

CAPÍTULO 3

Mediciones e instrumental de campo

*Sebastián I. Besteiro, José M. Etchegoin, Carlos A. Orsetti
y Héctor A. Salgado*

En Topografía se efectúan mediciones de distancias, ángulos y desniveles mediante diversos instrumentos y procedimientos. Los datos capturados a campo son posteriormente procesados para realizar levantamientos, apoyo o control de proyectos de sistematización, canales, riego, etc.

Medición de distancias

La medición de distancias se puede clasificar en **directa** o **indirecta**, según se recorra o no la longitud a medir.

Medición directa de distancias

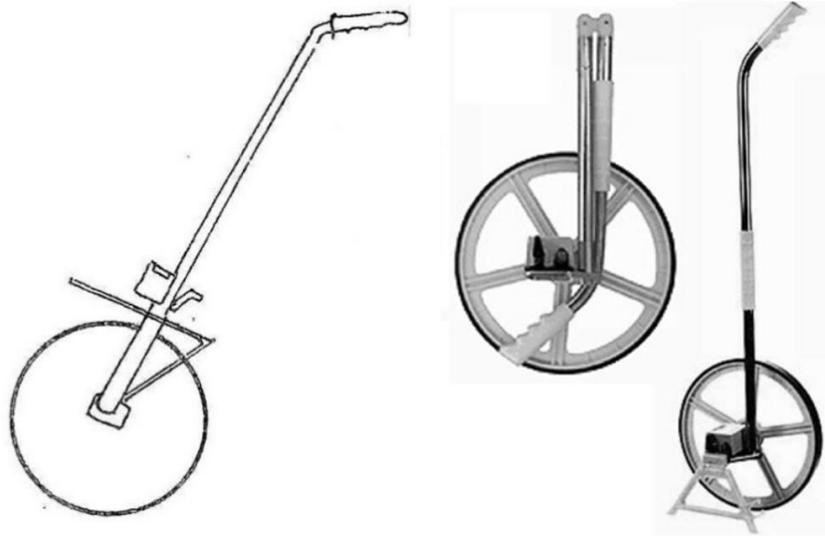
Se llama medición Directa, cuando el valor de la misma se obtiene por aplicación sucesiva sobre toda la extensión de la unidad de medida, o bien sobre un múltiplo o submúltiplo de la misma. Por consiguiente, se requiere recorrer toda la distancia; en cambio, la medición es indirecta cuando se efectúan otras determinaciones que permiten, sin aplicar el elemento de medición sobre la línea a medir, obtener por cálculo su longitud.

La medición directa puede realizarse por métodos expeditivos y por métodos precisos.

Métodos expeditivos

Se denominan “expeditivos” porque permiten a medición rápida y fácil de la distancia, aunque con menor precisión. Pueden utilizarse **odómetros o ruedas de agrimensor** (Figura 3.1), instrumentos que miden la distancia al hacer girar una rueda sobre la línea a medir. Este instrumento utiliza un contador para registrar las vueltas de la rueda o directamente la distancia recorrida si son electrónicos.

Figura 3.1: Odómetro o rueda de agrimensor



Odómetro genérico (izquierda) y odómetro plegable en posición de transporte y uso (centro y derecha)

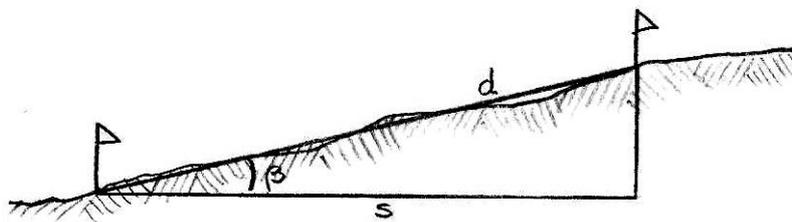
La **distancia medida** (D) se determina en base al diámetro de la rueda (ϕ), siendo c = la circunferencia, $\pi = 3,1416$, y n = el número de revoluciones:

$$c = \pi * \phi$$

$$D = n * c$$

Cuando la distancia es inclinada, se debe “reducir al horizonte” para obtener la **distancia topográfica** (s) (Figura 3.2),

Figura 3.2: Distancia topográfica (s)



Reducción al horizonte de la distancia inclinada (d) y su proyección al horizonte (s)

La distancia topográfica o distancia reducida al horizonte (s), cuando el ángulo de inclinación es “ β ”, se calcula:

$$\cos \beta = s / d \rightarrow \boxed{s = d * \cos \beta}$$

La utilización del odómetro requiere que la superficie de rodamiento sea lisa, recta, y no se produzca patinaje, ya que, si así ocurriese, la medida sería errónea. Es muy útil para mediciones de longitudes de caminos, canales de riego, etc.

Método del paso regular

Consiste en determinar la distancia mediante el conteo de los pasos. El Error relativo (E_r) es de 1/100 aproximadamente, dependiendo del tipo de terreno (arena, compacto, quebrado, llano, etc.), la pendiente y el sentido en que se la recorre. En general se estima que un hombre recorre una longitud igual a su altura, cada 2 pasos. No obstante, es conveniente calibrar el paso mediante la repetición de la operación.

Ejemplo (Tabla 3.1): se desea calibrar el paso utilizando una distancia, previamente medida con un instrumento preciso ($d = 128\text{m}$); se efectúan 6 repeticiones de la medición con pasos, 3 de ida y 3 de vuelta.

Tabla 3.1: Calibración de paso

Repetición	Cantidad de pasos (p)
1	166
2	167
3	166
4	165
5	167
6	165
Total	996
Promedio de pasos = Total / repeticiones	166

Planilla de calibración de longitud de paso

$$\begin{aligned} \text{Medida del paso regular} &= \text{Distancia medida} / \text{Promedio de pasos} = 128\text{m} / 166\text{p} = \\ &= \mathbf{0,77 \text{ m/paso}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ de pasos c/10m} &= \text{Promedio de pasos} \times 10 / \text{Distancia medida} = 166\text{p} \times 10 / 128\text{m} = \\ &= \mathbf{13 \text{ pasos/10m}} \end{aligned}$$

Métodos precisos

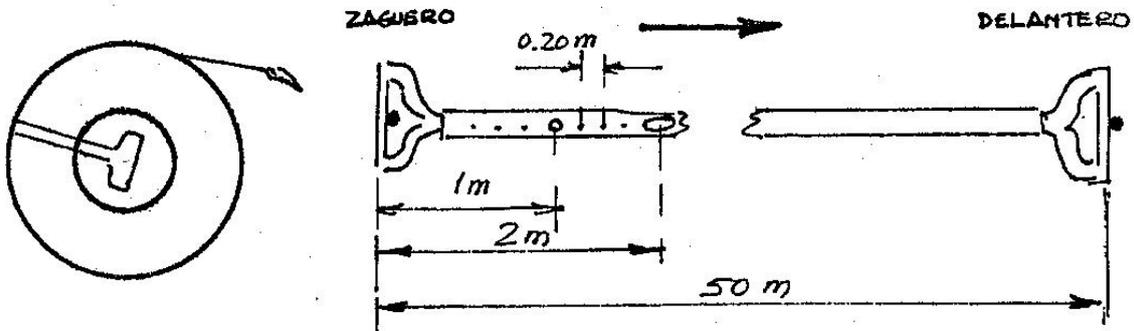
En general, en topografía agrícola se requiere precisión mayor que la alcanzable con los métodos anteriores, debido a las Escalas (1/100 a 1/20.000) empleadas. Por eso se recurre a cintas o alambres de invar, ruletas (cintas métricas de 25 a 30 m), o cintas de agrimensor auxiliándose con jalones y fichas.

Cinta de agrimensor

La cinta de agrimensor (Figura 3.3) es un fleje de acero de 50m de longitud. Lleva marcas, que permiten la medición. Cada 2m hay una chapita elíptica, en la cual figura la distancia en

metros desde ambos extremos de la cinta. Además, hay 1 remache circular grande cada metro, y un remache chico cada 20cm.

Figura 3.3. Cinta de agrimensor



Cinta de agrimensor de 50m enrollada (izquierda) y desplegada (derecha) mostrando sus partes constitutivas (manijas, chapitas y remaches de posición)

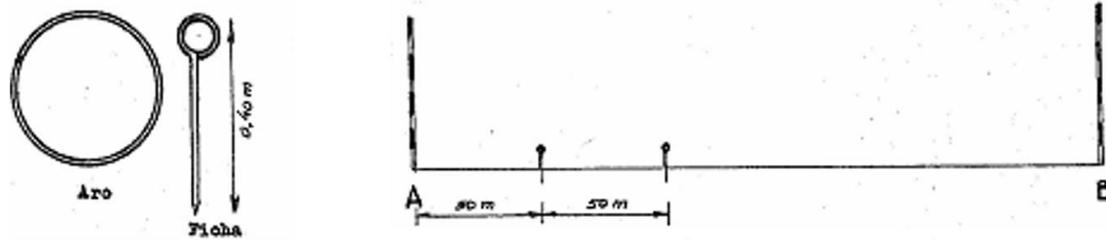
En cada extremo, la cinta posee una manija, siendo la longitud total la existente entre los ejes o bordes de tales manijas.

Ejecución de la medición:

Sean 2 puntos A y B, entre los cuales se desea conocer la distancia (Figura 3.4).

- Primero se materializa la **alineación**, y luego se procede al trabajo, integrado por 2 operadores (**zaguero y delantero**), que cuentan con una cinta de agrimensor y un juego de 11 **fichas** y 2 **aros** (Figura 3.4).
- Inicia la operación el zaguero, quien clava una ficha en el extremo A.
- El delantero se dirige en dirección hacia B, guiado desde A por el zaguero, que lo alinea. El delantero clava 1 ficha (de las 10, que tenía en el aro), y avanza nuevamente hacia B.
- El zaguero acompaña el desplazamiento, con la cinta extendida, recoge la ficha, insertándola en el aro, y se desplaza hacia la próxima ficha.
- La secuencia se repite hasta que al delantero no le quedan más fichas. Ahí espera al zaguero, e intercambian los aros. En ese momento han recorrido 1 “ **tiro**” (500m para cintas de 50m de longitud).

La distancia resulta el N° de tiros, más el N° de fichas del zaguero (multiplicada por la longitud de la cinta), más la fracción desde la última ficha clavada.

Figura 3.4. Medición con cinta de agrimensor

Aro y ficha utilizados en la medición directa con cinta (izquierda); medición con cinta de la longitud AB, materializada con jalones en sus extremos (derecha)

Errores en la medición con cintas:

Errores sistemáticos (Es)

- Error por falta de contraste
- Error por falta de alineación
- Error por catenaria
- Error por tracción
- Error por temperatura (el más importante).

Los errores por tracción y por catenaria, además de su menor incidencia, tienden a compensarse entre sí.

A los efectos de contrastar una cinta métrica, se deben estandarizar las condiciones de medición. En Argentina se consideran 20°C de Temperatura y 5 kg de fuerza de Tracción, como condiciones Standard para el contraste.

La **corrección por Temperatura** requiere el auxilio de medición con un termómetro de la misma, en el lugar y momento de la medición.

Sean:

- Longitud de contraste (figura en el folleto, que acompaña a la cinta): L_0
- Temperatura de contraste (figura en el folleto, que acompaña a la cinta): T_0
- Temperatura a la cual se realiza la medición: $T(^{\circ}\text{C})$
- Módulo de dilatación: α

La diferencia de temperatura entre la de medición y la de contraste:

$$\Delta T = T(^{\circ}\text{C}) - T_0$$

La longitud de la cinta en el momento de la medición L_T será:

$$L_T = L_0 * (1 + \alpha * \Delta T)$$

Errores accidentales (Ea)

- Falta de coincidencia entre extremos de 2 cintadas sucesivas
- Error en la lectura (apreciación)...
- Clavado inclinado de las fechas...etc...

La suma de los errores accidentales es:

$$\boxed{Ea = e_a \sqrt{n}}$$

Donde e_a : error accidental en una cintada; n : número de cintadas con las cuales se midió la longitud "L". Por lo tanto $\rightarrow n = L / l$

El **Error Medio Total (Em_T)** en la medición de la longitud "L" es:

$$Em_T = \sqrt{Ea^2 + Es^2}$$

$$\text{siendo } Es = es * n \quad \text{y} \quad Ea = ea * \sqrt{n}$$

$$\rightarrow Em_T = \sqrt{e_a^2 \cdot n + e_s^2 \cdot n^2} \quad \rightarrow \quad Em_T = \sqrt{\frac{e_a^2 \cdot L}{l} + \frac{e_s^2 \cdot L^2}{l^2}}$$

considerando que $e_a^2 / l = A$ y $e_s^2 / l^2 = B$ se determinan empíricamente, queda:

$$\boxed{Em_T = \sqrt{A \cdot L + B \cdot L^2}}$$

Tolerancias en la medición con cintas métricas

En general, las Tolerancias varían de acuerdo a la precisión requerida, la zona y las condiciones de medición. Se puede expresar:

$$T = K \cdot \sqrt{A \cdot L + B \cdot L^2}$$

Donde T y L se expresan en metros (m); K varía entre 0,01 y 0,03; A varía entre 0,3 y 1,5; B varía entre 0,0005 y 0,003

En general para mediciones en topografía agrícola se puede tomar:

$$\boxed{T(m) = 0,01 \cdot \sqrt{1,5 \cdot L + 0,003 \cdot L^2}}$$

Medición indirecta de distancias

La necesidad de conocer magnitudes que no se pueden medir en forma directa, siempre está presente en todo trabajo topográfico, ya sea este de relevamiento o de replanteo.

Muchas veces la topografía del terreno, la vegetación, obras de arte o cualquier otro obstáculo se interponen en la línea de medición o no permite acceder a alguno o algunos de los puntos que se quieren determinar.

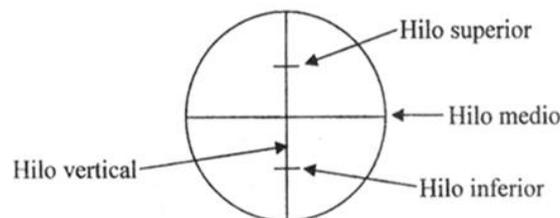
Se desarrollan a continuación algunos ejemplos que se presentan más a menudo en los trabajos de campo. En todos los procedimientos de medición indirecta (excepto en los electrónicos que se verán más adelante) intervienen magnitudes y se realizan más operaciones que si se midieran directamente. Por este motivo se deben tener en cuenta que los errores producidos en cada una de ellas tendrán su influencia conjunta en el resultado final, según la ley de propagación de errores.

En síntesis, cuantas más operaciones se realizan para determinar una magnitud, menos exacto será el valor determinado de esta.

Estadimetría

Se emplea en general un nivel de anteojo, que cuenta con un anteojo astronómico, el cual lleva en su interior una lente, donde se han marcado con un diamante una línea vertical y 3 líneas horizontales, llamado **retículo** (Figura 3.5).

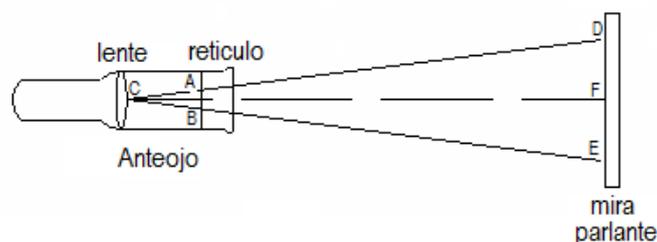
Figura 3.5: Retículo con hilos estadimétricos



Los hilos superior e inferior se llaman hilos estadimétricos o distanciométricos, y realizando la diferencia entre ellos, multiplicándola por una constante K, que generalmente es 100, se obtiene la distancia entre el aparato y la mira.

$$d = (hs - hi) \cdot K$$

Figura 3.6: Medición estadimétrica de distancia



De acuerdo con las leyes de semejanzas entre los triángulos CAB y CDE:

$$\frac{CD}{CF} = \frac{AB}{DE} \Rightarrow CF = \frac{CD}{AB} * DE$$

Donde CF es la distancia que separa al instrumento de la mira.

La magnitud DE se obtiene de la diferencia de lecturas de hilo superior menos hilo inferior de la mira, mientras que la magnitud AB sea constante por fabricación del aparato. En los instrumentos más modernos los fabricantes hacen que la relación entre CO y AB sea igual a 100 por lo que nuestra expresión se reduce a:

$$\boxed{CF = DE * 100}$$

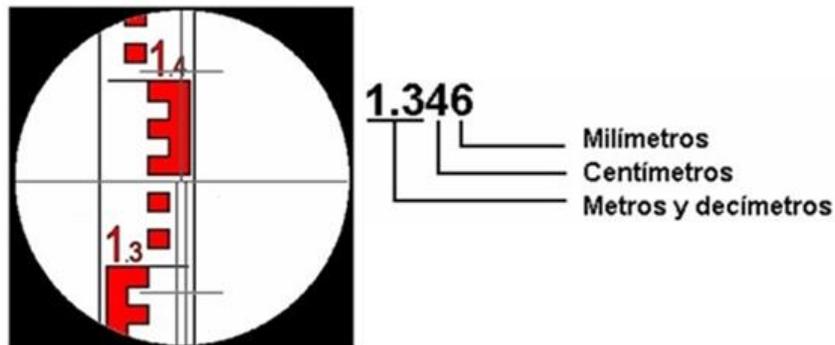
En la práctica se leen los tres hilos (hs, hi, hm) y se controla que el hm leído no difiera en más de 11/2 mm con el hm calculado (promedio de hs y hi). Si eso se cumple, se toma como válida la lectura, caso contrario, si supera el 11/2 mm, la lectura se efectuará nuevamente:

$$hm = (hs + hi) / 2 \quad ; \quad d = (hs - hi) \times K$$

$$d = (hs - hi) \times 100$$

Las lecturas directas se efectúan “al centímetro” (tercera cifra significativa), y se aprecia el “milímetro” (cuarta cifra significativa).

Figura 3.7: Lecturas de hilos estadimétricos en la mira



Lecturas de mira vistas desde el anteojo

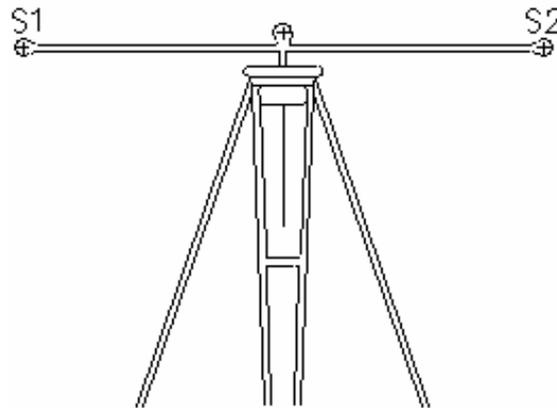
Sean: $hs = 1,404$ $hm = 1,346$ y $hi = 1,288 \rightarrow$ la distancia aparato - mira resulta $\rightarrow d = 11,6$ m

Estadía horizontal de invar

En este método se emplea un teodolito para la medida del ángulo paraláctico, y una mira, también conocida como “**mira base**” o “**paraláctica**” (Figura 3.8). Esta mira consta de un tubo,

en cuyo interior va incorporada una varilla de invar (aleación de Fe-Ni), que tiene la propiedad de no dilatarse con la temperatura (muy bajo coeficiente de dilatación). En los dos extremos de esta varilla se encuentran las señales, a las cuales se apunta con un teodolito. La mira o estadia va sujeta a un trípode, que permite la centración sobre el punto a medir, como así también consta de un nivel para verificar su horizontalidad, y un sistema de mira para lograr la perpendicularidad. La longitud de las miras, en la generalidad de los casos, es un entero de metro que puede variar de 1, 2 o 3 metros.

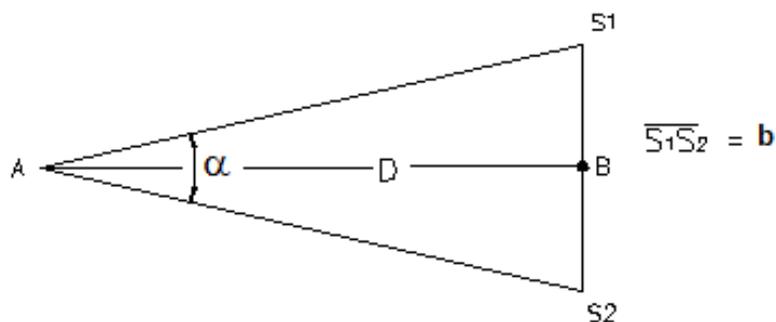
Figura 3.8: Estadia de invar



Representación gráfica de una estadia de invar o mira paraláctica

Para determinar la longitud "D" entre los puntos AB (A es la estación del teodolito y B es la posición de la mira paraláctica), se emplean un teodolito y la estadia con sus correspondientes trípodes.

Figura 3.9: Distancia horizontal con estadia de invar



Vista en planta de distancia horizontal AB con estadia de invar, mira base o mira paraláctica

Se estacionan el teodolito en A y la mira en B. Seguidamente se bisectan¹ S1 y S2 y se hacen las correspondientes lecturas, determinándose así el ángulo α "paraláctico". Cabe señalar que α es un ángulo diedro, entre 2 planos verticales, uno que contiene a la línea A-S1, y otro con la línea A-S2.

¹ En Topografía el término "bisección" se utiliza para indicar el punto donde se realiza la visual o puntería.

Entonces la distancia buscada D estará dada por la expresión:

$$D = b / 2 \cdot \cotg \alpha / 2$$

De la expresión surge que el valor de D depende directamente del valor del ángulo α . Por consiguiente, se debe tener el mayor cuidado en la medición angular. Es conveniente para lograr buenos resultados utilizar un teodolito de lectura de segundo ($1''$).

Medición electrónica de distancias

A mediados del siglo pasado se hizo posible la medición de distancias mediante “ondas”. Esta medición de ondas, ya sean de luz, electromagnéticas o de rayos láser ha hecho posible la fabricación de instrumentos electrónicos, los cuales, mediante un dispositivo permiten medir distancias.

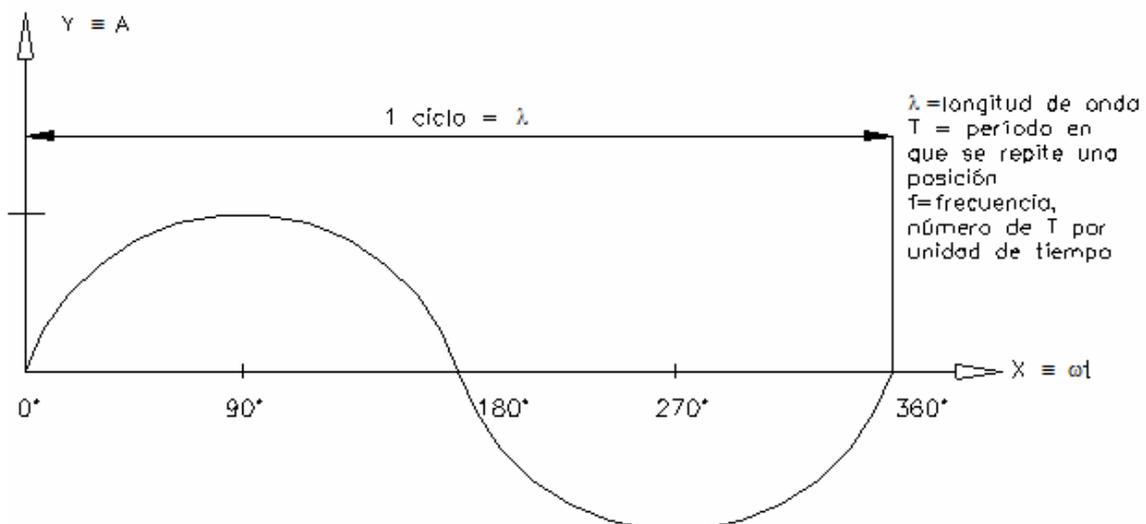
El primero de estos aparatos surgió de unos de los tantos intentos para mejorar la medición de la velocidad de la luz, fue presentado por el físico sueco Erik Bergstrand en el año 1948 y se denominó **Geodímetro**. Este aparato podía medir con precisión distancias de hasta 40 kilómetros, y transmitía una radiación visible, por lo que podía ser utilizada durante la noche.

A partir de este primer distanciómetro se han sucedido una innumerable cantidad de dispositivos electrónicos cada vez más precisos, de menor costo y tamaño, pero básicamente el principio de todos es la medición de ondas.

Fundamento de los distanciómetros

Para poder comprender el funcionamiento básico de estos aparatos, primeramente, se debe conocer cómo se comportan las ondas (Figura 3.10).

Figura 3.10: Ciclo de onda



Ciclo de una onda sinusoidal simple, donde: A (amplitud) es constante e igual a la distancia vertical entre una cresta o valle y el punto de equilibrio de la onda, λ (longitud de onda) es la distancia entre el mismo punto de dos ondulaciones consecutivas; T (período) es el tiempo en el que se completa λ ; f (frecuencia) es el número de períodos por unidad de tiempo, y ωt es el producto entre la frecuencia angular (ω) y el tiempo (t).

Si se considera que la posición de la onda está dada por la ecuación:

$$Y = A \cdot \text{sen } \omega t$$

Y que cuando transcurre un intervalo de tiempo adicional (Δt), la onda se desplaza a la posición:

$$Y_1 = A \cdot \text{sen } \omega(t + \Delta t)$$

Cuando se emite una onda, esta seguirá la siguiente de ecuación:

$$e_{\text{emitida}} = A \cdot \text{sen } \omega t$$

Esta misma onda, al llegar hasta un punto, es reflejada nuevamente hasta el punto origen y es recibida por un sistema electrónico. Indudablemente, la onda ha demorado un cierto tiempo (Δt) en recorrer el trayecto de ida y vuelta, por lo que tendrá la siguiente expresión:

$$e_{\text{recibida}} = A \cdot \text{sen } \omega(t + \Delta t)$$

Dado que una perturbación de onda simple varía tanto en el tiempo (t) como en la distancia (x), y esta última es función de su frecuencia angular (ω). Si se compara la onda emitida con la recibida se habrá producido una diferencia de fase ($\Delta\phi$), entendiendo a la fase como una situación instantánea en el ciclo, donde:

$$\Delta\phi = \omega \cdot \Delta t$$

Como Δt es función de la longitud que separa el emisor y el reflector (D) y de la velocidad a la que viajó ($c = 300.000 \text{ km/s}$), entonces:

$$\Delta t = 2 D/c$$

Si se reemplaza en la fórmula del desfasaje, se tiene que:

$$\Delta\phi = \omega \cdot 2D/c$$

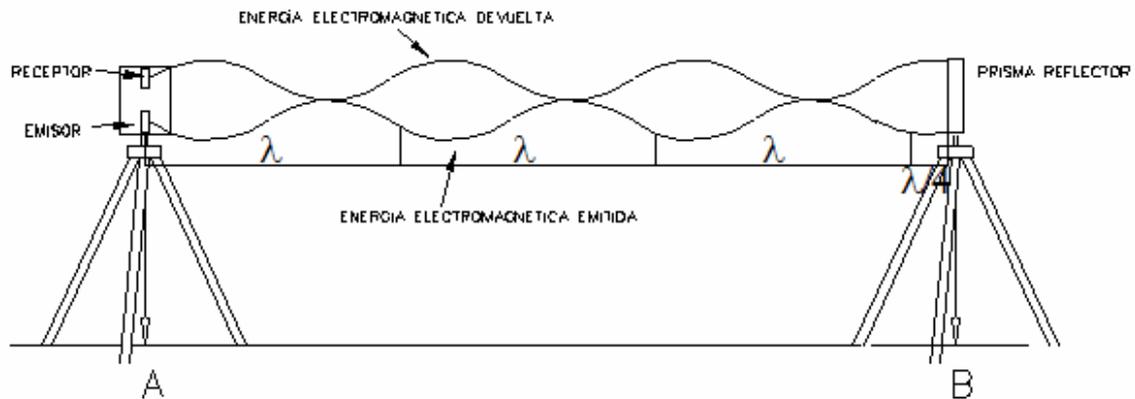
Finalmente, como: $\omega = 2\pi \cdot f$, y $f = c/\lambda$, la distancia D será función de la longitud de onda del aparato emisor y el desfasaje de la misma al regresar:

$$\boxed{D = \Delta\phi \cdot \lambda / 4\pi}$$

Aplicación a instrumentos de medición

En general los dispositivos de medición electrónica de distancias emiten una longitud de onda conocida, esta es reflejada por un prisma reflector que devuelve la señal al sistema receptor del aparato. Nótese, en la (Figura 3.11), que la distancia recorrida por la onda es exactamente el doble de la que separa al emisor del receptor y que la energía experimenta un cambio de fase de 90° , es decir de $\lambda/4$. Este cambio de fase es recibido en el sistema receptor, el cual compara la onda emitida con la recibida.

Figura 3.11: Distanciómetro electrónico



Por lo tanto, siguiendo el ejemplo gráfico (Figura 3.11), la distancia AB estará dada por 3 longitudes de onda completas, más 1/4 longitud de onda. Pero, como el camino AB fue recorrido en ida y vuelta, el sistema receptor del aparato registrará:

$$\overline{AB} = (3\lambda + \lambda/4) + (3\lambda + \lambda/4) \Rightarrow \overline{AB} = (6\lambda + \lambda/2) / 2$$

Generalizando la expresión:

$$\text{Distancia} = \frac{(n\lambda + \Delta\lambda)}{2}$$

Los aparatos registran los desfases de longitud de onda, pero no los números enteros de onda o los desfases de una longitud de onda completa (360°). Por este motivo, los aparatos envían señales adicionales combinando diferentes frecuencias y longitudes para eliminar esta ambigüedad.

Lo descrito precedentemente es el principio básico, dándose en la realidad otras especificaciones y características técnicas de cada tipo de aparato y fabricante. Existen sistemas de medición donde ambos sistemas funcionan alternativamente como emisor – receptor, aunque los topográficos generalmente utilizan el sistema descrito.

Medición angular

Para la medición de ángulos se utilizan instrumentos denominados **goniómetros** (medidores de ángulos), los cuales se clasifican en:

- Goniómetros de **ángulo fijo**: son aquellos que permiten determinar un ángulo específico como 45° , 90° o 180° (escuadras ópticas)
- Goniómetros de **ángulo variable**: permiten determinar ángulos que pueden variar de 0° a 360° (brújula forestal, sextante, teodolito, nivel taquímetro).

Medición angular expeditiva

La medición angular expeditiva tiene un gran campo de aplicaciones dentro de las diversas ciencias (geología, hidrología, agronomía, etc.), ya que en numerosos casos no se requiere una precisión geométrica muy rigurosa. En el caso de las tareas agronómicas, se pueden citar algunos ejemplos:

- Delimitación planimétrica de zonas inundables, bosques, etc.
- Determinación de alturas de árboles, silos, etc.
- Mapeo de usos de suelos, vegetación espontánea, etc.
- Ubicación de macizos umbrosos, plantaciones o construcciones (galpones para criaderos, viveros, etc.) que requieran orientación respecto al Norte.
- Ubicación de embarcaciones en cursos de agua para aforo con fines de aprovechamiento para riego.

Escuadras ópticas

La Escuadra Óptica es un Goniómetro, que permite el levantamiento de direcciones perpendiculares. Su funcionamiento se basa en las leyes de la reflexión y de refracción, dando origen a diversos tipos de escuadras, entre las cuales se pueden nombrar tres tipos principales:

- **Escuadra de agrimensor** (Figura 3.12a): es un tubo de sección cilíndrica u octogonal que se apoya en un soporte y permite determinar ángulos de 45° y 90° con una precisión máxima de $15'$.
- **Escuadra de espejos**: se fundamenta en la reflexión de la luz en dos espejos permitiendo levantar y bajar perpendiculares (90°). No requiere soporte (se sostiene a mano alzada y posee una plomada que indica la dirección vertical) siendo su error de aproximadamente $10'$
- **Escuadra de prismas**: se fundamenta en la refracción de la luz al pasar por prismas. Son las más precisas ($1-2'$) y las del tipo pentaprisma doble (Figura 3.12b), permiten alinearse (determinar ángulos llanos) y levantar o bajar perpendiculares.

Figura 3.12: a: Escuadra de Agrimensor

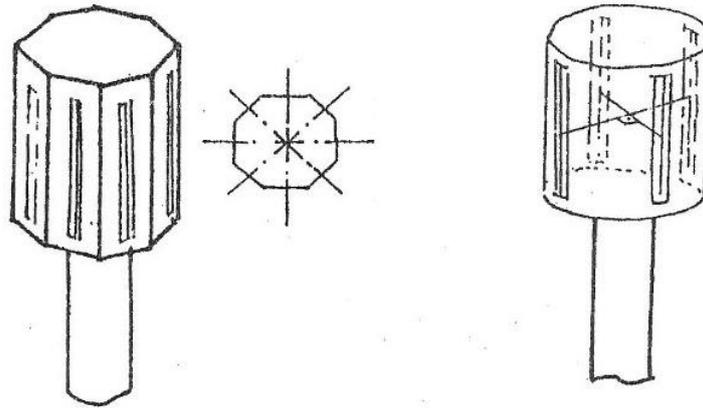
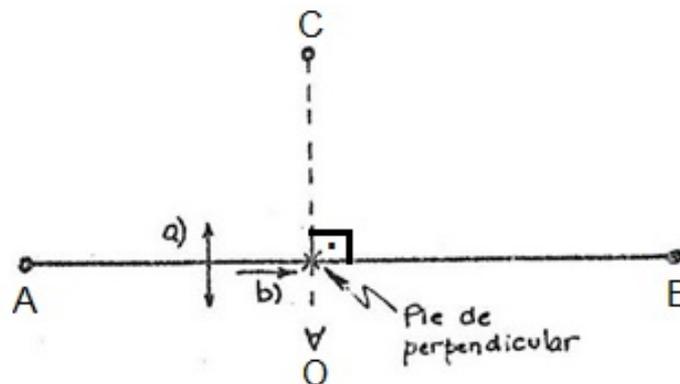


Figura 3.12: b: Pentaprisma Doble



La operación es sencilla, debiendo el operador ("O") hacer uso de una alineación con jalones para determinar las direcciones "A", "B", o "C", según la Figura 3.13.

Figura 3.13: Operación con escuadra óptica



Se puede emplear para realizar diversos tipos de levantamientos, los cuales se desarrollarán en los Capítulos 4 (levantamiento por coordenadas rectangulares) y 5 (Nivelación areal por cuadrícula).

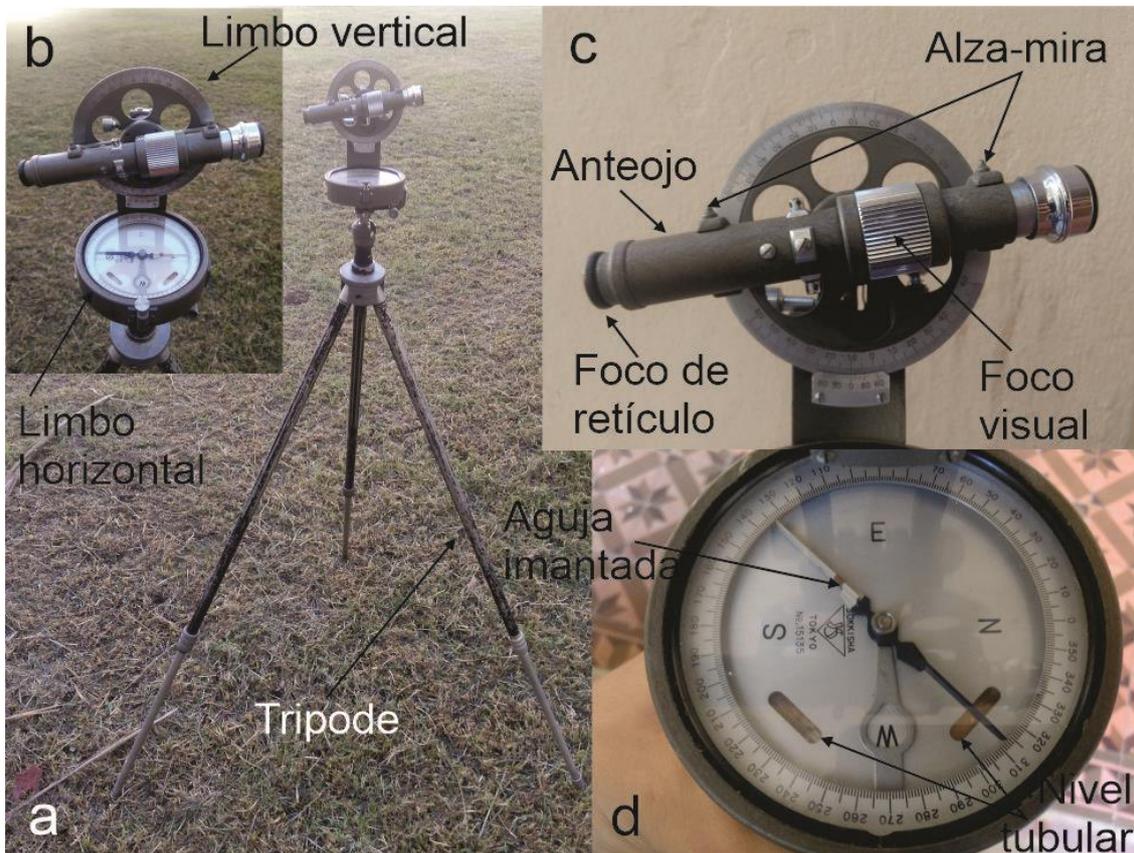
Brújula

La Brújula es un goniómetro, cuya característica es la de permitir determinar direcciones con respecto al Polo Norte Magnético.

Es un instrumento muy utilizado para trabajos forestales, picadas, y posicionamiento en general. Hay diversos tipos de brújulas, pero básicamente consisten en una aguja imantada apoyada en un pivote, y contenida en una caja, que posee el borde graduado.

La precisión alcanzable depende del tipo de brújula, logrando valores de apreciación de 15' a 30' en las más precisas, que son aquellas que vienen provistas de un anteojo móvil, que permite la medición de ángulos horizontales y verticales (Figura 3.14).

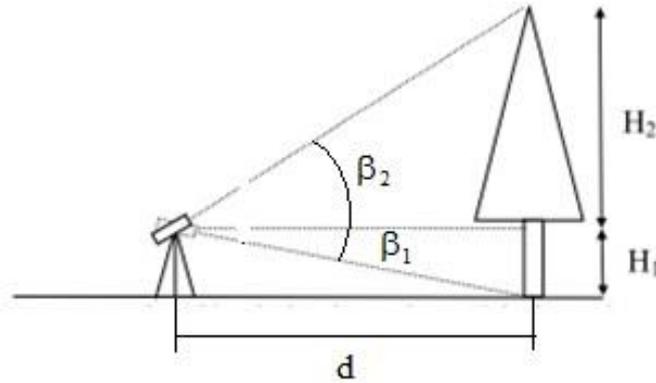
Figura 3.14: Brújula forestal



a. brújula forestal en posición de trabajo sobre su trípode; b: detalle de brújula mostrando limbo vertical solidario al anteojo astronómico, perpendicular al limbo horizontal; c: Limbo vertical, solidario al anteojo astronómico, que se encuentra parcialmente graduado en grados sexagesimales y permite determinar los ángulos de elevación (o de depresión) respecto al horizonte para una determinada visual; d: limbo horizontal graduado en grados sexagesimales, aguja imantada que actúa de índice sobre el limbo graduado móvil y se alinea respecto a los Polos Norte y Sur Magnéticos, dos niveles tubulares dispuestos a 90° para horizontalizar el instrumento y freno de agujas para trasporte.

Al medir los ángulos verticales y la distancia que separa a la brújula de un determinado objeto, puede determinarse la altura del objeto (Figura 3.15). Esta aplicación es utilizada por los Ingenieros Forestales para cubicar recursos forestales, o sea estimar los m^3 de madera que puede brindar un bosque, monte o plantación forestal. Conociendo la altura de los ejemplares, su diámetro y el número de individuos por hectárea se puede estimar el volumen (en m^3/Ha) de madera que puede brindar el recurso. Debido a esto al instrumento se lo denomina “**Brújula Forestal**”.

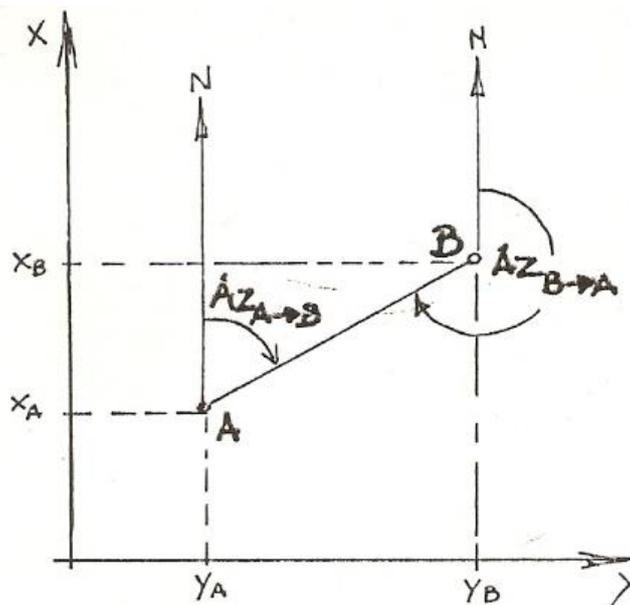
Figura 3.15: Determinación de la altura de un árbol con la Brújula Forestal



$$H = H_1 + H_2 = d \cdot \operatorname{tg} \beta_1 + d \cdot \operatorname{tg} \beta_2 = d (\operatorname{tg} \beta_1 + \operatorname{tg} \beta_2)$$

La lectura sobre el **limbo horizontal** de la brújula permite conocer el ángulo que forma una determinada dirección con la dirección del Norte magnético medido en sentido horario. A dicho ángulo se lo denomina **Azimut** o Acimut y se lo simboliza con las letras Az (Figura 3.16). El Azimut de una dirección permite conocer la orientación de un lado de un determinado lote o polígono con respecto al Norte.

Figura 3.16: Acimutes de las direcciones AB y BA



$Az_{A \rightarrow B}$ se lee como “Azimut de A hacia B”. Nótese que es imprescindible mencionar el sentido con el orden de las letras (por ejemplo, $A \rightarrow B$). Al inverso se lo llama Azimut recíproco del lado $A \rightarrow B$, o bien azimut $B \rightarrow A$ ($Az_{B \rightarrow A}$). De la Figura 3.16, se obtiene la siguiente expresión:

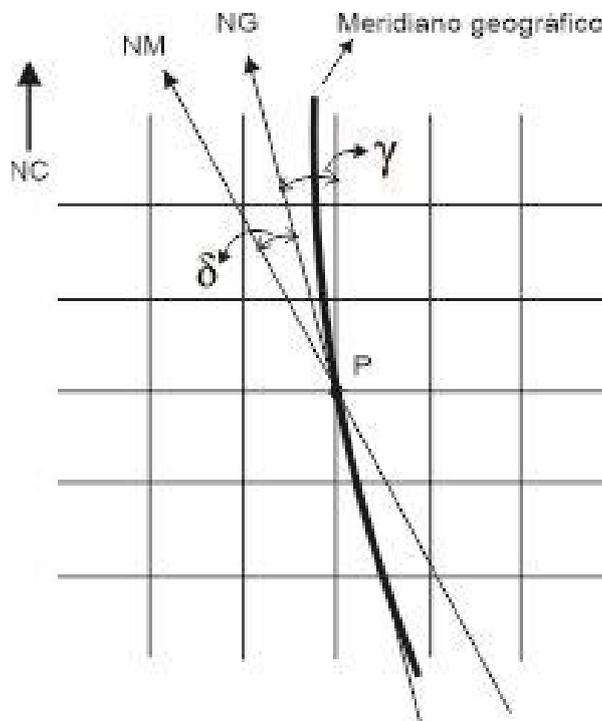
$$Az_{A \rightarrow B} = \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x} = \arctg \frac{(y_B - y_A)}{(x_B - x_A)}$$

Por lo tanto, con la Brújula se mide el ángulo que forma una determinada dirección respecto al Norte Magnético (NM), el cual se encuentra próximo al Polo Norte Geográfico, pero no coincidente con él. Como la posición del NM no es fija, el Azimut Magnético tampoco lo es y debe sufrir una transformación para obtener el Azimut Verdadero o Geográfico, que no varía en el tiempo y el espacio.

Convergencia de meridianos

Cuando se trabaja con Cartas Topográficas, además del Norte Geográfico (NG) y el Norte Magnético (NM), es posible distinguir un tercer norte, el Norte de Cuadrícula (NC). En virtud de los distintos Nortes, es posible definir a la Convergencia de Meridianos (γ) como el ángulo formado entre las direcciones del NG y NC para un punto determinado (P). Puede adoptar valores positivos si el NC se encuentra a la derecha del NG ($+\gamma$) o negativos si se encuentra a la izquierda ($-\gamma$) (Figura 3.17).

Figura 3.17: Tres Nortes



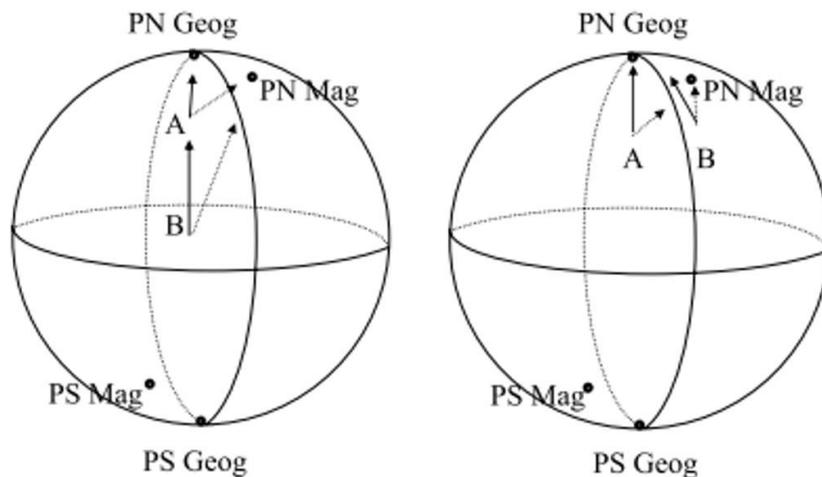
Porción de Carta Topográfica con una línea gruesa y curva que representa el meridiano geográfico que pasa por el punto P. La línea tangente a P simboliza el NG. El NM se define mediante la dirección de una aguja imantada situada en P.

Declinación Magnética

Los Polos Norte y Sur Magnéticos del planeta no coinciden con los polos Norte y Sur Geográficos (que son los polos definidos por el eje a través del cual la Tierra realiza su movimiento de rotación). Además, los polos magnéticos varían su posición a lo largo del tiempo. Al ángulo que se forma entre el Polo Norte Geográfico y el Polo Norte Magnético en un determinado lugar se lo denomina **declinación magnética** del lugar y se lo representa con la letra griega δ (Figura 3.17).

El valor de la declinación magnética varía con el tiempo (recuérdese que los polos Norte y Sur magnéticos se está desplazando constantemente) y también varía en el espacio para un mismo momento. En la (Figura 3.18) se han representado los polos geográficos (PN Geog) y magnéticos (PN Mag) en el planeta para un momento dado. Se observa que la declinación magnética varía con la latitud para dos puntos ubicados sobre un mismo meridiano terrestre ($\delta_A > \delta_B$), mientras que cuando los puntos se ubican sobre un mismo paralelo, la declinación varía con la longitud ($\delta_A > \delta_B$).

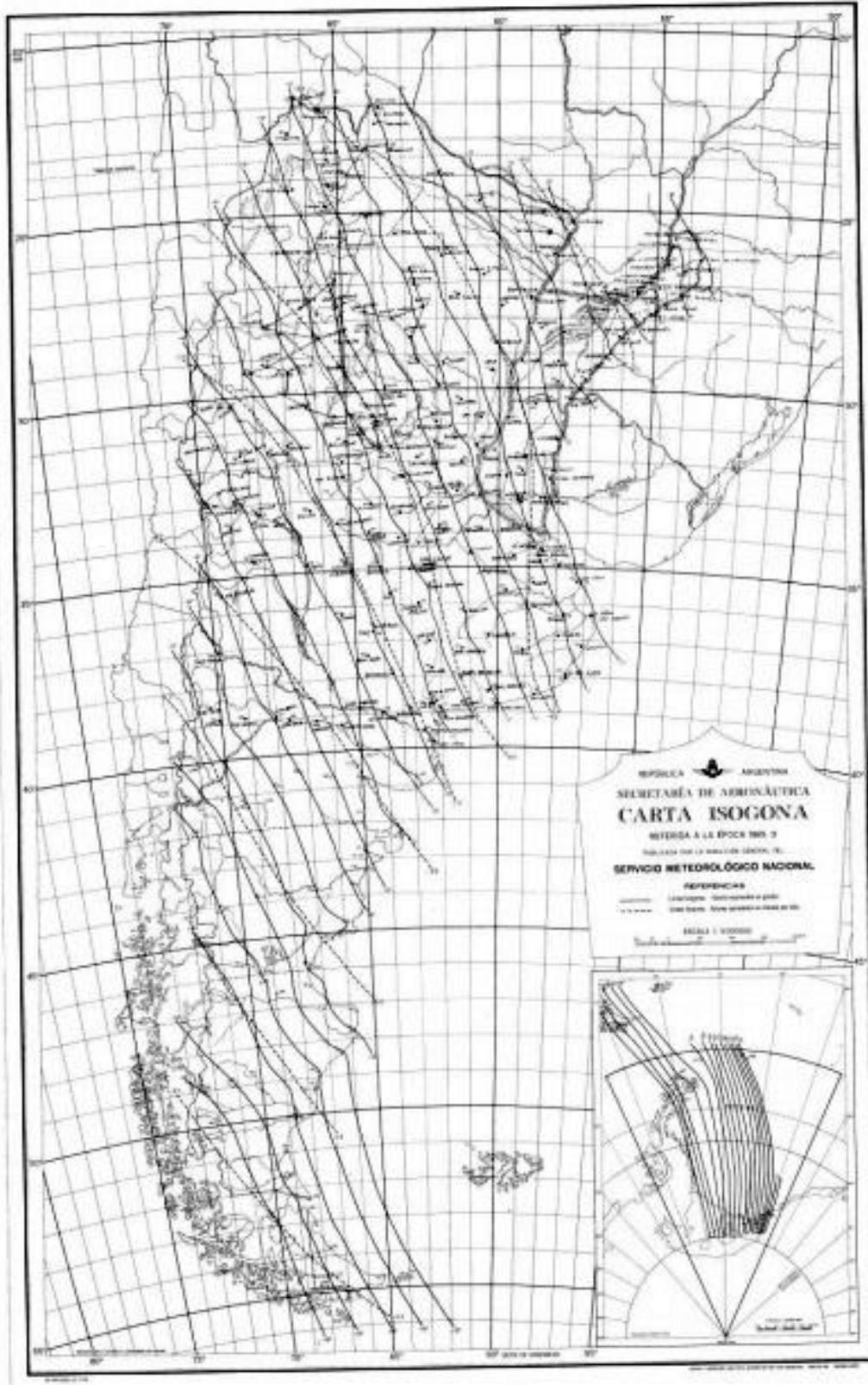
Figura 3.18: Variación espacial y temporal de δ



La variación de δ a lo largo del tiempo sigue parámetros seculares, anuales, mensuales y diarios. La variación secular se debería a una rotación continua y uniforme del eje magnético alrededor del geográfico que demanda un período de 740 años siguiendo una ley sinusoidal. Las variaciones anuales tendrían relación con el número de manchas solares. La variación diaria no es constante siendo mayor en verano que en invierno. También existen variaciones locales debidas a la presencia de yacimientos ferromagnéticos en las proximidades o elementos metálicos como construcciones de hierro, torres de alta tensión, columnas de alumbrado eléctrico e inclusive elementos metálicos pequeños que puede portar el operador como anillos y llaves. Para conocer la declinación magnética de un lugar y debido a que los polos magnéticos están constantemente en movimiento se elaboran periódicamente (cada 5 años, en los años terminados en 0 y 5) **Cartas Isógonas**, en las cuales se presentan 2 familias de isolíneas: a) líneas que unen puntos con la misma declinación magnética, denominadas “**isógonas**” y se las representa con trazo continuo; líneas que unen puntos con igual variación anual de la declinación, llamadas “**isóporas**”, representadas con trazo

discontinuo. Con la ayuda de estas cartas es posible determinar la declinación magnética en un determinado lugar y para una determinada fecha (Figura 3.19).

Figura 3.19: Carta Isógona para la República Argentina



Para determinar la δ en un lugar y tiempo determinado, se debe interpolar los valores de las curvas isógonas e isóporas. Obtenida de esta forma el valor de δ , se podrá calcular el **Acimut Geográfico** para un punto determinado de la superficie terrestre como el producto de la suma algebraica entre la declinación magnética obtenida y el acimut magnético medido con brújula. El valor del Acimut Geográfico, también conocido como Azimut Verdadero, permanecerá invariable en el tiempo.

Dado que la variación diurna de la declinación magnética puede llegar a ser de 15' para un mismo punto, su apreciación es de ese orden (15' a 30').

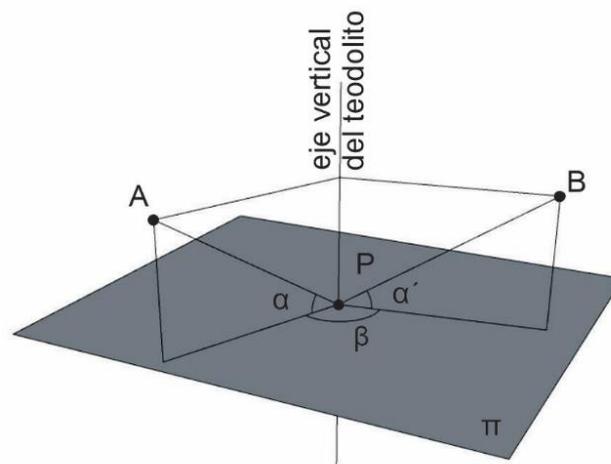
Medición angular con teodolito

El teodolito es propiamente un goniómetro capaz de medir **ángulos verticales** (nadirales, cenitales, ascendentes o descendentes) y **ángulos horizontales** (o acimutales), como así también **distancias** por estadimetría.

Etimológicamente hablando, el termino Teodolito adquiere distintas traducciones. La más extendida es que deriva de los vocablos griegos *théan* (mirar, contemplar), *hodós* (camino) y *litós* (suave, liso, llano), algo así como "mirar el camino llano", aunque no se corresponde completamente con la funcionalidad de este instrumento y suele asociárselo también a los vocablos *tópos* (lugar) y *graphia* (escribir).

En la Figura 3.20 se grafican ángulos verticales y horizontales cuando el instrumento se encuentra estacionado en el punto P. Los ángulos verticales α son **ángulos planos**, que se encuentran en los planos verticales, que resultan ortogonales al plano horizontal π . El ángulo horizontal β es un **ángulo diedro**, y se mide en el plano π .

Figura 3.20: Planos que contienen al vértice P

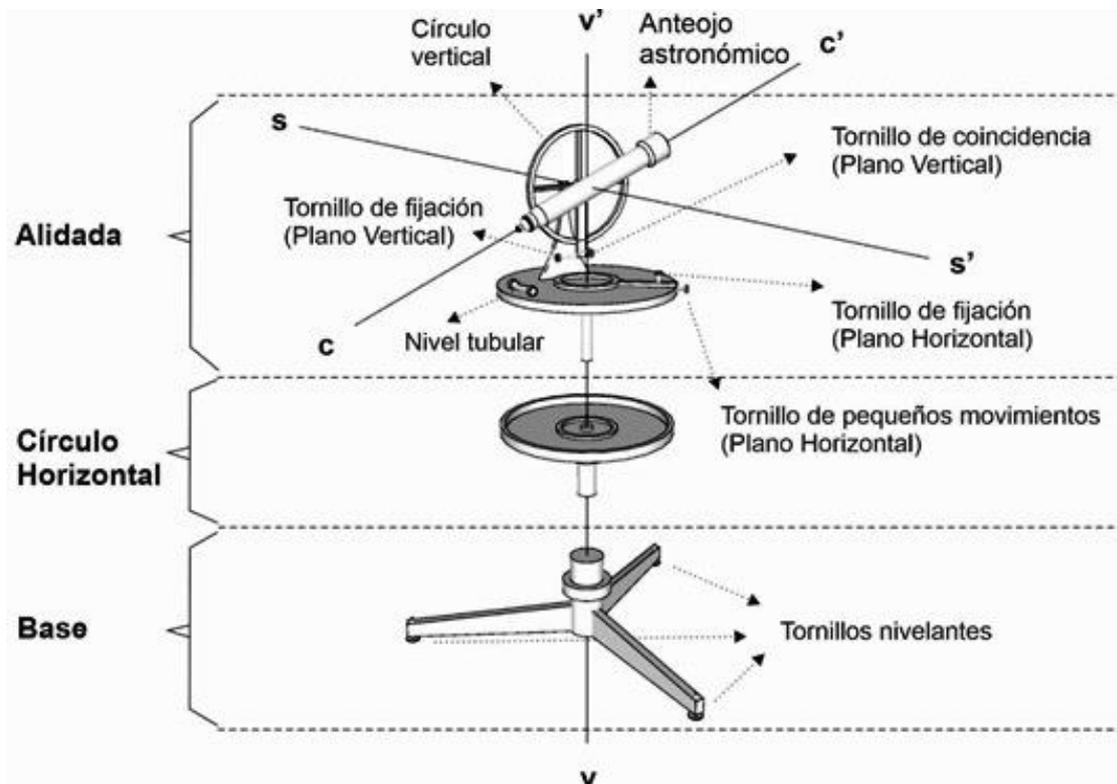


Los ángulos verticales α y α' (ángulos verticales ascendentes) serán los formados entre las direcciones inclinadas PA y PB respecto al plano horizontal que contiene a P (π), mientras que el ángulo horizontal β , será el formado entre las líneas de intersección de los planos verticales que pasan por PA y PB y el plano horizontal π .

En su constitución básica, el teodolito se compone de 4 partes principales (Figura 3.21):

- **Alidada:** Parte móvil que gira sobre el círculo horizontal, alrededor del eje vertical de rotación (vv'). Lleva los índices de lectura del teodolito y el nivel tubular del círculo horizontal. Su fijación se realiza mediante el tornillo de fijación y los movimientos de colimación por el tornillo de coincidencia o pequeños movimientos.
- **Círculo horizontal:** Círculo graduado fijo acimutal que posibilita la medición de ángulos horizontales. En los teodolitos, el círculo horizontal gira sobre el eje vertical (vv'), y posee un tornillo de presión para su fijación y uno de pequeños movimientos para colimar.
- **Base:** Plataforma compuesta de 3 tornillos nivelantes que permiten su horizontalización. Ésta apoya directamente sobre el trípode, situado en el punto de estación desde el que se realizarán las visuales y mediciones.
- **Anteojo.** Se trata de un anteojo astronómico montado sobre la *Alidada*, solidario a un *círculo vertical* (círculo cenital, de alturas o eclímetro) que define el plano sobre el cual se mueve. El movimiento en el plano vertical, junto al propio de la alidada, permiten apuntar (colimar) a cualquier punto en el espacio. La fijación del anteojo se realiza mediante el tornillo de fijación en el plano vertical, mientras que los pequeños movimientos de colimación se realizan con el *tornillo de coincidencia*.

Figura 3.21: Partes de un Teodolito

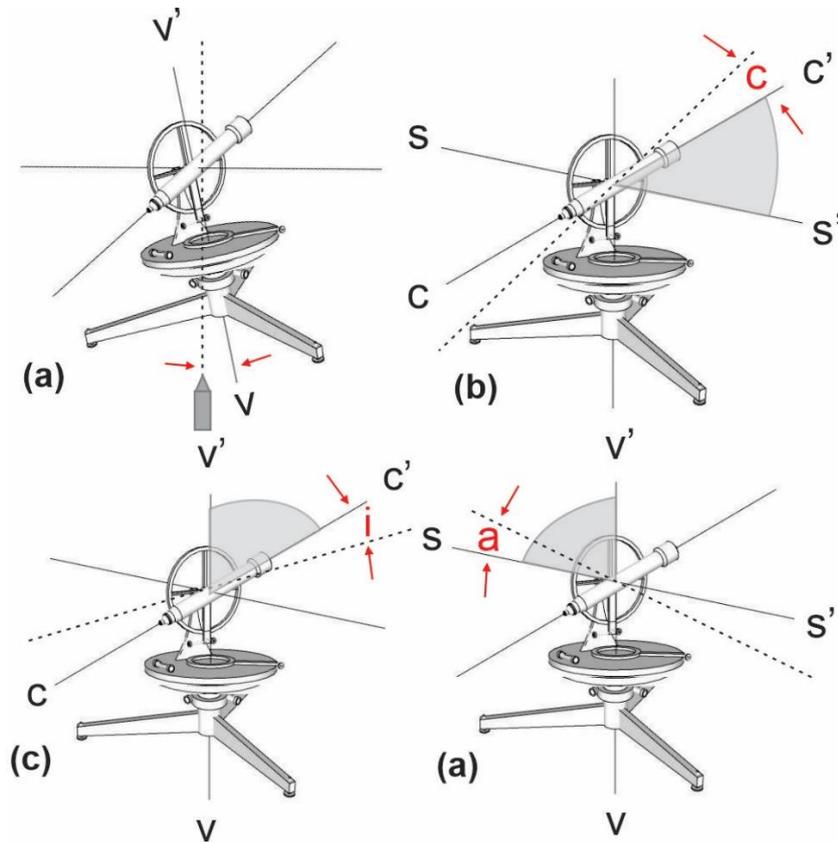


Condiciones de funcionamiento y errores asociados

Como cualquier goniómetro, el teodolito requiere la verificación de una serie de requisitos para su correcta utilización. De no verificarse estas condiciones, se incurriría a una serie de errores instrumentales (Figura 3.22):

- El eje vertical debe ser absolutamente vertical ($v-v'$). La no verificación de este requisito provoca el error de inclinación del eje vertical, el cual no puede ser corregido por el operario, siendo consecuencia de algún golpe en el instrumento.
- El eje de puntería o colimación ($c-c'$) debe ser perpendicular a la dirección del eje horizontal o secundario ($s-s'$). Esta condición se asocia al error de colimación (c)
- El eje horizontal ($s-s'$) debe ser perpendicular al eje vertical ($v-v'$). De no verificarse, tiene lugar el error de eje secundario o de inclinación (a)
- El círculo vertical debe marcar cero al apuntar al cenit (en teodolitos cenitales). Si esto no se cumple estamos en presencia de un error de índice vertical (i)

Figura 3.22: Errores en Teodolito



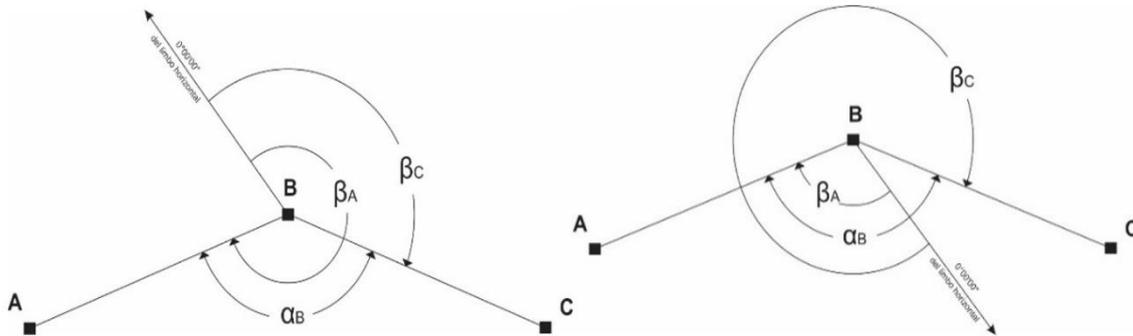
*a: error de eje vertical, b: error de colimación (c); c: error de índice vertical (i);
d: error de eje secundario o de inclinación (a)*

Método simple

Si se desea establecer el ángulo horizontal entre dos direcciones (por ejemplo, ángulo α), el método de aplicación más sencillo es el llamado método simple que consiste en dirigir visuales

en ambas direcciones (BC y BA) y restar los valores angulares de ambas lecturas para obtener el ángulo buscado (Figura 3.23).

Figura 3.23: Método Simple



*El valor cero del limbo vertical puede estar por fuera del ángulo buscado ($\alpha_B = \beta_A - \beta_C$)
o por fuera ($\alpha_B = \beta_A - \beta_C + 360^\circ$)*

El método establece que una vez estacionado el Teodolito en un punto cualquiera B, si se desea determinar el ángulo (α) ubicado entre las direcciones BC y BA, debemos ubicar señales en los extremos de estas direcciones (1 jalón en A y otro en C). Luego, se bisecta al jalón ubicado más a la izquierda (el C), apuntado a su parte inferior visible para evitar el error de falta de verticalidad de la señal, y se lee el valor angular de la dirección BC. Se realiza una segunda visual y lectura en la dirección BA (bisectando el jalón ubicado en A) y, finalmente, se restan ambas lecturas para obtener el ángulo buscado (α_B).

El método simple presenta como ventaja su rapidez, pero tiene la desventaja de que no elimina las influencias de los errores instrumentales (excentricidad, inclinación, colimación), y además no pone de manifiesto los posibles errores groseros del operador

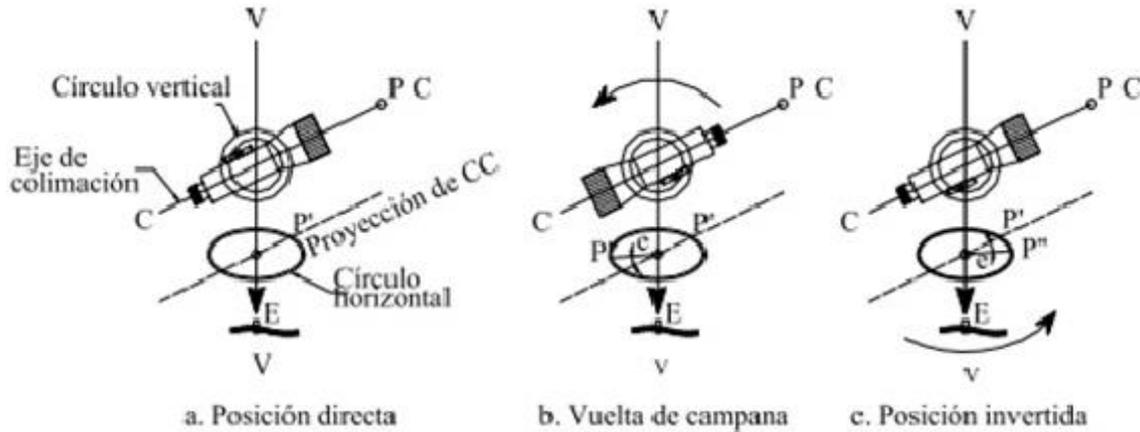
Método de Bessel

El método o regla de Bessel consiste en leer cada dirección en las dos posiciones del instrumento, obteniéndose el ángulo final por diferencia de promedio en las mediciones. Básicamente, es el método simple aplicado 2 veces, una con círculo vertical a la izquierda del anteojo (se llama círculo vertical izquierda a la posición del limbo vertical respecto al lente) y la otra con el círculo vertical a la derecha de este.

La operación se inicia con el círculo vertical en posición izquierda, leyendo el valor angular referido a la dirección BC (Figura 3.24). Cabe consignar que se puede provocar en el limbo un valor angular cercano al 0 (tanto en teodolitos repetidores como reiteradores). A continuación, se girará el anteojo hasta buscar la señal en B y se leerá el valor angular correspondiente a la dirección BA, ambos valores serán las lecturas de Círculo Izquierda (CI). Se proseguirá efectuando la maniobra de vuelta de campana (Figura 3.24), es decir, se girará el anteojo alrededor del eje secundario de forma que el círculo vertical quede a la derecha del anteojo. En estas condiciones, se bisectará nuevamente el jalón en A y luego en B, registrando las lecturas correspondientes como lecturas de Círculo Derecha (CD). Finalmente, por cada dirección se tendrán

ahora dos lecturas, que diferirán entre ellas en 180°, debido a la vuelta de campana, y se admitirá además una discrepancia máxima de 2' (dos minutos) entre ambas. En caso de existir estas diferencias entre lecturas, se promediará entre ambas direcciones de tal forma que la diferencia de dichos valores corregidos arroje exactamente 180°. El ángulo deducido para el vértice B, surgirá como la diferencia entre las lecturas promedio.

Figura 3.24: Maniobra de vuelta de campana



Maniobra de vuelta de campana, adaptado de M. Casanova (2002).

A continuación, se indica una planilla tipo para la obtención de ángulo interno en B por el Método de Bessel (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Planilla de levantamiento por método de Bessel

Punto Estación	Punto Visado	Lecturas		Promedio Lecturas	Ángulo Deducido	Ángulo Corregido
		C.I.	C.D.			
B	C	01° 12'	181° 21'	01° 21'	21° 08'	
	A	22° 30'	202° 28'	22° 29'		

En el caso de trabajar con un polígono cerrado de “n” lados, la sumatoria de los ángulos corregidos (α_i) deberá verificar la condición de cierre angular:

$$\sum \alpha_i = \pi (n - 2) = 180^\circ (n - 2)$$

La verificación de esta misma condición para los Ángulos Deducidos es lo que nos permite hallar el error total de la medición (E). Por ejemplo, el cierre angular para un polígono de 4 lados es de $360^\circ = 180^\circ * (4-2)$. Si la sumatoria de los ángulos deducidos fuera igual a $359^\circ 59' 50''$, el error total será de $-10''$ (segundos). Este error, se deberá comparar con la tolerancia angular, que dependerá de la precisión del instrumento utilizado (a) y el número de lados del polígono (n), según:

$$T = 3 * a \sqrt{n}$$

Luego, verificada la condición $E \leq T$, la corrección total será de la misma magnitud del error pero con signo contrario. Esta corrección (c), dividida por el número de lados del polígono (n), se aplicará a cada ángulo deducido para obtener los Ángulos Corregidos o definitivos.

$$c = -E / n$$

Se concluye que con la aplicación del método de Bessel se compensan los errores axiales de inclinación de eje de colimación y de eje secundario, así como el de excentricidad de la alidada. A la vez, permite eliminar errores groseros (equivocaciones) del operador y posible error de arrastre del limbo.

Medición de desniveles

Aunque existen diversos instrumentos para medición de desniveles, aquí se describe el clásico Nivel de Anteojo.

Nivel de anteojo

El **Nivel de Anteojo** o **Equialtímetro** consta de un anteojo astronómico, similar al del teodolito, vinculado a un nivel tubular.

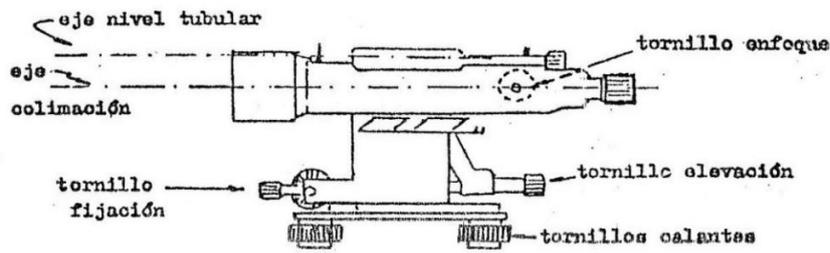
El conjunto Nivel-Anteojo se apoya sobre un trípode, cuya platina se puede horizontalizar mediante tornillos calantes (Figura 3.25). También cuenta con tornillos de fijación y de pequeños movimientos en el sentido horizontal.

El "Tornillo de elevación" le permite realizar pequeños ajustes verticales del conjunto anteojo-nivel, operación denominada "calaje del nivel".

Durante su operación, el anteojo describe un plano horizontal mediante su visual, llamado "Plano Visual".

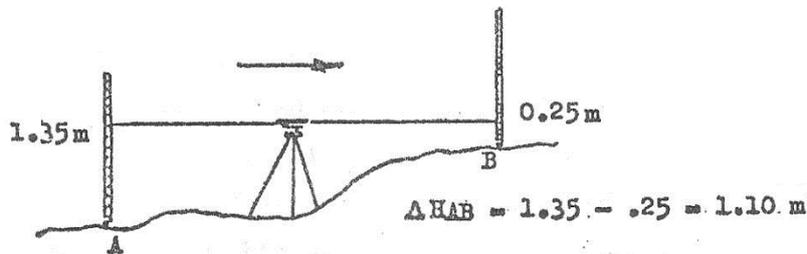
La intersección de la visual con las miras brinda la posibilidad de efectuar lecturas sobre ellas, destinadas a la obtención de los Desniveles.

Figura 3.25: Nivel de Anteojo



El desnivel se obtiene como diferencia entre las lecturas realizadas entre el "Hilo Medio" de la Mira Atrás (considerando el sentido de avance de la nivelación) y el correspondiente de la Mira Adelante:

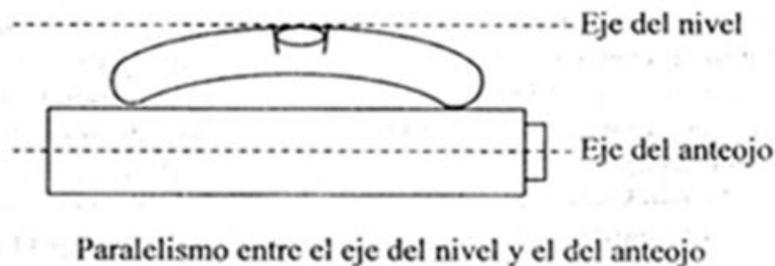
Figura 3.26: Desnivel entre 2 puntos A y B (ΔH_{AB})



En los niveles se pueden distinguir tres ejes:

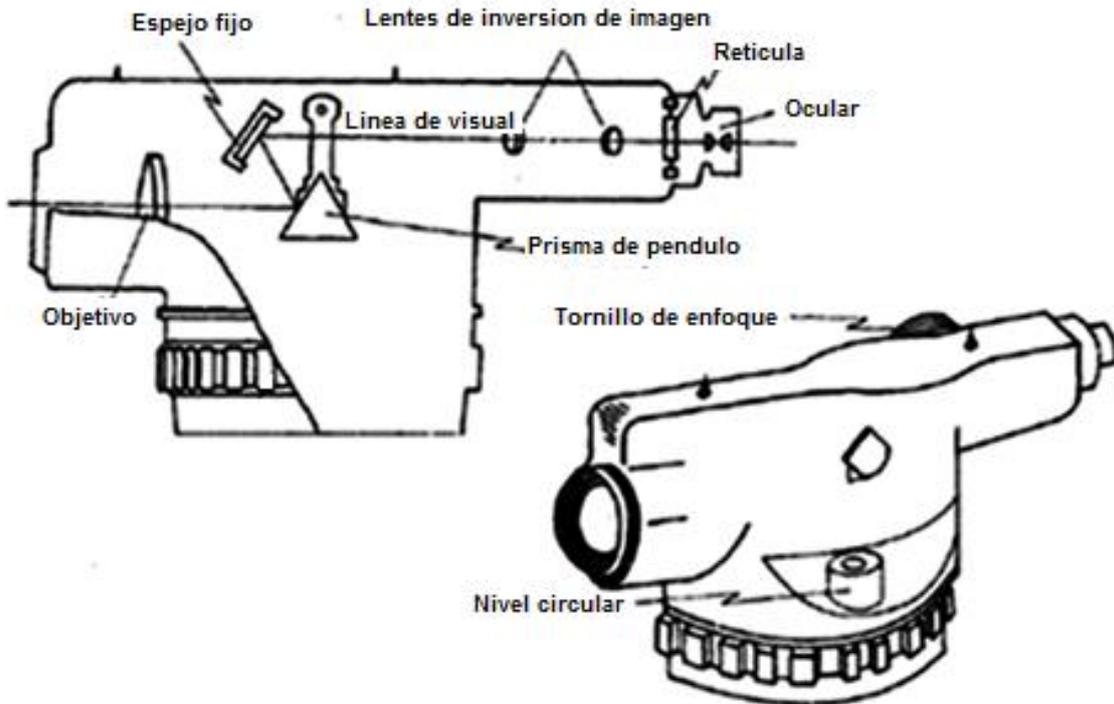
- Eje de rotación del aparato, es un eje alrededor del cual gira el aparato, debe estar en posición vertical. Esto se logra con el calado de nivel esférico. Es un eje material.
- Eje de la visual, o eje de la colimación, es un eje óptico determinado por el centro óptico de la lente objetiva y el centro óptico de la lente ocular y pasa por el centro del retículo.
- Eje del nivel, es una tangente a la burbuja del nivel tubular y cuando dicha burbuja está calada, la tangente es horizontal. La condición que debe cumplirse es que el eje del anteojo y el eje del nivel, en la posición de trabajo del instrumento, sean paralelos (Fig.3.27).

Figura 3.27: Ejes de colimación y del nivel tubular



Actualmente casi todos los niveles son de tipo **Automáticos**, en los cuales el eje del anteojo o de colimación se horizontaliza automáticamente mediante un compensador óptico suspendido como un péndulo, que se interpone en el camino de la visual a través del anteojo. Lo que se logra en definitiva es la horizontalización de la visual (Fig. 3.28).

Figura 3.28: Sistema de horizontalización automática, de tipo pendular



Este sistema constituido generalmente por espejos y prismas, para que pueda funcionar, es necesario que se encuentre centrada la burbuja de un nivel esférico ubicado en la base del instrumento, puesto que esto garantiza una horizontalidad mínima como para evitar que el péndulo toque o roce contra alguna pared interna del nivel. Estos niveles automáticos no poseen nivel tubular, por lo tanto se cala una única vez la burbuja del nivel esférico para cada estación del instrumento, ganando así precisión y un importante tiempo de operación.

Miras

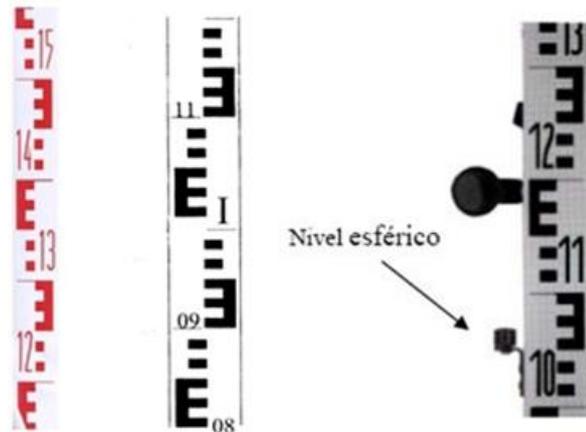
Las miras son reglas graduadas sobre las cuales se efectúan las lecturas con el nivel. Se fabrican en madera o metálicas (aleación de aluminio). Estas últimas, las metálicas, han desplazado a las de madera, por ser más livianas, resistentes y durables. Generalmente son telescópicas, es decir, se introducen los tramos que la constituyen unos dentro del otro, siendo fáciles de transportar.

Su longitud varía entre los 3 y 5 metros y están graduadas en centímetros. Las hay milimetradas, las cuales se utilizan para nivelaciones de gran precisión.

El esquema de graduación de las miras tradicionales es a través de una letra E cada 5 cm, representando cada pata de la letra 1 cm, se encuentran numeradas cada decímetro (10 cm). Por lo general alternan cada metro el color de las letras entre el rojo y el negro. La graduación comienza desde el cero que siempre se encuentra en la parte inferior de la mira (apoyo sobre el suelo).

En los trabajos de nivelación se suele tomar las lecturas al milímetro, esto se logra estimando la décima del centímetro.

Figura 3.29: Miras



Miras de visual directa.

A estas miras se les puede adosar un nivel esférico para garantizar la verticalidad de las mismas (Figura 3.29).

Cuando se quiere lograr una mayor precisión en el trabajo, las miras por lo general no se apoyan sobre el terreno natural, sino sobre una pequeña plataforma metálica llamada “Sapo” (Figura 3.30), el cual posee tres pequeñas patas que se clavan en el terreno.

Figura 3.30: Sapo o base de apoyo de mira

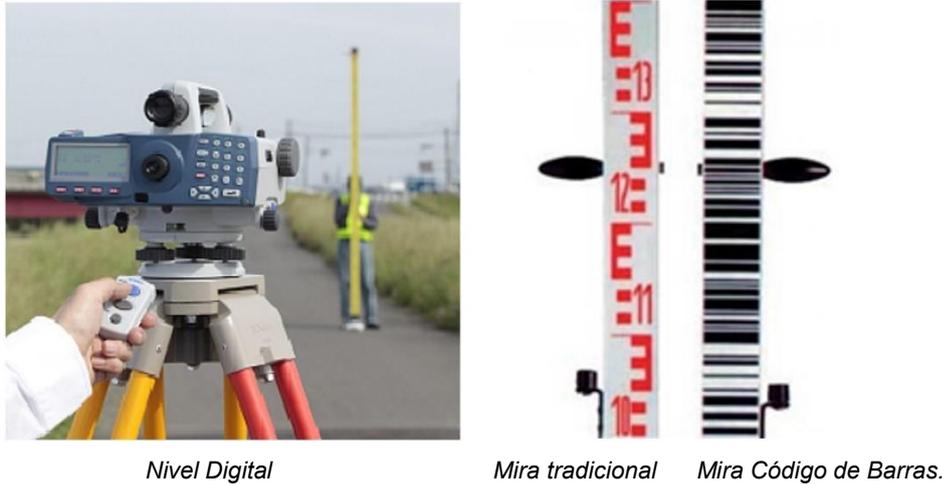


En la parte superior el sapo presenta una saliente sobre la cual se apoya la mira y permite girarla cuando se pasa de lectura adelante a lectura atrás (se verá más adelante). El uso del sapo evita que se produzcan hundimientos de la mira en el terreno.

En la actualidad existen Niveles Automáticos de tipo **Digital** en donde las lecturas se visualizan en una pantalla (Figura 3.31). Estos aparatos poseen una memoria que permite ir almacenando datos del levantamiento.

Las miras utilizadas están grabadas con un código de barras.

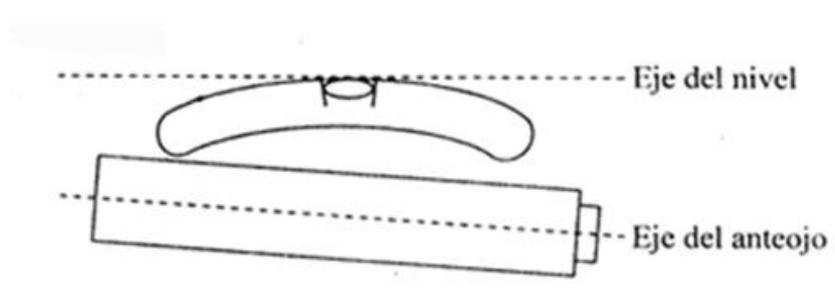
Figura 3.31: Nivel Digital y miras



Errores instrumentales

Los errores sistemáticos son: error de colimación o error principal del nivel, error de cruce, error por falta de verticalidad de las miras, error por hundimiento progresivo de las miras.

Figura 3.32: Error de colimación



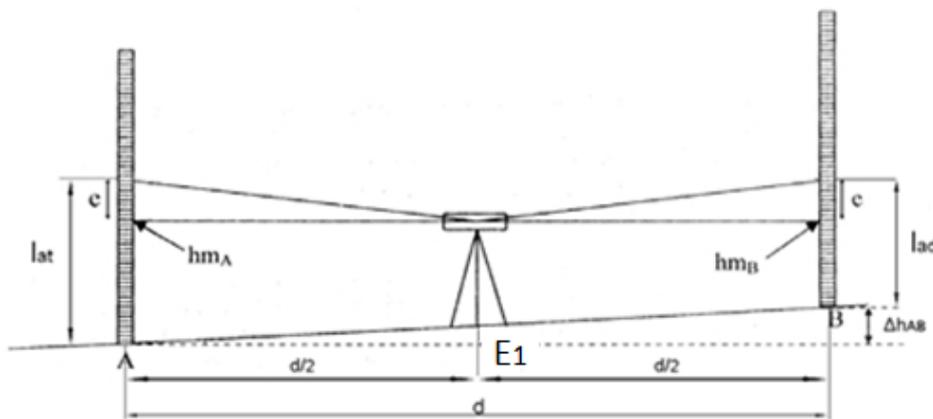
- **El Error de colimación:** consiste en la falta de paralelismo entre el eje del nivel y el eje del anteojo considerando una proyección sobre un plano “vertical”, es el principal error a tener en cuenta.
- **El Error de cruce:** es la falta de paralelismo entre el eje de nivel y el eje de anteojo, pero considerando ahora una proyección sobre un plano “horizontal”. No es un error de importancia en las nivelaciones topográficas.

- **El Error por falta de verticalidad de las miras:** se puede evitar si adicionamos a las mismas un nivel esférico que garantice la verticalidad de dichas miras.
- **El Error de hundimiento progresivo de las miras:** se puede minimizar con el uso del sapo.

Determinación del error de colimación

Para poder determinar la existencia de este error, se marca una distancia “d” sobre el terreno, de 40 a 50 m medida con cinta. Equidistante de ambos puntos A y B, se estaciona el nivel de anteojo, en E1, se efectúan lecturas de hm sobre miras ubicadas en A y B respectivamente. Si el aparato tiene un error de colimación, el mismo se manifiesta en igual magnitud sobre ambas posiciones de miras, como se ve en la siguiente figura:

Figura 3.33: Determinación del error de colimación, paso 1

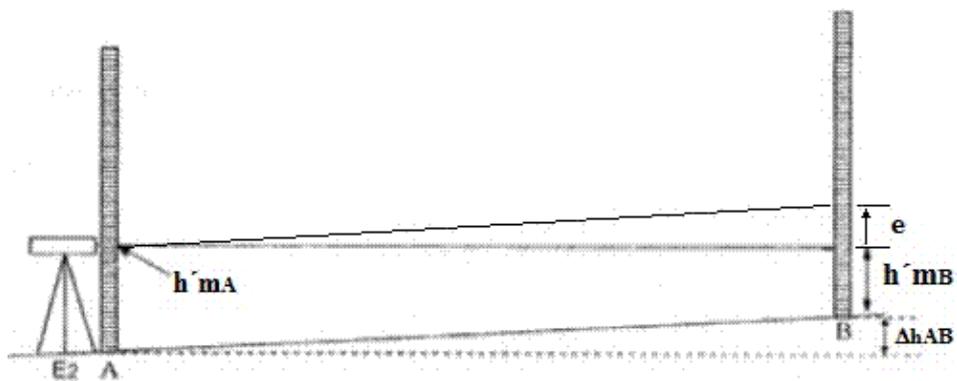


$$\Delta h_{AB} = lat - lad = (hm_A + e) - (hm_B + e) \rightarrow \Delta h_{AB} = hm_A - hm_B$$

De esta manera, se demuestra que realizando la nivelación desde el punto medio, se compensa el error de colimación y el desnivel hallado es el correcto.

El paso siguiente consiste en ubicar el nivel en uno de los extremos lo más próximo posible a una de las posiciones de mira E2 (Figura 3.34):

Figura 3.34: Determinación del error de colimación, paso 2



Se supone que, si existe error, este se manifiesta en su totalidad en la posición B de mira.

Calculando $\Delta h'_{AB}$:

$$\Delta h'_{AB} = h'_{mA} - (h'_{mB} + e)$$

$$\Delta h'_{AB} = h'_{mA} - h'_{mB} - e$$

Si $\Delta h'_{AB} \neq \Delta h_{AB} \rightarrow$ existe error de colimación

Si no existiera error “e” el desnivel obtenido sería igual al calculado desde el punto medio, por lo tanto en este caso: $\Delta h'_{AB} = \Delta h_{AB}$

$$\Delta h'_{AB} = \underbrace{h'_{mA} - h'_{mB}}_{\Delta h_{AB}} - e$$

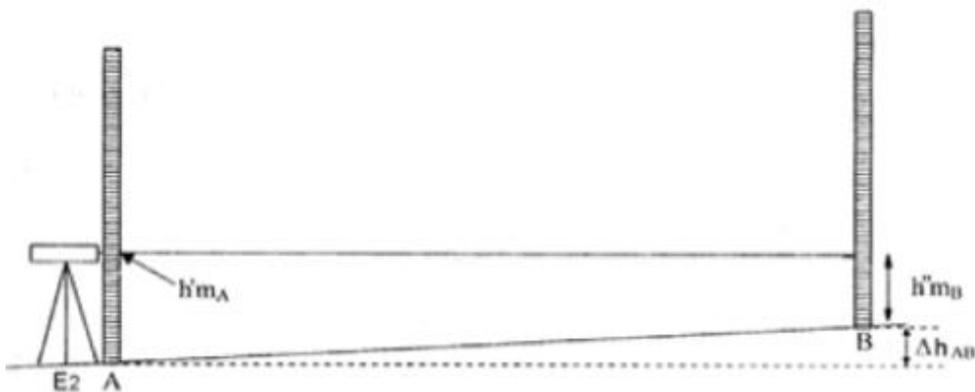
$$\Delta h'_{AB} = \Delta h_{AB} - e$$

$$e = \Delta h_{AB} - \Delta h'_{AB} \quad \Rightarrow \quad \text{Error de Colimación}$$

Conocido el valor del error de colimación puede corregirse el aparato modificando la posición del nivel tubular. Se debe calcular que lectura de h_{mB} debería tenerse en la mira para que $e = 0$.

En la posición del extremo de ubicación del aparato (estación E2) se calcula el valor de hilo medio sobre la mira en B. Llamamos a este valor h''_{mB} .

Figura 3.35: Corrección del error de colimación



Por lo tanto, se tenía: $\Delta h'_{AB} = h'_{mA} - h'_{mB} - e$

, ahora e debe ser cero ($e = 0$) por tanto: $\Delta h'_{AB} = h'_{mA} - h'_{mB}$

$$\Delta h'_{AB} = \Delta h_{AB}$$

Entonces: $\Delta h_{AB} = h'_{mA} - h'_{mB}$

Donde h'_{mB} es ahora incógnita y la llamaremos h''_{mB}

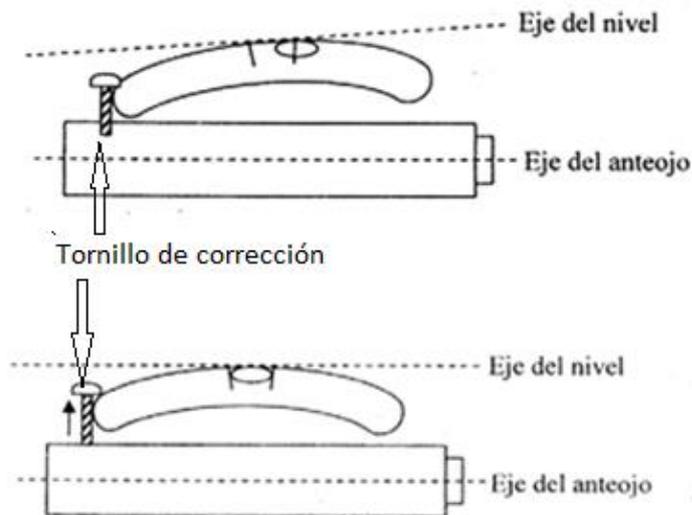
$$h''_{mB} = h'_{mA} - \Delta h_{AB}$$

Valor de h_m sobre la mira ubicada en B para que el error de colimación sea nulo.

Corrección de niveles mecánicos y automáticos

Con el tornillo basculante del nivel, se provoca en la mira la lectura h''_{mB} , ahora la visual es horizontal, pero el nivel tubular se ha descorregido, la burbuja ya no está centrada, para lograr el centrado de la misma se mueve un tornillo de corrección que sujeta al nivel tubular hasta que la burbuja vuelva a quedar centrada.

Figura 3.36: Operación con tornillo de corrección



De esta manera se puede corregir el error de colimación o error principal del nivel de anteojo en niveles **Mecánicos** (con nivel de burbuja).

En la actualidad casi todos los niveles son de tipo **Automáticos** (no poseen nivel tubular). En este caso el error de colimación se corrige a través del movimiento del retículo. Ver imágenes siguientes:

Figura 3.37: Corrección de error de colimación en niveles automáticos

Los tornillos indicados como A y B en la figura anterior son los que, al destornillarlos, permiten el desplazamiento vertical de la lente reticular, para provocar la lectura correcta.

Cualquiera de estas operaciones debe hacerse con precisión y es por eso que se aconseja que las mismas sean realizadas por un técnico en instrumental en un gabinete óptico.

Referencias

Casanova, Leonardo M. (2002). Topografía Plana. Mérida. ULA, Venezuela.