

**DETERMINACIÓN DE CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDAL PARA CUENCAS  
INTERMITENTES**

Trabajo para optar por el grado de ingeniero civil

POR: Carlos Augusto Marín Villegas  
200522366

25 de Enero de 2011

Universidad de los Andes

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>ALCANCE.....</b>	<b>7</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DE MODELOS .....</b>	<b>8</b>
Modelo regional basado en la teoría de la probabilidad total, para cuencas intermitentes en Portugal. ....	8
Método por índice estocástico: .....	16
Determinación de FDC mediante datos cualitativos y entrevistas .....	20
Entrevista semiestructurada.....	22
<b>2. CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>24</b>
<b>3. IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
Determinación de FDC por medio de datos de estaciones.....	28
Determinación de FDC mediante datos cualitativos y entrevistas .....	32
Determinación de FDC mediante el uso de información de precipitación .....	42
Relación precipitación- escorrentía y método racional.....	42
Curvas de duración de precipitación .....	45
Método de curvas de duración de precipitación de Karen Croker .....	49
<b>4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>61</b>

## INDICE DE FIGURAS

	Pagina
Figura 1.1 FDC para los flujos de no cero	9
Figura 1.2 porcentaje de tiempo de descarga vs. flujo estandarizado	11
Figura 1.3 Porcentaje de tiempo excedido vs. Flujo estandarizado	12
Figura 1.4 FDC estimadas y observadas para cunecas perennes y efimeras	13
Figura 2.1 Río Calandaima	22
Figura 2.2 Mapa de suelos Cundinamarca	23
Figura 3.1 Curvas de duración estaciones de flujo	26
Figura 3.2 Tipos de curvas de duración	27
Figura 3.3 Curvas de duración de caudal anuales estación 2120893	29
Figura 3.4 Curvas de duración de caudal anuales histórica estación 2120893	30
Figura 3.5 diagrama de flujo preguntas	31
Figura 3.6 Curva de duración primera aproximación método cualitativo	33
Figura 3.7 Curva de duración segunda aproximación método cualitativo	35
Figura 3.8 Segunda aproximación y curva de duración calculada	35
Figura 3.8 perfil río	36
Figura 3.9 parte central curvas de duración estaciones hidrológicas	38
Figura 3.10 curva de duración calculada estación 2120929	39
Figura 3.11 Segunda aproximación curva duración ejes Log- Log	40
Figura 3.12 Hidrograma triangular	43
Figura 3.13 Curvas de duración para precipitación	44
Figura 3.14 Curvas de duración precipitación y esorrentía	45
Figura 3.15 Curvas de duración precipitación - esorrentía	46
Figura 3.16 mapa de suelos de la cuenca	47
Figura 3.17 FDC para los flujos de no cero	49
Figura 3. 18 Curvas de duración modelo y medidas	50
Figura 4.1 Curva de duración método cualitativo de entrevistas	52
Figura 4.2 Curvas de duración método de coeficiente de esorrentía	54
Figura 4.3 Curvas de duración modelo probabilidad total	56

## INDICE DE TABLAS

	Pagina
Tabla 2.1 Tipos de suelo por estación	24
Tabla 2.2 características suelos	24
Tabla 2.3 Área cuenca tributaria	25
Tabla 3.1 Probabilidad de excedencia y Caudal puntos clave	32
Tabla 3.2 Probabilidad de excedencia y caudal datos completos	33
Tabla 3.3 Probabilidad de excedencia y caudal datos completos corregido	34
Tabla 3.4 coeficientes de escorrentía para diferentes condiciones	37
Tabla 3.5 Precipitación mensual por estaciones	41
Tabla 3.6 Áreas cuencas	41
Tabla 3.7 Propiedades de las cuenca: pendiente, longitud máxima y tiempo de concentración	42
Tabla 3.8 Fórmulas para realizar el método racional	43
Tabla 3.9 Precipitación y área estación 2120184	45
Tabla 3.10 Parámetros de suelos BFI	48
Tabla 3.11 BFISOIL de la cuenca	48
Tabla 3.12 MAR de la cuenca	48
Tabla 3.12 Q80nz de la cuenca	48
Tabla 3.13 pdry y pnz	49
Tabla 5.1 comparación modelos	58

## INTRODUCCIÓN

Las Curvas de Duración de Caudales (o por su sigla en inglés FDC), son una de las herramientas más utilizadas en la hidrología, puesto que proveen información sobre el porcentaje del tiempo que el caudal en un cauce excede un valor específico. Estas curvas se presentan por lo general en escala Log normal y se utilizan con frecuencia para resumir la información hidrológica de una cuenca, con la probabilidad de excelencia del caudal en el eje X y la descarga en el eje Y.

Estas curvas son muy importantes para la realización de diferentes obras de ingeniería. Para la ejecución de cualquier tipo de proyecto relacionado con hidroeléctricas o proyectos a filo de agua, es necesario elaborar curvas de duración para conocer la probabilidad de que un flujo determinado exceda un cierto caudal. Esta es una variable importante de entrada para el diseño. Para el diseño de planes de riego, abastecimiento de agua y manejo de hábitats naturales tanto en zonas áridas como en zonas húmedas, es importante conocer el comportamiento hidrológico por medio de las curvas de duración, ya que éstas proveen información que permite optimizar el diseño y ahorrar agua y recursos en sistemas y distritos de riego.(Post)

Las curvas de duración de caudal también se pueden utilizar para validar los modelos hidrológicos o para comparar y modelar respuestas hidrológicas. (Post) Recientemente se ha sugerido que las curvas de duración pueden proveer una “firma” hidrológica de la cuenca. Esto puede ser utilizado para hacer modelaciones con el fin de determinar el nivel de complejidad necesario para un modelo lluvia-escorrentía, ya que la “firma” hidrológica, provista por la curva de duración, refleja a simple vista propiedades importantes de la cuenca y puede ser usada en estudios de este tipo a nivel regional.(Post)

En zonas de flujo con caudales muy uniformes, las curvas de duración pueden ser relativamente fáciles de estimar, pero se requiere disponer de métodos para caracterizar y estimar las curvas en zonas con regímenes hidrológicos variables, incluso en zonas intermitentes, donde solo hay flujo en determinadas épocas del

año. Estos métodos de determinación deben ser robustos y deben estar relacionados con las características del flujo que representen.(Post)

En regiones áridas y semi-áridas donde el flujo es intermitente, éste se puede caracterizar mediante un comportamiento discreto o por medio de grupos de hidrogramas separados por períodos sin descarga, donde no hay flujo. (Cigizoglu, 2002) Éste tipo de cuencas se denominan intermitente.

Los primeros esfuerzos para modelar curvas de duración de caudal para cuencas intermitentes corresponden a los modelos DARMA implementados en los años 1980s.(Cigizoglu, 2002) Estos consisten en mezclas probabilísticas de variables independientes e igualmente distribuidas. Estos modelos tienen limitaciones, puesto que son estacionarios y solo se pueden aplicar a temporadas del año en las cuales diferentes suposiciones son válidas. Este problema se solucionó en 1995 cuando se comenzaron a utilizar modelos discretos autorregresivos (su sigla en inglés PDAR) (Cigizoglu, 2002)

Otra forma confiable de aproximarse a este tipo de soluciones es modelar los picos de caudal por medio de puntos y ajustar distribuciones de probabilidad.(Cigizoglu, 2002)

Una dificultad para la elaboración de curvas es que se necesita información histórica de caudal. A menudo es necesario hacer estudios para ríos que no poseen esta información. Por esta razón son importantes nuevas metodologías para la estimación de curvas sin información de caudales, como por ejemplo la de modelos regionales predictivos con base en información como la precipitación mensual, tipos de suelo, etc. (Crocker Karen M, et Al, 2003)

## ALCANCE

Este trabajo pretende recopilar y exponer diferentes metodologías propuestas por algunos autores para la determinación de curvas de duración de caudales, implementarlas, compararlas y buscar sus diferencias, ventajas y desventajas, para finalmente establecer metodologías apropiadas para estimarlas dependiendo de cada caso. También se busca desarrollar un procedimiento para hacer aproximaciones a las curvas de duración que permitan determinarlas con algún nivel de precisión, mediante información cualitativa y cuantitativa. Para ello se diseñó un cuestionario que servirá para recolectar información proveniente de las personas que viven cerca del cause en estudio.

## 1. DESCRIPCIÓN DE MODELOS

Es importante la comparación de diferentes tipos de modelos y metodologías para la resolución de problemas en la ingeniería civil, puesto que muchas veces las soluciones están sesgadas a problemas específicos y no son aplicables universalmente. Por esto es muy útil conocer diferentes maneras de resolver el mismo problema y conocer las ventajas y desventajas de cada método para poder aplicar la solución mas adecuada de acuerdo con las capacidades, informacion recursos e intereses.

### **Modelo regional basado en la teoría de la probabilidad total, para cuencas intermitentes en Portugal.**

Este modelo fue construído usando información de estaciones hidrométricas de 67 cuencas en Portugal. De éstas, 31 cuencas tenían una gran cantidad de tiempo con valores de cero (mas de dos meses por año). La mayoría de estas cuencas con grandes períodos de tiempo con descargas nulas, fué encontrada en la parte sur del país.(Croker Karen M, et Al, 2003)

El procedimiento realizado consiste en combinar dos modelos: el primero sirve para predecir el porcentaje de tiempo que el río esta seco y el segundo para predecir la FDC para los períodos con flujo, usando las curvas generales de duración (su sigla en inglés TC).(Croker Karen M, et Al, 2003)

El clima de Portugal, puede ser clasificado en dos regiones principales: el clima al norte del río Tagus, donde hay clima marítimo con una lluvia de 1000mm (cercano al promedio mundial) por año, y las llanuras secas del sur donde las lluvias oscilan entre 400 y 800mm por año. (Croker Karen M, et Al, 2003)

En esta región de llanura, la mayoría de la lluvia cae en la temporada invernal con un porcentaje de lluvia insignificante en los meses de verano, generando así que muchos flujos en la zona sean intermitentes en la temporada mas seca del año.(Croker Karen M, et Al, 2003)



Los ríos en Portugal se comportan acorde con las condiciones de lluvia de la zona y muestran dos tipos de comportamiento: reflejan la variabilidad climática en el norte, cuyo promedio anual de esorrentía está entre 1540 y 2015mm por año (Croker Karen M, et Al, 2003) con picos en la temporada invernal y valores mínimos en septiembre, y en la zona sur del país, cuyo promedio anual de esorrentía es bastante mas bajo que en la zona norte, generalmente menor a 250mm por año (Croker Karen M, et Al, 2003) se presentan muchos ríos con flujos intermitentes. En algunos ríos, los extremadamente efímeros, el flujo solamente existe durante dos meses del año, y son consecuentes a episodios de inundación.

El modelo regional desarrollado para estimar la FDC para cuencas donde pueden existir intermitencias se puede dividir en tres: (Croker Karen M, et Al, 2003)

- Modelo para predicción de la probabilidad de mayor que cero (pnz)
- Estimación de caudal mayor que cero (FDCnz)
- Escalonamiento de la distribución derivada para las cuencas intermitentes

Para facilitar los pasos anteriores, las FDC de los casos de estudio fueron sujetas al siguiente procedimiento: (Croker Karen M, et Al, 2003)

- a. Estandarizar los caudales: expresar el flujo en porcentaje del caudal medio
- b. Para las cuencas intermitentes, hacer partición entre los componentes de caudal cero y no cero por medio de la teoría de la probabilidad total.

Es importante anotar que los flujos cero, también pueden representar caudales debajo del umbral de medición, lo cual no significa que el flujo sea realmente cero. Pero en ese estudio se supuso que cuando la medición es cero, el caudal es igualmente cero.

Haan(1997) describió tres metodologías para que valores de cero puedan ser tenidos en cuenta para la elaboracion de las FDC:

1. Sumar una pequeña cantidad a cada observación. Esta alteración no debe afectar la tendencia ni la discontinuidad dado que algunos valores son cero. De esta manera las distribuciones de probabilidad comunes pueden ajustarse mejor a los datos
2. Se pueden analizar los valores de no cero únicamente, y luego ajustar los porcentajes a todo el período de toma de datos
3. Usar el teorema de la probabilidad total.

Para el caso de Portugal, se utilizó la tercera metodología, el teorema de probabilidad total. Este puede servir para determinar la distribución de los valores que no son cero y la probabilidad de ocurrencia de un caudal que no sea cero, suponiendo que un evento de cero flujo ya ocurrió. (Crocker Karen M, et Al, 2003)

Este teorema está dado por:

$$Prob(X \geq x) = Prob(X \geq x / X = 0) Prob(X = 0) + Prob(X \geq x / X \neq 0) Prob(X \neq 0) \quad (1)$$

Como la probabilidad de que  $(X \geq x / X = 0)$  es cero, porque el caudal no puede ser negativo, la ecuación de probabilidad total se reduce a :

$$Prob(X \geq x) = Prob(X \geq x / X \neq 0) Prob(X \neq 0) \quad (2)$$

Si  $k$  representa la probabilidad de que  $X$  no sea cero, la ecuación se reduce a:

$$Prob(X \geq x) = Prob(X \geq x / X \neq 0) k, \quad k = Prob(X \neq 0) \quad (3)$$

Escribiendo esta probabilidad en forma de distribución acumulada de probabilidad:

$$P_x(x) = 1 - k + k P_{x^*}(x) \quad (4)$$

Donde  $P_x(x)$  es la probabilidad acumulada de  $X$ . Y  $P_x^*(x)$  es la probabilidad acumulada de los valores no cero de  $X$ .

Para cada cuenca medida del caso de estudio, la proporción de tiempo que el río tuvo flujo fue definido como:  $pnz$  y la probabilidad de que el río estuviera seco corresponde a  $pdry=1-pnz$ . En la figura 1.1 se muestran las FDC para los no cero. (Crocker Karen M, et Al, 2003)

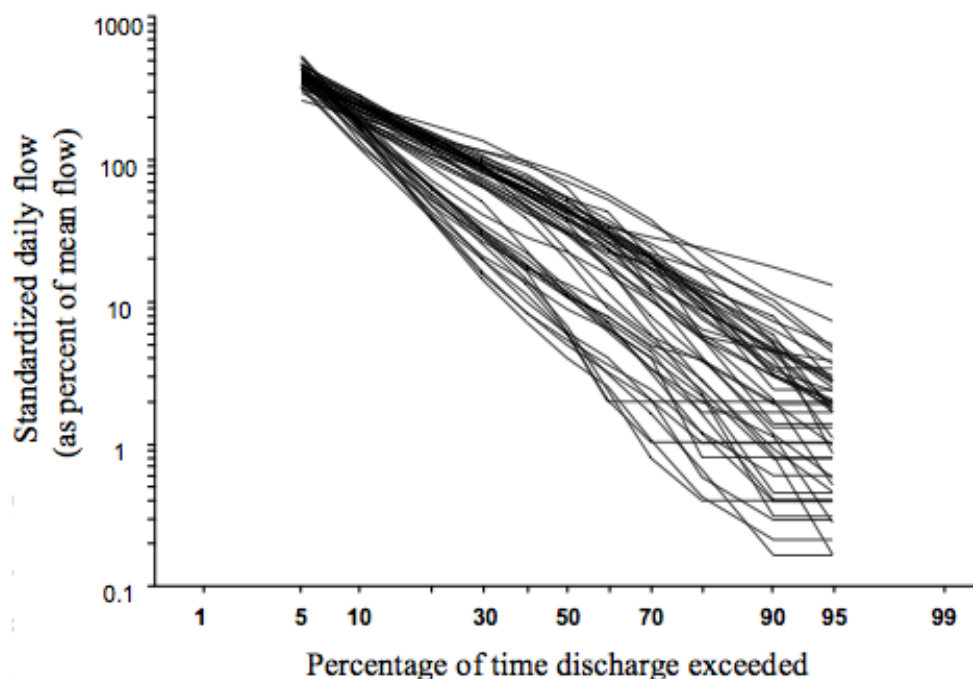


Figura 1.1 FDC para los flujos de no cero (Crocker Karen M, et Al, 2003)

Las FDC representan los caudales que ocurren entre 0 y  $pnz$ ; ya que  $pnz$  es la probabilidad excedente de que el flujo sea cero. En una cuenca no intermitente,  $pnz = 1$  y en una cuenca intermitente,  $pnz < 1$ . Para graficar las FDC tanto de los flujos intermitentes como de los no intermitentes, fue necesario reescalar el intervalo  $(0, pnz)$  para cubrir el intervalo  $(0, 1)$ . Esto se puede hacer transformando los componentes del flujo ( $i=1, n$ ) de la  $FDC_{nz}$  (FDC de valores

cero) estandarizada. Para la probabilidad de excedencia, se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$p(i)_t = p(i)_{nz} p_{nz} \quad (5)$$

donde  $p(i)_t$  es la probabilidad de excedencia transformada, sobre el intervalo (0,1), y  $p(i)_{nz}$  es la probabilidad de excedencia de un caudal específico y  $p_{nz}$  es el umbral de la probabilidad de excedencia bajo la cual el caudal es mayor o igual a cero. (Crocker Karen M, et Al, 2003)

Los caudales de la FDC que no son cero se estandarizan con la media del caudal del período no cero ( $MF_{nz}$ ), y luego. La FDC se recalculó para ser expresada en porcentaje de la media del flujo (MF). Si Q es el caudal absoluto en m<sup>3</sup>/s,  $SQp(i)_t$  es el caudal transformado estandarizado como porcentaje de MF con probabilidad de excedencia  $p(i)$  y  $SQp(i)_{nz}$  es la estandarización del caudal con probabilidad de excedencia  $p(i)_{nz}$ : (Crocker Karen M, et Al, 2003)

$$Q = SQp(i)_t MF / 100 = SQp(i)_{nz} MF_{nz} / 100$$

Entonces:

$$SQp(i)_t = SQp(i)_{nz} (MF_{nz} / MF) \quad \text{Porque } MF_{nz} > MF,$$

se aproxima a  $1/p_{nz}$ ,

Entonces:

$$SQp(i)_t = SQp(i)_{nz} / p_{nz}$$

En la Figura 1.2 se muestra una gráfica típica de una cuenca intermitente del sur de Portugal. La probabilidad de excedencia está dada como porcentaje.

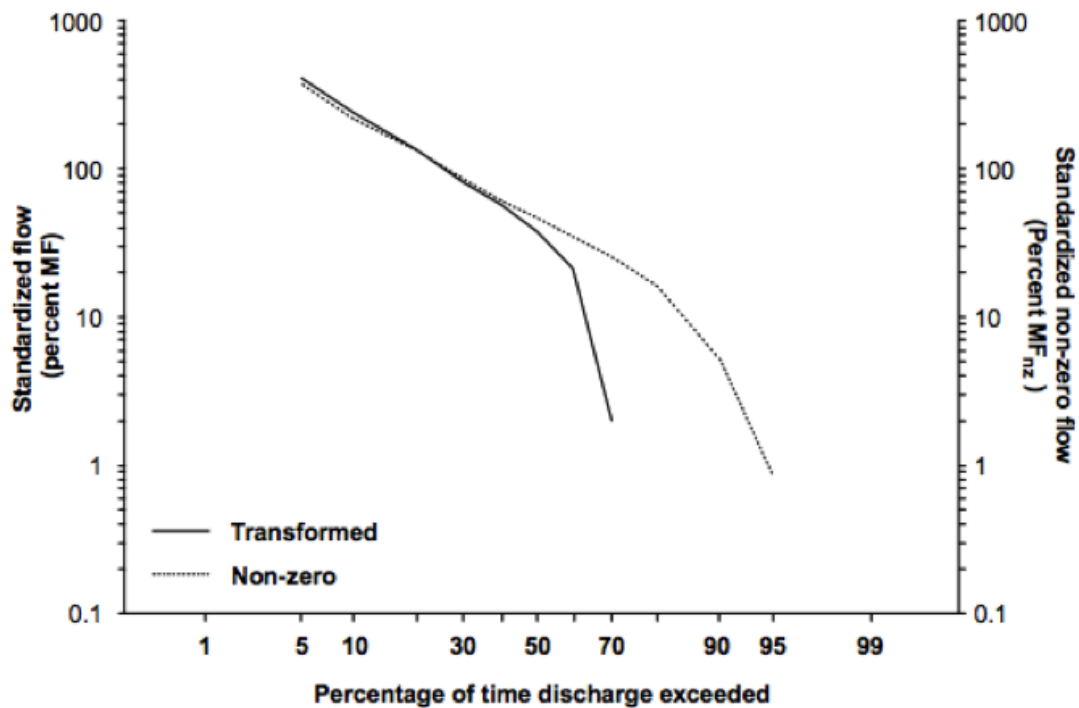


Figura 1.2 porcentaje de tiempo de descarga vs. flujo estandarizado (Croker Karen M, et Al, 2003)

Ya se explicó cómo, aplicando la teoría de probabilidad total, en cuencas instrumentadas tanto perennes como intermitentes, se pueden expresar las distribuciones de caudal no cero, usando el intervalo (0,1). Este mismo principio puede ser utilizado estimar FDCs en cuencas sin información de caudales.

En Portugal la probabilidad de que un cause no sea intermitente, está muy relacionada con la media anual de lluvias (MAR). La relación entre  $p_{dry}$  y MAR puede ser cuantificada usando regresiones lineales. La relación encontrada es: (Croker Karen M, et Al, 2003)

$$p_{dry} = 2.1 \times 10^8 \text{ MAR}^{3.158} \quad (6)$$

donde  $p_{dry} = 1 - p_{nz}$ .

Para estimar la distribución de frecuencia de los caudales no cero, usando la probabilidad de excedencia en el intervalo (0,1), se revisó cómo es que la forma de las curvas de duración, teniendo en cuenta los efectos de escala por el hecho que el flujo sea efímero, está relacionada con la hidrogeología de la cuenca. El rango de las SFDCs se puede representar mediante un conjunto de curvas que reflejen las condiciones hidrogeológicas típicas. Estas curvas se denominan curvas de duración tipo (TCs). En la figura 1.3 se muestran las  $SFDC_{nzs}$  distribuidas acorde con el  $Q80_{nz}$  caudal que es excedido o igualado el 80% del tiempo calculado por medio de la información de flujos que no son cero. (Croker Karen M, et Al, 2003)

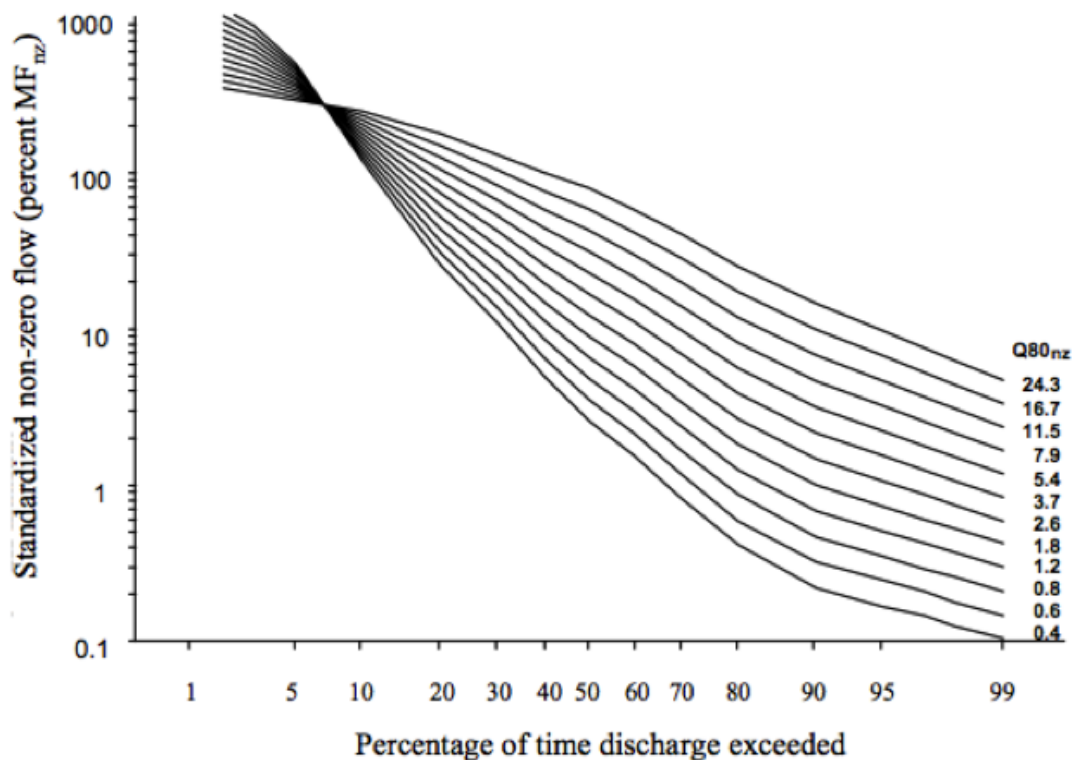


Figura 1.3 Porcentaje de tiempo excedido vs. Flujo estandarizado (Croker Karen M, et Al, 2003)

En cuencas que sin información histórica, las  $SFDC_{nz}$  pueden ser calculadas seleccionando el  $TC_{nz}$  apropiado, basándose en una estadística de caudal bajo representativa. La mejor estadística para esto, es el  $Q80_{nz}$  ya que está fuertemente relacionado con muchas condiciones importantes de la hidrogeología de la zona, tales como la capacidad de almacenamiento de agua de la cuenca y el tipo de suelo. El BFI (Base Flow Index) (Institute of Hydrology,

1980 and Gustard & Irving, 1993) es un buen indicador del grado de almacenamiento de agua en la cuenca, y también fue de utilidad para la elaboración del modelo para cuencas sin información en Portugal.(Crocker Karen M, et Al, 2003)

El modelo subestimó el  $Q80_{nz}$  para cuencas con un BFI alto y sobre estimó el  $Q80_{nz}$  para cuencas con BFI bajo. Esto sugirió a los autores que el suelo no es la única variable importante. Por esto en el modelo también fue tenido en cuenta el MAR como un indicador de la estación y de las condiciones climáticas. El modelo, después de estas consideraciones fue:

$$Q80_{nz} = BFISOIL^{1.258} MAR^{0.484} \quad (7)$$

El paso final de todo el procedimiento es aplicar las ecuaciones

$$SQp(i)_t = SQp(i)_{nz}/p_{nz} \quad (8)$$

$$p(i)_t = p(i)_{nz} p_{nz} \quad (9)$$

a la curva estimada ( $TC_{nz}$ ) para determinar la distribución completa de los caudales para el cauce, teniendo en cuenta la ocurrencia de no flujos cero definidos por  $P_{nz}$ .

Esta metodología presenta la implementación de varios modelos interesantes y permite encontrar probabilidades útiles como ( $p_{nz}$ ). Se alimenta de muchos factores, como el tipo de suelo, el promedio de lluvia como indicador de estación, el estadístico  $Q80_{nz}$  y describe un método muy simple, basado en ecuaciones sencillas de probabilidad, y otras empíricas, para hallar las FDC para casos generales. La metodología funciona para cuencas instrumentadas y no instrumentadas y para cuencas con flujos efímeros y perennes. El inconveniente es que necesita datos de entrada específicos que son difíciles de encontrar en algunas cuencas colombianas, tales como mapas digitales con los tipos de suelos, que aunque se pueden digitalizar, haría que el trabajo sea mas largo. Lo mejor de este método es que puede ser muy rápido y de fácil implementación.

En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de las FDC estimadas en el trabajo de Portugal:

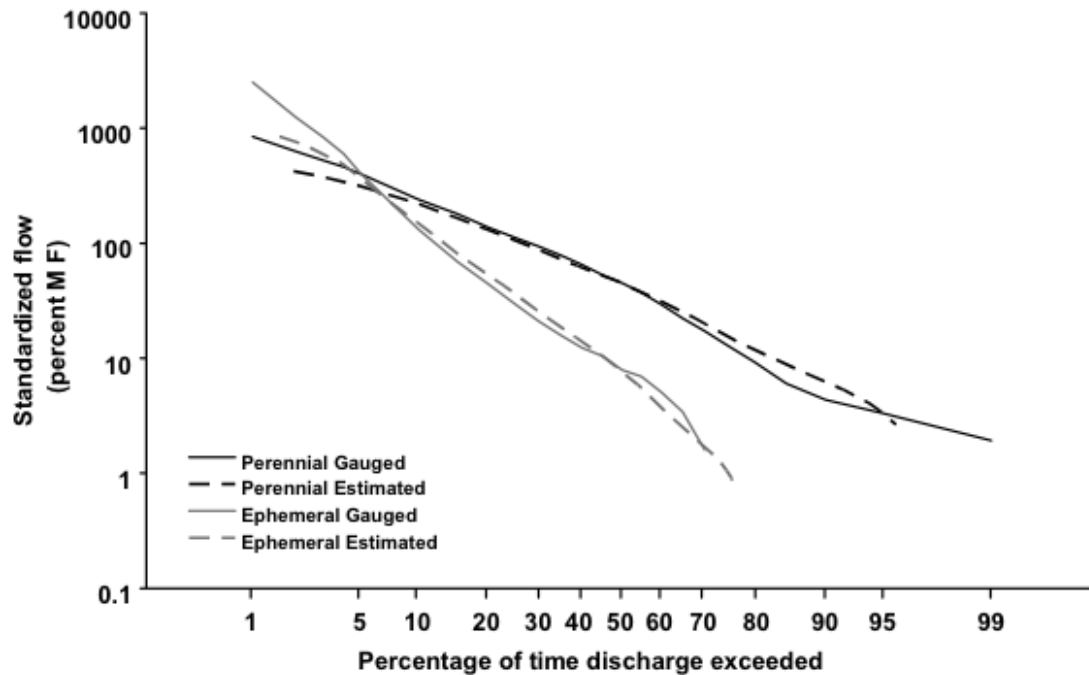


Figura 1.4 FDC estimadas y observadas para cunecas perennes y efímeras (Croker Karen M, et Al, 2003)

Como se puede observar, el modelo se ajusta bastante bien tanto en el caso de FDC permanentes, como en el caso de FDC efímeras, haciendo que este método sea aplicable para las dos ocurrencias.

### Método de índice estocástico:

Este método combina el modelo de índice estocástico, el cual permite reproducir la FDC de un río que y calcular  $F(y|Y>0)$ , por medio de la teoría de la probabilidad total para calcular el porcentaje de tiempo que el río esta seco.



Las curvas FDC pueden ser vistas como el complemento de la distribución acumulada de los caudales diarios, usando la información completa de los caudales.

Existen diferentes maneras de elaborar las FDC. Existen procedimientos no paramétricos como:

- Reordenar los caudales en orden ascendente
- Graficar cada observación ordenada contra la probabilidad de excedencia correspondiente. La duración se expresa en porcentaje y coincide con el estimativo de la probabilidad de excedencia:  $e_i$  de la  $i$ -ésima observación en la muestra ordenada.  $e_i$ , puede ser estimada utilizando la posición de graficación cuando la distribución es de Weibull, . La duración  $D_i$ , es:

$$D_i = 100(e_i) = 100 \bullet \left(1 - \frac{i}{n+1}\right), \text{ Para } i= 1,2,3,...,n \quad (10)$$

Donde  $n$  es el tamaño de la muestra.

Es posible construir las FDC usando diferentes tipos de información, con diferentes resoluciones de tiempo (diario, semanal mensual, etc.). Incluso se pueden elaborar utilizando información anual.(Rianna, 2010)

Esta aproximación presume que el caudal diario  $X$  se puede encontrar multiplicando un índice de flujo igual al caudal anual  $AF$  por un caudal diario  $X'$  adimensional.

$$X=AF*X' \quad (11)$$

$AF$  describe el régimen climático de la cuenca, y está relacionado con la precipitación media anual. La función de densidad de probabilidad (pdf),  $f_X$  de caudales estandarizados está correlacionada con el régimen hidrológico y las características geomorfológicas de la cuenca. (Rianna, 2010)

La FDC calculada usando el registro completo de caudales, es el complemento de la función de distribución acumulada (cdf) de  $X$ ,  $F_X$  está dada por:

$$F_X(x) = P\{X \leq x\} = \int_{x_l}^x f_X(u) du = P\{AF, X \leq x\} = \int_{\Omega_X} \int_{x_l}^x f_{AF,X}(v, z) dv dz \quad (11)$$

$\Omega_Y$  = dominio de la variable aleatoria  $Y$

$f_X$  = pdf de  $X$

$f_{AF,X}$  y  $af_l$  = distribución de probabilidad conjunta de  $AF$  y de  $X$

$x_l$  y  $af_l$  = frontera inferior de  $\Omega_X$  y  $\Omega_{AF}$ , respectivamente.

Si  $AF$  y  $X$  son independientes,  $f_{AF,X}$  es igual al producto de las dos distribuciones marginales, y la ecuación es:

$$F_X(x) = \int_{\Omega_X} f_{X'}(z) \int_{af_l}^{x/z} f_{AF}(v) dv dz = \int_{\Omega_X} f_{X'}(z) F_{AF}(x/z) dz \quad (12)$$

Donde:

$F_{AF}$  = cdf de  $AF$

$f_{X'}$  = pdf de  $X'$

Esta ecuación puede ser resuelta analítica o numéricamente, y puede haber expresiones para  $F_{AF}$  y  $f_{X'}$ .

Para determinar la FDC se debe graficar la variable  $X$  versus la duración, que es

igual a  $100(1-F_X)$

Luego, se usa el teorema de probabilidad total para determinar la probabilidad de ocurrencia de caudales no cero, asumiendo que un evento de no flujo (cero) ya sucedió (Jennings and Benson, 1969). Este teorema, al igual que en el modelo (Croker Karen M, et Al, 2003) 1 está dado por

$$P(X > x) = Pr(X > x / X = 0)Pr(X = 0) + Pr(X > x / X \neq 0)Pr(X \neq 0) \quad (13)$$

Pero  $P(X > x / X = 0)$  es cero puesto que el flujo de un río no puede ser negativo, entonces la formula se reduce a

$$P(X > x) = P(X > x / X \neq 0) Pr(X \neq 0) \quad (14)$$

Reescribiendo esto, en la forma de una función de densidad acumulada:

$$Pr(X \leq x) = p_{dry} + p_{nz} Pr(X \leq x / X \neq 0) \quad (Croker Karen M, et Al, 2003) \quad (15)$$

$p_{nz}$  es la proporción de tiempo que el río fluye  $P(X \neq 0)$ . La distribución condicional  $P(X \leq x / X \neq 0)$  puede ser calculada usando el modelo del índice. (Rianna, 2010)

$$P(X \leq x / X \neq 0) = \int_{\Omega_{X_{nz}}} f_{X_{nz}}(z) \cdot F_{AF_{nz}}(x/z) dz \quad (16)$$

Donde:

$f_{X_{nz}}$  = función de densidad de probabilidad de no cero  $X'$

$F_{AF_{nz}}$  = distribución acumulada de los AF no cero

Para calcular la distribución condicional  $F_{AF_{nz}} = P(AF \leq af / AF \neq 0)$  y  $f_{X'_{nz}} = P(X' \leq x' / X' \neq 0)$  se puede hacer mediante procedimientos de ajustes utilizando la posición de graficación según distribución Weibull. (Croker Karen M, et Al, 2003)

También se puede considerar la situación en la cual los datos de series de tiempo tengan tamaño  $n(y_1, \dots, y_k, 0, \dots, 0)$  donde  $y_1, \dots, y_k$  son flujos positivos y el resto son cero ( $n-k$ ). Para calcular la distribución de Weibull no es posible utilizar todos los valores de  $n$  y la formulación  $100 \cdot (1 - m/n + 1)$ , para  $m=1, \dots, n$ . Es necesario usar la formulación usando solo los  $k$  valores positivos:  $D_i = 100 \cdot (1 - i/k + 1)$  para  $i=1, \dots, k$ . Teniendo esto en cuenta la formulación general del índice estocástico, para series de tiempo con valores de cero es:

$$P(X \leq x) = p_{dry} + p_{nz} \cdot \int_{\Omega_{X|nz}} f_{X|nz}(z) \cdot F_{AFnz}(x/z) dz \quad (17)$$

Este método es muy útil para el caso de estudio, puesto que ofrece la posibilidad de calcular las FDC en presencia de datos de caudal cero, lo que significa que es adecuado para las cuencas intermitentes. Este método se basa en dos leyes de probabilidad básicamente. Utiliza el teorema de probabilidad total para calcular la probabilidad de un evento de flujo y el índice estocástico para calcular la probabilidad condicional  $P(X \leq x | X \neq 0)$ .

### Determinación de FDC mediante datos cualitativos y entrevistas

En muchos casos, los datos para elaborar una FDC no están disponibles o no existen puesto que no hay estaciones de medición en la zona. Esta situación puede ser frecuente en países como Colombia, donde durante algunos períodos es muy complicado acceder a ciertas ubicaciones geográficas debido a problemas de seguridad o de accesibilidad. Entonces, en lugares como éstos, es muy difícil mantener una estación de medición de caudal.

Otro punto importante es que muchas veces tampoco se cuenta con los recursos suficientes para la implementación de las estaciones, puesto que estas pueden resultar muy costosas, y deben ser sometidas a mantenimiento por personal calificado cuyo desplazamiento a la zona es costoso y de difícil acceso. Por estas

razones, es de utilidad en estos contextos, tener la posibilidad de estimar curvas FDC por mediante otros procedimientos, que no impliquen necesariamente datos históricos de estaciones hidrométricas.

En este proyecto, se intenta diseñar e implementar un cuestionario a realizarle a personas ribereñas, con el objetivo de obtener información útil y clara, por medio de la cual se puedan estimar curvas FDC con cierto grado de precisión. Para establecer la bondad del procedimiento, se presumirá que no se cuenta con series históricas en varias estaciones hidrométricas y se comparará las curvas obtenidas por medio de información recolectada en el lugar, con las curvas estimadas por medio de datos históricos.

El primer paso para la implementación de esta metodología es definir la información que se quiere obtener de las personas. Es muy importante tener claro el tipo de información que se necesita para saber qué se debe preguntar. Los siguientes, son los datos más relevantes que se buscan encontrar a través de las entrevistas.

- Hace cuánto tiempo vive el entrevistado en la zona
- Si el flujo en realidad se seca
- Si estos flujos de cero caudal, suceden todos los años
- En qué meses del año sucede el fenómeno
- Por cuánto tiempo sucede el fenómeno
- Cuáles son los niveles máximos y mínimos y cuándo suceden
- Si el régimen de flujo es natural, o si está influido por alguna actividad antropogénica
- Cuál es el caudal medio

Por medio de estos datos, se puede estimar de manera aproximada la FDC. El siguiente paso es encontrar las preguntas adecuadas para que cualquier persona sea capaz de responderlas, ya que las personas que viven en las riveras de los ríos pueden ser campesinos con bajo nivel cultural y conocimiento.

Primero, se debe realizar una entrevista semi estructurada para tener datos preliminares, familiarizarse con el contexto cultural y descubrir cuál es la manera mas adecuada de realizar el cuestionario.

### Entrevista semiestructurada

La entrevista semiestructurada es una útil herramienta para investigaciones científicas. Este tipo de entrevistas facilita y enriquece muchos procesos. Es importante que la entrevista esté adaptada al contexto: al entrevistado, al entrevistador, al objeto del caso y a las condiciones socioculturales jurídicas y psicológicas.(Giraldo, 2007)

Lo anterior hace que el proceso de identificación apunte a identificar patrones culturales que permitan al investigador corroborar, descartar o descubrir elementos que relacionen al entrevistado con el problema de estudio y así poder presentar los datos de la manera más adecuada. Para implementar una entrevista semiestructurada, se deben seguir los siguientes pasos:

- I. Definir el tipo de cuestionario: se puede hacer un cuestionario abierto de respuesta libre, el cual debe estar muy bien definido para poder controlar la temática, con un diagrama de flujo detallado, que ayude a predecir todos los caminos por donde puede ir la entrevista y estar preparado a preguntar en cada momento lo indicado.(Giraldo, 2007)
- II. Fases de elaboración de la entrevista: los siguientes son los factores guías a tenerse en cuenta en la elaboración:(Giraldo, 2007)
  - a. Justificación sobre la técnica: una vez definida la utilización de la entrevista semiestructurada como instrumento, es necesario argumentar ésa utilización cuando sea pertinente y útil.
  - b. Contacto con el futuro entrevistado: se debe hacer una cita, especificando el lugar, hora y fecha del encuentro. También se debe tener en cuenta la predisposición del entrevistado: hay que hacerle una breve introducción de lo que será la entrevista así

como la duración de la misma. Una vez se tenga la información de a quién se va a entrevistar, el entrevistador deberá preparar el “tono” de la entrevista, es decir el grado de empatía que se presentará, la emoción que se va a transmitir, la forma en la que se estará vestido, etc.

- c. Guías puntuales de preguntas obligadas para confirmar.
  - i. Rasgos socio-demográficos
  - ii. Genograma
  - iii. Apariencia física
  - iv. Porte y actitud
  - v. Tipo y consecutivo administrativo de la entrevista
  - vi. Esqueleto guía de la entrevista- diagrama de flujo

Las preguntas guía pueden ir ordenadas por dinámica de aparición, por personas, situaciones o modos de relación, con espacios de registro extra en caso de información adicional pertinente.(Giraldo, 2007)

### III. Conclusiones y recomendaciones:

En la conclusión se reconocerá el proceso y los resultados, desde la discusión de la investigación y del documento. En las sugerencias se elaborarán las sugerencias para las próximas investigaciones sobre el tema y luego se preparará el documento final.(Giraldo, 2007)

## 2. CASO DE ESTUDIO

Para el presente estudio se ha escogido la cuenca del río Calandaima, que está ubicada en el departamento de Cundinamarca y vierte sus aguas al río Apulo.



Figura 2.1 Río Calandaima (Google Maps, 2010)

En la zona se puede encontrar geografía de montaña con relieve quebrado y escarpado, valles aluviales de topografía plana y colinas de relieve ondulado. Los suelos vienen de depósitos aluviales y tienen texturas variadas alrededor de toda la región. Por lo general son suelos jóvenes y de fertilidad media a alta, generalmente arcilloso y por lo general son bien a moderadamente bien drenados, en la figura 2.1 se muestra una imagen satelital de la zona.(Río Calandaima, Cundinamarca, Colombia, 2010)

La mayoría del suelo de la región en la que hay colinas, presenta erosión ligera o moderada superficial. Por otro lado los suelos de montaña fueron originados por la cordillera. Los ríos principales de la zona son el Calandaima, el Apulo y el Bogotá. Otras fuentes hídricas son la laguna de Salcedo y varias fuentes termales(Río Calandaima, Cundinamarca, Colombia, 2010)



La altitud de la zona media es de 421 m.s.n.m. y la temperatura es de 26°C en promedio. En la figura 2.2 se muestra el mapa de la zona con las estaciones estudiadas ubicadas. En el Anexo 1, se muestran en detalle la información de las estaciones hidrométricas y de presipitacion

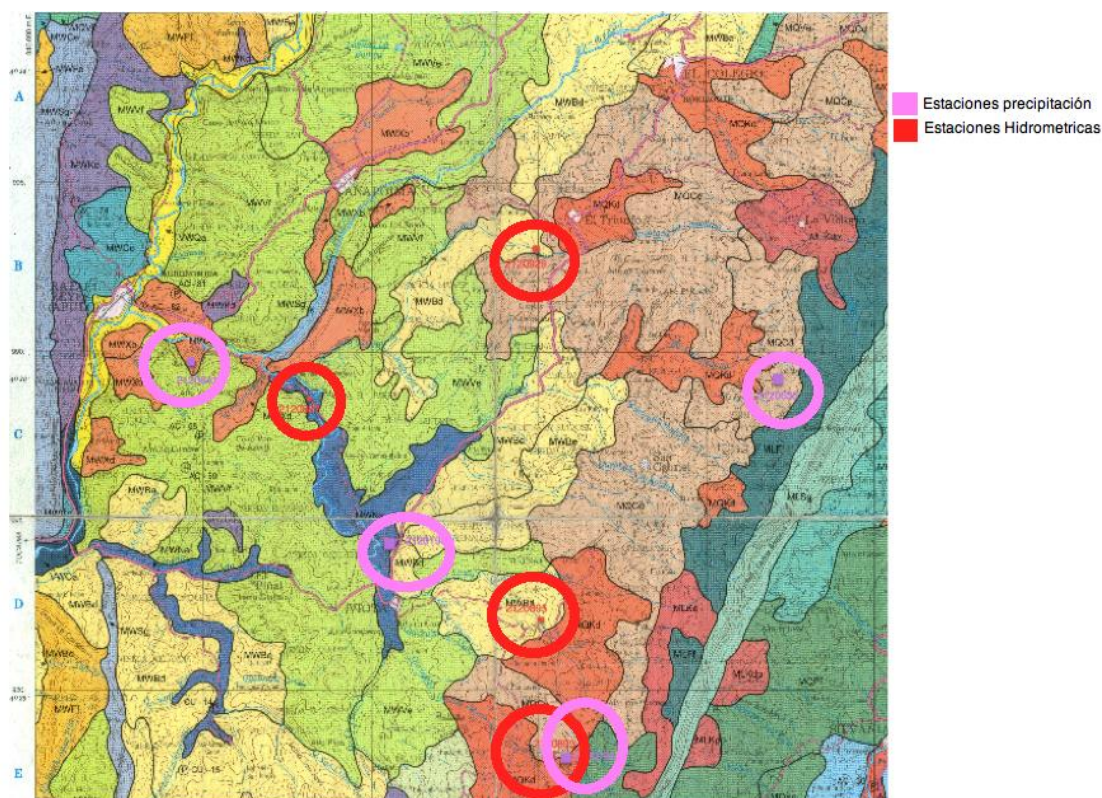


Figura 2.2 Mapa de suelos Cundinamarca (Agustín Codazzi 2010)

Para posteriores análisis, fué necesario consultar los mapas de suelo de la zona en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Se encontraron los siguientes tipos de suelos asociados a la ubicación de las estaciones estudiadas.

Las curvas de nivel disminuyen en altura desde la cuchilla Peñas Blancas hacia el occidente (de derecha a izquierda en la imagen). La tendencia de los caudales de agua es ir en dirección transversal a las curvas de nivel y por esta razón los flujos parten de la cuchilla Peñas Blancas, hasta verter sus aguas en el río Apulo y río Bogota. (Agustín Codazzi 2010)

La calidad de drenaje está relacionada con el tipo de suelo. En la tabla 2.1, se muestra el tipo de suelo asociado con cada estación hidrológica o de

precipitación.

Tabla 2.1 Tipos de suelo por estación

Estación Precipitación	Tipo de suelo
2120190	MWNa
2120641	MWXb
2120184	MQCe
2120635	MQCd
<b>Estación Hidrológica</b>	
2120929	MWBd
2120893	MWNa
2120887	MWBd
2120895	MQCe

Cada tipo de suelo tiene características diferentes lo cual es clave tener en cuenta al hacer modelos que involucren la precipitación. En la tabla 2.2 se muestran las características de cada tipo de suelo asociados a las estaciones.

Tabla 2.2 características suelos (Agustín Codazzi, 2010)

	Tipo de relieve	Material Parental	Clima	Undades cartograficas y componentes taxonomicos	principales características
<b>MWBd</b>	Lomas	Rocas clasticas limoarcillosas y quimicamente carbonatadas	calido seco	consociacion hunic  dystrustpts, typic  calcustrolls	Relieve ligera a fuertemente quebrado con pendientes de 7-12, 12-25 y 25-50% afectado en sectores por erosión hídrica superficial laminar ligera y frecuente pedregocidad superficial, suelos profundos a muy superficiales bien a moderadamente bien drenados con texturas finas, reacción acida a moderadamente alcalina y
<b>MQCe, MQCd</b>	Lomas	rocas clasticas limoarcillosas y manto de ceniza	medio humedo	asociacion typic  udorthents typic  melanudands	Relieve ligera a moderadamente quebrado con pendientes de 7-12, 12-25 y 25-50 % afectado en sectores por frecuente pedregocidad superficial, suelos profundos a muy superficiales, bien a moderadamente bien drenados de texturas medias a finas, reacción muy fuerte a neutra, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada.
<b>MWNa</b>	vallesitos coluvio- aluviales	depositos clasticos hidrogenicos y gravigenicos	calido seco	asociacion typic  udorthents typic  melanudands	Relieve plano con pendiente de 1 a 3 %. Suelos moderadamente profundos a muy superficiales, bien a imperfectamente drenados, de texturas finas, reacción alcalina y fertilidad baja a media.
<b>MWXb</b>	abanicos terraza- aluviales	depositos clasticos hidrogenicos y gravigenicos	calido seco	asociacion typic  udorthents typic  melanudands	Relieve relativamente plano a ligeramente inclinado con pendientes de 1-7%, suelos moderadamente profundos a muy superficiales, bien drenados, de textura fina a media, reacción ligera a media alcalina, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada.

Como se muestra en la tabla 2.2, se pueden generalizar los suelos puesto que todos son finos, de clima seco cálido y bien drenados. Esta característica es importante a la hora de implementar los modelos con datos de entrada de precipitación y no de escorrentía. Los suelos varían su pendiente de entre 1-7% a 25-50%, mostrando gran variedad en este aspecto. (Agustín Codazzi, 2010)

Otro dato de entrada pertinente para la elaboración de algunos de los modelos propuestos para estimar las curvas de duración, son las áreas de las cuencas tributarias asociadas con las estaciones. En la tabla 2.3 se muestran las áreas de las cuencas calculadas para cada estación.

Tabla 2.3 Área cuenca tributaria

<b>Estación Hidrológica</b>		
2120929	MWBd	20
2120893	MWNa	2,875
2120887	MWBd	196,7
2120895	MQCe	18

Las áreas de las cuencas tributarias se calcularon de manera manual, utilizando papel transparente y papel milimetrado. Si se pudieran tener los planos en formatos digitales se sugiere hacer este procedimiento mediante programas de calculo de áreas como Autocad.

### 3. IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS

#### Determinación de FDC por medio de datos de estaciones

Para determinar la validez y calidad de los modelos analizados, se elaboraron las curvas de duración de caudal para las 4 estaciones de la cuenca del río Calandaima. Como se puede apreciar en la figura 3.1, para las 4 estaciones existe registros con flujo nulo. Esto quiere decir que las estaciones están ubicadas en causes intermitentes donde en algunos periodos el flujo se seca.

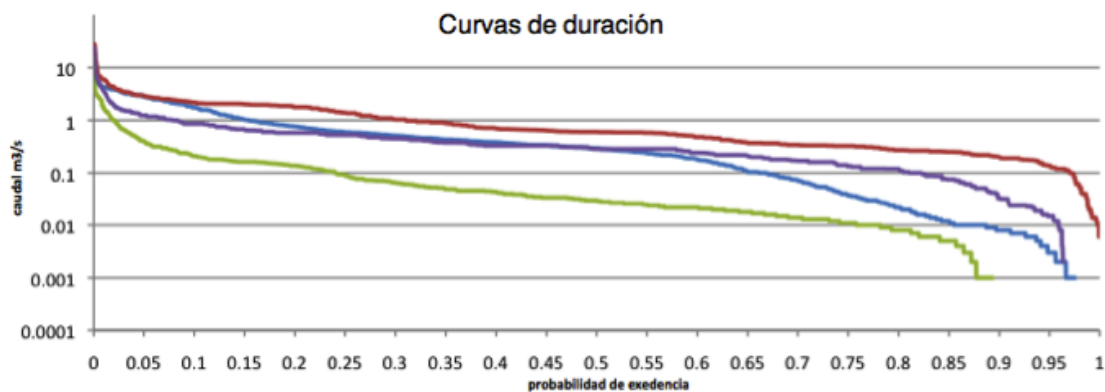


Figura 3.1 Curvas de duración estaciones de flujo

Para la elaboración de las curvas, se siguió un procedimiento sencillo: se organizaron los datos de cada estación en orden ascendente de menor a mayor valor. Luego se estableció la probabilidad de que el caudal fuera cero. Para cada dato se encontró la probabilidad de que éste fuera excedido. De esta manera se construyeron las gráficas de la figura 3.1.

Que los flujos lleguen a cero es un fenómeno que puede tener dos causas fundamentales: dada actividad antropogénica, el flujo puede secarse por algún tipo de toma excesiva de agua o el flujo puede secarse por condiciones naturales que obedecen a situaciones del contexto tales como el clima y las características hidrogeológicas.

Cuando se realizaron las entrevistas a los habitantes de la zona, se les indagó acerca de los diferentes usos que se les da a los caudales. Ninguna información

de que los caudales se afecten fuertemente fue registrada. Por esta razón todo parece indicar que el hecho de que estos caudales se sequen obedece a un fenómeno natural y a las condiciones del ambiente. Cabe anotar que la zona es netamente rural de montaña, con baja densidad demográfica, terreno abrupto y no hay grandes industrias que puedan tomar grandes cantidades de agua, ni cultivos extensivos.

Los datos de caudales histórico muestran que todas las veces que el flujo fue cero, fue durante los meses de mitad de año, mayo, junio y julio. Estos meses son los que tradicionalmente son menos lluviosos, secos y calurosos, y por esta razón los flujos se secan en esta época.

Las curvas se presentan con alta pendiente teniendo en cuenta que se encunetran en escala logarítmica en el eje vertical, lo cual indica que son cauces de montaña ver en la figura 3.2.(Medina, 2010)

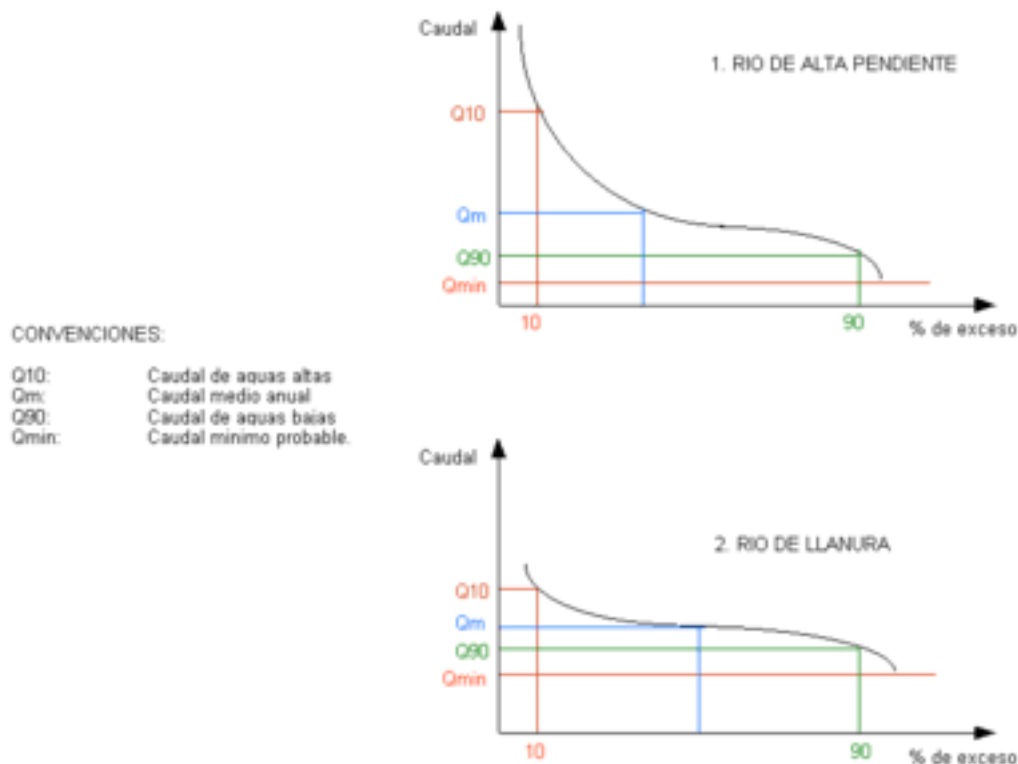


Figura 3.2 Tipos de curvas de duración (Medina, 2010)

Las gráficas obtenidas son del estilo de la gráfica de arriba de la figura 3.2. Esto indica que la variación de caudal es menos uniforme que en situaciones con menor pendiente, en donde se ve menor variación de caudales encontrados.

También se pueden elaborar curvas de duración anuales de caudales diarios para una estación. En la figura 3.3 se muestra un ejemplo de esto, utilizando datos históricos desde 1991 hasta el 2009 para la elaboración. Mediante este tipo de curvas se puede obtener información muy útil. Se puede ver con claridad que aunque hay una tendencia general para la mayoría de los años, algunos presentan comportamientos sumamente distintos. Es el caso de los años 1991, 1992 y 1993. Estos años presentan comportamientos sumamente secos, mucho más que el promedio de los años medidos en la estación.

Este comportamiento anómalo fue dado por condiciones de sequía extrema en el país y por el Fenómeno del Niño que se presentó en esta época. La sequía de la época fue tan grave que la reducción en las reservas de agua de los embalses, agravada por el fenómeno de El Niño, condujo a una reducción en la producción de energía hidroeléctrica que forzó a las autoridades a implementar una serie de apagones programados que duraron más de un año entre 1992 y 1993. Para contrarrestar los efectos negativos de los cortes de energía eléctrica, el gobierno del entonces presidente César Gaviria Trujillo tomó la decisión de adelantar una hora los relojes en el país, pasando de UTC-5 a UTC-4 a la medianoche del 2 de mayo de 1992. La medida, conocida informalmente como *Hora Gaviria*, duró once meses y ayudó amortiguar los problemas generados por la crisis energética de la época, ocasionados por la sequía. (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, revisado 2010)

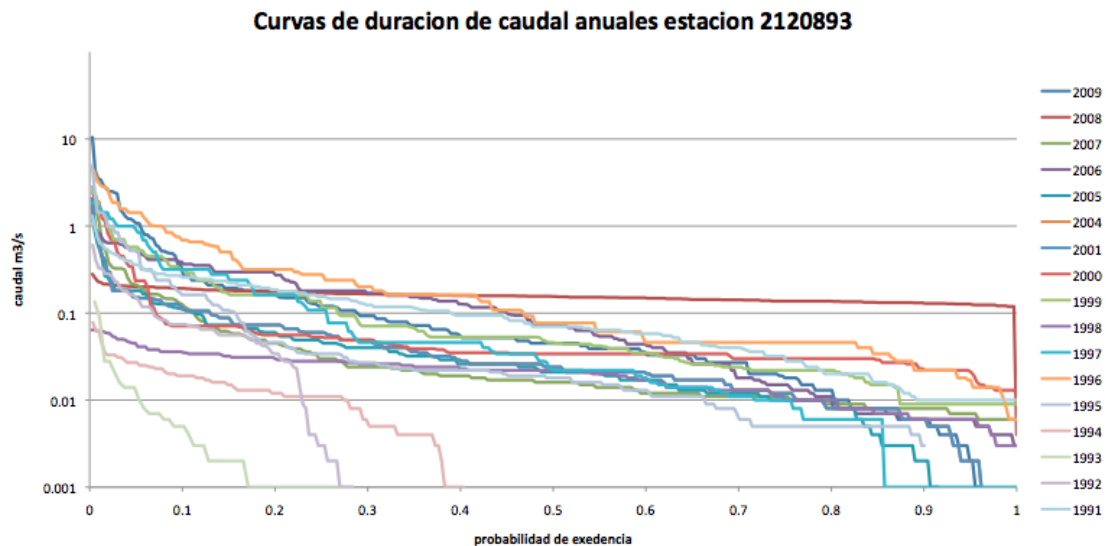


Figura 3.3 Curvas de duración de caudal anuales estación 2120893

En la figura 3.3 también se encuentran curvas de años en los cuales no se seca. De hecho hay más años en los cuales el flujo es perenne, lo que indica que aunque es habitual que el flujo se seque en varios años, esta no es la tendencia y no es un comportamiento que ocurra de manera regular en este cause. Como información adicional, en el Anexo 2 se encuentra el porcentaje de datos faltantes por año.

Según las investigaciones realizadas en campo, el flujo tampoco está afectado por ningún tipo de actividad antropogénica de captación de aguas, lo cual descarta la posibilidad de que la variación entre curvas de años intermitentes y años de flujo perenne sea causada por actividades antropogénicas. Se puede concluir entonces que los años en que el flujo alcanza valores secos de cero, son años en los cuales hubo un verano más intenso que generó este tipo de flujo. Esto puede ser causado por fenómenos globales o locales como el fenómeno del Niño o la Niña, o por diferentes corrientes de aire que alejan las nubes de lluvia y causan anomalías.

En la figura 3.4, se muestran las curvas de duración de caudal para cada año, y marcado en negro, la curva de duración histórica de la estación. Como se puede apreciar, la probabilidad de que el flujo sea cero es de más del 10%. Esta probabilidad resultó ser alta, dado en gran medida por los años de sequía

extrema de 1991, 1992 y 1993.

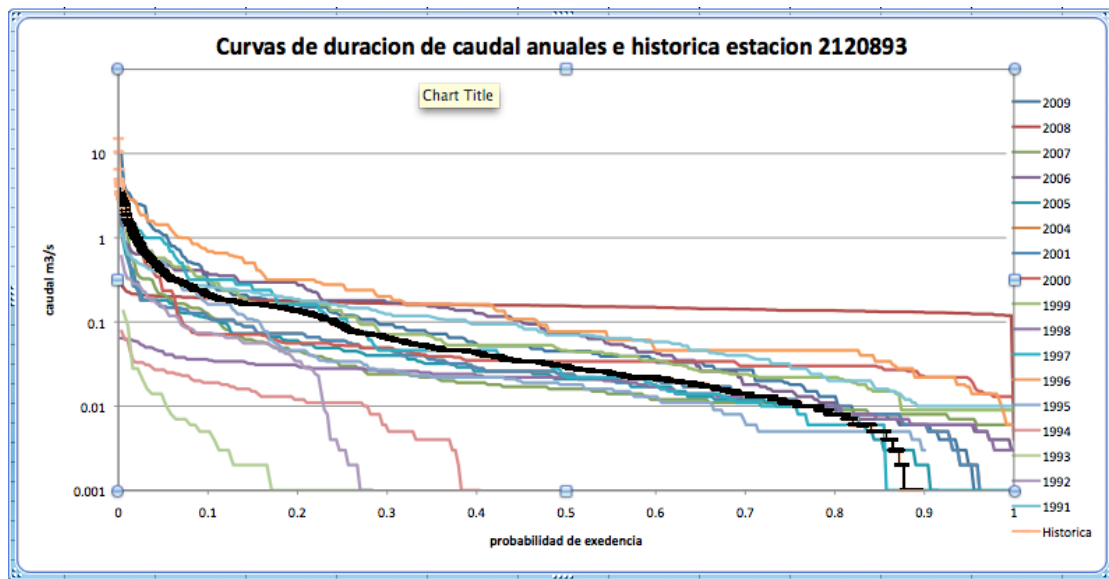


Figura 3.4 Curvas de duración de caudal anuales histórica estación 2120893

Para labores de diseño, se debe utilizar la curva de duración mas confiable, en este caso es la que recoja más cantidad de datos, o sea la curva histórica. Usar curvas anuales puede no ser lo indicado puesto que éstas pueden presentar comportamientos que no reflejen el flujo en sus condiciones habituales dados los acontecimientos anómalos durante el año. Entre más años se utilicen para hacer la curva de duración, mejor representará ésta las condiciones del flujo, ya que presentará una mayor confiabilidad en el cálculo de probabilidad puesto que se utilizaron mas datos.

### Determinación de FDC mediante datos cualitativos y entrevistas

El primer paso para la implementación del método es diseñar la entrevista semiestructurada, la cual sirvió de base para elaborar el cuestionario final y familiarizarse con el tema y el contexto. Se definió un tipo de cuestionario abierto y sujeto al diagrama de flujo que se ilustra en la figura 3.5, Este ayuda a la organización conceptual de la información y permite no pasar por alto ninguna pregunta importante, dependiendo de la persona que se esté entrevistando.



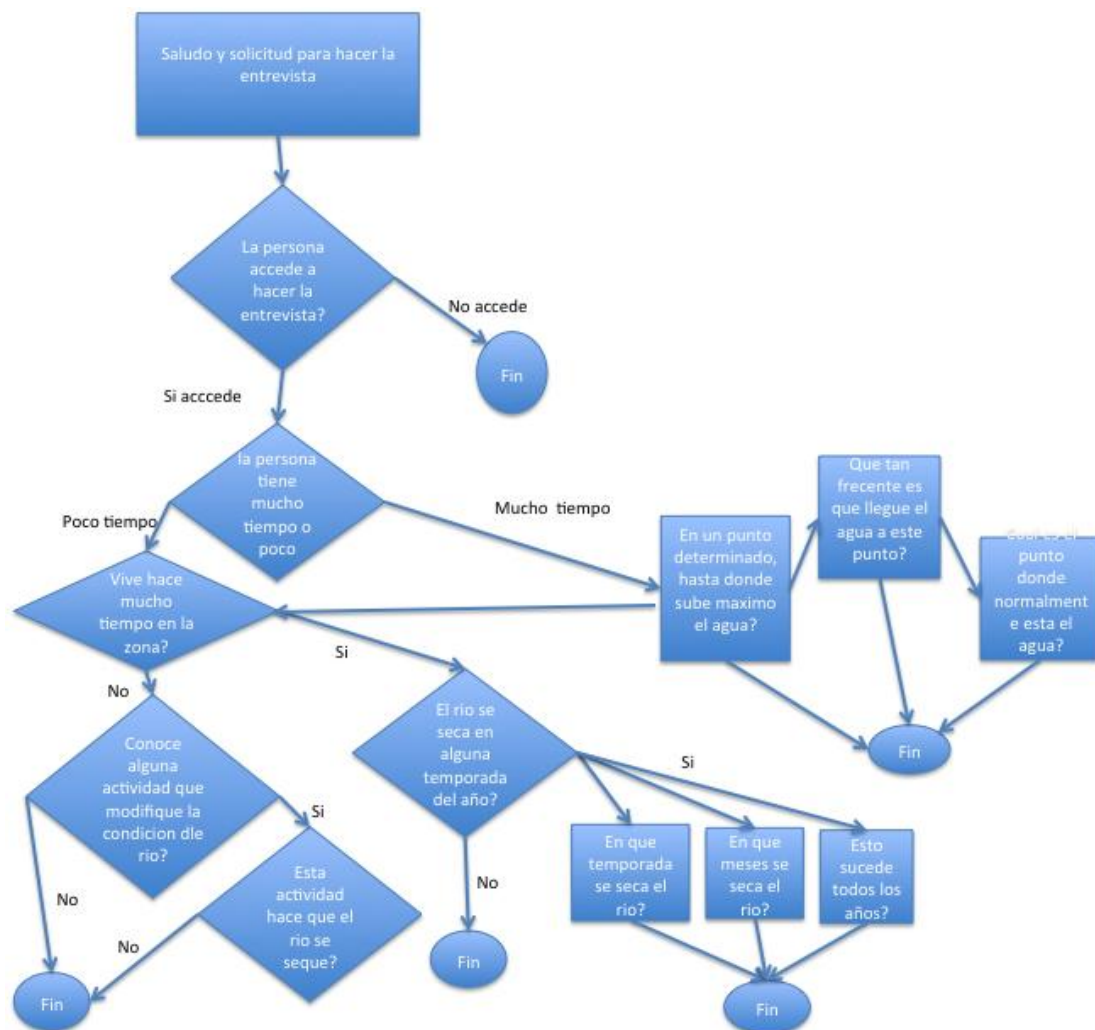


Figura 3.5 diagrama de flujo preguntas

Después de haber realizado las entrevistas (Anexo 3), se obtuvieron datos útiles para poder plantear una metodología para estimar las curvas con alguna proximidad. A partir de los datos de la sección transversal cauce se puede estimar el caudal para una condición determinada y el caudal máximo. Por medio de las entrevistas se puede determinar el porcentaje de tiempo que el cauce está seco y si este fenómeno obedece a condiciones naturales o generadas por actividades humanas. También es útil saber en qué temporadas se seca el río y si esto sucede todos los años, para poder predecir si el hecho de que se seque, obedece a algún fenómeno anómalo.

Para el caso de estudio, se encuestaron pobladores en la cercanía de la estación de medición de caudal de el Triunfo (código CAR 2120929). Se encontró que el flujo tiene un caudal medio de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . esto se estimo en base a la sección transversal la pendiente y los niveles sugeridos por los entrevistados.

Suponiendo que el caudal promedio se encuentra alrededor del 50% de la probabilidad de excedencia, con el caudal promedio ya se tiene un inicio para elaborar toda la FDC. A continuación, por medio del caudal máximo, se estima la parte alta de la gráfica. Según la información recogida en campo, el caudal máximo es aproximadamente de  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  y un caudal mínimo de cero, con una probabilidad de 10 %. Con estos datos ya es posible construir un boceto de la gráfica. En la tabla 3.1 se muestran los datos obtenidos en la investigación en campo.

Tabla 3.1 Probabilidad de excedencia y Caudal puntos clave

Probabilidad de exedencia	caudal m3/s
0	12
0,5	0,5
0,85	0,01
0,9	0
0,95	0
1	0

Luego, para completar la tabla de datos, se supuso una recta entre los puntos conocidos y se llenó la tabla con valores espaciados uniformemente. En la tabla 3.2 se muestra el resultado.

Tabla 3.2 Probabilidad de excedencia y caudal datos completos

Probabilidad de excedencia	caudal m3/s
0	12
0,05	10,7
0,1	9,4
0,15	8,1
0,2	6,8
0,25	5,6
0,3	4,3
0,35	3
0,4	1,7
0,45	0,5
0,5	0,5
0,55	0,5
0,6	0,4
0,65	0,3
0,7	0,2
0,75	0,17
0,8	0,09
0,85	0,01
0,9	0
0,95	0
1	0

Como resultado de la tabla, se dibujó la grafica de duración de caudal, la cual se presenta en la figura 3.6.

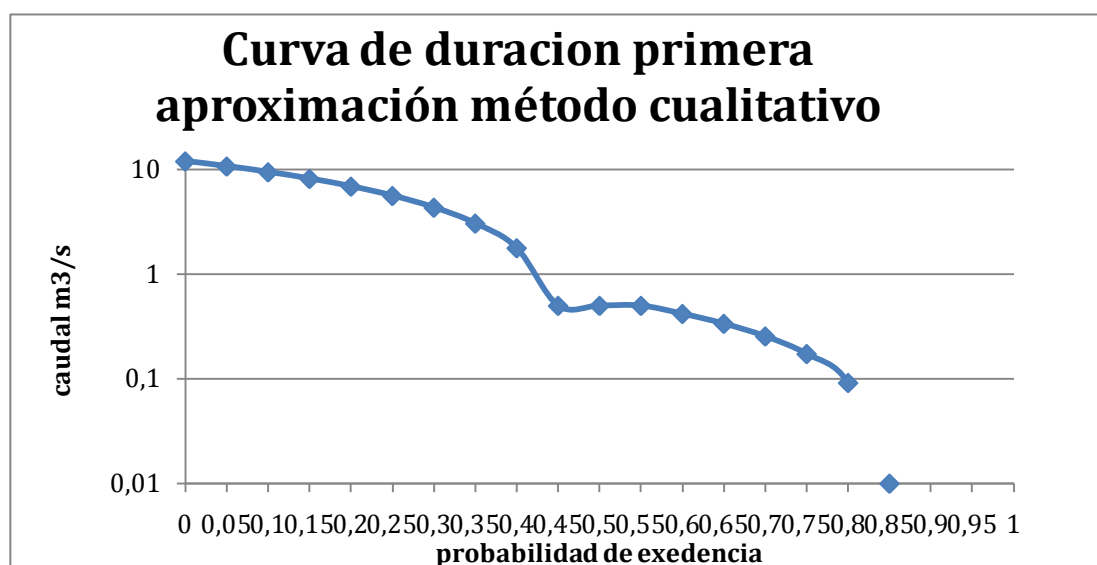


Figura 3.6 Curva de duración primera aproximación método cualitativo

Como se puede observar en la figura 3.6, la forma de la gráfica no es adecuada, ya que no tiene la forma característica de las curvas de duración. A continuación, se

buscaron nuevos valores de los valores arbitrarios con el fin de acomodar la forma a una más adecuada. Es importante anotar que los valores como el máximo, mínimo y la probabilidad de cero no fueron variados. En la tabla 3.3 se muestran los valores finales después de la manipulación para obtener una mejor curva.

Tabla 3.3 Probabilidad de excedencia y caudal datos completos corregido

caudal m <sup>3</sup> /s	Probabilidad de excedencia
10	0
1,5	0,05
1,23	0,1
1	0,15
0,7	0,2
0,63	0,25
0,6	0,3
0,57	0,35
0,53	0,4
0,51	0,45
0,5	0,5
0,45	0,55
0,4	0,6
0,38	0,65
0,35	0,7
0,3	0,75
0,2	0,8
0,05	0,85
0,01	0,9
	0,95
	1

Los valores de a tabla 3.3 se grafican para obtener una segunda iteración, que ahora sí cumple con las características de forma esperadas. En la figura 3.7 se muestra la nueva curva de duración.

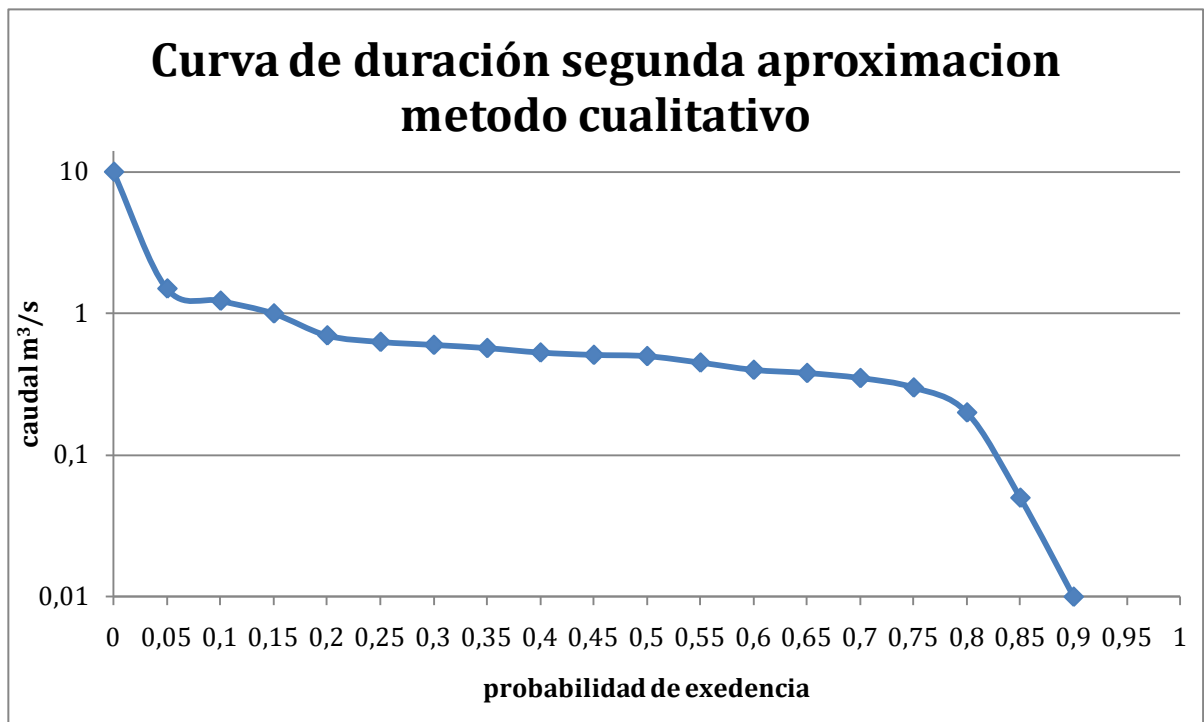


Figura 3.7 Curva de duración segunda aproximación método cualitativo

En la figura 3.8 se puede ver la comparación entre la curva de duración elaborada con los datos históricos de la estación (rojo) y la curva estimada con el método cualitativo. La buena aproximación del método estará en función exclusivamente del buen trabajo realizado en campo. Por ésta razón es importante el entendimiento de los métodos de entrevista para obtener los datos necesarios de manera precisa y lo mas exacta posible.

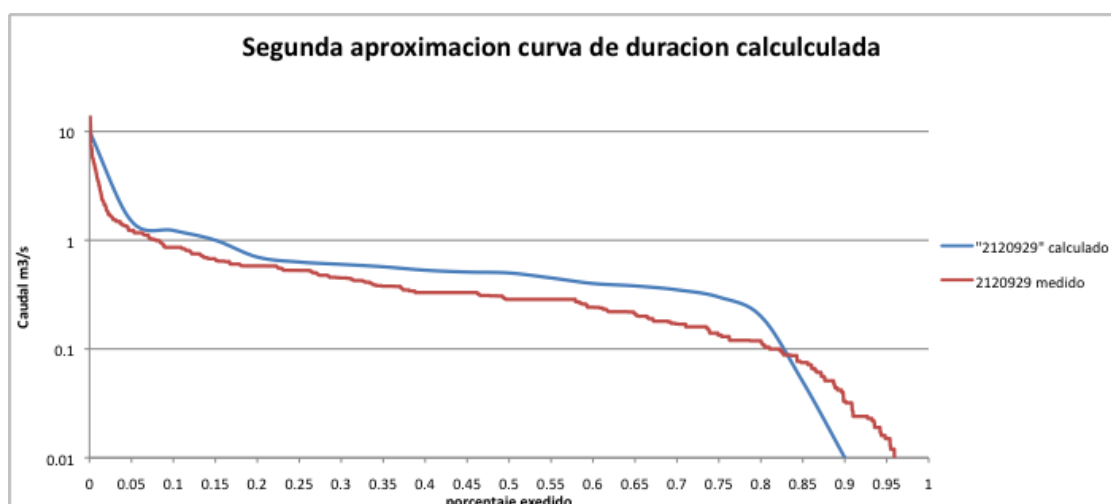


Figura 3.8 Segunda aproximación y curva de duración calculada

Para el caso de estudio se utilizaron maneras sencillas y rudimentarias para conocer los diferentes niveles de interés del flujo. En la figura 3.9 se muestra un esquema de una sección típica de río. Al hacer las entrevistas, el entrevistado explicaba hasta qué nivel llegaba el agua y mediante cálculos sencillos se pudo determinar el caudal. Esto se hizo para el máximo y el medio.

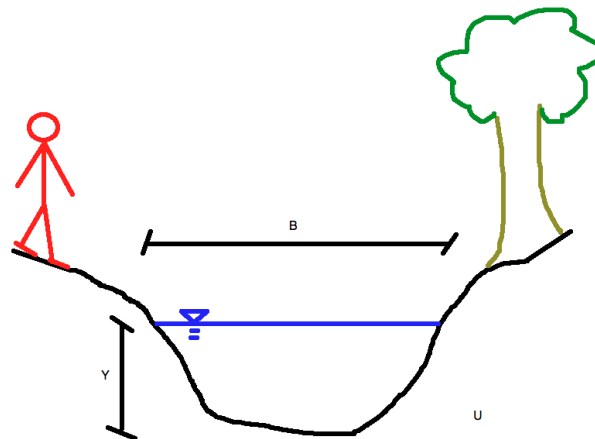


figura 3.9 perfil río

Como se puede medir el alto (Y) y ancho (B) y la velocidad (u) en un momento determinado, y para diferentes secciones del flujo, se puede encontrar el caudal ya que éste es:

$$Q=YBU \quad (18)$$

Otra manera para calcular el caudal que fluye (Chow, 2007) por una sección es suponiendo un n de Manning para rugosidad y utilizando la fórmula de Manning para encontrar la velocidad o el caudal, en función de la pendiente y el radio hidráulico

$$V = (1/n) * R^{2/3} * S^{1/2} \quad (19)$$

La ecuación de Manning es el resultado del proceso de un ajuste de curvas, y por tanto es completamente empírica en su naturaleza. Debido a su simplicidad de forma y a los resultados satisfactorios que arroja para aplicaciones prácticas, la

fórmula Manning es la más usada de todas las fórmulas de flujo uniforme para cálculos de flujo en canal abierto artificial o natural.(Chow, 2007)

Aplicando la fórmula Manning, la mayor dificultad reside en la determinación del coeficiente de rugosidad  $n$  pues no hay un método exacto para seleccionar un valor  $n$ .(Chow, 2007)

Para calcular entonces el coeficiente de rugosidad  $n$  se dispone de tablas (como la publicada por el U.S Department of Agriculture en 1955), y una serie de fotografías que muestran valores típicos del coeficiente  $n$  para un determinado tipo de canal.(Chow, 2007) En la tabla 3.4 se muestran los rangos típicos de valores para el coeficiente de rugosidad para canales naturales.

Tabla 3.4 coeficientes de escorrentía para diferentes condiciones (Chow, 2007)

Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lamina de agua suficiente	0,027-0,033
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lamina de agua suficiente, algo de vegetación	0,033-0,040
Limpias, meandros, embalses y remolinos de poca importancia	0,035-0,050
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados	0,060-0,080
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados, vegetación densa	0,100-0,200 <sup>1</sup>
Rugosas, corrientes en terreno rocoso de montaña	0,050-0,080
Áreas de inundación adyacentes al canal ordinario	0,030-0,200 <sup>1</sup>

Para modelar la curva de duración con tan solo datos de caudal máximo, medio, y probabilidad de que el flujo sea igual a cero, es necesario conocer cómo se comporta la curva en sus diferentes secciones. Para ello se graficaron curvas en su parte uniforme, para ver cómo es su comportamiento en esta zona. En la figura 3.9 se muestran las curvas de duración en un rango de probabilidad de excedencia de 15% a 80%.

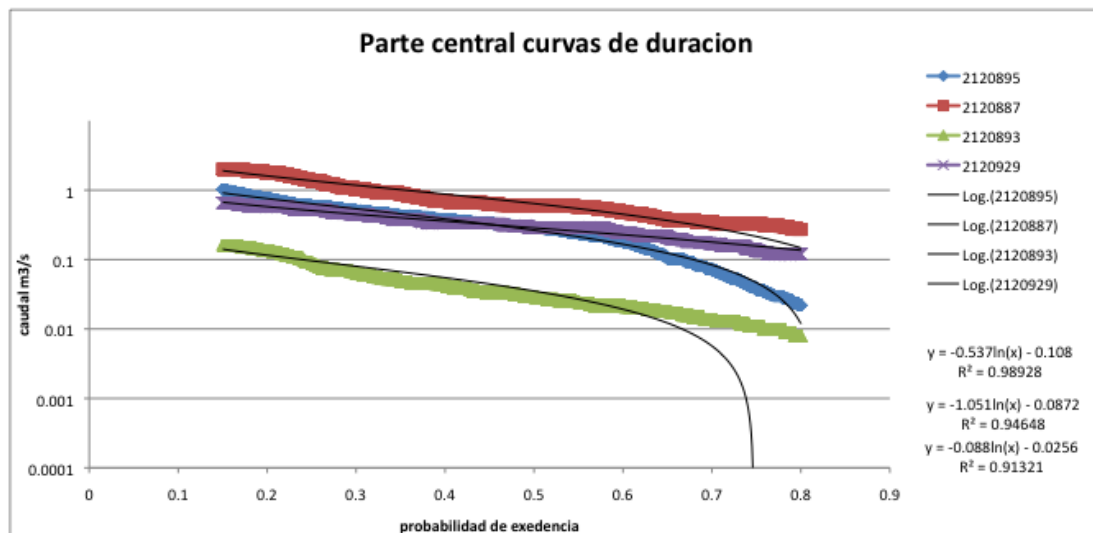
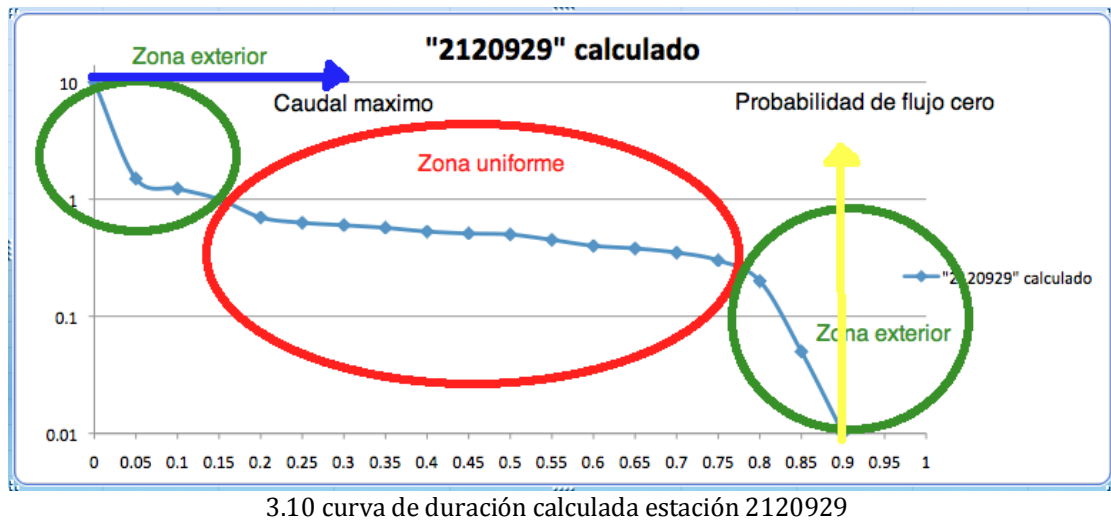


figura 3.9 parte central curvas de duración estaciones hidrológicas

La forma de la ecuación que mejor describe esta zona de la curva es  $Y = (a) \cdot \ln(x) - (b)$ . Siendo  $a$  y  $b$  coeficientes que dependen del tipo de flujo.  $(a)$  es la pendiente de la curva, que depende de la distribución de flujos y  $(b)$  es el intercepto, que depende de la tendencia al intercepto con el eje  $y$ . Solamente se puede modelar con estas ecuaciones la parte central de la curva. Las zonas con rango entre 100% y 80% y de 15% a 0%, muestran otro tipo de distribución, ya que los datos dejan de crecer y disminuir uniformemente y crecen y disminuyen con una pendiente mucho mayor para el resto de la curva. Para los otros dos intervalos de la curva, se debe realizar un ajuste suave desde el último punto de la parte uniforme hasta el caudal máximo en la parte de la izquierda, y hacia la derecha, desde el último punto hasta cero, interceptado en  $x$  la probabilidad de que el flujo sea de cero. En la figura 3.10 se muestra la gráfica realizada utilizando esta metodología.





Para el caso de estudio (estación 2120929), los coeficientes utilizados fueron  $a=0.537$  y  $b=0.108$  y comparando la curva resultante con la curva realizada con datos de estaciones, resultó un  $R^2$  de 0,989 para esta zona de la curva. En la figura 3.9 se muestran las aproximaciones a diferentes curvas de la parte central.

Como esta metodología no parte de información medida de ningún tipo, tiene una gran incertidumbre y solo es aconsejable utilizarla para proyectos que no requieran mucha precisión. Si bien en el caso de estudio la curva de duración resultó muy cercana a la curva calculada con los datos de la estación, tuvo una diferencia de 5% en la probabilidad de que el flujo se seque y difirió en el caudal máximo un 15 %.

Otra forma de describir la curva es cambiar las dos escalas por logarítmicas. En este caso la curva tendrá típicamente dos zonas, y un punto de inflexión. En la figura 3.11, se muestra la comparación de la curva calculada con los datos y con la metodología, dibujada en escala Log- Log.

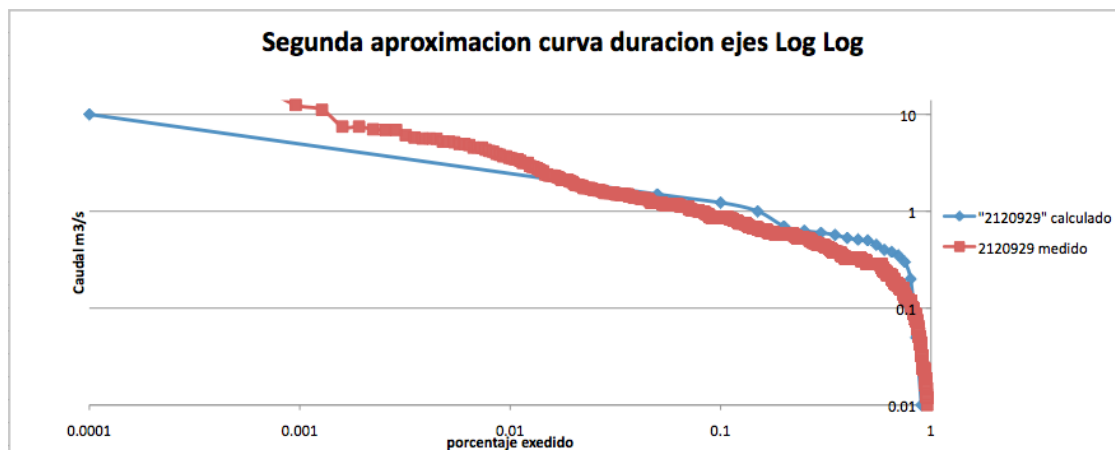


Figura 3.11 Segunda aproximación curva duración ejes Log- Log

Para hacer el ajuste, se puede hacer de la misma manera que se explicó anteriormente. La ventaja de este método es que gráficamente es mas fácil ver la diferencia entre las dos curvas realizadas. Es recomendable hacer el ajuste, teniendo escalas Logarítmicas en el eje del caudal y escala normal en el eje de los porcentajes, pero también dibujar este tipo de curva, simplemente para ver gráficamente de mejor forma las diferencias y similitudes.

## Determinación de FDC mediante el uso de información de precipitación

### Relación precipitación- esorrentía y método racional

Cuando no se cuenta con datos de estaciones en los flujos, es posible realizar las curvas de duración mediante datos de precipitación de la cuenca. También es importante conocer las características de la zona como el tipo de suelo y su capacidad drenante. (Croker Karen M, et Al, 2003)

Para realizar la primera aproximación se debe partir del método racional para pasar de lluvia a esorrentía. Este método supone una intensidad de lluvia uniforme "I". Para esto, se encontró la precipitación promedio mensual para cada estación de precipitación. En la tabla 3.5 se muestra la precipitación mensual por estaciones.

Tabla 3.5 Precipitación mensual por estaciones

Estación	mm mensuales promedio
2120635	169,6
2120184	126,8
2120641	94
2120190	102

A continuación, se supone que esta lluvia cae por completo de manera uniforme en la cuenca de área A. En la tabla 3.6 se muestra el área asociada de la cuenca tributaria para cada estación.

Tabla 3.6 Áreas cuencas

Estación	mm mensuales promedio	área cuenca
2120635	169,6	20
2120184	126,8	2,875
2120641	94	196,7
2120190	102	196,7

Suponiendo que toda la precipitación producirá escorrentía, el caudal de salida de la cuenca sería dado por la siguiente ecuación.

$$Q \text{ (m}^3\text{/hora)} = I \text{ (mm/hora)} \cdot 10^{-3} \cdot A \text{ (km}^2\text{)} \cdot 10^6 \quad (20)$$

En casos reales, nunca sucede que toda el agua que cae a la cuenca se convierte a escorrentía, ya que existen otros fenómenos como filtración y transpiración. Para casos reales no es sencillo realizar todo el modelo de balance hídrico y por eso puede utilizarse un coeficiente de escorrentía que indique qué tanta lluvia se convierte en flujo. La fórmula general para este cálculo es: (Ramon, Revisado 2010)

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (21)$$

Donde Q= Caudal, C es el coeficiente de escorrentía, típicamente varia de 0,2 a

0,7, I es la intensidad de la lluvia y A es el área de la cuenca tributaria.

Para tener una mejor idea de la respuesta de una cuenca pequeña, se pueden utilizar fórmulas empíricas que se basan en características físicas de la cuenca (superficie, pendiente media, longitud del cauce). Mediante estas formulaciones empíricas, se pueden realizar buenos ajustes a hidrogramas de la cuenca. Una de estas aproximaciones es la del SCS (Soil Conservation Service 2010).

El primer paso para realizar este tipo de metodología es calcular el tiempo de concentración, esto se puede realizar por medio de diferentes métodos, uno de ellos, la formula de Kirpich, en el cual el tiempo de concentración depende de la longitud del cauce y de la pendiente media del terreno.(Ramon, Revisado 2010)

$$t_c = 3,97 \cdot \left( \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \right) \quad (22)$$

Para el caso de estudio se midieron en mapa estas dos variables. En la tabla 3.7 se muestran los resultados.

Tabla 3.7 Propiedades de las cuenca: pendiente, longitud máxima y tiempo de concentración

Estacion	Pendiente media (m/m)	Longitud maxima (m)	Tiempo de concentracion(min)
2120635	0,454545455	20500	11237,60369
2120641	0,3	11375	8378,791931

En primer lugar se hace el hidrograma simplificado en forma de triángulo como se muestra en la figura 3.12. Mediante este hidrograma se obtienen parámetros fundamentales como el caudal punta (Qp), y el tiempo base (tb).(Ramon, Revisado 2010)

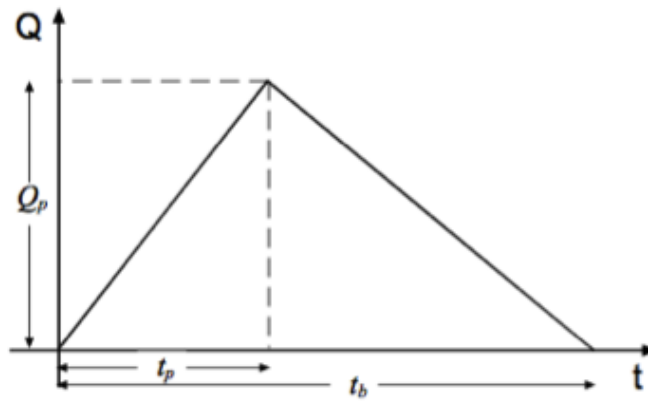


Figura 3.12 Hidrograma triangular (Ramon, Revisado 2010)

El tiempo en el que se produce la punta ( $t_p$ ):

Tabla 3.8 Fórmulas para aplicar el método racional (Ramon, Revisado 2010)

<p>Tiempo de la punta (horas):</p> $t_p = 0,5 \cdot D + 0,6 \cdot t_c$ <p>Tiempo base (horas):</p> $t_b = 2,67 \cdot t_p \quad (3)$ <p>Caudal de la punta (<math>\text{m}^3 / \text{seg.}</math>):</p> $Q_p = \frac{0,208 \cdot P \cdot A}{t_p} \quad (4)$	<p>Donde:</p> <p><math>t_c</math> = tiempo de concentración (horas)</p> <p><math>D</math> = Duración de la precipitación efectiva (horas)</p> <p><math>P</math> = precipitación efectiva (mm.)</p> <p><math>A</math> = superficie de la cuenca (<math>\text{km}^2</math>)</p>
--	---

Esta metodología tiene como restricción que solamente sirve para cuencas pequeñas y para sucesos cortos. Por esta razón se sale del marco general del presente documento y solo será comentado de manera general, para conocer cuales son las diferentes metodologías para problemas similares relacionados con la hidrología.

### Curvas de duración de precipitación

Se calcularon las curvas de duración con registros históricos mensuales de precipitación registradas en las estaciones climatológicas y pluviométricas del Anexo 1. Estas curvas se elaboraron como una primera aproximación, directamente con los datos suministrados por la entidad ambiental. En la figura 3.13 se muestran las curvas de duración de precipitación mensual.

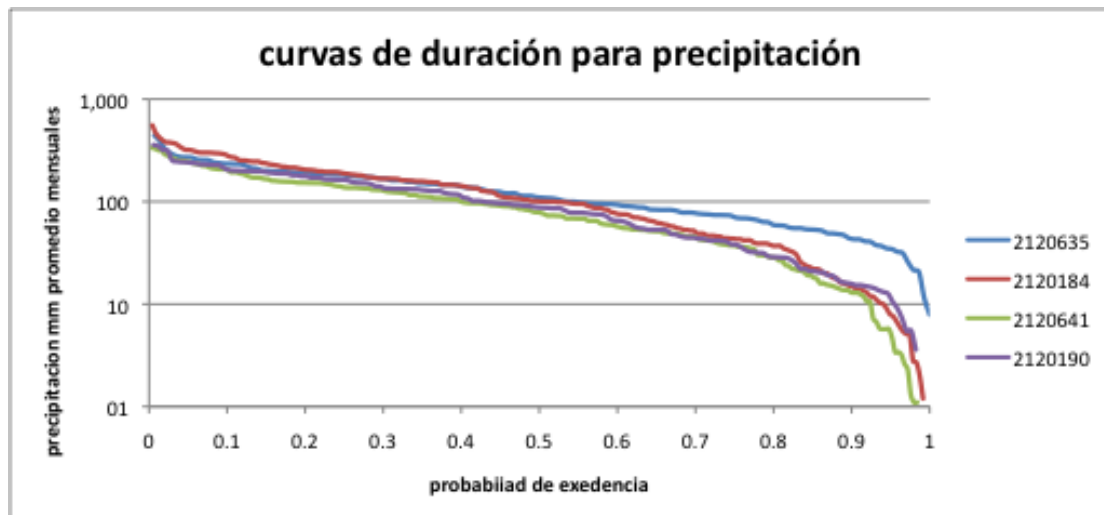


Figura 3.13 Curvas de duración de precipitación mensual

Al estar ubicadas todas las estaciones en lugares cercanos, dentro la misma cuenca (río Calandaima) es esperable que se presentara un comportamiento homogéneo entre las diferentes curvas.

Las curvas muestran probabilidad de que la precipitación mensual sea cero. Lo cual indica que puede haber meses enteros sin llover en esta zona, y que puede implicar que la cuenca se seque y los flujos de escorrentía cesen por algunos períodos.

Es de esperar que la probabilidad de cero sea mayor para el caso de la escorrentía que de la precipitación. Para un mismo nivel de agregación temporal de la información. Aunque Haya precipitación, ésta puede tomar otros destinos diferentes a la escorrentía superficial, como la transpiración y la infiltración entre otros. En la zona, los suelos fueron catalogados como bien drenados, lo cual incrementa la posibilidad de que la precipitación se infiltre, y las altas temperaturas de la zona (clima templado a cálido) generen condiciones de evaporación favorables.

Es posible, partiendo de la curva de duración de precipitación, estimar la curva de duración de escorrentía. Para esto, la primera aproximación realizada fue convertir toda la precipitación en caudal de a la salida de la cuenca, y con estos valores estimar la curva de duración y compararla con la curva de duración de escorrentía obtenida previamente de los registros históricos de caudal.

Para la estación de precipitación mostrada en la tabla 3.9. , su cuenca tributaria es de 2.875 km<sup>2</sup> como se muestra en la tabla. Con este dato, se obtiene el volumen de agua que cae sobre la cuenca, promedio mensual.

Tabla 3.9 Precipitación y área estación 2120184

Estación	mm mensuales promedio	área cuenca
2120184	126,8	2,875

Para convertir la altura de precipitación a volumen se utilizó la siguiente ecuación para encontrar el valor en metros cúbicos:

$$(\text{Volumen precipitación m}^3) = (\text{Precipitación en mm}) * (\text{Área cuenca en km}^2) * (1'000'000/1000) \quad (21)$$

Dado que las curvas de duración para escorrentía fueron obtenidas utilizando caudales expresados en m<sup>3</sup>/s, el volumen encontrado en metros cúbicos fue dividido en el tiempo en segundos de un mes.

$$(\text{Caudal m}^3/\text{s}) = (\text{Volumen precipitación m}^3) * (2592000 \text{ segundos}) \quad (22)$$

En la figura 3.14 se muestra la comparación de las curvas de duración para precipitación mensual expresada en m<sup>3</sup>/s y escorrentía de una misma cuenca.

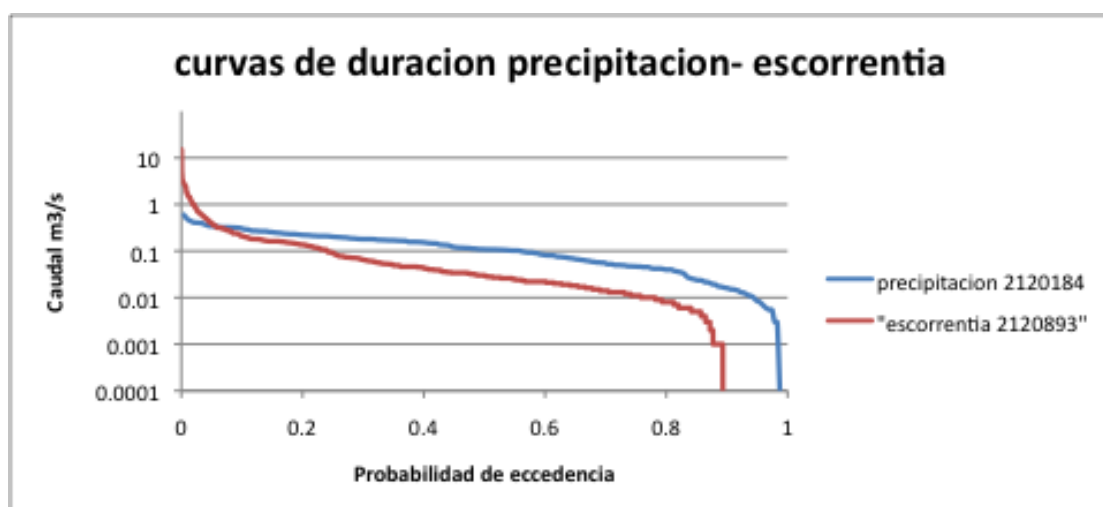


Figura 3.14 Curvas de duración precipitación y escorrentía

Como era de esperarse, la probabilidad de que el flujo fuera cero, es mayor en la escorrentía, puesto que mucha agua de la precipitación, no sale de la cuenca por este medio sino por otros, como infiltración y evaporación. Por esta misma razón, el caudal de precipitación es mas alto que el caudal de escorrentía, y esta diferencia debería ser la parte de lluvia que sale de la cuenca por otros medios. Además, los niveles de agregación de la información de precipitación de caudal son diferentes. Es posible que conociendo la diferencia de caudales entre precipitación y escorrentía, se obtenga el coeficiente de escorrentía y se pueda pasar de una forma sencilla de una curva a la otra.

En la figura 3.15, se muestra la aproximación lineal de la curva de duración de precipitación y de escorrentía, con el coeficiente que mejor ajustó la curva.

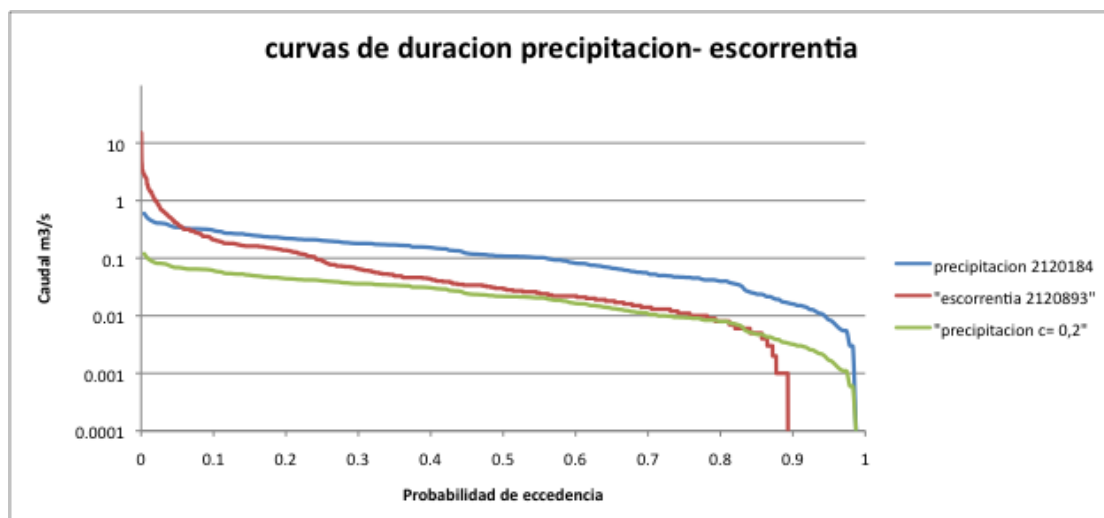


Figura 3.15 Curvas de duración precipitación - escorrentía

El coeficiente, solo mueve la curva de precipitación hacia arriba o hacia abajo puesto que multiplica los datos, por lo tanto los extremos de la curva de escorrentía, no son bien representados por la curva de precipitación utilizando el coeficiente. Para una mayor precisión es necesario utilizar otros métodos mas sofisticados que involucren factores de forma, este método, si bien ayuda a representar de manera adecuada la parte del medio de la curva y la pendiente, es deficiente en los extremos, y por lo tanto no es representativa de la curva entera. Para trabajos que requieran precisión no es un método adecuado.



### Método de curvas de duración de precipitación de Croker et al

Este método, requiere seguir una serie de pasos para la obtención de las curvas de duración partiendo de datos como el tipo de suelo y la precipitación de la cuenca tributaria.

1. Se identificó en un mapa la cuenca tributaria y se señaló el área, pendientes y tipo de suelo.



Figura 3.16 mapa de suelos de la cuenca

2. Se identificó en un mapa de suelos el tipo de suelo de la zona de la cuenca, y según la tabla 3.10, se asignó un BFI. En la tabla se muestran los tipos de suelos para cada parámetro. (Croker Karen M, et Al, 2003)

Tabla 3.10 Parámetros de suelos BFI (Croker Karen M, et Al, 2003)

Soil group	Constituent soil units Represented in gauged catchments	<i>BFI</i> parameter estimate
SOILGP1	Moderately well drained, weathered soils	<i>a</i> 0.517
SOILGP2	Fine textured, poorly drained soils on gentle slopes	<i>b</i> 0.169
SOILGP3	Medium well drained soils in level areas	<i>c</i> 0.401
SOILGP4	Well drained soil on gentle slopes	<i>d</i> 0.525
SOILGP5	Peaty and hydromorphic soils, poorly drained on gentle slopes	<i>e</i> 0.321

Según la tabla 2.2 el suelo en la zona es bien drenado y con pendientes medias. Por esto se asignó un BFI de 0.525 como se muestra en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 BFISOIL de la cuenca

BFISOIL	0,525
---------	-------

3. Se calculó el MAR (mean anual rain) de la cuenca. Este valor fue obtenido de diferentes estaciones de medición de precipitación cercanas a la zona. Esta información fue proveída por la CAR (Corporación Autónoma Regional) como se ve en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 MAR de la cuenca

MAR	119,1
-----	-------

4. Se determinó el  $Q_{80nz}$  para la cuenca usando los valores derivados de el drenaje del suelo y el MAR con la siguiente ecuación empírica. Esta relación es valida para las cuencas analizadas en Portugal. Y aunque para este caso se aplico directamente, se deben encontrar ecuaciones propias de cada zona

$$Q_{80nz} = BFISOIL^{1.258} MAR^{0.484} \quad (23)$$

y luego utilizando el  $Q_{80nz}$  como se muestra en la tabla 3.12, se buscó en la gráfica 3.17 la curva de duración estandarizada apropiada para el período que no es cero.

Tabla 3.12  $Q_{80nz}$  de la cuenca

$Q_{80nz}$	4,49
------------	------

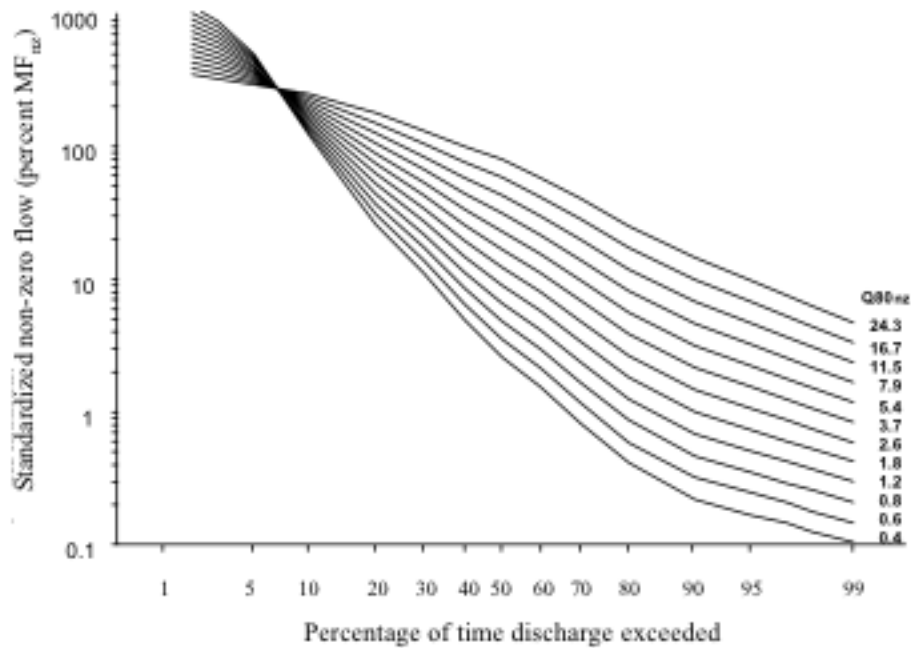


Figura 3.17 FDC para los flujos de no cero (Croker Karen M, et Al, 2003)

Este paso se realiza para calcular el  $SFDC_{nz}$

5. Usando la siguiente ecuación, se calculó la probabilidad de que el río se ponga seco ( $p_{dry}$ ) en el sitio de interés usando el MAR del paso 5. También se calculó  $p_{nz}$  como  $(1 - p_{dry})$

$$p_{dry} = 2.1 \times 10^8 MAR^{-3.158} \quad (24)$$

de esta manera se encontró  $p_{dry}$  y  $p_{nz}$ . En la tabla 3.13 se muestran los resultados para la cuenca estudiada.

Tabla 3.13  $p_{dry}$  y  $p_{nz}$

$p_{dry}$	58,4
$p_{nz}$	41,5

6. Transformar las probabilidades de la  $SFDC_{nz}$  usando la siguiente ecuación

$$p(i)_t = p(i)_{nz} p_{nz} \quad (25)$$

Luego con la siguiente ecuación, transformar la SFDCnz. Esto se realiza para determinar la curva de duración total. También se incorporó la teoría de probabilidad total

$$SQp(i)_t = SQp(i)_{nz}/p_{nz} \quad (26)$$

Este procedimiento fue utilizado en cuencas tanto efímeras como perennes en Portugal. En la figura 3.18 se muestra la curva de duración realizada con este procedimiento. Para el caso de la subcuenca del río Calandaima

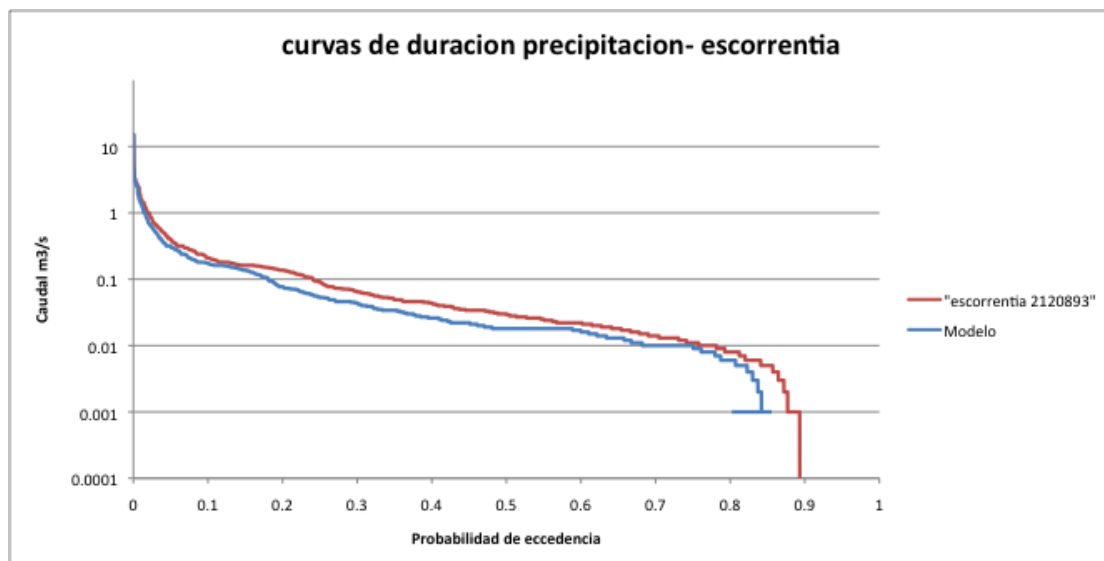


Figura 3. 18 Curvas de duración modelo y medidas

Este modelo se ajustó de una manera muy precisa a la curva de duración realizada con los datos de escorrentía. La zona de caudales altos (zona 1 de la gráfica) fue precisamente modelada como se puede apreciar en la figura 3.18, y la pendiente de la zona del medio de la curva también tuvo una pendiente y forma muy similar a la curva de escorrentía.

En la zona 2 de la curva, aunque la tendencia fue muy similar, el modelo no fue tan eficiente en encontrar la probabilidad de que el flujo fuera cero, con un error de el 5% en este aspecto. Esto se puede deber a que el modelo fue diseñado para cuencas del sur de Portugal que están por lo menos 2 meses enteros secos y en ocasiones solo en los meses de invierno presentan flujo. Ese no es el caso de las cuencas que se encuentran en la zona de estudio. Estas, pese a que sí pueden verse secas, no es un fenómeno tan habitual como en el sur de Portugal.

Este método resultó siendo el más preciso de todos, ya que fue el que mejor representó las curva de duración estudiada. El método también funciona para causas perennes, lo cual lo hace un procedimiento útil, pues su implementación es relativamente sencilla. Sin embargo es necesario desarrollar estudios adicionales que permitan estimar ecuaciones como la 23 y la 24 derivadas del contexto estudiado.

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se elaboraron en total 3 modelos para estimar la FDC de la cuenca del río Calandaima. Para esta cuenca existen 4 estaciones de medición de caudal que presentan flujos de cero en algún momento del año y la investigación se centró en métodos de estimación de sus curvas de duración, partiendo del hecho de que existe una probabilidad de que el río se seque en algún momento.

El primer modelo tuvo como objetivo estimar la curva de duración de caudal sin ningún tipo de información hidrológica previa. Este método se basó en indagaciones y encuestas realizadas en la zona. De esta forma, a partir de encuestas a pobladores de la zona se busco cuantificar algunos puntos de la FDC como el caudal máximo y el porcentaje de tiempo que el río se seca, entre otras cosas, y luego se realizaron mediciones en el cause, para aproximar su seccion transversal y estimar caudales. Este método arrojó como resultado una curva de duración no muy precisa pese a que se realizo un adecuado trabajo de campo. En la figura 4.1 se muestra la curva de duración estimada por esta metodología y la obtenida con datos históricos de caudal.

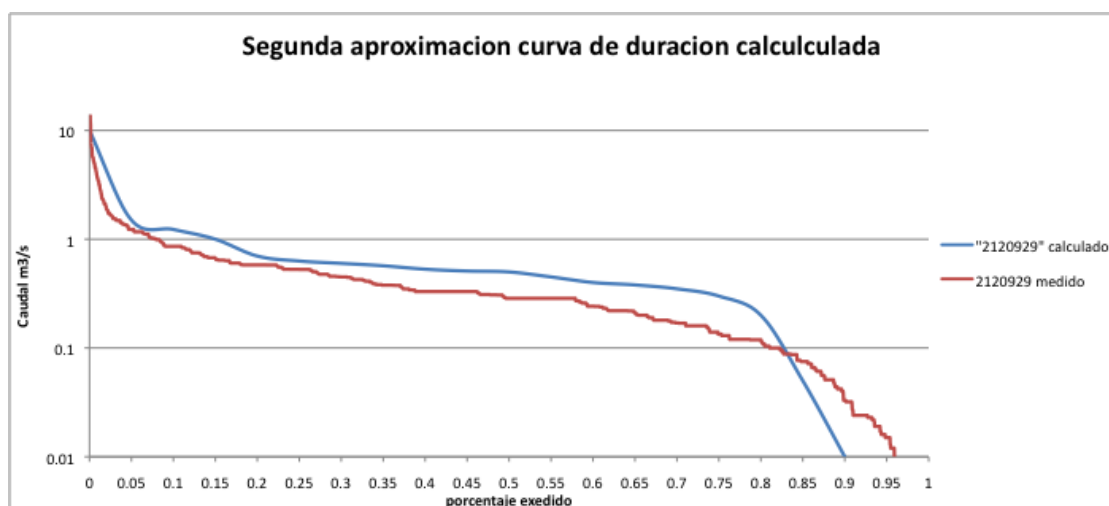


Figura 4.1 Curva de duración método cualitativo de entrevistas.

Este método tiene 2 inconvenientes: requiere trabajo de campo el cual debe ser supervisado por especialistas a la hora de hacer encuestas y preguntas e intenta

medir un fenómeno partiendo de una opinión, lo cual puede hacer que los resultados sean sesgados. Por otra parte este método requiere que el ingeniero que haga una estimación simplificada del flujo como se ilustra antes en el presente documento. La exactitud del modelo depende entonces de qué tan precisa sea la información suministrada por los ribereños y de qué tan preciso sean las mediciones del campo y los estimativos de caudales.

Como este procedimiento no parte de información histórica de ningún tipo, tiene una gran incertidumbre y solo es aconsejable utilizarla para estudios que puedan presentar altas incertidumbres. Si bien en el caso de estudio la curva de duración resultó muy cercana a la curva obtenida con los registros históricos de la estación, tuvo una diferencia de 5% en la probabilidad de que el flujo se seque y difirió en el caudal máximo en un 15 %.

La segunda metodología aplicada utilizó un coeficiente de escorrentía, para convertir la FDC de precipitación mensual en la FDC de caudal diario, restandole el agua que sale por otros medios como evaporación e infiltración. Esta metodología, además de datos de estaciones de lluvia, también requiere conocer área de la cuenca tributaria. Es importante encontrar este dato de manera precisa para poder convertir de mejor manera la precipitación en caudal.

Esta metodología simplemente multiplica el valor de la precipitación (expresada en  $\text{m}^3/\text{s}$  por ejemplo) por un coeficiente, que puede variar de 0,2 a 0,7 (Ramon, Revisado 2010) para convertir la curva de duración de precipitación a curva de duración de caudal. Así, tiene en cuenta las pérdidas o abstracciones de agua en la cuenca.

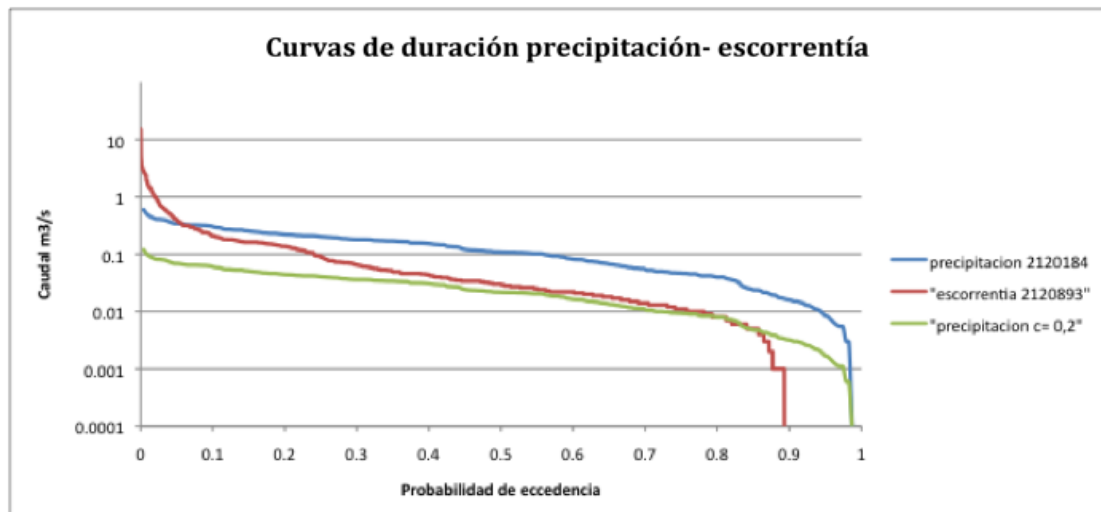


Figura 4.2 Curvas de duración método de coeficiente de escorrentía

En la figura 4.2 se muestra la FDC estimada con esta metodología y se compara con la curva de duración de la cuenca.

Como era de esperarse (dados los registros mensuales de precipitación y diarios de escorrentía), la probabilidad de que el flujo sea cero es mayor en la escorrentía, puesto que una porción de la precipitación no sale de la cuenca por escorrentía sino infiltración y evaporación entre otros. Por esta misma razón, el volumen de precipitación es mayor que el de escorrentía, y esta diferencia debe ser la porción la porción de lluvia que sale de la cuenca por otros medios. Es posible entonces que estimando la diferencia de relación entre escorrentía y precipitación, obtener el coeficiente de escorrentía y pasar de una forma sencilla lineal de una curva a la otra.

En la figura 4.2, se muestra la FDC estimada a partir de la FDC de precipitación y , con el coeficiente que mejor ajustó la curva.

El coeficiente solo mueve la curva de precipitación hacia arriba o hacia abajo pues es un factor lineal, y por lo tanto los extremos de la FDC de escorrentía, no son bien representados. Para una mayor precisión sería necesario utilizar factores de forma no lineales. Este método si bien ayuda a representar de manera adecuada la parte del medio de la curva y la pendiente, es deficiente en los extremos, y por lo tanto no es representativa de la curva entera puesto que



no representa de manera adecuada las crecidas más grandes. Para trabajos que requieran precisión, no es un método adecuado.

El tercer método implementado, consistió en combinar dos modelos: el primero sirve para predecir el porcentaje de tiempo que el río está seco y el segundo para predecir la FDC para los períodos en que el cauce tiene flujo, usando curvas generales de duración (su sigla en inglés TC). (Crocker Karen M, et Al, 2003)

Las FDC representan los flujos que ocurren entre 0 y  $pnz$ ; ya que  $pnz$  es la probabilidad excedente de que el flujo sea cero. En un cauce perenne,  $pnz = 1$  y en una cuenca intermitente,  $pnz < 1$ . Para graficar las FDC tanto de los cauces perennes como intermitentes, es necesario reescalar el intervalo  $(0, pnz)$  para que cubra el intervalo  $(0, 1)$ . Esto se puede hacer transformando los componentes del flujo  $(i=1, n)$  de la  $DFC_{nz}$  estandarizada.

Este método requiere información de suelos de la cuenca, así como también áreas tributarias y tipo de drenaje. También usa ecuaciones empíricas las cuales es necesario derivar para la propia región dependiendo el caso.

En la figura 4.3 se muestra la curva de duración estimada por medio de este modelo.

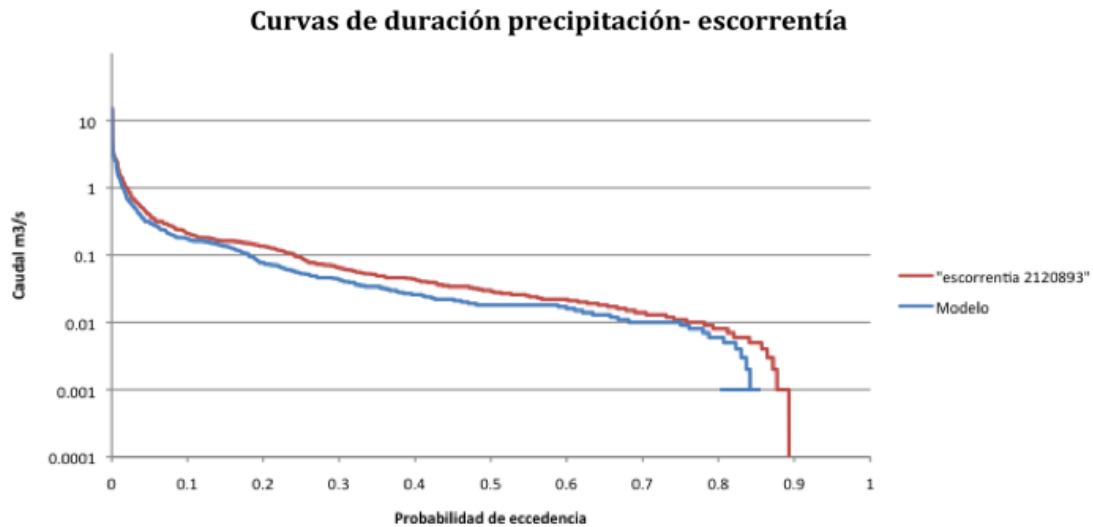


Figura 4.3 Curvas de duración modelo probabilidad total

Como se puede ver en la figura 4.3, este modelo fue el que mejor describió la curva de duración de la cuenca, es el que mejor representó las curvas de duración estudiadas y es claramente aplicable a causas perennes como intermitentes, lo cual lo hace un procedimiento robusto y práctico, aunque se basa en algunas ecuaciones empíricas que es necesario derivar para la región específica de estudio.

Este método requiere datos confiables de los tipos de suelo, tamaño de cuenca y promedio de lluvias de la zona. Muchos países han venido adelantando trabajos de obtención de datos geográficos, por lo cual no debería ser muy difícil encontrar la información necesaria para implementar esta metodología.

## 5. CONCLUSIONES

Existen diferentes métodos para estimar las curvas de duración de caudal. Estos métodos pueden ser muy útiles en casos en que no se cuente con la información histórica necesaria de la cuenca. Cada metodología necesita un tipo distinto de información y genera curvas de duración de precisiones diferentes. Entre menos burdo sea el modelo, la curva modelada tenderá a ser más cercana a la curva real, dado que se tienen en cuenta más factores que influyen en el comportamiento de las mismas.

En el caso de la metodología propuesta basándose en entrevistas y encuestas a los habitantes de la rivera sobre el régimen de caudales en el cause, es indispensable hacer un muy buen y responsable trabajo de campo.

La preparación de las encuestas deben apoyarse en bases conceptuales robustas para la ejecución de entrevistas ya que se está midiendo un fenómeno con una opinión, lo cual es bastante difícil de hacer. En este trabajo se desarrolló e implementó una entrevista semiestructurada y en el desarrollo de las entrevistas se recomienda que este presente un ingeniero con conocimientos básicos de hidráulica e hidrológica para que la información que se quiere obtener sea adecuadamente suministrada por el entrevistado. Este método puede llegar a presentar una aproximación aceptable para algunos casos de estudio pero solo se recomienda su uso cuando no se pueda realizar ninguna de las otras metodologías. Es decir, cuando no se cuente con ningún tipo de información de la zona.

La metodología propuesta utilizando el coeficiente de escurrimiento es una aproximación gruesa. Este método, si bien puede llegar a representar bien la pendiente central de la curva, no muestra un buen comportamiento para caudales altos o bajos, ya que no se tienen en cuenta las crecidas más grandes y puede no ser acertado en el porcentaje en el que el flujo se seca, en el caso de los causes intermitentes. Este método necesita como datos de entrada registros de precipitación en la cuenca, y el área de la misma. Estos datos son comunes en la

mayoría de lugares y es muy sencillo de implementar, por lo cual puede ser utilizado en casos en los que no se cuente con la información necesaria para aplicar otros modelos.

La metodología de probabilidad total usa el valor medio anual de precipitación en la cuenca, su área tributaria, tipos de suelos, drenaje y pendiente de esta. Implementar esta metodología, por ser menos simple, es mas dispendiosa y requiere alguna información que no siempre esta disponible, como el tipo de drenaje de la zona. Sin embargo requiere usar ecuaciones empíricas propias de la zona. Aun así ese tipo de metodología modela de mejor manera la curva de duración. Esta herramienta puede ser muy útil para estimar las FDC, si se tienen todos los datos de entrada requeridos. Además también sirve para con régimen de flujo perenne

En la tabla 5.1 se muestra la comparación de los diferentes modelos partiendo de los criterios de evaluación más importantes y resumiendo las conclusiones. Se enfatiza que la calificación de la calidad del modelo es específica para el caso de estudio analizado.

Tabla 5.1 comparación modelos

		Items de evaluación de modelos		
		Complejidad implementación	Calidad modelo	Datos de entrada
<b>Metodologías</b>	<b>Cualitativo</b>	Media	Baja	Baja
	<b>Coefficiente escurrentia</b>	Baja	Media	Media alta
	<b>Probabilidad total</b>	Media Alta	Media Alta	Media alta

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V. (2007). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Cigizoglu, H. K. (2002 йил febrero). Bivariate stochastic modelling of ephemeral streamflow. *Wiley InterScience* .
- Codazzi, I. G. (Revisado Septiembre 2010). *Estudio de suelos cundinamarca*.
- Croker Karen M, et Al. (2003 йил Junio). Flow duration curve estimation in ephemeral catchments in Portugal. *Hydrological Sciences Journal* .
- Giraldo, E. (2007). *La Entrevista Semiestructurada como Instrumento clave en Investigación*. From <http://periciapscojuridica.zoomblog.com/archivo/2007/08/22/entrevista-Semiestructurada-en-Investi.html>
- Medina, G. (2010). *Hidrologia general*. From <http://www.oocities.com/gsilvam/hidrologia.htm>.
- Post, D. A. *A New Method for Estimating Flow Duration Curves : an Application to the Burdekin River Catchment, North Queensland, Australia*. CSIRO Land and Water.
- Ramon, J. S. (Revisado 2010). *Relacion Precipitacion- escorrentia*. Universidad de Salamanca, Departamento de geologia.
- Rianna, M. (2010 йил mayo). USING THE STOCHASTIC INDEX METHOD FOR CALCULATION OF FLOW DURATION CURVES ON EPHEMERAL BASINS. *International Workshop ADVANCES IN STATISTICAL HYDROLOGY* .
- Río Calandaima, Cundinamarca, Colombia. (2010). From travelingluck: [http://travelingluck.com/South+America/Colombia/Cundinamarca/\\_3687968\\_R%C3%ADo+Calandaima.html#local\\_map](http://travelingluck.com/South+America/Colombia/Cundinamarca/_3687968_R%C3%ADo+Calandaima.html#local_map)
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. (revisado 2010). *Horario de verano en el mundo*. From [http://es.wikipedia.org/wiki/Horario\\_de\\_verano\\_en\\_el\\_mundo](http://es.wikipedia.org/wiki/Horario_de_verano_en_el_mundo)

## 7. ANEXOS

### Anexo 1: Tabla información estaciones utilizadas

Código Estación	Nombre	Tipo	Latitud	Longitud	Elevación	Municipio	Corriente	Cuenca	Instalación
2120635	Los Lagos	Precipitación	0430 N	7426 W	2000 M.S.N.M	Viotá	R Calandaima	R Calandaima	01/8/92
2120184	Lago del Indio	Precipitación	0424 N	7428 W	2050 M.S.N.M	Viotá	R Calandaima	R Calandaima	01/5/93
2120641	Esc Samper Madrid	Precipitación	0431 N	7435 W	550 M.S.N.M	Viotá	R Calandaima	R Calandaima	01/4/91
2120190	Colegio Jose de Caldas	Precipitación	0427 N	7432 W	400 M.S.N.M	Viotá	R Calandaima	R Calandaima	01/4/91
2120895	La Pola	Hidrometrica	0428 N	7438 W	1120 M.S.N.M	Viotá	R Lindo	R Calandaima	01/1/87
2120889	Pueblo de Piedra	Hidrometrica	0428 N	7430 W	610 M.S.N.M	Viotá	R Calandaima	R Calandaima	01/4/90
2120929	El Triunfo	Hidrometrica	0432 N	7429 W	940 M.S.N.M	Viotá	Q Campos	R Calandaima	01/2/94
2120893	Puerto Brasil	Hidrometrica	0424 N	7429 W	1170 M.S.N.M	Viotá	Q La Mona	R Calandaima	01/8/88

### Anexo 2: Porcentaje de datos estación 2120893

Año	Porcentaje de datos
1991	0,991780822
1992	0,821917808
1993	0,512328767
1994	0,808219178
1995	0,989041096
1996	0,991780822
1997	1
1998	1
1999	0,95890411
2000	0,835616438
2001	0,769863014
2004	1
2005	1
2006	0,997260274
2007	0,8
2008	0,917808219
2009	0,923287671

### Anexo 3: Formato entrevistas

Dispone de tiempo para ser entrevistado?

Mucho	Poco
-------	------

Vive hace mucho tiempo en la zona?

---

---

---

---

Conoce Alguna actividad que modifique la condición del Río?

---

---

---

---

Esta Actividad hace que el río se seque?

---

---

---

---

El Rio se seca en alguna temporada del año?

---

---

---

---

En un punto determinado, hasta donde sube el agua?

---

---

---

---

Que tan frecuente es que llegue el agua a ese punto?

---

---

---

---

En que punto esta el agua normalmente?

---

---

---

---

En que temporada se seca el Río?

---

---

---

---

En que meses se seca el río?

---

---

---

---

Esto sucede todos los años?

---

---

---

---



