

Precipitaciones

Concepto. Tipos

Precipitación es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye básicamente: lluvia, nieve y granizo. (También rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total)

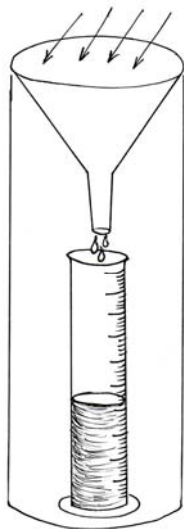
En relación a su origen, pueden distinguirse los siguientes tipos:

- Las *ciclónicas* son las provocadas por los frentes asociados a una borrasca o ciclón. La mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca se debe a este tipo de precipitaciones .
- Las de *convección* se producen por el ascenso de bolsas de aire caliente; son las tormentas de verano.
- Las precipitaciones *orográficas* se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa.

El estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal (en general la única) entrada de agua a una cuenca. También es fundamental en la previsión de avenidas, diseño de obras públicas, estudios de erosión, etc.

Intensidad de precipitación es igual a precipitación/tiempo.

Medida. Unidades



Podemos cuantificar las precipitaciones caídas en un punto mediante cualquier recipiente de paredes rectas, midiendo después la lámina de agua recogida. La *unidad de medida es el milímetro*¹. Es obvio que el tamaño del recipiente de medida no influye en el espesor de la lámina de agua recogida.

La *intensidad de precipitación*, aunque conceptualmente se refiere a un instante, suele expresarse en *mm/hora*.

Pluviómetros: Para poder leer con más precisión el agua recogida ($\pm 0,1$ mm) un pluviómetro recoge el agua en una bureta de sección menor a la de la boca del pluviómetro. La lectura del agua recogida se efectúa una vez al día².

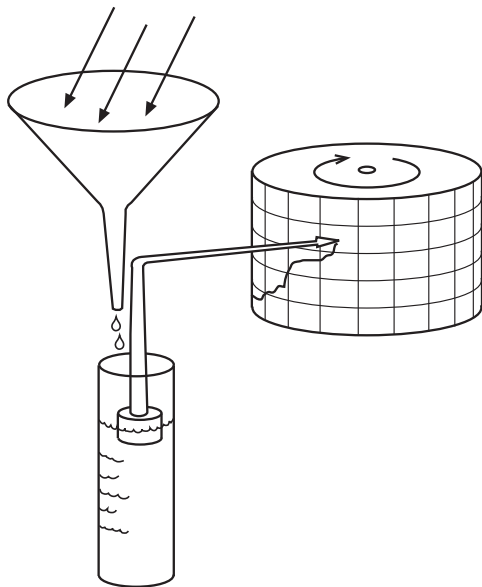
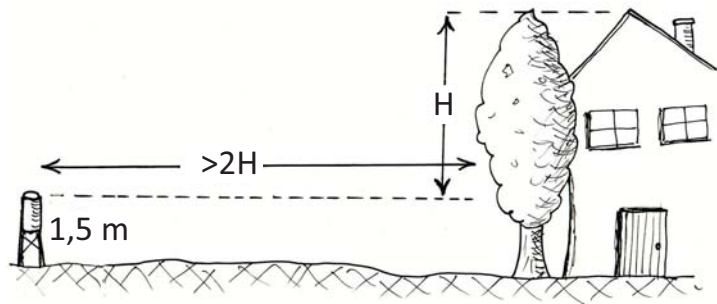
Aunque con criterios geométricos el tamaño de la boca del pluviómetro no influye en los milímetros recogidos, sí pueden apreciarse pequeñísimas variaciones dependiendo del tamaño del recipiente, y también de la altura desde el suelo, por lo que cada país fija estos parámetros: En España, la boca del pluviómetro es de 200 cm²

¹ La unidad de *litros / m²* tan utilizada en los medios de comunicación es equivalente al *mm*.:Un litro repartido por una superficie de 1 m² origina una lámina de agua de 1 mm.

² En zonas difícilmente accesibles, a veces se instalan *pluviómetros totalizadores*, de mayor tamaño y con una sustancia oleosa recubriendo el agua para evitar la evaporación.

y debe estar a 1,5 metros de altura sobre el suelo.

El máximo error puede proceder de una ubicación defectuosa del pluviómetro. La norma fundamental es que debe estar alejado de árboles o construcciones elevadas, en general a más del doble de la altura del obstáculo.



Pluviógrafos: En general, una medida al día de la precipitación puede ser suficiente, pero en muchas ocasiones necesitamos un registro continuo del fenómeno; por ejemplo, si en un día han caído 100 mm., la avenida que se originará será muy diferente si se han registrado a lo largo de todo el día o si han caído en una hora.

Un pluviógrafo clásico funciona como un pluviómetro pero que registra la evolución de la precipitación con el tiempo, bien con tinta y papel, bien digitalmente. En algunos modelos, el pluviógrafo está dotado de un flotador que hace subir a una plumilla que registra gráficamente el llenado del recipiente a lo largo del tiempo.

Otros modelos (de "cangilones") funcionan con dos pequeños recipientes dispuestos en forma de columpio o balancín, y que recogen alternativamente

agua en uno y otro lado (Cuando un lado se llena, el peso vuelca el balancín y el agua comienza a caer en el otro lado). El agua recogida en cada vuelco equivale normalmente a 0,2 mm de precipitación.

Con cualquiera de los sistemas, los aparatos más modernos registran los datos electrónicamente, no se dibujan sino que son grabados en un ordenador, o los comunican instantáneamente a una oficina central (por ejemplo, para previsión de avenidas).

El gráfico obtenido directamente con la plumilla o representando los datos digitales, se denomina **pluviograma**, y refleja la precipitación acumulada en función del tiempo.

La pendiente del gráfico obtenido en el pluviógrafo nos permite calcular la intensidad de precipitación en cada momento.

Nivómetros: Los más básicos están constituidos por una superficie, similar a una mesa, con una escala en centímetros para medir el espesor caído. Aproximadamente, 1 cm. de nieve equivale a, u origina, 1 mm. de agua, aunque puede variar de 0,5 a 2 mm, dependiendo de la densidad de la



Pluviógrafo de cangilones digital

nieve. En zonas de alta montaña, a veces se instalan estacas con marcas de colores visibles a gran distancia.

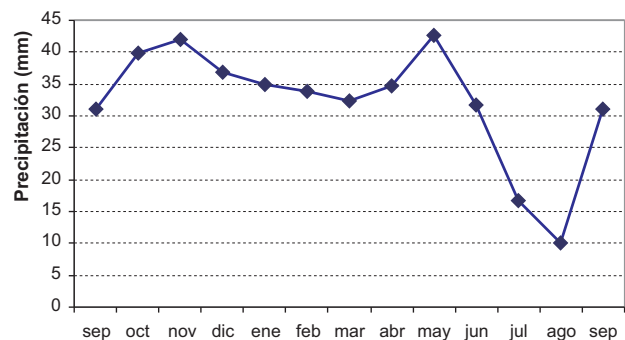
Redes pluviométricas. Generalmente se utilizan datos pluviométricos recogidos por el organismo estatal o regional correspondiente. Cada país dispone de una red de pluviómetros y son estos datos los que se utilizan para cualquier estudio; raramente se instalan algunos para una investigación concreta. Una red de pluviómetros debe estar adecuadamente diseñada, dependiendo del relieve, de la densidad de población, del interés para obras hidráulicas, previsión de avenidas, etc. Como primera aproximación, en zonas llanas puede bastar con un pluviómetro cada 250 km², pero en zonas de montaña la densidad debe ser mayor.

Elaboración de los datos pluviométricos de un punto

Depende de los objetivos del trabajo. Para el estudio de los recursos hídricos de una región, trabajaremos con datos de precipitaciones mensuales y anuales. En cambio, si nos interesan las precipitaciones como generadoras de caudales excepcionales (avenidas), comenzaremos por precipitaciones máximas diarias (el día más lluvioso de cada año), para aumentar el detalle hasta las horas o minutos más lluviosos.

En cualquier caso, a partir de las medidas realizadas en una estación pluviométrica, se computan básicamente: **P diaria**, **P mensual** y **P anual** ("Módulo pluviométrico"), obtenidas simplemente sumando las precipitaciones diarias del mes y del año. El año hidrológico va del 1 de Octubre al 30 de Septiembre³.

El paso siguiente es calcular los valores medios para una serie de años: **P mensual media** y **P anual media**. Para esto necesitamos disponer de *series climáticas* largas, en general más de 20 años. Así podemos decir que la P anual media en un punto de 1972-73 a 2003-04 (32 años hidrológicos) es de 485 mm. Si decimos que la P media de Octubre para el mismo periodo es de 63 mm., nos estamos refiriendo a la media aritmética de las precipitaciones de los 32 Octubres de ese periodo.



Precipitaciones mensuales medias en Matacán (Salamanca) (1945-94)

Se ha repetido Septiembre en ambos extremos para apreciar gráficamente la evolución a lo largo de todo el periodo anual

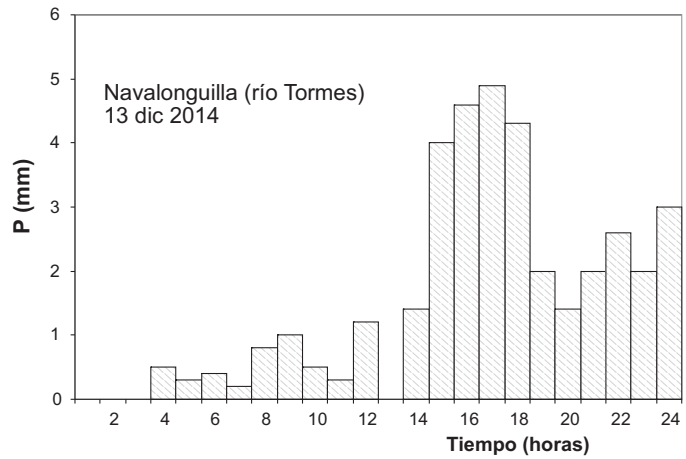
Hietogramas

Un *hietograma* (del griego *Hietos*, lluvia) es un gráfico que expresa precipitación en función del tiempo. En ordenadas generalmente figura la precipitación caída (mm), pero a veces se construyen hietogramas de intensidad de precipitación (mm/hora).

³ A veces se considera del 1 de Septiembre al 31 de Agosto, lo que sería más lógico; en España muchos años en el mes de Septiembre ya comienzan las lluvias.

En otras partes del mundo esto es variable dependiendo del régimen climático.

Generalmente se representa como un histograma (gráfico de barras, figura adjunta), aunque a veces también se expresa como un gráfico de línea (como la figura de más arriba, que sería un hietograma anual).



A veces un hietograma se refiere a un día o a una tormenta concreta (en el eje de abcisas, las horas que duró la tormenta); en otras ocasiones el periodo de tiempo representado en el eje horizontal puede ser más amplio: meses o años.

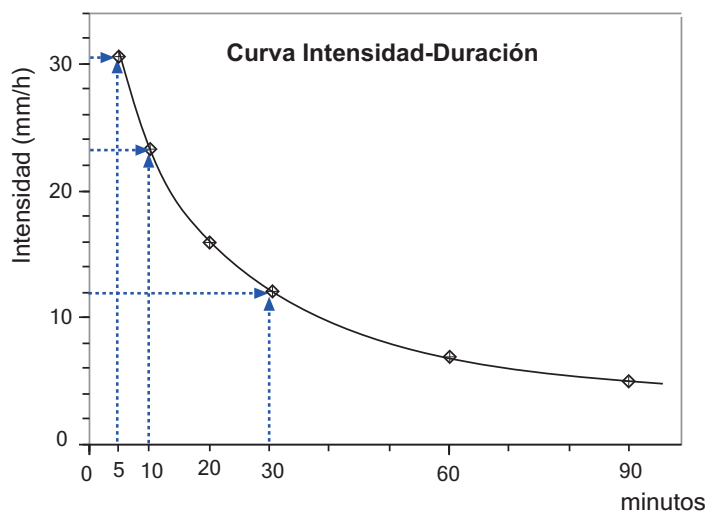
Para su elaboración, si se trata de un hietograma mensual o anual, bastará con representar datos diarios. Si se trata de un hietograma de un día o de unas horas de duración, necesitamos una banda de pluviógrafo, leyendo la precipitación caída en los intervalos elegidos, por ejemplo, de 10 en 10 minutos.

Si no se dispone de datos de pluviógrafo, sino solamente de la precipitación diaria, aún se puede calcular la forma previsible del hietograma (ver al final del apartado siguiente)

Curva Intensidad-Duración

Es una curva que expresa la máxima intensidad de precipitación registrada en diversos intervalos de tiempo. Por ejemplo, en la figura adjunta podemos leer (líneas de puntos) que en los 5 minutos más lluviosos la intensidad era de 30 mm/hora, en los 10 minutos más lluviosos la intensidad es de 23 mm/hora y a los 30 minutos más lluviosos corresponden 12 mm/hora.

Es muy importante en diversas aplicaciones de los datos pluviométricos. Concretamente, lo utilizaremos para calcular los caudales generados en los cauces superficiales a partir de las precipitaciones, por ejemplo para el diseño de obras públicas relacionadas con la escorrentía superficial.



Si se trata de un aguacero real, para realizar la curva, se buscan en los datos pluviográficos los 5 minutos de máxima precipitación, los 10 minutos, etc... y se calcula la intensidad (en mm/hora) para cada uno de esos intervalos. Por ejemplo, si en los 10 minutos más lluviosos se recogieron 3,8 mm, la intensidad en mm/hora sería igual a:

$$Intensidad = 3,8 \text{ mm} \cdot \frac{60}{10} = 22,8 \text{ mm / hora}$$

Con frecuencia disponemos solamente del dato de la precipitación diaria. En este caso existen diversas fórmulas para calcular la intensidad para un intervalo de tiempo menor dentro de ese día, o, lo que es lo mismo, ecuaciones que nos permiten dibujar la curva *Intensidad-Duración* (Ver Apéndice 1).

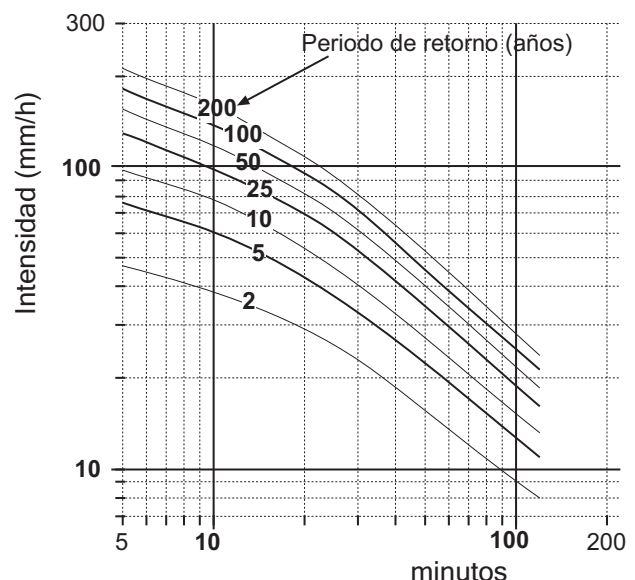
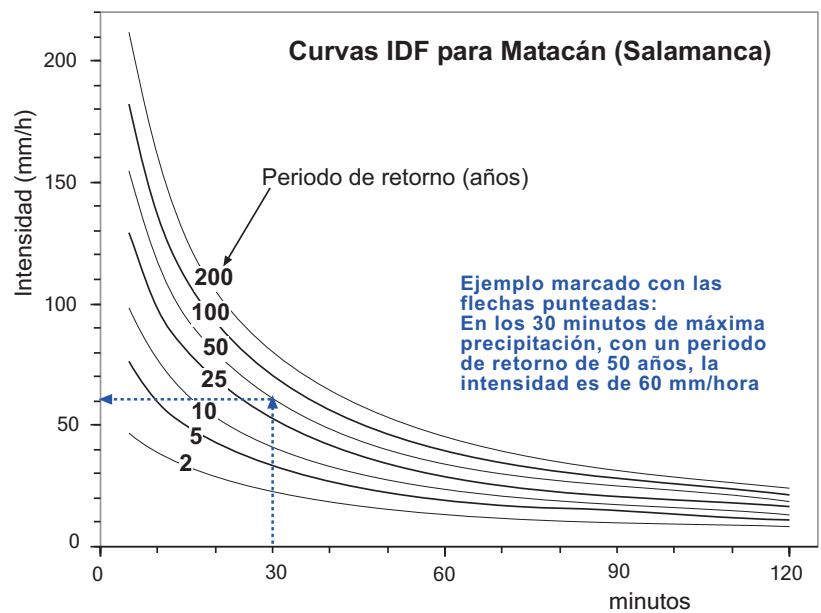
Más usual es que la curva *Intensidad-Duración* no se refiera a un aguacero producido sino a la precipitación teórica que se produciría en ese lugar con un determinado periodo de retorno, por ejemplo: 200 años. En este caso, la curva representa los 10 minutos (20, 30, etc) más lluviosos que esperamos que se produzcan en este punto cada 200 años.

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Es usual representar conjuntamente varias curvas **Intensidad-Duración** para **diversos periodos de retorno**, dando lugar a una familia de curvas denominadas **Intensidad-Duración-Frecuencia**⁴ ("Curvas IDF")⁵. En este tipo de gráficos aparecen varias curvas intensidad-duración correspondientes a diversos periodos de retorno, por ejemplo: 10, 25, ... años.

Para una mejor lectura, puede preferirse representar las curvas IDF en escalas logarítmicas. En la figura inferior aparecen las mismas curvas IDF del gráfico superior, pero ambos ejes en escala logarítmica.

La elaboración de una curva IDF es una tarea laboriosa y requiere unos datos de partida de los que normalmente no disponemos (En el Apéndice 2 se esboza la metodología a seguir). Como indicábamos en el apartado anterior, si disponemos de ecuaciones que reflejen las curvas



⁴ La frecuencia es el inverso del periodo de retorno: Si algo sucede cada 50 años, su frecuencia es de 0,02 (=1/50). Esto se trata en el tema *Distribuciones Estadísticas* (Sección *Complementos*)

⁵ En *Environmental Hydrology* (Ward y Trimble, 2004, pp. 45-47) se denominan curvas IDF al gráfico de probabilidades, en el que se representa en un eje precipitaciones anuales ordenadas de mayor a menor, en el otro la frecuencia o porcentaje de casos que superan cada valor. Es un error, eso no son las curvas IDF.

Intensidad-duración (Apéndice 1) la elaboración es simple, aunque se trata solamente de una estimación, y además estas curvas son válidas para la región o país en que se han desarrollado las ecuaciones.

Estudio estadístico

Cuando disponemos de series pluviométricas largas (en general, de más de 20 años) podemos calcular qué probabilidad existe de que las precipitaciones del año próximo superen un determinado valor, o, al revés, que precipitación se supera (por ejemplo) un 10% de años.

Este cálculo puede realizarse con series de precipitaciones **anuales, mensuales o diarias máximas**. Por ejemplo, calcularíamos, respectivamente, qué probabilidad existe de que se produzca una precipitación anual mayor de 950 mm/año, que el próximo mes de Abril se superen los 140 mm o bien que el día más lluvioso del próximo año se recojan más de 65 mm/día (O inversamente: qué precipitación anual, mensual o diaria máxima se alcanzará o superará con un probabilidad del 2%)

En cualquiera de los casos, debe ajustarse la serie de datos a una ley estadística (Gauss, Gumbel,..)

Ordenes de magnitud

En España, la *precipitación anual media* oscila en la mayoría de las regiones entre 400 y 1000 mm., aunque en el SE las medias anuales son inferiores a 300 mm. y en algunos puntos de Galicia y en zonas de montaña presentan valores muy superiores a 1000 mm.

En el mundo encontramos precipitaciones desde 20-30 mm/año (por ejemplo, El Cairo), hasta valores superiores a 5000 mm./año en áreas sujetas a climas monzónicos.

En cuanto a las *intensidades*, una lluvia ligera oscila entre 0,25 a 1 mm/hora, y una lluvia intensa o torrencial sobrepasa los 20 mm./hora. Las precipitaciones que originan avenidas catastróficas son excepcionalmente intensas, del orden de 200 mm en una hora.

Elaboración de los datos de una zona. Cálculo de la P media

Normalmente la unidad de trabajo será una cuenca hidrológica, y los objetivos serán básicamente el cálculo de la *precipitación media* caída sobre la cuenca (o su equivalente: el *volumen total de agua recogido* en la cuenca) y, eventualmente, la *distribución espacial del fenómeno*, su variación en relación con alguna variable física de la cuenca.

Vamos a centrarnos en el cálculo de la P media caída sobre una cuenca en un periodo determinado (un día, un año,...). Una vez conocido este valor, se obtiene fácilmente el volumen de agua caído multiplicando por la superficie total de la cuenca.

Si las estaciones pluviométricas estuvieran repartidas homogéneamente, bastaría con calcular la media aritmética, pero como en las zonas de montaña la densidad de puntos es mayor que en la llanura, este procedimiento genera un error grande. Se utilizan dos procedimientos: el mapa de isoyetas y los polígonos de Thiessen. Previamente conviene considerar la variación de la precipitación con la altitud.

Relación P-altitud

Se representa la P en función de la cota de cada estación pluviométrica. Las precipitaciones aumentan con la altitud, hasta una cierta cota ("altura óptima pluvial"), a partir de la cual se registran precipitaciones menores; esto sólo se aprecia en cuencas con cotas elevadas, del orden de 2000 metros.

Mapa de isoyetas

Se trazan isolíneas que engloben puntos comprendidos en los intervalos elegidos. El valor de las isolíneas depende del periodo considerado y de la extensión de la zona de estudio; por ejemplo, para un mapa de isoyetas anuales podrían representarse isoyetas de 100 en 100 mm., aunque si se trata de un área sin grandes variaciones en la pluviometría, el intervalo debería ser menor.

Al trazar las isolíneas, si en alguna zona no disponemos de suficientes puntos, las curvas de nivel del mapa pueden servir de ayuda si previamente hemos considerado la relación entre P y la altitud.

También se puede confeccionar un mapa de isoyetas para un día, con el fin de estudiar un aguacero determinado. En ese caso, la equidistancia entre isoyetas sería menor, por ejemplo de 10 mm.

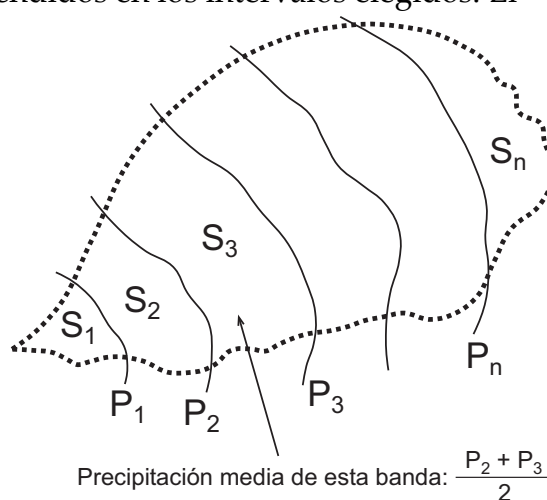
Para calcular la P media (P_m), basta calcular la media ponderada:

Los valores S_i son las superficies obtenidas planimetrando las franjas que quedan entre isoyetas, y P_i son las precipitaciones asignadas a cada isoyeta (ver la Figura). Las precipitaciones correspondientes a las dos franjas extremas (P'_1 y P'_n) se asignan a estima:

$$P_m = \frac{S_1 P'_1 + S_2 \frac{P_1 + P_2}{2} + S_3 \frac{P_2 + P_3}{2} + \dots + S_n P'_n}{S_{total}}$$

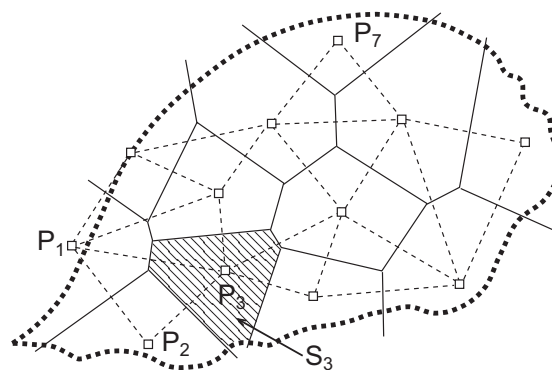
Un mapa de isoyetas es un documento

básico dentro del estudio hidrológico de una cuenca: no solamente nos permite cuantificar el valor medio, como hemos indicado, sino que presenta gráficamente la distribución espacial de la precipitación para el periodo considerado



Polígonos de Thiessen

Mientras que el procedimiento anterior conlleva un cierto grado de subjetividad, el trazado de polígonos es absolutamente objetivo. Cada estación pluviométrica se rodea de un polígono y se supone que todo el polígono recibe la misma precipitación que el punto central.



Para trazar los polígonos se trazan las mediatrices (perpendicular en el punto medio) de los segmentos que unen las diversas estaciones pluviométricas.

Planimetrando los polígonos, obtenemos sus superficies (S_i), y la P media (P_m), se calcula con la media ponderada:

$$P_m = \frac{S_1 P_1 + S_2 P_2 + \dots + S_n P_n}{S_{total}}$$

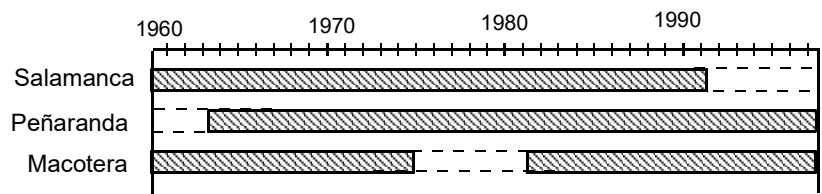
En este caso, los valores P_1, P_2, \dots, P_n corresponden a los valores de los puntos.

Tanto en esta fórmula como en la aplicada al mapa de isoyetas, el numerador corresponde al volumen de agua precipitado.

Homogeneización de las series pluviométricas⁶

Esta es una fase de trabajo previa a la elaboración de isoyetas o cálculo de la P media. Si todo lo anterior se refiere a la P media de una serie de años, debe realizarse sobre series de datos análogas para todos los puntos. Sería incorrecto realizar, por ejemplo, un mapa de isoyetas de una cuenca y que los datos de un punto fueran la media de 25 años y los de otro de 13 años. Para que todos los valores de P media se refieran al mismo periodo es preciso *homogeneizar las series pluviométricas*.

1º. Se elige un intervalo de años para el que la mayoría de las estaciones dispongan de series completas. Se desprecian las estaciones con pocos datos en el intervalo elegido. Se elabora un esquema con los datos disponibles (dibujo adjunto)



2º. Si faltan algunos datos, se pueden estimar, estableciendo una correlación entre una estación incompleta y otra estación completa próxima. Se establece la correlación utilizando los años comunes entre dos estaciones, y con la ecuación obtenida se estiman los datos que faltan a partir de los datos de la estación que sí los tiene. Con el esquema de ejemplo adjunto, los datos inexistentes de Macotera se estimarían a partir de los de Peñaranda, si previamente hemos establecido una buena correlación entre ambas utilizando los datos de años comunes, que podría ser así:

$$P_{Macotera} = P_{Peñaranda} \cdot 1,083 + 23,61$$

⁶ Ver en la sección de "Prácticas": Homogeneización de series pluviométricas.

Apéndice 1 : Cálculo de la intensidad de precipitación para un intervalo cualquiera a partir de la Precipitación diaria. Estimación de curvas Intensidad-Duración e IDF

Para España, se ha desarrollado (M^o FOMENTO, 2016) ⁷ la siguiente formulación para estimar la intensidad de precipitación para cualquier intervalo de tiempo (<24 horas) a partir de la precipitación diaria.

1^o. Cálculo de la **intensidad media diaria** (I_d) a partir de la precipitación diaria:

$$I_d = P \text{ día } /24$$

2^o. Obtención de la **intensidad máxima para cualquier intervalo t** . mediante la fórmula siguiente:

$$I_t = I_d \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{3,5287 - 2,5287 \cdot t^{0,1}}$$

donde:

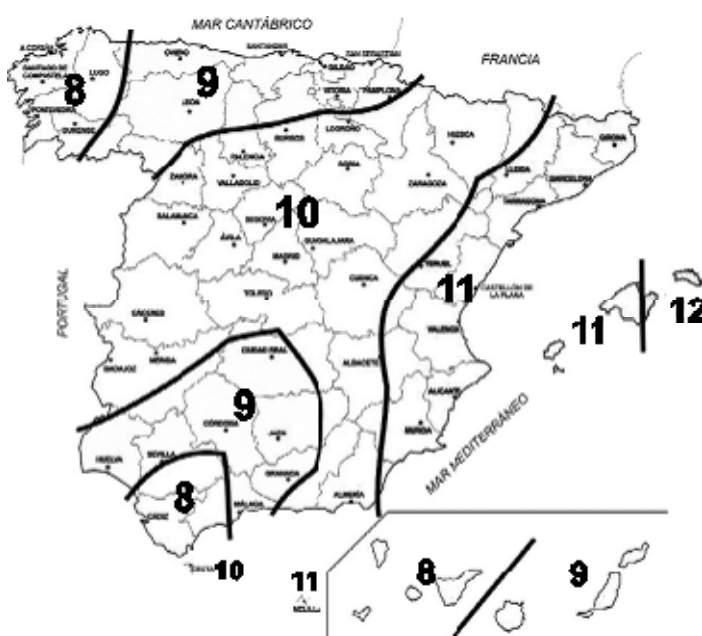
t = periodo de tiempo (horas) para el que se quiere evaluar la intensidad

I_t = Intensidad media en el periodo t

I_d = intensidad media diaria = P diaria /24

I_1 = Intensidad media en la hora más lluviosa de ese día.

No es necesario conocer el valor de I_1 , ya que en la fórmula introducimos el valor de (I_1/I_d) leído directamente del mapa adjunto (M^o FOMENTO, 2016).



Si leemos 9 quiere decir que en la hora más lluviosa la intensidad es 9 veces mayor que la intensidad media de todo el día.

Para el trazado de la curva *Intensidad-Duración* será suficiente aplicar la ecuación anterior para varias duraciones (p. ej.: 10 min, 30 min, 1, 2, 4 horas, etc) y representar los resultados gráficamente.

Si el dato de partida (precipitación diaria) procede de un cálculo estadístico que nos ha permitido evaluar la precipitación diaria máxima para diversos periodos de retorno (5, 10, 25,... años), por el procedimiento indicado en el párrafo anterior obtendríamos varias curvas Intensidad-Duración para los diversos periodos de retorno, es decir una familia de curvas IDF.

⁷ MINISTERIO DE FOMENTO (2016).- *Norma 5.2-IC drenaje superficial* . (BOE, 10-marzo-2016).

Apéndice 2 : Elaboración de curvas IDF

En el último párrafo del Apéndice 1 se indicaba cómo obtener unas curvas IDF de modo sintético (P diaria obtenida estadísticamente, Intensidades calculadas mediante fórmula). Aquí esbozaremos los pasos a seguir para **construir curvas IDF a partir de datos empíricos**. Ver, por ejemplo, Aparicio (1997), Chow et al. (1993)

1. Los datos necesarios para la elaboración de las curvas **Intensidad-Duración-Frecuencia** para una estación pluviométrica aparecen en **A-1** (ejemplo ficticio). Estos datos se obtienen buscando, para cada año hidrológico, los 5 minutos mas lluviosos del año, los 15 minutos más lluviosos, etc... (por supuesto, pueden elegirse otros valores: 10 min, 20 min, etc)

2. Calcular la intensidad en cada intervalo.

Por ejemplo, si en los 15 minutos mas lluviosos del año 1980-81 se recogieron 14,3 mm., la intensidad será la correspondiente a 60 minutos será:
 $I(\text{mm/h}) = 14,3/15 \times 60 = 57,2 \text{ mm/hora}$.

Si en las 2 horas mas lluviosas del año se recogieron 67,4 mm., la intensidad será $67,4/2 = 33,7 \text{ mm/hora}$.

Obtenemos una tabla del mismo tamaño que la inicial, pero todo expresado en mm/hora (**A-2**).

3. En la nueva tabla (todo expresado en intensidades en mm/hora), trabajaremos con cada una de las columnas separadamente; realizamos el ajuste a una ley de distribución, por ejemplo Gumbel, y calculamos las intensidades correspondientes a los periodos de retorno deseados para dibujar las curvas IDF, por ejemplo: 10, 25, 50 y 100 años. Obtendremos una tabla como la indicada en **A.3**.

4. Se representan gráficamente los valores de **A-3**: los minutos de duración en abcisas, cada una de las filas son los valores en ordenadas: una curva para 2 años, otra para 5 años, etc. (ver las figuras análogas de la página 5).

A-1: Precipitaciones máximas (mm) recogidas en los intervalos indicados

año	5 min.	15 min.	30 min.	1 hora	2 horas
1980-81	8,5	14,3	24,9	38,5	67,4
1981-82	12,1	21,9	35,2	57,7	101,3
1982-83	7,1	11,5	20,1	etc...	etc...
1983-84	10,4	16,8	29,1		
etc...	etc...	etc...	etc...		

A-2: Intensidad de precipitación (mm / hora)

año	5 min.	15 min.	30 min.	1 hora	2 horas
1980-81	102,0	57,2	49,8	38,5	33,7
1981-82	145,2	87,6	70,4	57,7	50,7
1982-83	85,2	46,0	40,2	etc...	etc...
1983-84	124,8	67,2	58,2		
etc...	etc...	etc...	etc...		

A-3: Intensidad de precipitación (mm / hora) **calculada** para diversos **periodos de retorno**

p. retorno	5 min.	15 min.	30 min.	1 hora	2 horas
2 años	75,0	51,3	36,8	22,5	12,9
5 años	92,2	67,6	46,4	27,7	16,7
10 años	125,2	86,0	63,2	etc...	etc...
25 años	154,8	109,2	81,5		
etc...	etc...	etc...	etc...		