CAPITULO VII.

NIVELACIÓN BAROMÉTRICA.

275. Se sabe que el barómetro es el instrumento que sirve para medir la presión que ejerce la masa de aire atmosférico que rodea á la tierra. Consiste en un tubo de vidrio abierto en uno de sus extremos y cerrado en el otro, que es el que queda hacia arriba en la posición normal del aparato. Este tubo, que debe ser cilíndrico y de $0^m.8$ á $0^m.9$ de longitud, se llena en su totalidad de mercurio bien purificado, y se invierte en seguida para sumergirlo en un receptáculo en que también hay mercurio, cuidando de que en esta operación no entre cantidad alguna de aire al interior del tubo. Entonces se ve que la columna líquida desciende hasta cierto punto B (fig. 213ª) en el cual se detiene, siendo la distancia A B, del nivel exterior al interior, la que se llama *all tura barométrica*, y es la que mide la presión atmosférica que se ejerce en A. En efecto, puesto que en la parte superior del tubo resulta un vacío perfecto, el nivel B de la columna no sufre presión alguna; mas como e- nivel inferior A recibe la de toda la columna atmosférica que gravita sobre él, será preciso, para que subsista el equilibrio, que el peso de la columna mercurial sea igual al de la atmosférica de la misma base.

Fig.ª 213ª

El barómetro que brevemente se ha descrito, se llama de *cisterna* ó *cubeta*, á causa del receptáculo colocado en su parte inferior; pero

hay también otros barómetros, llamados de *sifón*, como el que representa la figura 214ª, el cual se compone de dos tubos de igual diámetro y situados en el mismo eje, unidos entre sí por medio de otro tubo recurvo de diámetro menor. Los dos primeros están cerrados; pero el inferior tiene en O un agujero muy pequeño, por donde se ejerce la presión del aire en el nivel A, y como todo el resto del tubo está lleno de mercurio, la presión mencionada es la que sostiene la columna barómetrica, que como antes, es la distancia A B de uno á otro nivel. Los barómetros de sifón construídos de esta manera se deben al físico francés Gay-Lussac.

Fig.ª 214ª

Algunas veces los tubos de los barómetros tienen grabada las divisiones que sirven para medir las alturas de las columna; pero generalmente están aquellas trazadas á lo largo de una ranura longitudinal practicada en la armadura metálica que los cubre, y que sirve también para proteger la fragilidad del vidrio. Por lo regular, las divisiones de la armadura indican milímetros, y se aproximan las lecturas hasta los diezmilímetros con un vernier movible á lo largo de la ranura por medio de un tornillo. En los barómetros de cubeta construídos por Fortin, el nivel inferior del mercurio puede elevarse ó bajarse lo necesario para que llegue á tocar una punta de marfil que está fija en la armadura, é indica el *cero* de la escala. Con este objeto el fondo de la cubeta es de piel, y susceptible de cierto movimiento que se le comunica por medio del tornillo T (fig. 213ª) De esta manera se eleva poco á poco el nivel inferior hasta que la imagen de la punta de marfil, que se ve por reflexión en la superficie del mercurio, esté en contacto con la misma punta vista directamente. En seguida se mueve el vernier de la armadura hasta que su *cero*, determinado por el borde de la pieza metálica en que está trazado, se vea tangente en B á la superficie del menisco convexo en que termina la columna barométrica. La lectura del vernier dará la indicación del instrumento, puesto que el origen de las divisiones coincide con la punta de marfil y por consiguiente con el nivel inferior del mercurio.

En los barómetros de Gay-Lussac se hacen las lecturas con dos vernieres, uno de los cuales se pone tangente en A (figura 214ª) al menisco inferior, y el otro al superior, lo mismo que se ha explicado. La diferencia de ambas indicaciones suministra la altura barométrica si las divisiones están numeradas en un mismo sentido; pero como por lo regular no es así, sino que su cero está hacia el medio de la columna, la suma de ambas lecturas es la que expresa aquella altura.

Cuando un barómetro se traslada de un lugar á otro que esté más ó menos elevado que el primero, se nota en la columna un descenso ó un ascenso correspondiente á la diferencia de altura de los dos lugares, puesto que la presión atmosférica decrece necesariamente á medida que aumenta la elevación de un punto respecto de la superficie de la tierra. La relación que existe entre las variaciones de la columna barométrica y el desnivel de los puntos en que se observan, es la que sirve para determinar este último elemento; pero antes de darla á conocer, indiquemos dos correcciones que deben hacerse á las indicaciones del barómetro para hacerlas perfectamente comparables entre sí.

276. Siempre que se sumerge un tubo de pequeño diámetro en un líquido cualquiera, es bien sabido que, por la acción de la capilaridad, el nivel en el interior del tubo no queda á la misma altura que en el exterior. Entre el vidrio y el mercurio la capilaridad produce el efecto de deprimir el líquido respecto de la altura que tiene su nivel exterior, de manera que la columna barométrica, tal como se obtiene en los barómetros de cubeta, quiere decir, contada desde el nivel de ésta, es realmente un poco menor de lo que sería sin la capilaridad; y en consecuencia de menor peso que la columna de aire correspondiente. Para obtenerla con exactitud sería preciso contarla desde el nivel que adquiriría el mercurio dentro del tubo si éste estuviera abierto; pero es claro que esto equivale á añadirle una cantidad igual á la depresión capilar que conviene al diámetro interior del mismo tubo. La tabla siguiente contiene estas correcciones, expresadas en milímetros, lo mismo que los diámetros interiores desde 2 hasta 20 milímetros:

Diámetro.	Depresión.	Diámetro.	Depresión.	Diámetro.	Depresión.
2	4.43	7	0.91	14	0.16
2.5	3.57	8	0.71	15	0.12
3	2.92	9	0.56	16	0.10
3.5	2.44	10	0.44	17	0.08
4	2.07	11	0.35	18	0.06
5	1.53	12	0.26	19	0.04
6	1.17	13	0.20	20	0.03

Si no se puede medir directamente el diámetro interior del tubo, se mide su circunferencia exterior c, y se tendrá con la exactitud necesaria:

$$\text{Diámetro interior} = 0.318\,c - 0^{m}.0025$$

Supongamos que se haya obtenido $0^{m}.5876$ por altura barométrica con un instrumento de Fortin, cuya circunferencia exterior sea $c = 0^{m}.033$, y que deseamos corregirla de la capilaridad. El diámetro interior será $0.318 \times 0^{m}.033 - 0^{m}.0025 = 0^{m}.008$, por lo cual la indicación correcta es $0^{m}.5876 + 0^{m}.0007 = 0^{m}.8583$.

Cuando el diámetro de la cubeta es poco mayor que el del tubo, de tal manera que las paredes exteriores de éste sólo disten algunos milímetros de las de aquella, se hace también sentir la capilaridad en la cubeta; y entonces la corrección de la columna barométrica será la diferencia de las que corresponden al diámetro interior del tubo y á la distancia de éste á la cubeta. Sin embargo, como la tabla precedente manifiesta que para diámetros ó distancias mayores que $0^{m}.016$ es casi insensible la corrección, podrá despreciarse la que corresponde á la cubeta siempre que el diámetro interior de ésta sea igual á $0^{m}.032 + 0.318\,c$, ó mayor que esta misma cantidad.

La corrección de la capilaridad no tiene lugar en el barómetro de Gay-Lussac, ni en ningún barómetro de sifón cuyos tubos sean de igual diámetro; porque la depresión será la misma en ambos, y su efecto desaparecerá en la altura barométrica, puesto que esta resulta de la diferencia algebraica de las dos lecturas.

277. La otra corrección, que es común á toda clase de barómetros, proviene de la temperatura que tenga el instrumento en el instante

de la observación. El mercurio, como todos los cuerpos, varía de volumen con los cambios de temperatura; y como su peso, que es el que mide la presión atmosférica, es una función del volumen, resultaría que si no se tomara en cuenta el efecto de la temperatura, se tomaría, como dato para calcular el peso, un volumen tanto mayor, cuanto más alto fuera el grado de calor del instrumento. En otros términos, presiones iguales quedarían aparentemente medidas por volúmenes y, en consecuencia, por pesos desiguales.

El efecto de la temperatura se toma en cuenta anotando la indicación de un termómetro unido al barómetro, y que por esta razón se llama termómetro *fijo*. Con este elemento y la altura de la columna, se reduce ésta á lo que sería á cualquiera otra temperatura; de manera que para comparar entre sí dos ó más columnas barométricas, basta reducirlas á una temperatura común por medio del sencillo cálculo que voy á indicar. Sean B y B' las dos indicaciones del barómetro obtenidas cuando el termómetro fijo señala T y T' grados respectivamente. Designando por m el *coeficiente de dilatación* del mercurio, quiere decir, la pequeñísima fracción que aumenta su unidad de volumen por un incremento de 1° del termómetro centesimal; por θ la temperatura común á la cual se desea reducir ambas alturas; y finalmente por b y b' las alturas reducidas, tendremos que B será igual á b, mas lo que ésta haya aumentado por $T - \theta$ grados, que será $b\,m\,(T - \theta)$, ó lo que es lo mismo:

$$B = b\,[1 + m\,(T - \theta)]$$

Por idéntica razón, la otra altura dará:

$$B' = b'\,[1 + m\,(T' - \theta)]$$

y la relación de las dos columnas reducidas á θ grados, es:

$$\frac{b}{b'} = \frac{B\,[1 + m\,(T' - \theta)]}{B'\,[1 + m\,(T - \theta)]}$$

El coeficiente de dilatación del mercurio tiene por valor .... $m = 0.00018$ que, por su pequeñez, permite hacer la división de los

binomios del segundo término hasta la primera potencia de m, de lo que resulta:

$$\frac{b}{b'} = \frac{B}{B'}\,[1 + m\,(T' - T)]$$

ecuación independiente de θ, y que indica que para hacer comparables las dos columnas, basta corregir por la diferencia de temperaturas de los barómetros, la relación de las alturas observadas. Esto equivale evidentemente á reducir una de las alturas á la temperatura de la otra, pues la columna B reducida á la temperatura T' sería $B\,[1 + m\,(T' - T)]$; ó bien B' reducida á T daría:

$$B'\,[1 - m\,(T' - T)] = \frac{B'}{1 + m\,(T' - T)}$$

Es acaso preferible reducir siempre á 0° todas las columnas barométricas; porque de esa manera se hacen directamente comparables, sea cual fuere su número. En tal caso se tiene $\theta = 0$, y las ecuaciones anteriores darán:

$$b = \frac{B}{1 + m\,T} = B - B\,m\,T$$

$$b' = \frac{B'}{1 + m\,T'} = B' - B'\,m\,T'$$

He supuesto hasta ahora que sólo el mercurio se dilata; pero es claro que también influye la temperatura en la escala metálica que sirve para obtener las indicaciones B y B', y que generalmente es de latón. Designando por l su coeficiente de dilatación, hallaremos que siendo su longitud á T grados mayor que á θ, menor número de divisiones habrán medido la altura de la columna, la cual, en consecuencia, deberá multiplicarse por $1 + l\,(T - \theta)$, de donde resulta:

$$B = b\,\frac{1 + m\,(T - \theta)}{1 + l\,(T - \theta)} = b\,[1 + (m - l)\,(T - \theta)]$$

Se ve que la ecuación es de la misma forma que las anteriores, con la única diferencia de introducir $m - l$ en lugar de m. Para reducir á 0° de temperatura, se tendrá, pues:

$$b = B - (m - l)\,T\ .$$

Representando en general por F el producto del coeficiente $m - l$ por la altura barométrica, tendremos para cualquiera columna B obtenida á la temperatura T:

$$b = B - F\,T$$

Con el fin de facilitar estas reducciones, que son muy frecuentes, he calculado la siguiente tabla de valores de F para cada centímetro de la columna barométrica, tomando $m = 0.00018$ y $l = 0.000018$ que corresponden al mercurio y al latón respectivamente:

Tabla del coeficiente de F para reducir á 0° las alturas barométricas.

Argumento: LA ALTURA BAROMÉTRICA.

ALTURA.	F	ALTURA.	F	ALTURA.	F
0m.36	0.000058	0m.50	0.000081	0m.64	0.000104
0 .37	. 60	0 .51	. 83	0 .65	. 105
0 .38	. 62	0 .52	. 84	0 .66	. 107
0 .39	. 63	0 .53	. 86	0 .67	. 109
0 .40	. 65	0 .54	. 87	0 .68	. 110
0 .41	. 66	0 .55	. 89	0 .69	. 112
0 .42	. 68	0 .56	. 91	0 .70	. 113
0 .43	. 70	0 .57	. 92	0 .71	. 115
0 .44	. 71	0 .58	. 94	0 .72	. 117
0 .45	. 73	0 .59	. 96	0 .73	. 118
0 .46	. 75	0 .60	. 97	0 .74	. 120
0 .47	. 76	0 .61	. 99	0 .75	. 122
0 .48	. 78	0 .62	. 100	0 .76	. 123
0 .49	0.000079	0 .63	0.000102	0 .77	0.000125

Para indicar el uso de la tabla, reduzcamos á 0° las siguientes observaciones. Al nivel del mar, y cuando el termómetro fijo señalaba

25°.3, la altura de la columna barométrica se halló ser de 0m.7620. Al mismo tiempo cerca de la cima del Chimborazo indicaba el barómetro 0m.3773, siendo de 10° su temperatura. Las reducciones serán:

0.000123 × 25.3 = 0m.0031	0.000061 × 10 = 0m.0006
Altura observada = 0 .7620	Altura observada = 0 .3773
„ reducida = 0m.7589	„ reducida = 0m.3767

Del mismo modo podríamos reducir la segunda altura barométrica á la temperatura de la primera, y obtendríamos 0m.3782; ó bien la primera á la temperatura de la segunda, hallando 0.7601. En los tres casos resultarían en la misma relación, á saber:

$$\frac{0.7589}{0.3767} = \frac{0.7620}{0.3782} = \frac{0.7601}{0.3773} = 2.0146 \text{ próximamente.}$$

278. Estando ya en aptitud de hacer comparables dos ó más columnas barométricas, y puesto que estas decrecen al elevarnos verticalmente en la atmósfera, busquemos la relación que existe entre sus variaciones y las alturas de los lugares en que se practiquen las observaciones.

Desde luego, si la densidad del aire fuera constante en toda la masa atmosférica y uniforme su temperatura, como el peso de la columna barométrica equilibra al de la columna atmosférica de la misma base, designando en general por P el peso específico del mercurio y por p el del aire, tendríamos la ecuación:

$$P\,b = p\,Z$$

en la que Z representa la altura de la atmósfera contada hasta el punto en que el barómetro indica b. Diferenciada esta relación respecto de las variables Z y b, y atendiendo á que Z aumenta cuando b disminuye, hallaríamos:

$$\mathrm{d}\,Z = -\,\frac{P}{p}\,\mathrm{d}\,b \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

Esta fórmula daría la diferencia de nivel entre dos puntos, conociendo la de las columnas barométricas correspondientes, pero la igualdad de temperatura y densidades en que está fundada, sólo puede admitirse para diferencias de nivel sumamente pequeñas, introduciendo los valores de P y p que convenga á cada lugar. Por ejemplo, se ha hallado que al nivel del mar y á 0° de temperatura, la densidad del mercurio es 13.596, y 0.001299 la del aire perfectamente seco, tomando por unidad en ambas la del agua. Con estos valores se obtiene: $\frac{P}{p} = \frac{13.596}{0.001299} = 10466$; de manera que, si en las mismas condiciones quisiéramos determinar el desnivel que corresponde á $0^m.001$ de decremento en la columna barométrica, tendríamos:

$$d\,Z = 10466 \times 0^m.001 = 10^m.466$$

En este y otros casos semejantes, la ecuación (1) daría suficiente exactitud; pero en general para desniveles más considerables es inadmisible la hipótesis de uniformidad de pesos específicos. Veamos cómo debe procederse, admitiendo por lo pronto la igualdad de temperatura con el fin de simplificar la investigación.

Supongamos la columna atmosférica (figura 215ª) á 0 grados de temperatura, y dividida en secciones ó capas de espesor igual, y bastante pequeño para poder admitir que en cada una sea uniforme la densidad del aire, aunque variable de una sección á otra. Siendo z el grueso común de estas capas, sus alturas, contadas desde el nivel del mar, formarán la siguiente progresión aritmética:

Fig.ª 215ª

$$\div\ 0 . z\, 2z . 3z .... nz \text{ ....} \quad (2)$$

Designando por b la altura del barómetro al nivel del mar, y por $b_1, b_2, b_3, \ldots \ldots b_n$ las que corresponde á la parte superior de la primera, de la segunda, de la tercera, ... de la n^a capas, encontraremos que estas alturas van decreciendo según cierta ley que vamos á determinar.

Puesto que, en cualquier punto de la masa atmosférica, la columna barométrica equilibra el peso de la columna de aire que gravita sobre ella, resulta que b mide la presión del aire al nivel del mar; b_1 en

la parte superior de la primera capa; b_2 en la parte superior de la segunda; etc., lo cual equivale á decir que $b - b_1$ representa el peso de la primera capa; $b_1 - b_2$ el de la segunda; y así sucesivamente. En igualdad de volúmenes, los pesos son proporcionales á las densidades ó á los pesos específicos, por lo que si designamos por p_1, p_2, p_3, etc., las de las diversas capas, tendremos:

$$p_1 : p_2 :: b - b_1 : b_1 - b_2$$

Según la ley de Mariotte, se tiene también que las densidades de los gases son directamente proporcionales á los pesos que los oprimen, y por consiguiente:

$$p_1 : p_2 :: b_1 : b_2$$

De estas dos proporciones resulta:

$$b - b_1 : b_1 - b_2 :: b_1 : b_2$$

y puesto que, en toda proporción, la suma de los antecedentes y la de los consecuentes guardan entre sí la misma razón que la de un antecedente á su consecuente, hallaremos:

$$b : b_1 :: b_1 : b_2$$

De igual manera hallaríamos que $b_1 : b_2 :: b_2 : b_3$ etc., que dan proporciones continuas y pueden ponerse en forma de progresión como sigue:

$$\div\!\div\ b : b_1 : b_2 : b_3 : .... b_n \text{ ....} \quad (3)$$

Esto demuestra que cuando las alturas, contadas desde el mar, crecen en progresión aritmética (2), las indicaciones correspondientes del barómetro decrecen en progresión geométrica:

El conjunto de las progresiones (2) y (3) ofrece, pues, la mayor analogía con un sistema de logaritmos, y puede hacerse más completa dando á la (3) la forma de progresión creciente y asignándole la unidad por primer término. Para lo primero basta dividir la unidad por cada término, y para lo segundo multiplicar por b toda la progresión, de lo cual resulta el sistema:

$$\div\ 0\,.\,z\,.\,2z\,.\,3z\,.\,\dots\dots\dots\dots\, nz$$

$$\div\ 1 : \frac{b}{b_1} : \frac{b}{b_2} : \frac{b}{b_3} : \dots\dots\dots \frac{b}{b_n}$$

y por consiguiente se tendrá:

$$z = \log. b - \log. b_1$$
$$2z = \log. b - \log. b_2$$
$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$
$$nz = \log. b - \log. b_n$$

Restando una de otra dos cualesquiera de estas ecuaciones, por ejemplo, la segunda de la última, se elimina á log. b y se tiene:

$$(n-2)\,z = \log. b_2 - \log. b_n$$

El primer miembro de esta ecuación no es otra cosa más que la diferencia de altura entre la segunda y la nª secciones, independientemente del grueso z que se les asigne; por lo cual si convenimos en designar siempre por n el desnivel entre dos pnntos, por B la altura barométrica en la estación inferior, y por b la correspondiente á la estación superior, podremos escribir en general:

$$n = \log. B - \log. b$$

279. A la verdad este sistema de logaritmos, que llamaremos *barométrico*, no nos es conocido; el sistema usual es el tabular cuya base es 10; pero puesto que para pasar de un sistema á otro de logaritmos, basta multiplicar los del uno por un coeficiente constante llamado *módulo*, tendremos la facultad de valernos del tabular si conseguimos determinar el módulo que lo convierte en barométrico. Designándolo por C, la ecuación anterior se escribirá como sigue, siendo log. B y log. b logaritmos tabulares:

$$n = C\,(\log. B - \log. b) \dots\dots\dots\dots\dots\dots (4)$$

Toda la dificultad queda, pues, reducida á la determinación de C. Su valor podría hallarse experimentalmente haciendo una nivelación topográfica entre dos puntos, y observando después en ellos las indicaciones del barómetro. Entonces conociendo n, B y b tendríamos:

$$C = \frac{n}{\log. B - \log. b}$$

Pero hay un método más expedito para determinar este coeficiente. Se ha visto, en efecto, que para diferencias de nivel muy pequeñas, la ecuación (1) da toda la exactitud que puede proporcionar una nivelación topográfica. Supongamos, según esto, que sea β la indicación del barómetro cuando son P y p los pesos específicos del mercurio y del aire respectivamente; que en seguida se coloque el instrumento en un punto en que señale $\beta + m$; y por último, que se eleve á otro punto en que indique $\beta - m$, siendo m una fracción muy pequeña. Tendremos entonces $B = \beta + m$; $b = \beta - m$, y el incremento que, en la ecuación (1), se designó por d b, será en este caso d $b = -2m$. La diferencia de nivel d Z ó n será, pues: $n = 2\frac{P}{p}m$, que sustituído en la expresión de C, dará:

$$C = \frac{2\,\frac{P}{p}\,m}{\log. \beta\left(1 + \frac{m}{\beta}\right) - \log. \beta\left(1 - \frac{m}{\beta}\right)}$$

Desarrollando los logaritmos hasta los segundos términos de las series solamente, por ser m tan pequeño como se quiera, y reduciendo, resulta:

$$C = \frac{P\beta}{pM} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (5)$$

fórmula en la cual M representa el módulo 0.43429...... de los logaritmos tabulares. Para aplicarla determinemos el valor del coeficiente tomando $P = 13.596$ y $p = 0.001299$, que como se dijo al princi-