CAPITULO 2

2. ANALISIS ESTADISTICO DE DATOS HIDROLOGICOS

El análisis estadístico consiste en parametrizar un conjunto de datos (precipitaciones o caudales) con el fin de extrapolar y conocer eventos venideros.

La selección de la precipitación de diseño, se inicia con la revisión del registro pluviográfico obtenido de una estación meteorológica cercana al sector en estudio.

Actualmente Guayaquil cuenta con tres estaciones pluviográfica, la primera localizada en el aeropuerto “Simón Bolívar” a cargo de la Dirección de Aviación Civil-DAC; la segunda inicialmente localizada en la cdla. La FAE y luego reubicada en la Universidad Estatal de Guayaquil, a cargo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología-INAMHI; y la tercera ubicada dentro de la Base Naval Sur a cargo del Instituto Oceanográfico de la Armada-INOCAR.

Este capitulo se ha dividido en tres partes; la primera contiene el ajuste de los datos de precipitación a una distribución de probabilidades y el calculo del periodo de retorno de la precipitación registrada el **13 de diciembre de 1997**; la segunda muestra las mayores intensidades obtenidas del levantamiento de las fajas correspondiente a los meses de marzo, abril, noviembre y diciembre del año 97; y la tercera menciona dos formas para expresar la relación de intensidad-duración-frecuencia.

2.1. Periodo de Retorno

Es el tiempo promedio en que se vuelve a presentar un evento hidrológico. El conocimiento inicial de este evento, el cual permite el diseño y la planificación optima de la obra, depende de la extrapolación a una secuencia de observaciones máximas, por ejemplo las series anuales de máximas precipitaciones diarias en

Guayaquil, obtenidas del Anuario emitido por el INOCAR, cuyos valores se citan en la tabla 2.1.

Precipitación Máxima Diaria-Estación Radio Sonda		
Año	Precipitación (mm.)	Fecha
1992	113,60	19 de Marzo
1993	75,70	10 de Febrero
1994	130,60	19 de Diciembre
1995	79,00	17 de Febrero
1996	104,30	1 de Febrero
1997	**185,50**	**13 de Diciembre**
1998	221,80	18 de Abril
1999	60,40	26 de Abril

Tabla 2.1. Serie de máximas precipitaciones diarias tomadas de la Estación Radio Sonda

2.1.1. Ajuste de datos a una distribución de probabilidades

Una distribución de probabilidades es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una serie pluviográfica. En Estadística existen varias funciones de distribución de probabilidad teórica y en su mayoría no es posible probarlas todas para un problema en particular, por lo tanto, se escogió de esas funciones las que mejor se adoptaron a la serie de máximas precipitaciones diarias registradas al norte de la ciudad de Guayaquil.

En la tabla 2.2 se enumeran algunas de las distribuciones comúnmente utilizadas con su función de distribución y su respectiva aplicación para el ajuste de datos hidrológicos.

Distribuciones de probabilidades para el ajuste de información hidrológica		
Distribuciones	**Función de densidad de probabilidad**	**Aplicación**
Normal	$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$	La precipitación anual(suma de los efectos de los muchos eventos)
Log-normal	$f(x)=\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y{}^2}\right)};y=\log x$	La distribución de tamaños de gotas de una lluvia
Exponencial	$f(x)=\lambda e^{-\lambda x}$	Determinar el volumen de escorrentía contaminada que entra a los ríos a medida que la lluvia lava los contaminantes en la superficie.
Gamma	$f(x)=\frac{\lambda^{\beta}x^{\beta-1}e^{-\lambda x}}{\Gamma(\beta)}$	La altura de precipitación
Pearson tipo III	$f(x)=\frac{\lambda^{\beta}(x-\varepsilon)^{\beta-1}e^{-\lambda(x-\varepsilon)}}{\Gamma(\beta)}$	La distribución de probabilidades de picos decrecientes máximos anuales
Log-Pearson tipo III	$f(x)=\frac{\lambda^{\beta}(y-\varepsilon)^{\beta-1}e^{-\lambda(y-\varepsilon)}}{x\Gamma(\beta)};y=\log x$	La distribución de probabilidades de picos decrecientes máximos anuales
Valores extremos		
tipo I – Gumbel	$f(x)=\frac{1}{\alpha}e^{\left[-\frac{x-\mu}{\alpha}-e^{\left(-\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}\right]}$	Modelaje de las tormenta de lluvia
tipo II – Frechet		
tipo III- Weibull		Los flujos de estirajes

Tabla 2.2.- Función de densidad de probabilidad que se ajustan a datos hidrológicos

Dado el registro meteorológico constituido por las máximas precipitaciones anuales desde el año 1992 al 1999, se determinó las medidas descriptivas como paso previo al ajuste del conjunto de datos. El calculo de la media y desviación estándar se muestra en la siguiente tabla.

Precipitación Máxima Diaria - Estación Radio Sonda						
AÑO	PRECIPITACION	DÍA		$(X_i - X)$	$(X_i - X)^2$	$(X_i - X)^3$
1992	113.6	19 de Marzo	1	-7,76	60,26	467,74
1993	75.7	10 de Febrero	1	-45,66	2085,06	95209,23
1994	130.6	19 de Diciembre	1	9,24	85,33	788,25
1995	79	17 de Febrero	1	-42,36	1794,58	76022,95
1996	104.3	1 de Febrero	1	-17,06	291,13	4967,39
1997	185.5	13 de Diciembre	1	64,14	4113,62	263837,23
1998	221.8	18 de Abril	1	100,44	10087,69	1013182,51
1999	60.4	19 de Marzo	1	-60,96	3716,43	226562,64
Σ:	970,9	**N**	8	Σ:	22234,10	0.01
MEDIA		*121,36*	**DESVIACION ESTANDAR**		*56,36*	
COEFICIENTE DE SESGO		*1,1738*	**COEFICIENTE DE ASIMETRIA**		*1,7887*	

Tabla 2.3. Obtención de los parámetros estadísticos de la muestra - μ, s

El uso de las distribuciones de probabilidades consiste en estandarizar el evento extremo buscado a través de la sustitución de la media, la varianza y el coeficiente de asimetría en cada una de las ecuaciones que el autor ha desarrollo. En las siguientes líneas se expondrá acerca de cada distribución de probabilidad y las ecuaciones necesarias para el cálculo de sus parámetros.

a) Distribución Gumbel Tipo I

La distribución de valores extremos tipo I cuyas propiedades fueron desarrolladas por Gumbel (1941) se aplican de mejor manera a las tormentas de lluvia, tal es el caso que son el sustento para el método estándar de análisis de frecuencia de crecientes en Gran Bretaña.

Del estudio realizado por Gumbel a una serie de datos, estableció los parámetros α y μ en función de la media y la desviación estándar, las mismas que citamos a continuación:

$$\alpha = \frac{s \times \sqrt{6}}{\pi} \; ; \qquad \text{ec. 2.1}$$

s: Desviación estándar de la muestra

$$\mu = \bar{x} - 0.5772\alpha \; ; \qquad \text{ec. 2.2}$$

μ: Moda de la distribución o punto de máxima densidad de probabilidad

$\bar{X}$: Media de la muestra

Remplazando los valores de la desviación y media muestral (tabla 2.3) en las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente, se obtienen los parámetros que estandarizan a cada evento analizado (tabla 2.4).

b) Distribución Normal

La distribución normal se caracteriza por ser la menos usada de todas las funciones de probabilidad, debido a que la mayor parte de las variables hidrológicas son no negativas y tienden ser asimétricas, mientras que ésta varía a lo largo de un rango continuo $\langle -\infty, \infty \rangle$.

Esta función establece que la suma de cada evento independiente como son las precipitaciones diarias en una región y el volumen de escurrimiento diario de un rió tienden a estar normalmente distribuida.

El primer paso para realizar el ajuste de datos es estandarizar la muestra a través de la ecuación 2.3

$$z = K_T = \frac{X_T - \mu}{s} \quad ; \qquad \text{ec. 2.3}$$

Siendo;

μ: Media muestral

s: Desviación estándar

K_T: Factor de Frecuencia

z: Variable normal estándar

Para realizar el ajuste de datos a una distribución Log - normal se aplica la misma ecuación antes descritas con la única particularidad que se emplean el logaritmo de la variable, la media y la desviación estándar. La tabla 2.5 muestra el cálculo de estas medidas descriptivas.

c) Distribución Pearson Tipo III

La distribución Pearson Tipo III o también llamada la *distribución gamma de tres parámetros,* utiliza tres medidas descriptivas para la obtención de sus parámetros. El cálculo de estos parámetros se realiza a través de las siguientes ecuaciones:

$$\beta = \left(\frac{2}{C_s} \right)^2 ; \qquad \text{ec. 2.4}$$

$$\lambda = \frac{S}{\sqrt{\beta}} ; \qquad \text{ec. 2.5}$$

$$\in = \bar{x} - S\sqrt{\beta} ; \qquad \text{ec. 2.6}$$

Siendo;

$\beta, \lambda, \in$: Parámetros de la distribución de probabilidad

s: Desviación estándar

Cs: Coeficiente de asimetría

$\bar{x}$: Media muestral

En la tabla 2.4 constan todos los parámetros necesarios para conocer la probabilidad de ocurrencia teórica de un evento específico a través de las funciones de distribución de probabilidades antes citadas

Distribución de Probabilidad							
Datos		Parámetros					
		Gumbel Tipo I					
		α	43,94	μ	96,00		
		Normal					
X_T	185,50 mm	μ	121,36	σ	56,36		
		Pearson Tipo III					
		β	1.25	λ	50.4	$\in$	58.35
		Log-normal					
$Log(X_T)$	2.27 mm	μ_y	2.05	σ_y	0.19		

Tabla 2.4.- Parámetros de las distribuciones de probabilidades

Precipitación Máxima Diaria - Estación Radio Sonda							
AÑO	**PRECIPITACION**	**LOG(Pe)**	**DÍA**		**$(X_i - X)$**	**$(X_i - X)^2$**	**$(X_i - X)^3$**
1992	113.6	2.055	19 de Mar	1	0.01	0.00	0.00
1993	75.7	1.879	10 de Feb	1	-0.17	0.03	0.00
1994	130.6	2.116	19 de Dic	1	0.07	0.01	0.00
1995	79	1.898	17 de Feb	1	-0.15	0.02	0.00
1996	104.3	2.018	1 de Feb	1	-0.03	0.00	0.00
1997	185.5	2.268	13 de Dic	1	0.22	0.05	0.01
1998	221.8	2.346	18 de Abr	1	0.30	0.09	0.03
1999	60.4	1.781	26 de Abr	1	-0.26	0.07	-0.02
Σ:		16.362	**N**	8	Σ:	0.27	0.01
MEDIA		*2.05*	**DESVIACION ESTANDAR**			*0.19*	
COEFICIENTE DE SESGO		*0.21*	**COEFICIENTE DE ASIMETRIA**			*0.32*	

Tabla 2.5.- Medidas descriptivas para una función Log-normal y Log-pearson tipo III

2.1.2. Prueba de Bondad de Ajuste

En la tabla 2.4 se mostró los parámetros de cada distribución de probabilidad como resultado del ajuste de los datos de precipitación, en seguida se describirá de manera breve la prueba de bondad del ajuste, que en la teoría de estadística las más conocidas son la x^2 y la *Kolmogorov-Smirnov*. La selección de la distribución de probabilidad obedecerá a un análisis realizado a estos resultados, donde se califica cada una de ella.

a) Prueba X^2

La prueba X^2 es la más popular. Fue propuesta por Karl Pearson en 1900.

Para aplicar la prueba, el primer paso es dividir los datos en número de *k* de intervalos de clase, donde se ha escogido $k = 6$. Como se muestra en la tabla 2.6.

Intervalo de Clases				
Intervalo i	**Limite inferior Ii**	**Limite superior Si**	**Marca de clase**	**Número Observado** θ_i
1	0	40	20	0
2	40	80	60	3
3	80	120	100	2
4	120	160	140	1
5	160	200	180	1
6	200	240	220	1
Número de Muestra – n				**8**

Tabla 2.6.- Medidas descriptivas para una función Log-normal y Log-pearson tipo III

Luego se calcula el parámetro estadístico:

$$D = \sum_{i=1}^{k} \left(\theta_i - \varepsilon_i\right)^2 / \varepsilon_i \qquad \text{ec. 2.7}$$

Donde:

θ_i : Es el número observado de eventos en el intervalo i

ε_i : Es el número esperado de evento en el mismo intervalo, y se calcula como:

$$\varepsilon_i = n\left[F\left(S_i\right) - F\left(I_i\right)\right] \quad i = 1,2,3,\ldots k \qquad \text{ec. 2.8}$$

Siendo:

$F\left(S_i\right)$: Función de distribución de probabilidad en el límite superior del intervalo *i*

$F\left(I_i\right)$: Función de distribución de probabilidad en el límite inferior del intervalo i

n: Número de evento.

En la columna (4) de la tabla 2.7 se muestra los valores ε_i para las cuatro funciones de distribución vistas anteriormente

Parámetro Estadístico						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Función de Distribución	**Intervalo**	**F(Si)**	**F(Ii)**	ε_i	$(\theta_i - \varepsilon_i)^2 / \varepsilon_i$	**D**
Normal	1	0.074	0.015	0.46	0.46	**4.04**
	2	0.230	0.074	1.25	2.46	
	3	0.488	0.230	2.07	0.00	
	4	0.752	0.488	2.11	0.58	
	5	0.918	0.752	1.33	0.08	
	6	0.982	0.918	0.52	0.46	
Log-normal	1	0.009	0.000	0.07	0.07	**2.47**
	2	0.221	0.009	1.69	1.01	
	3	0.560	0.221	2.71	0.19	
	4	0.791	0.560	1.85	0.39	
	5	0.907	0.791	0.92	0.01	
	6	0.959	0.907	0.42	0.80	
Pearson III	1	0.01	0.01	0.04	0.04	**1.98**
	2	0.23	0.01	1.77	0.86	
	3	0.54	0.23	2.44	0.08	
	4	0.77	0.54	1.84	0.38	
	5	0.90	0.77	1.05	0.00	
	6	0.96	0.90	0.46	0.62	
Gumbel	1	0.03	0.00	0.20	0.20	**9.34**
	2	0.24	0.10	1.07	3.49	
	3	0.56	0.40	1.27	0.42	
	4	0.79	0.69	0.80	0.05	
	5	0.91	0.86	0.38	0.99	
	6	0.96	0.94	0.17	4.20	

Tabla 2.7.- Parámetro estadístico [D]

Una vez calculado el parámetro D se determina el valor de una variable aleatoria con distribución X^2 para $\nu = k - 1 - m$ grados de libertad y un nivel de significancia α, donde *m* es el número de parámetros estimado a partir de los datos (m = 2; Normal, Log-normal, Gumbel; m = 3; Pearson III), que se encuentran en la tabla 2.4.

Se acepta la Hipótesis (H_o), si se cumple lo siguiente:

$$D \leq X^2{}_{1-\alpha, k-1-m}$$

Seleccionando un nivel de significancia α = 0.05, se tiene, para funciones de dos y tres parámetros (tabla 1, Apéndice B) respectivamente los valores de la X^2 cuyos valores se muestran en la tabla 2.8.

Aprobación de Hipótesis				
Función de Distribución	***D***	ν	$\chi^2_{0.95,\nu}$	***Ho***
Normal	4.04	3	7.81	se acepta
Log-normal	2.47		7.81	se acepta
Gumbel	**9.34**		**7.81**	***se rechaza***
Pearson	1.98	2	5.99	se acepta

Tabla 2.8.- Aprobación de hipótesis

b) Prueba Kolmogorov - Smirnov

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_0(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$ con un valor crítico *d* que depende del número de datos y del nivel de significancia seleccionado (tabla 2 del apéndice B)

Se acepta la Hipótesis (H_o), si se cumple la siguiente restricción:

$$D < d(n, \alpha)$$

Siendo

n: Número de datos, 8

α : Nivel de significancia, 0.05

La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$F_0(x_m) = 1 - \frac{m}{m+1} \qquad \text{ec. 2.9}$$

Siendo

m: Número de orden de los datos

X_m: Datos de precipitación de mayor a menor

N: Número total de datos

En la columna (2) de la tabla 2.9 se han escrito las precipitaciones máximas anuales ordenadas en forma decreciente, en la siguiente se muestran los valores de la función de distribución de probabilidad observada obtenidas al evaluar la ecuación 2.9. En las columnas (4), (6), (8) y (10) se presentan los valores de $F(x_m)$ calculados con las cinco funciones de distribución teórica vista anteriormente y en las columnas (5), (7), (9) y (11) se muestran los valores absolutos de las diferencias entre $F_0(x_m)$ y $F(x_m)$.

tabla 2.9.- Parametro estadistico

Tabla 2.9.- Parámetro estadístico

Se ha sombreado el valor de *D* para cada función de distribución en la tabla 2.10. Como se puede observar, según esta prueba se aceptarían todas las funciones de distribución consideradas para un nivel de significancia α = 0.05, para el cual el valor crítico *d* es 0.43 con n = 8 (tabla 3, apéndice B). La función distribución con el menor valor de *D* es la Gumbel por lo que, según esta prueba, esta seria la preferible (tabla 2.10).

Aprobación de Hipótesis			
Función de Distribución	**D**	***d***	**Ho**
Normal	0.1871	0.43	Se acepta
Log-normal	0.1214	0.43	Se acepta
Pearson	0.1103	0.43	Se acepta
Gumbel	**0.1040**	**0.43**	Se acepta

Tabla 2.10.- Calificación de las distribuciones usadas

En la tabla 2.11 se resumen los resultados de las pruebas de bondad del ajuste y se califican las funciones según el orden de preferencia indicado por cada prueba, dado 1 a la “mejor” y 4 a la “peor”. De estos resultados se concluye que la mejor función que se ajusta a los datos de precipitación es la Pearson tipo III.

Selección de la función de Distribución		
Función de Distribución	**X2**	**Kolmogorov**
Normal	3	4
Log-normal	2	3
Pearson	**1**	**2**
Gumbel	se rechaza	1

Tabla 2.11.- Función Pearson tipo III mejor ajustada

2.1.3. Cálculo del periodo de retorno

Una vez seleccionada la función de distribución que mejor se aplica a la muestra, la Pearson tipo III, procedemos a calcular el periodo de retorno.

Este cálculo consiste en determinar el factor de frecuencia a través de ciertas expresiones matemáticas las cuales relacionan las medidas descriptivas de una muestra con la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo seleccionado [X_T]. Cuyo valor corresponde a la precipitación del 13 de diciembre de 1997 seleccionada por presentarse en uno de los fenómenos de “El Niño” con mejor registro pluviográfico.

Primero se determina el factor de frecuencia de la precipitación través de una aproximación que relaciona la media y la desviación estándar muestral.

$$K_T = \frac{X_T - \bar{x}}{s} \qquad \text{ec. 2.10}$$

Donde:

s: Desviación estándar de la muestra

$\bar{x}$: Media de la muestra

X_T: Variable aleatoria (máxima precipitación)

K_T: Factor de frecuencia.

Luego se realiza un tanteo hasta alcanzar el factor de frecuencia antes calculado por medio de las ecuaciones desarrolladas por Kite (1977)

Este tanteo se inicia evaluando la ecuación 2.11 para obtener el factor *k* a través del coeficiente de asimetría de la muestra

$$k = C_S / 6 \qquad \text{ec. 2.11}$$

En seguida se calcula el valor *z* correspondiente a una probabilidad de excedencia *p* a través de la ecuación 2.12 que asocia una variable intermedia *w*

$$z = w - \frac{2.51557 + 0.802853\, w + 0.010328\, w^2}{1 + 1.432788\, w + 0.189269\, w^2 + 0.001308\, w^3} \qquad \text{ec. 2.12}$$

Donde;

$$w = \left[\ln\left(\frac{1}{p^2} \right) \right]^{1/2}; \; p = 1/T \qquad \text{ec. 2.13}$$

Siendo

w: Variable intermedia

p: Probabilidad de excedencia

T: Periodo de retorno (años)

Sustituyendo *z* y *k* en la ecuación 2.14 obtenemos el factor de frecuencia K_T.

$$K_T = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 - zk^4 + \frac{1}{3}k^5 \qquad \text{ec. 2.14}$$

Siendo:

K_T: Factor de frecuencia

z: Variable normal estándar

k: Factor adimensional

T: Periodo de retorno (años)

En la tabla 2.12 consta el periodo de retorno obtenido de la evaluación de las ecuaciones antes descritas

Resultados	
FACTOR DE FRECUENCIA[k_T]	**1,1380**
PERIODO DE RETORNO	**8,59 años**

Tabla 2.12.- Periodo de retorno de la lluvia de Diciembre 13 de 1997

2.2. Análisis de intensidades máximas.

Las metodologías para el cálculo de la escorrentía en cuenca de estudios utilizan las intensidades con que se precipitan las lluvias en cierto sector. Como ya se conoce, la selección de una intensidad de diseño no corresponde al criterio de una sola persona, por tanto es necesario realizar un análisis a las máximas intensidades registradas para posteriormente extrapolarlas utilizando métodos estadísticos.

El primer paso para diseñar gráfica y analíticamente las curvas IDT, es identificar la serie de datos con la que se pretende trabajar.

Si se busca eventos con probabilidades mayores de 0.2 ($T \geq 5$ años), se recomienda utilizar un serie de datos compuestas de valores máximos anuales o sea tomando el mayor evento de cada año, si se desea conocer eventos que ocurren con mayor frecuencia, es mejor analizar una serie compuesta por valores que se encuentren por encima de algún valor base pre-seleccionado, de tal manera que no se escojan mas de dos o tres eventos cada año.

La estación “Radio Sonda” consta de un pluviografo que registra continuamente la variación de la lluvia con el tiempo. Esta información es captada en fajas pluviográficas que permiten al observador procesar el evento lluvioso en periodos mínimos de 10 minutos y máximos de 24 horas, como se muestra en la figura 2.1 del apéndice B.

Las intensidades de las precipitaciones provienen de pluviogramas que registra la precipitación acumulada a lo largo del tiempo.

De esas gráficas se puede obtener para diversas duraciones, las máximas intensidades ocurridas en una lluvia. Durante los meses de marzo, abril, noviembre y diciembre de 1997, se presentaron los mejores eventos hidrológicos, por lo cual se hizo el análisis de intensidades de estas fajas(apéndice B) para 10, 20, 30 minutos, y de 1 y 2 horas de duración, los mismos se presentan a continuación:

Intensidad máxima (mm./h)							
MARZO	DURACION					FECHA	HORA
	10 min.	20 min.	30 min.	1 hora	2 Hora		
ALTURA MAX (min.)	10	17	24	41,8	51,4	4 de Marzo de 1997	07H50
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	60	51	48	41,8	25,7		
ALTURA MAX (min.)	9,1	15,3	21,3	39,7	57,9	15 de Marzo de 1997	18H00
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	54,6	45,9	42,6	39,7	28,95		
ALTURA MAX (min.)	7	12	15,3	18,7	18,9	19 de Marzo de 1997	16H20
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	42	36	30,6	18,7	9,45		
ALTURA MAX (min.)	15,5	27	34,5	65	111,8	**25 de Marzo de 1997**	**02H00**
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	**93**	**81**	**69**	**65**	**55,9**		

Tabla 2.13.- Máximas intensidades registradas en de marzo de 1997-Radio Sonda

Intensidad máxima (mm./h)							
ABRIL	DURACION					FECHA	HORA
	10 min.	20 min.	30 min.	1 hora	2 hora		
ALTURA MAX (min.)	4,7	7,6	8,5	9,3	0	12 de Abril de 1997	16h30
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	28,2	22,8	17	9,3	0		
ALTURA MAX (min.)	5,9	1,5	2,1	2,4	3,4	13 - 14 de Abril de 1997	19h05
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	35,4	4,5	4,2	2,4	1,7		
ALTURA MAX (min.)	2,6	4,6	4,7	4,7	5,9	14 – 15 de Abril de 1997	19h50
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	15,6	13,8	9,4	4,7	2,95		
ALTURA MAX (min.)	7	12,5	14,9	16,2	19,3	**17 de Abril de 1997**	**19h28**
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	**42**	**37,5**	**29,8**	**16,2**	**9,65**		
ALTURA MAX (min.)	4,3	6,3	7,5	11,1	19,9	18 – 19 de Abril de 1997	19h00
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	25,8	18,9	15	11,1	9,95		
ALTURA MAX (min.)	3,4	6,6	9,2	13,3	18	21 de Abril de 1997	01h10
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	20,4	19,8	18,4	13,3	9		
ALTURA MAX (min.)	2,5	4,2	5	8,5	12,9	21 de Abril de 1997	21h00
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	15	12,6	10	8,5	6,45		
ALTURA MAX (min.)	6,5	9,5	10,9	20,7	24,2	28 de Abril de 1997	18h30
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	39	28,5	21,8	20,7	12,1		
ALTURA MAX (min.)	3,8	4,3	4,4	5,3	6	30 de Abril de 1997	18h00
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	22,8	12,9	8,8	5,3	3		

Tabla 2.14.- Máximas intensidades registradas en abril de 1997-Radio Sonda

NOVIEMBRE	Intensidad máxima (mm./h) DURACION 10 min.	20 min.	30 min.	1 hora	2 hora	FECHA	HORA
ALTURA MAX (min.)	6,5	10	13,4	17,9	24,4	11 de Noviembre de 1997	05H00
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	39	30	26,8	17,9	12,2		
ALTURA MAX (min.)	11	22	29	36,4	0	14 de Noviembre de 1997	19h30
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	66	66	58	36,4	0		
ALTURA MAX (min.)	11,5	22	26,8	32,7	34,5	**17 de Noviembre de 1997**	**17H00**
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	**69**	**66**	**53,6**	**32,7**	**17,25**		
ALTURA MAX (min.)	9,8	15	19,9	34,7	63,8	23 – 24 de Nov de 1997	17H20
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	58,8	45	39,8	34,7	31,9		

Tabla 2.15.- Máximas intensidades registradas en noviembre de 1997-Radio Sonda

DICIEMBRE	Intensidad máxima (mm./h) DURACION 10 min.	20 min.	30 min.	1 hora	2 hora	FECHA	HORA
ALTURA MAX (min.)	6,1	9,2	12,5	23	32,8	4 de Dic de 1997	15h00
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	36,6	27,6	25	23	16,4		
ALTURA MAX (min.)	6	11,2	14,7	24	30,7	8 - 9 de Dic de 1997	16h00
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	36	33,6	29,4	24	15,35		
ALTURA MAX (min.)	13	24,8	33	46,8	61,7	10 – 11 de Dic de 1997	22h30
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	78	74,4	66	46,8	30,85		
ALTURA MAX (min.)	19,5	34,5	48	80	130,5	**13 - 14 de Dic de 1997**	**21h40**
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	**117**	**103,5**	**96**	**80**	**65,25**		
ALTURA MAX (min.)	8	9,5	10,1	10,2	11,1	21 - 22 de Dic de 1997	19h30
INTENSIDAD MAX (mm/hora)	48	28,5	20,2	10,2	5,55		

Tabla 2.16.- Máximas intensidades registradas en diciembre de 1997-Radio Sonda

En cada tabla se resalta el evento mas intenso del mes, sin embargo la precipitación que se presento el 14 de diciembre de 1997, fue la lluvia con mayor intensidad suscitada ese año ya que alcanzo los 117 mm/h durante 10 minutos.

Este proceso de selección se toma como patrón para obtener un conjunto de datos compuesto por las mayores intensidades anuales caídas en un sector.

2.3. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia(IDF)

La intensidad de la lluvia se la define como la cantidad de agua que cae, en un punto, por unidad de tiempo, y es inversamente proporcional a la duración de la tormenta. La duración de la tormenta es el tiempo que transcurre desde que inicia la precipitación de la tormenta hasta que esta cesa.

Willems (2000) define las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) como la relación que existe entre la intensidad de precipitación media y la frecuencia de ocurrencia (inverso del periodo de retorno); estas curvas son herramientas ampliamente utilizadas en ingeniería para fines de plantación, diseños y operación de los proyectos hidráulicos, así como la protección de obras de ingeniería contra avenidas máximas.

Existen básicamente dos formas de expresar la relación IDT para un sitio dado, la primera a través de curvas y la segunda a través de modelos matemáticos

Para la construcción de las curvas se plantean dos métodos, uno conocido como *intensidad - periodo de retorno*, el cual relaciona estas dos variables para cada duración por separado mediante algunas de las funciones de distribución de probabilidad usada en hidrología.

Estas familias de distribuciones probabilísticas se someten a pruebas de bondad, para determinar cual de ellas se aplica de mejor manera a la serie de valores pluviográficos.

El segundo método relaciona simultáneamente las tres variables en una familia de curvas cuya ecuación es:

$$\mathrm{i} = \frac{k \times T^{m}}{(d + c)^{n}} \qquad \text{ec. 2.7}$$

Donde k, m, n y c son constante que se calcula mediante un análisis de correlación lineal múltiple.

$$\log \mathrm{i} = \log k + m \log T - n \log(d + C) \qquad \text{ec. 2.8}$$

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \qquad \text{ec. 2.9}$$

Modelos matemáticos para las curvas (IDF).

Las curvas intensidad, duración y frecuencia también pueden expresarse como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de diseño, en una grafica (Chow et al., 1994). A continuación se presentan los modelos matemáticos mas conocidos, a nivel mundial, que se utilizan para estimar las curvas IDF.

Ecuación que relaciona la intensidad de la lluvia con la duración de la tormenta.		
Autor	**Modelo**	**Características**
Ponce(1989)	$i = \dfrac{\lambda}{(d+\theta)^{\eta}}$	Siendo n < 1

Tabla 2.17.- Modelos matemáticos que relaciona la intensidad-duración

Nota: Los valores de λ y θ se determinan por análisis de regresión

Ecuaciones que relacionan la intensidad de la lluvia de una tormenta con la duración y frecuencia de ocurrencia de esta.		
Autor	**Modelo**	**Aplicación**
Bernard (1932).	$i = \dfrac{\lambda \times T^{\psi}}{d^{\eta}}$	
Sherman (1931)	$i = \dfrac{\lambda \times T^{\psi}}{(d+\theta)^{\eta}}$	Boston-Massachussets-USA
Wenzel (1982).	$i = \dfrac{\lambda}{d^{\eta}+\theta}$	Varias ciudades de los Estados Unidos
Chow et al. (1994),	$i = \dfrac{\lambda \times T^{\psi}}{d^{\eta}+\theta}$	Varias ciudades de los Estados Unidos
Koutsoyiannis et al. (1998).	$i = \lambda \left\{ \dfrac{\psi - \ln\left[-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right]}{(d+\theta)^{\eta}} \right\}$	Atenas- Grecia

Tabla 2.18.-Modelos que relacionan la intensidad-duración-frecuencia

Nota: Los valores de λ, Ψ, η y θ se estiman por aproximaciones sucesivas cuando se ajusta cada modelo.

Diversas publicaciones donde se resalta la ecuación de lluvia, como el producto del análisis de los máximos eventos registrados en una estación, indican que el modelo matemático propuesto por Ponce, no es recomendable debido a que solo se aplica a un 50% de la muestra, mientras que las ecuaciones que relacionan las tres variables muestran un buen ajuste al punto que absorben el 90% de los datos en el peor de los casos.

La Empresa Municipal de Alcantarillado de Guayaquil, EMAG elaboro dos ecuaciones de lluvia para su plan de manejo de aguas servidas. La primera contempla los datos lluviosos de los años 1951 a 1981 mientras que la segunda incluye el registro de la estación invernal 82-83, que fue extremadamente lluviosa debido a la presencia del fenómeno El Niño. Este incremento de datos hizo variar los coeficientes de la ecuación, difiriendo la intensidad de la lluvia en el $\pm 1\%$. Mas tarde el IIFIUC presento un trabajo donde obtuvo nuevas ecuaciones pluviométricas utilizando la distribución de frecuencia de Gumbel para el ajuste de datos que incluían lluvias intensas hasta el año 1998. En la siguiente tabla se presenta las tres ecuaciones obtenidas por la EMAG y el IIFIUC respectivamente para un periodo de retorno de 10 años.

Ecuaciones Pluviométricas		
Entidad Proponente	**Ecuación**	**Datos**
EMAG 1	$i = \dfrac{771.56}{\left(+16\right)^{0.56}}$	1951-1981
EMAG 2	$i = \dfrac{853.5}{\left(+15\right)^{0.6}}$	1951-1987
IIFIUC	$i = -37.509 \ln\left({}_{C}\right) + 237.62$	1951-1998

Tabla 2.19.-Ecuaciones obtenidas por la EMAG y la IIFIUC

INDICE

INDICE DE TABLA

Análisis de resultado

En el capitulo correspondiente al análisis de estadísticos de datos se ajusto la muestra compuesta de las máximas precipitaciones diarias anuales, en este estudio se determino que la distribución que mejor se aplicaba a los datos era la distribución de probabilidad Pearson tipo III, sin embargo se utilizo varias funciones para hallar el periodo de retorno de la lluvia del 13 de Diciembre para comparar los resultados y cuantificar la variación. La tabla 2.14 resume el periodo de retorno obtenido de la evaluación de cada distribución.

Resumen	
Distribución	**Periodo de Retorno**
Gumbel Tipo I	8,18
Normal	7,84
Log-Normal	7,99
Pearson Tipo III	8,59
Log-Pearson Tipo III	8,52

Tabla 2.14.- Periodo de retorno usando distintas distribuciones

Del procesamiento de las fajas pluviográficas con mejor registro del año 1997, se obtuvo la mayor intensidad de

Intensidad de lluvia (F=10 años)					
CUENCA	Tiempo de concentración	EMAG 1	EMAG 2	IIFIUC	Registro Diciembre 13 de 1997
	Minutos	$i = \frac{771.56}{(t+16)^{0.56}}$	$i = \frac{853.5}{(t+15)^{0.6}}$	$i = -37.509 \ln(t_c) + 237.62$	
#1	4.74	138.79	142.56	150.07	117
#2	13.37	114.22	114.68	117.19	117
#3	16.21	108.47	108.30	111.09	117

Intensidad de Lluvia (F = 10 AÑOS)					
Cuenca	**Tiempo de Concentración**	**EMAG 1**	**EMAG 2**	**IIFIUC**	**Registro - Dic 13 de 1997**
		$i = \frac{771.56}{(+16)^{0.56}}$	$i = \frac{853.5}{(+15)^{0.6}}$	$i = -37.509 \ln (_C) + 237.62$	
	Minutos				
#1	4.74	138.79	142.56	150.07	117
#2	13.37	114.22	114.68	117.19	117
#3	16.21	108.47	108.30	111.09	117