales incluían el control de la calidad de los datos obtenidos por radar, la sincronización de los mismos, el mosaico tridimensional de los datos radar sin procesar y la transferencia de los resultados de la investigación a la operatividad. En Pekín se celebraron dos seminarios de formación, en abril de 2007 y julio de 2008, con objeto de formar a los expertos locales y a los predictores en la mejora del apoyo local a los sistemas B08FDP, especialmente en la aplicación local de productos. Algunos usuarios finales participaron en calidad de aprendices.

El proyecto B08RDP se centró en las predicciones a corto plazo (6-36 horas) a través del desarrollo y la utilización de sistemas de predicción por conjuntos (EPS) de área limitada y alta resolución (15 km) para el corto plazo, por parte de seis participantes diferentes (el Centro Nacional de Predicción del Medio Ambiente y el CNIA, de los Estados Unidos; el Servicio Medioambiental de Canadá; la Agencia Meteorológica de Japón; el Instituto Central de Meteorología y Geodinámica de Austria; MétéoFrance; y la CMA). Se estableció un marco común en el que los seis participantes ejecutaran sus modelos de forma remota en sus propias sedes, empleando la misma configuración para los cálculos y abarcando Pekín y el área que le rodea. Tanto los datos de observación como los de los miembros del conjunto se transmitían a través de un servidor

Tabla 2 – Los productos del proyecto B08FDP en www.b08fdp.org

| Sistema | | Productos resultantes | Plazo de predicción (minutos) |
|--|--|---|-------------------------------|
| B J A N C | Auto-Nowcaster | Reflectividad ≥ 35 dBZ | 30, 60 |
| | | Predicción cuantitativa de la precipitación (PCP) | 0-30, 0-60 |
| | | Evolución de las tormentas | 30, 60 |
| | | Límites | 30, 60 |
| | VDARS | Viento (componentes "u" y "v") | Análisis |
| | | Velocidad vertical | |
| | | Temperatura de perturbación | |
| Humedad relativa | | | |
| C A R D S | PCP | 0-60 | |
| | Predicción en un punto | Cada 6 min hasta 102 min | |
| | Aparición y propiedades de las tormentas | 6, 12, 18, 24, 30, 42, 60 | |
| G R A P E S - S W I F T | PCP | 0-30, 0-60, 0-120, 0-180 | |
| | Reflectividad | 30, 60 | |
| | Trayectoria de la tormenta (35, 40, 45, 50, 55 dBZ) | 6, 12, 18, 24, 30, 42, 60 | |
| | Potencial wx convectivo | 0-60 | |
| M A P L E | PCP | 30, 60 | |
| | Reflectividad | 30, 60 | |
| N I W O T | Reflectividad ≥ 35 dBZ | 60, 120, 180, 240, 300, 360 | |
| S T E P S | S T E P S | PCP (dominio de mosaico) | 0-30, 0-60, 0-90 |
| | | Probabilidad de precipitación (POP) (1, 10, 20, 50 mm, dominio de mosaico) | 0-60 |
| | C a m p o s d e l l u v i a | Estimación cuantitativa de la precipitación (ECP) (6 min, mosaico) | Análisis |
| | | ECP (60 min, mosaico) | Análisis |
| | | ECP (120 min, mosaico) | Análisis |
| | | ECP (180 min, mosaico) | Análisis |
| | | ECP (60 min, combinado con pluviómetro, mosaico) | Análisis |
| Medidor (60 min, interpolado, mosaico) | Análisis | | |
| S W I R L S | PCP (radar) | 0-60, 0-120, 0-180 | |
| | Probabilidad de amenaza de rayos | 0-60, 0-120, 0-180 | |
| | Aparición y propiedades de las tormentas (reflectividad ≥ 34 dBZ) | 6, 12, 18, 24, 30, 42, 60 | |
| | Condiciones meteorológicas severas: inicio de rayos (tipo y severidad), reventón (nivel de severidad), granizo (tipo), tormenta con lluvia (nivel de intensidad) | 0-30 | |
| | Fuertes rachas de viento (máximo posible) | 0-30 | |
| | POP (1, 10, 20 mm en 60 min; 1, 10, 20, 50 mm en 180 min; 1, 10, 20, 50 mm en 360 min) | 0-60, 0-180, 0-360 | |
| | PCP (combinado) | 0-60, 0-120, 0-180, 0-240, 0-300, 0-360 | |
| T I F S | T I F S | Conjunto de probabilidades de tormenta (guía para alerta VIPS por rayos, modo automático) | 0-60 |
| | | Conjunto de probabilidades de tormenta (guía para alerta VIPS por rayos, modo manual) | 0-60 |
| | | Conjunto de probabilidades de lluvia (guía de alerta VIPS por tormentas con lluvia) | 0-60 |
| | | Probabilidad de lluvia densa (2 mm/h) | 0-60 |
| | TITAN* | Aparición y propiedades de las tormentas (reflectividad ≥ 35 dBZ) | 6, 12, 18, 24, 30, 42, 60 |
| | WDSS* | Aparición y propiedades de las tormentas | 6, 12, 18, 24, 30, 42, 60 |

* TITAN es una parte de Auto-Nowcaster desarrollada por el CNIA (Estados Unidos). WDSS es un sistema de predicción inmediata desarrollado por el Laboratorio nacional de tormentas severas (Estados Unidos). Los dos sistemas se utilizaron en el proyecto S2KFDP para los Juegos Olímpicos de Sídney de 2000 y se facilitaron al Servicio Meteorológico de Australia (BOM) tras la finalización de los mismos. El BOM integró estos dos sistemas en el TIFS y para que hicieran las veces de un solo sistema en el proyecto B08FDP.

Tabla 3 – Sistema de predicción por conjuntos de área limitada del B08RDP en el verano de 2008

| Participantes | Modelo | Condiciones iniciales | Perturbación inicial | Condiciones de contorno laterales | Perturbación lateral | Perturbación física |
|---------------------|--|-----------------------|--|-----------------------------------|--|---|
| NCEP | WRF-ARW (5) WRF-NMM (5) GEFS-regionalizado (T284L60, 5) (L60M15) | NCEP 3DVAR | Desarrollo | NCEP EPS global | NCEP EPS global | Multimodelo |
| MRI/JMA | NHM (L40M11) | Meso 4DVAR (20kmL40) | VS globales dirigidos (T63L40) | Predicción global JMA (TL959L60) | Predicción global (T63L40) Iniciada por VS dirigidos | Ninguna |
| SMC | GEM (L28M20) | SMC Global EnKF | SMC Global EnKF | ESP global del SMC | EPS global de SMC | Perturbación de la tendencia física con cadena de Markov, perturbación de la superficie |
| ZAMG Y METEO-FRANCE | ALADIN (L37M17) | CEPMMP Global 4DVAR | Fusión CEPMMMP SV con ALADIN Modo desarrollo | Predicción global del CEPMMMP | Predicción EPS del CEPMMMP | Multifísica |
| CMN/CMA | WRF-ARW (L31M15) | WRF-3DVAR | Desarrollo | EPS global de CMA | EPS global de CMA | Multifísica |
| CAMS/CMA | GRAPES (L31M9) | GRAPES-3DVAR | Desarrollo | EPS global de CMA | EPS global de CMA | Multifísica |

FTP en tiempo real, con resolución y localización de zona unificadas, utilizando formato de datos y nombre de archivo uniformes y con codificación y descodificación normalizadas en GRIB2. La Tabla 3 muestra las características de los seis sistemas.

Entre 2006 y 2008 todos los sistemas participantes se ejecutaron en tiempo real o casi real durante el verano, comparándose y analizándose las predicciones. En el Centro Meteorológico Nacional (CMN) y en el Centro de Información Meteorológica Nacional de la CMA se configuró un sistema para cumplir las tareas relativas a la transmisión de datos de observación y de predicción por conjuntos, codificación y descodificación de datos, verificación, corrección de desviaciones y generación de productos teniendo en cuenta los datos de predicción por conjuntos procedentes de múltiples fuentes, la presentación de productos, etc. La mayor parte de los productos de los conjuntos fueron distribuidos al CMN y a la Oficina Meteorológica de Pekín como guía para los predictores. El proyecto B08RDP también hizo hincapié en la demostración, evaluación e intercomparación en

tiempo real de las actividades de modelización que suelen ser competencia de la comunidad investigadora (por ejemplo, los productos probabilísticos provenientes de múltiples centros orientados a los fenómenos meteorológicos de gran impacto o el modelo capaz de resolver nubes, de alta resolución (unos 2-4 km), para fenómenos meteorológicos severos).

Para garantizar la aplicación eficaz de los productos de la predicción por conjuntos, durante estos últimos años el CMN ha centrado sus esfuerzos en la formación profesional de predictores nacionales y provinciales en su tarea cotidiana de la predicción meteorológica. Con el fin de afrontar las necesidades del servicio meteorológico para los Juegos Olímpicos, se creó un vínculo entre los proyectos relativos a la mesoescala y los correspondientes a la predicción inmediata y se estudiaron las necesidades de productos por parte de grupos de expertos y de usuarios. Entre los productos considerados se incluían la media, dispersión y probabilidad de los elementos en superficie, las incertidumbres de las circulaciones y los productos espe-

ciales asociados con las situaciones meteorológicas de gran impacto. Se desarrollaron, además, productos en términos de probabilidad para las distintas sedes de los Juegos.

El período de demostración de los ocho sistemas de predicción inmediata anteriormente mencionados y del sistema de verificación de las predicciones en tiempo real tuvo lugar entre el 20 de julio y el 20 de septiembre de 2008. Trece expertos procedentes de Australia, Canadá, Estados Unidos y Hong Kong (China) trabajaron durante un período de demostración intensivo (1-24 de agosto). Todos los sistemas B08FDP ofrecieron un subconjunto de los productos de guía para la predicción inmediata que se mencionan en la Tabla 2, cada seis minutos.

Con objeto de apoyar estas operaciones para aumentar su eficacia, un experto del proyecto y dos expertos locales fueron los responsables de:

- organizar análisis y discusiones sobre los productos meteorológicos y de predicción inmediata en el seno del grupo del B08FDP;

- preparar los textos concisos que describan los patrones de la circulación dominante y los sistemas meteorológicos, así como los posibles impactos sobre el área de Pekín, en general, y sobre las sedes deportivas, en particular;
- interpretar los productos B08FDP para los predictores locales; y
- participar, en representación del grupo, en las discusiones meteorológicas que tenían lugar dos veces al día.

En el caso de un servicio importante o de un fenómeno meteorológico complejo, los expertos del proyecto B08FDP y los expertos locales participaban con una mayor frecuencia en intercambios de información con los predictores, así como en discusiones meteorológicas dentro del período de vigilancia mejorado. Para las ceremonias de inauguración y de clausura, los expertos del programa B08FDP trabajaron junto con los predictores de la Oficina Meteorológica de Pekín (BMB), para realizar un seguimiento continuo de las variaciones de los sistemas meteorológicos hasta la finalización de estos eventos.

Se habilitaron tres medios para que tanto los predictores como los equipos de los servicios meteorológicos que trabajaban in situ pudieran acceder directamente a los productos del proyecto de demostración y a los resultados de la verificación de forma sencilla:

- Una página web (<http://www.b08fdp.org>), en chino y en inglés, desarrollada dentro del dominio web de la BMB, dirigida a los predictores y a los equipos de los servicios in situ, con el fin de que pudieran acceder a los productos (véase la Tabla 2).
- Una plataforma interactiva hombre-máquina donde se incluyó un subconjunto de productos B08 dentro de los procedimientos operativos de predicción inmediata de la BMB, para que los predictores pudieran acceder directamente a ellos y utilizarlos como guía para la predicción inmediata.
- Los expertos locales facilitaron a los predictores algunas copias impresas e interpretaciones orales de productos, así como dictámenes de expertos. Además,

en el caso de otros usuarios finales (como el Comité Organizador de los Juegos Olímpicos de Pekín (BOCOG), los departamentos meteorológicos de aviación civil, la unidad de servicios de embarcaciones del Palacio de Verano y el público en general), se habilitó una página web del Servicio Meteorológico para los Juegos Olímpicos de Pekín (<http://www.weather2008.cn>) en chino y en inglés, para ofrecer acceso y navegación por los diferentes productos.

Para garantizar la aplicación práctica de los productos del EPS del B08RDP en los servicios meteorológicos de los Juegos, especialmente durante el transcurso de episodios meteorológicos de gran impacto, el CMN diseñó diferentes enfoques para asegurar el acceso directo de los predictores y de los participantes en el proyecto a los productos del EPS, así como a las observaciones y a los campos del análisis. En primer lugar, los productos del EPS se clasificaron por categorías y se convirtieron a diferentes formatos de datos dirigidos a distintos usuarios finales o modos de visualización. En segundo lugar, se desarrolló la página web del B08RDP

(www.b08rdp.org) dentro del dominio web del CMN, para garantizar de esta manera el acceso en tiempo real de todos los predictores de la BMB y el CMN y de los participantes en el proyecto. En tercer lugar, los productos del EPS desarrollados para las 17 sedes olímpicas se transmitían a la BMB a través de una red por cable de alta velocidad especialmente diseñada para tal propósito. Esto permitió establecer una estrecha colaboración entre las aplicaciones de predicción del proyecto B08RDP y las de predicción inmediata del B08FDP.

Los expertos del proyecto B08RDP pertenecientes a la CMA también trabajaron codo con codo con los predictores a través de la transmisión e interpretación de las predicciones por conjuntos y aportando sugerencias a la predicción meteorológica desde la perspectiva de la investigación. Se utilizaron las predicciones por conjuntos para caracterizar las incertidumbres en las predicciones. Estas incertidumbres son necesarias para comprender y mejorar aún más la predicción de fenómenos meteorológicos de gran impacto mediante la comparación con predicciones sencillas y deterministas.

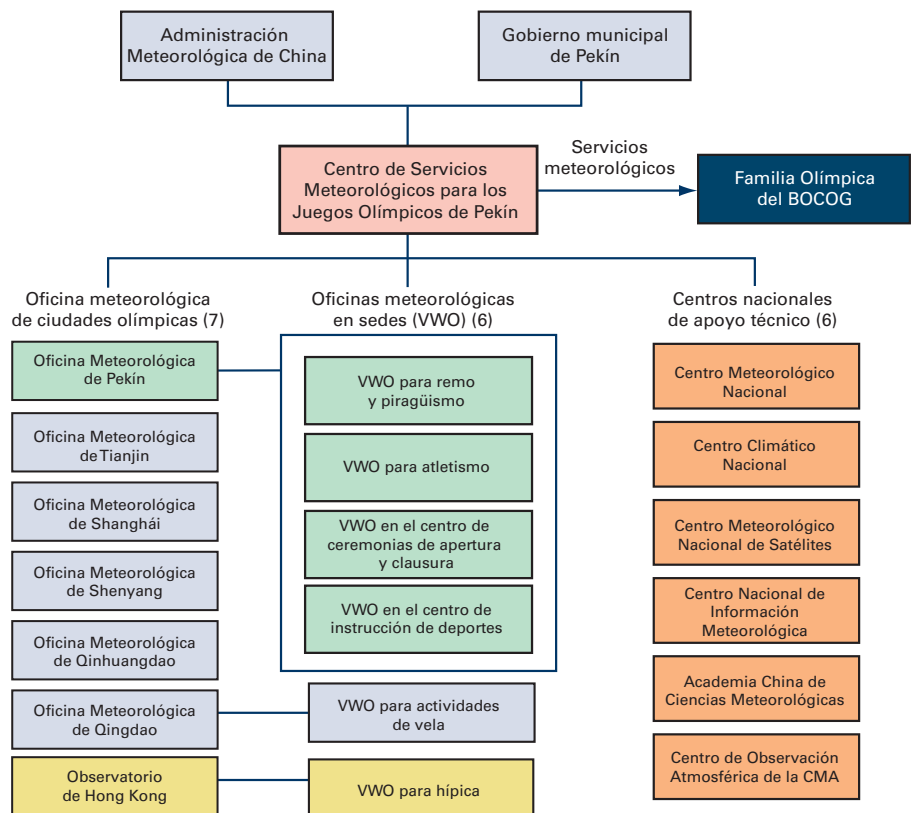


Figura 2 – Estructura organizativa del Centro de Servicios Meteorológicos para los Juegos Olímpicos de Pekín

Servicios de predicción del tiempo

Los Juegos Olímpicos de Pekín 2008 se desarrollaron en la ciudad anfitriona y en seis ciudades subse-des (Qingdao para las pruebas de vela, Hong Kong para los eventos ecuestres, y Tianjin, Qinhuangdao, Shen-yang y Shanghai para el fútbol). Con la aprobación de la CMA y del gobierno municipal de Pekín, se designó al BOMSC como el único proveedor de servicios meteorológicos oficiales en agosto de 2006 (TOK, 2008). En la Figura 2 se muestra su estructura organizativa.

El BOMSC abarcaba tres componentes: los servicios meteorológicos de la ciudad anfitriona, las ciudades subse-de y las oficinas meteorológicas de las sedes. En Pekín, Qingdao y Hong Kong se crearon algunos centros meteorológicos operativos nacionales e instituciones de investigación bajo los auspicios de la CMA, así como seis organismos de servicios meteorológicos provisionales, destinados a apoyar los eventos deportivos al aire libre y las situaciones de gran afluencia de público. Los servicios meteorológicos de la ciudad anfitriona y de las subse-des suministraban predicciones del tiempo y servicios meteorológicos a los comités organizadores deportivos locales y a los organizadores locales de las principales actividades públicas, mientras que los centros operativos nacionales y las instituciones de investigación asumieron la tarea de ofrecer asesoramiento y apoyo técnico a las oficinas meteorológicas de la ciudad anfitriona y de las subse-des, además del Observatorio de Hong Kong, que tenía la responsabilidad íntegra de facilitar predicciones y servicios meteorológicos a los eventos hípicas. Todas las observaciones, predicciones y alertas pertinentes recibidas por el sistema de información de los Juegos Olímpicos de Pekín, diseñado para tal fin, eran recopiladas y convertidas a un formato unificado por parte de la BMB y, posteriormente, distribuidas al BOCOG.

Las demandas especiales de servicios meteorológicos muy precisos para los acontecimientos deportivos y para los grandes actos sociales relacionados con ellos superaban el nivel habitual de las predicciones meteorológicas y de los servicios operativos en muchos aspectos. Para abordar este asunto, la BMB, en asociación con otros servicios meteorológicos, se centró en la investigación

y el desarrollo de nuevas técnicas, metodologías y herramientas destinadas a conseguir las predicciones refinadas de elementos meteorológicos en sedes concretas, así como las predicciones inmediatas y las alertas tempranas por condiciones meteorológicas convectivas severas (Wang, 2007). Se establecieron los "cuatro sistemas y dos herramientas interactivas" siguientes:

- El sistema Hi-MAPS se encargaba del preproceso de un amplio abanico de observaciones frecuentes a través de una forma rápida de actualización (por ejemplo, datos sin procesar procedentes del barrido volumétrico del radar cada seis minutos, perfiles de viento cada seis minutos, observaciones de estaciones meteorológicas automáticas cada cinco minutos, observaciones de radiosonda mejoradas cada seis horas, etc.). El sistema Hi-MAPS suministraba datos de observación a los sistemas operativos de la BMB y proporcionaba datos normalizados a los ocho sistemas de demostración del B08FDP en tiempo real.
- El sistema BJ-ANC se desarrolló conjuntamente con el CNIA y generaba predicciones inmediatas de condiciones meteorológicas convectivas severas, basadas principalmente en las múltiples observaciones de radar Doppler, y realizadas con técnicas de extrapolación más complejas. También incorporaba otros algoritmos, como por ejemplo el sistema de análisis variacional del radar Doppler, la estimación cuantitativa de la precipitación a partir del radar y los algoritmos de predicción. El sistema generó mucha información susceptible de utilizarse como guía para la predicción inmediata (véase la Tabla 2).
- El sistema BJ-RUC fue desarrollado conjuntamente con el CNIA. Se trata de la versión local del sistema de investigación y predicción meteorológica con una serie de mejoras. Con un ciclo rápido cada tres horas, el sistema suministraba salidas numéricas mesoescales de alta resolución (3 km) para Pekín y las zonas limítrofes para las siguientes 24 ó 36 horas como guía para la predicción.
- El sistema OFIS constituía una herramienta interactiva hombre-ordenador destinada a facilitar el

análisis de las condiciones meteorológicas y la generación de predicciones cada tres horas, de elementos meteorológicos precisos para los tres días siguientes (0-63 horas), basándose en una serie de observaciones, en los productos de predicción numérica del tiempo (PNT) y en la guía para la predicción en las sedes, así como la verificación en tiempo real de la guía. La guía para las predicciones en las sedes se obtenía principalmente de:

- predicciones de varios elementos específicos para las sedes olímpicas mediante el método de regresión de las máquinas de soporte vectorial, una interpretación estadística de los productos de PNT;
- predicciones de varios elementos específicos para las sedes olímpicas por métodos de ajuste de funciones semi-periódicas, basadas en las conclusiones del responsable de los predictores para pronósticos cada 12 horas de los tres días siguientes.
- El sistema VIPS, una herramienta interactiva hombre-máquina, ayudó a los predictores a la hora de vigilar los fenómenos meteorológicos convectivos severos y en la emisión de alertas tempranas para la zona de Pekín. En una sola pantalla podía superponerse una variedad de observaciones meteorológicas mesoescales de alta frecuencia y de productos de PNT, así como la guía para las predicciones inmediatas e información geográfica. También admitía mapas de alertas tempranas y funciones para la revisión desde la pantalla. Además, generaba automáticamente textos de alerta tanto en chino como en inglés, con una función de edición.
- El sistema OMIS tenía múltiples funciones, pues recopilaba observaciones en tiempo real y predicciones meteorológicas específicas para las diversas sedes, tanto en Pekín como en las demás ciudades anfitrionas. Este sistema realizaba una decodificación automática de la información, convirtiendo formatos de datos y unidades de medida, traduciéndola a los idiomas deseados, clasificándola y empaquetándola para diferentes usuarios en forma de productos diferentes, y difundiéndola en tiempo real al BOCOG, al sistema INFO2008 de los Juegos

Olímpicos de Pekín, al sistema de radiodifusión de los Juegos y a la página web del Servicio Meteorológico de los Juegos Olímpicos.

Durante los Juegos Olímpicos, la precipitación registrada fue superior a lo normal en Pekín. La precipitación acumulada, del 8 al 24 de agosto, fue de 151,7 mm en la zona llana, un 90 por ciento superior a la media de 30 años (80 mm) de este mismo período. Hubo cuatro episodios de precipitaciones generalizadas en Pekín y otros cuatro de precipitaciones locales, en los que en cinco días sueltos se registró una precipitación diaria de 10 mm. Entre el 10 y el 11 de agosto, la ciudad sufrió tormentas y lluvias fuertes. Por otra parte, el número de fenómenos meteorológicos de gran impacto, diferentes a las precipitaciones, fue inferior al normal.

Frente a unas condiciones meteorológicas complejas y cambiantes, el

BOMSC puso un especial énfasis en algunos componentes fundamentales de cara a su prestación de servicios:

- **Mejorar la “consulta” meteorológica**
Se organizaron debates especiales para acontecimientos importantes, como por ejemplo las ceremonias de apertura y clausura, así como para los eventos al aire libre sensibles a las condiciones meteorológicas. En estos encuentros participaron los predictores principales y los expertos, así como expertos extranjeros en predicción inmediata.
- **Hacer un buen uso de las tecnologías avanzadas**
Los “cuatro sistemas y las dos herramientas interactivas” se incorporaron a los procesos de alerta temprana y de predicción refinada con el fin de aprovechar el potencial humano para aumentar la eficacia y la calidad

basándose en las altas tecnologías.

- **Mejorar la interacción con las sedes**
Se instaló la versión simplificada del sistema VIPS en las oficinas meteorológicas, facilitando el acceso de los equipos de servicio a las observaciones y predicciones actualizadas, así como a las alertas tempranas, permitiendo así que se pudiera interactuar de forma oportuna con los usuarios finales. Al mismo tiempo, los canales de comunicación de información posibilitaron que el personal del emplazamiento correspondiente y de la oficina central incluyese los cambios en las demandas de los usuarios, facilitando la prestación de los servicios pertinentes y adaptados a las necesidades de cada uno y en cualquier momento.

Con las ventajas aportadas por estas iniciativas, el BOMSC suministró al

Tabla 4 – Predicciones meteorológicas y alertas ante fenómenos meteorológicos severos emitidas por el BOMSC entre el 25 de julio y el 17 de septiembre de 2008

| N.º | Nombres de los productos | Suma de productos | | |
|-----|---|-------------------|--------|---------|
| | | Chino | Inglés | Francés |
| 1 | Predicción meteorológica cada 3 horas para las sedes de las ciudades anfitrionas | 13 160 | 13 160 | 272 |
| 2 | Charlas informativas meteorológicas especialmente destinadas a los Juegos Olímpicos | 110 | 110 | 48 |
| 3 | Avisos de tiempo severo para las ciudades anfitrionas | 390 | 390 | |
| 4 | Predicciones meteorológicas a 7 días vista para las ciudades anfitrionas de los Juegos Olímpicos de Pekín | 55 | 55 | 24 |
| 5 | Predicción de viento cada hora para la sede de tiro de los Juegos Olímpicos de Pekín | 62 | 62 | -- |
| 6 | Predicción meteorológica para la sede de remo y piragüismo de los Juegos Olímpicos de Pekín | 60 | 60 | -- |
| 7 | Predicción meteorológica a lo largo del trazado de la prueba de maratón de los Juegos Olímpicos de Pekín 2008 | 30 | 30 | -- |
| 8 | Predicción meteorológica para el circuito urbano de ciclismo de los Juegos Olímpicos de Pekín | 56 | 56 | -- |
| 9 | Predicción meteorológica para la ceremonia de apertura (clausura) de los Juegos Olímpicos de Pekín | 301 | 301 | -- |
| 10 | Alerta de riesgo meteorológico para la ceremonia de apertura (clausura) de los Juegos Olímpicos de Pekín | 11 | -- | -- |
| 11 | Predicción meteorológica en Pekín, especialmente de cara al tráfico | 110 | -- | -- |
| 12 | Informe de tormentas para los Juegos Olímpicos de Pekín | 22 | -- | -- |
| 13 | Evolución probable del tiempo para los próximos 10 días para los Juegos Olímpicos de Pekín | 12 | -- | -- |
| 14 | Evolución probable del tiempo para los próximos 30 días para los Juegos Olímpicos de Pekín | 2 | -- | -- |
| 15 | Predicción meteorológica especialmente destinada a la logística de los Juegos Olímpicos de Pekín | 55 | -- | -- |
| 16 | Predicción meteorológica para la ceremonia de apertura (clausura) de las pruebas de vela olímpica en Qingdao | 50 | -- | -- |
| 17 | Predicción horaria del viento para las sedes de vela olímpica de Qingdao | 165 | -- | -- |
| 18 | Informe meteorológico para los eventos ecuestres de la sede olímpica de Hong Kong | 138 | 138 | -- |

BOCOG predicciones exhaustivas “características y de alto nivel”, así como servicios de alerta temprana, que ayudaron a los organizadores a programar el horario de varios eventos al aire libre. El Comité Olímpico de Programación llevó a cabo seis conferencias telefónicas e introdujo cambios de horario en ocho eventos deportivos como consecuencia de las predicciones meteorológicas facilitadas por el BOMSC. A pesar de que la precipitación fue superior a lo normal, las predicciones inmediatas y de corto plazo, precisas y oportunas, así como los servicios de seguimiento continuo, pudieron garantizar el desarrollo normal de la mayor parte de eventos al aire libre. Tan solo unos pocos se vieron interrumpidos por la aparición de precipitaciones inesperadas.

Estos servicios meteorológicos contribuyeron significativamente a todos los eventos. Por ejemplo, el BOMSC predijo que habría más precipitación antes de las 09:00 horas del día 21 de agosto, pero que disminuiría después de esta hora. La Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo decidió que las pruebas femeninas de 20 kilómetros marcha y decatón se mantuvieran a su hora, pero que las especialidades de salto de altura y de jabalina se retrasaran una hora.

Desde la llegada de los atletas a la Villa Olímpica hasta la finalización de los Juegos Paralímpicos, el BOMSC emitió y difundió más de 10 000 copias de predicciones, informes, charlas informativas y alertas de naturaleza meteorológica en 18 categorías en chino, inglés y francés (Tabla 4). Al mismo tiempo, la sociedad en general fue participe de más informaciones meteorológicas que nunca por televisión, radio, internet, teléfono, prensa, mensajería y otros medios; asimismo, también existía la posibilidad de disponer de información meteorológica en inglés. La página web del Servicio Meteorológico para los Juegos Olímpicos (www.weather2008.cn), creada por el BOMSC, contaba con un enlace a la página oficial del BOCOG, que recibió más de 15 millones de visitas.

La verificación preliminar de las predicciones meteorológicas cada tres horas para las 63 horas siguientes en las sedes de Pekín puso de relieve que:

- Los predictores dependieron en gran medida del material de guía suministrado; podían emitir opiniones o realizar modificaciones con arreglo a sus méritos.

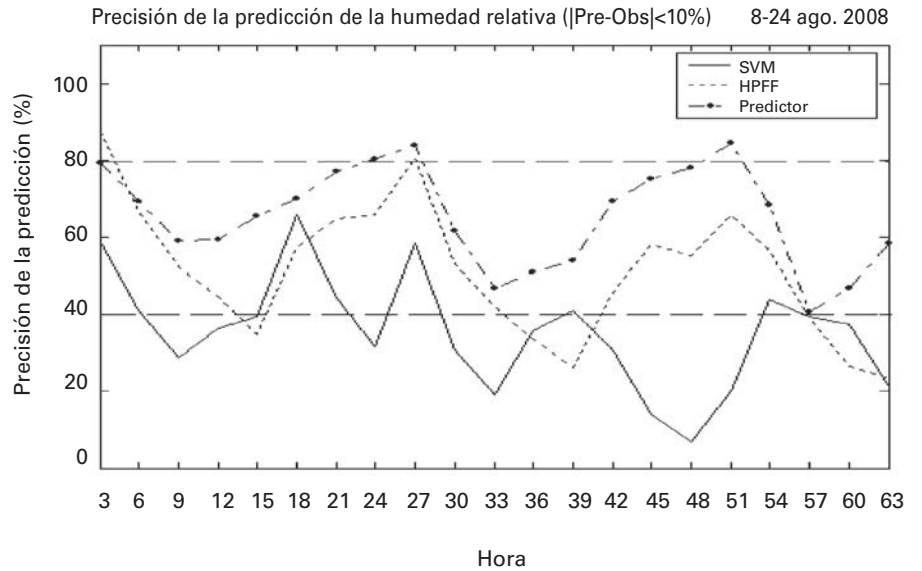


Figura 3 – Grado de precisión de la predicción de la humedad relativa (desviación < 10%) (estadísticas basadas en los datos de los días 8-24 de agosto de 2008)

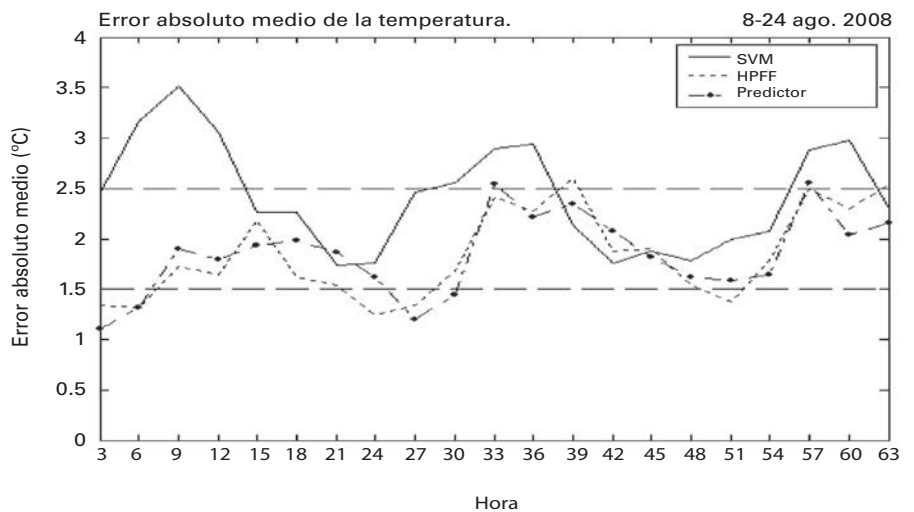


Figura 4 – Error absoluto medio de la temperatura (°C, estadísticas basadas en los datos de los días 8-24 de agosto de 2008)

- La predicción cuantitativa de la precipitación es el elemento más difícil de pronosticar, sobre todo cuando se refiere a un lugar y momento determinados.
- Las pericias de los predictores por lo que respecta a la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento fueron algo superiores a las de la guía de predicción; sin embargo, los aciertos en la precipitación y en la dirección del viento fueron, por término medio, más o menos similares a los de la guía.
- El grado de precisión de las predicciones de humedad relativa cada tres horas emitidas por los predictores, con una desviación inferior al 10 por ciento con respecto a la observación, se acercaba al 70 por ciento en 24 h, al 65 por ciento en 24-48 h, y al 55 por ciento más allá de las 48 h. El error absoluto medio de las predicciones de temperatura cada tres horas fue de 1,7 °C en 24 horas, 2,0 °C en 24-48 horas, y 2,2 °C más allá de las 48 h (véanse las Figuras 3 y 4).
- Al comparar el rendimiento de las predicciones de precipitación cada tres horas en las diferentes sedes a través del índice de amenaza (TS), los predictores demostraron mayor habilidad que la guía basada en las máquinas de soporte vectorial (SVM); sin embargo, la pericia se reducía

con el plazo de validez (TS alrededor de 0,1-0,2 en 24 h, y 0,07-0,13 en 24-63 h frente a un TS de la guía basada en las máquinas de soporte vectorial inferior a 0,1 en 0-63 h). Resulta llamativo que el TS de la guía para la precipitación en las sedes cada tres horas, dentro de un plazo de validez de 24 horas, obtenido a partir del sistema BJ-RUC, contara con el TS más elevado de los tres. Sin embargo, su rendimiento inestable en las diferentes pasadas a lo largo del ciclo diario no aportó la confianza necesaria a los predictores como para fiarse de este sistema.

Las respuestas a una encuesta sobre el grado de satisfacción puso de manifiesto que tanto los usuarios y los afiliados al BOCOG como los operarios que intervinieron en las ceremonias de apertura y clausura, los equipos de deportes acuáticos de Shunyi, el Estadio Nacional, los equipos de operación en la ciudad, los funcionarios metropolitanos, los organizadores de los eventos deportivos, los árbitros, los atletas, los voluntarios y el público en general creían que las predicciones suministradas por el BOMSC eran precisas, oportunas y eficaces, con un grado de satisfacción pública del 93,1 por ciento.

Conclusiones

El exitoso, amplio y complejo conjunto de actividades de apoyo relacionadas con la calidad del aire y la meteorología durante los Juegos Olímpicos y Paralímpicos tendrá un efecto duradero tanto en China como en la comunidad internacional.

Se registraron importantes disminuciones en la concentración de muchos gases y aerosoles relacionados con el tráfico rodado, gracias a la restricción del mismo. La prohibición de los vehículos con distintivo amarillo tuvo un efecto mucho mayor sobre la reducción de los contaminantes atmosféricos que las limitaciones relativas a las cifras alternas de las placas de matrícula. La corporación del gobierno municipal de Pekín recibió varias recomendaciones destinadas a comprender y mejorar la calidad del aire a partir de estos resultados; asimismo, otras zonas urbanas del mundo podrían beneficiarse de este conocimiento.

El BOMSC prestó unos servicios meteorológicos eficaces y de calidad en

un período en el que se registraron más precipitaciones de lo habitual. Esta circunstancia fue reconocida por todos los sectores. El éxito se debió a la utilización de tecnologías y técnicas avanzadas, al papel "humano"; a la estrecha interacción con los usuarios finales, a la implantación de los proyectos de demostración y a la ejecución de unas medidas de trabajo y de gestión sin precedentes.

El proyecto B08FDP del PMIM de la OMM resultó ser muy eficaz como apoyo a los servicios de predicción inmediata de los Juegos Olímpicos de Pekín no solo por servir de guía, sino también por ofrecer un enfoque complementario muy interactivo entre expertos, predictores y el personal encargado de transmitir los conocimientos. El B08FDP constituyó un ejemplo satisfactorio de la combinación de los resultados de la investigación con las aplicaciones operativas. Esta práctica debería seguirse a la hora de desarrollar unos mejores apoyos a la predicción inmediata en cualquier lugar del mundo.

El proyecto B08RDP del PMIM de la OMM promovió el conocimiento en el uso de los conjuntos de múltiples centros y en la determinación de la incertidumbre. Los productos de la combinación y corregidos de las desviaciones del conjunto multimodelo eran superiores a los de cualquier conjunto individual, de tal manera que podían obtenerse ventajas a partir de la utilización en tiempo real de los productos probabilísticos destinados a la predicción de fenómenos meteorológicos severos. Sin embargo, el cambio paradigmático de una oficina de predicción a la hora de pasar de una predicción determinista a otro por conjuntos siempre encierra un desafío, incluso tras una formación meticulosa.

El Servicio Meteorológico para los Juegos Olímpicos ofreció una oportunidad práctica a los predictores de generar pronósticos meteorológicos exhaustivos. Sin embargo, la predicción refinada supone una tarea nueva y desafiante para unos predictores cuya experiencia previa en predicciones convencionales no tiene por qué ser necesariamente aplicable. En la actualidad, las habilidades de los predictores a la hora de realizar predicciones refinadas superan ligeramente a los métodos de predicción objetivos, pero aún queda mucho margen para que los predictores puedan desempeñar un papel de valor añadido en las predicciones refinadas como

consecuencia de un aprendizaje continuo y acumulado fruto de la experiencia.

Las actividades desarrolladas de cara a los Juegos Olímpicos y Paralímpicos fueron muy amplias, y gran parte de su éxito residió en la planificación plurianual a largo plazo relativa a todos los aspectos de esfuerzo y compromiso de los socios internacionales y de los anfitriones locales.

Agradecimientos

Los autores desean dar las gracias a todos los participantes en el B08FDP/RDP por su contribución al éxito del proyecto y por su excepcional rendimiento a la hora de apoyar a los servicios meteorológicos para los Juegos Olímpicos de Pekín de 2008. F. Liang, S.Y. Shi, D.B. Shu, H. Guo y X.Q. Ma ayudaron a elaborar las figuras y las tablas.

Referencias

- WANG, J.J., 2007: Refined forecasts for the weather service to 2008 Beijing Olympics. Documento destinado al Seminario Anual de la Sociedad Meteorológica de China, diciembre de 2007 (en chino).
- CMA, 2008: Transfer of Knowledge (TOK), Functional Area Report—Meteorological Service.
- ZHANG, X.Y., Y.Q. WANG, X.C. ZHANG, T. NIU, S.L. GONG, P. ZHAO, J.L. JIN y M. YU, 2008: Aerosol monitoring at multiple locations in China: contributions of EC and dust to aerosol light absorption. *Tellus B* 60B, 647-656.