GUIA DEL TRABAJO PRACTICO Nº 1

Determinación de las características físicas de la cuenca

Las características físicas de una cuenca son elementos que tienen una gran importancia en el comportamiento hidrológico de la misma. Dichas características físicas se clasifican en dos tipos según su impacto en el drenaje: las que condicionan el volumen de escurrimiento como el *área* y el *tipo de suelo* de la cuenca, y las que condicionan la velocidad de respuesta como el *orden de corriente*, la *pendiente*, la *sección transversal*, etc.

Existe una estrecha correspondencia entre el régimen hidrológico y dichos elementos por lo cual el conocimiento de éstos reviste gran utilidad práctica, ya que al establecer relaciones y comparaciones de generalización de ellos con datos hidrológicos conocidos, pueden determinarse indirectamente valores hidrológicos en secciones de interés práctico donde falten datos o donde por razones de índole fisiográfica o económica no sea factible la instalación de estaciones hidrométricas.

Para la resolución de este práctico modelo, el cual ha de servir de base para realizar el trabajo con los datos adjuntos a la presente guía, tomaremos como ejemplo la cuenca de los arroyos Sarandí – Barrancas (Prov. de Corrientes), de la cual se dispone cartografía planimétrica en Escala = 1:250.000 con curvas de nivel. Los pasos a desarrollar para la resolución son los descriptos a continuación:

1. Calcular la superficie y el perímetro de la cuenca

El área de la cuenca tiene importancia porque:

a. sirve de base para la determinación de otros elementos (parámetros, coeficientes, relaciones, etc.);
b. por lo general los caudales de escurrimiento crecen a medida que aumenta la superficie de la cuenca;
c. el crecimiento del área actúa como un factor de compensación de modo que es más común detectar crecientes instantáneas y de respuesta inmediata en cuencas pequeñas que en las grandes cuencas.

Siguiendo el criterio de investigadores como Ven Te Chow, se pueden definir como *Cuencas Pequeñas* aquellas con áreas menores a 250 km^2 , mientras que las que poseen áreas mayores a los 2500 km^2, se clasifican dentro de las *Cuencas Grandes*.

La medición de la superficie de la cuenca se puede llevar a cabo mediante la utilización de un *planímetro* o, a través de la digitalización planimétrica en un sistema de diseño gráfico asistido por computadora (CAD), mientras que el perímetro puede ser obtenido con la ayuda de un *curvímetro* o también a través de sistemas CAD.

El *planímetro* es un aparato que realiza una integración mecánica que permite el cálculo de la superficie de la cuenca, el cual trabaja con una constante para cada escala de medición recorriendo perimetralmente la cuenca con el visor del aparato. Al resultado obtenido de las lecturas inicial y final en la escala del instrumento se lo afecta de la constante correspondiente para obtener la superficie, que generalmente es expresada en km^2.

El *curvímetro* es un aparato con el cual, recorriendo con un cursor la cuenca desde un punto de inicio hasta regresar al mismo, se lee directamente la longitud en km en la escala correspondiente a la cartografía de trabajo.

Si bien el planímetro y el curvímetro han sido utilizados habitualmente en épocas pasadas, hoy en día gracias a los sistemas CAD y/o SIG (sistemas de información geográfica), los cómputos de superficie y perímetro de un área cualquiera se resuelven inmediatamente, una vez que la cuenca ha sido digitalizada bajo un sistema de georeferenciación adecuado.

Uno de los sistemas CAD más difundidos es el AutoCAD™, con el cual y mediante las siguientes instrucciones es posible realizar los siguientes procesos:

Command:	area / object	se obtiene el área del objeto que se selecciona y su perímetro, en las unidades de dibujo elevadas al cuadrado
Command:	list / object	se obtiene un listado de las características del objeto seleccionado. En el caso de seleccionar una curva de nivel, se obtiene su longitud entre otras cosas
Command:	draw / point / divide	se divide una polilínea en un número constante de segmentos, herramienta útil en la determinación de la pendiente del cauce
Command:	break	se corta una polilínea en los puntos deseados, herramienta útil en la determinación de la pendiente del cauce
Command:	bpoly	se crean polígonos con bordes de varios elementos, ideal para generar áreas cuya superficie se desea conocer

2. Calcular la pendiente media de la cuenca, aplicando los criterios de Alvord, Horton y Nash

La pendiente media constituye un elemento importante en el efecto del agua al caer a la superficie, por la velocidad que adquiere y la erosión que produce.

2.1. Criterio de ALVORD

Analiza la pendiente existente entre curvas de nivel, trabajando con la faja definida por las <u>líneas medias</u> que pasan entre las curvas de nivel, Para una de ellas la pendiente es (Fig. 1):

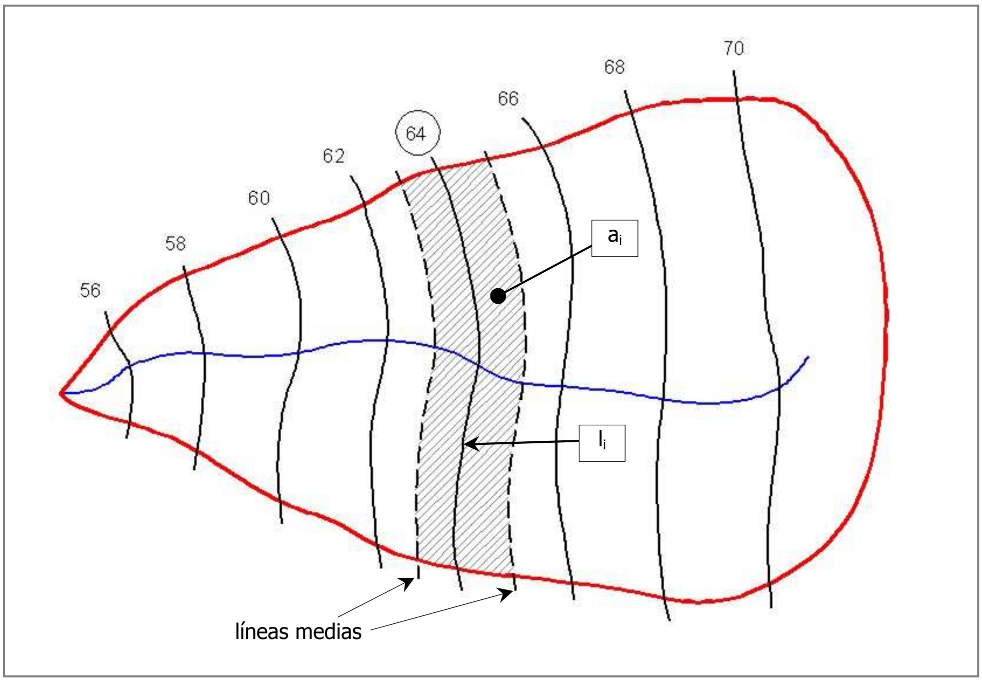

Fig. 1: Esquema de análisis y ejemplo para el cálculo de la pendiente en una faja según Alvord

$$\boxed{S_i = \frac{D}{W_i}} \qquad y \qquad \boxed{W_i = \frac{a_i}{l_i}}$$

Siendo:

S_i pendiente de la faja analizada i
D desnivel entre líneas medias, aceptado como desnivel entre curvas (equidistancia)
W_i ancho de la faja analizada i
a_i área de la faja analizada i
l_i longitud de la curva de nivel correspondiente a la faja analizada i

Así la pendiente media de la cuenca será el promedio pesado de la pendiente de cada faja en relación con su área:

$$\boxed{S = \left(\frac{D \cdot l_1}{a_1} \cdot \frac{a_1}{A}\right) + \left(\frac{D \cdot l_2}{a_2} \cdot \frac{a_2}{A}\right) + \ldots + \left(\frac{D \cdot l_n}{a_n} \cdot \frac{a_n}{A}\right)} \quad => \quad \boxed{S = \frac{D}{A} \cdot (l_1 + l_2 + \ldots + l_n)}$$

y finalmente,

$$\boxed{S = \frac{D \cdot L}{A}}$$

Siendo:

S pendiente media de la cuenca
L longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (Tabla 1)
A área de la cuenca

Tabla 1: Cómputo de longitud de curvas de nivel

Curva de cota	Longitud (km)
56	33.55
58	51.45
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...
Long. total	380.10

2.2. Criterio de HORTON

Consiste en trazar una malla de cuadrados sobre la proyección planimétrica de la cuenca orientándola según la dirección de la corriente principal. Si se trata de una cuenca pequeña, la malla llevará al menos cuatro (4) cuadros por lado, pero si se trata de una superficie mayor, deberá aumentarse el número de cuadros por lado, ya que la precisión del cálculo depende de ello.

Una vez construida la malla, en un esquema similar al que se muestra en la Fig. 2, se miden las longitudes de las líneas de la malla dentro de la cuenca y se cuentan las intersecciones y tangencias de cada línea con las curvas de nivel.

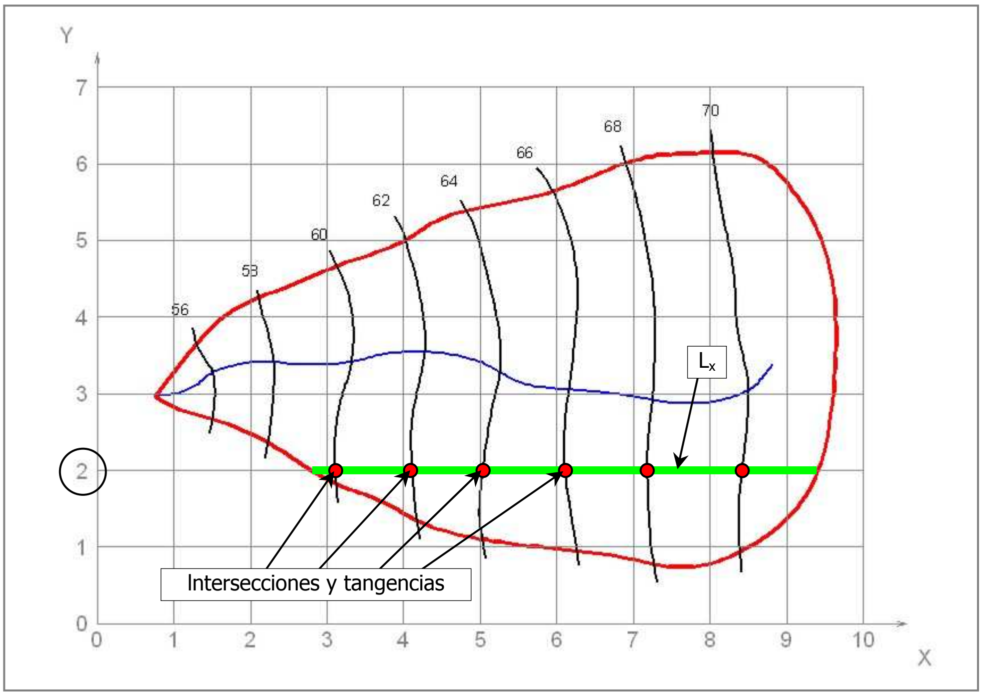

Fig. 2: Grilla de análisis y ejemplo para el cálculo de la pendiente de la cuenca según Horton

La pendiente de la cuenca en cada dirección de la malla se calcula así:

$$\boxed{S_x = \frac{N_x \cdot D}{L_x}} \quad \text{y} \quad \boxed{S_y = \frac{N_y \cdot D}{L_y}}$$

Siendo:

S_x pendiente en el sentido x
S_y pendiente en el sentido y
N_x número total de intersecciones y tangencias de líneas de la malla con curvas de nivel, en el sentido x
N_y número total de intersecciones y tangencias de líneas de la malla con curvas de nivel, en el sentido y
D equidistancia entre curvas de nivel
L_x longitud total de líneas de la malla en sentido x, dentro de la cuenca
L_y longitud total de líneas de la malla en sentido y, dentro de la cuenca (Tabla 2)

Horton considera que la pendiente media de la cuenca puede determiarse como:

$$\boxed{S = \frac{N \cdot D \cdot \sec(\theta)}{L}}$$

Siendo:

S pendiente media de la cuenca
N $N_x + N_y$
θ ángulo dominante entre las líneas de malla y las curvas de nivel
L $L_x + L_y$

Como resulta laborioso determinar la sec(θ) de cada intersección, en la práctica y para propósitos de comparación es igualmente eficaz aceptar al término sec(θ) igual a 1, o bien considerar el promedio aritmético o geométrico de las pendientes Sx y Sy como pendiente media de la cuenca

promedio aritmético $$\boxed{S = \frac{S_x + S_y}{2}}$$

promedio geométrico $$\boxed{S = \sqrt{S_x \cdot S_y}}$$

Tabla 2: Cómputo de pendiente en la cuenca según Horton

Número de la línea de la malla	Intersecciones		Longitudes (km)	
	N_x	N_y	L_x	L_y
0	...	...	...	...
1	...	...	...	...
2	...	...	...	...
3	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
Suma parciales	40	38	826.5	829
Suma total	78		1655.5	

2.3. Criterio de NASH

Actuando en forma similar al criterio de Horton, se traza una cuadrícula en el sentido del cauce principal (Fig. 3), que debe cumplir la condición de tener aproximadamente 100 intersecciones ubicadas dentro de la cuenca. En cada una de ellas se mide la distancia mínima (d) entre curvas de nivel, la cual se define como el segmento de recta de menor longitud posible que pasando por el punto de intersección, corta a las curvas de nivel más cercanas en forma aproximadamente perpendicular. La pendiente en ese punto es:

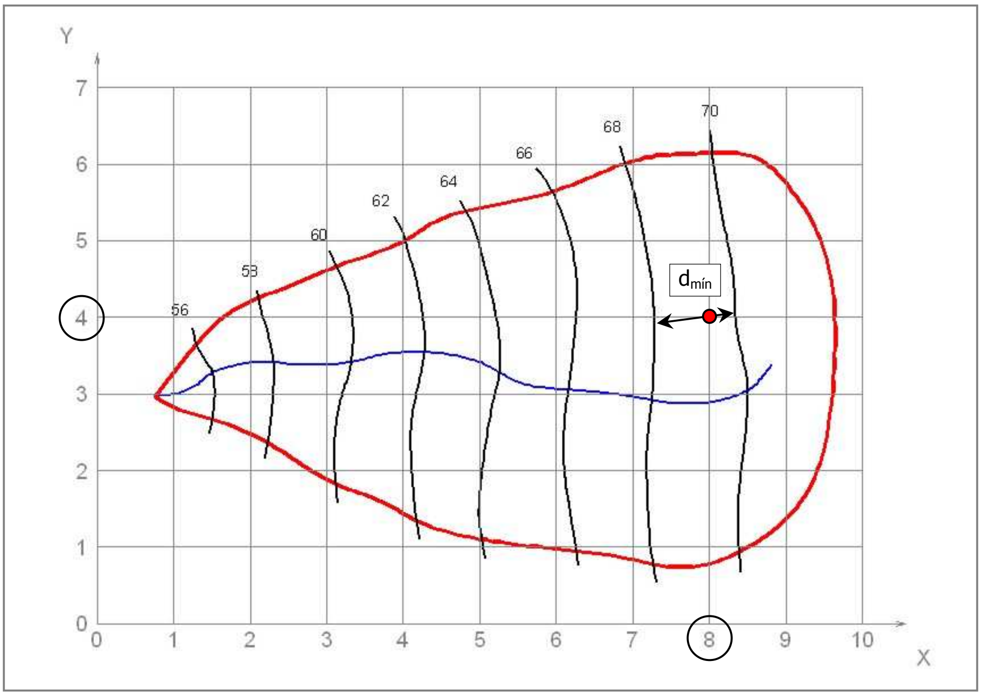

Fig. 3: Grilla de análisis y ejemplo para el cálculo de la pendiente de la cuenca según Nash

$$\boxed{S_i = \frac{D}{d_i}}$$

Siendo:

S_i pendiente en un punto intersección de la malla
D equidistancia entre curvas de nivel
d_i distancia mínima de un punto intersección de la malla entre curvas de nivel

$$\boxed{S = \frac{\sum S_i}{n}}$$

Siendo:

S pendiente media de la cuenca
n número total de intersecciones y tangencias detectadas

Cuando una intersección ocurre en un punto entre dos curvas de nivel del mismo valor, <u>la pendiente se considera nula</u> y esos son los puntos que no se toman en cuenta para el cálculo de la pendiente media.

Con ese procedimiento, la pendiente media de la cuenca es la media aritmética de todas las intersecciones detectadas, descontando de dicho cómputo aquellas intersecciones con pendiente nula . Los datos deben procesarse según la siguiente Tabla 3:

Tabla 3: Cómputo de pendiente en la cuenca según Nash

Intersección	Coordenadas		Distancia mínima (km)	Pendiente
1	0	8	15.3	3.92×10^{-4}
2	1	9	16.2	3.75×10^{-4}
3	1	8	15.2	5.22×10^{-4}
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
82	6	3	15.0	4.63×10^{-4}
83	6	4	16.2	3.33×10^{-4}
	Pendiente media de la cuenca			4.23×10^{-4}

3. Graficar la Curva Hipsométrica de la cuenca y determinar el valor de la altitud media (m.s.n.m.), analítica y gráficamente

Se define como curva hipsométrica a la representación gráfica del relieve medio de la cuenca, construida llevando en el eje de las abscisas, longitudes proporcionales a las superficies proyectadas en la cuenca, en km^2 o en porcentaje, comprendidas entre curvas de nivel consecutivas hasta alcanzar la superficie total, llevando al eje de las ordenadas la cota de las curvas de nivel consideradas.

La altura o elevación media tiene importancia principalmente en zonas montañosas donde influye en el escurrimiento y en otros elementos que también afectan el régimen hidrológico, como el tipo de precipitación, la temperatura, etc. Para obtener la elevación media se aplica un método basado en la siguiente fórmula:

$$\boxed{H = \frac{\sum (c_i \cdot a_i)}{A}}$$

Siendo:

H elevación media de la cuenca

c_i cota media del área i, delimitada por 2 curvas de nivel

a_i área i entre curvas de nivel

A área total de la cuenca

En la siguiente Tabla 4 se representan los pasos seguidos para el cálculo de la curva hipsométrica.

Tabla 4: Cómputo de la Curva Hipsométrica de la cuenca

Intervalo entre curvas de nivel (m)	Cota media (m)	Área (km^2)	$\frac{\text{Área}}{\text{ÁreaTotal}}$ (%)	Porcentaje de área acumulado (%)
> 68	69.0	6.17	1.88	1.88
68 – 66	67.0	20.05	6.11	7.99
66 – 64	65.0	35.01	10.67	18.66
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
< 56	55.0	3.55	1.08	100.00
		328.25	100.00	

Alternativamente a la fórmula anterior, se aplica el uso de la gráfica de curva hipsométrica como si se dividiera el volumen total del relieve de la cuenca sobre su superficie proyectada, ingresando por el eje que representa el área con el valor correspondiente al 50% y leyendo el valor de cota correspondiente (Fig. 4).

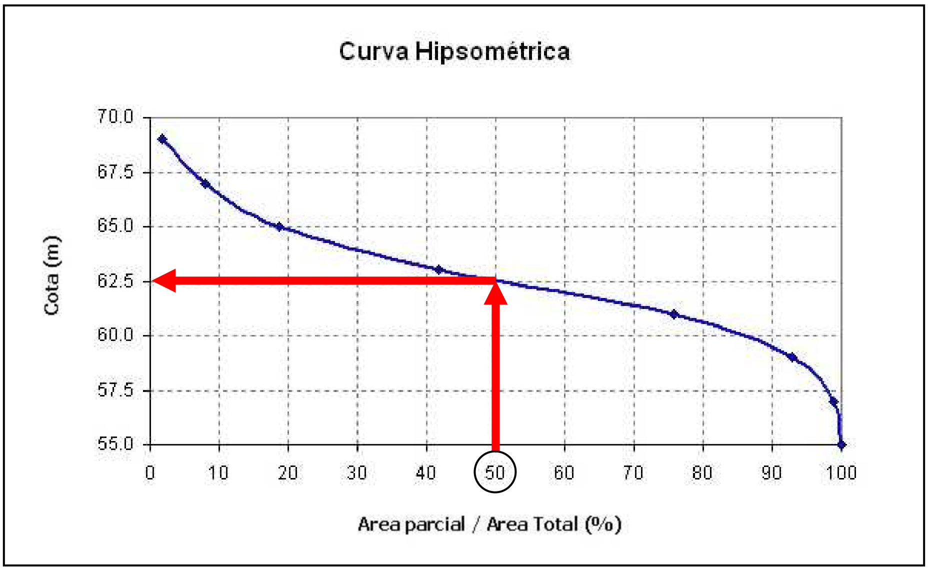

Fig. 4: Gráfico de la Curva Hipsométrica de la cuenca

4. Obtener los parámetros que caracterizan la forma de la cuenca

4.1. Índice de Compacidad o de GRAVELIUS

La forma superficial de las cuencas hidrográficas tiene interés por el tiempo que tarda en llegar el agua desde los límites hasta la salida de la misma. Uno de los índices para determinar la forma es el Coeficiente de Compacidad (Gravelius) que es la relación "K" existente entre el perímetro de la cuenca "P" y el perímetro de un círculo que tenga la misma superficie "A"que dicha cuenca:

$$\boxed{A = \pi \cdot r^2} \qquad \boxed{r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}}$$

Siendo:
A área de un círculo, igual al área de la cuenca
r radio de un círculo de igual área que la cuenca

$$\boxed{K = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}}} \qquad \boxed{K = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}} \qquad \boxed{K = 0.282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}}$$

Siendo:
K índice o coeficiente de compacidad de Gravelius
P perímetro de la cuenca

El índice será mayor o igual a la unidad, de modo que cuanto más cercano a ella se encuentre, más se aproximará su forma a la del círculo, en cuyo caso la cuenca tendrá mayores posibilidades de producir crecientes con mayores picos (caudales). Por otra parte "K" es un número adimensional independiente de la extensión de las cuencas. Por contrapartida, cuando "K" se aleja más del valor unidad significa un mayor alargamiento en la forma de la cuenca.

4.2. Factor de forma adimensional de HORTON

Horton ha sugerido un factor adimensional de forma designado como "Rf" que puede deducirse a partir de la ecuación siguiente:

$$\boxed{Rf = \frac{A}{Lb^2}}$$

Siendo:
Rf factor adimensional de forma de Horton
A área de la cuenca
Lb longitud de la cuenca, medida desde la salida hasta el límite, cerca de la cabecera del cauce principal, a lo largo de una línea recta

Este índice de Horton ha sido usado frecuentemente como indicador de la forma del Hidrograma Unitario

5. Calcular la pendiente del cauce principal de la cuenca en estudio, aplicando el criterio de TAYLOR y SCHWARZ

En general, la pendiente de un tramo de río se considera como el desnivel entre los extremos del tramo, dividido por la longitud horizontal de dicho tramo, de manera que:

$$S = \frac{H}{L}$$

Siendo:
S pendiente del tramo del cauce
H desnivel entre los extremos del tramo del cauce
L longitud horizontal del tramo del cauce

Esta definición se aproxima al valor real de la pendiente cuando es reducida la longitud del tramo analizado. Una forma más precisa que la anterior de aproximarse al valor real consiste en aplicar el criterio de Taylor y Schwarz, que considera al río formado por una serie de canales de pendiente uniforme, en los cuales el tiempo de recorrido del agua es igual al del río. Entonces, dividiendo al cauce principal del río en "m" tramos iguales de longitud Δx, el tiempo de recorrido por tramo será:

$$V_i = \frac{\Delta x}{t_i} \quad => \quad t_i = \frac{\Delta x}{V_i}$$

Siendo:
V_i velocidad media en el tramo i considerado
Δx longitud de cada tramo, igual a la longitud total del cauce dividido por el número de tramos m (Δx es igual para todos los tramos i considerados)
t_i tiempo de recorrido del flujo de agua por el tramo i considerado

Adoptando como válida la expresión de Chezy, se tiene que:

$$V_i = C_i \cdot \sqrt{Rh_i \cdot S_i} \quad => \quad V_i = K \cdot \sqrt{S_i}$$

Entonces el tiempo de recorrido del tramo será:

$$t_i = \frac{\Delta x}{K \cdot \sqrt{S_i}} \quad => \quad T = \sum t_i$$

Siendo:
V_i velocidad media del flujo de agua en el tramo i considerado
C_i coeficiente de Chezy en el tramo i considerado
Rh_i radio hidráulico en el tramo i considerado
S_i pendiente media en el tramo i considerado
K constante
T tiempo total del recorrido del flujo de agua por el cauce

El tiempo total de recorrido (T) será igual a la suma de los tiempos parciales de los "m" tramos, y puede calcularse como

$$\boxed{T = \frac{L}{V}} \quad => \quad \boxed{V = K \cdot \sqrt{S}} \quad => \quad \boxed{T = \frac{L}{K \cdot \sqrt{S}}}$$

Siendo:
L longitud total del cauce
V velocidad del flujo de agua por el cauce
S pendiente media del cauce

Igualando expresiones:

$$\boxed{\frac{L}{K \cdot \sqrt{S}} = \sum\left(\frac{\Delta x}{K \cdot \sqrt{S_i}}\right)} \quad => \quad \boxed{\frac{L}{K \cdot \sqrt{S}} = \frac{\Delta x}{K} \cdot \sum\left(\frac{1}{\sqrt{S_i}}\right)} \quad ; \quad \boxed{m = \frac{L}{\Delta x}}$$

$$\boxed{\sqrt{S} = \frac{m}{\sum\left(1/\sqrt{S_i}\right)}}$$

$$\boxed{S = \left[\frac{m}{1/\sqrt{S_1} + 1/\sqrt{S_2} + \cdots + 1/\sqrt{S_n}}\right]^2}$$

Siendo:
m número de segmentos iguales en los que se divide el cauce principal

Para la resolución, se debe confeccionar la siguiente Tabla 5:

Tabla 5: Cómputo de la pendiente del cauce según Taylor y Schwarz

Tramo	Desnivel (m)	Pendiente del tramo S_i (cm/km)	$1/\sqrt{S_i}$
1	......	......	......
2	......	......	......
...	......	......	......
...	......	......	......
...	......	......	......
...	......	......	......
...	......	......	......
...	......	......	......
...	......	......	......
m	......	......	......
		$\sum =$	......

HIDROLOGÍA

TRABAJO PRACTICO Nº 1

Planos y gráficos a presentar con el trabajo práctico:

- Cuadrícula en el plano con el Método de HORTON;
- Cuadrícula en el plano con el Método de NASH;
- Gráfico de la Curva hipsométrica Cota - Area (en km^2 y en %);
- Delimitación de tramos para el Método de TAYLOR - SCHWARZ.