HENARES, Rev. Geol., 2: 233-240 (1988)

CUANTIFICACION HIDROGEOLOGICA BASICA

V. Ibarra Lozano (*)

T. Morales-Juberias (*)

L.M. Martinez-Torres (*)

R. Ramón-Lluch (*)

(*) Departamento de Estratigrafía, Geodinámica y Paleontología.
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO.

RESUMEN

Se explican las nociones básicas para obtener una visión global de la dinámica del ciclo del agua. Además, se exponen métodos sencillos y asequibles de cuantificación de la precipitación, evaporación y escorrentía, que permiten realizar balances hídricos elementales.

ABSTRACT

It explained basic notions to obtain a global vision about the elemental hidrologic cycle. Moreover, it exposed easy and accesible methods to cuantifity the precipitation, evaporation and runoff, that permit obtain elemental water balances.

1.- INTRODUCCION

El agua ocuap unas 3/4 partes de la superficie terrestre, con un volumen de 1300-1400 millones de Km^2, que se distribuyen como sigue:

- océanos: 97%
- hielos continentales: 1,8%
- agua dulce (aguas subterráneas, suelos, lagos, ríos, etc.): 0,50%
- atmósfera (capas de agua): 0,001%

El volumen total de las precipitaciones anuales mundiales está estimado en 0,5 millones de Km^3 (0,1 millones de Km^3 sobre los continentales), de los cuales se evapotranspiran el 66% (la evaporación media en el conjunto de los océanos es del orden de 1000 mm. anuales), que viene a ser el 0,04% del volumen de agua del globo, o lo que es lo mismo, 40 veces el volumen de vapor de agua en la atmósfera. Ello implica una renovación muy rápida de la humedad atmosférica con un tiempo medio de residencia del vapor de agua en la atmósfera de 9 días. Así, dados los intercambios existentes en el ciclo del agua, se produce una circulación cíclica con cambios de estado en los que la energía es aportada por el Sol, que es el motor del ciclo (FIGURA 1).

Ya en tiempos pasados, Salomón hizo la siguiente observación: "Todos los ríos van a parar al mar y, aunque los ríos siguen fluyendo hacia él, el mar todavía no se ha llenado".

El verdadero origen del agua de los ríos fue comprobado por vez primera por dos científicos franceses, Pierre Perrault (1608-1680) y Edmé Mariotte (1620-1684). Perrault midió la altura de las precipitaciones en la cuenca del río Sena y obtuvo una media anual de 520 mm.; posteriormente estimó el valor de la aportación superficial anual de la cuenca y llegó a la conclusión de que ésta sólo representaba la 6ª parte del volumen total de las precipitaciones; así demostró que las precipitaciones eran suficientes para justificar las aportaciones superficiales de los ríos.

Por su parte, Mariotte midió el valor de la infiltración del agua de lluvia, a través del suelo en un sótano del Observatorio de París, y comprobó que esta infiltración variaba en función de las lluvias de igual modo que el caudal de los manantiales. Así, llegó a la conclusión de que los manantiales podrían estar perfectamente alimentados a partir del agua de lluvia que se infiltraba en el subsuelo. Mediante el método del flotador Mariotte estimó el caudal del río Sena y su descarga anual, cifra que supone una cantidad inferior

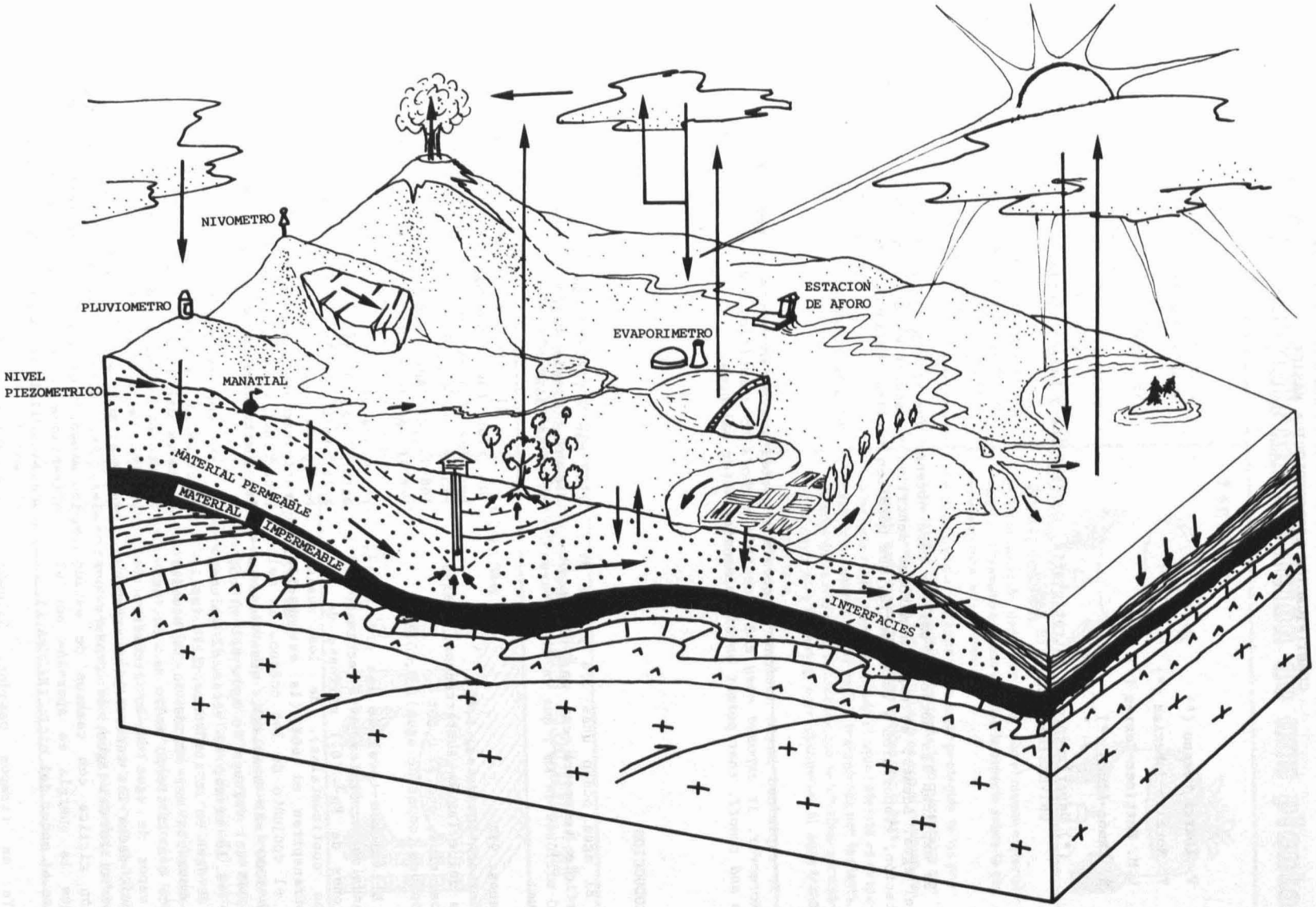

FIGURA 1.- El ciclo del agua.

a la 6ª parte del volumen del conjunto de las precipitaciones anuales de la cuenca. "Es pues evidente que si una tercera parte de las precipitaciones se evapora sobre la superficie de la tierra, queda todavía un volumen de agua suficiente para mantener el caudal del conjunto de pozos y ríos de la cuenca", según concluye el mismo Mariotte.

Unos cuantos años después, el astrónomo británico Edmund Halley (1656-1742) publicó una serie de estudios acerca de la evaporación en el mar Mediterráneo y llegó a la conclusión de que ésta era capaz de justificar el volumen de agua que aportaban a este mar todo el conjunto de sus ríos.

2.- DINAMICA DEL CICLO DEL AGUA

Los océanos son los inmensos depósitos de los cuales procede el agua del ciclo hidrológico y a los cuales retorna. No todas las partículas de agua recorren el ciclo hidrológico de una manera completa; en el caso más completo el agua se evapora en el océano y forma las nubes, las cuales son transportadas hacia los continentes donde se condensan y caen en forma de precipitaciones, las cuales, a su vez, son conducidas por medio de los ríos y del flujo subterráneo hasta el océano. Existe una pequeña aportación de agua al ciclo que procede de los procesos magmáticos y metamórficos, así como una sustracción constante de agua que pasa a los minerales.

La precipitación que alcanza la superficie continental, la mayor parte se realiza directamente sobre los océanos, puede ser distribuida de diferentes maneras:

- Devuelta a la atmósfera por evaporación o interceptada y transpirada por los vegetales (a ambos términos se les considera juntos a efectos cuantitativos y se les denomina evapotranspiración).
- Circular por la superficie del terreno (escorrentía superficial).
- Infiltrarse en el suelo y circular subterráneamente (escorrentía subterránea).

En definitiva, la expresión simplificada del ciclo del agua es: agua de precipitación = evapotranspiración + escorrentía superficial + infiltración (escorrentía subterránea).

El que la precipitación se distribuya de una forma u otra está condicionado por una serie de factores:

- Geológicos: los materiales permeables favorecen la infiltración mientras que las litologías impermeables facilitan la escorrentía superficial. Por su parte, zonas con gran densidad de fracturación favorecen la infiltración.
- Topográficos: si la topografía es suave, con pendientes pequeñas, el agua tiende a infiltrarse, predominando la escorrentía superficial si las pendientes son acusadas.
- Climáticos: el clima influye sobre la cantidad total y la distribución de las precipitaciones. Por ejemplo: en un clima tropical las precipitaciones son intensas y muy separadas en el tiempo, lo que da lugar a que excedan la capacidad de absorción del suelo y se produzca una escorrentía superficial. Si el clima es húmedo, con precipitaciones uniformemente separadas en el tiempo, las recargas del suelo son máximas pues se regula la absorción.
- Bióticos: la existencia de vegetación influye considerablemente, ya que consume una importante cantidad de agua. Sin embargo, su papel no se limita a ser consumidor, ya que es una gran productora de suelos, por lo general permeables, que favorecen la infiltración; además, parece ser que la implantación de áreas de bosque aumenta la precipitación en una región y su desaparición da lugar a una disminución.

3.- EL BALANCE HIDRICO

La expresión simplificada del balance hídrico (precipitación = evapotranspiración + escorrentía superficial + infiltrcíón) puede ser aplicada a sistemas de diferente escala; no obstante, los datos tomados en un lugar serán representativos de ese área dada la variabilidad en el espacio de los elementos del balance. Asímismo, éstos varían en el tiempo, por lo que para la elaboración del balance deben ser medidos en los mismos períodos de tiempo.

A continuación se exponen las nociones para el establecimiento de una estación hidrometereológica propia, cuyos resultados pueden ser discutidos por comparación con los datos de estaciones próximas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional. A su vez se puede intentar elaborar balances hídricos, aunque para ello se debe disponer de datos de caudales de una estación foronómica que pueden proceder de la Confederación Hidrográfica correspondiente.

La ubicación de la estación debe ser tal que consiga una óptima observación de las variables que se quieren medir; así, el terreno deberá ser llano y despejado de obstáculos (en el caso del pluviómetro no podrá existir ningún obstáculo a una distancia por lo menos dos veces mayor que la altura del obstáculo). Si es posible,

se elegirá un lugar de fácil acceso y próximo para facilitar la labor del encargado de las lecturas.

3.1.- Medida de las precipitaciones.

La lluvia se mide por la altura que alcanzaría sobre una superficie ideal, plana y horizontal, antes de sufrir pérdidas por evaporación o filtración. Esta altura de precipitación se cuantifica en milímetros (mm.) o bien en litros/m^2 (1 mm. = 1 l/m^2, es decir, una luvia de volumen de 1 litro caída sobre una superficie de 1 m^2 produce una altura de precipitación de 1 mm.).

Existen dos mecanismos de recogida y medida de las lluvias, el pluviógrafo y el pluviómetro:

- El **pluviógrafo** registra de un modo gráfico y contínuo la distribución e intensidades de las precipitaciones en el tiempo. Son aparatos bastante sofisticados y relativamente caros.

- El **pluviómetro** puede ser totalizador u ordinario. El totalizador realiza medidas, por lo general mensuales, en lugares de difícil acceso, y consiste en un gran colector con aislante térmico y sustancia para evitar la evaporación. Por su parte, el pluviómetro ordinario mide la cantidad de lluvia recibida en el intervalo de tiempo, generalmente un día, comprendido entre dos lecturas consecutivas. Es el más habitual y el de diseño más simple. Consiste en un colector que recibe el agua de lluvia a través de un cilindro receptor con una boca horizontal de sección conocida. En algunos pluviómetros el agua recibida se canaliza hasta el colector mediante un embudo para evitar la evaporación. La altura del agua recogida se mide en una probeta graduada según la superficie de la boca. En el Estado el modelo más utilizado es el tipo Hellman, con boca de 200 cm^2 de sección y situado a 1,50 m. sobre el suelo (FIGURA 2).

Para calcular la precipitación media (precipitación total de un año) de una zona de estudio (cuenca hidrológica, acuífero, etc.) se parte de los datos de las estaciones pluviométricas del área. Se pueden aplicar varios métodos:

- El método más simple admite que la precipitación media del área corresponde a la **media aritmética** de los datos de las estaciones existentes. Este sistema carece de precisión ya que no se tiene en cuenta la situación de las estaciones.

- El **método de los polígonos de THIESSEN** consiste en admitir que los datos de una estación son representativos de la superficie que se encuentra más

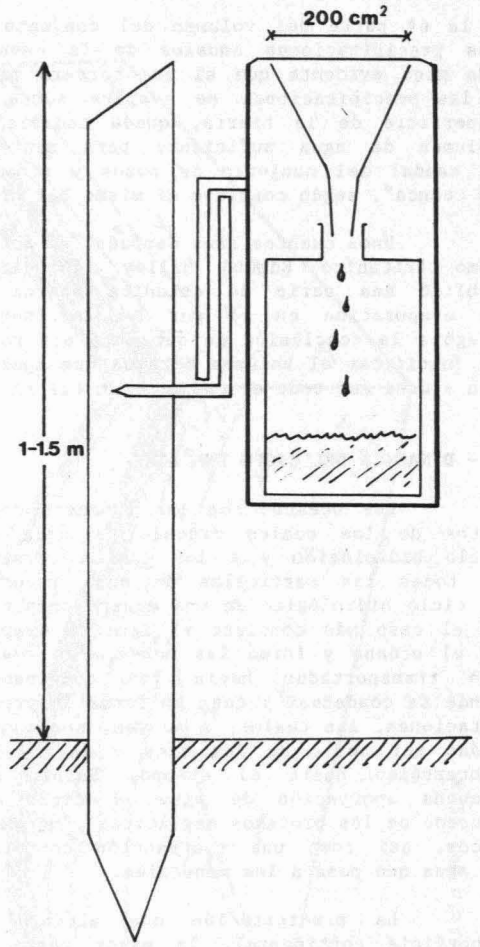

FIGURA 2.- Esquema de pluviómetro ordinario de tipo Hellman.

cercana a esa estación que a otra. De esta forma se divide el área de estudio en polígonos, cada uno de los cuales contiene una estación representativa de las precipitaciones de dicho polígono. Los polígonos se delimitan mediante mediatrices de segmentos (FIGURA 3).

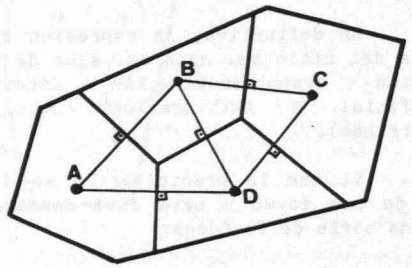

FIGURA 3.- Polígono de THIESSEN.

ESTACION	PRECIPITACION	SUPERFICIE
A	P_a	S_a
B	P_b	S_b
C	P_c	S_c
D	P_d	S_d

Para hallar la media se realiza el siguiente cálculo:

$$P_{media} = \frac{\Sigma P_i S_i}{S_t} = \frac{P_a \cdot S_a + P_b \cdot S_b + P_c \cdot S_c + P_d \cdot S_d}{S_{total}}$$

En este método no se tiene en cuenta la distribución real de las precipitaciones.

- El análisis de **mapas de isoyetas** (FIGURA 4) (líneas que unen puntos con precipitaciones medias iguales), si se tiene en cuenta la distribución de las precipitaciones. Se planimetran las superficies entre isoyetas y a cada superficie se le asigna como precipitación característica la media aritmética de las dos isoyetas que la delimitan. Conocida la superficie total del área de estudio, se realiza una curva en función de las precipitaciones acumuladas (FIGURA 5). La precipitación media de la cuenca es la que corresponde al 50% de la superficie.

Para la medida de la nieve pueden emplearse los pluviómetros ordinarios o totalizadores, con algún aditivo que facilite

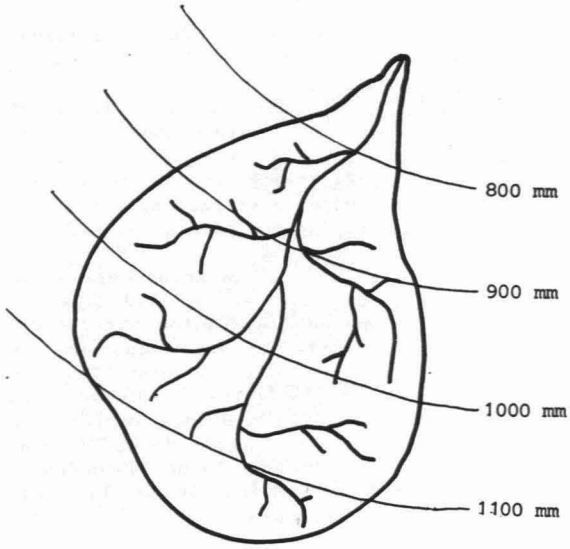

FIGURA 4.- Mapa de isoyetas.

la fusión (por ejemplo: cloruro cálcico anhidro). De esta forma se obtendrá el equivalente en agua líquida de la nieve.

También se utilizan regletas graduadas (**nivómetros**) que miden la altura de la nieve sobre suelo horizontal, aproximadamente la altura de lluvia equivalente es la décima parte del espesor medio con una regleta graduada.

3.2.- Medida de la evapotranspiración.

Una gran parte del agua que se precipita sobre la superficie de la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor

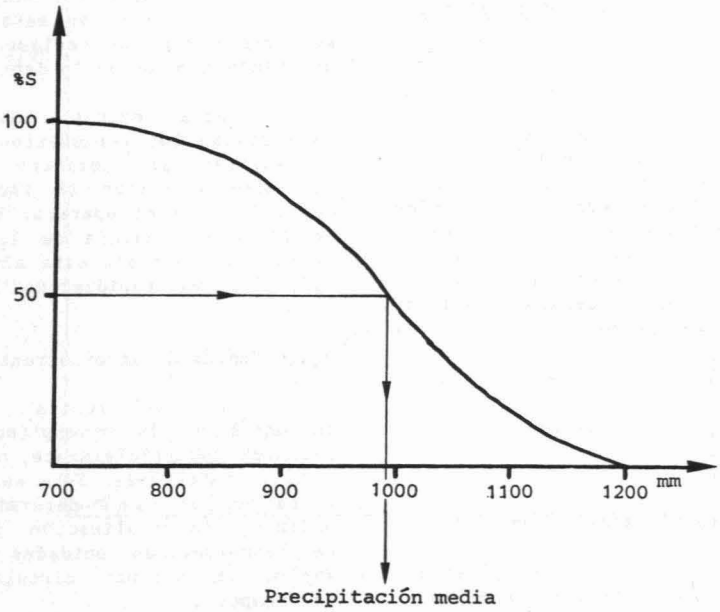

FIGURA 5.- Curva acumulativa de precipitaciones.

a través de la acción combinada de la evaporación y la transpiración.

El volumen total de la evaporación real es muy difícil de independizar de la transpiración, de ahí que ambos efectos suelan ser considerados en conjunto bajo el concepto de **evapotranspiración**, que incluye todas las pérdidas por paso a vapor.

Existe una correlación entre la energía solar recibida en un área determinada y la **evapotranspiración potencial**, ETP (la que tendría un suelo cubierto de vegetación en desarrollo si dispusiera de todo el agua que solicita); es por ello que la ETP se evalua mediante expresiones empíricas que están en función de la temperatura. Por ejemplo, la fórmula de THORNTHWAITE que determina la ETP en función de las temperaturas medias mensuales.

$$ETP_m = c.t_m^a = 1{,}6\left(\frac{20}{i_m}\right)^a.tm^a = 1{,}6\left(\frac{10t_m}{i_m}\right)^a ,$$

siendo

ETP_m= evaporación mensual en centímetros.

t_m= temperatura media mensual= $\frac{\Sigma \text{ t diarias}}{\text{nº días del mes}}$

$$C(\text{coeficiente}) = 1{,}6\left(\frac{10}{i_m}\right)^a$$

$$a(\text{coeficiente}) = 1{,}6.\frac{i_m}{100} + 0{,}5$$

i_m= índice de calor del mes = $\left(\frac{t_m}{5}\right)^{1,5}$

ETP_m ajustada = ETP_m sin ajustar x

$$x \frac{\text{Nº horas de sol diarias}}{12} x \frac{\text{días del mes}}{30}$$

ETP anual = Σ ETP_m

Si además de los datos de temperatura se dispone de las precipitaciones mensuales, se puede calcular la **evapotranspiración real**, que es la cantidad de agua evapotranspirada en función del poder evaporante de la atmósfera y del agua que el suelo realmente contiene. Se puede determinar mediante las siguientes expresiones:

Fórumula de TURC

$$ETR_a = \frac{P_m}{0{,}9 + \frac{P_m^2}{L^2}} , \quad \text{siendo}$$

ETR_a= evapotranspiración anual en mm./año.

P_m= precipitación media anual (precipitación anual total) = Σ precipitaciones mensuales.

$L = 300 + 25T + 0{,}05T^3$

T= temperatura anual media = $\frac{\Sigma \text{ p.tm}}{p_m}$

P= precipitación mensual total = Σ precipitaciones diarias.

T_m= temperatura media mensual = $\frac{\Sigma \text{ t diarias}}{\text{nº de días del mes}}$

Fórmula de COUTAGNE

$ETR = p_m - \lambda p_m^2$, siendo

ETR= evapotranspiración anual en metros.

p_m= precipitación media anual en metros.

$$\lambda = \frac{1}{0{,}8 + 0{,}14T}$$

T= temperatura anual media en ºC.

Esta fórmula sólo es aplicable cuando:

$$\frac{1}{8\lambda} < p_m < \frac{1}{\lambda}$$

3.3.- Cuantificación de la temperatura.

Corrientemente se usa el termómetro de mercurio, líquido que al dilatarse discurre en forma contínua por el interior de un capilar, leyéndose directamente en la escala grabada sobre el tubo termométrico, la temperatura. En graduación centígrada, la escala está dividida en medios grados o en décimas de grado.

Es de destacar que lo que interesa medir es la temperatura del aire y por tanto no conviene que el Sol incida directamente sobre el termómetro; tampoco debe estancarse el aire alrededor del termómetro, ya que la mayor masa específica del mercurio haría que cediese calor al aire, dilatándose menos de lo debido.

Para evitar ambas cuestiones, se instalan los termómetros en el interior de garitas que permiten la circulación del aire y evitan la incidencia directa del Sol sobre el aparato. Esta garita debe de tener una altura de 1,50 m. sobre el suelo, ya que hasta esta altura la temperatura varía muy rápidamente.

3.4.- Medida de la escorrentía.

La escorrentía superficial es la parte de la precipitación que no es retenida superficialmente, ni evapotranspirada ni infiltrada. Esta escorrentía discurrirá por un cauce determinado y se mide mediante la realización de aforos, que se resuelven en unidades de caudal, es decir, en volumen circulado por unidad de tiempo.

Las estaciones de aforo buscan

la medida de una variable auxiliar, cuyo conocimiento nos conduzca a través de una función intermedia al conocimiento del caudal. La variable auxiliar idónea es el valor de h (nivel variable de las aguas).

La función intermedia es la llamada curva o tabla de gasto, o curva de tarado (Q= f(h), FIGURA 6). A partir de ella, para cada valor de h en un momento dado, conocemos el valor del caudal, Q, en ese mismo instante.

3.4.1.- Medición de niveles en el tiempo.

El nivel del río se ha de leer en una escala ubicada en un margen; como las oscilaciones del nivel pueden ser frecuentes es preciso hacer las lecturas a intervalos que reflejan las variaciones de caudal de manera precisa. Por lo general, la lectura diaria es suficiente para elaborar balances hídricos estimativos.

La escala ha de ser visible en todo tiempo y debe ir colocada de forma que no quede en seco cuando los caudales sean bajos. Debe ir bien anclada para que no la arrastre la corriente. Además, debe tener frácil acceso y fácil lectura, con una división mínima apreciable de un centímetro (FIGURA 7).

Por otra parte, existen aparatos que registran de forma contínua la variación de niveles de las aguas (limnígrafos).

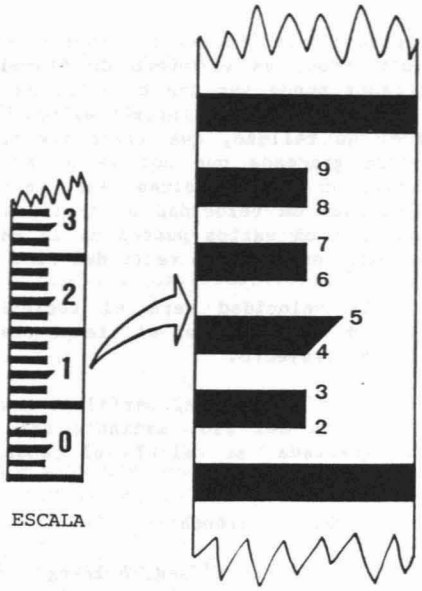

FIGURA 7.- Escala para la medición de la altura de la lámina de agua.

3.4.2.- Realización de aforos en cursos de agua.

Existen varios métodos de aforo (mecánicos con molinete hidraúlico, químicos, radiactivos, etc.); no obstante, el más rudimentario pra hallar la velocidad media de la corriente, pero también el

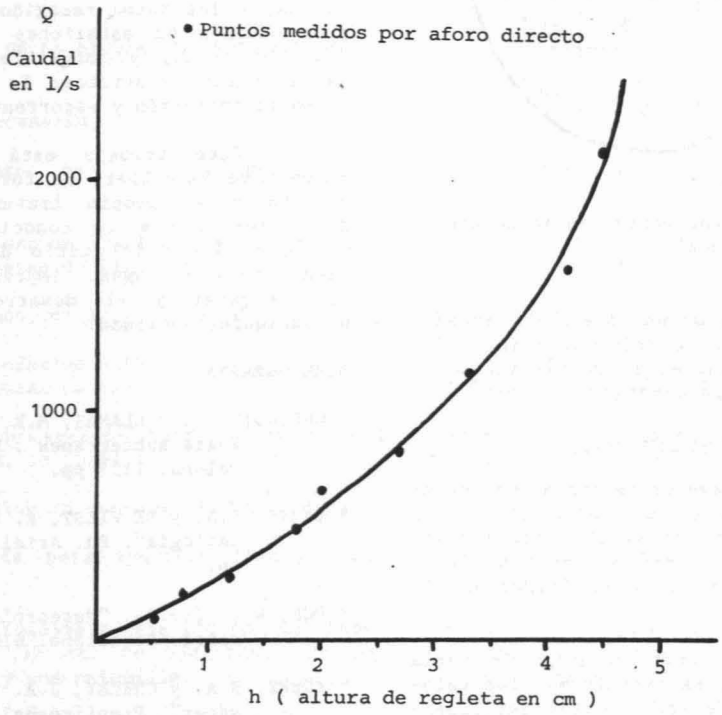

FIGURA 6.- Curva de gastos o de tarado.

más rápido y que precisa de menos elementos y preparativos, es el **aforo de flotadores.** El flotador puede ser una botella, de forma que se consiguen distintos lastres según el nivel de relleno, que lleve incorporado una barra graduada que nos va a facilitar la lectura de la profundidad. Así, se realizarán medidas de velocidad a distintas profundidades y en varios puntos de la sección transversal, en un tramo recto del río.

La velocidad será el cociente de la longitud recorrida por el tiempo transcurrido en el trayecto.

Si se levanta el perfil transversal de la sección del río, mediante una sonda o barra graduada, se calcula el caudal mediante la expresión:

$Q= V_m.S$, siendo

Q= caudal del río en m^3/seg. ó l/seg

V_m= velocidad media de la corriente

S= sección del río

o, bien, multiplicando cada velocidad por el área más cercana en la sección del cauce (FIGURA 8).

$Q= \Sigma\ v.S$

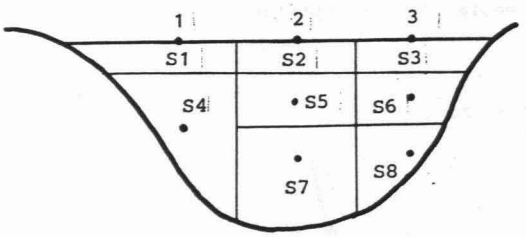

FIGURA 8.- Perfil transversal de la sección de un cauce.

En el caso de una avenida o inundación, se debe tomar la referencia del nivel alcanzado, para levantar el perfil transversal una vez pasada la avenida.

3.4.3.- Elaboración de los datos.

El **limnigrama** es la curva que registra en cada instante el valor del nivel o altura del río. En el gráfico las abcisas son los tiempos (en horas o días), h= f(t), y las ordenadas las alturas leídas en la escala.

Al hacer entrar en juego la tabla de gastos, Q= f(h), se transforman los valores de h en Q, es decir, a partir del limnigrama se obtiene el **hidrograma** Q= f(t).

Una vez dibujado el hidrograma es fácil deducir los caudales medios diarios, mensuales, etc., ya que las áreas S= Q. Δt representan las aportaciones del río en el intervalo de tiempo Δt.

3.5.- Medida de la infiltración.

La infiltración representa el flujo de aguas en movimiento descendente entre las zonas de aireación del suelo y la de saturación; en este trayecto la circulación es predominantemente vertical, a diferencia de lo que ocurre en un acuífero donde es horizontal.

La cantidad de agua infiltrada depende de: la capacidad de absorción del suelo, el tipo de material del terreno, la topografía, las características de la precipitación y la existencia de vegetación.

La infiltración es el elemento hidrológico de cuantificación más dificultosa; no obstante, existen métodos de estimación en base a lisímetros o por deducción a partir del balance hídrico, si ya se han calculado los demás componentes.

4.- CONCLUSIONES

Se pretende que los alumnos obtengan una visión global de la dinámica del ciclo del agua en base a la explicación de las nociones básicas del ciclo y a la realización de balances hídricos elementales. Estos balances se pueden elaborar en base a los datos recogidos por los propios alumnos en estaciones de control de sencillo diseño y asequible construcción, que permiten cuantificar la precipitación, evapotranspiración y escorrentía.

Este trabajo está pensado para alumnos de Bachiller, de forma que la toma directa y el propio tratamiento de los datos les aporte un conocimiento directo de la dinámica del ciclo de un bien tan vital como el agua, imprescindible para el bienestar y el desarrollo económico de cualquier sociedad.

BIBLIOGRAFIA

* CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (1983). "Hidrología subterránea". Ed. Omega. Barcelona. 1157 pp.

* DAVIS, S.N. y DE WIEST, R. (1971). "Hidrogeología". Ed. Ariel, Barcelona. 563 pp.

* DON, W.L. (1978). "Meteorología". Ed. Reverté. Barcelona. 610 pp.

* FREEZ, R.A. y CHERRY, J.A. (1979). "Groundwater". Prentice-Hall, Inc., Englowood Cliffs, N.J. 07632. 604 pp.