

Meteorología de montaña: perspectiva regional

Por Ken LITTLE¹

Meteorología de montaña

La geografía física no sólo define el paisaje sino, esencialmente, las interacciones con los procesos meteorológicos en sus diferentes fases y escalas. En el caso más sencillo, las montañas ejercen influencia sobre los procesos meteorológicos perturbando el flujo aéreo de su entorno. La perturbación puede ser directa (p. ej., canalización por el terreno o desviación, generación de ondas gravitatorias) o indirecta (p. ej., calentamiento solar de la ladera de una montaña, que origina circulación local anabática). Las regiones montañosas se caracterizan por una variedad de efectos meteorológicos "locales" que resultan de las variaciones mesoescalares del movimiento atmosférico por terrenos accidentados. De hecho, estos efectos "locales" pueden predominar sobre los efectos "sinópticos", originando diferencias regionales importantes en las configuraciones meteorológicas diarias y estacionales. En particular, las fuertes diferencias regionales de temperatura, viento y precipitación confieren a la meteorología de montaña su carácter único y constituyen un desafío.

Predicción de la meteorología de montaña

Como saben todos los estudiantes de meteorología, la no linealidad inherente al movimiento atmosférico impone un límite práctico a la previsión de los pronósticos meteorológicos. Dependiendo de la estación, la situación y el método de predicción, el límite de la previsión puede ser tan largo como unas pocas semanas o tan corto como unas pocas horas. El proceso de predicción se ve favorecido por herramientas y tecnología sofisticadas pero incluso el mejor modelo de predicción numérica del tiempo (PNT) pierde su fiabilidad cuando carece de datos adecuados para su inicialización. La obtención de datos de observación fiables y representativos de regiones remotas del mundo es un desafío continuo para todos los Miembros de la OMM. Las redes de instrumentación y de comunicación son costosas de instalar y de mantener, y la utilización eficaz de las mismas observaciones requiere una importante inversión en investigación y desarro-

llo para la asimilación de los datos. La falta de datos no se restringe a los entornos montañosos. Amplias zonas de las regiones polares y de los océanos del mundo siguen estado escasamente vigiladas. Estas continuas "lagunas de datos" contribuyen a la incertidumbre de la predicción meteorológica mundial a medio plazo y tienen consecuencias importantes sobre la inicialización y el rendimiento de los modelos operativos regionales o de mesoescala en el entorno de las zonas sin datos. Un ejemplo son las zonas occidentales de América. Situadas en latitudes medias, a continuación de la mayor extensión oceánica del mundo, las costas occidentales montañosas de América se ven expuestas de forma habitual a fuertes perturbaciones baroclínicas. Debido en parte a la falta de datos de observación, muchas de estas tormentas del Pacífico están deficientemente inicializadas en los modelos de PNT, lo que produce un bajo rendimiento del modelo de predicción. Se espera que iniciativas como el Experimento de Investigación y Capacidad de Predicción del Sistema de Observación Hemisférico ((THORPEX), un proyecto financiado por el Programa Mundial de Investigación Meteorológica) resuelvan dichas discontinuidades de datos y, finalmente, consigan mejorar la predicción numérica del tiempo.

Se puede argüir que vigilar y predecir el tiempo en zonas montañosas están entre las tareas que presentan mayores desafíos a los servicios meteorológicos actuales. Numerosos experimentos científicos de campo (p. ej. ALPEX, PIREX, IPEX y, más recientemente, el MAP) han investigado la atmósfera por encima de las cadenas montañosas del mundo y se han hecho avances notables en la PNT a mesoescala como resultado de estos estudios. Así el reciente Programa Alpino Mesoescalar (MAP)² ha demostrado que es posible realizar de forma rutinaria predicciones precisas de alta resolución para regiones montañosas, aunque a un alto coste en infraestructuras. En términos prácticos, pueden pasar años o décadas antes de que el conocimiento adquirido con el MAP y los anteriores experimentos de campo se pueda aplicar en su totalidad fuera de los Alpes europeos o de las Rocosas de Colorado. De todas formas, se va consiguiendo definir el camino para mejorar la capacidad de predicción.

¹ Environment Canada / Meteorological Service of Canada / Mountain Weather Centre, 3140 College Way, Kelowna, British Columbia, Canada V1V 1V9. Correo electrónico: ken.little@ec.gc.ca

² Véase el artículo de la página 14 de este número.



Algunos Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN), p. ej., el de Canadá, han desarrollado "centros de excelencia" específicamente dirigidos a implicarse en los desafíos propios de la predicción regional tales como la meteorología de montaña.

Para predecir el tiempo en la montaña de forma eficaz, el predictor debe poseer tanto un conocimiento detallado del paisaje físico como un conocimiento profundo de los procesos meteorológicos fundamentales que afectan al complejo terreno de las montañas. Hasta que llegue el momento en que se disponga de forma rutinaria de PNT de alta resolución aplicable al entorno montañoso, los mapas topográficos minuciosos seguirán siendo algunas de las herramientas disponibles más útiles y fundamentales para el predictor meteorológico de montaña. Dado que las montañas perturban el flujo atmosférico y que las perturbaciones de ese flujo son el origen de situaciones meteorológicas peculiares, el conocimiento de la topografía por parte del predictor es crucial. Igualmente es importante conocer y tener en cuenta la climatología. Los glaciares, los bosques, los desiertos y otros paisajes existen y perduran debido a combinaciones favorables de terreno y de clima. Las conexiones entre la geografía física y la climatología son obvias y esenciales para toda predicción meteorológica; incluida la que se realiza para las zonas de montaña.

Aplicaciones de las predicciones meteorológicas de montaña

Aunque el terreno montañoso y su tiempo atmosférico asociado son ciertamente complicados, el valor y la

utilidad de las predicciones meteorológicas para el terreno montañoso son mucho más fáciles de evaluar. Las aplicaciones van desde lo práctico (p. ej., la planificación de recursos hidrológicos para la generación de energía eléctrica o para el consumo de agua potable) a lo vital (p. ej., los avisos a aeronaves de turbulencias fuertes en ondas de montaña). La infraestructura de una economía moderna (transporte eficaz, energía y telecomunicaciones) es sensible a diferentes impactos meteorológicos. El transporte aéreo necesita condiciones de vuelo seguras, incluida una visibilidad vertical y horizontal mínima aceptable durante el despegue y el aterrizaje y buenas condiciones durante el vuelo. El transporte moderno de superficie (carretera y ferrocarril) demanda vías de comunicación sin obstrucciones, con independencia del tiempo o de la estación. El transporte marítimo es vulnerable a los vientos fuertes y a las olas que éstos generan. Las redes de energía eléctrica y las de telecomunicaciones son vulnerables a los rayos, a la lluvia engelante (p. ej., la tormenta de hielo de Canadá de 1998³), a las nevadas intensas o a vientos fuertes. Como en las montañas se producen frecuentes tormentas acompañadas por precipitaciones intensas, vientos fuertes y visibilidad reducida, hay una necesidad ineludible de predicciones oportunas y precisas de estos episodios de consecuencias tan importantes. Una ingeniería adecuada puede minimizar el daño potencial a las infraestructuras, pero el paisaje de montaña está cambiando de forma constante. Los efectos acumulados de tormentas sucesivas, en especial la precipitación intensa, pueden originar inundaciones devastadoras, corrimientos de tierra o avalanchas de nieve con importantes consecuencias para las rutas del transporte de superficie, la propiedad privada y la seguridad personal.

Una predicción meteorológica no puede evitar las situaciones meteorológicas o hidrológicas que originan situaciones de peligro, pero una predicción meteorológica útil puede influir en la toma de decisiones, para conseguir minimizar o impedir las consecuencias. El examen de un programa de predicción de montaña regional puede ilustrar este concepto.

³ Véase el *Boletín de la OMM* 47 (3), 287-294.



La región del Pacífico y de Yukón del MSC comprende la mayor parte del terreno montañoso de Canadá y todo el terreno de Canadá con una altura superior a los 4 000 metros

La Región del Pacífico y de Yukón del Servicio Meteorológico de Canadá

El Servicio Meteorológico de Canadá (MSC), el SMHN de Canadá, ofrece servicios de predicción y avisos meteorológicos al segundo país más grande del mundo. La Región del Pacífico y de Yukón (RPY) del MSC abarca aproximadamente 1,4 millones de km², comprendiendo el 15 por ciento de la superficie de Canadá, toda la costa del Pacífico de Canadá y la mayor parte de su zona montañosa. Las montañas más altas de Canadá, muchas con una altura superior a los 4 000 m, se encuentran en el interior del país, a menos de 200 km del Océano Pacífico. Tanto las tierras continentales occidentales de América del Norte como las zonas costeras adyacentes del Pacífico se caracterizan por ser zonas extremadamente accidentadas.

Las zonas costeras del Pacífico están expuestas de forma habitual a ciclones extratropicales intensos acompañados por vientos devastadores y por precipitaciones intensas durante el otoño y el invierno, mientras que estos mismos sistemas a menudo dejan importantes nevadas en las zonas interiores de la RPY. Las configuraciones de viento y de precipitación costeras están muy influenciadas por la accidentada topografía de la costa occidental, donde el terreno montañoso está cortado por profundos fiordos y valles fluviales. En estrecha correspondencia con la escarpada topografía, las variaciones de precipitación y de temperatura a lo largo de la región son también extremas. Los bosques y la amplia glaciación alpina se ven favorecidos por una precipitación abundante durante las estaciones más frías. La precipitación de invierno, en especial las nevadas, es a la vez beneficiosa y nociva para la Región. La nieve es el ingrediente natural esen-

cial de una próspera industria de ocio invernal y un recurso natural, igualmente esencial, para la generación de energía hidroeléctrica, riego agrícola y consumo doméstico de agua durante las estaciones más secas. La nieve y sus riesgos asociados (p. ej., la nieve movilizad y depositada por el viento reduce la visibilidad y cubre carreteras, pistas de aterrizaje y vías ferroviarias; las avalanchas naturales o provocadas por el hombre y las inundaciones debidas a la fusión) son también un importante impedimento para un transporte eficaz dentro de la región e interrumpen a veces el tráfico aéreo y de superficie durante varios días o semanas. El tráfico aéreo, en especial durante las estaciones más frías, también se ve afectado por peligrosos episodios de engela-

miento y de turbulencia, como resultado de las circulaciones mesoescalares inducidas por el terreno. Las estaciones más cálidas tienen sus propios riesgos, entre los que podemos señalar: los incendios forestales ocasionados por caída de rayos, la agudización de las plagas de insectos originadas por la sequía, los largos períodos de menor calidad de aire por estancamiento del mismo y la severa actividad convectiva local.

Servicios de la RPY

Un terreno abrupto cercano a una inmensa extensión oceánica constituye un atractivo programa de predicción para la RPY del MSC. Aparte de las necesidades obvias de aviso de mal tiempo actual e inminente a los ciudadanos, la RPY ayuda también a muchas otras agencias y organismos del gobierno a responder a los riesgos medioambientales. Una breve lista de dicha ayuda incluye:

Emergencias medioambientales

- Servicio de predicción para atender las emergencias provocadas por los desastres naturales (inundaciones, incendios, corrimientos de tierra, avalanchas, erupciones volcánicas), las actividades de búsqueda y rescate, los escapes tóxicos, y otros riesgos sin especificar, y para apoyar a las organizaciones gubernamentales responsables de las medidas de emergencia.
- Predicciones meteorológicas diarias realizadas, durante la estación invernal, expresamente en apoyo de las operaciones de predicción de avalanchas.

Servicios a la aviación

- Predicciones programadas y no programadas, durante todo el año, de condiciones meteorológi-

cas peligrosas para la aviación, como apoyo al Sistema de Navegación Aérea de Canadá (NAV CANADA).

- Avisos de ceniza volcánica transportada por el aire dentro del espacio aéreo canadiense realizados según demanda y de acuerdo con el programa de Vigilancia Volcánica Internacional de Líneas Aéreas dirigido por la OACI.

Servicios a la silvicultura

- Predicciones diarias, durante todo el año, realizadas para el control del fuego y del humo, para la gestión de cosechas y para la lucha contra las plagas biológicas, según las necesidades de los servicios de silvicultura del gobierno.

Calidad del aire

- Predicciones urbanas de ozono a nivel del suelo realizadas diariamente durante las estaciones más cálidas, como apoyo a los programas regionales gubernamentales de calidad del aire; y predicciones a la medida durante todo un año en apoyo de las operaciones regionales de dispersión de contaminantes industriales.

Transporte de superficie

- Diariamente durante el invierno, se realizan predicciones a la medida, que incluyen predicciones experimentales de la temperatura de la superficie de las carreteras, para apoyar a las distintas autoridades de los transportes en las operaciones de mantenimiento de las carreteras.

Servicios hidrológicos

- Predicciones diarias realizadas a la medida durante la primavera y el otoño, en apoyo de la modelización hidrológica regional para predicciones de caudales y pronóstico de inundaciones.

Muchos de los programas operativos y de investigación de la RPY para las zonas de montaña se desarrollan o se suministran en asociación con otras agencias, incluidas instituciones académicas y distintos organismos gubernamentales. Siguiendo una estrategia de ges-

tión basada en el ecosistema, la RPY ha sido la primera en introducir el concepto de gestión de “divisoria de aire” para la calidad del aire dentro de Canadá y ha desarrollado conocimientos técnicos similares para la gestión de “divisoria de aguas” de la cantidad y calidad del agua. La RPY es la responsable nacional del MSC para la implantación del radar Doppler en terreno montañoso. Participa de forma activa en las contribuciones del Programa Canadiense de Investigación Meteorológica (CWRP) al Programa Mundial de Investigación Meteorológica. Entre las prioridades del CWRP se incluye una mejora de los modelos de mesoescala, en especial de la precipitación en terreno montañoso. El CWRP también busca intensificar la transferencia tecnológica y de conocimiento desde la investigación a la meteorología operativa. Para lograr lo último, y bajo la dirección del CWRP y de la RPY, el MSC se ha asociado, recientemente, al Programa de Cooperación para la Enseñanza y la Formación en Meteorología Operativa y a la Cooperación Universitaria para la Investigación Atmosférica (UCAR-COMET). El conocimiento y la experiencia que han adquirido los meteorólogos de la RPY implicados en la predicción meteorológica operativa de montaña se está transfiriendo, en la actualidad, a otros organismos y personas, mediante el desarrollo de un curso de formación de COMET sobre tiempo severo de invierno en latitudes altas.

Resumen

La Región del Pacífico y de Yukón del MSC se esfuerza por ser un “centro de excelencia” en la meteorología de montaña y fomenta de forma activa la aplicación de su ciencia y de su técnica meteorológica a un amplio espectro de usuarios. El terreno montañoso que define la Región ofrece la necesidad y la inspiración para los programas y los servicios que se prestan. Aunque 2002 sea el Año Internacional de las Montañas, la Región del Pacífico y de Yukón considera todos los años como el Año Internacional de las Montañas. Otras Regiones del MSC —y también otros SMHN— ofrecen servicios esenciales similares centrados en los ciudadanos.

