IV. PRECIPITACION.

Para determinar el nivel de aguas máximas extraordinarias en la zona del sitio de proyecto es necesario estimar el gasto máximo de diseño en la zona de cruce, para lo cual se deberán tener los escurrimientos proporcionados por una estación hidrométrica en el sitio. Debido a la dificultad de que exista una contando con varios años de registros, se requiere conocer la precipitación de la zona para establecer las características hidrológicas de la cuenca y así determinar una tormenta de diseño que ayude a estimar la máxima avenida en el sitio de cruce.

- *Precipitación*: es el agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico, proveniente de la atmósfera.
- *Precipitación Total Diaria* (Pd): Es la lámina total acumulada en un día de observación (de 8:00 a 8:00 A.M.).
- *Precipitación Total Mensual* (Pm): Es la lámina total acumulada en un mes.

$$Pm = \sum_{d=1}^{dm} Pd$$

- *Precipitación Total Anual* (Pa): Es la lámina total acumulada en el año, viene dada por:

$$Pa = \sum_{m=1}^{m=12} Pm$$

- *Precipitación Media Anual Mensual* (Pm): Es la lámina que en promedio cae al mes en la estación, se estima con la relación.

$$\overline{Pm} = \frac{1}{n} \sum_{y=1}^{n} \overline{Pmi}$$

- *Precipitación Media Anual* (Pa): Es la lámina total que en promedio cae al año en la estación y está dado por:

$$\overline{Pa} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Pa$$

Para que exista precipitación se necesita que exista suficiente humedad atmosférica (circulación y ascendencia del aire), una atmósfera adecuada con buen gradiente de temperatura y un mecanismo enfriador que lleve a cabo el proceso de nivelación que hace que las partículas pequeñas se acumulen y caigan por gravedad. (3)

Existen diferentes tipos de precipitación de los cuales están la precipitación orográfica: que es debido a que las masas de aire que circulan encuentran un obstáculo montañoso las cuales se ven obligadas a subir, enfriándose y condensándose. (1)

- *Precipitación por Convección.*

Es cuando una masa de aire caliente se encuentra inestable cerca de la superficie que puede ser debido a un sobrecalentamiento del suelo, esta masa asciende, se enfria, se condensa y cae; este tipo de precipitación tiende a ser puntual y genera tormentas eléctricas. (1)

- *Precipitación Frontal.*

Esta ocurre cuando se mueve una masa de aire caliente y uno de aire frío. cuando un frente frío desplaza a un frente caliente, éste sube bruscamente produciendo fuertes chubascos, cuando ocurre lo contrario el aire caliente con el frío forman un cierto ángulo y la intensidad es moderada, la cual cubre una extensa área.

- *Precipitación Ciclónica.*

Es la que está asociada al paso de un ciclón, la cual puede ser: No frontal, la que está relacionada con la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar las zonas de baja presión, y la frontal es la debida a la fricción de dos frente las cuales se ondulan debido a la tendencia de los aires tropicales de ir hacia los polos y de los polares ir hacia trópicos formando una circulación contraria a las manecillas del reloj ocasionando el ciclón.

1. Medición de la precipitación.

1.1. Pluviómetros.

Es un recipiente en forma de cono truncado en el que su área grande es 10 veces mayor que el área del medidor haciendo que un centímetro marcado sea igual a un milímetro de precipitación. Se toman lecturas cada 24 horas generalmente a las 8:00 horas.

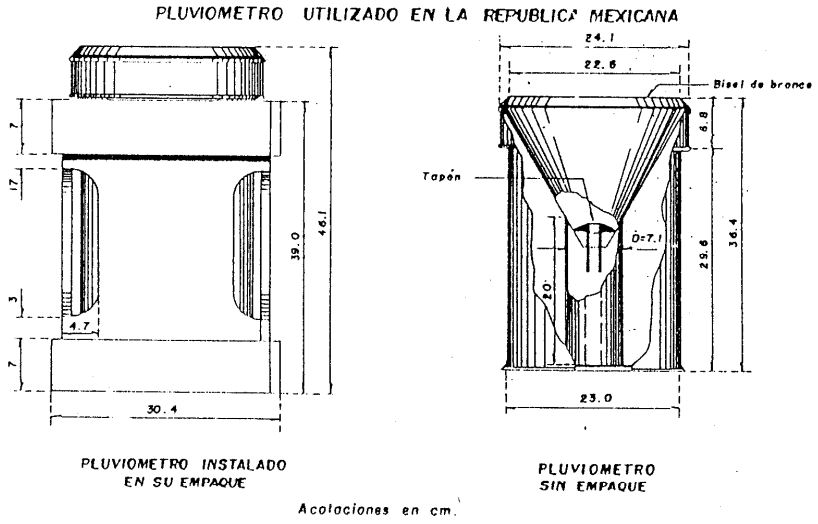

Figura IV.1 Pluviómetro (5)

1.2. Pluviógrafo.

El pluviógrafo más común utilizado en la República es el de tipo flotador el cual por medio de un cilindro que va rotando y un estilógrafo va graficando el aumento de lluvia. cuando el recipiente se llena se vacía automáticamente por medio de un sifón autocebante.

1.3. Radar Metereológico.

Permite observar la posición y movimiento de las áreas de precipitación y determinados tipos de radares pueden proporcionar una evaluación de la intensidad de lluvia en las zonas comprendidas de su alcance; éste último de 40 a 200 kms.

1.4. Observaciones Mediante Satélites.

Con apoyo de satélites puede conocerse información tan valiosa como lo es la extensión y distribución temporal de la precipitación pero ahora no se ha podido usar en medidas cuantitativas.

2. Exactitud en las Mediciones.

No existe un método exacto para medir la precisión de los errores de los pluviómetros, es decir, que no existe ningún método para cuantificar con grado de precisión conocido, la cantidad de precipitación que recibe un punto sobre la superficie de la tierra ya que existe la posibilidad de encontrar errores debidos a las características del sitio y de las condiciones meterológicas como se ilustra en la figura IV.2.

2.1. Errores por viento, salpicadura y evaporación.

En general el viento origina que las gotas caigan oblicuamente y produzcan turbulencia. Las gotas pequeñas son desviadas y no son captadas; el problema del viento puede ser contrarrestado al construir un pluviómetro al nivel del suelo. El cual se puede presentar el problema por salpicadura si no se le coloca una parrilla. Los árboles y otros obstáculos deberán subtender ángulos de 20° a 30° desde el borde del pluviómetro y deberán rodear al pluviómetro para ofrecer protección.

La evaporación es otra fuente de error ya sea por evaporación de las gotas durante la tormenta y la que ocurre en el tiempo que transcurre al tomar la medida. Para contrarrestar esto es recomendable tener un área transversal reducida que induzca un rápido escurrimiento o también agregando aceite en el vaso medidor.

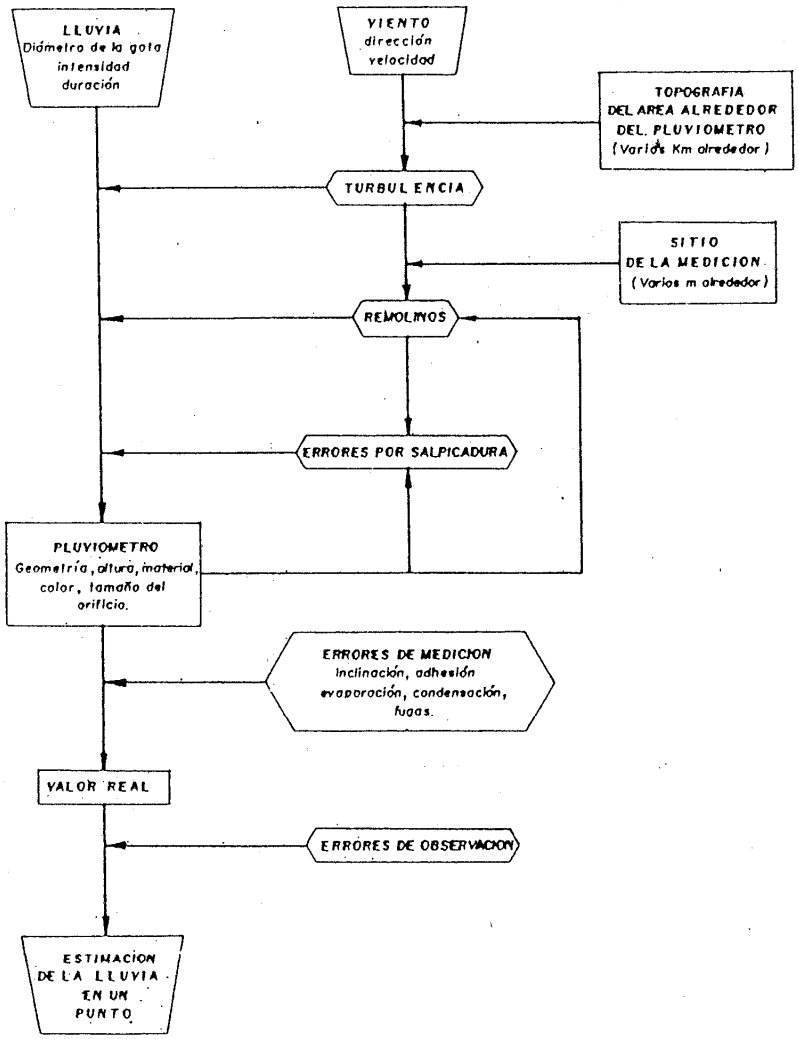

Figura IV.2. Modelo conceptual de los procesos involucrados en la medición de la lluvia.

3. Precipitación en la cuenca de estudio.

En el estado de Sonora existen 102 pluviómetros y 11 pluviógrafos de los cuales no son muchos los que tienen más de 20 años de datos. En la cuenca de estudio existen estaciones cerca de la salida de ésta y otras aguas arriba que no caen dentro del área de la cuenca. En la presa Cuauhtémoc existe una estación meterológica que lleva su nombre, la cual cuenta con 35 años de datos; en las otras estaciones se tienen muy pocas años además de contar con varios meses faltantes; en el caso de Sásabe se tienen 72 meses faltantes en 11 años lo que los hace poco confiables. Por lo anterior se utilizará sólo información de la estación climatológica "presa Cuauhtémoc" para ser la representativa en la cuenca de estudio. Los datos de precipitación máximas diarias se encuentran tabuladas en la tabla IV.1.

4. Procedimiento estadístico de los datos.

Uno de los pasos para poder conocer las características del escurrimiento de diseño es necesario procesar estadísticamente la información anterior. Primeramente se deberá analizar la importancia de la obra por medio de un concepto llamado Período de Retorno que se define como el lapso "promedio" entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada y éste se da generalmente en años. Para saber cual es el Período de Retorno de la avenida de diseño es necesario establecer que tipo de obra que se construirá como se muestra la tabla IV.2.

Un criterio sería el de utilizar un Período de Retorno de 50 años ya que por la carretera Altar-Saric hay un tránsito promedio anual de 750 vehículos y se usará un puente no muy grande.

El siguiente paso, será el de seleccionar una distribución que más se apegue a los datos observados para que por medio de ésta función, poder extrapolar a través de regresión lineal, la precipitación máxima diaria que ocurre en un período de retorno de 50 años.

La serie más utilizada es la de tipo Weibull debido a su facilidad de integración y su rapidez. La fórmula de Weibull para evaluar la probabilidad es:

$$Tr = \frac{n+1}{m}$$

Año\Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.	ANUAL
1952	9,00	6,00	11,30	8,70	0,00	23,20	24,90	25,00	17,50	0,00	9,80	12,80	25,00
1953	0,00	17,10	20,00	3,50	0,00	0,30	49,50	23,60	0,00	0,70	0,00	0,00	49,50
1954	18,10	0,60	10,50	0,00	8,00	13,70	44,70	36,00	31,80	21,00	0,00	0,00	44,70
1955	25,00	1,60	0,50	0,00	INAP	INAP	41,10	39,30	0,00	19,20	0,20	1,90	41,10
1956	15,20	1,70	0,00	3,40	0,00	3,80	32,00	16,20	16,40	2,10	INAP	2,40	32,00
1957	18,40	1,60	27,70	0,60	2,00	0,00	15,30	11,50	22,50	12,00	INAP	4,50	27,70
1958	INAP	17,50	18,00	5,00	INAP	9,00	14,50	26,50	10,50	14,50	18,50	INAP	26,50
1959	INAP	14,80	INAP	42,50	INAP	17,30	16,70	38,20	22,50	23,50	13,20	25,30	38,20
1960	27,50	7,20	0,00	0,00	0,00	0,00	20,60	39,20	21,30	11,50	0,00	9,50	39,20
1961	8,70	0,00	0,00	0,00	0,00	15,70	28,20	30,80	14,70	9,80	5,70	37,20	37,20
1962	8,20	1,70	30,00	INAP	0,00	2,60	9,50	9,20	—	0,00	6,60	24,50	30,00
1963	2,20	6,20	3,30	12,10	0,00	0,00	13,70	31,50	24,40	24,50	8,70	3,10	31,50
1964	2,70	6,00	4,70	0,00	0,00	6,20	32,50	38,20	40,70	15,00	17,80	3,80	40,70
1965	2,90	8,60	2,10	7,30	0,00	0,00	17,50	16,10	8,80	0,00	0,00	60,10	60,10
1966	14,20	46,00	0,00	0,00	0,00	6,90	67,80	46,10	14,20	0,00	16,20	12,10	67,80
1967	0,00	1,10	3,30	5,20	0,00	41,50	16,00	24,10	9,60	14,50	7,30	50,00	50,00
1968	13,50	6,20	10,00	5,50	0,00	0,00	10,10	25,50	17,20	0,00	6,50	18,50	25,50
1969	8,10	2,90	0,00	0,00	7,60	0,00	37,20	44,20	5,10	0,00	13,70	16,30	44,20
1970	3,40	3,30	11,30	0,00	0,00	11,50	46,20	41,60	38,10	0,00	0,00	2,10	46,20
1971	0,00	6,80	0,00	4,90	0,00	0,00	39,50	29,40	13,10	35,20	21,10	16,80	39,50
1972	0,00	0,00	0,00	0,00	7,10	4,50	12,40	20,30	9,40	21,50	6,80	8,50	20,30
1973	8,90	29,10	41,50	0,00	0,00	8,90	18,60	23,40	2,70	0,00	4,90	0,00	41,50
1974	14,00	0,00	22,00	0,00	0,00	0,00	41,70	22,50	16,10	14,70	0,00	2,30	41,70
1975	11,20	0,00	8,20	0,00	0,00	0,00	40,50	22,10	13,50	0,00	13,20	6,20	40,50
1976	3,60	14,10	4,80	10,00	10,00	20,50	14,60	22,40	7,50	18,50	16,40	11,80	22,40
SUMA													
PROMEDIO													
NOTAS:													

Tabla IV.1. Registro de las precipitaciones máximas diarias ocurridas en la presa Cuauhtémoc. Hoja 1.

Año\Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.	ANUAL
1977	8,00	0,00	7,10	17,90	0,00	0,00	25,90	20,30	23,40	61,40	2,10	6,80	61,40
1978	26,90	43,30	7,30	4,60	0,00	0,00	39,40	15,20	8,90	46,10	22,90	25,00	46,10
1979	20,00	4,20	22,00	0,00	43,60	0,00	40,50	12,60	9,70	0,00	0,00	0,00	43,60
1980	6,20	14,20	10,00	0,00	0,00	2,00	41,90	52,30	17,40	0,00	0,00	0,00	52,30
1981	9,10	5,10	19,40	11,10	0,00	7,30	32,40	24,30	23,60	2,50	15,50	0,00	32,40
1982	5,30	0,00	8,70	0,00	0,00	0,00	25,90	16,60	3,80	0,00	26,20	41,50	41,50
1983	43,50	24,50	38,50	4,50	0,00	0,00	28,50	56,20	28,50	72,50	31,50	25,50	72,50
1984	26,50	0,00	0,00	4,50	6,20	32,20	52,50	28,50	3,20	38,50	4,50	30,10	52,50
1985	33,50	18,50	1,00	14,20	0,00	0,00	17,20	5,20	3,20	42,20	14,20	5,30	42,20
1986	12,50	24,50	19,20	0,00	4,20	28,20	18,20	58,20	60,30	5,20	2,70	15,50	60,30
1987	10,70	10,70	48,30										
SUMA													
PROMEDIO													
NOTAS:													

Tabla IV.1. Registro de las precipitaciones máximas diarias ocurridas en la presa Cuauhtémoc. Hoja 2.

TIPO DE ESTRUCTURA	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS
DRENAJE DE CARRETERAS EN LAS QUE CIRCULAN:	
0 a 400 Vehículos al día	10
400 a 1,700 Vehículos al día	10 a 25
1,700 a 5,000 Vehículos al día	25
más de 5,000 Vehículos al día	50
Drenajes de Aeropuertos	5
Pequeños puentes	50
Grandes puentes	100
Alcantarillas	25

Tabla IV.2 Período de retorno según el tipo de Obra

Donde:

Tr = Período de retorno en la serie anual de máximos en años.

n = Número total de eventos en la serie anual, igual al número total de registros.

m = número de orden del evento, arreglados de forma decreciente, es decir 1 para el mayor y n para el menor.

Una vez ordenados los datos para cada año en forma decreciente y utilizando la fórmula anterior para evaluar Tr para cada año se deberán transformar los datos a logaritmo natural para poder aplicar la linealidad en la regresión debido a que los datos tienen la forma:

$$P = b + m \log(Tr) \qquad \text{(IV.6)}$$

Donde:

P = precipitación en mm.

Tr = es el período de retorno, elegido.
m y b son constantes a determinar.

m es la pendiente de la recta de regresión, la cual minimiza las distancias entre puntos observados y puntos sobre la ecuación, m se evalúa como:

$$m = Sxy/Sx^2 \qquad \text{(IV.7)}$$

En donde Sxy es la covarianza, definida como:

$$Sxy = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} xiyi - \bar{x}\bar{y} \qquad \text{(IV.8)}$$

Sx^2 es la varianza de las x dada por:

$$Sx^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{xi^2}{n} - \bar{x}^2 \qquad \text{(IV.9)}$$

$\bar{x}$ es la media de las x:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} \frac{xi}{n} \qquad \text{(IV.10)}$$

$\bar{y}$ es la media de las y:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{n} \frac{yi}{n} \qquad \text{(IV.11)}$$

En donde "x" son los logaritmos de los Períodos de Retorno calculados con la distribución Weibull (Ec. IV.5) y "y" las precipitaciones en milímetros. a continuación se presenta una tabla con las precipitaciones ordenadas en forma descendiente (ordenadas), los períodos de retorno calculados con la distribución de Weibull, los logaritmos de los períodos de retorno (abscisas), las ordenadas multiplicadas con las abscisas, las abscisas al cuadrado, las ordenadas al cuadrado y sus sumatorias.

m	y=P(mm)	Tr	x=log Tr	P*log Tr	(log Tr) ²	P²
1	72.5	36.00	1.55630	112.832	2.4221	5256.3
2	67.8	18.00	1.25527	85.107	1.5757	4596.8
3	61.4	12.00	1.07918	66.262	1.1646	3770.0
4	60.3	9.00	0.95424	57.541	0.9106	3636.1
5	60.1	7.20	0.85733	51.526	0.7350	3612.0
6	52.5	6.00	0.77815	40.853	0.6055	2756.3
7	52.3	5.14	0.71096	37.183	0.5055	2735.3
8	50.0	4.50	0.65321	32.661	0.4267	2500.0
9	49.5	4.00	0.60206	29.802	0.3625	2450.3
10	46.2	3.60	0.55630	25.701	0.3095	2134.4
11	46.1	3.27	0.51455	23.721	0.2648	2125.2
12	44.7	3.00	0.47712	21.327	0.2276	1998.1
13	44.2	2.77	0.44248	19.558	0.1958	1953.6
14	43.6	2.57	0.40993	17.873	0.1680	1901.0
15	42.2	2.40	0.38021	16.045	0.1446	1780.8
16	41.7	2.25	0.35218	14.686	0.1240	1738.9
17	41.5	2.12	0.32572	13.517	0.1061	1722.3
18	41.5	2.00	0.30103	12.493	0.0906	1722.3
19	41.1	1.89	0.27738	11.400	0.0769	1689.2
20	40.7	1.80	0.25527	10.390	0.0652	1656.5
21	40.5	1.71	0.23401	9.477	0.0548	1640.3
22	39.5	1.64	0.21378	8.444	0.0457	1560.3
23	39.2	1.56	0.19451	7.625	0.0378	1536.6
24	38.2	1.50	0.17609	6.727	0.0310	1459.2
25	37.2	1.44	0.15836	5.891	0.0251	1383.8
26	32.4	1.38	0.14145	4.583	0.0200	1049.8
27	32.0	1.33	0.12483	3.995	0.0156	1024.0
28	31.5	1.29	0.10924	3.441	0.0119	992.3
29	30.0	1.24	0.09377	2.813	0.0088	900.0
30	27.7	1.20	0.07918	2.193	0.0063	767.3
31	26.5	1.16	0.06483	1.718	0.0042	702.3
32	25.5	1.12	0.05115	1.304	0.0026	650.3
33	25.0	1.09	0.03782	0.946	0.0014	625.0
34	22.4	1.06	0.02449	0.548	0.0006	501.8
35	20.3	1.03	0.01225	0.249	0.0001	412.1
Σ	1467.8		14.45650	760.422	10.7495	66940.1

Tabla IV.3 Precipitación y periodos de retorno procesados estadísticamente.

De lo anterior obtenemos que $\sum xiyi = 760.422$, $n = 35$, $\sum xi^2 = 10.7495$, $\sum yi^2 = 66940.1$, $\sum xi = 14.45$, $\sum yi = 1467.8$, sustituyendo en las fórmulas anteriores:

$$Sxy = \frac{1}{35}(760.422)\left(\frac{14.456}{35}\right)\left(\frac{1467.8}{35}\right) = 4.4069$$

$$Sx^2 = \frac{10.7492}{35}\left(\frac{14.456}{35}\right)^2 = 0.13653$$

$$m = \frac{Sxy}{Sx^2} = \left(\frac{4.4069}{0.13653}\right) = 32.278$$

La ordenada al origen de la recta es:

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \qquad \text{(IV.12)}$$

sustituyendo valores:

$$b = \left(\frac{1467.8}{35}\right) - 32.278\left(\frac{14.456}{35}\right) = 28.576$$

Según la ecuación (IV.6)

$$P = 28.576 + 32.278 \log(Tr) \qquad \text{(IV.6')}$$

Sustituyendo para Tr = 50 años.

$$P = 28.576 + 32.278 \log(50) = 83.4 \approx 84 \text{ mm.}$$

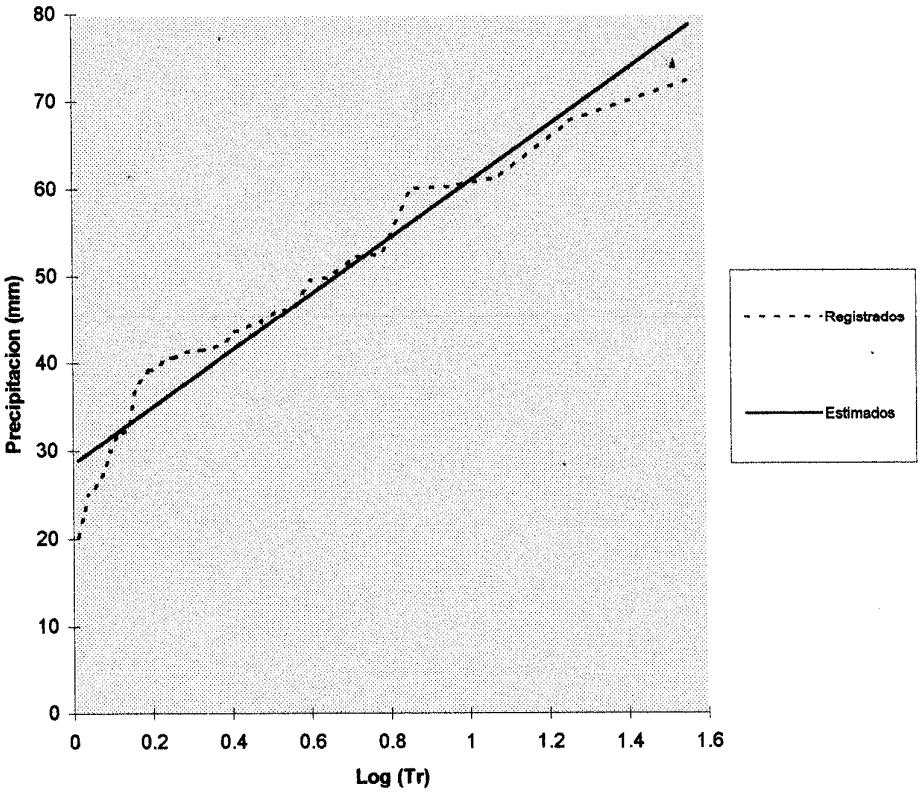

Fig. IV.2' Relación entre las precipitaciones estimadas y las registradas con sus períodos de Retorno.

Coeficiente de correlación:

El coeficiente de correlación lineal es una medida numérica entre dos variables, es decir, es una medida de la cercanía de los puntos observados y de los puntos calculados con la ecuación anterior y se calcula como:

$$r_{xy} = \frac{Sxy}{Sx^2\, Sy^2} \qquad \text{(IV.13)}$$

En donde Sxy y Sx^2 es la covarianza y varianza de las x respectivamente. Sy^2 es la varianza de las yi o de las precipitaciones de este caso, evaluada como:

$$\sum \frac{yi^2}{n} - \bar{y}^2 \qquad \text{(IV.14)}$$

$\sum yi^2$ fué evaluada en la tabla (IV.3).

$$\sum y_i^2 = 66940.1$$

Sustituyendo valores:

$$Sy^2 = \left(\frac{66940.1}{35}\right)\left(\frac{1467.8}{35}\right)^2$$

$$Sy^2 = 153.85$$

De (VI.13):

$$rxy = \frac{4.4069}{\sqrt{(0.13653)(153.85)}} = 0.96 = 96\%$$

Existe una correlación del 96%, la cual es muy buena y suficiente confiable.

5. Correcciones al valor representativo. (1)

Se deberán realizar dos correcciones a éste último valor de precipitación máxima diaria con un período de retorno de 50 años para adecuarlo lo más posible al valor verdadero y estas son:

1o. Corrección por intervalo fijo de observación.
2o. Reducción por magnitud de cuenca.

5.1. Corrección por intervalo fijo de observación.

L.L. Weiss en base a un estudio de miles de estaciones-año de datos de lluvia, encontró que los resultados de un análisis probabilístico llevado a cabo con lluvias máximas anuales tomados en un único y fijo intervalo de observación (24 horas) al ser incrementados un 13 % conducían a magnitudes más aproximadas a las obtenidas con lluvias máximas verdaderas.

Precipitación con corrección por intervalo fijo = 1.13 (84 mm.) = 94.92 mm.

5.2. Reducción por magnitud de cuenca.

Se considera que los valores puntuales obtenidos en la estación pluviométrica son representativos de sólo 25 km² y al tender a abarcar un área mayor de cuenca, deberán ser reducidos, como se ilustra en la siguiente figura IV.3.

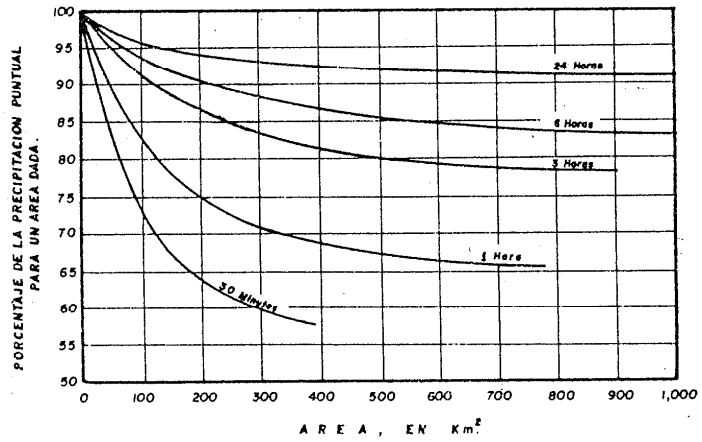

Figura IV.3 Reducción por magnitud de cuenca.

Suponiendo una duración de lluvia de 24 horas que está del lado de la seguridad ya que se cuenta con una sola estación, con un área de 1980 km², tenemos que el coeficiente de reducción es de : 0.91

Precipitación corregida = (94.92)(0.91) = 86.4 mm.