

Desafíos en la transición de las redes de observaciones meteorológicas convencionales a las automáticas en registros climáticos a largo plazo

Edición de 2017

TIEMPO CLIMA AGUA



ORGANIZACIÓN
METEOROLÓGICA
MUNDIAL

OMM-N° 1202

Desafíos en la transición de las redes de observaciones meteorológicas convencionales a las automáticas en registros climáticos a largo plazo

Edición de 2017



ORGANIZACIÓN
METEOROLÓGICA
MUNDIAL

OMM-N° 1202

NOTA DE LA EDICIÓN

METEOTERM, base terminológica de la OMM, está disponible en la página web: <http://public.wmo.int/es/recursos/meteoterm>.

Conviene informar al lector de que cuando copie un hipervínculo seleccionándolo del texto podrán aparecer espacios adicionales inmediatamente después de <http://>, <https://>, <ftp://>, <mailto:>, y después de las barras (/), los guiones (-), los puntos (.) y las secuencias ininterrumpidas de caracteres (letras y números). Es necesario suprimir esos espacios de la dirección URL copiada. La dirección URL correcta aparece cuando se pone el cursor sobre el enlace o cuando se hace clic en el enlace y luego se copia en el navegador.

OMM-N° 1202

© Organización Meteorológica Mundial, 2017

La OMM se reserva el derecho de publicación en forma impresa, electrónica o de otro tipo y en cualquier idioma. Pueden reproducirse pasajes breves de las publicaciones de la OMM sin autorización siempre que se indique claramente la fuente completa. La correspondencia editorial, así como todas las solicitudes para publicar, reproducir o traducir la presente publicación parcial o totalmente deberán dirigirse al:

Presidente de la Junta de Publicaciones
Organización Meteorológica Mundial (OMM)
7 bis, avenue de la Paix
Case postale N° 2300
CH-1211 Genève 2, Suiza

Tel.: +41 (0) 22 730 84 03
Fax: +41 (0) 22 730 81 17
Correo electrónico: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-31202-0

NOTA

Las denominaciones empleadas en las publicaciones de la OMM y la forma en que aparecen presentados los datos que contienen no entrañan, de parte de la Organización, juicio alguno sobre la condición jurídica de ninguno de los países, territorios, ciudades o zonas citados o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

La mención de determinados productos o sociedades mercantiles no implica que la OMM los favorezca o recomiende con preferencia a otros análogos que no se mencionan ni se anuncian.

ÍNDICE

	<i>Página</i>
AGRADECIMIENTO	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ASPECTOS GENERALES Y RELATIVOS A ELEMENTOS ESPECÍFICOS DE LA TRANSICIÓN DE LAS MEDICIONES CONVENCIONALES A LAS AUTOMÁTICAS	2
2.1 Aspectos generales	2
2.1.1 Integridad de los datos	2
2.1.2 Diferencias en los modos de error entre las mediciones convencionales y las automáticas	3
2.1.3 Uniformidad de las prácticas entre los sistemas convencionales y automáticos	4
2.1.4 Mantenimiento, calibración y verificaciones de tolerancia	5
2.1.5 Filtrado de picos, muestreo temporal y otros algoritmos	5
2.2 Elementos meteorológicos específicos	6
2.2.1 Temperatura	6
2.2.2 Precipitación	9
2.2.3 Humedad atmosférica (humedad, punto de rocío y presión de vapor)	12
2.2.4 Otros elementos	13
3. EJEMPLOS DE FALTAS DE HOMOGENEIDAD DOCUMENTADAS CAUSADAS POR LA TRANSICIÓN DE LAS OBSERVACIONES CONVENCIONALES A LAS AUTOMÁTICAS	14
3.1 Introducción	14
3.2 Temperatura	14
3.3 Precipitación	15
3.4 Otros elementos	16
4. DIRECTRICES PARA LA GESTIÓN DE LA TRANSICIÓN DE LAS MEDICIONES CONVENCIONALES A LAS AUTOMÁTICAS	16
4.1 Mediciones paralelas entre los sistemas convencionales y los automáticos	16
4.2 Pruebas anteriores a la implantación de las estaciones meteorológicas automáticas operacionales	17
4.3 Representatividad del período de observaciones paralelas	18
4.4 ¿Qué sucede si no hay un período de observaciones paralelas útil?	19
4.5 Gestión de datos durante la transición de las observaciones convencionales a las automáticas	21
5. REFERENCIAS	21

AGRADECIMIENTO

Se agradece al señor Blair Trewin, Oficina de Meteorología de Australia, su destacada contribución a la presente publicación.

1. INTRODUCCIÓN

Nota: En la presente nota orientativa se analiza la homogeneidad de los registros climáticos de largo plazo en la transición de las redes de observaciones meteorológicas convencionales a las automáticas, y se brindan ejemplos y orientaciones al respecto.

Las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) desempeñan una función cada vez mayor en las redes de observación meteorológica, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo. Ofrecen numerosas ventajas en las aplicaciones meteorológicas, ya que permiten que las observaciones con una alta resolución temporal se reciban en tiempo real y se realicen a un costo periódico relativamente bajo después del gasto de capital inicial de instalación. En muchos emplazamientos donde anteriormente se realizaban observaciones solo unas pocas veces por día, ahora se dispone de un suministro continuo de datos a cada minuto. Además, con estas estaciones meteorológicas automáticas pueden realizarse observaciones en zonas donde no hay una presencia permanente de poblaciones humanas, así como en emplazamientos donde los observadores humanos no tienen un fácil acceso (como en los centros de los aeropuertos). Por otra parte, las EMA generalmente requieren de un mantenimiento más frecuente y más especializado que los sistemas manuales, lo que puede imponer una notable carga a la gestión de las redes en algunos lugares, sobre todo en países con recursos limitados. Asimismo, presentan desafíos para los programas de observación del clima debido a cuestiones relacionadas con la transición de las mediciones convencionales a las automáticas y debido a algunas características de las mediciones automáticas, tales como los diferentes niveles de mal funcionamiento de los instrumentos.

Algunos países ya han cambiado por completo sus redes sinópticas a EMA, o bien han manifestado su intención de hacerlo (por ejemplo, en Alemania se prevé instrumentar una red totalmente automática a más tardar en 2020; Claussnitzer y otros, 2015), mientras que algunos países en desarrollo han aprovechado la incorporación de las EMA para respaldar una importante ampliación de las redes que tenían anteriormente pocas estaciones.

El término “estación meteorológica automática” puede abarcar un amplio abanico de tipos de estaciones. En el extremo básico de la escala, las estaciones que miden un intervalo relativamente reducido de variables con una exactitud limitada, pero conveniente pueden adquirirse por algunos cientos de dólares a través de los canales comerciales habituales, y son ampliamente utilizadas por particulares y pequeñas organizaciones en muchos países. En el extremo avanzado de la escala, las estaciones profesionales que cumplen las normas de funcionamiento de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) pueden costar decenas de miles de dólares; además de las variables básicas como, por ejemplo, la temperatura, la humedad, la velocidad y la dirección del viento, la presión atmosférica y las precipitaciones, también pueden incluir sensores para otros parámetros, entre ellos la visibilidad, la nubosidad y el tipo de nubes, y las condiciones meteorológicas actuales. En algunos países, los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) solo utilizan los datos procedentes de las EMA de los SMHN, mientras que en otros países, los SMHN además incorporan en sus productos y análisis los datos procedentes de las EMA de otras organizaciones o personas. A los efectos de la presente nota orientativa, se considerará que las EMA no incluyen los instrumentos registradores automáticos, como barógrafos o anemógrafos, que funcionan de forma permanente, pero requieren de la intervención manual para leer la información de un mapa u otro gráfico; sin embargo, sí incluyen los dispositivos que elaboran un producto digital que exige la intervención manual para conectarlo con la red más amplia de comunicaciones.

Ya se han publicado las *Directrices para la gestión de las modificaciones en los programas de observación del clima*, que incluyen un conjunto de prácticas recomendadas conforme a las cuales pueden gestionarse dichas modificaciones (OMM, 2007). La presente nota orientativa se centrará en las EMA que probablemente formarán parte de registros climáticos de largo plazo. En general, serán de propiedad de los SMHN u organismos conexos, o a veces de terceros (por ejemplo, organismos de aviación, agricultura o transporte por carretera) de conformidad con las normas adoptadas por los SMHN. La experiencia demuestra que las EMA del sector privado pueden ser útiles para algunos fines climáticos (por ejemplo, brindan información sobre fenómenos meteorológicos extremos específicos a escala local), pero pocas veces cuentan con

las normas relativas a la duración del registro, la exactitud o la exposición, o con la estabilidad a largo plazo del emplazamiento o los instrumentos, como para ser convenientes para el seguimiento en escalas temporales de diez años o más.

La automatización de una red de observación ofrece muchas ventajas, aunque también presenta desafíos para la vigilancia del clima a largo plazo. Toda modificación que se realice en un sistema de observación podría provocar una falta de homogeneidad en el registro climático, lo cual debe evaluarse y, si es necesario, ajustarse. La evaluación de una falta de homogeneidad en un emplazamiento puede resultar especialmente difícil si se producen modificaciones similares en una gran cantidad de emplazamientos (que, en caso contrario, podrían ser estaciones de referencia) durante un corto período, como se analiza en el capítulo 4. En muchos casos, la incorporación de las EMA también puede estar acompañada de la reubicación del emplazamiento. Además, dicha incorporación puede dar lugar a la pérdida de observaciones de variables que resulta difícil medir de forma automática (o en casos en que las mediciones automáticas no son directamente comparables con las observaciones manuales), por ejemplo, la nubosidad, el espesor de la nieve o la evaporación en tanques. Una vez que el uso de las EMA es generalizado en una red, también puede resultar difícil mantener un tipo compatible de instrumentos debido a las políticas de adquisiciones y licitaciones públicas competitivas en algunos países.

Esta nota orientativa debe leerse teniendo presente otras publicaciones de la OMM, entre ellas la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-N° 8) de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO) (OMM, 2014; en lo sucesivo denominada CIMO 2014). En particular, en CIMO 2014 se proporcionan orientaciones detalladas (parte II, capítulo 1) sobre el uso de las estaciones meteorológicas automáticas. La presente nota se centra en los aspectos de las EMA que son pertinentes para las mediciones climáticas de largo plazo; para obtener información detallada sobre las EMA en general, véase la publicación CIMO 2014. En la *Guía de prácticas climatológicas* (OMM, 2011) se analizan aspectos de las EMA en el capítulo 2 (Observaciones, estaciones y redes climáticas), y se hace referencia a los principios generales de la vigilancia del clima establecidos por el Sistema Mundial de Observación del Clima de la OMM. En *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (OMM, 2003) (Directrices sobre metadatos climáticos y homogeneización) se analizan los métodos de prueba de la homogeneidad y la homogeneización y se brindan orientaciones conexas (está prevista una actualización de la publicación en el momento de la redacción de la presente nota).

2. **ASPECTOS GENERALES Y RELATIVOS A ELEMENTOS ESPECÍFICOS DE LA TRANSICIÓN DE LAS MEDICIONES CONVENCIONALES A LAS AUTOMÁTICAS**

2.1 **Aspectos generales**

2.1.1 ***Integridad de los datos***

Las estaciones meteorológicas automáticas (EMA), cuando funcionan de manera óptima, pueden proporcionar flujos de datos con una continuidad y una resolución temporal que superan ampliamente la capacidad del más diligente de los observadores. Pueden proporcionar datos en resoluciones de 1 minuto o menos y funcionar durante la noche y los fines de semana con la misma eficacia que lo hacen en la semana normal de trabajo.

Tanto en las observaciones convencionales como en las automáticas pueden producirse interrupciones en la continuidad de los datos, pero estas interrupciones posiblemente ocurran de diferentes formas. En el caso de las observaciones convencionales, la razón más habitual por la cual se pierden observaciones es la ausencia del observador, ya sea prevista (por ejemplo, no se realizan observaciones durante los fines de semana) o imprevista (por ejemplo, debido a una enfermedad). También es posible que no se obtengan datos durante períodos prolongados, o incluso que las observaciones se suspendan por completo, si un observador abandona su puesto (por ejemplo, en caso de renuncia, enfermedad o fallecimiento) y no es posible contratar rápidamente a un reemplazante (un riesgo que surge especialmente en las zonas alejadas con

pocos habitantes). En ocasiones, las averías o fallas de los instrumentos provocan la pérdida de datos en las observaciones convencionales, pero las fallas en las comunicaciones rara vez lo hacen, ya que los datos generalmente pueden conservarse y transmitirse con posterioridad.

En el caso de los sistemas automáticos, no se necesita la presencia de un observador. Sin embargo, los sistemas electrónicos suelen ser más susceptibles a las fallas que los sistemas convencionales (en especial, las partes de los sistemas convencionales que no contienen piezas móviles, como los termómetros y los pluviómetros), y pueden verse afectados por distintos fenómenos, tales como las descargas eléctricas (a las cuales los anemómetros son particularmente susceptibles debido a que se encuentran ubicados en mástiles altos) o los cortes del suministro de energía (ya sea de la red eléctrica o de las baterías, o bien, de la energía solar). Las observaciones automáticas también pueden verse afectadas por fallas del sistema de comunicaciones, que pueden producirse en la estación, en el punto de ingreso en una base de datos o en el sistema de telecomunicaciones intermedio. El grado en que los datos afectados pueden recuperarse depende de diversos factores, por ejemplo, de los métodos utilizados para la transmisión de los datos y del hecho de si los datos se registraron en el emplazamiento (y si es así, durante cuánto tiempo). Cuando se producen fallas de los instrumentos o sistemas de comunicaciones, generalmente se necesitan conocimientos técnicos especializados para subsanarlas, mientras que un termómetro roto, por ejemplo, puede sustituirse por uno de repuesto que se conserva en el emplazamiento o se envía a la estación en unos pocos días. Esta situación puede ocasionar interrupciones prolongadas si tales conocimientos especializados no están disponibles a nivel local, especialmente en las zonas alejadas. De acuerdo con la experiencia obtenida con los datos de Australia a partir de la introducción de las EMA, el porcentaje total de datos faltantes es similar en las estaciones convencionales y en las automáticas; sin embargo, la duración media de las interrupciones en las estaciones automáticas es mayor. La información procedente de Australia y España indica que las interrupciones breves intermitentes que se repiten durante un período prolongado son otro tipo de falla que puede producirse en las EMA. Estas interrupciones pueden afectar las observaciones diarias y, por ende, los totales y los promedios de períodos más prolongados.

2.1.2 ***Diferencias en los modos de error entre las mediciones convencionales y las automáticas***

Las observaciones convencionales son susceptibles a un amplio abanico de errores humanos, que no ocurren en los sistemas automáticos. Entre algunos ejemplos cabe mencionar los siguientes:

- a) errores de lectura incorrecta de un instrumento (por ejemplo, leer el extremo incorrecto del índice de un termómetro o leer incorrectamente el valor por 5° o 10°);
- b) errores de transcripción y entrada de datos (por ejemplo, la introducción incorrecta de datos mediante el teclado al ingresar la información de los formularios impresos en una base de datos), y
- c) errores de cálculo (por ejemplo, la conversión de la presión a nivel de estación a la presión a nivel medio del mar, cuando esta se realiza de forma manual o mediante tablas de consulta, lo que sucede habitualmente con los datos históricos).

En el caso de algunos elementos meteorológicos, las observaciones convencionales también estarán supeditadas inevitablemente al criterio del observador, que puede variar según su capacidad, experiencia y diligencia. Un ejemplo obvio es el de la nubosidad y el tipo y la altura de las nubes, dado que se depende en gran medida del criterio del observador; en este caso, el cambio de observador generalmente provoca una falta de homogeneidad en los datos (Jovanovic y otros, 2010). Entre otros ejemplos se incluyen las estimaciones de la visibilidad y las observaciones del viento derivadas de las estimaciones de la escala de Beaufort.

Si bien las causas de error mencionadas anteriormente desaparecen en gran medida, o totalmente, en el caso de las EMA, estas pueden generar datos erróneos por otras razones, entre las que cabe mencionar las fallas electrónicas o mecánicas. Un modo de error particularmente común en las EMA está relacionado con los cambios muy rápidos en una variable observada

(“picos”), que a menudo se traducen en un valor muy poco realista (figura 1). Estos picos generalmente se deben a sobretensiones o interferencias eléctricas que se producen en algún punto del sistema. En las redes avanzadas de EMA, esto representa un problema cada vez menor, dado que se aplican algoritmos para filtrar los datos espurios (véase a continuación), pero continúa siendo un problema importante en las EMA menos avanzadas o de la primera generación, como las que suelen encontrarse en los países en desarrollo o las que se utilizaban en los primeros años en los países más desarrollados. También pueden producirse errores en los sistemas internos de las EMA, por ejemplo, los algoritmos que se utilizan para convertir las señales de los instrumentos en los valores de las variables meteorológicas. Puede resultar especialmente difícil detectar y corregir estos errores si el programa informático de la EMA es una “caja negra” provista por el fabricante, a la que los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales no tienen un acceso directo.

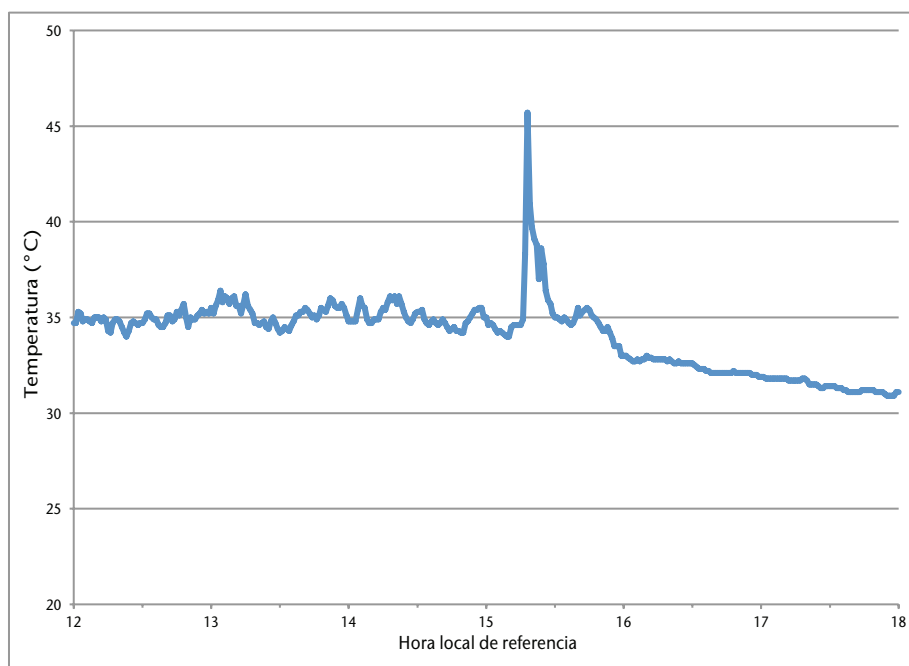


Figura 1. Ejemplo de un pico de datos: temperaturas de bulbo seco en Bulman (Australia), 5 de mayo de 2016

2.1.3 ***Uniformidad de las prácticas entre los sistemas convencionales y automáticos***

En general, es conveniente definir las variables climatológicas que se miden con estaciones automáticas de una forma que coincida, en la mayor medida posible, con las variables equivalentes que se miden con estaciones convencionales. Esto es especialmente necesario en el caso de las variables que se definen durante un día. Por ende, la forma en que se calculan las variables diarias a partir de los flujos de datos de las EMA (que generalmente tienen una resolución de 1 minuto o menos) reviste importancia.

La mayor resolución temporal de las estaciones automáticas, junto con el hecho de que funcionan durante todo el día, puede introducir posibilidades de medición que no existen en el caso de las estaciones convencionales. A continuación se incluyen dos ejemplos:

- a) En una estación automática, resulta fácil definir un día climatológico que finaliza a la medianoche, mientras que en una estación convencional suele ser difícil encontrar observadores que estén disponibles a la medianoche, por lo que generalmente se eligen otras horas de observación (por ejemplo, a las 9.00 horas).

- b) Un promedio diario en una estación automática (por ejemplo, la presión a nivel medio del mar) puede calcularse continuamente en todas las observaciones, mientras que en las estaciones convencionales, solo puede utilizarse un número reducido de observaciones (por ejemplo, cuatro observaciones cada seis horas).

En estos casos, si bien aprovechar las posibilidades adicionales que ofrecen las EMA puede parecer una “mejora”, hacerlo podría provocar una falta de homogeneidad en el registro climático. También podría haber una falta de uniformidad en una red de observación si, por ejemplo, distintas estaciones transmiten información en horas diferentes. Es preferible que las definiciones utilizadas para las variables en las EMA coincidan, en la mayor medida posible, con las definiciones utilizadas para las estaciones convencionales.

2.1.4 **Mantenimiento, calibración y verificaciones de tolerancia**

La OMM recomienda que todas las estaciones terrestres sinópticas y las estaciones climatológicas principales se inspeccionen al menos una vez cada dos años (CIMO 2014, parte I, sección 1.3.5). Asimismo, las directrices de la OMM establecen que deben realizarse las verificaciones recomendadas por el fabricante en los instrumentos automáticos (las cuales varían según cada instrumento). Los sensores automáticos, especialmente los electrónicos, pueden quedar a la deriva sobre el terreno, y las verificaciones de tolerancia periódicas¹ son importantes para velar por la estabilidad y la homogeneidad a largo plazo de las observaciones. También es conveniente realizar calibraciones más rigurosas de los sensores cada cierto tiempo. Si no se realizan, existe el riesgo de que la deriva del instrumento produzca tendencias espurias en los datos, que pueden ser difíciles de detectar si se generan gradualmente con el transcurso del tiempo. La ausencia de verificaciones de tolerancia o de calibraciones también reduce la trazabilidad de los datos.

Además de las inspecciones periódicas y el mantenimiento sobre el terreno, las EMA inevitablemente sufrirán algunas interrupciones imprevistas. Para mitigar este riesgo, pueden adoptarse algunas medidas, tales como instalar sensores redundantes (en caso de falla de un solo sensor), o bien, tener una capacidad considerable de registro de datos en la estación que permita recuperar los datos si se produce una falla en las comunicaciones (esto requiere un suministro adecuado de energía). Muchas interrupciones se resuelven sin la intervención directa del proveedor de las redes de observación, y algunas pueden ser solucionadas por el personal local; sin embargo, en algunos casos, se necesitará la intervención de personal técnico especializado.

Una situación habitual es que se instale una red de EMA, pero que la fuente de financiamiento de la instalación incluya una asignación limitada, o nula, para el mantenimiento continuo (previsto o imprevisto). Otras dificultades pueden incluir la escasez de personal técnico debidamente cualificado y los emplazamientos a los que el personal técnico no puede llegar con rapidez (por ejemplo, aquellos que se encuentran muy lejos de la sede de los SMHN o en zonas de difícil acceso, como montañas altas o islas alejadas de la costa).

En consecuencia, en los países donde el apoyo para el mantenimiento es limitado o nulo, algunas EMA son propensas a sufrir interrupciones prolongadas u otros problemas de mantenimiento (Page y otros, 2004). Este problema es especialmente grave en algunos países en desarrollo, donde el alcance de los fondos (a veces otorgados por donantes de ayuda o entidades similares) es limitado, al igual que los conocimientos técnicos especializados. En los peores casos, las redes de EMA prácticamente han dejado de funcionar a pocos años de su instalación.

2.1.5 **Filtrado de picos, muestreo temporal y otros algoritmos**

Como se indicó anteriormente, en las EMA, un problema habitual relacionado con la calidad de los datos es la presencia de picos. Cada vez más se aplican algoritmos en el proceso de datos para filtrar estos picos de los flujos de datos. No obstante, aún es preciso utilizar métodos de control de calidad de los datos en los análisis climáticos para detectar y marcar los valores erróneos, sobre

¹ Las verificaciones de tolerancia sobre el terreno suelen denominarse “calibraciones”, pero, en sentido estricto, el término “calibración” se limita a una comparación con un patrón de referencia formal.

todo en el caso de los datos históricos. Esto se debe a que no puede suponerse que las normas de calidad que se aplican a los datos actuales también son válidas necesariamente para los datos de los primeros años de uso de las EMA. Los picos de datos representan un problema especial para los análisis de los fenómenos climáticos extremos debido a que, por su naturaleza, generalmente no están comprendidos en el intervalo normal de observaciones y, por ende, aparecerán como extremos espurios, a menos que se los filtre.

Las EMA utilizan un amplio abanico de programas y equipos informáticos para convertir las señales de los instrumentos (por ejemplo, la resistencia eléctrica de una sonda de temperatura o las señales eléctricas generadas cada vez que un anemómetro gira) en los valores de las variables meteorológicas. Este proceso también supondrá la selección de ventanas temporales durante las cuales se tomarán muestras de las variables. En algunos casos, los cambios de programas informáticos pueden ocasionar una falta de homogeneidad en una o más variables climáticas. Por lo tanto, es importante que los cambios de versiones de los programas informáticos y las modificaciones que se realicen en los equipos informáticos internos (incluidos los módulos de interfaces electrónicas) se incluyan en los metadatos de la estación. El hecho de que los programas informáticos de las EMA generalmente están amparados por patentes supone otra dificultad, y es posible que el efecto de los cambios de versiones efectuados por los fabricantes no sea transparente para el operador de la red o los usuarios de los datos.

2.2 Elementos meteorológicos específicos

2.2.1 *Temperatura*

La temperatura es la variable que ha estado sujeta al máximo nivel de análisis con respecto a la homogeneidad. Históricamente, los cambios significativos en las tecnologías de observación, sobre todo las modificaciones de los escudos o los abrigo que se utilizan para proteger los instrumentos de la radiación solar directa o indirecta, han ocasionado una falta de homogeneidad, a veces considerable, en las mediciones de la temperatura. Por ejemplo, la introducción de los abrigo típicos para instrumentos (garitas de Stevenson u otros abrigo similares) en numerosos países a fines del siglo XIX y principios del siglo XX produjo cambios generalizados de alrededor de 0,2 °C en las temperaturas medias anuales (Parker, 1994), y cambios aún mayores en ciertas estaciones (por ejemplo, Brunet y otros, 2011; Ashcroft y otros, 2012).

Algunas cuestiones específicas que afectan las mediciones automáticas de la temperatura incluyen las siguientes:

- a) cambios en los instrumentos (de termómetros de líquido en cápsula de vidrio a sondas electrónicas);
- b) cambios en los abrigo para instrumentos;
- c) cambios en los algoritmos de proceso de datos (por ejemplo, la frecuencia temporal de las observaciones y la definición del promedio diario);
- d) cambios de las horas de observación u otras prácticas de observación, y
- e) cambios en los emplazamientos vinculados con la introducción de las EMA.

A veces se considera que el cambio de instrumentación propiamente dicho es la principal modificación que se produce con la introducción de las EMA. Sin embargo, en las redes de observación bien gestionadas, el sistema de medición está correctamente calibrado (en el sentido de que las lecturas puntuales son congruentes con un patrón de laboratorio) de acuerdo con procedimientos meteorológicos normalizados (Bertiglia y otros, 2015), y la falta de homogeneidad en la temperatura relacionada con la introducción de las EMA surge principalmente de otras fuentes, como se indica a continuación.

a) Cambios en los instrumentos

En la mayoría de los casos, la introducción de las EMA implica un cambio de instrumento; generalmente, se reemplaza el termómetro de líquido en cápsula de vidrio con lectura manual (mercurio o alcohol) por un termómetro con resistencia de platino o un instrumento similar.

La mejor práctica consiste en calibrar y probar los instrumentos (OMM, 2014). En los países donde esto ocurre, es poco común que haya una diferencia importante entre las observaciones instantáneas de un instrumento manual y de uno automático en condiciones de laboratorio estables y controladas. Sin embargo, aunque los instrumentos produzcan lecturas instantáneas idénticas, puede haber diferentes tiempos de respuesta (el tiempo que tardan en responder a un cambio instantáneo en la temperatura del aire). Las observaciones no filtradas de una sonda automática suelen tener una respuesta más rápida que las de un termómetro de líquido en cápsula de vidrio.

En algunos casos, las sondas automáticas, una vez que se encuentran sobre el terreno o durante el transporte, pueden derivarse con respecto a un patrón. Estas derivas producirán una falta de homogeneidad en los registros climáticos. Para prevenirlas, deben efectuarse inspecciones periódicas de los emplazamientos (cada seis meses, como mínimo, en el caso de las EMA; OMM, 2011), y verificaciones de tolerancia y calibraciones de los instrumentos con respecto a un patrón. Algunos países carecen de los recursos necesarios para realizar inspecciones frecuentes, lo que eleva el riesgo de deriva de los instrumentos.

b) Cambios en los abrigos para instrumentos

Algunos países (como Australia y el Canadá) conservaron el mismo diseño de garita cuando introdujeron las EMA, y otros (como el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte) mantuvieron la forma y las dimensiones de la garita, pero utilizaron materiales plásticos en lugar de madera. En el caso de Gran Bretaña, Perry y otros (2007) determinaron que las diferencias de temperatura entre las garitas de plástico y las de madera eran, en promedio, menores de 0,1 °C (y que las diferencias entre el plástico y la madera generalmente eran inferiores a las diferencias entre las garitas de madera situadas en el mismo lugar). Conservar el mismo diseño de garita es la opción preferida, siempre que sea posible, ya que al hacerlo se elimina la posibilidad de que se produzca una falta de homogeneidad.

Sin embargo, muchos países han introducido nuevos diseños de garitas y, en general, han preferido las garitas pequeñas de plástico, que son más económicas y cuyo mantenimiento es más sencillo. Algunos de estos nuevos diseños de garitas producen resultados similares (generalmente dentro de 0,1 °C) a los obtenidos con las tradicionales garitas de Stevenson de madera (Brandsma y van der Meulen, 2008). Sin embargo, en otros casos, como el cambio de los abrigos de la región de algodón a otras garitas diversas en los Estados Unidos de América, los impactos en ciertas variables de temperatura son de varias décimas de grado. En ciertos casos se ha determinado que algunos de los nuevos diseños de garitas pueden degradarse considerablemente con el paso del tiempo y causar efectos en la temperatura máxima media de hasta 0,5 °C en un plazo de cinco años (Lopardo y otros, 2014). Esta degradación, cuando se produce, es difícil de detectar estadísticamente o a través de inspecciones sobre el terreno.

En algunos casos (por ejemplo, la Red de Referencia Climatológica de los Estados Unidos; Diamond y otros, 2013), también se han introducido abrigos para instrumentos ventilados, pero los sensores con ventilación natural siguen utilizándose en la mayoría de las redes operacionales.

En la sección 3.2 se analizan otros detalles de comparaciones pertinentes.

c) Cambios en los algoritmos de proceso de datos

Como se indicó anteriormente en el punto a), las sondas automáticas utilizadas en las EMA habitualmente tienen diferentes características de tiempo de respuesta que las de los termómetros de líquido en cápsula de vidrio. Por lo general, las sondas tienen tiempos de respuesta más rápidos, es decir, cuentan con una mayor capacidad para tomar muestras de

fluctuaciones de la temperatura a muy corto plazo, lo que da como resultado temperaturas máximas más altas y mínimas más bajas que las registradas por los termómetros de líquido en cápsula de vidrio. Esto genera un sesgo positivo en la amplitud térmica diaria.

Las temperaturas máximas más altas y las temperaturas mínimas más bajas pueden anularse, hasta cierto punto, en las temperaturas medias en aquellos países donde las temperaturas máximas y mínimas diarias se utilizan como base para calcular las temperaturas medias. Sin embargo, existen algunos lugares (figura 2), en especial en las regiones áridas, donde las fluctuaciones de temperatura en escalas temporales muy cortas (menos de 1 minuto) son más grandes en el día que en la noche (debido a la estructura diferente de la capa límite, que suele ser estable durante la noche y bien mezclada durante el día). Por ende, en tales casos, el muestreo más rápido dará como resultado un cambio positivo en las temperaturas máximas que será mayor que el cambio negativo en las temperaturas mínimas, lo que producirá un cambio en las temperaturas medias.

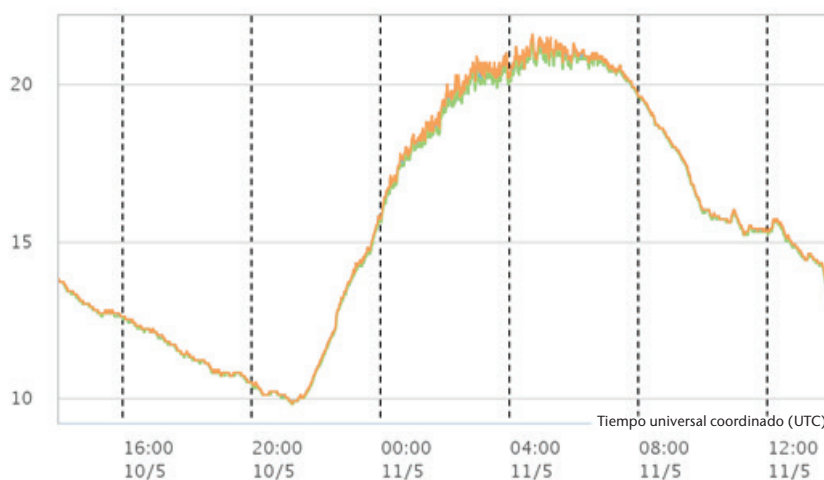


Figura 2. Temperaturas (°C) en Birdsville (Australia), de las 14.00 UTC (hora universal coordinada) del 10 de mayo de 2016 a las 14.00 UTC del 11 de mayo de 2016 (de las 0.00 a las 24.00 horas del 11 de mayo de 2016, hora local), que muestran fluctuaciones discernibles de un minuto al siguiente, de alrededor de las 0.00 a las 7.00 UTC (de las 10.00 a las 17.00, hora local) del 11 de mayo de 2006 entre la temperatura más alta (línea anaranjada) y la más baja (línea verde) de cada minuto

Fuente: Oficina de Meteorología de Australia

Es factible aplicar filtros en los algoritmos de proceso de datos para suavizar los resultados de las sondas automáticas, de modo que sean similares a los tiempos de respuesta característicos de los termómetros de líquido en cápsula de vidrio. Sin embargo, es posible que dichos procesos no existan en todas las circunstancias, ni puede suponerse que generen una coincidencia exacta. Tampoco es probable que tengan en cuenta los cambios en las propiedades térmicas de las garitas cuando el diseño de la garita de las estaciones automáticas es diferente del que se utiliza en las estaciones convencionales.

d) Cambios de las horas de observación u otras prácticas de observación

Los cambios de las horas de observación provocan importantes faltas de homogeneidad en los registros de temperatura (Menne y otros, 2009; Vincent y otros, 2009)². La automatización de las redes no genera necesariamente cambios en las horas de observación, pero podría facilitar

² El caso analizado por Menne y otros (2009), si bien solo se relaciona parcialmente con la introducción de las EMA, demuestra que un cambio en las horas de observación en gran parte de una red puede sesgar de forma considerable los valores; en este caso, cuando se sustituyeron de manera sistemática observaciones vespertinas por observaciones matutinas en muchas estaciones se produjo un sesgo negativo en las temperaturas medias.

tales cambios. Por ejemplo, dado que ya no se necesita un observador humano, resulta mucho más práctico medir las temperaturas máximas y mínimas de un día civil, de medianoche a medianoche. Como se señaló anteriormente, si bien es preferible evitar los cambios en las horas de observación de las variables diarias durante la transición de las estaciones convencionales a las automáticas, este tipo de cambio ha sido habitual en el pasado.

La introducción de las EMA puede provocar cambios en la precisión de los datos. Por una parte, los observadores humanos, aunque se les indique que deben leer al $0,1^\circ$ más cercano, tienden a utilizar números redondos y, como resultado, los valores que terminan en $0,0$ y, en menor medida, en $0,5$ quedan excesivamente representados (Trewin, 2002). Las estaciones automáticas deberían estar libres de tales tendencias, pero en algunos casos han comunicado valores redondeados a grados enteros (por ejemplo, debido a las limitaciones de los códigos de transmisión de datos, en particular en las EMA de primera generación) en países donde la norma de precisión habitual es de $0,1^\circ$. Siempre que la tendencia al redondeo no tenga un sesgo ascendente o descendente, el redondeo debería tener un impacto insignificante en los valores medios, pero podría generar un efecto considerable en la frecuencia de las superaciones de umbrales (por ejemplo, días en los que la temperatura es de 30°C o superior) (Zhang y otros, 2009; Trewin, 2012), y también podría influir en la variabilidad meteorológica observada.

e) Cambios en los emplazamientos vinculados con la introducción de las EMA

En muchos casos, la introducción de las observaciones automáticas está acompañada de un cambio del emplazamiento. Esto obedece a muchas razones, pero una situación habitual es que un emplazamiento manual de larga data situado en una zona urbana (por razones históricas o debido a la disponibilidad de observadores) se traslade a una nueva ubicación en una zona menos urbanizada (generalmente, un aeropuerto o un lugar similar). La nueva ubicación cumpliría mejor las especificaciones de observación normalizadas que se definen en CIMO 2014, y sería apta para observar distintas variables, como el viento, que no pueden observarse de manera satisfactoria en la mayoría de los entornos urbanos. Otra situación habitual es que un emplazamiento se traslade a un lugar, por ejemplo, el centro de un aeropuerto, que no es de fácil acceso para los observadores humanos, pero es más representativo para los principales grupos de usuarios de la información obtenida.

Si bien cada cambio de emplazamiento es único en lo que respecta a su impacto en la temperatura y otras variables, es un principio bien asentado que las zonas urbanas generalmente son más cálidas (en especial, durante la noche) que las zonas no urbanas. Por ende, en ausencia de otras influencias (como la topografía local o la exposición a una costa cercana), la reubicación de un emplazamiento desde un sitio dentro de la ciudad hacia otro fuera de la ciudad, lo que suele estar relacionado con la instalación de las EMA, con frecuencia dará lugar a una disminución artificial de las temperaturas mínimas. Según las características exactas del sitio anterior y del nuevo, las faltas de homogeneidad de 1°C o superiores en las temperaturas mínimas, como resultado del traslado a un sitio fuera de la ciudad, no son inhabituales. Posiblemente también haya impactos menos uniformes en las temperaturas máximas y las temperaturas medias diarias.

2.2.2 **Precipitación**

El cambio más común que se produce en las mediciones de precipitaciones durante la transición de las estaciones convencionales a las EMA es el reemplazo de los medidores con recipiente de acumulación y lectura manual (en los que la lluvia se acumula en un recipiente que se lee y luego se vacía a una hora determinada) por los medidores automáticos. El tipo más común de medidor de precipitación automático es el pluviómetro de cubeta basculante (en el que el agua ingresa en el medidor por una entrada y se acumula en una pequeña cubeta, que oscila cuando está llena y genera una señal que se transmite); otro tipo común de medidor automático es el medidor de pesaje. También existen instrumentos que miden el nivel de agua en un recipiente y medidores sin recolección que utilizan herramientas tales como la medición del impacto, el radar de microondas y el láser. Los medidores sin recolección suelen utilizarse para las mediciones de las condiciones meteorológicas actuales, más que para los registros de largo plazo de acumulación de la precipitación (Vuerich y otros, 2009).

Al igual que ocurre con la temperatura, el impacto de la transición a las mediciones automáticas puede incluir los efectos del cambio de instrumento y de los cambios en la exposición o el entorno del emplazamiento local del instrumento. Como sucede con cualquier cambio de tipo de instrumento, puede haber diferencias sistemáticas entre los instrumentos convencionales y los automáticos, cuya naturaleza dependerá de los instrumentos específicos de que se trate.

El principal impacto de los emplazamientos se produce en los lugares donde el viento es lo suficientemente fuerte como para causar una captación insuficiente de la precipitación, ya que el viento a menudo genera este efecto (Sieck y otros, 2007). En estos casos, un cambio significativo en el entorno de viento local (que puede ocurrir incluso como resultado de un cambio moderado de emplazamiento) puede influir considerablemente en la medida en que se produce la captación insuficiente y, por ende, provocar la falta de homogeneidad en la precipitación medida. Este problema es particularmente grave en los lugares muy expuestos, como las cimas de las montañas o las costas (por ejemplo, en los faros). También es especialmente grave en los lugares donde una proporción considerable de la precipitación cae en forma helada. En general, los emplazamientos revisten menos importancia en condiciones de viento ligero.

2.2.2.1 Impacto de las interrupciones de funcionamiento en los datos de precipitaciones

Si bien los operadores de las redes meteorológicas procuran reducir al mínimo la pérdida de datos, un cierto nivel de interrupciones es inevitable en cualquier red de observaciones. Las interrupciones plantean un problema especial en el caso de los elementos aditivos, de los cuales la precipitación es el más destacado. Ello se debe a que la pérdida de cualquier parte de un día de observaciones da como resultado la pérdida del total mensual (anual) del mes (año), a menos que los datos del período faltante se estimen, por ejemplo, mediante el uso de estaciones circundantes. (En cambio, la pérdida de un día de las observaciones de temperatura correspondientes a un mes generalmente solo introduce una incertidumbre marginal en el promedio mensual). Este problema es más grave en el caso de los pluviómetros de cubeta basculante, en los que se necesita un recuento continuo, y es menos probable que incida en los medidores de pesaje, según la forma en que se configure la captación de datos.

Un período de datos de precipitaciones faltantes de una estación automática puede ocasionar que el valor diario afectado se indique como faltante, o bien, podría registrarse como un valor de 0 (posiblemente espurio), según la forma en que se estructure la captación en la base de datos. En el último caso, se creará un sesgo negativo en la precipitación registrada, cuyo alcance dependerá de la frecuencia de las interrupciones y las circunstancias en las que estas ocurran. (Podría suponerse que sería más probable que las interrupciones se produzcan durante las tormentas, que también probablemente sean momentos con elevados niveles de precipitaciones, pero se desconoce si esta proposición ha sido sometida a una prueba objetiva).

En el caso de las observaciones convencionales, si se pierden las observaciones de un día, puede obtenerse (habitualmente) un total de varios días, es decir, podrían perderse observaciones diarias, pero, en general, no aquellas correspondientes al mes y al año. Sin embargo, las observaciones convencionales en ocasiones pueden verse afectadas por desbordamientos de los medidores en condiciones muy lluviosas, lo que genera que se subestimen, o se pierdan por completo, las precipitaciones extremas altas, un modo de error que es mucho menos probable en los instrumentos automáticos.

2.2.2.2 Registro de pequeñas cantidades de precipitación

Existen posibles sesgos en el registro de pequeñas cantidades de precipitación mediante el uso de instrumentos tanto convencionales como automáticos. Esta situación genera un posible sesgo en la frecuencia de estas pequeñas cantidades durante la transición de las estaciones convencionales a las automáticas.

De acuerdo con la experiencia obtenida en los emplazamientos manuales, es relativamente común que las cantidades pequeñas (menos de 2 mm, y especialmente menos de 1 mm) no se comuniquen, en particular, en los emplazamientos que no cuentan con observadores

profesionales. Un estudio sobre datos manuales de las lluvias realizado en Australia reveló que no se informó sobre más del 50 % de todas las cantidades de lluvias diarias menores de 1 mm en toda la red (Trewin, 2001). Si bien el impacto de esta situación en los totales mensuales y anuales no es importante (dado que la pequeña cantidad generalmente permanecerá en el medidor y se agregará a la siguiente lluvia más abundante), la infravaloración de las pequeñas cantidades afectará la cantidad de días de lluvia observados y los índices basados en estos³.

Al contrario, los pluviómetros automáticos no pueden distinguir de manera fiable entre la lluvia y el rocío o las heladas, lo que puede generar una cantidad exagerada de días con pequeñas cantidades de precipitación, salvo que se realice una intervención manual para eliminarlas. Los pluviómetros de cubeta basculante también son susceptibles a las lecturas espurias derivadas de los movimientos de basculación registrados como resultado de una alteración del medidor, del ingreso de objetos extraños en el medidor⁴ o de otra situación similar.

Se sabe que en los medidores manuales puede producirse un registro insuficiente debido a las pérdidas por humidificación en el caso de pequeñas cantidades de precipitación (lo que también puede ocurrir en algunos sistemas automáticos). Este problema cobra más importancia en los lugares que reciben una cantidad elevada de precipitaciones muy débiles, sobre todo cuando estas caen en forma helada. En el Canadá, se ha estimado que la pérdida total por humidificación en algunas localidades puede ser de alrededor del 15 % al 20 % (Goodison y otros, 1998). Dicho régimen de precipitaciones es típico de los climas muy fríos, donde los niveles traza también pueden contribuir considerablemente a la precipitación total.

2.2.2.3 Precipitación engelante

La medición de la precipitación engelante siempre ha resultado particularmente dificultosa. La captación insuficiente de la nieve constituye un problema, aun en condiciones de viento ligero; asimismo, resulta complejo distinguir entre la nieve que cae y la ventisca de nieve que se levanta del suelo. Es frecuente que los diversos métodos de medición de la precipitación engelante produzcan resultados que difieren por un factor de 2 o más, y las diferencias pueden ser incluso mayores en condiciones de vientos fuertes (Goodison y otros, 1998; Wolff y otros, 2014).

La OMM realizó un importante estudio de intercomparación entre 1986 y 1993, basado principalmente en observaciones convencionales (Goodison y otros, 1998). En un segundo estudio de intercomparación, el Experimento de Intercomparación de la Precipitación Sólida de la OMM, se efectuaron observaciones entre 2012 y 2015.

Muchos de los problemas relativos a la medición de la precipitación engelante son comunes tanto para los instrumentos convencionales como para los automáticos. En particular, el impacto del viento en las mediciones de la lluvia engelante (ocasiona la captación insuficiente de la nieve que cae y genera la ventisca de nieve) dependerá de la posición (altura y exposición) y del tamaño de la toma del medidor, como así también de la medida en la que esté protegido del viento. La manera en que la precipitación engelante se mide una vez que ingresa en el medidor no debería influir.

Los pluviómetros de cubeta basculante generalmente están diseñados para medir líquidos. Una configuración habitual de estos instrumentos consiste en calentar la toma del medidor para derretir la lluvia engelante que ingresa en este, lo que permite que el instrumento mida equivalentes líquidos (con un pequeño desfase temporal). Esta puede ser una manera eficaz de medir la precipitación engelante, aunque depende del funcionamiento adecuado del sistema de calefacción. Por lo tanto, se descompondrá si el sistema de calefacción falla⁵ y, aun cuando funcione bien, es posible que tenga sesgos sistemáticos (por ejemplo, debido a la evaporación en

³ Este fenómeno explica, en parte, el motivo por el cual el Equipo de Expertos sobre Detección e Índices del Cambio Climático utiliza un umbral de precipitación diaria de 1 mm en sus índices de precipitación.

⁴ En 2009 se observó un caso de lectura espuria de 0,2 mm en el norte de Australia, en un día sin nubes en varios cientos de kilómetros a la redonda. La causa de esta lectura espuria fue el ingreso de detritos arrastrados por el viento en la toma del medidor.

⁵ De acuerdo con la experiencia operacional, los sistemas de calefacción de medidores suelen presentar problemas de fiabilidad y demandan una cantidad elevada de energía.

la toma del medidor). Cuando no se incluye un sistema de calefacción (en general, en los lugares donde la precipitación engelante es relativamente poco frecuente), posiblemente la nieve se acumulará en el medidor y no se la medirá hasta que se derrita. En consecuencia, es posible que la precipitación se mida mucho tiempo después de haber caído, aunque la cantidad total fuera aproximadamente correcta y no se haya visto afectada, por ejemplo, porque la toma del medidor quedó completamente llena de nieve. Las pérdidas por evaporación en los medidores calentados pueden ser considerables; Goodison y otros (1998) recomiendan que no se utilicen medidores calentados para medir la precipitación engelante en lugares donde las temperaturas sean menores de 0 °C durante períodos prolongados.

Los medidores de pesaje, que pueden medir con facilidad precipitación líquida o helada, generalmente no dependen de la calefacción. En algunos estudios de intercomparación, se ha señalado que estos medidores son más adecuados para los climas que reciben cantidades considerables de precipitación engelante, aunque también pueden presentar problemas relacionados con la calidad de los datos (Goodison y otros, 1998).

En una encuesta de la CIMO (OMM, 2010) se facilitaron los resultados de nueve países. Se determinó que, en ese momento, el 74 % de los emplazamientos automáticos operativos utilizaba pluviómetros de cubeta basculante calentados para medir la precipitación engelante, y el 23 %, medidores de pesaje.

2.2.3 ***Humedad atmosférica (humedad, punto de rocío y presión de vapor)***

En las observaciones convencionales de la humedad atmosférica, generalmente se utilizan termómetros de bulbo seco y de bulbo húmedo. Las lecturas obtenidas con estos instrumentos se utilizan para derivar la presión de vapor actual y la presión saturante de vapor a través del método psicrométrico; luego, estas presiones pueden utilizarse para calcular la temperatura del punto de rocío y la humedad relativa.

Las estaciones automáticas generalmente emplean uno de dos tipos de tecnología: una sonda de bulbo húmedo, que funciona en un entorno similar al de un termómetro de bulbo húmedo convencional, o una sonda de humedad relativa, que mide el cambio de capacitancia de una hoja delgada, cantidad que varía en función de la humedad relativa.

Ambos tipos de instrumentos tienen posibles diferencias sistemáticas con respecto a las mediciones obtenidas con instrumentos convencionales (Lucas, 2010). En el caso de los métodos relacionados con la temperatura de bulbo húmedo, la ecuación utilizada para derivar la presión de vapor a partir de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo incluye una cantidad *A*, la constante psicrométrica. El valor “real” de *A* depende de distintos factores, tales como la ventilación de los instrumentos, la forma del instrumento de bulbo húmedo, y la longitud y la limpieza de la mecha. En la práctica, el valor de *A* que se utiliza en las operaciones generalmente será una constante en toda la red nacional y, por ende, un cambio en el tipo de instrumento que afecta el valor “verdadero” subyacente de *A*, sin que se modifique el valor que se utiliza de manera operativa, producirá una falta de homogeneidad en la presión de vapor y en otros elementos conexos.

Las sondas de humedad generalmente se instalan en los lugares donde no existe la presencia regular de observadores, o donde se registran temperaturas inferiores al punto de congelación de forma periódica. Están diseñadas para funcionar con la máxima eficacia dentro de un intervalo especificado de humedad relativa, y es posible que sean menos fiables fuera de dicho intervalo. Esto puede generar posibles sesgos en las humedades altas o bajas extremas. Los cambios observados en casos de muy baja humedad pueden tener repercusiones en aplicaciones tales como las condiciones meteorológicas propicias para incendios, para las cuales la humedad atmosférica muy baja es un factor de riesgo considerable. Las observaciones en casos de humedad muy alta son fundamentales para la identificación de la niebla y la bruma, que revisten especial importancia para el transporte marítimo y aeronáutico.

Cuando se utilizan sondas de bulbo húmedo, el recipiente de agua conexo debe llenarse periódicamente (al igual que ocurre con los termómetros de bulbo húmedo). Si el recipiente se

seca, la sonda de bulbo húmedo comenzará a funcionar como un bulbo seco y generará lecturas espurias de temperaturas del punto de rocío y de humedad elevadas, cercanas al 100 %. Este modo de error puede ocurrir tanto en los instrumentos de medición de temperatura de bulbo húmedo convencionales como en los automáticos. Sin embargo, en los emplazamientos donde los instrumentos se verifican periódicamente (como sucedería si un observador realizara la observación), cabe esperar que sea más probable que un recipiente vacío se detecte antes de que se seque lo suficiente como para afectar las observaciones.

La relación entre la presión saturante de vapor y la temperatura (y, por ende, entre la presión de vapor y la temperatura del punto de rocío observadas) es principalmente no lineal. A temperaturas del punto de rocío inferiores a 0 °C, un cambio absoluto relativamente pequeño en la presión de vapor (o en la temperatura del bulbo húmedo) puede tener un efecto considerable en la temperatura del punto de rocío. Por ejemplo, la reducción de la presión de vapor en un 1 hPa reducirá la temperatura del punto de rocío en 0,7 °C a una temperatura del punto de rocío de 20 °C, en 2,4 °C a 0 °C y en 5,3 °C a -10 °C. El efecto de este cambio es que cualquier sesgo entre los diferentes tipos de instrumentos generalmente tendrá el mayor impacto en las observaciones realizadas en condiciones de muy baja humedad. Un ejemplo es el caso de Adelaida (Australia), donde el promedio de días por año en los que el punto de rocío a las 9.00, hora local, fue de -5 °C o inferior fue de 0,2 por año desde 1978 hasta 1995, período durante el cual se utilizó un termómetro de bulbo húmedo convencional, pero de 1,5 por año desde 1997 hasta 2015, período durante el cual se utilizó una sonda de bulbo húmedo automática. Por otra parte, en la localidad cercana de Parafield, donde se utilizó una sonda de humedad a partir de 1990, la frecuencia media fue de 0,5 por año⁶.

2.2.4 **Otros elementos**

Algunos de los elementos que se han observado tradicionalmente en muchas estaciones convencionales no pueden medirse con instrumentos automáticos; son elementos para los cuales las observaciones automáticas actualmente se encuentran en una fase inicial; pueden medirse de cierta manera con instrumentos automáticos, pero no de una forma que sea compatible con las observaciones convencionales (incluso con ajustes para lograr la homogeneización); o son elementos para los cuales el uso de instrumentos automáticos aún es, en gran parte, de carácter experimental. Entre ellos cabe mencionar la nubosidad y el tipo y la altura de las nubes, la evaporación en tanques, las condiciones meteorológicas actuales, la visibilidad y el espesor de nieve.

La conversión de las mediciones convencionales a las automáticas generalmente se traduce en el cese de las observaciones de estos elementos. En los países donde una proporción considerable de la red se ha automatizado, o se está automatizando, es posible que la red de observación de tales elementos se reduzca a un nivel inferior al que se necesita para realizar análisis nacionales viables. (Por ejemplo, la actualización del conjunto de datos de nubosidad total de Australia se suspendió a fines de 2015 debido a la cantidad insuficiente de estaciones contribuidoras; Jovanovic y otros, 2010). En algunos casos, podría haber otras posibilidades para los datos convencionales. Por ejemplo, es posible elaborar análisis de la nubosidad a largo plazo combinando los datos satelitales modernos con las anteriores observaciones basadas en las estaciones; además, los datos de la radiación solar, cuando están disponibles, podrían utilizarse como medida de la duración de la luz solar.

La introducción de observaciones automáticas generalmente implicará un cambio en el tipo de instrumento utilizado para las observaciones del viento (o la sustitución de la estimación de los vientos realizada por un observador, mediante la escala de Beaufort u otra similar, por las mediciones instrumentales). Todo cambio en el tipo de instrumento puede introducir una falta de homogeneidad en el registro, cuya naturaleza dependerá de los instrumentos específicos en cuestión y de los algoritmos específicos que se utilicen para convertir el resultado de un instrumento (por ejemplo, la velocidad de rotación de las cazoletas del anemómetro) en la medición deseada.

⁶ De acuerdo con la experiencia operacional, los sistemas de calefacción de medidores suelen presentar problemas de fiabilidad y demandan una cantidad elevada de energía.

Otro problema importante en lo que respecta a las observaciones del viento es que la introducción de las observaciones automáticas también implica la reubicación del emplazamiento. En muchos casos, se tratará de una reubicación desde una zona urbana hacia un aeropuerto o una instalación similar. Las observaciones del viento son sumamente sensibles a la presencia de obstáculos en el flujo de aire en las proximidades del emplazamiento de observación. (En CIMO 2014, se recomienda que los instrumentos de viento se instalen en un área en que la distancia entre el anemómetro y cualquier obstáculo sea, como mínimo, 10 veces la altura del obstáculo). Por ende, cabría esperar que la reubicación a un emplazamiento más despejado, aun sin un cambio de instrumento, genere un aumento en la velocidad del viento observada.

3. EJEMPLOS DE FALTAS DE HOMOGENEIDAD DOCUMENTADAS CAUSADAS POR LA TRANSICIÓN DE LAS OBSERVACIONES CONVENCIONALES A LAS AUTOMÁTICAS

3.1 Introducción

Actualmente, numerosos países cuentan con experiencia en la transición de las observaciones convencionales a las automáticas. Los resultados de estas transiciones están ampliamente documentados, aunque no siempre de forma accesible (por ejemplo, muchos resultados de los ensayos prácticos de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales están documentados solo en informes internos, que generalmente no son de fácil acceso para los usuarios externos, aunque estos materiales están cada vez más disponibles en línea).

El objetivo de este capítulo es proporcionar algunos ejemplos para indicar a los usuarios la naturaleza y el tipo aproximados de las diferencias entre las observaciones convencionales y las automáticas con respecto a un conjunto de variables; el objetivo no es realizar un examen exhaustivo de las publicaciones sobre las faltas de homogeneidad.

El Equipo Científico de Observaciones Paralelas (POST) de la Iniciativa Internacional sobre las Temperaturas en Superficie (Venema y otros, 2016) está realizando (al momento de la redacción de la presente nota) una evaluación de estudios de casos de un amplio abanico de países sobre las mediciones paralelas entre las observaciones convencionales y las observaciones automáticas de temperatura y precipitación. A continuación figuran las conclusiones preliminares de la labor de este Equipo.

3.2 Temperatura

De acuerdo con los resultados preliminares del POST (Aguilar y otros, 2015) correspondientes a diez países, en la mayoría de los estudios, el sesgo promedio en las temperaturas medias causado por la transición de las observaciones convencionales a las automáticas fue negativo (es decir, con las observaciones automáticas se registraron temperaturas inferiores). Los sesgos medios oscilaron entre +0,19 °C en el Perú y -0,36 °C en la Argentina, aunque hubo valores considerablemente más altos en ciertas estaciones. Las magnitudes de los sesgos fueron notablemente mayores en el caso de la amplitud térmica diaria, dado que algunos países tuvieron resultados muy diferentes en las temperaturas máximas y mínimas. Por ejemplo, en España y Suecia, se hallaron sesgos positivos en la temperatura máxima y sesgos negativos en la temperatura mínima, mientras que en el caso de los Estados Unidos (que se analiza en detalle más adelante), el sesgo promedio fue de -0,50 °C en la temperatura máxima, pero en la temperatura mínima fue cercano a 0. Cabe destacar que en los resultados comunicados no se separa sistemáticamente el cambio de instrumento de las reubicaciones del emplazamiento o los cambios en los abrigos para instrumentos conexos; en algunos países, estos cambios tienen un impacto sistemático propio (por ejemplo, en Australia, algunas instalaciones meteorológicas automáticas también guardaron relación con traslados de los emplazamientos desde sitios dentro de la ciudad hacia otros fuera de la ciudad, lo que, cabe suponer, provocaría un sesgo de enfriamiento).

Una transición de instrumentos convencionales a instrumentos automáticos que se estudió en profundidad se llevó a cabo en los Estados Unidos, donde, entre 1984 y 1988, en aproximadamente el 60 % de la red de estaciones cooperativas que miden la temperatura, se efectuó la sustitución de los instrumentos convencionales (en garitas de madera con forma de caja) por instrumentos automáticos (en garitas con múltiples placas)⁷. En los análisis iniciales basados en comparaciones de estaciones operativas (Quayle y otros, 1991), se determinó un impacto promedio de esta transición de $-0,4$ °C en la temperatura máxima y de $+0,3$ °C en la temperatura mínima. Las comparaciones *in situ* especializadas efectuadas en un emplazamiento experimental (Wendland y Armstrong, 1993; Doesken, 2005) respaldaron esta conclusión con respecto a la temperatura máxima, y también revelaron que las diferencias eran mayores en condiciones de viento ligero y radiación solar fuerte. Se encontraron pocos indicios de una diferencia significativa en el caso de la temperatura mínima, lo que sugiere que las diferencias en la temperatura mínima observadas por Quayle y otros (1991) posiblemente hayan sido producto de los cambios de emplazamiento relacionados con la transición (por ejemplo, la instalación de los emplazamientos automáticos más cerca de zonas urbanizadas que los emplazamientos de observaciones convencionales que reemplazaron, a fin de reducir la cantidad necesaria de cables). Hubbard y Lin (2006) reforzaron esta conclusión al determinar que, si bien los impactos generales en toda la red de los Estados Unidos señalados por Quayle y otros (1991) eran sólidos, los impactos de cada lugar en particular eran sumamente específicos de cada emplazamiento.

En estudios que abarcaron otras partes de la red de los Estados Unidos (el sistema automático de observación de la superficie [ASOS], que se utiliza en los principales aeropuertos, y la red de referencia climatológica [CRN], ambos con diferentes diseños de garitas para el sistema de temperaturas máximas y mínimas), también se hallaron diferencias de algunas décimas de grado entre el sistema de temperaturas máximas y mínimas, por una parte, y el ASOS y la CRN, por otra parte (Hubbard y otros, 2004; Sun y otros, 2005). Sin embargo, Guttman y Baker (1996) señalaron que las diferencias entre el ASOS y otros sistemas eran específicas de cada emplazamiento, incluso cuando ambos sistemas estaban instalados dentro de los límites del mismo aeropuerto. Leeper y otros (2015) determinaron que la garita ventilada utilizada en la CRN tenía temperaturas máximas más bajas (una media de $-0,48$ °C) y temperaturas mínimas más altas ($+0,36$ °C) que el sistema de temperaturas máximas y mínimas. Al evaluar la transición de las mediciones de temperatura convencionales a las automáticas, estos resultados reafirmaron la dificultad que supone separar los impactos debidos a los sensores propiamente dichos, aquellos relacionados con el tipo de garita y los que están vinculados con otros cambios conexos, como los traslados de los emplazamientos.

A fin de preservar la continuidad de los registros climáticos de largo plazo, se examinaron observaciones coexistentes de las estaciones convencionales y de las nuevas estaciones automáticas de Campbell Scientific, con configuraciones normalizadas, en 22 emplazamientos del Canadá. En primer lugar, los intervalos de observación de las temperaturas máximas y mínimas diarias se ajustaron entre algunos de los pares de estaciones. En segundo lugar, se calcularon los sesgos y se los utilizó para ajustar las series temporales de las estaciones automáticas. Se emplearon períodos coexistentes de dos y cinco años para analizar los sesgos. Se determinó la diferencia absoluta media entre los pares de estaciones, que fue de hasta $0,7$ °C para la temperatura máxima y de hasta $1,4$ °C para la temperatura mínima (Milewska y Vincent, 2016).

3.3 Precipitación

De acuerdo con los resultados preliminares del POST (Stepanek y otros, 2015) correspondientes a nueve países, en la mayoría de los estudios, las observaciones automáticas registraron niveles de precipitación menores que las observaciones convencionales. La magnitud media del sesgo en seco fue reducida (menos del 5 % en la mayoría de los países estudiados); sin embargo, hubo respuestas muy diversas entre las diferentes estaciones, y en un número considerable de estaciones se registraron sesgos superiores al +20 % o inferiores al -20 %.

⁷ Estos sistemas se conocen generalmente como el sistema de abrigos de la región de algodón (CRS) y el sistema de temperaturas máximas y mínimas, respectivamente. Este último sistema no es completamente automático, ya que transmite datos digitales a una terminal (que, en general, se encuentra dentro de las instalaciones del observador), pero se necesita la intervención manual para transmitir los datos a la red más amplia de comunicaciones.

Según las conclusiones preliminares, los sesgos en la precipitación engelante y las estaciones meteorológicas automáticas de primera generación fueron mayores que en la precipitación líquida y los instrumentos desarrollados más recientemente. Con respecto a la temperatura, en los resultados comunicados también se incorporó el efecto de las reubicaciones conexas de los emplazamientos; gran parte de la divergencia en las conclusiones del POST probablemente obedezca a tales reubicaciones, y no al cambio de instrumento (especialmente en el caso de la precipitación engelante, dada la influencia de la velocidad del viento en la captación insuficiente, y la sensibilidad de la velocidad del viento al entorno del emplazamiento local).

Si bien las mediciones convencionales no formaron parte de la comparación, ha habido proyectos de intercomparación de la OMM que abarcaron una amplia variedad de medidores de precipitación, tanto en laboratorio (Lanza y otros, 2006; Sevruck y otros, 2009) como sobre el terreno (Vuerich y otros, 2009). De acuerdo con los resultados de estos proyectos, los pluviómetros de cubeta basculante sin corregir generalmente tenían sesgos negativos considerables, en relación con una referencia, a intensidades de lluvia muy altas (habitualmente, del 15 % al 20 % a intensidades de lluvia de 300 mm/h); sin embargo, los sesgos eran mucho menores a intensidades inferiores (habitualmente, menos del 5 % a intensidades de 50 mm/h o más bajas). Según estos resultados, es probable que los pluviómetros de cubeta basculante sin corregir se vean gravemente afectados por sesgos de largo plazo en los climas donde una proporción considerable de la precipitación anual cae en episodios de alta intensidad, como es habitual en muchas partes de las zonas tropicales y subtropicales. En el estudio de Vuerich y otros (2009), se determinó que, en general, se obtienen buenos resultados con los pluviómetros de cubeta basculante en los que se aplican factores de corrección automática en función de la intensidad de la lluvia. En esta intercomparación no se incluyó la precipitación sólida.

3.4 Otros elementos

La mayoría de los estudios publicados sobre la transición de las mediciones convencionales a las automáticas se ha centrado en la temperatura y la precipitación, mientras que una cantidad menor de estudios se ha focalizado en otras variables.

Lucas (2010) y Gorman (2003) informaron sobre las comparaciones de mediciones convencionales y automáticas del punto de rocío y la humedad efectuadas en Australia (Lucas a través de un análisis de regresión en todos los componentes convencionales y automáticos de la red, y Gorman a través de un ensayo práctico). Lucas (2010) determinó que las sondas de bulbo húmedo automáticas de la red de Australia tenían un sesgo medio del punto de rocío de $-0,5$ °C y las sondas de humedad tenían un sesgo medio del punto de rocío de $-0,3$ °C (aunque en este último caso, dependía en cierta medida de cada emplazamiento) con respecto a los instrumentos de bulbo húmedo convencionales. Gorman (2003) encontró marcadas diferencias entre los puntos de rocío obtenidos con las sondas de bulbo húmedo y de humedad a puntos de rocío bajos (habitualmente 3 °C o más a puntos de rocío inferiores a -5 °C), y las atribuyó a un valor inapropiado del coeficiente psicrométrico A (véase la sección 2.2.3). Estos resultados están vinculados específicamente con los instrumentos y las prácticas de observación que se utilizan en Australia, y quizá no se apliquen necesariamente a otros instrumentos y redes.

4. DIRECTRICES PARA LA GESTIÓN DE LA TRANSICIÓN DE LAS MEDICIONES CONVENCIONALES A LAS AUTOMÁTICAS

4.1 Mediciones paralelas entre los sistemas convencionales y los automáticos

En el contexto climático, el desafío más importante que presenta la transición de las mediciones convencionales a las automáticas es la homogeneidad de los datos, en un amplio abanico de variables, y con respecto a los valores medios y los extremos. Como se analizó anteriormente, y en el caso de los elementos específicos mencionados en la sección 2.2, la introducción de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) podría generar faltas de homogeneidad en cualquier serie temporal climatológica, como también podrían hacerlo las reubicaciones de los emplazamientos que suelen acompañar la transición.

En la transición de las estaciones convencionales a las EMA, se recomienda efectuar observaciones paralelas entre los dos sistemas durante un período determinado. Las directrices provistas por la OMM acerca del período óptimo de observaciones paralelas no son totalmente coherentes. En CIMO 2014 se recomienda un período mínimo de 12 meses para la velocidad y la dirección del viento, de 24 meses para la temperatura, la humedad, la insolación y la evaporación, y de 60 meses para la precipitación (en dicha publicación también se señala lo siguiente: “Una buena solución intermedia sería contar con un período de coexistencia de 24 meses”). En la *Guía de prácticas climatológicas* (OMM, 2011) se recomienda un período de coexistencia de por lo menos un año, pero preferentemente de dos años o más. En la práctica, es probable que el período necesario dependa de cada emplazamiento, y no es necesariamente predecible con antelación. Un plazo de 24 meses podría ser suficiente para determinar si existe una falta importante de homogeneidad o no, pero tal vez no sea suficiente para cuantificar plenamente la falta de homogeneidad (lo que incluye el impacto en los extremos de la distribución y la media). Cuanto más grande es el cambio de sistema, mayor es el riesgo de que se produzca una falta de homogeneidad considerable; si la introducción de una EMA se realiza en el mismo recinto de instrumentos que el de las observaciones convencionales, dicho riesgo es bajo en el caso de muchas variables. No obstante, si también se lleva a cabo una reubicación sustancial del emplazamiento, el riesgo de que se genere una falta de homogeneidad considerable se incrementa. Por ende, es preferible tener la opción de ampliar el período de observaciones paralelas si el análisis del período inicial de tales observaciones revela diferencias considerables.

La mayor parte del análisis de este capítulo se relaciona con el uso de las observaciones paralelas en general, y se aplica al uso de tales observaciones en otros escenarios, además de la transición de las observaciones convencionales a las automáticas (por ejemplo, la reubicación de un emplazamiento sin efectuar un cambio de tipo de instrumento).

Las directrices detalladas para detectar y ajustar las faltas de homogeneidad en los datos climáticos se proporcionan en *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (OMM, 2003) (Directrices sobre metadatos climáticos y homogeneización), y quedan fuera del alcance de la presente nota.

4.2 **Pruebas anteriores a la implantación de las estaciones meteorológicas automáticas operacionales**

En la publicación CIMO 2014 se recomienda que los nuevos instrumentos se sometan a pruebas antes de su despliegue operacional en las EMA. Esto incluye las pruebas medioambientales y la calibración en un laboratorio, y las pruebas funcionales sobre el terreno. Dichas pruebas determinarán en qué medida los sensores coinciden con un patrón (si lo hubiera), como así también el funcionamiento de los instrumentos sobre el terreno con relación a una referencia.

Las pruebas sobre el terreno suelen llevarse a cabo en uno o más emplazamientos experimentales especialmente designados. Cuando se realiza este tipo de pruebas para respaldar la introducción de las EMA, los instrumentos actuales en uso para las observaciones convencionales deberían incluirse en las pruebas sobre el terreno, de modo que los instrumentos puedan compararse en un entorno local uniforme. Un programa de pruebas sobre el terreno debería abarcar, al menos, un ciclo anual completo y tratar de aislar los componentes individuales de un cambio (por ejemplo, comparando un sensor convencional y uno automático dentro de la misma garita).

La realización de pruebas medioambientales y sobre el terreno no elimina la necesidad de efectuar observaciones paralelas en cada ubicación en la que se instalan las EMA en reemplazo de las estaciones convencionales, ya que las faltas de homogeneidad pueden ser específicas de cada emplazamiento, según las condiciones locales. Sin embargo, si las pruebas medioambientales y sobre el terreno demuestran que la diferencia entre los dos tipos de estaciones en un entorno experimental es insignificante, se reduce el riesgo de que haya diferencias significativas en cada emplazamiento en particular (siempre que no se realice un cambio importante en el emplazamiento). Si, como sucede a menudo, las EMA se

han implantado en una proporción considerable de la red en un plazo breve, la ausencia de diferencias sistemáticas entre los sistemas automáticos y los convencionales también reduce el riesgo de sesgo en toda la red (véase la sección 4.4.1).

4.3 Representatividad del período de observaciones paralelas

Un período de observaciones paralelas entre dos sistemas de observaciones será una indicación fidedigna de las diferencias entre tales sistemas únicamente si dicho período es representativo de los períodos anteriores y posteriores (es decir, la estación anterior durante el período de observaciones paralelas es congruente con la estación anterior antes de que se iniciara el período de observaciones paralelas, y la estación nueva durante el período de observaciones paralelas es representativa de la estación nueva después del final del período). Por lo tanto, es importante someter a pruebas las series temporales de cada emplazamiento para detectar faltas de homogeneidad durante el período de observaciones paralelas, o poco antes o después de este. También es importante cerciorarse de que las observaciones paralelas se realicen de manera adecuada; ha habido casos en los que, durante una comparación, las observaciones “convencionales” en realidad se leyeron a partir de los instrumentos automáticos, por lo que la comparación fue de escasa utilidad.

Durante un período de observaciones paralelas, pueden surgir faltas de homogeneidad por diversas razones. Una situación habitual es que se tome la decisión de trasladar una estación porque la exposición del emplazamiento de observación se ha tornado deficiente, o existe un peligro inminente de que esto suceda, debido al desarrollo urbano. Si este acontecimiento ocurre durante el período de observaciones paralelas, es probable que, como resultado, el emplazamiento anterior deje de ser representativo de sí mismo y, por ende, el período de observaciones paralelas no será representativo.

Aun en ausencia de faltas de homogeneidad de largo plazo, las relaciones entre las variables meteorológicas en los emplazamientos de observaciones paralelas podrían estar sujetas a la variabilidad interanual. Por ejemplo, es más probable que la humedad del suelo y el verdor de la vegetación cercana influyan en las temperaturas en un emplazamiento rural que en un emplazamiento situado en un entorno urbano y, por lo tanto, la diferencia de temperatura entre el entorno rural y el urbano en un año inusualmente lluvioso (o seco) podría no ser representativa de las condiciones normales. Un período de observaciones paralelas de varios años reduce al mínimo el riesgo de que, durante el período, se obtenga un muestreo de una etapa climática inusitada, especialmente en los climas que reciben una fuerte influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur o están sujetos de otra manera a una variabilidad interanual elevada.

Si el período de observaciones paralelas es lo suficientemente prolongado, una manera de abordar las faltas de homogeneidad durante dicho período es ignorar la proporción no representativa del período de observaciones paralelas. En la figura 3 se muestra un ejemplo. En este caso, se efectuaron observaciones paralelas entre el emplazamiento anterior y el nuevo desde 1992 hasta 2002. Sin embargo, hubo faltas de homogeneidad de alrededor de $-0,9$ °C en el nuevo emplazamiento en 1995 (debido a un cambio en los algoritmos de suavizamiento de datos con una nueva versión de la EMA), y de aproximadamente $+0,5$ °C en el emplazamiento anterior en 1999 (debido a que el emplazamiento se vio cada vez más rodeado de edificios nuevos). Por ende, solo se utilizó el período comprendido entre 1995 y 1998 para evaluar la diferencia a largo plazo entre los dos emplazamientos. Según la duración del período de observaciones paralelas y el momento en que se produzcan las faltas de homogeneidad, este enfoque podría no ser viable. En dicho caso, tal vez podrían obtenerse mejores resultados al ignorar el período de observaciones paralelas y, en cambio, evaluar las posibles faltas de homogeneidad con otros medios, por ejemplo, estaciones de referencia independientes de la región (véase a continuación).

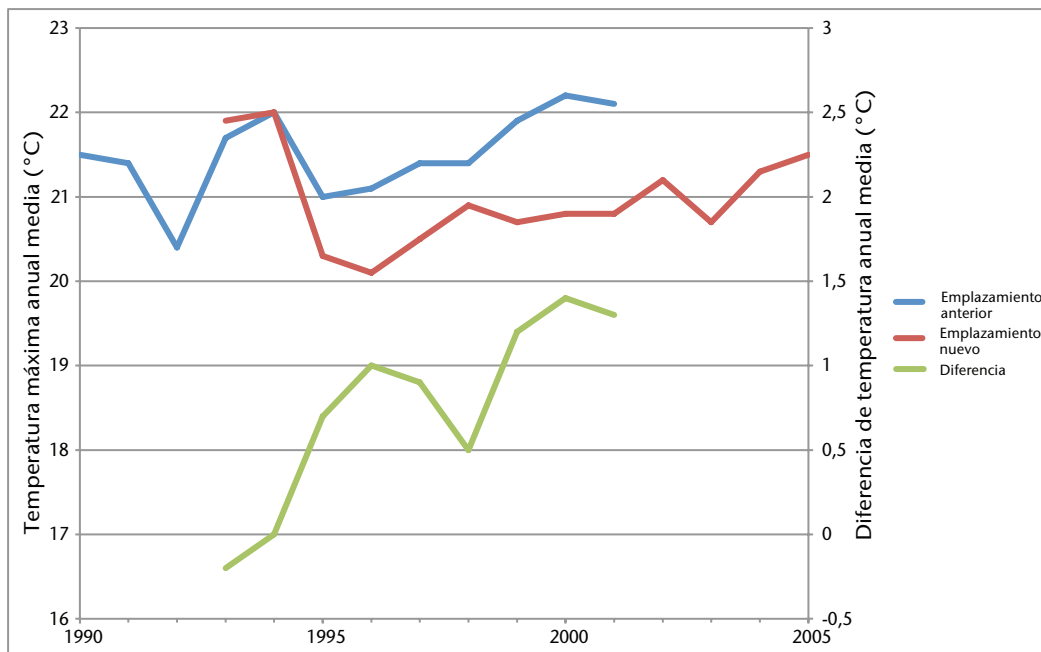


Figura 3. Temperaturas máximas anuales medias de Port Lincoln (Australia) durante un período de observaciones paralelas entre un emplazamiento convencional en el centro de la ciudad (“emplazamiento anterior”) y un emplazamiento automático en el aeropuerto, 14 km al norte (“emplazamiento nuevo”)

4.4 ¿Qué sucede si no hay un período de observaciones paralelas útil?

Si bien la planificación de una transición de las observaciones convencionales a las automáticas debería contemplar las pruebas sobre el terreno y las observaciones paralelas durante la fase de despliegue, en muchas situaciones no existe un período de observaciones paralelas que sea de utilidad. A continuación se enumeran algunas de las razones por las que esto puede ocurrir:

- la transición se llevó a cabo hace tiempo, y no había una normativa que exigiera la realización de observaciones paralelas en ese momento;
- se efectuaron observaciones paralelas, pero solo abarcaron un conjunto limitado de variables;
- el período de observaciones paralelas no fue de utilidad debido a las faltas de homogeneidad en el registro de la estación convencional o automática durante dicho período o alrededor de este, y
- un período de observaciones paralelas planificado se dio por finalizado antes de lo previsto debido a que el emplazamiento anterior no estaba disponible (por ejemplo, si el traslado de un emplazamiento se produjo a causa de la presión derivada del desarrollo urbano en un emplazamiento anterior, el propietario tal vez no esté dispuesto a continuar arrendando el terreno necesario para las observaciones).

En cualquiera de estos casos, la evaluación del impacto de la transición de las mediciones convencionales a las automáticas se convierte en un problema que consiste en evaluar la dimensión de una falta de homogeneidad, con la ayuda de los metadatos (suponiendo que se conoce la fecha de instalación de la estación automática). En este proceso generalmente se utilizan otras estaciones cercanas (estaciones de referencia).

Manejo de situaciones en las que los cambios se realizan en una parte considerable de la red en un período similar

La homogeneización de datos climáticos resulta particularmente difícil cuando los cambios se realizan en una parte considerable de una red nacional en un período similar. Esto se debe a que los métodos de homogeneización más precisos se basan en el uso de datos de estaciones de referencia (estaciones que tienen una correlación adecuada con la estación candidata, y cuyos datos correspondientes a los años inmediatamente anteriores y posteriores a la falta de homogeneidad pueden utilizarse para detectar la falta de homogeneidad y evaluar su impacto). Sin embargo, si una parte considerable de una red se ve afectada, muchas de las posibles estaciones de referencia también se verán afectadas y, por ende, no proporcionarán una indicación fidedigna del impacto de la falta de homogeneidad. Otro problema es que una falta de homogeneidad que afecta a una parte considerable de una red nacional podría ser lo suficientemente importante como para ser significativa a escala nacional, aunque sea marginal en una estación en particular. Por ejemplo, una falta de homogeneidad de 0,2 °C en la temperatura probablemente resulte indetectable en una estación en particular, pero puede ser significativa a escala nacional (en el contexto de las tendencias a lo largo de siglos, de alrededor de 0,1 °C por década).

Este problema es más grave cuando los cambios son simultáneos, como puede ocurrir, por ejemplo, con un cambio nacional de la hora de observación. En el Canadá, el cambio de la hora de observación realizado en 1961, de un día que finalizaba a las 0.00 UTC a un día que finalizaba a las 6.00 UTC, dio como resultado una falta de homogeneidad de -0,6 °C a -0,8 °C en la temperatura mínima en numerosas estaciones del este del Canadá (Vincent y otros, 2002). Este tipo de cambio simultáneo es menos frecuente en las transiciones de las redes convencionales a las automáticas, ya que no cabría esperar que todas las EMA de una red se pongan en funcionamiento el mismo día⁸. Sin embargo, es habitual que numerosas estaciones realicen la transición durante un período de algunos años, que es un plazo suficientemente corto para producir un efecto considerable en las prácticas de homogeneización.

En caso de que no existan observaciones paralelas adecuadas, entre las posibles estrategias para abordar este problema se incluyen las siguientes:

- a) Utilizar como estaciones de referencia solo aquellas estaciones que no se hayan visto afectadas por el cambio; en este contexto, las estaciones que conservaron las observaciones convencionales por completo, o posiblemente las estaciones automáticas que se instalaron algunos años antes de los cambios más amplios efectuados en toda la red.
- b) Si no existen estaciones de referencia de este tipo (por ejemplo, debido a que toda la red se vio afectada), utilizar un conjunto de datos independiente que tenga una cierta relación con la variable que se desea analizar. En el caso de las temperaturas de la superficie terrestre, esto podría incluir observaciones de países vecinos, temperaturas en altitud (por ejemplo, temperaturas a 850 hPa) o temperaturas de la superficie del mar en océanos cercanos. En cuanto a las mediciones del viento (en latitudes medias y altas), los vientos geostróficos derivados de los datos de la presión podrían ser un indicador indirecto útil. Estos conjuntos de datos probablemente no presenten una correlación adecuada suficiente como para producir resultados útiles en una estación específica, pero podrían emplearse para evaluar los impactos a escala nacional o regional.
- c) Establecer un ensayo práctico de manera retrospectiva (o aprovechar los resultados de un ensayo práctico existente) en el que las estaciones automáticas actualmente operativas se comparen con una réplica de los instrumentos convencionales que se utilizaban anteriormente, a fin de determinar y cuantificar diferencias en el funcionamiento que se puedan utilizar o extrapolar a los mismos tipos de EMA utilizados en otras ubicaciones.

⁸ Sin embargo, existen casos en los que las EMA se convirtieron en el instrumento principal de manera simultánea; por ejemplo, en los emplazamientos principales de observación de Australia que tenían observaciones tanto convencionales como automáticas, las observaciones automáticas se convirtieron en las lecturas principales de la mayoría de las variables el 1 de noviembre de 1996.

Este enfoque se ha aplicado en algunos estudios que evaluaron las características de los abrigos para instrumentos utilizados para las mediciones de la temperatura en el siglo XIX y anteriormente (Brunet y otros, 2006, 2011; Böhm y otros, 2010).

Cuando se han realizado cambios en toda la red, se considera una práctica óptima evaluar el efecto general de estos cambios y efectuar los ajustes pertinentes antes de tratar de realizar la homogenización a nivel del emplazamiento en particular (Milewska y Vincent, 2016; Vincent y otros, 2017).

4.5 **Gestión de datos durante la transición de las observaciones convencionales a las automáticas**

La transición de las observaciones convencionales a las automáticas presenta diversos desafíos en materia de gestión de datos.

Se recomienda que, cuando una estación es automática, se le asigne un nuevo identificador, de modo que el cambio sea lo más transparente posible para los usuarios de los datos. (Si se efectúan observaciones paralelas, como se recomienda, también deberá asignarse un identificador nuevo, ya que las estaciones convencionales y automáticas funcionarán de manera simultánea durante un período determinado, salvo que se estructure una base de datos climáticos para que pueda aceptar datos de varios sensores en la misma ubicación).

Se reconoce que un cambio de identificador ocasionará problemas en ciertas aplicaciones. Por ejemplo, la falta de un período de promediación suficiente puede impedir el cálculo de la normal climática en el caso de una estación automática con un identificador nuevo, y, para obtener registros de largo plazo, será necesario fusionar datos de dos o más estaciones identificadas por separado en la misma ubicación general. Lo más recomendable en estos casos es crear un conjunto de datos homogeneizados de largo plazo para la ubicación en cuestión. Sin embargo, si se ha determinado que las diferencias entre la estación convencional y la automática son de menor envergadura, tal vez sea posible fusionar las series sin realizar ajustes en el caso de ciertas aplicaciones (por ejemplo, la información pública), aunque para las aplicaciones relacionadas con el cambio climático a largo plazo, siempre deberán utilizarse datos completamente homogeneizados.

5. **REFERENCIAS**

- Aguilar, E., P. Stepanek, V. Venema, R. Auchmann, F. D. dos Santos Silva, E. Engström, A. Gilabert, Z. Kretova, J. A. Lopez-Díaz, Y. L. Rico, C. O. Rojas, M. Prohom, D. Rasilla, M. Salvador, G. Vetacnik, Y. Yosefi y M. de los Milagros Skansi, 2015: *Biases Found in Temperature Records by the Transition from Conventional to Automatic Measurements in European and American Parallel datasets*. Taller sobre Gestión de Datos de EUMETNET, celebrado en St. Gallen, Suiza, 28 a 30 de octubre de 2015.
- Ashcroft, L., D. Karoly y J. Gergis, 2012: "Temperature variations of south-eastern Australia, 1860–2011", en *Australian Meteorological Oceanographic Journal*, 62:227–245.
- Bertiglia, F., G. Lopardo, A. Merlone, G. Roggero, D. Cat Berro, L. Mercalli, A. Gilabert y M. Brunet, 2015: "Traceability of ground-based air-temperature measurements: a case study on the meteorological observatory of Moncalieri (Italy)", en *International Journal of Thermophysics*, 36:589–601, doi:10.1007/s10765-014-1806-y.
- Böhm, R., P. D. Jones, J. Hiebl, D. Frank, M. Brunetti y M. Maugeri, 2010: "The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760-2007", en *Climatic Change*, 101:41–67.
- Brandsma, T. y J. P. van der Meulen, 2008: "Thermometer screen intercomparison in De Bilt (the Netherlands) – Part II: description and modelling of mean temperature differences and extremes", en *International Journal of Climatology*, 28:389–400.

- Brunet, M., J. Asin, J. Sigró, M. Bañón, F. García, E. Aguilar, J. E. Palenzuela, T. C. Peterson y P. Jones: 2011. "The minimisation of the screen bias from ancient Western Mediterranean air temperature records: an exploratory statistical analysis", en *International Journal of Climatology*, 31:1879–1895, doi:10.1002/joc.2192.
- Brunet, M., O. Saladié, P. Jones, J. Sigró, E. Aguilar, A. Moberg, D. Lister, A. Walther, D. Lopeza y C. Almarzae, 2006: "The development of a new dataset of Spanish daily adjusted temperature series (SDATS) (1850–2003)", en *International Journal of Climatology*, 26:1777–1802.
- Claussnitzer, A., F. Maier y R. Spengler, 2015: *QualiMET2.0, the New Quality Control System of Deutscher Wetterdienst*. Taller sobre Gestión de Datos de EUMETNET, celebrado en St. Gallen, Suiza, 28 a 30 de octubre de 2015.
- Diamond, H. J., T. R. Karl, M. A. Palecki, C. B. Baker, J. E. Bell, R. D. Leeper, D. R. Easterling, J. H. Lawrimore, T. P. Meyers, M. R. Helfert, G. Goodge y P. W. Thorne, 2013: "U.S. Climate Reference Network after one decade of operations: status and assessment", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94:424–448, doi:10.1175/BAMS-D-12-00170.1.
- Doesken, N. J., 2005: *The National Weather Service MMTS (Maximum-Minimum Temperature System) – 20 Years After*. Decimotercer Simposio sobre Observaciones Meteorológicas e Instrumentación, celebrado en San Diego, 9 a 13 de enero de 2005.
- Goodison, B. E., P. Y. T. Louie y D. Yang, 1998: *WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison (WMO/TD-No. 872)*. Ginebra, Organización Meteorológica Mundial.
- Gorman, J., 2003: *AWS Determination of Dew Point in the Field*. Technical Note 2003-0001. Melbourne, Oficina de Meteorología.
- Guttman, N. B. y C. B. Baker, 1996: "Exploratory analysis of the difference between temperature observations recorded by ASOS and conventional methods", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:2865–2873.
- Hubbard, K. G. y X. Lin, 2006: "Re-examination of instrument change effects in the U.S. Historical Climatology Network", en *Geophysical Research Letters*, 33:L15710, doi:10.1029/2006GL027069.
- Hubbard, K. G., X. Lin, C. B. Baker y B. Sun, 2004: "Air temperature comparison between the MMTS and the USCRN temperature systems", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21:1590–1597.
- Jovanovic, B., D. Collins, K. Braganza, D. Jakob y D. A. Jones, 2010: "A high-quality monthly total cloud amount dataset for Australia", en *Climatic Change*, 108:485–517.
- Lanza, L., M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi y W. Wauben, 2006: *WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges (WMO/TD-No. 1304)*. Ginebra, Organización Meteorológica Mundial.
- Leeper, R. D., J. Rennie y M. A. Palecki, 2015: "Observational perspectives from U.S. Climate Reference Network (USCRN) and Cooperative Observer Program (COOP) Network: temperature and precipitation comparison", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32:703–721, doi:10.1175/JTECH-D-14-00172.1.
- Lopardo, G., F. Bertiglia, S. Curci, G. Roggero y A. Merlone, 2014: "Comparative analysis of the influence of solar radiation screen ageing on temperature measurements by means of weather stations", en *International Journal of Climatology*, 34:1297–1310, doi:10.1002/joc.3765.
- Lucas, C., 2010: *A High-quality Historical Humidity Database for Australia*. CAWCR Technical Report 24. Melbourne, Centre for Australian Weather and Climate Research.
- Menne, M. J., C. N. Williams y R. S. Vose, 2009: "The U.S. Historical Climatology Network monthly temperature data, version 2", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90:993–1007.
- Milewska, E. J. y L. A. Vincent, 2016: "Preserving continuity of long-term daily maximum and minimum temperature observations with automation of reference climate stations using overlapping data and meteorological conditions", en *Atmosphere-Ocean*, 54(1):32–47, doi:10.1080/07055900.2015.1135784.
- Page, C. M., N. Nicholls, N. Plummer, B. Trewin, M. Manton, L. Alexander, L. E. Chambers, Y. Choi, D. A. Collins, A. Gosai, P. Della-Marta, M. R. Haylock, K. Inape, V. Laurent, L. Maitrepierre, E. E. P. Makmur, H. Nakamigawa, N. Ouprasitwong, S. McGree, J. Pahalad, M. J. Salinger, L. Tibig, T. D. Tran, K. VEDIAPAN y P. Zhai, 2004: "Data rescue in the southeast Asia and south Pacific region: challenges and opportunities", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85:1483–1489.
- Parker, D. E., 1994: "Effects of changing exposure of thermometers at land stations", en *International Journal of Climatology*, 14:1–31, doi:10.1002/joc.3370140102.
- Perry, M. C., M. J. Prior y D. E. Parker, 2007: "An assessment of the suitability of a plastic thermometer screen for climatic data collection", en *International Journal of Climatology*, 27:267–276.
- Quayle, R. G., D. R. Easterling, T. R. Karl y P. Y. Hughes, 1991: "Effects of recent thermometer changes in the cooperative station network", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 72:1718–1723.

- Sevruk, B., M. Ondras y B. Chvila, 2009: "The WMO precipitation measurement intercomparisons", en *Atmospheric Research*, 92:376–380.
- Sieck, L. C., S. J. Burges y M. Steiner, 2007. "Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall", en *Water Resources Research*, 43:W01420.
- Stepanek, P., E. Aguilar, V. Venema, R. Auchmann, F. D. dos Santos Silva, E. Engström, A. Gilibert, Z. Kretova, J. A. Lopez-Díaz, Y. L. Rico, C. O. Rojas, M. Prohom, D. Rasilla, M. Salvador, G. Vetacnik, Y. Yosefi y M. de los Milagros Skansi, 2015: *Biases in Precipitation Records Found in Parallel Measurements*. Taller sobre Gestión de Datos de EUMETNET, celebrado en St. Gallen, Suiza, 28 a 30 de octubre de 2015.
- Sun, B., C. B. Baker, T. R. Karl y M. D. Gifford, 2005: "A comparative study of ASOS and USCRN temperature measurements", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22:679–686.
- Trewin, B. C., 2001: *The Under-reporting of Small Daily Rainfall Amounts*. Foro sobre el clima de Australia y Nueva Zelanda, celebrado en Darwin, Australia, 18 a 21 de septiembre de 2001.
- Trewin, B. C., 2002: *Extreme temperature events in Australia*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad de Melbourne, Australia.
- Trewin, B. C., 2012: *Techniques Involved in Developing the Australian Climate Observations Network – Surface Air Temperature (ACORN-SAT) Dataset*. CAWCR Technical Report 49. Melbourne, Centre for Australian Weather and Climate Research.
- Venema, V., R. Auchmann, E. Aguilar, I. Auer, C. Azorin-Molina, T. Brandsma, M. Brunetti, M. Dienst, P. Domonkos, A. Gilibert, J. Lindén, E. Milewska, O. Nordli, M. Prohom, J. Rennie, P. Stepanek, B. Trewin, L. Vincent, K. Willett y M. Wolff, 2016. *A Global Database with Parallel Measurements to Study Non-climatic Changes*. Asamblea General de la Unión Europea de Geociencias, celebrada en Viena, Austria, 17 a 22 de abril de 2016.
- Vincent, L. A., E. J. Milewska, R. Hopkinson y L. Malone, 2009: "Bias in minimum temperature introduced by a redefinition of the climatological day at the Canadian synoptic stations", en *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48:2160–2168, doi:10.1175/2009JAMC2191.1.
- Vincent, L. A., E. J. Milewska, X. L. Wang y M. M. Hartwell, 2017: "Uncertainty in homogenized daily temperatures and derived indices of extremes illustrated using parallel observations in Canada", en *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.5203.
- Vincent, L. A., X. Zhang, B. R. Bonsal y W. D. Hogg, 2002: "Homogenization of daily temperatures over Canada", en *Journal of Climate*, 15:1322–1334.
- Vuerich, E., C. Monesi, L. G. Lanza, L. Stagi y E. Lanzinger, 2009: *WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (WMO/TD-No. 1504). Ginebra, Organización Meteorológica Mundial.
- Wendland, W. M. y W. Armstrong, 1993: "Comparison of maximum-minimum resistance and liquid-in-glass thermometer records", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10:233–237.
- Wolff, M. A., K. Iskasen, K. Ødemark, R. Brækken y A. Petersen-Øverleir, 2014: *How Much Snow is not being Measured?* Conferencia técnica de la OMM sobre instrumentos y métodos de observación meteorológicos y medioambientales, celebrada en San Peterburgo, Federación de Rusia, 7 a 9 de julio de 2014.
- Organización Meteorológica Mundial, 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186). Ginebra.
- , 2007: *Directrices para la gestión de las modificaciones en los programas de observación del clima* (OMM/DT-Nº 1378). Ginebra.
- , 2010. *CIMO Survey on National Summaries of Methods and Instruments for Solid Precipitation Measurement at Automatic Weather Stations* (WMO/TD-No. 1544). Ginebra.
- , 2011: *Guía de prácticas climatológicas* (OMM-No 100). Ginebra.
- , 2014. *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-Nº 8). Ginebra.
- Zhang, X., F. W. Zwiers y G. Hegerl, 2009: "The influences of data precision on the calculation of temperature percentile indices", en *International Journal of Climatology*, 29:321–327.

Para más información, diríjase a:

Organización Meteorológica Mundial

7 bis, avenue de la Paix – Case postale 2300 – CH 1211 Genève 2 – Suiza

Oficina de Comunicación y de Relaciones Públicas

Tel.: +41 (0) 22 730 83 14/15 – Fax: +41 (0) 22 730 80 27

Correo electrónico: cpa@wmo.int

www.wmo.int