

AFOROS DE CAUDALES EN GRANDES RIOS (*)

APLICACIONES Y SIMPLIFICACIONES DEL METODO DE AFORO CON LANCHA MOVIL

Por MANUEL DIAZ-MARTA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El aforo de caudales en grandes ríos presenta, en muchos casos, dificultades difíciles de resolver, sobre todo cuando se pretende hacerlo en épocas de crecida. El artículo que se publica a continuación es una descripción del método de la lancha móvil, puesto en práctica con buenos resultados en Estados Unidos. Si bien su fundamento es el mismo que el del procedimiento habitual de aforos, es diferente la manera de recoger los datos que en este caso se hace por un observador que se desplaza en un bote de una orilla a otra del río. Se describe el proceso de cálculo y correcciones, así como algunas variaciones del método original, utilizables en diversas circunstancias.

ANTECEDENTES Y FUNDAMENTO DEL METODO DE LA LANCHA MOVIL

El aforo de las grandes corrientes de agua por los métodos usuales presenta dificultades prácticas de consideración. Estas se agravan en época de crecientes y, sobre todo, cuando se pretende realizar el aforo coincidiendo con las inundaciones. Conscientes de tales dificultades, los hidrólogos del United States Geological Survey han desarrollado recientemente otros métodos de aforo, entre los cuales destaca por su sencillez y facilidad de aplicación el de la lancha móvil.

Este método de aforo, cuya descripción puede verse en una publicación del United States Geological Survey (1), ha pasado ya la etapa experimental y se emplea con resultados satisfactorios en algunos ríos de Estados Unidos. Su fundamento es el mismo que el del procedimiento de aforos habitual, ya que se basa en la determinación de áreas parciales de la sección de paso y velocidades del agua para dichas áreas. La diferencia con el método clásico radica en la manera de recoger los datos. Mientras que en dicho método se sigue un procedimiento estático, debiéndose quedar fijo el observador, para cada medida que realiza, en el método de la lancha móvil los datos se recogen mientras el observador viaja en un bote que se traslada de una orilla a otra en forma continua.

Efectivamente, para realizar la operación del aforo, la lancha atraviesa el río en un lugar escogido, siguiendo una dirección normal a la corriente (fig. 1, a). La marcha es constante y los datos en que se basa el aforo se toman a intervalos de tiempo previamente determinados. El aforo por el nuevo método requiere una pequeña embarcación provista de una sonda ecógrafa y un dispositivo a proa que sirva para medir en magnitud y dirección la velocidad del agua respecto a la embarcación. En cuanto al personal para realizar el aforo, basta con un piloto hábil, capaz

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1972.

(1) Measurement of Discharge by the Moving Boat Method, por George F. Smoot y Charles E. Novak.

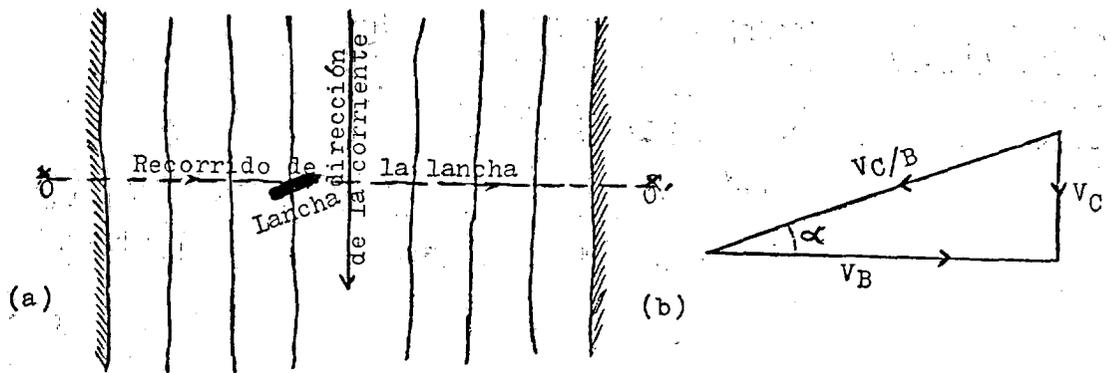


Figura 1.

de seguir la trayectoria marcada, y un observador con su ayudante. No es preciso maniobrar con cables de anclaje y retenidas, por lo cual la operación resulta menos azarosa que la convencional, la cual requiere fondear el barco un buen número de veces.

A continuación hacemos un resumen de las operaciones a realizar, fundado en la descripción del método en la publicación antes citada. Durante el recorrido del barco, la profundidad del cauce se obtiene directamente en la sonda ecográfica y puede registrarse en su cinta grabadora. La velocidad de la corriente se mide en forma directa por medio de un molinete que instalado en la proa del barco mediante un dispositivo como el indicado en la figura 2, mide la velocidad relativa del agua respecto al bote.

Llamando a esta velocidad relativa $V_{C/B}$, a la velocidad del bote V_B y a la velocidad de la corriente V_C , esta última vendrá dada por la siguiente ecuación vectorial:

$$\vec{V}_C = \vec{V}_{C/B} + \vec{V}_B$$

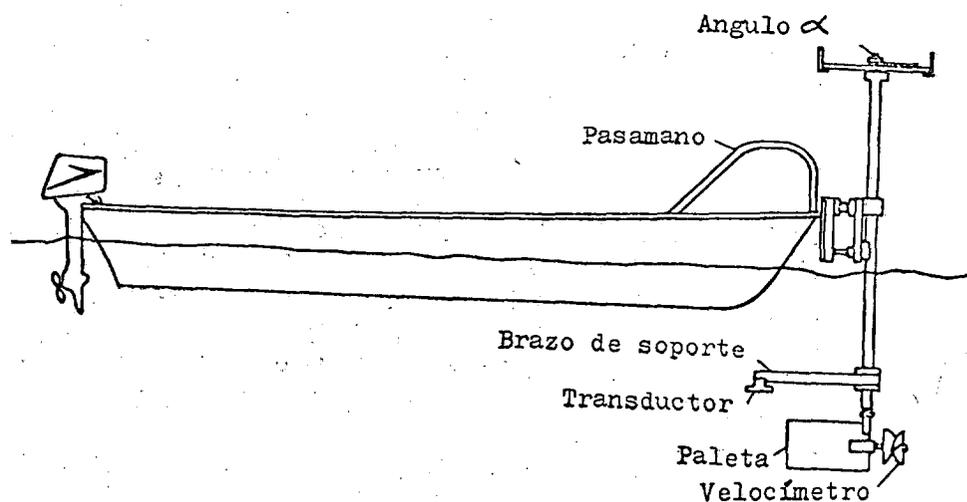


Fig. 2. — Croquis del equipo del bote.

En el supuesto de que el bote efectúe un recorrido normal a la corriente, esta relación vectorial tiene su representación en el triángulo rectángulo de la figura 1, b. El valor absoluto de $V_{C/B}$ viene dado en cada intervalo por el velocímetro. Los valores del ángulo α para el principio y el fin del intervalo se obtienen anotando los ángulos que forma el timón del velocímetro con la dirección del recorrido del bote. De ellos pueden deducirse valores medios para cada intervalo. Las velocidades V_B de la corriente y V_C del bote se obtienen teniendo en cuenta:

$$V_B = V_{C/B} \cdot \cos \alpha. \quad (1)$$

$$V_C = V_{C/B} \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

Conocida la velocidad media del bote en un intervalo, V_{Bm} , la distancia recorrida en el mismo será el producto de esa velocidad por el tiempo transcurrido en dicho intervalo, al que llamaremos Δt . La distancia a un origen O vendrá expresada por la integral:

$$L = \int_0^t V_B dt + L_0$$

o en la práctica:

$$L = \sum_0^t V_{Bm} \cdot \Delta t + L_0. \quad (3)$$

PROCESO DE CALCULO

Por lo anteriormente expuesto, todos los elementos básicos para la determinación del caudal que pasa por la sección O O' pueden deducirse de los registros y observaciones obtenidos a bordo durante el recorrido del bote. En efecto, para instantes t_i , espaciados a intervalos de tiempo previstos, se conocerán las profundidades h_i , marcadas en la cinta de la sonda. También se conocerán los valores de α_i , los cuales se leerán en el limbo situado a proa, en el mismo eje vertical sobre el que gira el velocímetro con su timón orientador. Para anotarlos, el observador, al oír la señal acústica que da principio y fin a cada intervalo, escribirá o dictará los valores del ángulo α_i . También anotará las señales o marcas del molinete correspondientes al intervalo de tiempo que acaba de pasar, de cuyo conteo se deducirá el valor $V_{C/B}$ para dicho intervalo. Con base en estos registros y anotaciones pueden deducirse los valores medios que entran en el cálculo, tal como se indica en el cuadro I, a. El proceso de cálculo del caudal se indica en el cuadro I, b, en el cual se muestra cómo se calculan los caudales que pasan por cada una de las áreas trapeziales de anchura ΔL y lados paralelos h_i y h_{i+1} en que se divide la sección transversal del río.

La velocidad media, V_{Cm} , de la corriente entre las verticales correspondientes a las distancias L_i y L_{i+1} se obtiene del producto $(V_{C/B})_m \times (\sin \alpha)_m \times f$, siendo f un factor de corrección que expresa la relación entre la velocidad media de la corriente y la velocidad del agua a la profundidad del velocímetro. La velocidad media del bote V_{Bm} es el producto $(V_{C/B})_m \times (\cos \alpha)_m$. Las longitudes correspondientes a un intervalo ΔL , vienen dadas por el producto $(V_B)_m \times \Delta t$, y las de L para el final de un intervalo se obtienen añadiendo ΔL al valor L_i al principio del mismo.

CUADRO I (a). — REGISTRO DE DATOS

(1) t	(2) Δt	(3) h	(4) h_m	(5) α	(6) $\text{sen } \alpha$	(7) $(\text{sen } \alpha)_m$	(8) $\text{cos } \alpha$	(9) $(\text{cos } \alpha)_m$	(10) $(V_{C/B})_m$
t_i		h_i		α_i	$\text{sen } \alpha_i$		$\text{cos } \alpha_i$		
	$t_{i+1} - t_i$		$\frac{h_i + h_{i+1}}{2}$			$\frac{\text{sen } \alpha + \text{sen } \alpha_{i+1}}{2}$		$\text{cos } \alpha + \text{cos } \alpha_{i+1}$	$(V_{C/B})_{i, i+1}$
t_{i+1}		h_{i+1}		α_{i+1}	$\text{sen } \alpha_{i+1}$		$\text{cos } \alpha_{i+1}$		

CUADRO I (b)

1	11 = 7 × 10 × t	12 = 9 × 10	13 = 2 × 12	14	15 = 4 × 13	16 = 15 × 11
t	$(V_C)_m$	$(V_B)_m$	ΔL	L	ΔS	ΔQ
t_i				L_i		
	$(V_C)_{i, i+1}$	$(V_B)_{i, i+1}$	$(\Delta L)_{i, i+1}$		$(\Delta S)_{i, i+1}$	$(\Delta Q)_{i, i+1}$
t_{i+1}				$L_i + \Delta L$		

Las áreas parciales de la columna (15) se obtienen multiplicando ΔL por la profundidad media en ese trecho; y los caudales parciales de la columna (16) son el producto del área parcial por la velocidad media. Por último, el caudal total que pasa por la sección se obtiene sumando los parciales y se anota al final de la columna (16).

CORRECCION TENIENDO EN CUENTA LA PROFUNDIDAD

La velocidad media de la corriente para cada vertical se calcula, como hemos dicho antes, multiplicando la velocidad de la corriente a la profundidad a que trabaja el velocímetro por un factor f . Este factor se puede encontrar suponiendo una curva tipo de distribución de velocidades, o mejor verificando la distribución de velocidades en tres o cuatro verticales escogidas de tal manera que representen distribuciones típicas de la sección de aforos.

CORRECCION TENIENDO EN CUENTA LA ANCHURA DEL CAUCE

Cuando la corriente no es perpendicular al recorrido del bote, las velocidades V_B en la figura 1, b no están representadas por la proyección de la trayectoria. La expresión $V_{C/B} \cos \alpha$, mediante la cual se calcula la velocidad del bote, daría un valor demasiado pequeño, como en la figura 3, a , o demasiado grande, como en la figura 3, b .

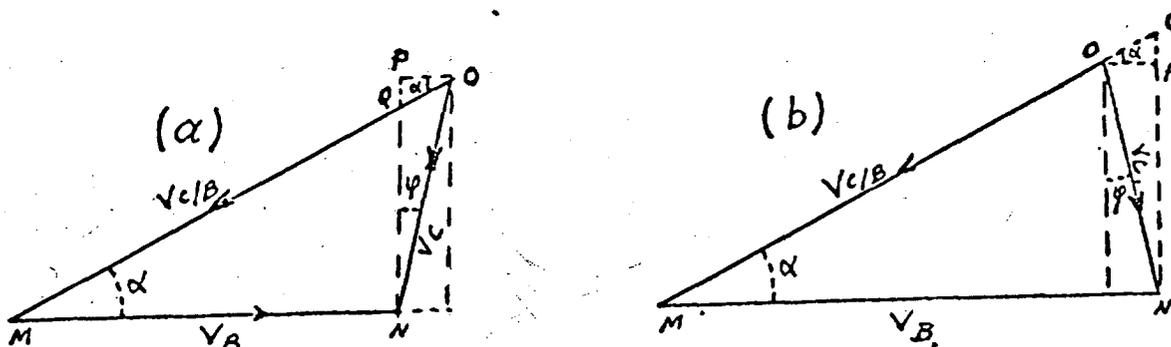


Figura 3.

En la publicación antes citada se recomienda hacer un ajuste, viendo si el ancho calculado como suma de los valores ΔL coincide o no con el ancho total de la sección, que debe medirse independientemente. Si coincide, el cálculo del caudal puede darse por bueno. Si el valor de L_C , longitud calculada, da un valor distinto de L_M , longitud media, el caudal obtenido del cálculo se corrige multiplicándolo por un factor $k = L_M/L_C$.

OTROS PROCEDIMIENTOS DE AFORO CON LANCHAS MOVIL

Hemos hecho hasta aquí una relación sucinta del método de aforo basado en la idea de la composición de velocidades que han desarrollado los investigadores

del U.S. Geological Survey. La explotación de esta fecunda idea no está agotada: permite establecer otros procedimientos de aforo con operaciones aún más sencillas; o bien, en condiciones de la corriente más difíciles que las anteriormente supuestas, que no permitan cruzar el río según una recta normal al cauce.

En lo que sigue, proponemos algunos de estos procedimientos de aforo.

AFORO BASADO EN LA MEDICION DE DISTANCIAS

En el triángulo que forman los vectores velocidad (fig. 1, b) se ha partido del conocimiento del valor absoluto de $V_{O/B}$, dado por un velocímetro, y del ángulo α que forma dicho vector con la dirección que sigue el bote, y de estos dos valores, medidos a bordo, se han deducido los elementos restantes para el cálculo del aforo. En el estado actual de la técnica de medición de distancias, las velocidades que componen dicho triángulo pueden determinarse en otra forma, que en muchos casos resultará más sencilla. Para cada instante t_i , la distancia L_i del bote a un punto de referencia sobre la línea $O O'$ puede medirse directamente por medio de un telurómetro o distámetro. La velocidad del bote, V_B , es la derivada de esa distancia con respecto al tiempo. Los valores medios de esa velocidad en el intervalo t_i, t_{i+1} que nos interesan para el cálculo pueden obtenerse por medio de operaciones sencillas:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i; \Delta L = L_{i+1} - L_i; (V_B)_m = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (4)$$

En el supuesto, anteriormente admitido, de que el bote avance en dirección perpendicular a la corriente

$$(V_C)_m = (V_B)_m (\tan \alpha)_m \quad (5)$$

La esencia de esta simplificación está en que en lugar de deducir la distancia recorrida por integración de la velocidad del bote, se deduce esta última por derivación de la distancia con respecto al tiempo, lo cual es más sencillo y casi siempre más exacto.

CUADRO II (a). — REGISTRO DE DATOS DE AFORO

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
t	Δt	h	h_m	α	$\tan \alpha$	$(\tan \alpha)_m$	L	ΔL
t_i		h_i		α_i	$\tan \alpha_i$		L_i	
	$t_{i+1} - t_i$		$\frac{h_i + h_{i+1}}{2}$		$\frac{\tan \alpha_i + \tan \alpha_{i+1}}{2}$			$L_{i+1} - L_i$
t_{i+1}		h_{i+1}		α_{i+1}	$\tan \alpha_{i+1}$		L_{i+1}	

CUADRO II (b). — CALCULO DEL CAUDAL

(1) t	(10) = (9) · (2) $(V_B)_m$	(11) = (7) × (10) $(V_C)_m$	(12) = (4) × (9) ΔS	(13) = (11) × (12) ΔQ
t_i				
	$(V_B)_{L, i+1}$	$(V_C)_{L, i+1}$	$(\Delta S)_{L, i+1}$	$(\Delta Q)_{L, i+1}$
t_{i+1}				

El registro de datos y el cálculo de los caudales parciales pueden ordenarse como se indica en los cuadros II, a y II, b. La deducción de los valores medios de la velocidad del bote (columna (10)) y de la velocidad de la corriente (columna (11)) se hace según las fórmulas (4) y (5), y los valores de los caudales que pasan por las áreas parciales se obtienen multiplicando dichas áreas por los valores medios de la velocidad en el intervalo correspondiente.

Cuando la corriente no es normal a la trayectoria de la lancha, el valor obtenido en la columna (10) para $V_{Bm} \cdot \tan \alpha$ puede ser menor que el valor verdadero de V_{Cm} , como sucede en el triángulo de la figura 3, a, o mayor que dicho valor, como en el triángulo en la parte b de la misma figura. Llamando al ángulo de desviación con la normal, el valor del segmento PQ que mide el error absoluto sería

$$PQ = P Q \cdot \tan \alpha = V_C \cdot \sin \varphi \cdot \tan \alpha.$$

y el error relativo vendría expresado por

$$e = PQ/V_C \cdot \cos \varphi = \tan \varphi \cdot \tan \alpha. \quad (6)$$

Con valores de $\tan \alpha$ menores de 1/3 y de $\tan \varphi$ menores de 1/10, que pueden conseguirse en un tramo de cierta regularidad, el error relativo sería menor que 1/30, lo cual está dentro de la tolerancia en esta clase de medidas. Pero el error total por causa de la oblicuidad de la corriente será mucho menor que esa fracción, por cuanto los errores para cada una de las áreas de cálculo serían positivos en unos casos y negativos en otros y tenderían a compensarse.

En lo que se acaba de exponer, se parte de medir la distancia a un punto fijo y el ángulo α de la velocidad relativa del agua respecto al bote con la trayectoria normal de la corriente. Siempre en el supuesto de una trayectoria normal a la corriente, podría partirse de la medida de distancias y velocidades relativas, eliminando la medida del ángulo α . En tal caso, la velocidad del bote se calcularía igual que antes, dividiendo ΔL por Δt , y la de la corriente por la expresión

$$V_C = \sqrt{(V_{C/B})^2 - (V_B)^2}. \quad (7)$$

Este procedimiento, que podría resultar bastante cómodo, sólo dará aproximación aceptable cuando el ángulo φ sea muy pequeño y el ángulo α bastante grande.

Esto se debe a que el error introducido al calcular el triángulo como si fuera rectángulo equivale a la expresión

$$\sqrt{1 + 2 \operatorname{sen} \varphi / \operatorname{tang} \alpha} - 1.$$

Con un ángulo α de 45° , para obtener un error relativo menor que $5/100$, deberá verificarse $\operatorname{sen} \varphi < 0,05$.

AFORO CUANDO LA TRAYECTORIA DEL BOTE ES OBLICUA A LA CORRIENTE

Puede suceder que el recorrido del bote, que suponemos todavía rectilíneo, no sea perpendicular a la corriente media, o que aun siéndolo, la corriente, en algunos sectores del recorrido, incida sobre la dirección de éste con oblicuidad no despreciable. En tal caso deben registrarse para los instantes de cálculo t_i , t_{i+1} , los valores de L , los de la velocidad relativa del agua respecto al bote, $V_{O/B}$ y los del ángulo α que forma esa velocidad relativa con la trayectoria. El triángulo que forman los vectores velocidad (fig. 3, b) quedará perfectamente determinado para cualquier ángulo de incidencia de la corriente con la trayectoria.

El valor V_{cn} , componente de la velocidad de la corriente normal a la dirección del bote, se obtendrá de la expresión $V_{O/B} \operatorname{sen} \alpha$. La anchura de ΔL de cada área parcial se deducirá de la diferencia $L_{i+1} - L_i$. El flujo para cada una de las áreas parciales se hallará multiplicando su superficie por V_{cn} . Podría formarse un cuadro de registro de datos como el II, a, sin más que añadir una columna (10) para anotar los valores de $V_{O/B}$ en el intervalo. El cuadro de cálculo del caudal sería como el II, b suprimiendo la columna (10); la columna (11) expresaría el valor de V_{cn} , y las columnas (12) y (13), que expresan áreas y caudales parciales, se calcularían del mismo modo que antes.

AFORO CON LANCHA RECORRIENDO UNA TRAYECTORIA CURVA

La idea de aforar los grandes cursos de agua utilizando una lancha de recorrido continuo puede aplicarse también si la lancha se mueve describiendo una trayectoria curva. La libertad de recorrido que esto supone, permite efectuar el aforo aun en aquellos casos en que por la excesiva velocidad del agua, o por la presencia de obstáculos fijos o flotantes, es difícil, si no imposible, gobernar el barco según una línea recta que sea además normal a la corriente.

Supongamos que el recorrido de la lancha es como el MN representado en la figura 4, a, y supongamos también que se establece una línea de referencia determinada por dos puntos O y O' , uno en cada orilla y elegidos de tal manera que la recta OO' sea normal a la corriente del río. Con un teodolito o distámetro emplazado en O se podrán medir las orientaciones y longitudes de las radiaciones OP_{i+1} , etcétera. Estas mediciones se harán a intervalos de tiempo prefijados, coincidiendo con las que se practiquen a bordo de la lancha móvil. De este modo, para cada instante t_i , se obtendrán desde tierra la distancia ρ del punto P y el ángulo θ que forma la radiación OP_i con la recta OO' . A bordo del barco se medirán las profundidades h_i y los valores del ángulo α que forma la velocidad relativa del agua respecto al bote con la línea OO' . Este ángulo puede determinarse obteniendo la de-

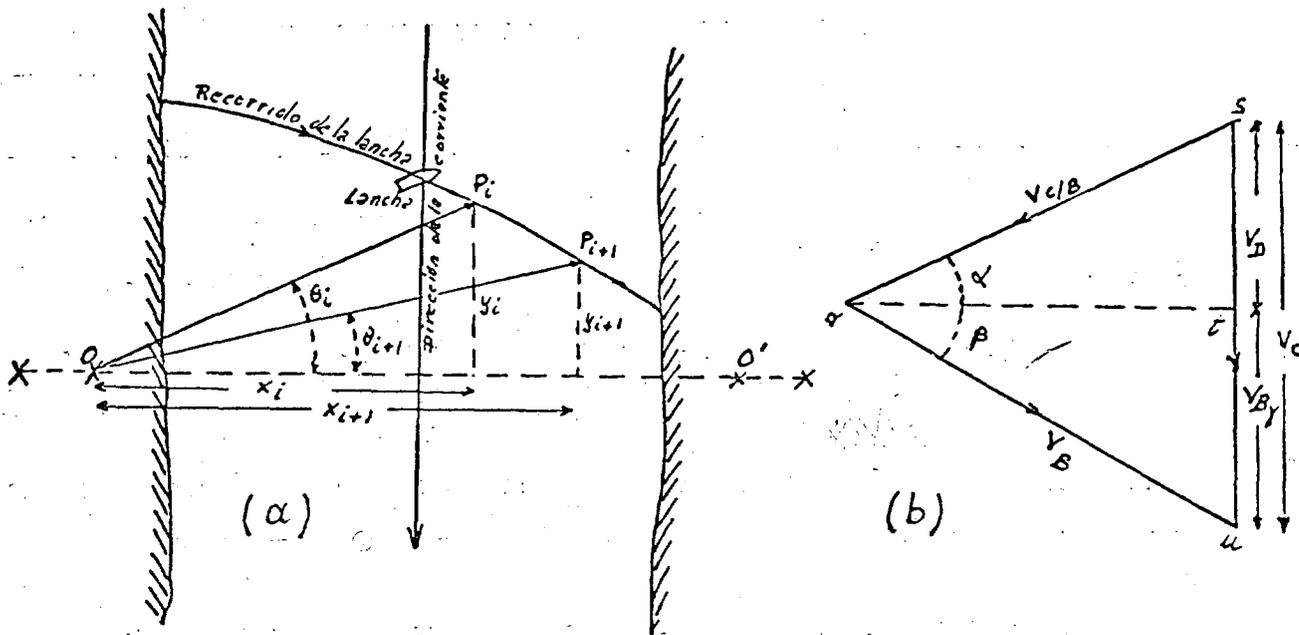


Figura 4.

clinación magnética del vector $V_{C/B}$ y deduciendo de ella la de la línea OO' . También puede obtenerse desde el barco la distancia ρ que media entre el punto O y la posición P del mismo barco.

En la parte *a* de la figura se representan las coordenadas polares de las posiciones de la lancha P_i, P_{i+1} referidas al origen O y al eje OO' , y en la parte *b*, el diagrama vectorial de las velocidades de la corriente y la lancha.

De las coordenadas polares se deducen los siguientes valores para los incrementos de x y de y

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i = \rho_{i+1} \cos \theta_{i+1} - \rho_i \cos \theta_i \quad (8)$$

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i = \rho_{i+1} \sin \theta_{i+1} - \rho_i \sin \theta_i \quad (9)$$

Estos valores sirven para calcular

$$V_{Bx} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ y } V_{By} = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

Del diagrama, suponiendo que la velocidad de la corriente es perpendicular a la recta base OO' , se deduce

$$V_C = st + tu = V_{Bx} \cdot \text{tang } \alpha + V_{By}$$

El primer sumando representa la velocidad de la corriente del agua en el supuesto de que para los mismos valores de la velocidad $V_{C/B}$ y del ángulo α , el bote se acercará a la orilla siguiendo una línea normal a la corriente. El segundo, la velocidad con que el barco se desplaza de esa línea normal a consecuencia de la corriente. Sumando ambas velocidades se obtiene la velocidad total de la corriente.

Con estos elementos es posible programar una secuencia de cálculo parecida a la de los casos anteriores, cuando el bote se movía según una línea recta. El re-

CUADRO III (a). — REGISTRO DE DATOS PARA TRAYECTORIA CURVA

(1) t	(2) Δt	(3) h	(4) h_m	(5) α	(6) $\text{sen } \alpha$	(7) $\text{cos } \alpha$	(8) $\text{tang } \alpha_m$	(9) ρ
t_i		h_i		α_i	$\text{sen } \alpha_i$	$\text{cos } \alpha_i$		ρ_i
	$t_{i+1} - t_i$		$\frac{h_i + h_{i+1}}{2}$				$(\text{tang } \alpha)_{i, i+1}$	
t_{i+1}		h_{i+1}		α_{i+1}	$\text{sen } \alpha_{i+1}$	$\text{cos } \alpha_{i+1}$		ρ_{i+1}

CUADRO III (b). — CALCULO DEL CAUDAL

1	10 = 9 × 7	11	12 = 11 : 2	13 = 9 × 6	14	15 = 14 : 2	16 = 8 × 12 + 15	17 = 4 × 11	18 = 17 × 16
t	x	Δx	V_{Bx}	y	Δy	V_{By}	V_C	ΔS	ΔQ
t_i	x_i			y_i					
		$x_{i+1} - x_i$	$(V_{Bx})_{i, i+1}$		$y_{i+1} - y_i$	(V_{By})	$(V_C)_{i, i+1}$	$(\Delta S)_{i, i+1}$	$(\Delta Q)_{i, i+1}$
t_{i+1}	x_{i+1}			y_{i+1}					

gistro de datos y el proceso de cálculo para el caudal pueden ordenarse como en los cuadros III, a y III, b.

Para obtener mayor claridad en el registro y en el cálculo, puede ser conveniente que el bote siga una trayectoria marcadamente oblicua a la línea transversal O O'. Por otra parte, una trayectoria de esa forma puede ser obligada cuando la corriente sea bastante fuerte.

El diagrama de velocidades en ese caso (fig. 4) presentaría un ángulo β de deriva bastante grande y un ángulo α relativamente reducido. Esto equivale a decir que la lancha se moverá como si estuviera casi arrastrada por la corriente, a la cual opondrá solamente una pequeña resistencia.

Todavía puede suponerse que el ángulo α se reduzca hasta llegar a anularse. En tal caso, el bote será arrastrado totalmente por la corriente. Su motor no actuará ni a favor ni en contra de la corriente del río, limitándose su acción a acercar el bote a la orilla. La velocidad de deriva en el sentido de la corriente del río sería la misma que la de la corriente que queremos medir. Bastaría entonces con obtener el valor

$$V_{By} = \frac{\rho_{i+1} \text{sen } \theta_{i+1} - \rho_i \text{sen } \theta_i}{\Delta t}$$

para conocer la velocidad media de la corriente entre las verticales correspondientes al intervalo t_i, t_{i+1} . Obteniendo los valores de Δx para el referido intervalo y los valores de h_m , profundidad media para el mismo, tendremos el área parcial ΔS , que multiplicada por el valor medio de V_C , en este caso igual al de V_{By} , dará el caudal parcial. Para anular el ángulo α , el piloto deberá gobernar la nave de manera que la dirección de $V_{C/B}$, marcada por la dirección del velocímetro, indique la misma declinación magnética que la línea base O O'.