

PRECIPITACION



3.1. La Precipitación

La precipitación, para el ingeniero, es el agua que emana de las nubes en la atmósfera y cae al suelo. Antes de llegar al suelo, esta agua es de suma importancia para los meteorólogos, pero luego, se convierte en un elemento básico de la hidrología. La precipitación es la fuente principal de agua para las corrientes superficiales y subterráneas.

Sólo el 25% de la precipitación regresa al mar superficial o subterráneamente. La evaporación local, causante de la humedad, sólo contribuye a la precipitación si el aire se mantiene quieto.

3.2. Formación de la precipitación

La condensación del vapor atmosférico se lleva a cabo alrededor de innumerables núcleos higroscópicos, en forma tal que las partículas de las nubes son tan pequeñas (≈ 0.01 mm) que un movimiento del aire a 15 cm/min. es suficiente para mantenerlas en suspensión. Bajo condiciones favorables, las gotas de agua o los cristales de hielo (según la temperatura) comienza a aumentar de tamaño hasta tal punto que ya el aire es incapaz de sostenerlos y entonces caen. Las gotas de radio menor que 0.1 mm en su viaje hacia el suelo a través del aire con un 90% de humedad relativa se evaporan a una distancia de 3.0 m. mientras que gotas de 0.5 mm. pueden caer hasta 2000 m. Es evidente que gran parte del agua que emana de las nubes nunca alcanza el suelo, y para el propósito de la hidrología, la precipitación se define como el agua en forma líquida ó sólida que llega al suelo. Un radio de 0.1 mm. es aceptado como el tamaño de gota que marca la frontera entre las nubes y la precipitación.

Como se puede deducir de lo dicho anteriormente los elementos esenciales para la formación de la precipitación son: la humedad disponible en el aire y un mecanismo que produzca la condensación y la formación de las gotitas de agua. El enfriamiento en gran escala, esencial para la condensación y precipitación posterior, es el resultado de la elevación del aire.

Esta elevación del aire es necesaria para la condensación, pues es ella la que produce el enfriamiento en gran escala, hasta un punto por debajo del punto de rocío.

Según el mecanismo que produce el ascenso del aire, se denominan los diferentes tipos de precipitación que existen, los cuales no son mutuamente exclusivos, sino que por el contrario se superponen para dar origen a formas más complejas de lluvias. Los tres tipos de precipitación son:

- (a) convectiva
- (b) orográfica
- (c) ciclónica

3.2.1. Precipitación Convectiva

Se produce como resultado del calentamiento de la capa superficial del aire, por lo cual este es forzado a subir por las capas superiores más pesadas y frías. Ordinariamente esto hace subir el aire solo unas centenas de metros, puesto que el aire se enfría a una rata que es hasta dos veces superior a la disminución normal vertical de temperatura. Sin embargo, si en este punto se inicia una condensación abundante, entonces se libera el calor de condensación, y esta nueva fuente de energía, hace que el aire sea forzado a ascender mucho antes de encontrar un estrato que sea de su propia temperatura y densidad.

3.2.2. Precipitación Orográfica

El aire puede también ser forzado a ascender, cuando en su camino se le interponen barreras constituidas por las formas de la tierra. Puesto que el vapor de agua está enormemente confinado a las capas más bajas de la atmósfera, lluvias orográficas fuertes resultan en el lado de ascenso (barlovento), forzado del aire asociado con el efecto bloqueador de las masas de tierra; mientras que en el lado de sotavento de dichas barreras, donde el aire desciende, y se enfría, las regiones son característicamente áridas y semiáridas.

La condición ideal para las lluvias orográficas, es en los lugares donde una larga cadena montañosa yace a lo largo de la costa. (ver fig. 3-1)

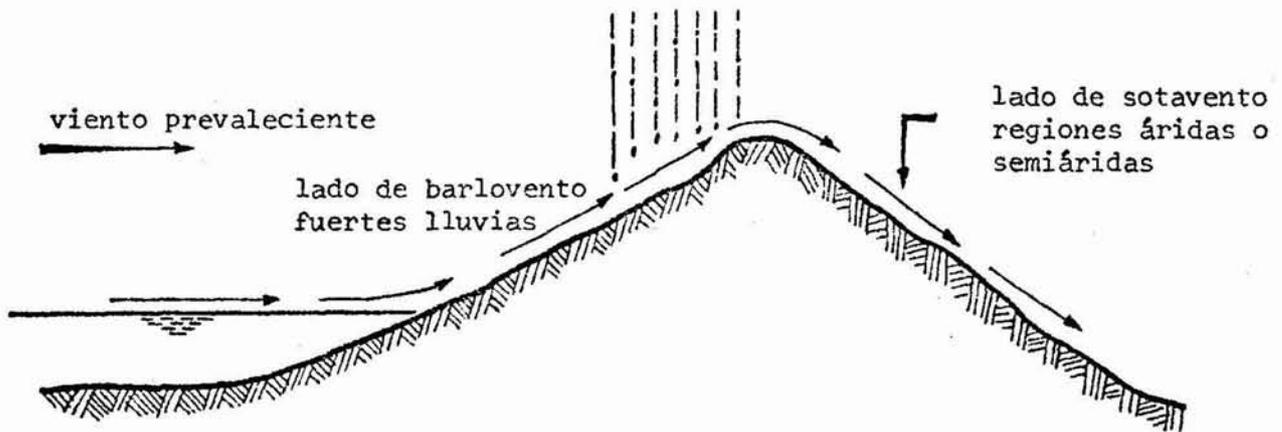


Fig. 3-1. Esquema que indica la formación de la precipitación orográfica.

En la fig. 3-2, se muestran ejemplos idealizados del efecto de las montañas sobre la cantidad de la precipitación. Las gráficas para los tres ríos venezolanos mostrados, indican un aumento de precipitación en las laderas de la montaña y luego una disminución marcada en las altitudes mayores. Estos datos indican la necesidad de obtener datos hasta en las partes más altas de las vertientes en las montañas, y el peligro que existe en trazar mapas de isoyetas sin tener datos adecuados de precipitación.

3.2.3. Precipitación Ciclónica

Precipitación ciclónica es la precipitación asociada con el paso de ciclones o zonas de baja presión. Esta precipitación puede ser o no frontal.

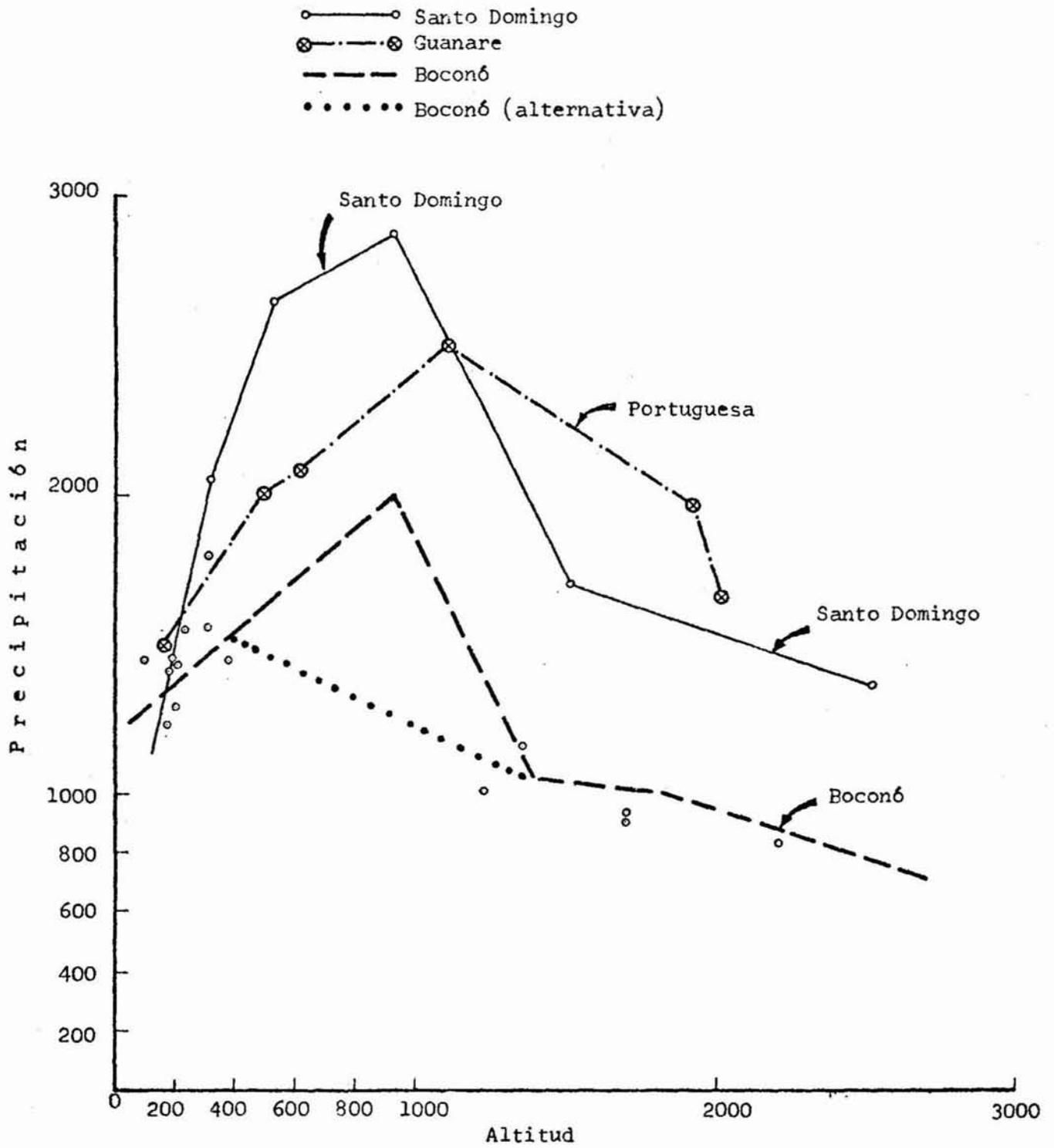


Fig. 3-2. Precipitación vs. altitud

- (a) Precipitación no-frontal. En este tipo de precipitación el ascenso del aire es causado por la convergencia horizontal de los flujos que entran en la zona de baja presión.
- (b) Precipitación frontal. En este caso las dos masas de aire que convergen tienen distinta temperatura y densidad, por lo tanto el aire más caliente y menos denso es forzado a ascender sobre el más frío a lo largo de una línea media inclinada de discontinuidad, produciéndose así el enfriamiento y consiguiente condensación. (ver fig. 3.3.)

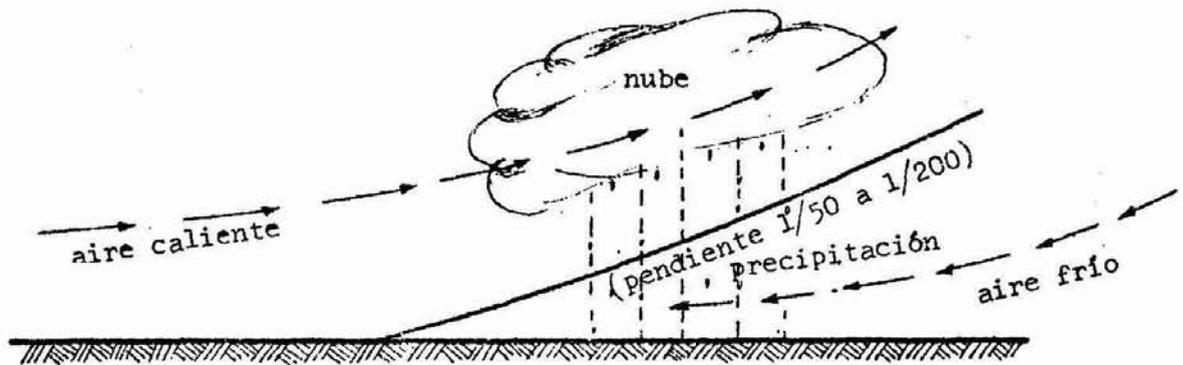


Fig. 3-3. Origen de la lluvia frontal.

Medición de la Precipitación

La medición de la precipitación se funda en el principio, de que la profundidad de agua observada durante un lapso cualquiera de tiempo, es la medida de la cantidad de lluvia producida por una tempestad despreciando las pérdidas. Con el objeto de medir esta altura de lámina de agua, se utilizan diversos tipos de instrumentos, bajo la condición, que cualquiera que sea el que se usa represente siempre las condiciones "estándar".

En Venezuela, la División de Hidrometeorología del MOP, ha uniformado sus medidores de lluvia y todos tienen un área recolectora igual a 200 cm^2 , correspondiente a un diámetro de 15,9 cm. Los cántaros son del tipo Hellman (fig. 3-4) y los instrumentos auto-registradores son los del mismo tipo fabricado por Fuess (fig. 3.5 y 3.6). Estos consisten de un embudo que dirige el agua recolectada hacia un cilindro, en el cual la variación en el nivel del agua afecta la posición de un flotante al que se conecta un mecanismo transmisor terminado en una plumilla que marca los trazos sobre una banda debidamente graduada que se enrolla en un tambor dotado de un mecanismo de relojería. En otras palabras, el elemento sensible es el sistema cilindro-flotante. Una vez que se alcanza una altura dada, el cilindro se vacía por sifonaje, y el agua va a un recipiente mayor y se deposita, lo que al final ayuda a comprobar la veracidad del registro. Cada descarga corresponde a 10 mm. de lluvia.

La instalación de un pluviómetro, debe ser tal que se aseguren las siguientes condiciones:

- (1) Que haya un flujo laminar a la entrada del pluviómetro.
- (2) Que se evite cualquier influencia local sobre el pluviómetro.
- (3) Que se reduzca al mínimo la fuerza con que el viento azota al pluviómetro.
- (4) Que se evite que el agua al chocar con cualquier obstáculo, salpique y entre al pluviómetro.

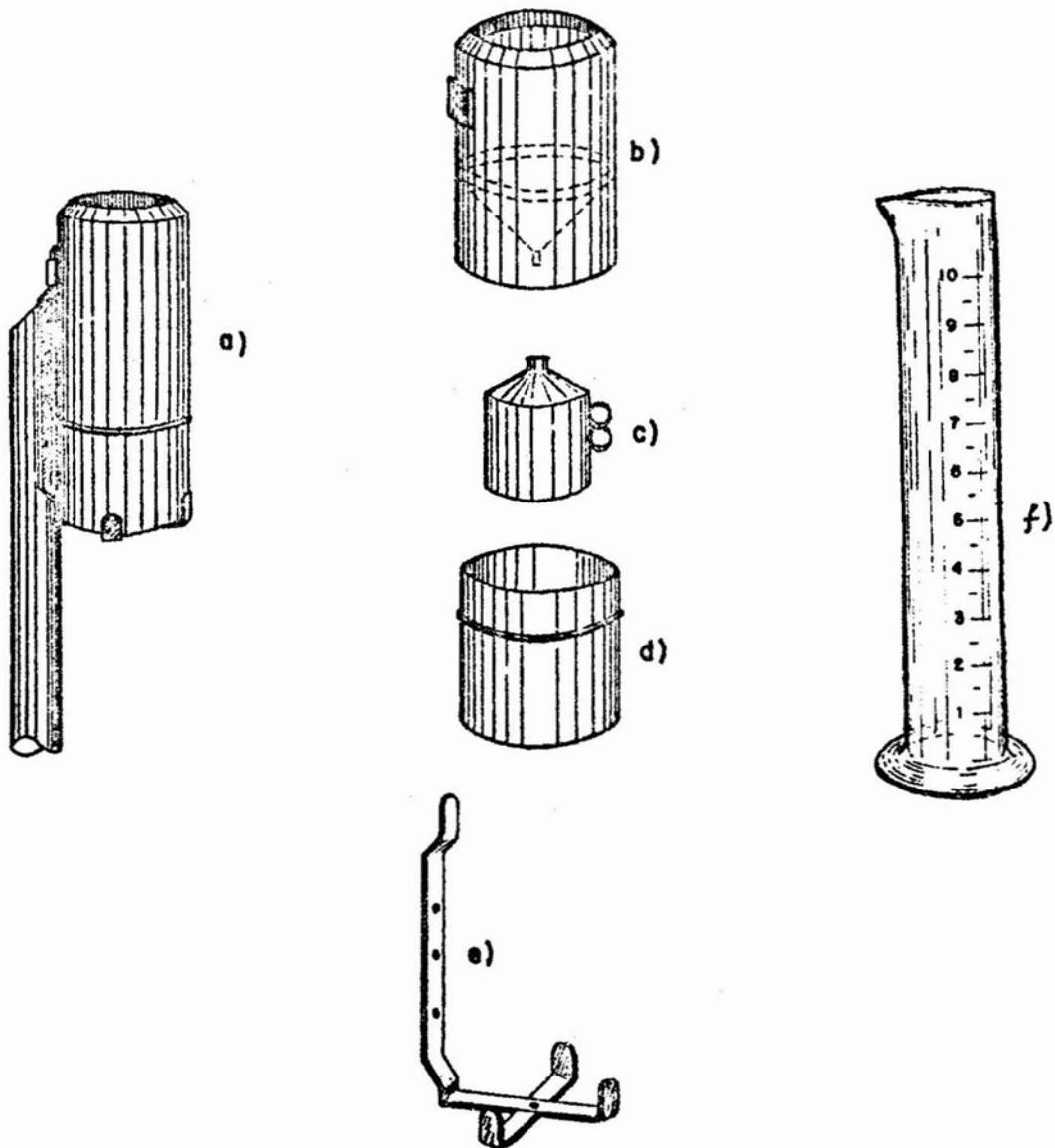


Fig. 3.4. Pluviómetro tipo Hellman (a) Cántaro completo, (b) Area reductora y embudo director, (c) Envase receptor, (d) Cubeta cilíndrica del envase receptor, (e) Estructura metálica de fijación, (f) Probeta graduada para convertir el volumen de agua caída a mm.

Fig. 3.6. Detalle del cilindro receptor y de los accesorios de registro y desagüe de un pluviómetro de sifón.

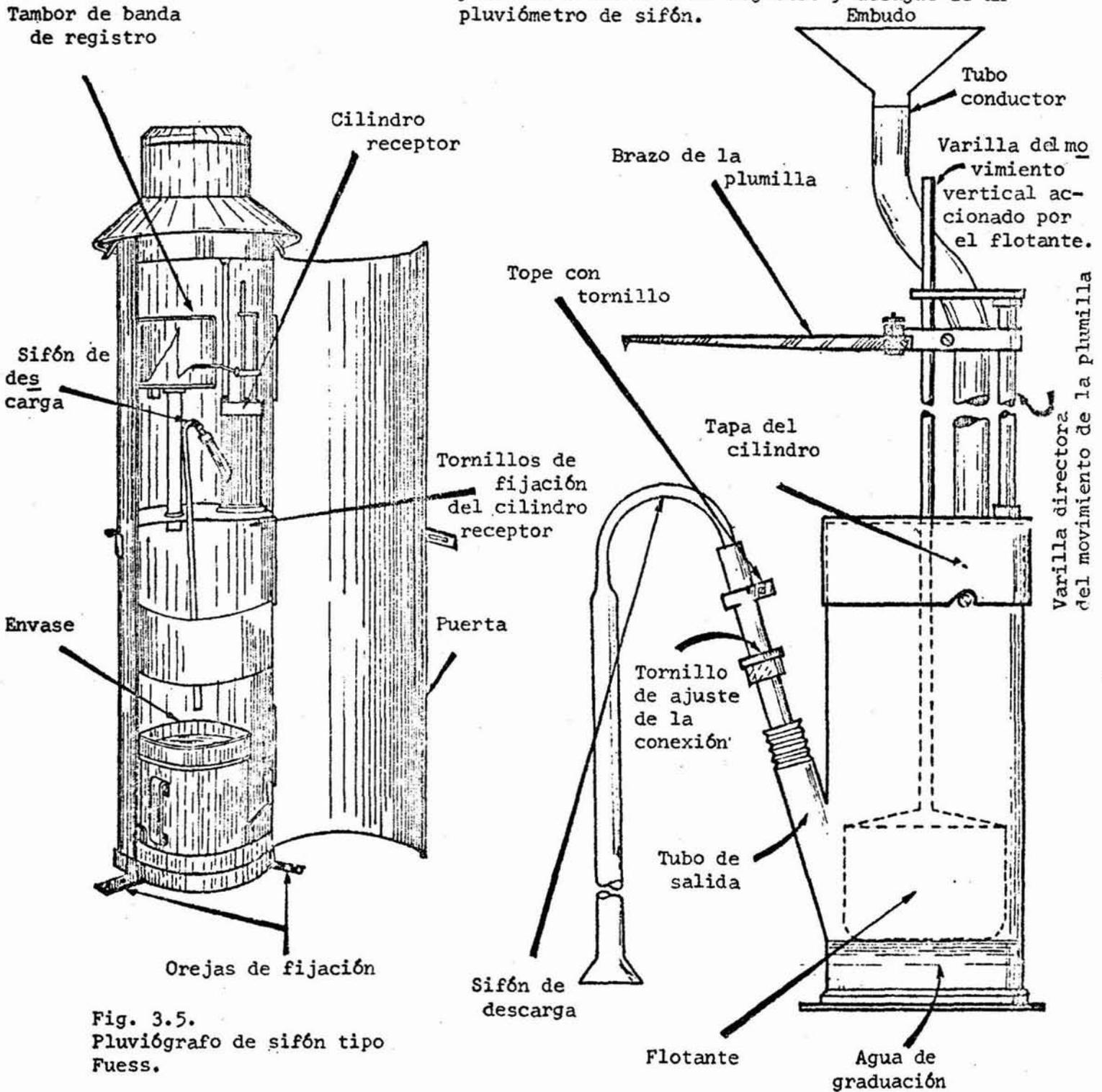


Fig. 3.5. Pluviógrafo de sifón tipo Fuess.

3.4. Interpretación de los Datos de Precipitación

Los datos de precipitación deben ser analizados y verificados antes de ser usados para un proyecto específico. Los datos faltantes deben también ser calculados, usando una de las técnicas que aquí se describen y todos ellos deben extenderse a un período base de diseño.

El procesamiento de los datos debe iniciarse con un estudio de la historia de cada estación que incluye:

- (1) Cambio de ubicación de las estaciones, haciendo los ajustes que requiera el caso.
- (2) Cambios del ambiente físico, crecimiento de vegetación o construcción de edificios alrededor del pluviómetro.
- (3) Cambios de equipo.
- (4) Cambios de personal y muchos otros factores.

3.5. Estimación de Datos Faltantes

Es frecuente que por una u otra razón, existan vacíos o interrupciones en el registro de datos, entonces se hace necesario para completar estos registros al período básico de diseño la estimación de los datos faltantes. Existen varios métodos para el cálculo de estos datos.

3.5.1. Promedio Aritmético

- (1) Promedio aritmético
- (2) Proporción normal
- (3) Correlación lineal
- (4) Análisis de varianza
- (5) Análisis doblemente acumulativo o curva doblemente másica.

En la fig. 3-7 se muestra una distribución de pluviómetros en un área dada. Las estaciones A, B, y C son denominadas índices para su uso en la determinación de datos faltantes para la estación X. En el caso de que la precipitación anual normal de las estaciones índices, ésto es, cuando los promedios

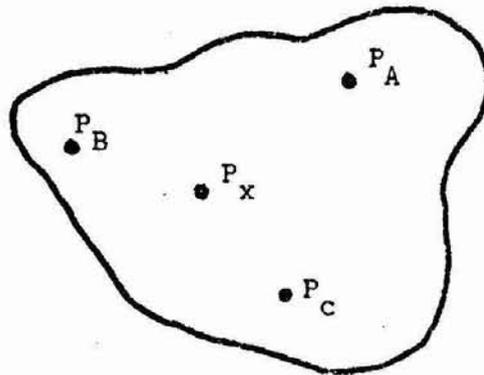


Fig. 3-7
Distribución de pluviómetros.

anuales en un período de 25 años, difieren en no más del 10% de la estación bajo estudio X, entonces la precipitación P_x para un período dado puede obtenerse mediante un simple promedio aritmético, ésto es:

$$P_x = \frac{P_A + P_B + P_C}{3}$$

Cuando la variación es mayor del 10%, este método no debe usarse, y en su defecto, el dato faltante puede calcularse por uno de los métodos que a continuación se exponen:

3.5.2. Proporción normal

En este método, se ponderan las precipitaciones de las estaciones índices con las proporciones de la precipitación anual normal de la estación en estudio con cada una de las estaciones usadas como referencia, lo que queda expresado en la fórmula siguiente:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\frac{N_x}{N_A} P_A + \frac{N_x}{N_B} P_B + \frac{N_x}{N_C} P_C \right]$$

Donde:

- P_x = dato faltante de precipitación que se desea obtener
- N_A , N_B y N_C = la precipitación anual normal de las estaciones índices.
- P_A , P_B y P_C = la precipitación en las tres estaciones índices durante el mismo período de tiempo del dato faltante.
- N_x = precipitación anual normal de la estación en estudio.

Cuando se va a usar esta fórmula, es conveniente verificarla primero, para algunos períodos de tiempo donde existen valores de la precipitación en X, antes de adoptarla sin reserva.

Un método semejante a este, puede usarse en el caso de que no existan estaciones adyacentes, entonces en vez de ponderar las precipitaciones de las estaciones índices con la proporción de la precipitación anual normal de la estación en estudio sobre la correspondiente a cada estación índice, se procede con los datos solos de la estación en estudio y en lugar de tomar los datos de las estaciones adyacentes (que no existen) se tomaron los datos de los meses restantes dentro del mismo año.

Suponga que $i = 1, 2, \dots, n$, es la denominación de los meses (o períodos) de datos faltantes, N_i el promedio de precipitación mensual a lo largo del período de registro para el mes i , X_i el dato faltante (precipitación de un mes determinado para un año determinado), X_j son los datos de precipitación para los meses que si existe registro dentro del mismo año al que pertenece X_i , esto es, el subíndice j denomina todos los doce meses del año distintos a i , y P es el promedio anual de precipitación para todo el registro existente.

Teniendo esta definición de términos en mente, se plantea una ecuación para cada dato faltante, resultando para n datos faltantes un sistema de n ecuaciones con n incógnitas. Cada una de las ecuaciones tendrá la siguiente forma:

$$\frac{\text{Precipitación durante el mes } i \text{ del año en estudio}}{\text{Promedio de precipitación durante el mes } i \text{ para todos los años de registro}} = \frac{\text{Suma de todas las precipitaciones mensuales del año en estudio}}{\text{Promedio anual de precipitación para todos los años de registro.}}$$

De acuerdo a la definición de términos, esta ecuación puede expresarse en la forma:

$$\frac{X_i}{N_i} = \frac{\sum X_i + \sum X_j}{P}$$

A cada dato faltante le corresponderá una ecuación, y de la solución del sistema simultáneo, resultarán los valores deseados. Para aclarar mejor las ideas suponga que para un año determinado se desconocen los datos de precipitación para los meses $i = 1, 2, 3,$ y $4,$ y se tienen los datos para los meses $j = 5, 6, \dots, 12,$ igualmente se conoce los promedios de precipitación anual (P) y los promedios de precipitación para cada mes ($N_i,$ $i = 1, 2 \dots 12$) durante un largo período de registro, las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$\frac{X_1}{N_1} = \frac{\sum_{i=1}^4 X_i + \sum_{j=5}^{12} X_j}{P}$$

$$\frac{X_2}{N_2} = \frac{\sum_{i=1}^4 X_i + \sum_{j=5}^{12} X_j}{P}$$

$$\frac{X_3}{N_3} = \frac{\sum_{i=1}^4 X_i + \sum_{j=5}^{12} X_j}{P}$$

$$\frac{X_4}{N_4} = \frac{\sum_{i=1}^4 X_i + \sum_{j=5}^{12} X_j}{P}$$

En las ecuaciones anteriores puede observarse que los segundos términos son los mismos.

De esta manera, pueden calcularse los cuatro datos faltantes. La exactitud de estos métodos, debe comprobarse mediante el uso de un registro completo, tomando algunos datos existentes como si faltasen y calculándolos luego para compararlos con las medidas en la realidad. Un error en esta comparación de $\pm 10\%$ puede considerarse aceptable. Para hacer estas "interpolaciones", el registro de la estación debe ser suficientemente lar

go (unos 25 años), sin embargo, para los países latinoamericanos es difícil encontrar estaciones con este período de registro, y no quedará muchas veces otra solución que aceptar como "largo" un período de 10 años ó quizás menos.

3.5.3. Correlación

Este método permite el cálculo de los datos faltantes estableciendo una relación entre una estación y otra, o entre una estación y un grupo de ellas o su promedio, requiriéndose para el trazado de la línea o plano que mejor se ajuste a los datos existentes, un período común de registro para ambas variables.

Con los datos del período común de mediciones para ambas variables, se calcula gráfica o analíticamente, la línea o plano que mejor se ajuste a las condiciones. Una vez establecido el gráfico, los datos faltantes pueden calcularse a partir de los datos existentes para el mismo período de tiempo.

El método analítico se basa en los mínimos cuadrados y es más preciso que el gráfico.

En la fig. 3.8. se muestra una línea trazada para llenar los requisitos de una correlación lineal existente entre una estación Y para la cual el registro es incompleto, y una estación o promedio de un grupo de estaciones X cuyo registro es completo.

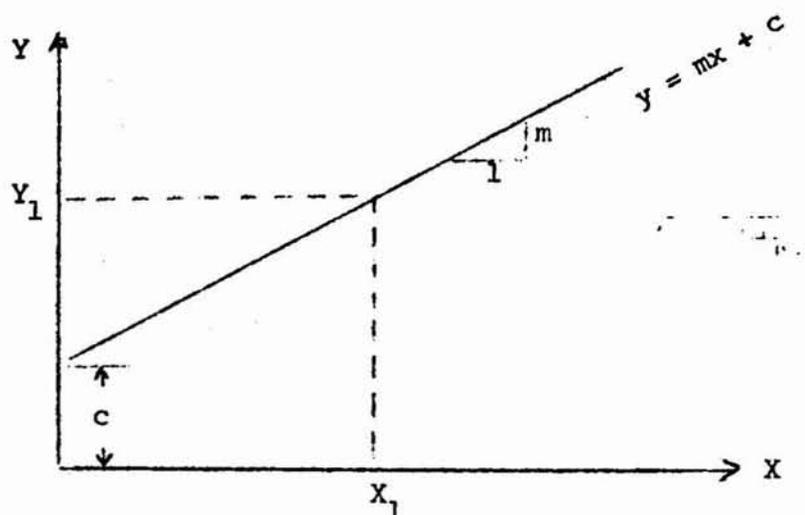


Fig. 3.8. Cálculo de datos faltantes usando el método de la correlación

Suponiendo que para el período 1 no existe registro en y, pero que durante el mismo período la precipitación existente en X fué X_1 , se sigue la línea punteada que se muestra en la figura para determinar la cantidad de precipitación Y_1 que debió ocurrir en la estación Y durante el mismo lapso de tiempo.

Está de sobra decir, que para que exista una buena correlación, las condiciones en Y deben ser semejantes a las condiciones en X y que mientras mayor sea el lapso de tiempo con registro común, mejor será el valor del dato calculado.

3.5.4. Análisis doblemente acumulativo

El uso del análisis doblemente acumulativo para la interpolación de datos faltantes, se indicará más adelante al estudiar la aplicación de este método a las pruebas de consistencia.

3.6. Pruebas de Consistencia

Antes de proceder a usar los datos de precipitación, éstos deben probarse para verificar su consistencia. La inconsistencia de los datos como se mencionó anteriormente, puede ser causada en su mayor parte por la acción del hombre, tales como las inconsistencias ocasionadas al cambiar de ubicación la estación o por la alteración de sus condiciones de exposición, aunque también algunos cambios físicos o meteorológicos puedan ser causados accidentalmente.

3.6.1. El Análisis doblemente acumulativo

El análisis doblemente acumulativo o la curva doblemente másica, es un método usado en muchos tipos de datos hidrológicos para determinar la consistencia de los datos, mediante la comparación de los datos de la estación bajo estudio, con aquellos de otra estación o grupo de estaciones que se toman como patrón. Para ello se hace un gráfico cartesiano, llevando sobre un eje los valores acumulados de la estación de estudio y sobre el otro los valores acumulados del patrón. Se comienza por el período más reciente. Se observa que los datos se alinean en una recta, pero a

veces puede producirse un cambio de pendiente que es lo que constituye una inconsistencia de los datos. Para poder asimilar los datos recogidos después del quiebre con los del período más reciente, se ajusta el período más antiguo según la razón de las pendientes (fig.3.9).

Como los puntos generalmente presentan ondulaciones periódicas respecto a la recta media, un cambio de pendiente solo debe aceptarse cuando queda bien evidente. Cuando esto ocurre, deben hacerse mayores investigaciones, a fin de conocer la verdadera razón de la inconsistencia, y poder así evaluar su efecto sobre los datos de la estación en estudio. Si el cambio de pendiente no es razonablemente el resultado de los estudios de la investigación, no se harán ajustes a los datos observados.

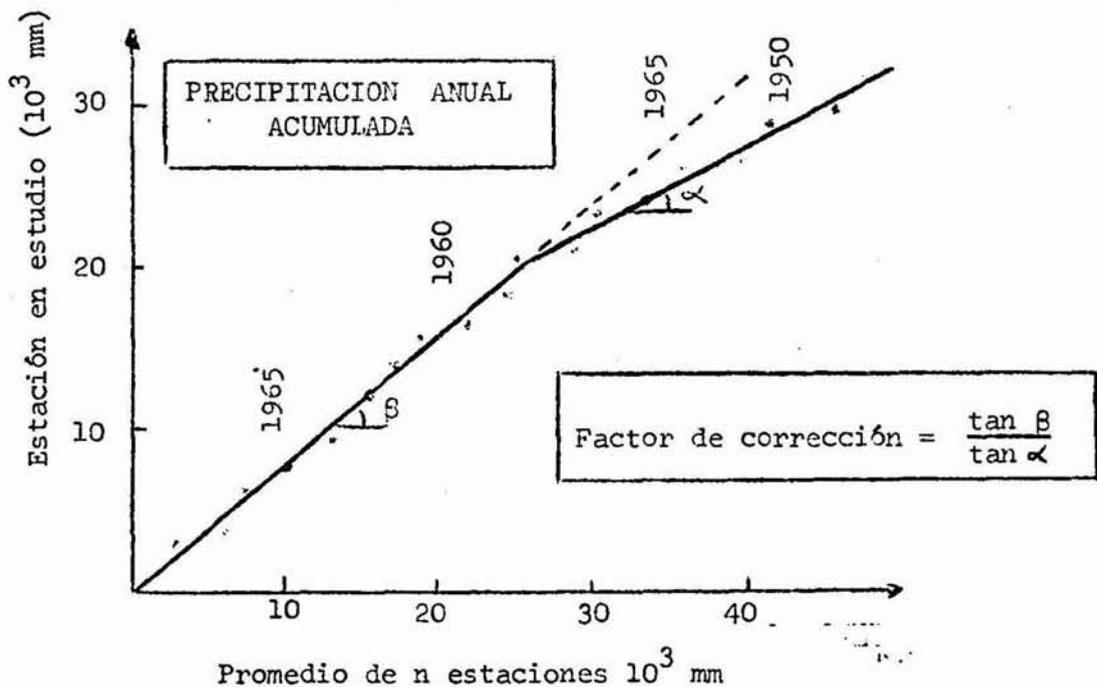


Fig. 3.9. Ajuste de los valores de precipitación mediante el análisis doblemente acumulativo.

Este análisis también puede hacerse relacionando caudales con precipitaciones. En este caso las inconsistencias pueden resultar por el comienzo del funcionamiento de una obra de derivación o por un cambio en el uso de los suelos. También puede aplicarse relacionando caudales de una estación con el promedio de los caudales de otras estaciones. Aquí las inconsistencias pueden resultar por un cambio en el régimen de escurrimiento o de las características del lecho fluvial.

En este tipo de análisis, la pendiente establecida por el último período de observaciones, además de ser un control para el ajuste de datos, también provee un método confiable para la interpolación de registros faltantes. Un estimado de un dato faltante puede llevarse a cabo usando la siguiente ecuación:

$$P_x = \frac{M_x}{M_a} P_a$$

donde:

P_x = Valor de precipitación para ser estimado

P_a = Valor de precipitación en la estación A para el período correspondiente a P_x .

M_x = Pendiente de la curva doblemente másica para la estación X.

M_a = Pendiente de la curva doblemente másica para la estación A.

Está claro que las pendientes de las dos curvas necesarias para el cálculo, se obtienen de graficar cada una de las estaciones contra un grupo de estaciones adyacentes.

En los casos que el dato faltante sea el correspondiente a un año, éste puede tomarse por simple correlación lineal, directamente de la curva doblemente acumulativa.

3.7. Determinación de la Precipitación Media en una Cuenca

Existen varios métodos para determinar la lámina de agua promedio que "cae" en una hoya, entres éstos, los más importantes son:

1. El promedio aritmético
2. El método de los polígonos de Thiessen
3. El método de las curvas isoyetas
4. El método de las curvas isoporcentuales respecto a los valores normales.

3.7.1. Promedio aritmético

Este método es el más simple pero el más seguro de todos los métodos, y consiste sencillamente, en igualar la precipitación media caída sobre una cuenca, al promedio aritmético de las lluvias registradas en los pluviómetros de la zona, ésto es:

$$P_m = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n}$$

Este método solo es aplicable a zonas planas donde las estaciones presenten una distribución uniforme y donde las lluvias registradas por cada pluviómetro no difieran mucho entre sí. Es recomendable verificar la bondad de este método con otros métodos de análisis.

3.7.2. Método de los polígonos de Thiessen

Este método es aplicable a zonas con una distribución irregular de estaciones y donde los accidentes topográficos no jueguen un papel importante en la distribución de las lluvias.

La precipitación media se determina como sigue: se dibuja la zona en estudio con las estaciones que contiene y las circunvecinas. Se unen estas estaciones con trazos rectos, tratando de formar triángulos, cuyos lados sean de la mínima longitud posible. Después de que los triángulos hayan sido dibujados, se trazan las mediatrices de todos los lados, con lo que se formarían unos polígonos alrededor de cada estación, se mide el área de cada polígono y su relación con el área total produce un coeficiente de ponderación para cada estación. La lluvia media resulta de la sumatoria de los productos de las lluvias registradas en cada estación por el coeficiente de ponderación correspondiente, ésto es:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

Donde:

- P_m = Precipitación media en la zona
 S_i = Area de la zona i corresponde al pluviómetro i
 P_i = Precipitación en la zona i

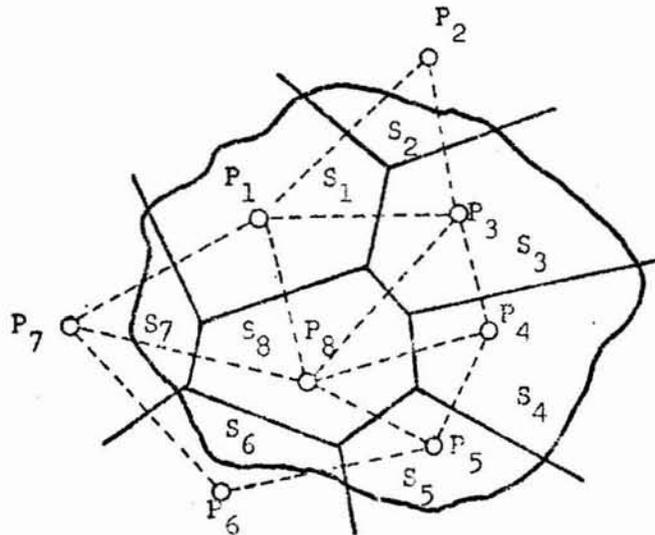


Fig. 3-10. Método de los polígonos de Thiessen para el cálculo de la precipitación media de una cuenca.

3.7.3. Método de las curvas isoyetas

Este método consiste en trazar curvas de igual precipitación para un período elegido. Los intervalos de profundidad de precipitación y de incremento de tiempo se toman de acuerdo a la necesidad del problema. Una vez trazadas las isoyetas se calculan las áreas entre líneas limítrofes, y cada una de ellas se multiplica por el promedio de precipitación del á-

rea correspondiente. La precipitación media resulta de sumar todos los productos anteriores y dividirlos por el área total de la cuenca.

El cálculo de las área puede llevarse a cabo recurriendo a planímetros pesando franjas de papel, o superponiendo el mapa a un papel milimetrado, y contando el número de cuadritos que corresponde a cada franja, relacionándolos con el número de cuadritos de toda la cuenca cuya área se conoce (fig. 3.11.)

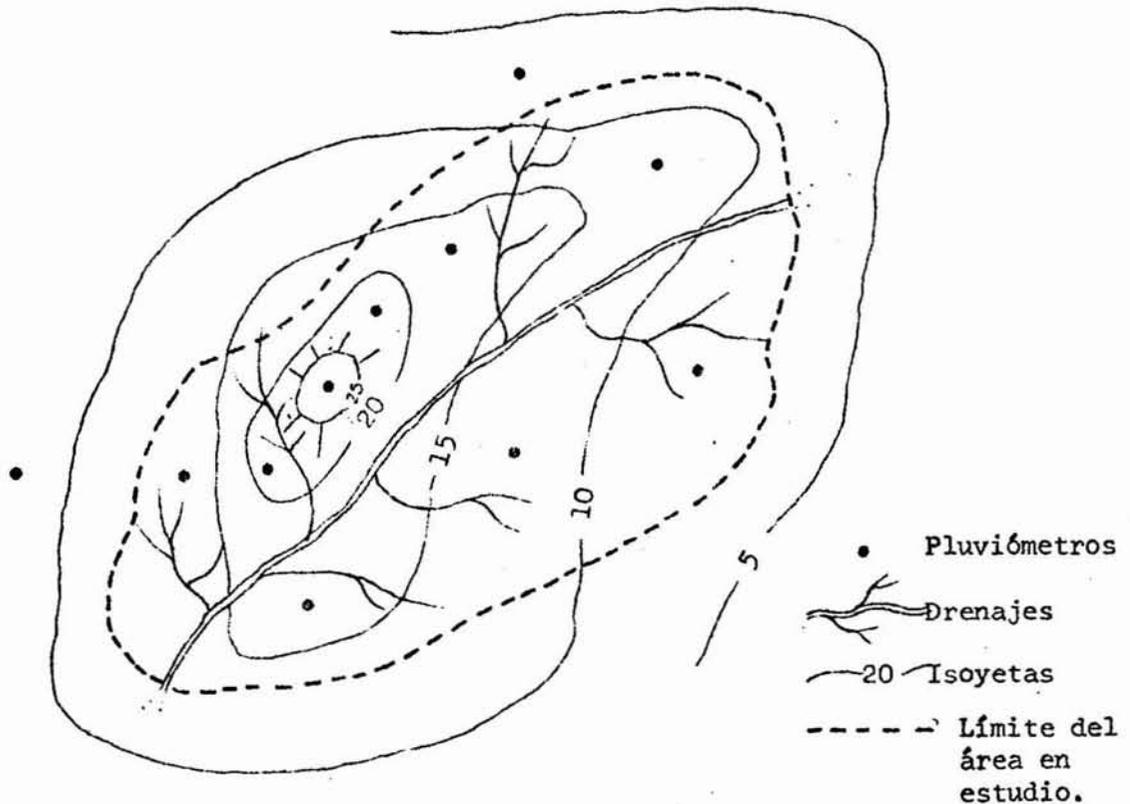


Fig. 3.11. Plano isoyético correspondiente a un temporal como se usa para el cálculo de la precipitación media caída en una cuenca.

Para trazar las isoyetas, se recomienda superponer la cuenca a un mapa con curvas de nivel, para tener en cuenta el efecto de la orografía, pues de otra forma no se diferencia mayormente del obtenido por el método de los polígonos de Thiessen. Debe evitarse recurrir a interpolaciones lineales, sobre todo cuando se trabaja en zonas montañosas. Este método es el más preciso, cuando el análisis de las curvas se hace debidamente.

3.7.4. Método de las curvas isoporcentuales respecto a los valores normales

En zonas montañosas la distribución de las lluvias de determinados temporales está íntimamente relacionada con la topografía y se ha visto que para una serie de estaciones el porcentaje de la altura de precipitación de un temporal respecto a la altura de precipitación normal estacional o anual presenta relaciones uniformes permitiendo de esta manera el trazado de curvas isoporcentuales. Estas curvas no necesariamente deben ser paralelas a las isoyetas o parecidas a un modelo definido por curvas isoyetas.

Antes de trazarlas se requiere contar con una larga estadística de período común en cada una de las estaciones que forman parte de la región para la cual se efectúa el estudio.

Esta teoría tiene gran aplicación en la transposición de temporales. Desde luego en zonas montañosas no tiene sentido efectuar la transposición de un modelo isoyético correspondiente a un temporal porque se ignoraría la causa de la variación de la distribución de las lluvias. En cambio el modelo isoporcentual es más bien de origen fortuito y, por lo tanto, puede ser transportado hacia áreas de diferente influencia orográfica. Lo que se hace es superponer el modelo isoporcentual sobre un modelo isoyético correspondiente a valores medios anuales o estacionales y multiplicar luego los valores de los porcentajes con los valores medios anuales o estacionales en los puntos de intersección. Se obtiene así el modelo de un temporal que no altera las características conocidas del área en referencia. Girando el modelo isoporcentual se logra determinar la posición más desfavorable.

En resumen este método tiene gran aplicación en zonas en que las variaciones

de la precipitación obedecían fundamentalmente a razones orográficas. El cálculo de la precipitación media sobre la hoya se hace de la misma manera aplicada al método de las curvas isoyetas.

3.8. Método para la Conversión de Profundidad de Precipitación a Intensidad

De mucha utilidad resulta para los ingenieros, tener los registros en términos de la intensidad (expresada en mm/hora).

Para determinar la intensidad de la lluvia a partir de los registros pluviográficos (profundidades acumuladas de lluvia) deben seguirse los siguientes pasos:

- (1) Determinar el incremento de lluvia máximo que haya caído en 5 min. y convertirlo a una rata expresada en mm/hora multiplicando por $60/5$.
- (2) Proceder en forma semejante a la anterior para períodos de 10, 15, 20 etc. minutos, convirtiéndolos a una intensidad en mm/hora, multiplicándolos por $60/10$, $60/15$, $60/20$, etc.

Los registros pluviográficos producen un gráfico de tal forma que la pendiente entre los quiebres de la curva son una medida de la intensidad. Estas intensidades pueden calcularse tabulando cada punto de quiebre y efectuando las divisiones correspondientes de precipitación acumulada sobre tiempo de acumulación para calcular la intensidad (ver fig. 3.12 y la tabla 3.1.)

Tabla 3.1. Tabla para el cálculo de las intensidades producidas por una lluvia.

(1) Fecha	(2) Hora (T)	(3) Prec.(P)	(4) AT	(5) AP	(6) I

A partir de las columnas 4 y 5 de la tabla, se determina el máximo incremento de precipitación para los intervalos de tiempo requeridos y se procede a llenar la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Máxima profundidad e intensidad de la lluvia para intervalos de tiempo seleccionados.

Duración	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	30 min.
Profundidad (mm)					
Intensidad mm/hr					

3.9. Curvas Integrales o Másicas

Una curva integral, es un registro gráfico de la acumulación de la lluvia durante el período que ella cae de la manera que lo hacen los pluviógrafos.

El procedimiento para la construcción de estas curvas cuando no existe registro pluviográfico, es agrupando las estaciones pluviométricas que tienen regímenes de precipitación comparables. En la fig. 3.12 se muestra gráficamente el método de trazado de una curva másica para una estación pluviográfica a partir del gráfico obtenido de un pluviógrafo.

3.10. Análisis de la Relación Profundidad - Area - Duración

Este tipo de análisis se efectúa, cuando además de la distribución espacial de las lluvias, se hace necesaria cierta información acerca de su distribución en el tiempo. Para este análisis se usa la información de las curvas másicas, bien sea las producidas directamente por los pluviógrafos, o las construidas indirectamente de los registros pluviométricos.

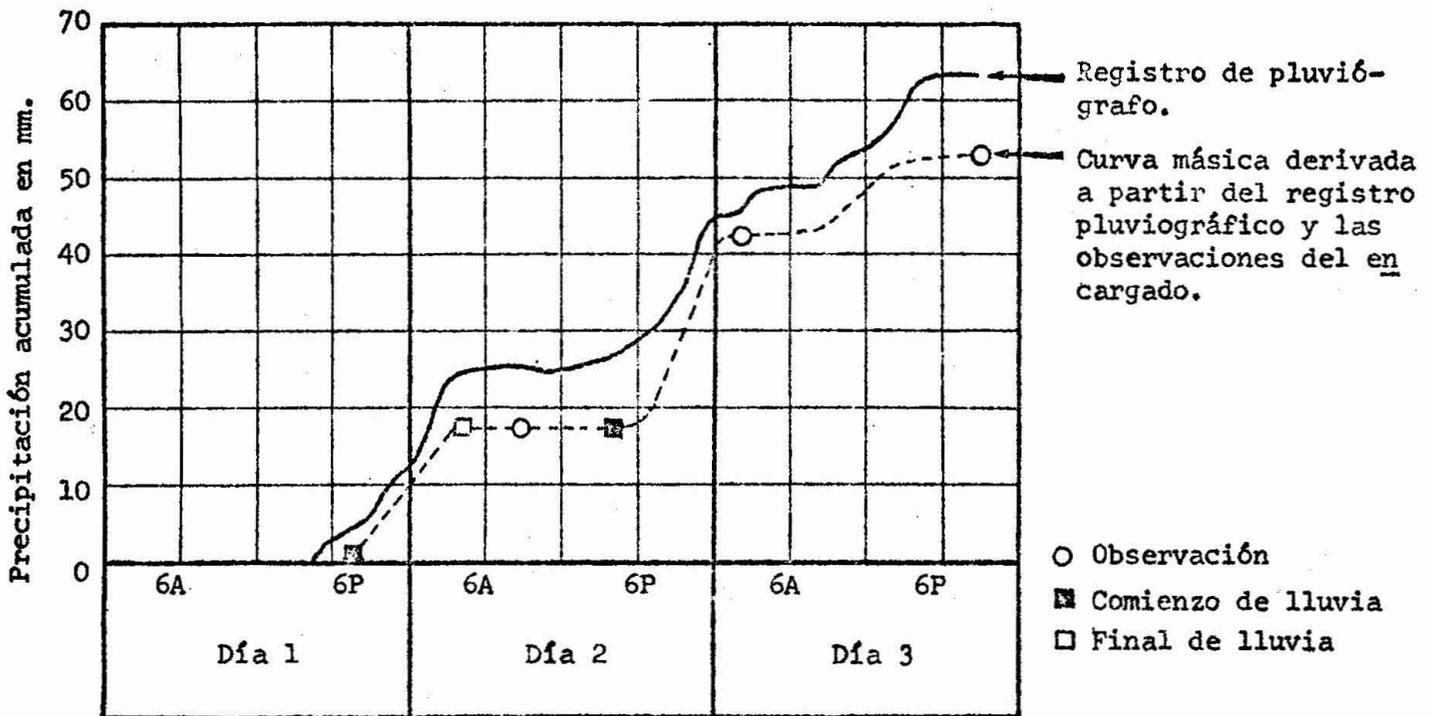


Fig. 3.12. Construcción de una curva másica para una estación pluviométrica.

3.10.1. Curvas de área-profundidad

Estas curvas expresan la relación de una profundidad de lluvias que decrece progresivamente a medida que el área aumenta, o sea a medida que el contorno de la tormenta se aleja de su centro. Estas curvas se pueden construir a partir de cualquier mapa isoyético, mediante un gráfico de las áreas asociadas con cada isoyeta como abscisa contra la precipitación correspondiente a ese arco como ordenada.

3.10.2. Curvas de área-profundidad-duración

Quando las curvas de área-profundidad se construyen paralelamente con las curvas másicas de lluvias, para así construir curvas de área-profundidad para intervalos de tiempo seleccionados que usualmente son de 6, 12, 18, 24 y 36 horas, resultan las curvas de área-profundidad-duración.

Para la construcción de estas curvas, es necesario usar mapas isoyéticos para los incrementos de tiempo requeridos, los cuales se dibujan a partir de las curvas másicas definidas anteriormente. Esto es, siguiendo un procedimiento similar al explicado para el caso de determinar las intensidades máximas de una tormenta, se obtienen a partir de las curvas másicas (fig. 3.12.) los máximos incrementos de precipitación para intervalos de 6 horas, 12 horas, 18 horas, etc.

Para el caso de la estación A, de las curvas másicas mostradas en la fig. 3.13. los valores de los incrementos de precipitación se muestran en la tabla 3.3. A partir de estos valores, se calculan los valores máximos de la precipitación para los incrementos deseados en la forma que se indica al margen de la misma tabla y con estos valores calculados para cada estación se llena la tabla 3,4.

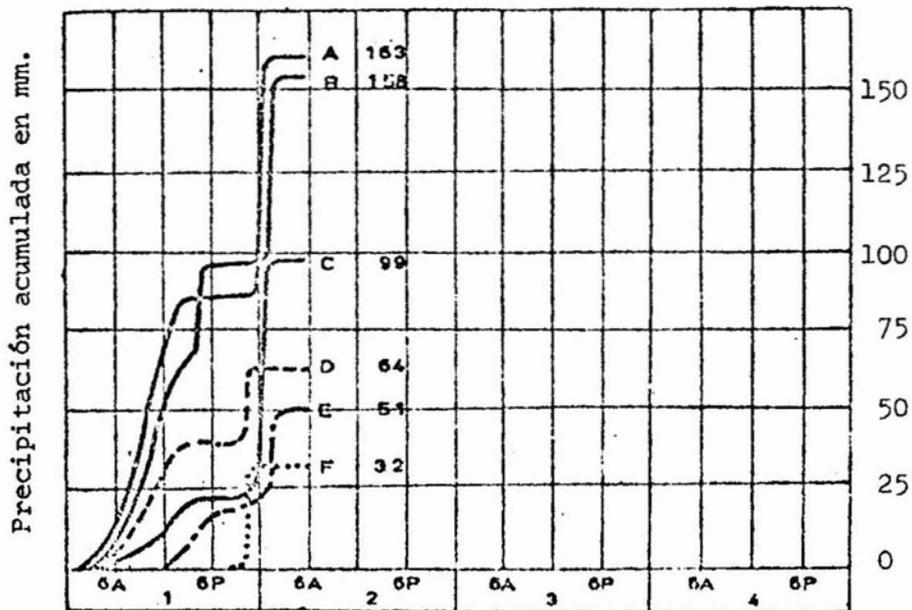


Fig. 3.13. Curvas másicas de precipitación.

Tabla 3.3. Cálculo de la precipitación máxima para intervalos de 6, 12, 18 y 24 horas para la estación A.

Día	Hora	Prec. (mm)	ΔT (hr)	ΔP (mm)
1	1:00 am	-	-	-
	6:00 am	18	5	18
	10:00 am	50	4	32
	12:00 am	70	2	20
	3:00 pm	85	3	15
	12:00 pm	85	9	00
2	1:00 am	163	1	77

\uparrow 6 hr. $\Delta P = 77$ mm.
 \uparrow 12 hr. $\Delta P = 87$ mm.
 \uparrow 18 hr. $\Delta P = 136$ mm.
 \uparrow 24 hr. $\Delta P = 163$ mm.

Tabla 3.4. Valor máximo absoluto de la precipitación para las estaciones A, B, C, D, y E y para duraciones de 6, 12, 18 y 24 horas

Estación	Duración en horas			
	6	12	18	24
A	77	87	136	163
B	62	94	137	158
C	77	84	96	99
D				
E				

A partir de los valores de la tabla 3.4. se efectúan mapas de isoyetas para cada una de las duraciones. Estos mapas se evalúan según alguno de los métodos explicados anteriormente para obtener las áreas 'S' y su correspondiente profundidad de precipitación 'h'. Los valores de S se grafican contra h para cada duración obteniendo así un haz de curvas como el mostrado en la fig. 3.14. Los valores de las áreas pueden llevarse en escala logarítmica

como se muestra en la fig. 3.15.

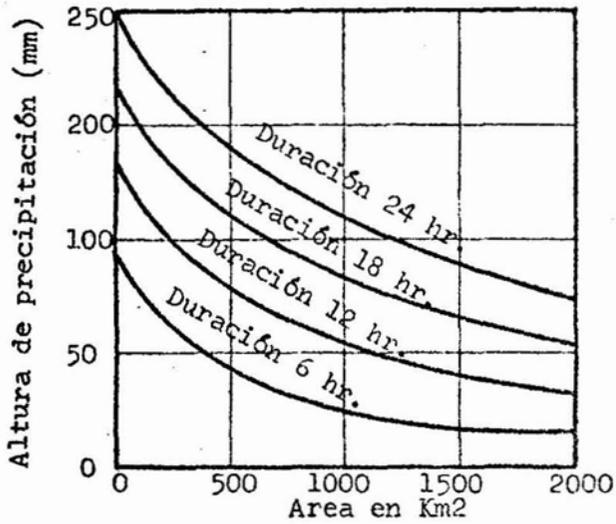


Fig. 3.14. Curvas Area-Profundidad-Duración

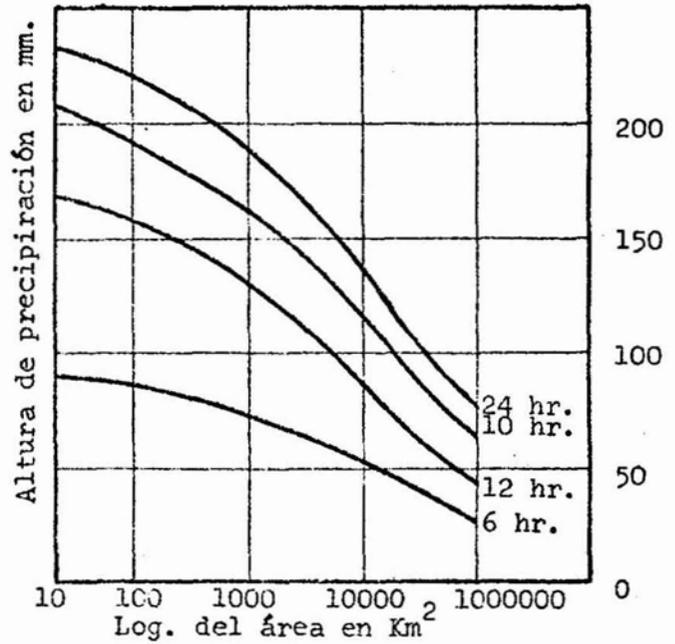


Fig. 3.15. Curvas Area-Duración-Profundidad (la escala del área es logarítmica).

En base a la figura 3.14. o a la fig. 3.15 se sacan los valores máximos de área profundidad duración, los que se tabulan como se indica en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Altura máxima media de precipitación en mm. correspondiente a un temporal.

Area Km ²	Duración en horas			
	6	12	18	24
25				
100				
1000				
10000				
100000				

3.11. Análisis de la Relación Duración-Intensidad-Frecuencia

Al igual que el anterior, este análisis es también de gran importancia para el ingeniero proyectista de obras hidráulicas. Al igual que antes, los valores de la intensidad y la duración de las lluvias, pueden extraerse de las curvas másicas producidas directamente por los pluviógrafos, o de las construidas en base a los pluviogramas existentes y a las observaciones del encargado de las estaciones pluviométricas. Para el cálculo de los valores puntuales de duración-intensidad-frecuencia, es necesario recurrir a una estadística pluvial larga, y mediante la ayuda de la tabla 3.6. Se procede de la siguiente manera: Supóngase que para una estación existe una estadística pluvial de 50 años, y se desean conocer los valores de la intensidad y duración para un período de 5 años de frecuencia. Entonces, para este período las tormentas de 5 años de frecuencia serán excedidas en intensidad, de acuerdo a la definición de tiempo de retorno, $50/5 = 10$ veces. Se llena entonces la tabla 3.6 con el número de tormentas que corresponden a cada duración e intensidad durante el período de registro.

Tabla 3.6. Número de tormentas ocurridas durante el período de registro. Intensidades y duraciones.

Intensidad mm/hora Duración minutos	Número de tormentas de intensidad y duración dadas ocurridas durante el período de registro.					
	10	20	30	50	100	200
5				12	6	
10				8		
15			13			
		15	6			
	11	8				
	9					
200						

Una vez que la tabla 3.6 ha sido construida, se traza la línea gruesa escalonada que aparece en ella y que separa las tormentas de intensidad y duración que han ocurrido más de 10 veces (período de retorno menor de 5 años) de aquellas que han ocurrido menos de 10 veces (período de retorno mayor de 5 años). Por lo tanto, esta línea escalonada, señala los valores de la intensidad y la frecuencia entre los cuales debe realizarse una interpolación cruzada, para así establecer las duraciones y las intensidades de las lluvias de la frecuencia requerida. Estos valores se llevan a una tabla como la 3.7.

Tabla 3.7. Valores de intensidad y duración para tormentas de una frecuencia de N años (5 años para el ejemplo).

Duración (min)	10	20	30							200
Intensidad (mm/hora)										

Cada una de estas tablas, da los valores que definen para una frecuencia dada la variación puntual de la duración contra la intensidad de las tormentas, resultando para varias frecuencias un haz de curvas como el que se muestra en la fig. 3.15.a.

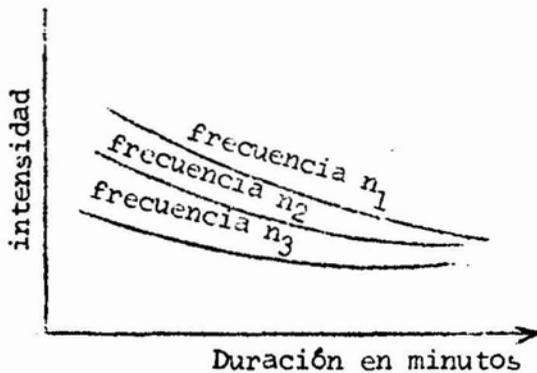


Fig. 3.15.a.

Valores puntuales de la relación duración-intensidad-frecuencia, tal como aparecen en papel rectangular.

Estas relaciones pueden expresarse en ecuaciones matemáticas de la forma:

$$i = \frac{cT^m}{(t+d)^n}$$

Donde:

i = intensidad

T = frecuencia en años

t = duración en minutos

c, d, m y n = coeficiente y exponentes, constantes para una estación dada.

Para frecuencia específicas, el valor de cT^m es una constante A, por lo tanto, extrayendo logaritmos, la ecuación se transforma en:

$$\log i = \log A - n \log (t + d)$$

Aquí los valores de "d" se establecen por tanteos, hasta que el gráfico resultante en papel logarítmico de los valores de "i" contra los valores de (t + d) sea una línea recta, pudiendo establecer de dicho gráfico los valores de A y n.

Cuando para varias frecuencias se han establecido diversos valores de A, un gráfico de valores de T contra A en papel logarítmico, produce una ecuación de la forma:

$$\log A = \log c + m (\log T)$$

pudiendo así calcular los valores de c y m.

3.12. Mapas de Duración-Intensidad-Frecuencia

Las relaciones de duración-intensidad-frecuencia establecidas para valores puntuales pueden resumirse en una serie de mapas, cada uno de los cuales se construye para una duración y una frecuencia dada. Una vez dibujado cada mapa se ubican sobre las estaciones y se trazan las líneas de igual intensidad de precipitación.

3.13. Relaciones de Profundidad-Duración-Frecuencia

Para hallar este tipo de relación, es necesario calcular primero la variación que existe entre profundidades y frecuencias para cada duración. La relación de profundidad-frecuencia se halla para cada duración que interese, graficando en papel semilogarítmico los valores máximos anuales de la profundidad en la escala aritmética contra los valores del tiempo de retorno en la escala logarítmica.

El tiempo de retorno para este tipo de gráfico se obtiene de la fórmula:

$$T_r = \frac{2n}{2m - 1} = \frac{n}{m - 1/2}$$

donde:

- n = longitud del período de registro
- m = número de orden del evento, cuando todos los eventos se han ordenado en orden descendente de magnitudes.

Estos valores pueden tabularse en una tabla como la 3.8.

Tabla 3.8. Para el ordenamiento de profundidades de lluvia y de una duración dada y cálculo de su período de retorno.

Orden de magnitud (n)	Profundidad de la lluvia (mm)	Período de retorno $T = \frac{n}{m + \frac{1}{2}}$
1	50	
2	60	
3	95	
.		
.		
.		
n		

Cuando los valores de la tabla se llevan al gráfico semilogarítmico, pueden interpolarse o extrapolarse los valores de profundidades de lluvia para las frecuencias que interesen y para la duración a que corresponden los datos.

De la misma forma que se explicó anteriormente, estos valores pueden graficarse en una serie de mapas, cada uno de los cuales, contiene líneas de igual profundidad, para una frecuencia y duración constantes para un mismo mapa, constituyendo los mapas de profundidad-duración-frecuencia.

La precipitación en Venezuela

En Venezuela, se producen lluvias convectivas en todo el país con una frecuencia alta, a excepción de las partes más elevadas de las montañas. Las lluvias de origen ^{frontal} ~~frontal~~ mojan una franja de aproximadamente unos 100 Km. de ancho de la costa norte del país y las islas en el mar Caribe. Las lluvias orográficas están confinadas a los cuatro sistemas de montañas del país. El cinturón tropical de bajas presiones también hace producir lluvias en todo el país, mientras que en el oriente, los huracanes inducen importantes lluvias. Para tener una mejor idea de la distribución de las lluvias en el país, se muestra en la Fig. 3.16 un mapa de las isoyetas correspondientes a la precipitación media anual para un período de 10 años y en la fig. 3.17 se muestran gráficamente los promedios mensuales de lluvias para un grupo seleccionado de estaciones (ambos mapas han sido tomados de: Ministerio de Obras Públicas, Atlas de Venezuela, Caracas, Venezuela, 1969).

Los principales organismos que se encargan de la obtención de datos son:

- (a) El Ministerio de Obras Públicas a través de su División de Hidrometeorología, que publica los "Anuarios Climatológicos" en forma regular.
- (b) Instituto de Obras Sanitarias - Departamento de Hidrología.
- (c) Fuerza Aérea Venezolana. Servicio de Meteorología.
- (d) Minist. de Agricultura y Cría, a través del servic.de Meteorología

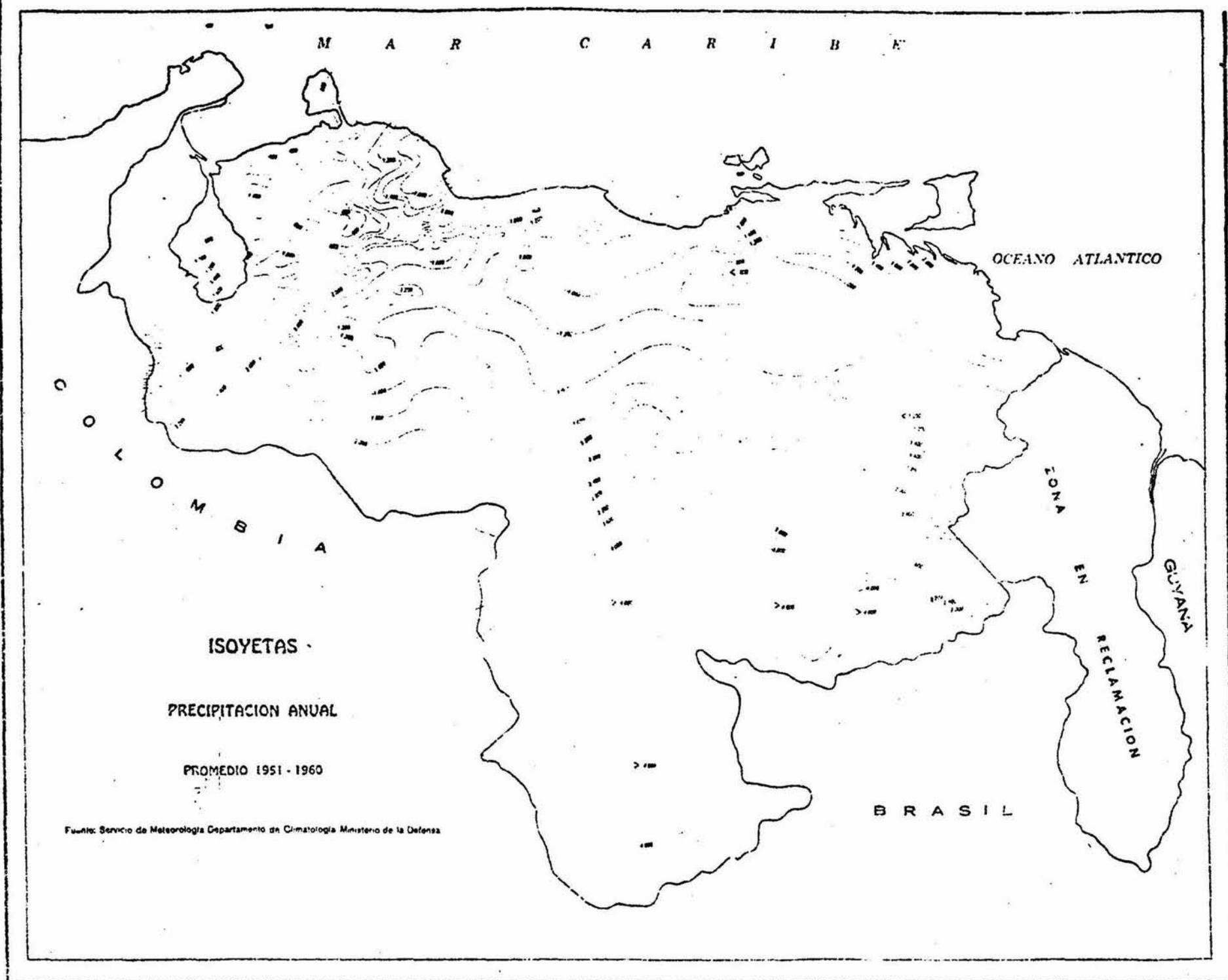


Fig. 3.6. Mapa de isoyetas para la precipitación anual en Venezuela. Promedio de 10 años.

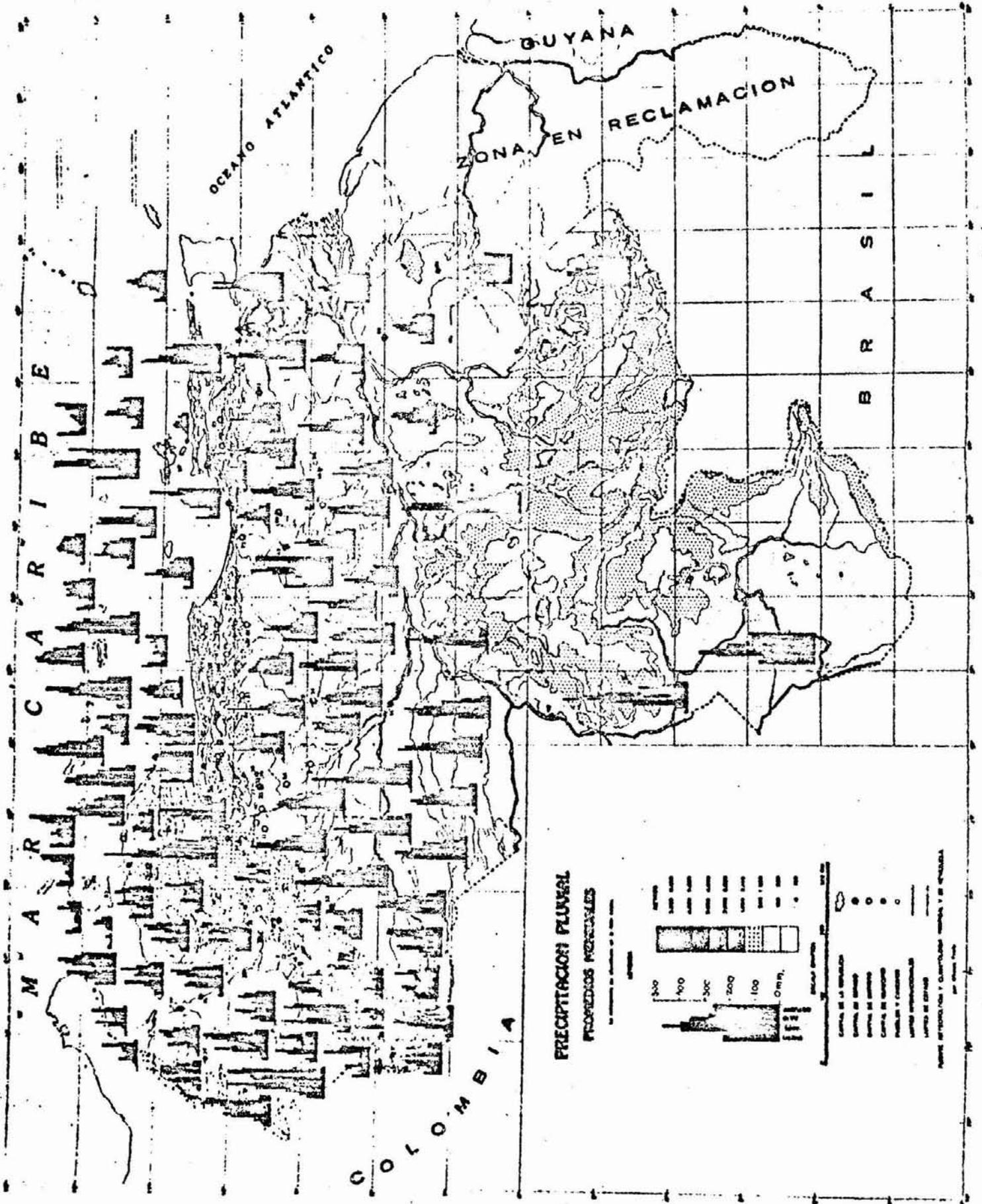


Fig. 3.17. Promedios mensuales de la distribución pluvial en Venezuela, para varias estaciones seleccionadas.