

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 3. MEDICIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	96
3.1 Generalidades	96
3.1.1 Definición.....	96
3.1.2 Unidades y escalas	96
3.1.3 Requisitos meteorológicos	97
3.1.4 Métodos de medición y de observación	97
3.2 Barómetros de mercurio.....	99
3.2.1 Requisitos de construcción.....	99
3.2.2 Requisitos generales	99
3.2.3 Condiciones normales	100
3.2.3.1 Temperatura y densidad normales del mercurio.....	100
3.2.3.2 Gravedad normal	100
3.2.4 Lectura de los barómetros de mercurio	101
3.2.4.1 Exactitud de las lecturas	101
3.2.4.2 Cambios en la corrección de índice	101
3.2.4.3 Cambios permisibles en la corrección del error de índice	102
3.2.5 Corrección de las lecturas barométricas a las condiciones normales	102
3.2.6 Errores y fallos de los barómetros de mercurio	103
3.2.6.1 Incertidumbres en la temperatura del instrumento	103
3.2.6.2 Vacío imperfecto de la cámara barométrica.....	103
3.2.6.3 Depresión capilar de las superficies del mercurio.....	103
3.2.6.4 Falta de verticalidad	104
3.2.6.5 Exactitud general de las lecturas de presión corregidas.....	104
3.2.7 Medidas de seguridad durante el manejo del mercurio	104
3.2.7.1 Vertidos y evacuación	105
3.2.7.2 Incendios	106
3.2.7.3 Transporte	106
3.3 Barómetros electrónicos.....	106
3.3.1 Transductores para medir el desplazamiento de la cápsula aneroide	107
3.3.2 Barómetros digitales piezorresistivos	108
3.3.3 Barómetros de resonador cilíndrico	108
3.3.4 Lectura de los barómetros electrónicos	109
3.3.5 Errores y fallos de los barómetros electrónicos	109
3.3.5.1 Deriva de calibración	109
3.3.5.2 Temperatura.....	110
3.3.5.3 Interferencias eléctricas	110
3.3.5.4 Naturaleza del funcionamiento.....	110
3.4 Barómetros aneroides.....	110
3.4.1 Requisitos de construcción.....	110
3.4.2 Requisitos de exactitud.....	111
3.4.3 Lectura de los barómetros aneroides	111
3.4.3.1 Exactitud de las lecturas	111
3.4.3.2 Correcciones aplicadas a los barómetros aneroides	111
3.4.4 Errores y fallos de los barómetros aneroides	111
3.4.4.1 Compensación incompleta de temperatura	111
3.4.4.2 Errores de elasticidad	112
3.5 Barógrafos	112
3.5.1 Requisitos generales	112
3.5.2 Construcción de barógrafos.....	113
3.5.3 Fuentes de error y de inexactitud	113
3.5.4 Instrumentos con capacidad para el procesamiento de datos	113
3.5.5 Lectura de los barógrafos.....	113
3.5.5.1 Exactitud de las lecturas	113
3.5.5.2 Correcciones que se aplicarán a las lecturas del barógrafo	114
3.6 Barómetros de tubo de Bourdon.....	114
3.7 Variación barométrica.....	114
3.8 Requisitos generales de exposición	114
3.8.1 Efecto del viento	115

	<i>Página</i>
3.8.2 Efectos del aire acondicionado	115
3.9 Exposición del barómetro	115
3.9.1 Exposición de los barómetros de mercurio	115
3.9.2 Exposición de los barómetros electrónicos	116
3.9.3 Exposición de los barómetros aneroides	116
3.9.4 Exposición de los barógrafos	116
3.10 Comparación, calibración y mantenimiento	117
3.10.1 Requisitos generales para la comparación entre barómetros	117
3.10.2 Equipo utilizado en las comparaciones entre barómetros	118
3.10.2.1 Barómetro patrón primario (categoría A)	118
3.10.2.2 Barómetro patrón de trabajo (categoría B)	118
3.10.2.3 Barómetro patrón itinerante (categoría C)	118
3.10.2.4 Especificaciones de los barómetros de mercurio portátiles (categoría P)	119
3.10.2.5 Especificaciones de los barómetros electrónicos portátiles (categoría Q)	119
3.10.3 Comparación de barómetros	119
3.10.3.1 Comparación internacional de barómetros	119
3.10.3.2 Inspección de los barómetros de estación	120
3.10.3.3 Procedimientos de comparación de los barómetros de mercurio. ...	120
3.10.3.4 Verificación de los barómetros electrónicos	120
3.10.4 Procedimiento general recomendado para la comparación de barómetros situados en emplazamientos diferentes	121
3.10.5 Comparación regional de barómetros	122
3.10.5.1 Nomenclatura y símbolos	122
3.10.5.2 Sistema de comparación interregional	123
3.10.5.3 Sistema de comparación internacional dentro de una Región	123
3.11 Ajuste de las lecturas del barómetro a otros niveles	124
3.11.1 Niveles normalizados	124
3.11.2 Estaciones de nivel bajo	124
3.12 Tendencia de la presión y característica de la tendencia de la presión.	125
ANEXO 3.A. CORRECCIÓN DE LAS LECTURAS DEL BARÓMETRO EN CONDICIONES NORMALES	126
ANEXO 3.B. BARÓMETROS PATRÓN REGIONALES	130
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	131

CAPÍTULO 3. MEDICIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

3.1 GENERALIDADES

3.1.1 Definición

La presión atmosférica sobre una superficie dada es la fuerza por unidad de área que ejerce sobre dicha superficie el peso de la atmósfera que está encima. La presión es, pues, igual al peso de una columna vertical de aire —que llega hasta el límite exterior de la atmósfera— sobre una proyección horizontal de la superficie.

Además de la presión real, hay que determinar también la tendencia de la presión. La tendencia de la presión describe el carácter y la cuantía de la variación de la presión atmosférica durante un período de 3 horas, o de otro especificado que finalice en el momento de la observación. Consta de dos partes: la variación de la presión y la característica de la presión. La variación de la presión es la diferencia neta entre las lecturas de presión al comienzo y al final de un intervalo de tiempo especificado. La característica de la presión indica la pauta de variación de la presión durante ese período de tiempo, por ejemplo, una disminución seguida de un aumento, o un aumento seguido de un aumento más rápido.

3.1.2 Unidades y escalas

La unidad básica para las mediciones de presión atmosférica es el pascal (Pa) (o newton por metro cuadrado). Se establece la norma de añadir el prefijo “hecto” a esta unidad cuando se indica la presión con fines meteorológicos, lo que hace que el hectopascal (hPa) —que equivale a 100 Pa— sea la terminología preferente. Esta circunstancia obedece, en gran medida, a que un hectopascal equivale a 1 milibar (mbar), la unidad utilizada anteriormente.

Las escalas de todos los barómetros meteorológicos deberían estar graduadas en hectopascales. Algunos barómetros están graduados en “milímetros o pulgadas de mercurio en condiciones normales”, $(\text{mm Hg})_n$ o $(\text{in Hg})_n$, respectivamente. Cuando sea evidente por el contexto que prevalecen condiciones normales, se pueden utilizar las expresiones más breves “milímetro de mercurio” o “pulgada de mercurio”. En esas condiciones normales, una columna de mercurio que tenga una altura a escala verdadera de 760 $(\text{mm Hg})_n$ ejerce una presión de 1013,250 hPa.

Serán aplicables en tales casos los factores de conversión siguientes:

$$\begin{aligned} 1 \text{ hPa} &= 0,750\ 062 (\text{mm Hg})_n \\ 1 (\text{mm Hg})_n &= 1,333\ 224 \text{ hPa} \end{aligned}$$

En los casos en que se aplique la relación de cálculo convencional entre la pulgada y el milímetro, es decir, $1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm}$, se obtienen los factores de conversión siguientes:

$$\begin{aligned} 1 \text{ hPa} &= 0,029\ 530 (\text{in Hg})_n \\ 1 (\text{in Hg})_n &= 33,863\ 9 \text{ hPa} \\ 1 (\text{mm Hg})_n &= 0,039\ 370\ 08 (\text{in Hg})_n \end{aligned}$$

Las escalas de los barómetros de mercurio para fines meteorológicos deberían graduarse de tal manera que permitan obtener lecturas de la presión verdadera directamente en las unidades normalizadas si la totalidad del instrumento se mantiene a la temperatura normal de $0\text{ }^\circ\text{C}$ y el valor normal de la gravedad es $9,806\ 65 \text{ m s}^{-2}$.

Los barómetros pueden tener más de una escala grabada, por ejemplo, hPa y mm Hg, o hPa e in Hg, siempre y cuando hayan sido calibrados correctamente en condiciones normales.

Los datos sobre la presión deberían expresarse en hectopascales. En adelante, en este capítulo se utilizará solo la unidad hectopascal.

3.1.3 **Requisitos meteorológicos**

Los campos de presión analizados constituyen un requisito fundamental de la ciencia de la meteorología. Es imperativo que esos campos se definan con exactitud, puesto que conforman la base de todas las predicciones subsiguientes relativas al estado de la atmósfera. Las mediciones de la presión deben ser tan exactas como lo permita la tecnología, con sujeción a unos condicionantes económicos realistas, y los procedimientos de medición y calibración han de ser uniformes en todo el mundo.

Las comisiones respectivas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) han fijado el nivel de exactitud necesario para que las mediciones de la presión satisfagan los requisitos de diversas aplicaciones meteorológicas, según se describe en el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E), que constituye la referencia primaria para las especificaciones de la medición en esta Guía. Los requisitos son los siguientes:

Rango de medición: 500 a 1080 hPa (tanto para la presión en la estación como para la presión al nivel medio del mar)
Incertidumbre de medición requerida: 0,1 hPa
Resolución comunicada: 0,1 hPa
Constante de tiempo del sensor: 20 s (para la mayoría de los barómetros modernos, 2 s es alcanzable; véase el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E))
Tiempo medio de obtención: 1 min

Se considera que los barómetros nuevos deberían poder cumplir los requisitos referidos en un entorno estrictamente controlado como, por ejemplo, el de un laboratorio equipado adecuadamente. Esos requisitos determinan el objetivo de exactitud apropiado que deberán tener los barómetros antes de ser instalados en un entorno operativo.

Una vez instalados los barómetros en un entorno operativo, las limitaciones prácticas pueden hacer necesario un equipo adecuadamente diseñado para que el Servicio Meteorológico Nacional mantenga ese objetivo de exactitud. No solo el barómetro, sino también la exposición debe ser objeto de una atención especial. De todos modos, el funcionamiento de un barómetro de estación de una red operativa, si está calibrado con respecto a un barómetro patrón cuyo error de índice sea conocido y permitido, debería adaptarse a los criterios ya indicados.

3.1.4 **Métodos de medición y de observación**

Por lo general, las mediciones de la presión atmosférica con fines meteorológicos se realizan mediante barómetros electrónicos, barómetros de mercurio y barómetros aneroides o hipsómetros. Este último tipo de instrumentos, cuyo funcionamiento se basa en la relación entre el punto de ebullición de un líquido y la presión atmosférica, hasta el momento solo ha sido de uso limitado y, por ello, no se tratará con detenimiento en esta publicación. En OMM (1992) se encontrará un análisis muy útil del funcionamiento de los barómetros digitales (la mayoría de los cuales están provistos de lectura electrónica).

Los instrumentos de medición de la presión con fines meteorológicos (barómetros) pueden utilizarse como instrumentos operativos para medir la presión atmosférica si cumplen los requisitos siguientes:

- a) Los instrumentos deben calibrarse o controlarse periódicamente con respecto a un barómetro patrón (de trabajo) mediante procedimientos aprobados. El intervalo de tiempo entre dos calibraciones debe ser lo suficientemente corto para que el error total absoluto de medición cumpla los requisitos, relativos a la exactitud, que figuran en este capítulo.

- b) Toda variación de la exactitud (a largo y corto plazo) debe ser muy inferior a los márgenes de tolerancia que se especifican en la sección 3.1.3. Cuando un instrumento haya mostrado en las calibraciones una tendencia a la deriva, solo será utilizable para fines operativos si el intervalo entre calibraciones es lo suficientemente corto para asegurar el grado de exactitud requerido en todo momento.
- c) Las lecturas del instrumento no deberían verse afectadas por variaciones de la temperatura. Los instrumentos serán idóneos solo si:
 - i) los procedimientos para corregir las lecturas de los efectos de temperatura aseguran el grado de exactitud requerido; y/o
 - ii) el sensor de presión está instalado en un entorno cuya temperatura esté estabilizada de forma que pueda conseguirse la exactitud requerida.

Algunos instrumentos miden la temperatura del sensor de presión para compensar los efectos de la temperatura. Será necesario controlar y calibrar esas funciones de compensación cuando se efectúen las calibraciones normales.

- d) El instrumento debe emplazarse en un entorno cuyas condiciones exteriores no originen errores de medición. Esas condiciones comprenden el viento, la radiación o la temperatura, los golpes y las vibraciones, las fluctuaciones del suministro eléctrico y los golpes de presión. Debe ponerse mucho cuidado al elegir la posición del instrumento, sobre todo si es un barómetro de mercurio.

Es importante que los observadores meteorológicos conozcan a fondo la incidencia de esas condiciones y puedan evaluar si alguna de ellas repercute o no en la exactitud de las lecturas del barómetro en uso.

- e) El instrumento debería ser de lectura fácil y rápida, y su diseño debe asegurar que la desviación típica de las lecturas sea inferior a un tercio de la exactitud absoluta establecida.
- f) Cuando el instrumento tenga que ser calibrado fuera de su emplazamiento, la forma de transporte del barómetro no debe afectar a su estabilidad ni a su exactitud. Entre las condiciones que pueden alterar la calibración del barómetro se encuentran los golpes y las vibraciones de tipo mecánico, las desviaciones de la vertical y las fluctuaciones de presión considerables, como las que se pueden producir durante el transporte aéreo.

La mayoría de los barómetros de diseño reciente utilizan transductores, que transforman la respuesta del sensor en magnitudes relacionadas con la presión. Estas son procesadas posteriormente por circuitos de integración eléctricos apropiados o por sistemas de adquisición de datos con algoritmos de suavizado adecuados. Para la mayoría de las aplicaciones sinópticas de los barómetros será conveniente una constante de tiempo de unos 10 segundos (y en ningún caso superior a 20 segundos). En los barómetros de mercurio, la constante de tiempo es generalmente irrelevante.

En los párrafos siguientes se detallarán varios métodos generales para medir la presión atmosférica.

Tradicionalmente, el método más utilizado para medir la presión atmosférica consiste en equilibrarla con el peso de una columna de líquido. Por motivos diversos, la exactitud requerida solo puede conseguirse convenientemente si el líquido es mercurio. En general, se considera que los barómetros de mercurio poseen buena estabilidad a largo plazo y exactitud, pero están perdiendo popularidad frente a los barómetros electrónicos de exactitud similar, de mayor facilidad de lectura.

Una membrana elástica, sujeta por los bordes, se deformará si se ejerce más presión en un lado que en otro. En la práctica, ello se consigue gracias a una cápsula de metal cerrada, en la que se ha hecho un vacío total o parcial, y que contiene un muelle metálico resistente que impide

que la cápsula ceda a la presión atmosférica externa. Para medir la deformación causada por la diferencia de presión entre el interior y el exterior de la cápsula se utilizan medios mecánicos o eléctricos. Este es el principio del conocido barómetro aneroides.

Se han desarrollado sensores de presión consistentes en cilindros de paredes finas —de una aleación de níquel— rodeados de vacío. La frecuencia natural de resonancia de esos cilindros varía en función de la diferencia de presión entre el interior del cilindro, que está a la presión atmosférica ambiental, y el exterior del cilindro, mantenido en el vacío.

Cada vez se utilizan con mayor frecuencia transductores de presión absoluta, basados en un elemento de cuarzo cristalino. La presión ejercida por un fuelle flexible sobre la superficie del cristal origina sobre este último una fuerza de compresión. Las propiedades piezorresistivas del cristal permiten que la aplicación de presión modifique el equilibrio de un puente de Wheatstone activo. Al equilibrar el puente, es posible determinar la presión con exactitud. Estos tipos de transductores de presión están prácticamente exentos de efectos de histéresis.

El punto de ebullición de un líquido es una función de la presión a la que hierve. Una vez determinada esa función, se puede utilizar la temperatura de ebullición del líquido, en un hipsómetro, para determinar la presión atmosférica.

3.2 BARÓMETROS DE MERCURIO

Hay una tendencia creciente a abandonar los barómetros de mercurio, debido a las siguientes causas: el vapor de mercurio es altamente tóxico; el mercurio no combinado es corrosivo para las aleaciones de aluminio utilizadas en las estructuras aéreas (de ahí las reglamentaciones que prohíben el manejo o transporte de barómetros de mercurio en algunos países); para el tubo es necesario un vidrio plomado especial; el barómetro es un instrumento muy delicado y difícil de transportar; son también difíciles su mantenimiento y la limpieza del mercurio; la lectura y las correcciones del instrumento deben efectuarse manualmente; y ya se dispone de otros sensores de presión de exactitud y estabilidad equivalentes, provistos de lectura electrónica.

3.2.1 Requisitos de construcción

El principio básico del barómetro de mercurio radica en el hecho de que la presión de la atmósfera se equilibra con el peso de una columna de mercurio. En algunos barómetros la columna de mercurio se pesa en una balanza, pero para los fines meteorológicos corrientes se mide la longitud de la columna de mercurio con una escala graduada en unidades de presión.

En las estaciones meteorológicas se utilizan varios tipos de barómetro de mercurio; entre los más utilizados cabe destacar el de cubeta fija y el de Fortin. La longitud que se ha de medir es la distancia comprendida entre el extremo superior de la columna de mercurio y la superficie del mercurio de la cubeta. Está claro que cualquier alteración que se produzca en la longitud de la columna de mercurio irá acompañada de una variación del nivel del líquido en la cubeta. En el barómetro de Fortin es posible enrasar el mercurio en la cubeta con un índice de marfil, cuyo extremo está situado en el indicador cero de la escala del barómetro. En los barómetros de cubeta fija, denominados con frecuencia barómetros de modelo Kew, no se precisa un enrase del mercurio de la cubeta, ya que la escala grabada sobre el barómetro está ideada para tener en cuenta los cambios de nivel del mercurio de la cubeta.

3.2.2 Requisitos generales

Los requisitos principales que ha de satisfacer un buen barómetro de mercurio de estación son los siguientes:

- a) Su exactitud debería permanecer invariable a lo largo de períodos prolongados de tiempo; en particular, sus efectos de histéresis tendrían que ser pequeños.

- b) Su lectura debería ser fácil y rápida, y en ella habrían de corregirse todos los efectos conocidos; los observadores que utilizan estas correcciones tienen que conocer su importancia para aplicarlas debidamente y no alterar la exactitud de las lecturas.
- c) No debería perder exactitud durante el transporte.
- d) El diámetro interior del tubo habría de ser, preferentemente, de 9 mm y nunca inferior a 7 mm.
- e) El tubo debería prepararse y llenarse al vacío; la pureza del mercurio es muy importante: será mercurio doblemente destilado, desengrasado, repetidamente lavado y filtrado.
- f) Se grabará en el barómetro la temperatura real a la que se supone que la escala da lecturas correctas, en condiciones de gravedad normal; preferentemente, la escala debería estar calibrada para dar lecturas correctas a 0 °C.
- g) Los meniscos no deberían ser planos, salvo cuando el diámetro interior del tubo sea grande (superior a 20 mm).
- h) En los barómetros marinos el error no debería exceder de 0,5 hPa en ningún punto.

El tiempo de respuesta de los barómetros de mercurio de las estaciones terrestres es habitualmente muy corto en comparación con el de los barómetros marinos y el de los instrumentos de medición de la temperatura, la humedad y el viento.

3.2.3 **Condiciones normales**

Dado que la longitud de la columna de mercurio de un barómetro depende de otros factores, especialmente la temperatura y la gravedad, además de la presión atmosférica, es preciso especificar las condiciones normales en las que el barómetro debería teóricamente proporcionar lecturas de la presión verdadera. Las convenciones barométricas internacionales contienen las normas que se indican a continuación.

3.2.3.1 **Temperatura y densidad normales del mercurio**

La temperatura normal a la que se reducen las lecturas del barómetro de mercurio para eliminar los errores relacionados con los cambios de densidad del mercurio inducidos por la temperatura es 0 °C.

Se considera que la densidad normal del mercurio a 0 °C es de $1,359\,51 \cdot 10^4 \text{ kg m}^{-3}$; para calcular la presión absoluta mediante la ecuación hidrostática, el mercurio de la columna de un barómetro se trata como un fluido incompresible.

La densidad del mercurio impuro es diferente de la del mercurio puro. Por ello, la utilización de un barómetro con mercurio impuro causará errores de lectura, ya que la presión indicada es proporcional a la densidad del mercurio.

3.2.3.2 **Gravedad normal**

En las lecturas barométricas es necesario reducir la aceleración local de la gravedad a la gravedad normal. Se considera que el valor de la gravedad normal (g_n) es una constante convencional, $g_n = 9,806\,65 \text{ m s}^{-2}$.

Nota: La necesidad de adoptar un valor de referencia arbitrario para la aceleración de la gravedad se explica en OMM (1966). No es posible establecer con precisión una relación entre este valor y el valor teórico o medido de la aceleración de la gravedad en condiciones especificadas, por ejemplo, a nivel del mar y 45° de latitud, porque es muy probable que esos valores varíen cuando se obtengan datos experimentales nuevos.

3.2.4 **Lectura de los barómetros de mercurio**

Al realizar una observación con un barómetro de mercurio, debería leerse primero el termómetro unido. Esta lectura tendría que llevarse a cabo con la mayor rapidez posible, ya que la temperatura del termómetro puede ascender debido a la presencia del observador. Para estabilizar las superficies de mercurio debería golpearse ligeramente el barómetro con el dedo en dos lugares: cerca del menisco y cerca de la cubeta. Si el barómetro no es de cubeta fija, se debería realizar el ajuste necesario para poner en contacto el mercurio de la cubeta con el índice fijo de referencia. Por último, debería ajustarse el nonio al menisco para tomar la lectura. El nonio está ajustado correctamente cuando su borde horizontal inferior está en contacto con la parte más alta del menisco; con una lupa debería poder verse cualquier rendija de luz filtrada entre el nonio y la parte más alta de la superficie del mercurio. En ningún caso el nonio debería "ocultar" la parte superior del menisco. El ojo del observador tendría que situarse de forma que los bordes anterior y posterior del nonio estén en la línea de visión.

3.2.4.1 **Exactitud de las lecturas**

La lectura debería redondearse a la décima de hectopascal más próxima. En general, no puede leerse el nonio con una exactitud mayor.

Para perfeccionar la lectura de los barómetros de mercurio se han diseñado sistemas ópticos y digitales que, aunque suelen facilitar las observaciones, pueden introducir también nuevas fuentes de error, a menos que se hayan diseñado y calibrado cuidadosamente.

3.2.4.2 **Cambios en la corrección de índice**

Toda variación de la corrección de índice que se aprecie durante una inspección debería evaluarse según su importancia, teniendo en cuenta los factores siguientes:

- a) el historial del barómetro;
- b) la experiencia del inspector en materia de comparaciones;
- c) la magnitud del cambio observado;
- d) la desviación típica de las diferencias;
- e) la disponibilidad en la estación de un barómetro de recambio cuya corrección se conozca con exactitud;
- f) el comportamiento de los patrones itinerantes durante la gira de inspección;
- g) la coincidencia o discrepancia entre las lecturas de presión de la estación y las de las estaciones vecinas, reflejadas en el mapa sinóptico diario si se acepta la variación;
- h) si se hizo o no la limpieza del instrumento antes de efectuar la comparación.

La variación del error de índice en los barómetros de estación, denominada deriva, obedece a:

- a) las variaciones de la depresión de capilaridad de las superficies de mercurio cuando este está contaminado; en zonas con contaminación atmosférica grave proveniente de fuentes industriales, la contaminación del mercurio puede plantear un serio problema y exigir la limpieza relativamente frecuente del mercurio y de la cubeta;
- b) el ascenso de burbujas de aire hasta la cámara barométrica a través de la columna de mercurio.

Estos cambios pueden ser aleatorios, o sistemáticamente positivos o negativos, en función de la causa que los origine.

Los cambios de la corrección de índice también están causados por:

- a) un error imputable al observador, por haber olvidado dar los golpecitos al barómetro antes de iniciar la lectura y no ajustar correctamente el nonio y el punto de referencia;
- b) la ausencia de equilibrio de temperatura en el barómetro de la estación o en el patrón itinerante;
- c) la no simultaneidad de las lecturas cuando la presión está cambiando rápidamente.

En los barómetros de Fortin, tales cambios pueden obedecer al desplazamiento accidental de la escala ajustable y a la atenuación o desaparición de las marcas que indican los puntos de referencia.

3.2.4.3 **Cambios permisibles en la corrección del error de índice**

Las variaciones de la corrección de índice deberían tratarse de la manera siguiente:

- a) Un cambio de la corrección que no exceda de 0,1 hPa se considerará despreciable, a menos que sea persistente.
- b) Un cambio de la corrección que exceda de 0,1 hPa, pero que no supere los 0,3 hPa, puede aceptarse provisionalmente, salvo en el caso de que lo confirme, por lo menos, una inspección ulterior.
- c) Un cambio de la corrección que exceda de 0,3 hPa puede aceptarse provisionalmente solo cuando el barómetro se ha limpiado y no se dispone de otro de repuesto con un valor de corrección conocido; el barómetro debería reemplazarse en cuanto se disponga de otro calibrado correctamente.

Se vigilarán atentamente los barómetros cuya corrección de índice varíe según lo descrito en los apartados b) y c), y se recalibrarán o sustituirán lo antes posible.

Los criterios aplicados a los cambios de la corrección de índice en los barómetros de estación son también aplicables a los instrumentos patrones itinerantes. Las variaciones inferiores a 0,1 hPa podrán despreciarse, salvo cuando sean persistentes. Una variación mayor debería confirmarse y aceptarse únicamente después de repetidas comparaciones. Las correcciones de índice del patrón itinerante efectuadas "antes" y "después" de las visitas de inspección no deberían diferir en más de 0,1 hPa. Así pues, solo deberían emplearse como patrones itinerantes los barómetros que tengan un largo historial de correcciones coherentes.

3.2.5 **Corrección de las lecturas barométricas a las condiciones normales**

Para convertir las lecturas efectuadas en horas y lugares diferentes en valores utilizables de la presión atmosférica deberían realizarse las correcciones siguientes:

- a) corrección del error de índice;
- b) corrección por gravedad;
- c) corrección de temperatura.

En numerosas aplicaciones meteorológicas operativas se pueden obtener resultados aceptables si se tienen en cuenta las instrucciones facilitadas por el fabricante del barómetro, siempre y cuando quede claro que esos procedimientos proporcionan lecturas de presión con el grado de

incertidumbre requerido. Sin embargo, cuando los resultados no sean satisfactorios o se requiera una mayor exactitud, deberían aplicarse unos procedimientos detallados que permitan efectuar las correcciones mencionadas, según se describe en el anexo 3.A.

3.2.6 **Errores y fallos de los barómetros de mercurio**

3.2.6.1 ***Incertidumbres en la temperatura del instrumento***

La temperatura que indica el termómetro unido no suele ser idéntica a la temperatura media del mercurio, de la escala y de la cubeta. Se puede disminuir el error resultante mediante una exposición conveniente y un procedimiento de observación adecuado. Debe tenerse en cuenta que en un recinto cerrado suele haber un gradiente de temperatura vertical estable y apreciable, que puede arrojar diferencias considerables entre las temperaturas de las partes superior e inferior del barómetro. La utilización de un ventilador eléctrico puede evitar esa distribución de temperaturas, pero es posible que dé lugar a variaciones de presión locales, por lo que conviene desconectarlo antes de hacer la observación. En condiciones normales, el error asociado a la reducción de la temperatura no excederá de 0,1 hPa si se han tomado las precauciones mencionadas.

3.2.6.2 ***Vacío imperfecto de la cámara barométrica***

Al calibrar un instrumento se supone, por lo general, que hay un vacío perfecto o solo una cantidad despreciable de gas por encima de la columna de mercurio. Toda variación a ese respecto dará lugar a errores en las lecturas de presión. Una manera sencilla de detectar la presencia de gas en el barómetro consiste en inclinar ligeramente el tubo y escuchar si se produce un sonido cuando el mercurio alcanza el extremo superior de la columna, o en examinar el extremo cerrado del tubo para ver si contiene alguna burbuja, cuyo diámetro no debería exceder de 1,5 mm cuando el barómetro esté inclinado. Sin embargo, no es posible detectar de ese modo la presencia de vapor de agua, ya que este se condensa cuando disminuye el volumen de la cámara barométrica. Según la ley de Boyle, el error debido al aire y al vapor de agua no saturado en la cámara barométrica será inversamente proporcional al volumen existente por encima del mercurio. La única manera satisfactoria de eliminar este error consiste en efectuar una calibración nueva en toda la escala; si el error es grande, el tubo debería ser rellenado o sustituido.

3.2.6.3 ***Depresión capilar de las superficies del mercurio***

La altura del menisco y la depresión capilar¹ de un tubo determinado pueden variar debido al envejecimiento del tubo de vidrio, a la contaminación del mercurio, a la tendencia de la presión y a la posición del mercurio dentro del tubo. En la medida de lo posible, la altura media del menisco debería observarse durante la calibración original y consignarse su valor en el certificado del barómetro. No deberían corregirse las desviaciones respecto de la altura original del menisco, y esta información tendría que utilizarse únicamente para determinar si es necesario o no revisar o recalibrar el barómetro. Una variación de 1 mm en la altura del menisco (de 1,8 a 0,8 mm) para un tubo de 8 mm puede ocasionar un error de aproximadamente 0,5 hPa en la lectura de presión.

Debería tenerse presente también que, en barómetros de cubeta fija, una variación grande del ángulo de contacto entre el mercurio y las paredes de la cubeta puede causar errores pequeños, pero apreciables, de la presión observada.

¹ La depresión capilar es una reducción de la altura del menisco de un líquido contenido en un tubo en el que el líquido (por ejemplo, mercurio) no moje las paredes del tubo. El menisco es convexo en su superficie superior.

3.2.6.4 **Falta de verticalidad**

Si la parte inferior de un barómetro simétrico de longitud normal (unos 90 cm), colgado libremente, se desplaza unos 6 mm con respecto a la vertical, la presión que indique tendrá un error por exceso de unos 0,02 hPa. Por lo general, estos barómetros no se apartan tanto de la vertical verdadera.

Sin embargo, en los barómetros asimétricos esta fuente de error es más importante. Por ejemplo, si el índice de referencia de la cubeta se encuentra a unos 12 mm del eje, basta con que la cubeta se desplace tan solo 1 mm respecto de la vertical para causar un error de 0,02 hPa.

3.2.6.5 **Exactitud general de las lecturas de presión corregidas**

En una estación meteorológica ordinaria, la desviación típica de una sola lectura barométrica corregida no debería exceder de 0,1 hPa. Este error se deberá, en gran parte, a la incertidumbre inevitable en la corrección del instrumento, a la incertidumbre relativa a la temperatura del instrumento, y al error originado por el efecto de bombeo de las ráfagas de viento sobre la superficie del mercurio.

3.2.7 **Medidas de seguridad durante el manejo del mercurio**

El mercurio se utiliza en grandes cantidades en los barómetros y, como es venenoso, su manejo exige precauciones. El mercurio en estado elemental es líquido a las temperaturas y presiones de la superficie terrestre. Allí donde hay mercurio líquido se forma vapor de mercurio. En sus estados líquido y gaseoso, el mercurio puede ser absorbido a través de la piel e inhalado como vapor. Las propiedades del mercurio se describen en Sax (1975). En muchos países, las reglamentaciones sobre el manejo de productos peligrosos incluyen las precauciones relativas al manejo del mercurio. El Convenio de Minamata sobre el Mercurio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) entró en vigor en octubre de 2013 y repercutirá significativamente en la utilización del mercurio para aplicaciones meteorológicas.

Una dosis alta de mercurio puede causar envenenamiento agudo. El mercurio puede acumularse también en los tejidos duros y blandos del cuerpo humano, y una exposición prolongada, incluso a dosis bajas, puede, con el tiempo, afectar a los órganos y hasta causar la muerte. El mercurio ataca principalmente el sistema nervioso central, la boca y las encías, y sus manifestaciones sintomáticas incluyen dolor, pérdida de dientes, reacciones alérgicas, temblores y alteraciones psicológicas.

En lo que respecta a las aplicaciones barométricas, los riesgos más importantes están vinculados a los laboratorios donde los barómetros se vacían o llenan con frecuencia. Pueden plantearse también problemas en las estaciones meteorológicas, por ejemplo cuando se rompe un barómetro y no se recoge el mercurio, que puede experimentar una evaporación continua en un recinto cerrado donde hay personas trabajando.

El peligro subsiste incluso si se limpia el mercurio después de un accidente y se coloca después en un recipiente adecuado. Al manejar mercurio se tendrá en cuenta lo siguiente:

- a) Los recipientes que contienen mercurio serán resistentes, se tapan convenientemente para evitar derrames y se inspeccionarán periódicamente.
- b) El suelo del recinto en el que se almacena mercurio o en el que se utilizan grandes cantidades de este metal se cubrirá con un material no poroso y sin grietas como el PVC. Las gotitas de mercurio quedarán atrapadas en las pequeñas grietas del suelo, por ejemplo entre las baldosas. Es conveniente extender el material protector unos 10 cm sobre las paredes, con lo que se eliminarán las juntas entre el suelo y las paredes.

- c) No debe almacenarse mercurio en recipientes metálicos, pues reacciona con casi todos los metales, salvo el hierro, y forma una amalgama que puede ser también peligrosa. El mercurio no debería entrar en contacto con ningún objeto metálico.
- d) No debe almacenarse mercurio cerca de otras sustancias químicas, especialmente aminas, amoníaco o acetileno.
- e) El mercurio en grandes cantidades debería almacenarse y manipularse siempre en recintos bien ventilados. El material en bruto debería manipularse en el interior de una campana contra emanaciones, de buena calidad.
- f) Nunca debería almacenarse el mercurio cerca de una fuente de calor, pues su punto de ebullición es relativamente bajo (357 °C) y puede dar lugar a concentraciones peligrosas de vapor tóxico, especialmente en caso de incendio.
- g) Cuando se manipule mercurio, tanto el recinto como el personal que trabaja en él deberían inspeccionarse con regularidad para determinar si hay exposición a dosis de mercurio peligrosas.

En virtud del Convenio de Minamata, ya no se autorizarán la importación ni la exportación del mercurio. En este contexto, para 2020 se interrumpirá la producción, la importación y la exportación de productos con mercurio añadido, tales como los termómetros. En el Convenio se establece que: “[c]ada Parte prohibirá, adoptando las medidas pertinentes, la fabricación, la importación y la exportación de los productos con mercurio añadido incluidos en la parte I del anexo A [del Convenio] después de la fecha de eliminación especificada para esos productos” (PNUMA, 2013). Más concretamente, la lista incluye lo indicado a continuación.

Los siguientes aparatos de medición no electrónicos, a excepción de los aparatos de medición no electrónicos instalados en equipo de gran escala o los utilizados para mediciones de alta precisión, cuando no haya disponible ninguna alternativa adecuada sin mercurio:

- a) barómetros;
- b) higrómetros;
- c) manómetros;
- d) termómetros;
- e) esfigomanómetros.

3.2.7.1 **Vertidos y evacuación**

Los dos métodos más corrientes para limpiar los vertidos de mercurio son la recogida por aspiración, utilizando un sistema como el que se describe a continuación, o la adsorción/ amalgamiento del mercurio con polvo.

Los vertidos de mercurio deberían limpiarse de inmediato. El operador debería trabajar provisto de guantes o de guanteletes de PVC, gafas protectoras y, cuando el vertido sea importante, una máscara de respiración con filtro contra las emanaciones de mercurio. Con arreglo a la magnitud del vertido, se recogerá el mercurio mediante un mecanismo aspirador, y se utilizarán después adsorbentes para recoger las gotitas. Es imprescindible utilizar adsorbentes, pues de lo contrario se escaparán docenas de pequeñas gotas, de diámetro inferior a 0,02 mm, que quedarán adheridas a las superficies y no podrán ser eliminadas eficazmente por aspiración.

Los sistemas de recogida por aspiración operan haciendo pasar el mercurio por un tubo de plástico de pequeño diámetro hasta un recipiente de vidrio que contendrá por lo menos 3 cm de agua en el fondo; el extremo del tubo quedará sumergido bajo el nivel del agua del recipiente. En la cámara de aire situada sobre el agua del recipiente se introduce un extremo de otro tubo, de diámetro mayor, y se conecta el otro extremo a una aspiradora o bomba de vacío. El agua

impide el paso del vapor o de las gotitas de mercurio hacia la aspiradora o bomba. Tras ello, la solución se depositará en un recipiente de plástico, claramente etiquetado, para su tratamiento posterior.

Para adsorber o amalgamar el mercurio pueden utilizarse diversos compuestos adsorbentes. En particular, el polvo de zinc, la flor de azufre o el carbono activado. Existen productos comerciales para limpiar el mercurio vertido. Se espolvorea el polvo sobre la superficie y se espera a que aquel adsorba o amalgame el mercurio. Se recoge la mezcla resultante y se coloca en un recipiente de plástico, claramente identificado, para su tratamiento posterior.

El mercurio recogido puede ser desechado o recuperado. Las autoridades locales o el proveedor pueden facilitar instrucciones para eliminar los desechos de mercurio. También el proveedor puede suministrar información sobre la recuperación y purificación del mercurio.

3.2.7.2 **Incendios**

El mercurio no arde, pero emite humos tóxicos en concentraciones importantes. Después de un incendio, el vapor de mercurio se condensará sobre las superficies frías más cercanas, contaminará áreas extensas y será adsorbido por las superficies porosas, como la madera quemada. En caso de incendio, se evacuará la zona y se tratará de evitar la inhalación de humos. Se informará al cuerpo de bomberos del lugar donde se encuentra el mercurio y de su cantidad.

3.2.7.3 **Transporte**

El transporte aéreo de mercurio o de instrumentos que contengan mercurio está regulado por la Asociación de Transporte Aéreo Internacional. Las aerolíneas proporcionarán las condiciones específicas relativas a ese transporte, si así se les solicita. El traslado por tren o por carretera está regulado, en general, por las reglamentaciones sobre el transporte de sustancias peligrosas que rigen en cada país.

Por lo común, el mercurio metálico se debe envasar en recipientes de vidrio o plástico, claramente etiquetados, y lo suficientemente protegidos para evitar roturas. Los instrumentos que contienen mercurio deberían embalarse en una caja de cierre hermético, bien acolchada, fabricada con material resistente al mercurio.

3.3 **BARÓMETROS ELECTRÓNICOS**

La mayoría de los barómetros de diseño reciente están dotados de transductores que transforman la respuesta del sensor en una magnitud eléctrica relacionada con la presión, bien en forma de señales analógicas, por ejemplo, el voltaje (de corriente continua o de corriente alterna con una frecuencia relacionada con la presión real), o bien en forma de señales digitales, por ejemplo, la frecuencia de impulsos o los protocolos normalizados de comunicación de datos como, por ejemplo, RS232, RS422, RS485 o IEEE488. Las señales analógicas se pueden visualizar utilizando diversos medidores electrónicos. Para visualizar las salidas digitales, o las salidas analógicas digitalizadas, se emplean monitores y sistemas de adquisición de datos, como los utilizados en las estaciones meteorológicas automáticas.

La tecnología actual de barómetros digitales recurre a diversos niveles de redundancia para aumentar la exactitud y la estabilidad de las mediciones a largo plazo. Una técnica consiste en utilizar tres sensores de funcionamiento independiente, controlados por un microprocesador centralizado. Se puede conseguir mayor estabilidad y fiabilidad con tres barómetros completamente independientes, dotados de tres juegos de transductores de presión y de microprocesadores. Los sensores de temperatura montados en el interior de cada configuración permiten efectuar automáticamente la compensación de temperatura. La triple redundancia

asegurará una excelente estabilidad a largo plazo y la exactitud de las mediciones, incluso en las aplicaciones más exigentes. Estas técnicas permiten controlar y verificar continuamente el funcionamiento individual de cada sensor.

El uso de barómetros digitales implica algunos requisitos operativos especiales, particularmente en las estaciones meteorológicas automáticas; existen recomendaciones formales para asegurar una buena práctica (véase el *Informe final abreviado de la undécima reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación (OMM-N° 807)*, anexo VII). Las organizaciones meteorológicas deberían:

- a) controlar o reajustar la calibración de los barómetros digitales, y repetir esas operaciones regularmente (anualmente, hasta que se determine el grado de deriva);
- b) asegurar una calibración frecuente de los barómetros digitales y examinar la posibilidad de usar, para este fin, los medios de calibración disponibles a nivel nacional;
- c) considerar que ciertos tipos de barómetros digitales pueden ser utilizados como patrón itinerante gracias a su portabilidad y a su buena estabilidad a corto plazo;
- d) considerar que la selección de un tipo específico de barómetro digital debería basarse, no solo en las especificaciones indicadas para el instrumento, sino también en las condiciones medioambientales y en las posibilidades de mantenimiento.

Los fabricantes deberían:

- a) mejorar la independencia de la temperatura y la estabilidad a largo plazo de los barómetros digitales;
- b) usar interfaces y protocolos de comunicación normalizados para la transmisión de datos;
- c) disponer de un suministro de energía para los barómetros digitales que opere en un amplio intervalo de valores de tensión en corriente continua (por ejemplo, de 5 a 28 VCC).

3.3.1 Transductores para medir el desplazamiento de la cápsula aneroide

La medición del desplazamiento de la cápsula aneroide sin tocar el instrumento es una necesidad inherente a los aparatos de precisión que miden la presión para aplicaciones meteorológicas. Se utiliza una gran variedad de esos transductores y, en particular, detectores de desplazamiento capacitivos, detectores de desplazamiento potenciométricos, extensómetros situados en puntos estratégicos del sensor, y servosistemas fuerza/equilibrio que mantienen constantes las dimensiones del sensor, independientemente de la presión.

Todos los componentes sensibles deben colocarse en un armazón de hierro fundido, que ha de mantenerse a una temperatura constante mediante un calefactor regulado electrónicamente. Debe evitarse absolutamente la condensación de agua. Una técnica eficaz consiste en colocar un agente higroscópico (por ejemplo, cristales de gel de silicio) dentro del armazón y, para impedir la difusión del vapor de agua dentro del mismo, se puede conectar un tubo de plástico largo (de unos 25 m), de un diámetro interior no mayor de 2 mm, entre la toma de presión y la cabeza estática (véase la sección 3.8.1).

El armazón debe cerrarse herméticamente, sin por ello impedir que el compartimento donde se mide la presión esté conectado con el exterior.

3.3.2 Barómetros digitales piezorresistivos

Es posible obtener mediciones de presión atmosférica utilizando el efecto piezoeléctrico (piezorresistivo). Una configuración común consta de cuatro resistores, colocados sobre la superficie flexible de un sustrato monolítico de silicio, interconectados de manera que formen un puente de Wheatstone.

En los barómetros piezorresistivos digitales se utilizan elementos de cuarzo cristalino, axialmente cargados, que son transductores de la presión absoluta. Se ha elegido el cuarzo cristalino por sus propiedades piezoeléctricas, sus características de estabilidad de frecuencia, sus reducidos efectos de temperatura y sus características de frecuencia reproducibles con precisión. La presión aplicada en un puerto de entrada, por medio de un fuelle flexible, origina una fuerza axial ascendente que da lugar, por tanto, a una fuerza de compresión sobre el elemento de cristal de cuarzo. Puesto que este elemento es, en esencia, una membrana rígida, toda la estructura mecánica sufre deflexiones minúsculas, con lo que queda prácticamente eliminada la histéresis mecánica.

El mencionado puente de Wheatstone plenamente activo puede consistir bien en medidores de deformación de semiconductores, o bien en medidores piezorresistivos. Estos extensómetros pueden estar unidos a un fino diafragma circular sujeto a su circunferencia, o difundidos atómicamente en una configuración de diafragma de silicio. En los dispositivos de difusión, el propio chip integrado de silicio es el diafragma. La presión aplicada confiere al diafragma una carga distribuida que, a su vez, produce un esfuerzo de flexión, con las consiguientes deformaciones a las que reacciona el extensómetro. Ese esfuerzo crea una deformación proporcional a la presión aplicada, dando lugar a un desequilibrio del puente. Así pues, la salida del puente es proporcional a la diferencia neta de la presión que actúa sobre el diafragma.

Este modo de funcionamiento se basa en el hecho de que la presión atmosférica actúa sobre el elemento sensor que abarca una pequeña celda, en la que se ha hecho el vacío, a través de la cual se somete a los resistores a esfuerzos de tracción y compresión. Debido al efecto piezoeléctrico, los valores de la resistencia cambian proporcionalmente a la presión atmosférica. Para eliminar los errores de temperatura, el sensor suele ir provisto de un termostato.

La salida del puente de Wheatstone, alimentado por corriente continua, se transforma en una señal normalizada por medio de un amplificador adecuado. Generalmente, los valores de presión se muestran en una pantalla de cristal líquido o de diodo fotoemisor.

En un modelo reciente de transductor de presión piezoeléctrico se determinan dos frecuencias de resonancia del elemento piezoeléctrico. Mediante el cálculo de una función lineal de esas dos frecuencias, y con un conjunto apropiado de variables obtenido después de la calibración, se calcula una presión utilizando un microprocesador independiente de la temperatura del sensor.

3.3.3 Barómetros de resonador cilíndrico

En los barómetros de resonador cilíndrico se emplea un elemento sensor consistente en un cilindro de paredes finas, de una aleación de níquel, que se mantiene en un modo de vibración "circular" electromagnética. La presión de entrada se mide en función de la variación que se produce en la frecuencia natural de resonancia del sistema mecánico de vibración. Los movimientos de la pared del cilindro se miden mediante una bobina convertidora, cuya señal es amplificada y devuelta a una bobina motora. La presión atmosférica que se desea medir pasa al interior del cilindro, mientras en el exterior se mantiene una referencia de vacío. En estas circunstancias, la frecuencia natural de resonancia de la vibración varía exactamente con el esfuerzo causado dentro de la pared del cilindro debido a la diferencia de presión entre sus superficies. Un aumento de presión da lugar a un incremento de frecuencia.

El delgado cilindro tiene la masa y rigidez suficientes como para hacer frente al intervalo de presiones de funcionamiento, y está montado sobre una base sólida. El cilindro está instalado en una cámara de vacío, y su entrada está conectada a la atmósfera libre para los usos meteorológicos. Dado que hay una relación unívoca entre la frecuencia natural de resonancia

del cilindro y la presión, se puede calcular la presión atmosférica a partir de la frecuencia de resonancia medida. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esa relación, determinada durante la calibración, dependerá de la temperatura y densidad del gas, por lo que habrá que introducir una compensación de temperatura; para ello se recomienda secar el aire antes de enviarlo hacia la entrada.

3.3.4 **Lectura de los barómetros electrónicos**

El barómetro electrónico mide la presión atmosférica del espacio circundante, o de cualquier espacio al que esté conectado mediante un tubo. Por lo general, el barómetro debería instalarse de forma que la lectura de presión se efectúe al nivel del instrumento. Sin embargo, a bordo de buques o en estaciones terrestres de poca altitud, es posible ajustar el instrumento para que indique la presión al nivel medio del mar, a condición de que la diferencia entre la presión de la estación y la del nivel del mar puedan considerarse constantes.

Con el barómetro electrónico es posible obtener lecturas exactas en un dispositivo de lectura digital, cuya escala está graduada generalmente en hectopascales, aunque puede ser fácilmente adaptado a otras unidades en caso necesario. Por lo general, permite también efectuar grabaciones digitales. Si el dispositivo está controlado por un microprocesador, podrá indicar la tendencia de las variaciones de la presión.

La exactitud del barómetro electrónico dependerá de la exactitud con que haya sido calibrado, de la eficacia de la compensación de temperatura (método de aire residual, medición y corrección de la temperatura, utilización de termostato), y de la deriva a lo largo del tiempo de calibración del barómetro.

En los transductores primarios es posible instalar circuitos que corrijan la falta de linealidad y los efectos de temperatura del sensor, y que conviertan los resultados de las lecturas en unidades normalizadas. Los modelos actuales más corrientes de barómetro comprenden un sensor, un microordenador (con dispositivo de visualización) y un circuito de interfaz para comunicar con los eventuales registradores de datos o con estaciones meteorológicas automáticas.

Por lo general, los barómetros electrónicos provistos de más de un transductor o elemento sensor calculan una media ponderada de los resultados de cada uno de los sensores y determinan la presión resultante con una resolución de 0,1 hPa. Durante la calibración, cada uno de los sensores puede verificarse con una resolución de 0,01 hPa, lo que no significa que la exactitud del sensor sea superior a 0,1 hPa (véase la sección 3.10.3.4).

3.3.5 **Errores y fallos de los barómetros electrónicos**

3.3.5.1 ***Deriva de calibración***

La deriva de calibración es una de las fuentes principales de error de los barómetros electrónicos. Esa deriva suele ser mayor cuando el barómetro es nuevo y disminuye con el paso del tiempo. Pueden producirse saltos en los resultados de una a otra calibración.

Para mantener el barómetro en un modo de funcionamiento aceptable, habrá que verificar las correcciones de calibración aplicadas a las lecturas a intervalos relativamente frecuentes (por ejemplo, cada año), a fin de detectar y reemplazar prontamente los sensores defectuosos.

La necesidad de verificar frecuentemente la calibración de los barómetros electrónicos conlleva una carga adicional para los Servicios Meteorológicos Nacionales, en particular cuando sus redes barométricas son extensas. A la hora de estudiar la posibilidad de reemplazar los barómetros de mercurio por instrumentos electrónicos deberán tenerse en cuenta los costes de calibración vigentes.

3.3.5.2 **Temperatura**

Para mantener la calibración es preciso que el barómetro electrónico permanezca a una temperatura constante, de ser posible, similar a la temperatura de calibración. Sin embargo, muchos de los barómetros electrónicos que se encuentran en el mercado no disponen de control de temperatura, por lo que están expuestos a errores mayores. Una buena parte de ellos depende de la medición exacta de la temperatura del sensor y de la corrección electrónica de la presión. Se presupone la ausencia de gradiente térmico en el interior del elemento sensor del barómetro. En situaciones en las que la temperatura cambia suficientemente rápido, pueden producirse errores por histéresis a corto plazo en la presión medida.

La variación de la calibración depende también en gran medida del historial térmico del barómetro puesto que una exposición prolongada a temperaturas diferentes de las de calibración puede ocasionar desviaciones en la calibración a medio o largo plazo.

Los sistemas electrónicos del barómetro pueden ser también una fuente de error cuando no se mantienen a la misma temperatura del elemento sensor. Es muy frecuente utilizar los barómetros electrónicos en condiciones climáticas extremas, especialmente en las estaciones meteorológicas automáticas. En tales casos, el barómetro puede estar expuesto a temperaturas que exceden de las señaladas en las especificaciones de diseño y calibración proporcionadas por el fabricante.

3.3.5.3 **Interferencias eléctricas**

Como todos los dispositivos electrónicos de medición sensibles, los barómetros electrónicos deberían protegerse y alejarse de fuentes generadoras de campos magnéticos intensos, como transformadores, computadoras, radares, etc. Aunque ello no suele ser un problema, puede producir un aumento del ruido que perjudicaría la precisión del dispositivo.

3.3.5.4 **Naturaleza del funcionamiento**

Los cambios visibles en la calibración de un barómetro electrónico pueden obedecer a que, durante la calibración, el barómetro funciona de modo diferente a como lo hace en el uso operativo. Un instrumento que funciona sin interrupciones y que, por consiguiente, está caliente, proporcionará lecturas de presión diferentes de las de un instrumento que se enciende durante unos segundos.

3.4 **BARÓMETROS ANEROIDES**

3.4.1 **Requisitos de construcción**

Las principales ventajas de los barómetros aneroides convencionales frente a los de mercurio son su tamaño reducido y su facilidad de transporte, que los hacen especialmente adecuados para su utilización en el mar o sobre el terreno. Las partes esenciales son una cámara metálica cerrada, en la que se ha hecho un vacío total o parcial, y un sistema de muelles fuertes que impide el colapso de la cámara debido a la presión atmosférica externa. Sea cual sea la presión, habrá un equilibrio entre la fuerza ejercida por los muelles y la de la presión exterior.

La cámara aneroide podrá estar fabricada con materiales (acero o aleación de cobre y berilio) cuyas propiedades elásticas permitan a la cámara actuar por sí misma como un muelle.

Es necesario disponer de algún medio que permita detectar y visualizar las deformaciones que se produzcan. El dispositivo puede consistir en un sistema de palancas que multipliquen las deformaciones y desplacen un índice sobre una escala graduada que indique la presión. Otra posibilidad es desviar un rayo de luz sobre la escala. En lugar de estas técnicas mecánicas analógicas, algunos barómetros llevan un micrómetro manual, cuyo contador indica la presión

directamente en décimas de hectopascal. Se efectúa la lectura cuando el indicador luminoso señala que el micrómetro ha contactado con el aneroide. Este tipo de aneroide es portátil y robusto.

3.4.2 **Requisitos de exactitud**

Los principales requisitos que debe cumplir un buen barómetro aneroide son los siguientes:

- a) El instrumento debería estar compensado de temperatura, de modo que las lecturas no varíen en más de 0,3 hPa para un cambio de temperatura de 30 K.
- b) Los errores de escala en cualquier punto no deberían exceder de 0,3 hPa y deberían mantener esa tolerancia durante un período de un año como mínimo para usos normales.
- c) La histéresis debería ser lo suficientemente pequeña para asegurar que la diferencia entre las lecturas efectuadas antes de un cambio de presión de 50 hPa y después de su retorno al valor inicial no exceda de 0,3 hPa.
- d) El instrumento debería poder resistir los riesgos ordinarios de traslado sin introducir inexactitudes que rebasen los límites estipulados en los apartados anteriores.

3.4.3 **Lectura de los barómetros aneroides**

3.4.3.1 ***Exactitud de las lecturas***

Un barómetro aneroide debería leerse siempre en la misma posición (vertical u horizontal) en la que haya sido calibrado. Antes de proceder a la lectura debería golpearse el instrumento ligeramente. En la medida de lo posible, la lectura debería redondearse a la décima de hectopascal más próxima. Existen dispositivos ópticos y digitales que mejoran la exactitud de las lecturas y reducen los errores debidos a las palancas mecánicas.

3.4.3.2 ***Correcciones aplicadas a los barómetros aneroides***

El barómetro aneroide debería ajustarse generalmente de forma que la lectura de presión se efectúe al nivel del instrumento. Sin embargo, a bordo de buques o en las estaciones terrestres de baja altitud podrá ajustarse el instrumento para que indique la presión al nivel medio del mar, siempre que se pueda considerar constante la diferencia entre la presión en la estación y la presión al nivel del mar. Deberían corregirse las lecturas de errores instrumentales pero, por lo general, se supone que la compensación de temperatura del instrumento es suficiente y que no es preciso introducir correcciones por gravedad.

3.4.4 **Errores y fallos de los barómetros aneroides**

3.4.4.1 ***Compensación incompleta de temperatura***

En los barómetros aneroides, el debilitamiento del muelle causado por el aumento de temperatura hará que el instrumento indique una presión demasiado alta. Por lo general, este efecto se compensa de dos maneras distintas:

- a) mediante una unión bimetálica en el sistema de palancas; o
- b) dejando una cierta cantidad de gas en el interior de la cámara aneroide.

En la mayoría de los barómetros aneroides corrientes, la compensación que se obtiene mediante estos métodos es completa solo para cierto valor de la presión de compensación. Es conveniente que todos los barómetros aneroides y barógrafos utilizados en las estaciones meteorológicas

estén debidamente compensados de temperatura para todo el rango de presión. En los sistemas de lectura digitales adecuados para la automatización, tales correcciones completas pueden formar parte del sistema electrónico.

3.4.4.2 **Errores de elasticidad**

El barómetro aneroide puede estar expuesto a cambios de presión grandes y rápidos. Por ejemplo, una racha de viento intensa hará que el instrumento acuse un aumento de presión rápido, seguido de un retorno más gradual a su valor original. En tales circunstancias, debido a la histéresis, el barómetro dará una lectura ligeramente distinta de la presión verdadera; es posible que transcurra un lapso de tiempo considerable antes de que esa diferencia se vuelva desdeñable. Sin embargo, dado que los barógrafos y barómetros aneroides de las estaciones de superficie no suelen estar expuestos directamente a tales cambios de presión, sus errores de histéresis no son excesivos.

Los cambios lentos que experimenta el metal de la cápsula aneroide con el paso del tiempo generan también un error. Este efecto solo puede compensarse mediante comparaciones con un barómetro patrón efectuadas a intervalos periódicos, por ejemplo anuales. Un buen barómetro aneroide debería conservar una exactitud de 0,1 hPa durante un año o más. A fin de determinar las desviaciones del barómetro respecto de esa exactitud, deberían establecerse procedimientos de inspección regulares con las calibraciones y ajustes necesarios.

3.5 **BARÓGRAFOS**

3.5.1 **Requisitos generales**

De los diversos tipos de barógrafos, solo se tratará con detalle el barógrafo aneroide. A efectos sinópticos, se recomienda que las bandas de los barógrafos meteorológicos:

- a) estén graduadas en hectopascales;
- b) permitan leer diferencias de hasta 0,1 hPa;
- c) tengan un factor de escala de 10 hPa por cada 1,5 cm de banda.

Además, son deseables los siguientes requisitos:

- a) El barógrafo debería utilizar una unidad aneroide de primera clase (véase la sección 3.5.2).
- b) El instrumento debería estar compensado de temperatura, de modo que las lecturas no varíen en más de 1 hPa para cambios de temperatura de 20 K.
- c) Los errores de escala no deberían ser superiores a 1,5 hPa en cualquier punto.
- d) La histéresis debería ser lo suficientemente pequeña para asegurar que la diferencia entre las lecturas efectuadas antes de un cambio de presión de 50 hPa y después de su retorno al valor inicial no exceda de 1 hPa.
- e) Debería disponerse de un sistema para señalar la hora que permita hacer las marcas sin necesidad de levantar la cubierta del instrumento.
- f) El brazo de la plumilla debería girar en un soporte cuyo eje esté inclinado, de forma que la plumilla se apoye sobre la banda por gravedad; debería contar con algún mecanismo que permita ajustar la posición de la plumilla.

Los barógrafos marinos están sujetos a requisitos especiales, que se examinan en el capítulo 4 de la parte II.

3.5.2 **Construcción de barógrafos**

El principio del barógrafo aneroide es similar al del barómetro aneroide, salvo que se utiliza una plumilla marcadora en vez de un índice, lo que conlleva ciertos cambios de diseño de la cápsula y, por lo general, causa una disminución de la amplificación total y un aumento de la cantidad y tamaño de las cápsulas utilizadas.

El "control" del barógrafo puede expresarse como la fuerza que se necesita para desplazar el índice una unidad de la escala (1 hPa), por lo que es igual a la fuerza necesaria para impedir que la plumilla se desplace cuando se produce un cambio de presión de 1 hPa. Se trata de un indicador de los efectos potenciales del rozamiento sobre los detalles del registro.

La fuerza necesaria para contrarrestar el movimiento de la cápsula cuando se produce un cambio de presión de 1 hPa es $100 A$ newtons, donde A es el área de la sección transversal efectiva de la cápsula, expresada en metros cuadrados. Si la amplificación es X , la fuerza necesaria para impedir el desplazamiento de la plumilla será igual a $100 A/X$ newtons, y variará como A/X . Para un tipo de cápsula y valor de escala determinados, el valor de X será en gran medida independiente de A , de modo que se puede considerar que el control de la plumilla del barógrafo varía aproximadamente con el área de la sección transversal efectiva de la cápsula.

3.5.3 **Fuentes de error y de inexactitud**

Además de las fuentes de error ya mencionadas con respecto a los barómetros aneroides (véase la sección 3.4.4), también es importante el rozamiento entre la plumilla y el papel. El control de la plumilla depende, en gran medida, de la sección transversal efectiva de la cápsula aneroide. En un barógrafo bien construido, el rozamiento de la plumilla es sensiblemente mayor que el rozamiento total de todos los pivotes y cojinetes del instrumento, por lo que debería prestarse especial atención para reducir esos errores, utilizando, por ejemplo, una cápsula aneroide suficientemente grande.

Un barógrafo de primera clase debería tener una incertidumbre de 0,2 hPa aproximadamente después de efectuadas las correcciones, y no debería sufrir modificaciones durante uno o dos meses. La variación barométrica leída en el barógrafo debería estar habitualmente dentro de los mismos límites.

3.5.4 **Instrumentos con capacidad para el procesamiento de datos**

Es posible conectar un barómetro de lectura automática a un ordenador, generalmente un microprocesador, que puede programarse para facilitar muestras de datos apropiadas. A su vez, esos datos pueden representarse gráficamente para obtener un registro similar al de un barógrafo. Existen modelos que imprimen sus propias escalas, con lo que se elimina una fuente de error.

3.5.5 **Lectura de los barógrafos**

La lectura del barógrafo debería efectuarse sin tocar el instrumento. La marcación de la hora, así como toda inspección del instrumento que obligue a levantar la cubierta, etc., debería hacerse siempre después de terminada la lectura.

3.5.5.1 **Exactitud de las lecturas**

La lectura de la banda debería redondearse a la décima de hectopascal más cercana. La variación barométrica obtenida debería estar dentro de los mismos límites de resolución.

3.5.5.2 **Correcciones que se aplicarán a las lecturas del barógrafo**

Debería verificarse la compensación de temperatura de cada instrumento antes de utilizarlo y también ajustarse el factor de escala mediante pruebas en cámara de vacío. Cuando el barógrafo se emplea únicamente para detectar la variación barométrica, no suelen aplicarse correcciones a las lecturas. En tales casos no es importante ajustar con exactitud la posición de la plumilla. Cuando se requieran valores absolutos de presión, debería compararse el registro con las lecturas corregidas de un barómetro de mercurio o de un buen barómetro anerode al menos una vez cada 24 horas, y los valores deseados se obtendrán por interpolación.

3.6 **BARÓMETROS DE TUBO DE BOURDON**

Los barómetros de tubo de Bourdon constan generalmente de un elemento sensor —que, como en el caso de la cápsula anerode, cambia de forma por influjo de los cambios de presión (transductores de presión)— y de un transductor que convierte las variaciones de forma que sean directamente utilizables por el observador. El visualizador puede estar situado lejos del sensor. En los laboratorios de calibración se utilizan como patrones de trabajo o patrones de referencia, instrumentos digitales, precisos y estables, provistos de tubos de Bourdon de cuarzo.

3.7 **VARIACIÓN BAROMÉTRICA**

Las estaciones que efectúan observaciones al menos cada 3 horas utilizan dos métodos:

- a) la lectura de la variación en el barógrafo; o
- b) el cálculo de la variación a partir de las correspondientes lecturas del barómetro, corregidas al nivel de la estación. Si se ha de escoger entre un barómetro de mercurio común y un barógrafo de escala abierta de primera clase, debería optarse por este último, por las razones que se exponen a continuación.

En el supuesto de que el instrumento funcione perfectamente, el error de una sola lectura barométrica es principalmente aleatorio. Por ello, cuando se restan dos lecturas separadas para determinar la magnitud de un cambio los errores pueden ser acumulativos. Los errores del barógrafo son, en parte, de índole sistemática, por lo que en el período relativamente corto de 3 horas es probable que tengan el mismo signo y, en consecuencia, disminuyan por sustracción.

Otra razón en favor del uso del barógrafo es la ventaja de no tener que corregir las lecturas barométricas al nivel de la estación. En todo caso, se utilizará el barógrafo para determinar la característica de la variación barométrica.

Los barómetros con visualización digital resultan también muy adecuados para determinar la magnitud y las características de un cambio de presión.

3.8 **REQUISITOS GENERALES DE EXPOSICIÓN**

Es importante escoger cuidadosamente el lugar de emplazamiento del barómetro en la estación de observación. Los principales requisitos con respecto al lugar de exposición son: temperatura uniforme, buena iluminación, ausencia de corrientes de aire, montaje sólido y vertical, y protección contra manejos bruscos. Por consiguiente, el instrumento debería estar colgado o instalado en un recinto donde la temperatura sea constante o cambie lentamente, y en el que no se produzcan gradientes de temperatura. El instrumento debería estar protegido en todo momento de los rayos directos del sol, y tendría que estar situado lejos de cualquier aparato de calefacción y de las corrientes de aire.

3.8.1 Efecto del viento

Cabe señalar que los efectos del viento afectan a todos los tipos de barómetro. En Liu y Darkow (1989) se ofrece más información al respecto.

Cuando prevalezcan vientos racheados, el barómetro no indicará la presión estática verdadera, ya que su lectura fluctuará con la velocidad y la dirección del viento, y la magnitud y el signo de esas fluctuaciones dependerán también de la naturaleza de las puertas y las ventanas del recinto y de su orientación con respecto a la dirección del viento. En el mar, este error estará siempre presente, debido a los movimientos del barco. Un problema semejante se planteará si se instala el barómetro en una habitación con aire acondicionado.

Con frecuencia, el viento causa variaciones dinámicas de la presión en el recinto donde se encuentra el instrumento. Estas fluctuaciones vienen a añadirse a la presión estática y, con viento fuerte y racheado, pueden alcanzar una magnitud de 2 o 3 hPa. Suele resultar poco práctico corregirlas porque el efecto de "bombeo" que ejercen sobre la superficie del mercurio depende tanto de la dirección y fuerza del viento como de las condiciones locales en el lugar de emplazamiento del barómetro. Por esa razón, el "valor medio" no representa solo la presión estática verdadera. Al comparar dos barómetros instalados en dos edificios distintos, debería tenerse en cuenta la posibilidad de que el efecto del viento arroje lecturas diferentes.

Este efecto puede atenuarse en gran medida utilizando una cabeza estática entre la atmósfera exterior y la toma de entrada del sensor. Los principios detallados de funcionamiento pueden consultarse en diversas publicaciones (Miksad, 1976; United States Weather Bureau, 1963). La cubeta del barómetro de mercurio será hermética, a excepción de un conector de contacto con una cabeza especial expuesta a la atmósfera, diseñada de tal modo que asegure que la presión en su interior es la presión estática verdadera. Por lo general, los barómetros aneroides y electrónicos tienen conexiones sencillas para permitir el uso de una cabeza estática, que debería localizarse en un entorno abierto al que no afecte la proximidad de ningún edificio. El diseño de dicha cabeza requiere gran cuidado. Las cabezas de presión estática están comercialmente disponibles, pero no hay publicaciones acerca de intercomparaciones que demuestren su funcionamiento.

3.8.2 Efectos del aire acondicionado

El aire acondicionado puede generar una diferencia de presión considerable entre el interior y el exterior de una habitación. Por ello, si un barómetro va a instalarse en un recinto con aire acondicionado se recomienda incorporarle una cabeza estática para que se acople al aire exterior del edificio.

3.9 EXPOSICIÓN DEL BARÓMETRO

3.9.1 Exposición de los barómetros de mercurio

A los requisitos generales de exposición reseñados en las secciones anteriores para los barómetros de mercurio se suman otros requisitos adicionales, que se mencionan a continuación. Siempre es preferible colgar el barómetro en una pared interior. Para conseguir mediciones muy exactas, el mejor lugar es un sótano, sin ventanas ni calefacción, con un pequeño ventilador eléctrico que impida toda estratificación de la temperatura.

Se recomienda utilizar luz artificial en todas las observaciones para conseguir condiciones de iluminación uniformes en las lecturas. Para ello, se podrá utilizar un dispositivo de iluminación que proporcione un fondo blanco y ligeramente luminoso para el menisco de mercurio y, si es necesario, para el índice. Si no se utiliza una fuente de luz, habrá que asegurarse de que el menisco y el índice tengan un fondo luminoso, que se puede conseguir utilizando vidrio

esmerilado, celuloide blanco o una hoja de papel blanco. Habrá que suministrar también luz artificial para leer las escalas del barómetro y del termómetro unido. No obstante, se tomarán las precauciones necesarias para evitar que la luz artificial caliente el barómetro durante las lecturas.

El instrumento debería instalarse en un lugar desprovisto de vibraciones, preferentemente una pared sólida, y con la columna de mercurio en posición vertical. Los errores causados por la desviación respecto de la vertical son más importantes en el caso de los barómetros asimétricos, por lo que tales barómetros deberían instalarse con el eje mayor en posición vertical, de manera que el reglaje verdadero de la superficie del mercurio con respecto al índice no presente errores ni siquiera cuando los instrumentos se desvían de la vertical.

Para proteger el instrumento contra el manejo brusco, el polvo y las corrientes de aire, se recomienda colocarlo en una caja que tenga una puerta con bisagra y que disponga de ventilación suficiente a fin de evitar la estratificación del aire en su interior.

El transporte de un barómetro de mercurio debería llevarse a cabo con mucho cuidado. El método más seguro es transportarlo en posición invertida dentro de un estuche de madera provisto de una eslinga. Si ningún responsable puede encargarse de trasladar personalmente el barómetro, el transporte deberá efectuarse en un embalaje acolchado, con la cubeta en la parte más alta. Para dar la vuelta al instrumento debería procederse siempre muy lentamente, evitando cualquier movimiento violento. Antes de invertir ciertos tipos de barómetro deberán tomarse precauciones especiales.

3.9.2 **Exposición de los barómetros electrónicos**

El barómetro electrónico requiere una atmósfera limpia y seca, exenta de sustancias corrosivas. Este tipo de barómetro también debería mantenerse a una temperatura constante (véase la sección 3.3.5.2). El instrumento debería montarse de forma que se eviten las vibraciones y choques mecánicos, y además, sería preciso instalarlo lejos de fuentes electromagnéticas; cuando esto último no sea posible, habría que proteger los cables y el armazón.

Los barómetros con dispositivo de lectura digital tendrían que recibir una iluminación general adecuada, pero no deberían colocarse frente a una ventana u otra fuente de luz intensa.

3.9.3 **Exposición de los barómetros aneroides**

Los requisitos de exposición del barómetro aneroides son similares a los del barómetro de mercurio (véase la sección 3.9.1), pues cabe la posibilidad de que el instrumento no esté correctamente compensado de los efectos de la temperatura. El lugar de instalación seleccionado debería tener preferiblemente una temperatura razonablemente uniforme durante todo el día. En consecuencia, será un lugar que ofrezca protección contra los rayos del sol directos y contra otras fuentes de calor o frío que puedan causar cambios bruscos y considerables de la temperatura.

En las estaciones terrestres es conveniente instalar el barómetro aneroides cerca de uno de mercurio para efectuar comparaciones y normalizaciones (véase la sección 3.10).

3.9.4 **Exposición de los barógrafos**

El barógrafo debería instalarse en un lugar que ofrezca protección contra los cambios bruscos de temperatura, las vibraciones y el polvo. No debería estar expuesto a la luz solar directa ni hallarse en un lugar donde pueda ser manipulado por personas no autorizadas. La instalación sobre una almohadilla de gomaespuma permitirá disminuir los efectos de la vibración. El lugar elegido debería estar limpio y seco, y el aire relativamente exento de sustancias que pudieran causar corrosión, suciedad en el mecanismo, etc.

Con el fin de minimizar el efecto de paralaje, es importante que el frente del instrumento se encuentre a una altura conveniente para realizar la lectura al nivel del ojo en condiciones normales de funcionamiento. La exposición debería permitir que el barógrafo esté uniformemente iluminado y, en caso necesario, se utilizará luz artificial.

Cuando haya que enviarlo por avión, o transportarlo por cualquier otro medio a gran altitud, debería desconectarse el brazo de la plumilla y tomarse las precauciones necesarias para que el mecanismo soporte la sobrecarga causada al rebasarse el intervalo normal de medición del instrumento.

3.10 **COMPARACIÓN, CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO**

3.10.1 **Requisitos generales para la comparación entre barómetros**

A la vista de la importancia que revisten las observaciones exactas de la presión, especialmente con fines aeronáuticos y sinópticos, y teniendo en cuenta los diversos errores posibles a los que están expuestos los barómetros, un inspector verificará regularmente todos los barómetros de la estación. En las secciones siguientes se ofrecen algunas orientaciones sobre el equipo que deberá utilizarse en las inspecciones, la frecuencia con que deberían efectuarse y otros temas relacionados. Cuando se empleen barómetros aneroides de precisión como barómetros de estación, deberían verificarse frecuentemente (como mínimo una vez por semana) por comparación con un barómetro de mercurio o digital, y las comprobaciones deberían consignarse en un impreso adecuado o en un libro de registro especial.

Puede prescindirse de la comparación con un barómetro de mercurio si se efectúan comparaciones diarias con un segundo barómetro aneroide instalado en la estación y con el análisis de las presiones realizadas en los alrededores de la estación. A efectos de confirmación, deberían efectuarse verificaciones semestrales mediante un patrón itinerante.

Para referirse a las diversas categorías de barómetros de un Servicio Meteorológico Nacional podrán utilizarse los símbolos siguientes:

- A: barómetro patrón primario o secundario, con capacidad para realizar determinaciones de la presión independientes con una incertidumbre de 0,05 hPa o menor;
- B: barómetro patrón de trabajo, de diseño adecuado para llevar a cabo comparaciones de presión periódicas y con errores conocidos, determinados por comparación con un instrumento patrón primario o secundario;
- C: barómetro patrón de referencia, utilizado para comparaciones con barómetros patrón itinerantes y para comparaciones con barómetros de estación realizadas durante la inspección sobre el terreno de las estaciones de un Servicio Meteorológico Nacional;
- S: barómetro (de mercurio, aneroide o electrónico) emplazado en una estación meteorológica ordinaria;
- P: barómetro de mercurio, de buena calidad y exactitud, que puede trasladarse de una estación a otra sin perder su calibración;
- N: barómetro aneroide de precisión, portátil y de primera calidad;
- Q: barómetro digital de precisión, portátil y de primera calidad, para ser utilizado como patrón itinerante ("Q" es la primera letra del término inglés "quality"; en español, "calidad");
- M: microbarógrafo portátil de buena calidad y exactitud.

Con objeto de que todos los Servicios Meteorológicos Nacionales establezcan programas similares de corrección de barómetros, conviene que se sigan prácticas uniformes en lo que

respecta a la calidad del equipo que se utilizará, la frecuencia de las comparaciones, los procedimientos que se aplicarán, los cambios permisibles en la corrección de índice, y los criterios con respecto a las medidas correctivas.

3.10.2 **Equipo utilizado en las comparaciones entre barómetros**

3.10.2.1 **Barómetro patrón primario (categoría A)**

Hay opiniones diferentes sobre cuál es el mejor tipo de barómetro patrón primario (OMM, 2010c). En los párrafos siguientes se describen dos tipos.

Un posible patrón primario para la presión atmosférica consiste en una balanza de precisión de pesos muertos, que genera una presión calibrada en función de las masas de precisión utilizadas y del campo de gravedad local. Este tipo de barómetro es relativamente sencillo, y no está expuesto al problema de deriva excesiva que plantean los barómetros de mercurio en un ambiente contaminado.

Otro posible patrón primario puede ser un barómetro de mercurio de alta calidad, especialmente diseñado a tal efecto. El patrón primario debe poseer un alto vacío, contener mercurio muy puro, de densidad bien conocida y mantenido a una temperatura constante, y estar emplazado en un entorno protegido de la contaminación. Necesita también una escala de medida calibrada y un dispositivo de lectura óptico. Estos tipos de barómetro miden la presión absoluta con gran exactitud, mientras que las balanzas de pesos muertos son instrumentos que miden la presión manométrica.

Habida cuenta del costo de esos patrones primarios y de las restricciones para su uso y mantenimiento, estos barómetros se utilizan más frecuentemente en los laboratorios de calibración de alto nivel.

3.10.2.2 **Barómetro patrón de trabajo (categoría B)**

El barómetro patrón de trabajo y el de referencia, así como el itinerante utilizado para las comparaciones con los barómetros de las estaciones, deberían mantener una gran estabilidad durante períodos largos. Estos barómetros pueden ser de mercurio o electrónicos. Los de mercurio deberían tener un tubo con un diámetro interior de al menos 12 mm. También es conveniente que estos instrumentos permitan efectuar comprobaciones del vacío. Todos los instrumentos tendrían que corregirse completa y cuidadosamente con respecto a todos los errores conocidos, que deberían determinarse en dos o más comparaciones recientes con barómetros de categoría superior.

3.10.2.3 **Barómetro patrón itinerante (categoría C)**

Un barómetro patrón itinerante fiable debe mantener durante el transporte su corrección dentro de un margen de 0,1 hPa. Antes y después de cada gira, debería calibrarse con respecto al patrón de trabajo o de referencia. Una vez efectuada esta operación, no debería abrirse ni ajustarse en modo alguno en tanto no se efectúe la comparación final en la estación de origen de la gira. Para que esté debidamente protegido, el transporte se efectuará manteniéndolo en un estuche acolchado de gran calidad.

Teniendo en cuenta las restricciones de transporte del mercurio y el desarrollo en curso de barómetros digitales, los Servicios Meteorológicos Nacionales pueden utilizar barómetros digitales de alta precisión apropiados como barómetros patrones itinerantes. En ese caso, los Servicios Meteorológicos Nacionales deberían controlar periódicamente la deriva de tales instrumentos, realizando de manera regular comparaciones con los patrones de trabajo o de referencia.

En caso de que se utilice un patrón itinerante de mercurio antes de iniciar la gira, este debería examinarse cuidadosamente a fin de garantizar que el mercurio de la cubeta y del tubo estén limpios, que no haya burbujas en el tubo, y que el vacío de la cámara barométrica sea satisfactorio. Durante el manejo, embalaje y transporte de los patrones itinerantes deberían tomarse todas las precauciones necesarias para reducir al mínimo las posibles causas de variación, por leve que sea, de su corrección de índice. Deberían evitarse los movimientos rápidos y bruscos, que podrían causar el ascenso de burbujas de aire de la cubeta por el tubo del barómetro. Los patrones itinerantes de mercurio deberían transportarse en una caja de cuero o metal, debidamente acolchada, manteniendo siempre el extremo de la cubeta más alto que el tubo.

3.10.2.4 **Especificaciones de los barómetros de mercurio portátiles (categoría P)**

Cuando se utilice un barómetro de mercurio como instrumento de categoría P, este deberá estar diseñado de forma que permita comprobar el vacío, o que permita crear un vacío suficiente en la parte alta del tubo mediante una bomba de vacío. Es fundamental que exista una válvula de comprobación que cierre el tubo herméticamente. Debería presentar también una estabilidad elevada durante períodos largos, y contar con un diámetro interior del tubo de 12 mm como mínimo. Además, será conveniente disponer de un medio para determinar si la cantidad de mercurio en la cubeta fija ha permanecido constante desde su llenado original.

Como patrón itinerante se puede utilizar también un barómetro de Fortin, bien construido, con un tubo de diámetro interior no inferior a 9 mm o, preferiblemente, de 12 mm. En lo que concierne a la repetibilidad, se considera necesario un grado de exactitud de alrededor de 0,1 hPa. Los barómetros de categoría P deberían calibrarse para un amplio intervalo de presión y de temperatura, que abarque todos los valores posibles que pudieran presentarse.

3.10.2.5 **Especificaciones de los barómetros electrónicos portátiles (categoría Q)**

Los barómetros electrónicos portátiles han alcanzado ya un grado de desarrollo y fiabilidad que permite utilizarlos como barómetros de categoría Q. El instrumento deberá tener un historial de fiabilidad, con correcciones asociadas a la deriva pequeñas, determinadas mediante varias comparaciones efectuadas durante un año o más con un barómetro patrón, y por encima del intervalo de presiones máximas a las que se prevé que funcionará el aparato.

Se prefiere el barómetro electrónico con varios transductores de presión controlados por un microprocesador independiente. Deberá verificarse la exactitud del mecanismo de compensación de temperatura. Las lecturas de los transductores de presión deben efectuarse sin necesidad de tocarlos, y el barómetro tiene que ser lo suficientemente robusto como para soportar los choques a los que pudiera estar expuesto durante su transporte.

3.10.3 **Comparación de barómetros**

3.10.3.1 **Comparación internacional de barómetros**

Las comparaciones internacionales de barómetros tienen una gran importancia. De 1989 a 1991 se llevó a cabo en De Bilt (Países Bajos) la Intercomparación de barómetros digitales automáticos de la OMM. Solo mediante esas comparaciones es posible asegurar la uniformidad de los patrones nacionales de los instrumentos de medición de la presión atmosférica, y evitar con ello cualquier discrepancia en los datos de presión entre países diferentes. En la sección 3.10.4 se describe el procedimiento recomendado para realizar esas comparaciones.

El programa de comparaciones consiste en:

- a) Comparar el patrón de trabajo nacional B con el patrón primario o secundario A, al menos una vez cada dos años. Si los barómetros A y B están situados en el mismo centro, no se necesitan patrones itinerantes.

- b) Comparar el patrón de referencia C con el patrón de trabajo nacional B mediante patrones itinerantes, al menos una vez cada dos años.
- c) Comparar el barómetro de estación S con el patrón de referencia C mediante patrones itinerantes, al menos una vez por año, o por comparación con el patrón de trabajo B cada uno o dos años, según las características conocidas de los barómetros que se utilicen. El que la comparación se realice en la estación o en un servicio central de calibración dependerá de las normativas vigentes. En este último caso no se requieren patrones itinerantes.

Se entenderá que el error de cada barómetro al final de cualquier eslabón de la cadena de comparaciones se determina con respecto al barómetro patrón primario o secundario A, de manera que los resultados de las lecturas barométricas corregidas sean absolutos en cada etapa.

3.10.3.2 ***Inspección de los barómetros de estación***

Para inspeccionar los barómetros de estación es apropiado el modelo de Fortin, con un tubo de diámetro interior de 9 mm; consúltense, sin embargo, las restricciones sobre el transporte de instrumentos de mercurio indicadas en la sección 3.2.7.3. También pueden utilizarse como patrones itinerantes los barómetros electrónicos, siempre que tengan la estabilidad y exactitud necesarias.

3.10.3.3 ***Procedimientos de comparación de los barómetros de mercurio***

En términos generales, se seguirán las instrucciones indicadas en las secciones anteriores. Deberían adoptarse con gran esmero todas las precauciones normales necesarias para el emplazamiento y las lecturas de los barómetros en la estación. Diversos estudios ponen de relieve que, si se toman las precauciones debidas, en una comparación de barómetros pueden alcanzarse normalmente lecturas con una desviación respecto al promedio no superior a 0,05 hPa.

Las lecturas comparativas de los barómetros deberían consignarse en formularios adecuados. El instrumento tendría que ir acompañado de un registro permanente de todas las comprobaciones, que incluiría información sobre la fecha de la comparación, la presión y la temperatura a la que se efectuó, y las correcciones obtenidas.

Los informes de las comparaciones de barómetros deberían enviarse a los Servicios Meteorológicos Nacionales, donde se evaluarán los errores, se calcularán y publicarán las correcciones, y se determinarán las medidas correctoras necesarias. Sería preciso mantener registros continuos de los datos de comparación de cada barómetro de estación, con objeto de estudiar su respuesta durante un período de años y de detectar sus defectos. Los registros tabulares y/o gráficos constituyen herramientas visuales útiles para un programa de control de la calidad de los barómetros.

3.10.3.4 ***Verificación de los barómetros electrónicos***

Teniendo en cuenta el estado actual de desarrollo de los barómetros electrónicos, es importante verificar su exactitud a intervalos de un año aproximadamente. Según el procedimiento habitual, el barómetro electrónico se calibra en un centro de calibración inmediatamente antes de enviarlo a la estación meteorológica de observación. En esta última deberían efectuarse varias lecturas comparativas de la presión entre el barómetro electrónico y el patrón itinerante en distintas presiones (bien sea durante un período de tiempo adecuado o con un generador de presión). Tales lecturas deberían realizarse con todos los barómetros colocados a la misma altura, cuando la velocidad del viento sea inferior a 12 m s^{-1} y la presión sea estable o experimente variaciones inferiores a 1 hPa h^{-1} . Un barómetro electrónico cuya diferencia media con respecto al patrón itinerante exceda de 0,25 hPa debería considerarse no apto para el servicio y tendría que ser devuelto al centro de calibración a fin de ser calibrado de nuevo.

Si fuera posible, sería aconsejable instalar dos barómetros electrónicos independientes en una estación meteorológica de observación, preferentemente uno de ellos con una deriva histórica baja. Este último será identificado por el personal del servicio de calibración atendiendo a su historial y se denominará barómetro de deriva baja. A la llegada de cada nuevo barómetro a la estación, se realizará la serie de lecturas comparativas descritas anteriormente y se establecerá la diferencia media entre el barómetro de deriva baja y el nuevo. Finalizada esta operación, deberían efectuarse lecturas diarias con ambos barómetros para luego calcular las correspondientes diferencias entre lecturas y hallar la suma acumulada de 25 diferencias. Si el barómetro de deriva baja y el nuevo presentan derivas distintas, la suma acumulada de esas 25 diferencias variará. Cuando una estación tenga un barómetro de mercurio y otro electrónico, el barómetro de deriva baja será normalmente el de mercurio. Con todo, los valores de deriva baja del barómetro de mercurio deberían verificarse mediante pruebas de calibración regulares.

Estas pruebas no constituyen una inspección o una nueva calibración del barómetro electrónico. Cada Servicio Meteorológico Nacional debería establecer procedimientos de inspección y calibración minuciosos para sus instrumentos electrónicos, utilizando como guía el método descrito anteriormente.

3.10.4 **Procedimiento general recomendado para la comparación de barómetros situados en emplazamientos diferentes**

La comparación de los barómetros es esencial, y debería realizarse de los modos descritos a continuación.

- a) Si se trata de comparar el barómetro "1" con el barómetro "2", una persona cualificada debería transportar uno o más patrones itinerantes, preferentemente de categoría P o Q, desde el barómetro "1" al "2", y retornar al "1", cerrando así el circuito. Este procedimiento es aplicable tanto entre países como a nivel nacional en cada uno de ellos. De ordinario, el barómetro "1" se encuentra en el laboratorio central de una organización nacional de normalización, o en el laboratorio de un Servicio Meteorológico Nacional. El barómetro "2" está instalado en otro lugar. El transporte de instrumentos patrón de categorías N y M es facultativo, y podrá prescindirse de los de categoría M si ambos emplazamientos cuentan con microbarógrafos de buena calidad.
- b) A efectos de normalización, los patrones itinerantes deberían estar colocados cerca del barómetro objeto de la comparación, y todos los instrumentos estar igualmente expuestos durante 24 horas como mínimo antes de que comiencen las lecturas comparativas oficiales. Una corriente de aire generada por un ventilador eléctrico situado sobre los instrumentos ayudará a igualar sus temperaturas. La temperatura del recinto debería mantenerse en el nivel más uniforme posible.

Nota: Debería desconectarse el ventilador antes de iniciar la comparación.

- c) Cuando el patrón de categoría M indique que la presión fluctúa rápidamente, no deberían tomarse lecturas comparativas. Debería darse preferencia en las comparaciones a los períodos de calma barométrica, es decir, cuando la presión sea estable o cambie lentamente.
- d) Las lecturas comparativas deberían realizarse a intervalos uniformes de no menos de 15 minutos.
- e) De la experiencia se desprende que se necesitan al menos cinco lecturas comparativas para los barómetros de categoría S de las estaciones ordinarias. Para los barómetros de las categorías A, B y C, harán falta al menos 10 lecturas comparativas con fines de normalización.
- f) Cuando las condiciones meteorológicas lo permitan, las lecturas comparativas de estos últimos casos deberían efectuarse a presiones distintas, tanto altas como bajas.

- g) En el registro debería consignarse lo siguiente: las observaciones del termómetro unido; las lecturas de los patrones itinerantes y las de los barómetros objeto de comparación; la velocidad, dirección y régimen racheado (rafagosidad) del viento; las correcciones por gravedad, por temperatura y por error instrumental; la elevación real por encima del nivel del mar del punto cero de los barómetros; y la latitud, la longitud, el nombre del lugar, la fecha y la hora de las observaciones.
- h) Cuando se utilicen barómetros de categoría N, sus lecturas deberían realizarse con dos o más barómetros aneroides de precisión y corregirse respecto a una referencia común si la comparación con instrumentos de categoría A o B evidencia diferencias en la calibración. Las lecturas corregidas de los barómetros aneroides deben concordar con los márgenes de tolerancia estipulados para el instrumento; de no ser así, la comparación se considerará inválida.
- i) Cuando en la comparación se utilicen patrones itinerantes, el barómetro "1" debe ser el barómetro patrón de clase más alta disponible en el punto de partida. El barómetro "1" debería ser de categoría A, B o B_r (véase la sección 3.10.5.1), siendo la categoría C la calidad más baja aceptable. El barómetro "1" requiere llevar a cabo dos series de comparaciones con los patrones itinerantes, en los momentos siguientes:
- i) antes de transportar a mano los patrones itinerantes desde el emplazamiento del barómetro "1" hasta el del barómetro "2";
 - ii) después de que los patrones itinerantes vuelvan a su punto de partida, tras su desplazamiento desde y hasta el emplazamiento del barómetro "2". Deberían comprobarse los resultados de las comparaciones efectuadas "antes" y "después". Si la concordancia con el barómetro "1" permanece dentro de los márgenes de tolerancia satisfactorios de los instrumentos, cabe suponer que las comparaciones entre los patrones itinerantes y el barómetro "2" permanecen también dentro de las tolerancias establecidas, siempre que se hayan adoptado las debidas precauciones durante todas las etapas del proceso de comparación. No obstante, si hay un desacuerdo significativo, o se tiene noticia de algún contratiempo con consecuencias perjudiciales para los instrumentos, o si, por cualquier motivo se pone en duda la validez de los datos de la comparación, se considerará que el ejercicio de comparación no tiene validez, y deberá repetirse todo el procedimiento.
- j) En la medida en que sea viable, todas las discrepancias deberían estar finalmente expresadas con respecto a una lectura primaria o secundaria de un barómetro de categoría A. Con ello, se establecerá una base común para todas las comparaciones. En el informe sobre las comparaciones debería indicarse el patrón utilizado en cada caso.
- Nota: Cuando se opte por un programa en el que haya que suprimir los errores barométricos residuales, se dispondrá de un sistema homogéneo de datos barométricos de observación conformes a un solo patrón, que permitirá eliminar los errores de los gradientes horizontales de presión causados por fuentes instrumentales.
- k) Será necesario comparar los instrumentos, antes y después de volver a instalar los barómetros en una estación o en un laboratorio, o de la limpieza del mercurio, a fin de detectar rápidamente la aparición de defectos.

3.10.5 Comparación regional de barómetros

3.10.5.1 Nomenclatura y símbolos

Los símbolos descriptivos de las distintas categorías de barómetros son los siguientes:

- A_r: barómetro de categoría A seleccionado por acuerdo regional como patrón de referencia de los barómetros de la Región;

B_r : barómetro de categoría B que los Servicios Meteorológicos Nacionales de la Región convienen en utilizar como barómetro patrón de la Región, en caso de que esta no disponga de un barómetro de categoría A.

El anexo 3.B contiene la lista de barómetros patrón a nivel regional.

3.10.5.2 **Sistema de comparación interregional**

Cuando se planifica una comparación interregional, deben tenerse en cuenta las medidas siguientes:

- a) En cada Región, los países Miembros designarán un barómetro patrón primario o secundario A que opere como A_r de la Región. Si en esta no se dispone de un barómetro primario o secundario, se designará conjuntamente un barómetro de categoría B como patrón regional para esa Región, identificado mediante el símbolo B_r . Los costos relativos determinarán si para una Región puede considerarse ventajoso designar más de un barómetro patrón.
- b) Una persona calificada se encargará de llevar consigo los patrones itinerantes desde una estación central equipada con un barómetro de categoría A_r hasta una Región próxima provista como mínimo de un barómetro de categoría B o B_r . Se efectuará entonces una comparación de los barómetros. Cuando la comparación se efectúe en condiciones ambientales, debería realizarse conforme al método descrito en la sección 3.10.3. De lo contrario, con un generador de presión, podrá hacerse la comparación de varios puntos de calibración de presión abarcando todo el intervalo y en varios ciclos. Ello permite definir la exactitud de los patrones en diferentes niveles de presión y determinar algunas características metrológicas, como la histéresis, la repetibilidad y la reproducibilidad. A efectos de verificación e intercomparación, a veces resulta conveniente repetir el proceso, y comparar el barómetro B_r con un barómetro A_r de otra Región.
- c) Deberían enviarse copias de los registros de la comparación a cada una de las estaciones centrales provistas de un barómetro de categoría A, y a la estación donde se encuentre el barómetro B o B_r que haya sido comparado. Asimismo, deberían enviarse resúmenes de los resultados de la comparación a todos los Servicios Meteorológicos Nacionales de la Región en que esté situado el barómetro B o B_r .

3.10.5.3 **Sistema de comparación internacional dentro de una Región**

Cuando se planifica una comparación internacional, deben tenerse en cuenta las medidas siguientes:

- a) Cada Servicio Meteorológico Nacional comparará sus barómetros de categoría B con el barómetro de categoría A de la Región, si se dispone de él, mediante el sistema descrito en la sección 3.10.4. Cuando sea posible, debería darse preferencia al barómetro de categoría A de la Región como instrumento patrón de toda la zona.
- b) Cuando en una Región no se disponga de un barómetro de categoría A, se compararán los barómetros de categoría B de los respectivos Servicios Meteorológicos Nacionales de la Región con el barómetro de categoría B_r de la Región, conforme a lo descrito en la sección 3.10.4.
- c) Cuando en la ejecución del programa de comparación de barómetros B y B_r participe una persona calificada, convendrá que efectúe otras comparaciones con barómetros de las categorías B y C durante su viaje de ida y vuelta a la estación en que esté emplazado el barómetro B_r de la Región.
- d) Se prepararán copias de los registros y resúmenes de las comparaciones, que se enviarán a los organismos interesados conforme a lo indicado en el apartado c) de la sección 3.10.5.2.

3.11 AJUSTE DE LAS LECTURAS DEL BARÓMETRO A OTROS NIVELES

Para que las lecturas de barómetro efectuadas en estaciones de diferente altitud puedan ser comparadas, es preciso reducirlas al mismo nivel. Para ello se utilizan diversos métodos, aunque hasta el momento la OMM no ha recomendado ninguno en particular, salvo en el caso de las estaciones situadas a un nivel bajo.

El método recomendado ha sido descrito en OMM (1954, 1964 y 1968). En OMM (1966) se encontrará una serie completa de fórmulas que pueden utilizarse para cálculos relativos a la presión.

3.11.1 Niveles normalizados

El valor observado de la presión atmosférica debería reducirse al nivel medio del mar (véase el capítulo 1 de la parte I) en todas las estaciones en que ello sea posible con un grado de exactitud razonable. Donde esto no pueda llevarse a cabo, la estación debería comunicar, mediante acuerdo de ámbito regional, la altura geopotencial de un "nivel de presión constante" convenido, o la presión reducida a un nivel de referencia acordado para la estación. El nivel seleccionado para cada estación debería comunicarse a la Secretaría de la OMM para su difusión.

Fórmula de reducción para la presión al nivel del mar para estaciones por debajo de 750 m (de OMM, 1964, pág. 22, ecuación 2):

$$\log_{10} \frac{p_0}{p_s} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_{mv}} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_s + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_s \cdot C_h} \quad (3.1)$$

donde p_0 es la presión reducida al nivel del mar en hectopascales; p_s es la presión de la estación en hectopascales; K_p es la constante 0,014 827 5 K/mgp; H_p es la elevación de la estación en metros geopotenciales; T_{mv} es la temperatura virtual media de la columna de aire ficticia por debajo del nivel de la estación en kelvines, ($T_{mv} = T_s + (a \cdot H_p)/2 + e_s \cdot C_h$); T_s es la temperatura de la estación en kelvines; $T_s = 273,15 + t$, donde t es la temperatura de la estación en grados Celsius; a es el valor supuesto del gradiente vertical en la columna de aire ficticia comprendida entre el nivel del mar y el nivel de elevación de la estación y es igual a 0,006 5 K/mgp; e_s es la presión de vapor en la estación en hectopascales; C_h es el coeficiente 0,12 K/hPa.

Esta misma fórmula se utiliza a menudo en la forma exponencial:

$$p_0 = p_s \cdot \exp \left(\frac{\frac{g_n \cdot H_p}{R}}{T_s + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_s \cdot C_h} \right) \quad (3.2)$$

donde g_n es la gravedad normal tipo, que toma el valor 9,806 65 m s⁻² y R es la constante de los gases para el aire seco, que es igual a 287,05 J kg⁻¹ K⁻¹.

3.11.2 Estaciones de nivel bajo

En las estaciones de nivel bajo (es decir, las que se encuentran a una altura de menos de 50 m sobre el nivel medio del mar) las lecturas de presión deberían reducirse al nivel medio del mar añadiendo, al valor de la presión obtenido en la estación, una constante de reducción C con arreglo a la expresión siguiente:

$$C = p \cdot H_p / (29,27 T_v) \quad (3.3)$$

donde p es la presión observada en la estación, expresada en hectopascales; H_p es la elevación de la estación, en metros; y T_v es el valor normal anual medio de la temperatura virtual en la estación, en kelvines.

Nota: La temperatura virtual del aire húmedo es la temperatura a la que el aire seco, sometido a la misma presión, tendría la misma densidad que el aire húmedo. En OMM (1966) se indican los incrementos de temperatura virtual del aire saturado a distintas presiones y temperaturas.

Este procedimiento debería emplearse únicamente en estaciones cuya elevación sea tan baja que, si se sustituye en la ecuación anterior T_v por los valores extremos absolutos de la temperatura virtual, la desviación del resultado generada por las demás aproximaciones de la ecuación (uso de la altura en lugar de la altura geopotencial tipo, y valores de C pequeños en comparación con p) puede despreciarse en términos comparativos.

3.12 **TENDENCIA DE LA PRESIÓN Y CARACTERÍSTICA DE LA TENDENCIA DE LA PRESIÓN**

En las estaciones de observación sinóptica en superficie, la tendencia de la presión y la característica de la tendencia de la presión deberían obtenerse a partir de las observaciones de la presión realizadas durante las 3 horas anteriores a la hora de observación (a lo largo de las últimas 24 horas en las regiones tropicales). La característica de la tendencia de la presión suele describirse atendiendo a la forma de la curva registrada por un barógrafo durante el período de 3 horas previo a una observación (OMM, 2010*b*). Cuando las observaciones son horarias, la magnitud y la característica pueden basarse en solo cuatro observaciones, y ello es susceptible de dar lugar a interpretaciones inexactas. Por esta razón, se recomienda determinar la característica para una frecuencia de observación mayor, por ejemplo a intervalos de 10 minutos (OMM, 1985). Se han definido nueve tipos de característica de la tendencia de la presión (OMM, 2010*a*, pág. II-4-8).

ANEXO 3.A. CORRECCIÓN DE LAS LECTURAS DEL BARÓMETRO EN CONDICIONES NORMALES

Corrección del error de índice

Los errores residuales de la graduación de la escala de un barómetro deberían determinarse mediante comparación con un instrumento patrón. Pueden contener errores que se deban a la inexactitud en la posición o en la subdivisión de la escala, a la capilaridad o a un vacío imperfecto. Los certificados de comparación con el instrumento patrón deberían especificar las correcciones que habrá que aplicar para subsanar el error de índice en no menos de cuatro puntos de la escala, por ejemplo cada 50 hPa. En un buen barómetro, estas correcciones no deberían exceder de unas décimas de hectopascal.

Correcciones por gravedad

La lectura de un barómetro de mercurio a una presión y temperatura dadas depende del valor de la gravedad, que varía a su vez con la latitud y con la altitud. Los barómetros destinados a aplicaciones meteorológicas se calibran de modo que proporcionen lecturas de la presión verdadera en condiciones de gravedad normal, es decir, $9,806\ 65\ \text{m s}^{-2}$, y será necesario corregir toda lectura efectuada para cualquier otro valor de gravedad. Para reducir esas lecturas a la gravedad normal se recomienda el método siguiente. Sean B la lectura observada del barómetro de mercurio, B_t la lectura reducida a la temperatura normal pero no a la gravedad normal, después de corregidos los errores instrumentales, B_n la lectura del barómetro reducida a la gravedad normal y a la temperatura normal, después de corregidos los errores instrumentales, B_{ca} la media climatológica de B_t en la estación, $g_{\varphi H}$ la aceleración local de la gravedad (en metros por segundo al cuadrado) en una estación de latitud φ y elevación H por encima del nivel del mar, y g_n el valor normal de la aceleración de la gravedad: $9,806\ 65\ \text{m s}^{-2}$.

Las relaciones siguientes son apropiadas:

$$B_n = B_t \left(g_{\varphi H} / g_n \right) \quad (3.A.1)$$

o bien:

$$B_n = B_t + B_t \left[\left(g_{\varphi H} / g_n \right) - 1 \right] \quad (3.A.2)$$

Se puede utilizar la ecuación aproximada 3.A.3, siempre que su resultado no difiera en más de 0,1 hPa del resultado que se habría obtenido con la ecuación 3.A.2:

$$B_n = B_t + B_{ca} \left[\left(g_{\varphi H} / g_n \right) - 1 \right] \quad (3.A.3)$$

La aceleración local de la gravedad, $g_{\varphi H}$, debería determinarse mediante el procedimiento descrito en la sección siguiente. Debería considerarse que los valores así obtenidos forman parte de la Red internacional de normalización de la gravedad 1971 (International Gravity Standardization Net 1971, IGSN71).

Determinación de la aceleración local de la gravedad

Para determinar en una estación el valor local de la aceleración de la gravedad con un grado de precisión satisfactorio, debería utilizarse una de las dos técnicas descritas a continuación. La primera técnica consiste en utilizar un gravímetro (instrumento que mide la diferencia entre los valores de la aceleración de la gravedad en dos puntos), y la segunda se basa en las "anomalías de Bouguer". Debería darse preferencia al método del gravímetro. Si no fuera posible aplicar ninguno de esos dos métodos, podrá calcularse la aceleración local de la gravedad mediante un modelo simple de la Tierra.

Utilización de un gravímetro

Supongamos que g_1 representa el valor conocido de la aceleración local de la gravedad en cierto punto O , generalmente una estación base gravimétrica establecida por una organización geodésica, donde g_1 figura en la IGSN71, y supongamos también que g representa el valor desconocido de la aceleración local de la gravedad, expresada en el sistema gravitatorio meteorológico, en otro punto X , del que se desea obtener el valor g . Sea Δg la diferencia de aceleración de la gravedad entre los dos lugares, observada mediante un gravímetro. Es decir, el valor en el punto X menos el valor en el punto O en un sistema congruente. En tales condiciones, g vendrá dado por la ecuación 3.A.4:

$$g = g_1 + \Delta g \quad (3.A.4)$$

Utilización de las anomalías de Bouguer

Si no se dispone de un gravímetro, es posible utilizar las anomalías de Bouguer interpoladas (A_B) para obtener el valor de g en un punto dado. Es necesario disponer de un mapa de isohipsas de las anomalías, obtenido de una organización geodésica o de una red de estaciones gravimétricas distribuidas conforme a una densidad de al menos una estación por cada 10 000 km² (no más de 100 km de distancia entre estaciones) en las proximidades del punto.

Se pueden utilizar como referencia redes gravimétricas de densidad algo inferior, siempre y cuando la organización geodésica considere que ese método puede dar resultados más fiables que los obtenidos mediante un gravímetro.

La definición de la anomalía de Bouguer (A_B) se deduce de la ecuación 3.A.5:

$$g_s = (g_{\varphi,0})_s - C \cdot H + A_B \quad (3.A.5)$$

donde $(g_{\varphi,0})_s$ es el valor teórico de la aceleración de la gravedad a la latitud φ al nivel del mar, como se deduce de la fórmula efectivamente utilizada para calcular la anomalía de Bouguer. La fórmula expresa el valor en función de la latitud en algunos sistemas. H es la elevación de la estación (en metros) sobre el nivel del mar a la que se ha medido g_s , que es el valor observado de la aceleración de la gravedad (en metros por segundo al cuadrado); A_B es la anomalía de Bouguer (en metros por segundo al cuadrado); y C es el factor de corrección de elevación utilizado para calcularla (por ejemplo, cuando se utiliza un valor específico de 2,67 para la gravedad de la corteza terrestre, el factor es 0,000 001 968 m s⁻²).

Cuando se desea conocer el valor de g en una estación dada y dicho valor no ha sido medido, el valor de g_s debería calcularse mediante la ecuación 3.A.5, a condición de que el valor apropiado de A_B correspondiente al emplazamiento de la estación pueda ser interpolado a partir de los mapas de isohipsas mencionados anteriormente o de los datos que representan las anomalías de Bouguer facilitados por una red adecuada de estaciones gravimétricas.

Cálculo de la aceleración local de la gravedad

Si no fuera posible aplicar ninguno de los métodos precedentes, podrá obtenerse con menor exactitud el valor local mediante un modelo simple. Según el Sistema Geodésico de Referencia de 1980, el valor teórico $(g_{\varphi,0})$ de la aceleración de la gravedad al nivel medio del mar y a la latitud geográfica φ , se calcula mediante la ecuación 3.A.6:

$$g_{\varphi,0} = 9,806\ 20 \left(1 - 0,002\ 644\ 2 \cos 2\varphi + 0,000\ 005\ 8 \cos^2 2\varphi \right) \quad (3.A.6)$$

El valor local de la aceleración de la gravedad en un punto dado de la superficie del terreno en una estación terrestre se calcula mediante la ecuación 3.A.7:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000\ 003\ 086\ H + 0,000\ 001\ 118(H - H') \quad (3.A.7)$$

donde g es el valor local calculado de la aceleración de la gravedad, en metros por segundo al cuadrado, en un punto dado; $g_{\varphi,0}$ es el valor teórico de la aceleración de la gravedad en metros por segundo al cuadrado al nivel medio del mar y a la latitud geográfica φ , calculado con arreglo

a la ecuación 3.A.6 anterior; H es la elevación real del punto, en metros sobre el nivel medio del mar; y H' es el valor absoluto, en metros, de la diferencia entre la altura del punto y la altura media de la superficie real del terreno comprendida en un círculo de unos 150 km de radio centrado en el punto.

El valor local de la aceleración de la gravedad en un punto dado a la altura H sobre el nivel medio del mar sin exceder de 10 km, y cuando dicho punto esté situado sobre la superficie del agua del mar, se calcula mediante la ecuación 3.A.8:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000\,003\,086\,H - 0,000\,006\,88(D - D') \quad (3.A.8)$$

donde D es la profundidad del agua, en metros, por debajo del punto dado; y D' es la profundidad media del agua, en metros, dentro de un círculo de unos 150 km de radio en torno al punto.

En estaciones o puntos situados en la costa o en sus proximidades, el valor local de la aceleración de la gravedad debería calcularse, en la medida de lo posible, mediante las ecuaciones 3.A.7 y 3.A.8 en términos de promedio, ponderando el último término de la ecuación 3.A.7 a lo largo del área relativa de la superficie terrestre abarcada por el círculo y haciendo lo propio con el último término de la ecuación 3.A.8 a lo largo del área relativa del mar abarcada por el círculo. Posteriormente se combinan algebraicamente los valores así obtenidos para obtener una corrección que se aplicará al segundo miembro de ambas ecuaciones, según se muestra en la ecuación 3.A.9:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000\,003\,086\,H + 0,000\,001\,118\,\alpha \\ (H - H') - 0,000\,006\,88(1 - \alpha)(D - D') \quad (3.A.9)$$

donde α es la fracción de superficie terrestre del área especificada, y H' y D' designan las áreas reales de tierra y de agua, respectivamente.

Correcciones de temperatura

Es necesario corregir las lecturas del barómetro a los valores que se habrían obtenido si el mercurio y la escala hubieran estado a temperaturas normales. La temperatura normal de los barómetros de mercurio es 0 °C. Por lo que respecta a las escalas, algunos barómetros las tienen de forma que proporcionan lecturas exactas a esa misma temperatura, aunque otros las dan a 20 °C.

La corrección de temperatura que necesitan los barómetros de cubeta ajustable (de tipo Fortin) es diferente de la que necesitan los de cubeta fija, aunque el principio básico que hace necesaria la corrección de temperatura es el mismo para ambos tipos, a saber, que el coeficiente de dilatación térmica cúbica del mercurio es diferente del coeficiente de dilatación térmica lineal de la escala. Por consiguiente, se precisa un término de corrección para los dos tipos de barómetro de mercurio.

El barómetro de cubeta fija necesita una corrección complementaria. La razón de ello es que un incremento de la temperatura del instrumento da lugar a un aumento del volumen del mercurio y de las áreas de la sección transversal de la cubeta (hierro) y del tubo (vidrio). Debido a esos cambios, el ascenso aparente del mercurio causado por el incremento de temperatura es inferior al que se produciría si las áreas permanecieran constantes. Esto sucede porque parte del mercurio del barómetro pasa a ocupar el incremento de capacidad causado por la dilatación de la cubeta y del tubo.

Por diversas razones, la escala de un barómetro de cubeta fija debe estar calibrada tomando como referencia un barómetro patrón primario de cubeta ajustable. Algunos fabricantes reducen el volumen del mercurio de manera que las lecturas del barómetro de prueba concuerden con las del barómetro patrón a 20 °C. Las lecturas de un barómetro patrón primario, cuyas escalas son exactas cuando se utiliza 20 °C como temperatura de referencia, permiten elaborar tablas de corrección para los barómetros de cubeta fija.

Correcciones de temperatura para los barómetros de mercurio

Diversos investigadores han realizado estudios exhaustivos sobre las correcciones de temperatura para los barómetros de mercurio, cuyos resultados se resumen en la tabla siguiente:

1. a) Escala correcta a 0 °C y, además	$C_t = -B(\alpha - \beta) \cdot t$
b) Volumen de Hg correcto a 0 °C	$C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot 4V/3A$
2. Escala correcta a 0 °C y	
Volumen de Hg correcto a 20 °C	$C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot 4V/3A$
3. a) Escala correcta a 20 °C	$C_t = -B[\alpha \cdot t - \beta \cdot (t - 20)]$
b) Volumen de Hg correcto a 0 °C	$C_{t,V} = -B[\alpha \cdot t - \beta \cdot (t - 20)] - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot (4V/3A)$
c) Disminución del volumen de Hg en una cantidad equivalente a 0,36 hPa	$C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot (4V/3A)$
4. Escala correcta a 20 °C y	
a) Volumen de Hg correcto a 20 °C	$C_{t,V} = -B[\alpha \cdot t - \beta(t - 20)] - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot (4V/3A)$
b) Disminución del volumen de Hg en una cantidad equivalente a 0,36 hPa	$C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot (4V/3A)$

donde:

C_t = corrección de temperatura;

$C_{t,V}$ = corrección adicional para los barómetros de cubeta fija;

B = lectura observada del barómetro;

V = volumen total de mercurio en el barómetro de cubeta fija;

A = área de sección transversal efectiva de la cubeta;

t = temperatura;

α = dilatación térmica cúbica del mercurio;

β = coeficiente de dilatación térmica lineal de la escala;

η = coeficiente de dilatación térmica lineal de la cubeta.

ANEXO 3.B. BARÓMETROS PATRÓN REGIONALES

<i>Región de la OMM</i>	<i>Emplazamiento</i>	<i>Categoría^a</i>
I	Casablanca (Marruecos)	A _r
	Dakar (Senegal)	A _r
	Douala (Camerún)	A _r
	El Cairo (Egipto)	A _r
	Kinshasa/Binza (República Democrática del Congo)	A _r
	Nairobi (Kenya)	A _r
	Orán (Argelia)	A _r
II	Calcuta (India)	B _r
III	Buenos Aires (Argentina)	B _r
	Maracay (Venezuela, República Bolivariana de)	B _r
	Río de Janeiro (Brasil)	A _r
IV	Miami, Florida (Estados Unidos de América) (subregional)	A _r
	San Juan (Puerto Rico) (subregional)	A _r
	Toronto (Canadá) (subregional)	A _r
	Washington D. C. (Gaithersburg, Maryland) (Estados Unidos de América)	A _r
V	Melbourne (Australia)	A _r
VI	Hamburgo (Alemania)	A _r
	Londres (Reino Unido)	A _r
	San Petersburgo (Federación de Rusia)	A _r
	Toulouse (Francia)	A _r

Nota:

a Para las definiciones de categoría, véase la sección 3.10.5.1.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Liu, H. y G. Darkow, 1989: "Wind effect on measured atmospheric pressure", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 6, núm. 1, págs. 5 a 12.
- Miksad, R., 1976: "An omni-directional static pressure probe", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 15, págs. 1215 a 1225.
- Organización Meteorológica Mundial, 1954: *Reduction of Atmospheric Pressure: Preliminary Report on Problems Involved*. Technical Note No. 7 (WMO-No. 36, TP. 12). Ginebra.
- , 1964: *Note on the Standardization of Pressure Reduction Methods in the International Network of Synoptic Stations: Report of a Working Group of the Commission for Synoptic Meteorology*. Technical Note No. 61 (WMO-No. 154, TP. 74). Ginebra.
- , 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu, ed.) (1973 amendment) (WMO-No. 188, TP. 94). Ginebra.
- , 1968: *Methods in Use for the Reduction of Atmospheric Pressure*. Technical Note No. 91 (WMO-No. 226, TP. 120). Ginebra.
- , 1985: "'Pressure tendency' and 'discontinuity in wind' – discussion of two algorithms used in Swedish automatic weather stations" (L. Bergman, T. Hovberg y H. Wibeck), en *Papers Presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III)*. Instruments and Observing Methods Report No. 22 (WMO/TD-No. 50). Ginebra.
- , 1992: *The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison* (J. P. van der Meulen). Instruments and Observing Methods Report No. 46 (WMO/TD-No. 474). Ginebra.
- , 2010a: *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción* (OMM-Nº 485), volumen 1. Ginebra.
- , 2010b: *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-Nº 544), volumen 1. Ginebra.
- , 2010c: *Guidance on Instrumentation for Calibration Laboratories, Including Regional Instrument Centres* (D. Groselj). Instruments and Observing Methods Report No. 101 (WMO/TD-No. 1543). Ginebra.
- , 2014: *Guía de sistemas meteorológicos de observación y distribución de información para los servicios meteorológicos aeronáuticos* (OMM-Nº 731). Ginebra.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2013: *Convenio de Minamata sobre el Mercurio*. Ginebra, Naciones Unidas.
- Sax, N. I., 1975: *Dangerous Properties of Industrial Materials*. Van Nostrand Reinhold Co., Nueva York.
- United States Weather Bureau, 1963: *Manual of Barometry (WBAN)*. 1, Imprenta del Gobierno de los Estados Unidos, Washington D. C.
-