

## ANEXO 4.1.4-1 DEFINICIONES Y METODOLOGÍAS EMPLEADAS

### 1. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración es uno de los principales parámetros de cuenca que representa el tiempo de respuesta de un sistema de escurrimiento de lluvias. La precisión de la estimación del volumen máximo de descarga o hidrograma es sensible a la exactitud del tiempo de concentración. Existen comúnmente modelos empíricos para estimar el tiempo de concentración que toman en cuenta factores como área y pendiente. Una de las fórmulas más aplicadas, es la fórmula de Kirpich definido para pendientes empinadas de 3 a 10%.

Sin embargo, para el caso nuestro, las cuencas se tratan de superficies casi planas con cobertura vegetal muy significativa. Por lo tanto aplicar algunas de las fórmulas comunes donde no se tome en cuenta el tipo de cubierta, no son representativos de la realidad.

Dentro de las fórmulas existentes, la fórmula de Hathaway toma en cuenta la rugosidad en función de la vegetación. Por lo tanto, según el criterio anteriormente descrito aplicaremos la siguiente fórmula:

$$T_c = 0.606 \frac{(Ln)^{0.467}}{S^{0.234}}$$

donde:

- T<sub>c</sub> = Tiempo de concentración en horas.
- L = Longitud del cauce en km.
- S = Pendiente en m/m.
- n = rugosidad en función de la vegetación (Ver Cuadro 1)

Según el Cuadro 1, se puede adoptar para el caso de los ríos de la Selva, el valor de rugosidad de 0,60.

**Cuadro 1** Valores de rugosidad en función de la vegetación – Fórmula de Hathaway

Tipo de superficie	Valor de n
Suelo liso impermeable	0,02
Suelo desnudo	0,10
Pastos pobres, cultivos en hileras o suelo desnudo algo rugoso	0,20
Pastizales	0,40
Bosques de frondosas	0,60
Bosque de coníferas, o de frondosas con una capa densa de residuos orgánicos o de césped.	0,80

En el Cuadro 2 se muestran los resultados para las subcuencas de interés. Se ha aplicado el programa SMADA en el cálculo del tiempo de concentración.

Cuadro 2 Tiempo de concentración para cuencas

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud (km)	S (m/km)	Tiempo de concentración (hr)
				Hathaway
Capirona	1340,99	95,00	0,38	25,28
Copalyacu	2531,71	110,00	0,45	26,02
Patayacu	960,60	109,88	0,20	31,44
Qda. Hormiga	741,59	80,85	0,20	27,25
Pucayacu	1108,42	119,02	0,20	32,64
Chambira-s	2032,09	203,66	0,25	39,81
Tigrillo	1590,70	176,40	0,23	37,96
Otras quebradas	99,01	9,27	0,10	11,65

## 2. CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS

### MÉTODO DE TURC

Turc (Remenieras, 1974), adaptó a la familia de las curvas  $D = f(P, T)$ , la expresión siguiente, que fue establecida a partir de las observaciones hechas en 254 cuencas situadas en todos los climas del planeta:

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

L, que es el parámetro heliotérmico, tiene la expresión:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Donde:

- P = Precipitación medio anual, en mm;
- D = Déficit de escorrentía, en mm;
- T = Temperatura media anual, en °C;
- L = Parámetro heliotérmico, en mm;

T (CASTANY, 1975) se puede reemplazar por la temperatura corregida,  $T_p$ :

$$T_p = (P_1 * T_1 + P_2 * T_2 + \dots + P_{12} * T_{12}) / (P_1 + P_2 + \dots + P_{12})$$

En donde:

- $P_1 - P_{12}$  = Precipitación total mes 1 a mes 12
- $T_1 - T_{12}$  = Temperatura media mes 1 a mes 12

## MÉTODO DE COUTAGNE

Refiere REMENIERAS (1974) que el método de Coutagne, como el de Turc, se sustenta en formulas que dan el déficit de escurrimiento,  $D$ , en función de las precipitaciones y de la temperatura, es decir:  $D = f(P, T)$ .

Entonces, el déficit de escurrimiento  $D$  (m), por el método de Coutagne se deduce de la altura media anual de las precipitaciones  $P$  (m) y de la temperatura media anual  $T$  (°C), en la formula siguiente:

$$D = P - \lambda + P^2$$

Donde:

$P$  = Precipitación medio anual, en mm;

$D$  = Déficit de escurrimiento, en mm;

$\lambda$ , es un parámetro dependiente de la temperatura media ( $T$ ) y es igual a:

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 * T}$$

Esta fórmula no es aplicable más que para  $P$  comprendido entre los siguientes valores:

$$\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$$

Si las precipitaciones fueran inferiores a  $1/(8*\lambda)$  el déficit de escurrimiento,  $D$ , es igual a las precipitaciones y no habría escurrimiento; caso contrario, si las precipitaciones fueran superiores a  $1/(2*\lambda)$ , el déficit de escurrimiento,  $D$ , es prácticamente independiente de  $P$  y estaría dado por la fórmula siguiente

$$D = 0.20 + 0.035 * T$$

La altura de “la lamina de agua escurrida” anualmente,  $Q$ , tendría la siguiente expresión:

$$Q = P - D = \lambda * P^2$$

Efectivamente, se admite a menudo en la práctica que (REMENIERAS, 1974), en climas lluviosos el caudal medio anual de una cuenca varia a grosso modo el cuadrado del módulo pluviométrico; ello es equivalente a despreciar las variaciones de  $D$  en función de  $T$ .

## MÉTODO DE BECERRIL

El método de Becerril (HERAS, 1983 Y TRAGSA, 1994), permite obtener directamente la aportación anual y se suele en proyectos sin información históricas de caudales. La fórmula propuesta es la siguiente:

$$Q = \beta \frac{P^{1.54}}{1000}$$

En la cual:

- Q = aportación de la cuenca (MMC);
- P = precipitación anual, en mm;
- A = superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>);
- B = coeficiente que define el tipo de escorrentía (ver valores en el Cuadro 3).

**Cuadro 3** Valores para el coeficiente b de becerril

Fuente	REGIONES				
	Muy secas	Secas	Medianamente húmedas	Lluviosas	Muy lluviosas
Heras, 1983	0,003 – 0,008	0,008 a 0,011	0,011 a 0,015	0,015 a 0,018	0,018 a 0,025
Tragsa, 1994	0,007	0,010	0,012 a 0,014	0,013 a 0,016	0,018 a 0,020

### MÉTODO DE KELER

El método de Keler (TRAGSA, 1994), se expresa mediante la siguiente ecuación, aplicable para la condición  $P \geq 500$  mm:

$$C = \alpha - \left(\frac{\beta}{P}\right)$$

Además, el caudal Q es igual a:

$$Q = C * P * A$$

Siendo:

- P = Precipitación media anual o módulo pluviométrico (mm)
- C = Coeficiente de escorrentía;
- $\alpha$  y  $\beta$  = Coeficiente relacionados a la cuenca y a la precipitación.
- Q = Caudal en función del coeficiente de escorrentía, la precipitación y el área

El valor de  $\alpha$  oscila entre 0,88 y 1,00; para cuencas con torrenciales se aconseja emplear el valor máximo.

El valor de  $\beta$  oscila entre 350 y 460; para cuencas con torrenciales se aconseja emplear el mínimo valor.

### MÉTODO DE NADAL

Nadal, propone el cálculo del coeficiente de escorrentía, C (TRAGSA, 1994), con la siguiente expresión empírica:

$$C = 0.25 * K_1 * K_2 * K_3$$

Donde:

- K<sub>1</sub> = Factor de la extensión de la cuenca;
- K<sub>2</sub> = Factor de la precipitación anual;

$K_3$  = Factor de pendiente y la permeabilidad del suelo:

Los factores  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , se obtiene del Cuadro 4.

**Cuadro 4** Factores característicos  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$

Área		Precipitación Característica de la Cuenca		Características de la Cuenca $k_3$
km <sup>2</sup>	$K_1$	mm	$K_2$	
10	2,60	200	0,25	Llana y permeable 0,5 0,7
20	2,45	300	0,50	
40	2,15	400	0,75	
100	1,80	500	1,00	Ondulada 0,70 – 1,20
200	1,70	600	1,10	
500	1,40	700	1,17	Montañosa e impermeable 1,20 1,50
1 000	1,30	800	1,25	
5 000	1,00	900	1,32	
10 000	0,90	1,000	1,40	
20 000	,87	2,000	1,50	

Fuente: TRAGSA (1994)

### 3. PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS

En la zona de estudio no existe información hidrométrica, evaluándose la información de la precipitación máxima en 24 horas ( $P_{24}$ ). Para el presente estudio, se toma como referencia la estación de Teniente López, cuyas coordenadas son Longitud  $76^{\circ}13'$  Oeste y Latitud  $2^{\circ}32'$  Sur, con una altitud media de 280 msnm. Para determinar los valores de descargas máximas en las cuencas analizadas se ha tomado esta estación por encontrarse en directa influencia con la cuenca del corrientes y también porque no todas las estaciones tienen este tipo de registro horario.

La estación Teniente López presenta un registro de 22 años (desde 1965-73/75-80 y 1989-95). En la Cuadro 5 se muestran los valores de las precipitaciones máximas diarias.

La metodología consiste en ajustar la serie de tiempo a una función de probabilidad conocida. A nuestro criterio, para el caso de la zona de Selva Baja, con períodos muy lluviosos, se toma como referencia la distribución de Gumbel Tipo I o de Valor Extremo.

**Cuadro 5** Precipitación máxima en 24 horas de la estación Teniente López

Año	$P_{24}$ (mm)	Año	$P_{24}$ (mm)
1965	69,6	1977	90,6
1966	70,5	1978	83,0
1967	90,5	1979	63,3
1968	70,9	1980	93,9
1969	70,3	1989	61,0
1970	75,0	1990	54,0
1971	81,0	1991	100,0
1972	87,0	1992	71,0
1973	100,0	1993	80,0

Año	P24 (mm)	Año	P24 (mm)
1975	105,5	1994	41,0
1976	88,7	1995	50,5

Fuente: Senamhi

Los parámetros estadísticos de la muestra son los siguientes:

Número de datos	= 22
Mínimo	= 41,0
Máximo	= 106
Promedio	= 77,1
Desviación estándar	= 16,9
Mediana	= 77,5
Coficiente de variación (Cv)	= 0,219
Coficiente de Asimetría (Cs)	= 0,303
Coficiente de curtosis (Ck)	= 2,21

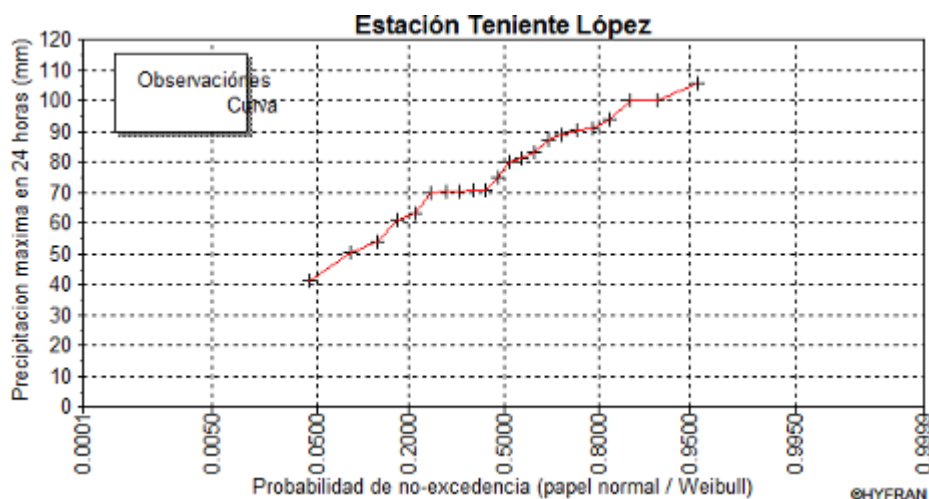
Para la determinación de las distribuciones de probabilidad se empleó el modelo HYFRAN (Hydrologic Frequency Anlysis). HYFRAN ha sido desarrollado en el Instituto Nacional de Investigación Científica – Agua, Tierra y Medioambiente (INRS-ETE) de la Universidad de Québec con el patrocinio de Hydro-Québec.

HYFRAN es un software que permite ajustar datos a leyes estadísticas incluyendo un juego de instrumentos matemáticos, poderosos, accesibles y flexibles que permiten en particular el análisis estadístico de eventos extremos y de manera más general el análisis estadístico de serie de datos.

El modelo HYFRAN tiene entre sus leyes de probabilidad, la Familia Gamma (Gamma, Gamma generalizada, Pearson tipo III, Gamma inversa, Log-Pearson tipo III). Otras distribuciones (Exponencial, Normal, Gumbel, Lognormal 2 o 3 parámetros, Weibull, Ley generalizado por los valores extremos (GEV)), y distribuciones mixtas (Lognormal y Weibull modificadas).

De los datos originales se puede obtener la distribución de probabilidad de no-excedencia versus precipitación (Figura 1). La fórmula de probabilidad empírica utilizada fue la de Weibull.

Figura 1 Distribución de probabilidad de no-excedencia – Estación Teniente López



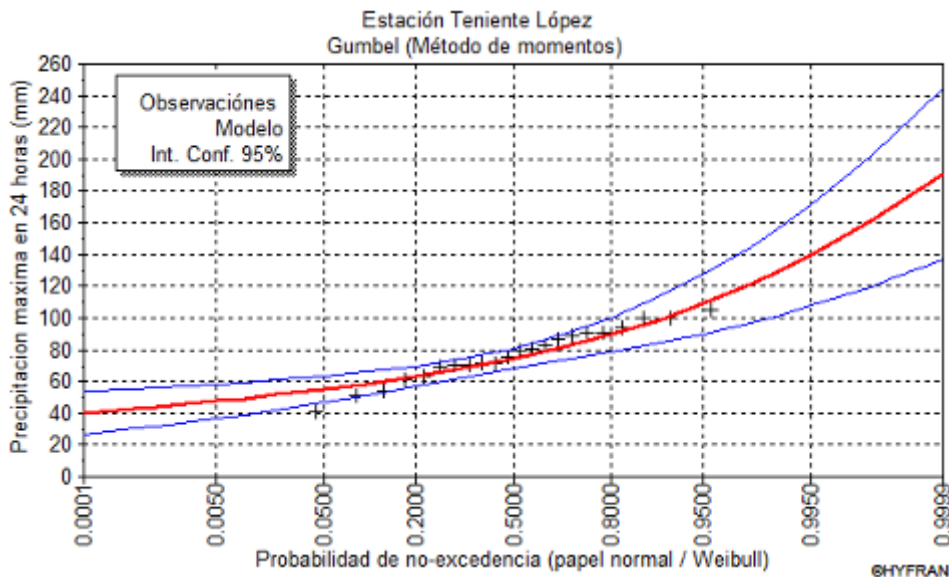
Luego se procedió a realizar un análisis de frecuencia, a través de la Distribución Gumbel Tipo I. Esta distribución es también llamada Valor extremo Tipo I basado en datos extremos máximos. La función densidad de probabilidad para la distribución del valor extremo tipo I es:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\mu}{\alpha}\right] \exp\left[-\frac{x-\mu}{\alpha}\right]$$

Donde  $\alpha$ : es el parámetro de escala, y  $\mu$ : es el parámetro de posición, llamado también valor central o moda. De los resultados del programa HYFRAN, los parámetros de la función Gumbel son:  $\mu = 69.536$  y  $\alpha = 13.1908$ .

En la Figura 2 se muestra los datos analizados y la función de probabilidad para un intervalo de confianza de 95% de probabilidad.

Figura 2 Distribución Gumbel (máxima verosimilitud)



En el Cuadro 6 se muestra un resumen de las precipitaciones máximas en 24 horas para los distintos períodos de retorno en años.

Cuadro 6 Precipitación máxima esperada correspondiente al Tiempo de retorno (Tr)

Período de retorno (años)	P24 (mm)
2	74,4
10	99,2
20	109
50	121
100	130
200	139
500	151

## APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS

Según la literatura, para la determinación de descargas máximas en cuencas medianas, se toma como referencia el *Método del Hidrograma Unitario*.

Se empleó el programa HEC – HMS *Hydrologic Modeling System*, Version 3.0.1, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos donde se utilizó las siguientes opciones:

Determinación de la infiltración usando el método de la Curva Número (CN) del Soil Conservation Service, NRCS (Servicio de Conservación Recursos Naturales de los Estados Unidos, ex SCS). Este método conceptual establece que la cuenca tiene una determinada capacidad de almacenamiento de lluvia acumulada. El número de curva, CN, describe la capacidad de infiltración del suelo en base al tipo hidrológico de suelo (A, B, C y D) y el tipo de cobertura vegetal. Para determinar CN se usaron los Cuadros 7 y 8.

Para hallar la distribución de la precipitación en el tiempo y por ende, las intensidades, se empleó una distribución Tipo III del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de Los Estados Unidos. Esta distribución de precipitación se utiliza en zonas costeras del Atlántico, donde las tormentas tropicales producen lluvias de 24 horas muy grandes.

Cuadro 7 Grupo hidrológico del Suelo

Grupo	Velocidad de infiltración mm/h	Suelos
A	7,6 – 11,5	Estratos de arena profundos
B	3,8 – 7,6	Arena – limosa
C	1,3 – 3,8	Limos arcillosos, arenas limosas poco profundas
D	0,0 – 1,3	Suelos expansibles en condiciones de humedad, arcillas de alta plasticidad

Fuente: Hidrología Aplicada. Chow Ven Te, 1994

Cuadro 8: Número de curva de Escorrentía

Cobertura	A	B	C	D
Áreas irrigadas	65	75	85	90
Pastos	40	60	75	80
Cuencas forestadas	35	55	70	80
Cuencas desforestadas	45	65	80	85
Áreas pavimentadas	75	85	90	95

Fuente: Hidrología Aplicada. Chow Ven Te, 1994

Según los estudios de calicatas realizadas en campo, se puede resumir que el material predominante es aluvial antiguo conformado por arcillas grises y variaciones en sus diferentes horizontes. Suelo de textura franco arcillosa, color pardo grisáceo muy oscuro a pardo en húmedo, estructura granular medio débil a masivo. Por lo dicho anteriormente podemos clasificarlo como del tipo de suelo B y C por la presencia de arcillas.

Además del mapa de capacidad de uso mayor de las tierras del Perú realizado por la ONERN en 1981, se puede extraer que las tierras son en su mayor parte aptas para la producción forestal que involucra, áreas de colinas bajas y terrazas bajas-medias con suelos de drenaje imperfecto e inundables. De los Cuadros 7 y 8, podemos concluir que el valor de CN pertenece a un rango de aplicación de 55 a 70 para cuencas forestadas.

Los parámetros para la simulación con el HEC-HMS se dividen en 3 grandes módulos: *Modelo de Cuenca* (donde se introduce el área, la CN y el tiempo de retardo), el *Modelo de Lluvia* (donde se introduce la P24 y la tormenta hipotética del tipo III), y el *Control de Especificaciones* (donde se indica el tiempo de simulación y su intervalo).

En los cuadros 9 y 10 se muestran los resultados del modelo HEC-HMS, con valores de CN de 65 y 60 para las subcuencas que pertenecen a Corrientes y Chambira respectivamente.

Una característica principal de los hidrogramas producidos para estas cuencas, es su gran volumen de agua con una onda bastante amplia producido por un evento extremo.

**Cuadro 9** Caudales simulados HEC-HMS – Cuenca río Corrientes y Chambira

Cuencas	Caudal (m3/s)		
	10 años	50 años	100 años
Corrientes	1323,8	2036,4	2354,7
Chambira	979,8	1594,5	1875,0

**Cuadro 10** Caudales simulados HEC-HMS – Subcuencas

Subcuencas	Caudal (m3/s)		
	10 años	50 años	100 años
Capirona	405,4	624,8	723,3
Copalyacu	747,9	1154,4	1336,0
Patayacu	177,7	289,5	340,5
Qda. Hormiga	154,5	252,4	297,1
Pucayacu	198,5	323,9	381,2
Chambira-s	305,5	497,4	585,0
Tigrillo	249,4	406,1	477,6
Otras quebradas	52,7	82,0	95,1