



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN  
LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

**ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA  
EL CÁLCULO DE CAUDALES EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO  
MAGDALENA.**

**PRESENTA:**

**CARLOS ANDRES PEREZ JIMENEZ – 20122279007**

**LAURA MELISSA PRADA GARCÍA - 20122279008**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS  
FACULTAD TECNOLÓGICA  
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERIA CIVIL  
BOGOTA D.C  
2015**



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN  
LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

**ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA  
EL CÁLCULO DE CAUDALES EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO  
MAGDALENA.**

**AUTORES:**

**CARLOS ANDRES PEREZ JIMENEZ – 20122279007**

**LAURA MELISSA PRADA GARCÍA - 20122279008**

**TRABAJO DE GRADO  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR:**

**ING. EDUARDO ZAMUDIO HUERTAS**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS  
FACULTAD TECNOLÓGICA  
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERIA CIVIL  
BOGOTA D.C  
2015**



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

EL trabajo de grado titulado: ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA, de los autores Carlos Andrés Pérez Jiménez y Laura Melissa Prada García, cumple con los requisitos para optar al título de Ingeniero Civil.

---

**Firma Tutor**

---

**Firma jurado**

---

**Firma jurado**

**BOGOTA D.C, Mayo de 2015**



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este Trabajo de Grado es el resumen del esfuerzo que hicieron muchas personas durante el tiempo que estuve estudiando Ingeniería Civil. Por esta razón, me gustaría agradecer a todos ellos que me apoyaron y estuvieron conmigo durante este proceso. Le agradezco enormemente a:

- Mi familia y amigos, por su apoyo incondicional.
- Ingeniero Eduardo Zamudio Huertas, por su gran aporte en este trabajo y su paciencia durante todo este tiempo.
- A cada uno de los maestros que tuve a lo largo de la carrera.

A todos los mencionados y a los que de pronto se me olvidó mencionar, sólo les puedo decir:

Muchas Gracias.



## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	10
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	10
3. MARCO DE REFERENCIA.....	11
3.1. MARCO CONCEPTUAL.....	11
3.2. MARCO TEÓRICO.....	15
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	18
4.1. DATOS DEL ESTUDIO.....	20
5. METODOLOGÍA.....	22
5.1. CAUDALES MINIMOS Y MAXIMOS MENSUALES.....	23
5.2. CAUDALES MEDIOS DIARIOS.....	27
6. RESULTADOS.....	33
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS.....	51

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-Afluentes del rio magdalena para la cuenca baja.....	19
Ilustración 2-Ubicación estaciones de la cuenca baja del Magdalena.....	21



## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1- Línea de tendencia entre los caudales calculados por transferencia y los caudales medidos por el IDEAM, de la estación LA MINA a la estación GRACIAS A DIOS.....	11
Gráfica 2-Correlación no perfecta .....	13
Gráfica 3-Correlación perfecta directa .....	13
Gráfica 4-Modelos no lineales.....	15
Gráfica 5-Perfil del rio magdalena.....	19
Gráfica 6- Tendencia entre la relación de caudales sobre área .....	24
Gráfica 7-Hidrogramas Específicos para Q. min mensuales.....	24
Gráfica 8-Comparación de Caudales máximos mensuales encontrados para Estación La mina con estación Gracias a Dios como índice.....	26
Gráfica 9-Coeficiente de Determinación de La mina con estación índice Gracias a Dios.....	26
Gráfica 10-Hidrograma Específico Estación Cantaclaro para Q, mínimos mensuales.....	28
Gráfica 11-Hidrogramas Específicos para Q, medios diarios.....	29
Gráfica 12-Tendencia entre la relación de caudales sobre área .....	30
Gráfica 13-Comparación de Caudales Medios diarios encontrados para Estación Calamar con estación Magangue Esperanza como índice. ....	32
Gráfica 14-Relación de estaciones GRUPO 1: río Magdalena .....	39
Gráfica 15-Relación de estaciones GRUPO 2: río Fundación .....	39
Gráfica 16-Relación de estaciones GRUPO 3: río Cesar.....	40
Gráfica 17-Relación de estaciones GRUPO 1: río Magdalena .....	42
Gráfica 18-Relación de estaciones GRUPO 2: río Fundación .....	42
Gráfica 19-Relación de estaciones GRUPO 3: río Cesar.....	43
Gráfica 20-Grupo 1: Relación de estaciones por similitud hidrográfica.....	45
Gráfica 21-Grupo 2: Relación de estaciones por similitud hidrográfica.....	45
Gráfica 22-Grupo 3: Relación de estaciones por similitud hidrográfica.....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-Valores referenciales del criterio de Nash .....	14
Tabla 2-Datos de estaciones hidrológicas .....	20
Tabla 3 - Caudales calculados para la mina con estación índice gracias a dios (Q. Max.).....	25



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN  
LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

tabla 4 – Caudales Específicos medios diarios multianuales (m <sup>3</sup> /s) estación cantaclaro .....	27
tabla 5- Transferencia de caudales de cantaclaro a el banco .....	30
tabla 6 - Caudales máximos mensuales .....	33
tabla 7 - Caudales mínimos mensuales .....	34
tabla 8 - Caudales medios diarios .....	35
Tabla 9-Transferencia de caudales medios diarios .....	37
Tabla 10-Clasificación de estaciones por afluente .....	38
Tabla 11-Transferencia de caudales maximos mensuales .....	41
Tabla 12-Transferencia de caudales mínimos .....	44



## 1. INTRODUCCIÓN

La cuenca baja del río Magdalena-Cauca cuenta con un área aproximada de 73.300 km<sup>2</sup>, se caracteriza por la presencia de amplias zonas cenagosas, riqueza ictiológica y la riqueza de un valle aluvial. Está comprendida desde El Banco hasta la desembocadura del río en Bocas de Ceniza y la bahía de Cartagena. A pesar de ser una zona extensa y rodeada por agua, estudios muestran que Las menores coberturas de acueducto y saneamiento básico se localizan en las macrorregiones de Sincelejo, Magangué, Santa Marta y Cartagena, todas pertenecientes a esta cuenca. De esta situación, se genera la intención de estimar ecuaciones de transferencia para calcular caudales en sectores que no se encuentren dentro del área de aferencia de las estaciones hidrológicas existentes y por consiguiente no cuenten con esta información. Obtener un medio que permita el cálculo caudales es de gran importancia, ya que esta información es la base de algunos proyectos de ingeniería como gestión de sequías, embalses, captaciones, acueductos, sistemas de riego, restauración de cauces, además de otras actividades como cuidar las necesidades de la vida acuática (proyectos de ordenación pesquera), evaluaciones de vulnerabilidad, conservación de bosques, entre otros.

La estimación de ecuaciones corresponde a una simulación estadística que permita para calcular caudales en estaciones no instrumentadas o no medidas que por algún motivo no cuenten con estos datos. Para esto, se seleccionaron 13 estaciones hidrológicas localizadas en distintos lugares de la cuenca, pasando por departamentos como Bolívar, cesar y Magdalena, estaciones que han sido debidamente monitoreadas, medidas y por consiguiente se conoce su información. Conociendo lo anterior, se solicitaron datos de caudales medios diarios, caudales máximos mensuales y caudales mínimos mensuales a la entidad encargada, para este caso el IDEAM, que permitieron a través de un hidrograma, describir detalladamente el comportamiento del caudal de cada estación mes a mes o día a día según el caso.

Para continuar con el estudio, conociendo ya la información de los caudales del área aferente a cada estación, se selecciona una estación como índice, lo cual significa que a partir de esa estación seleccionada se transferirán caudales a las demás estaciones. Para esto, se usaron 5 ecuaciones; 3 procedentes del artículo Estimación de caudal y asociada geometría hidráulica, en la región del medio Atlántico, EE.UU de la revista de la Asociación americana de los recursos hídricos





ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

y dos ecuaciones más basadas en una de las nombradas anteriormente, con la diferencia que llevan un exponente (uno calculado y otro iterado) que permite una mayor precisión de los datos hallados.

La intención de utilizar 5 ecuaciones es calcular para cada una de las estaciones 5 caudales usando los datos ya conocidos de la estación índice (caudal y área de drenaje) y comparar cuál de ellos presenta mayor similitud con los caudales medidos por el IDEAM. Dicha comparación es efectuada inicialmente visualizando el error de cada uno de los datos y a su vez, un promedio de todos ellos. Luego de esto, al grupo de datos que presenten un error promedio menor, se le efectúa una comparación más sigilosa usando el método de mínimos cuadrados y encontrando el coeficiente de determinación de los datos. Para los caudales medios diarios se halló el coeficiente de Nash en vez del coeficiente de determinación. Este proceso se repite seleccionando cada una de estaciones como índice y transfiriendo caudales de la misma manera.

Al haber transferido caudales a todas las estaciones, siendo cada una de ellas estación índice, se encuentra que no es posible encontrar un exponente “n” regional único para la cuenca, por consiguiente, existirán tantas ecuaciones como “n” se hallan generado. Para realizar la transferencia es de vital importancia contar con las tablas 10 (caudales medios diarios), tabla 12 (caudales máximos mensuales) y tabla 13 (caudales mínimos mensuales), ya que ellas establecen el valor del exponente que se debe reemplazar en la ecuación de transferencia y la relación de área para la cual se puede utilizar.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar ecuaciones para calcular caudales en zonas no medidas de la cuenca baja del río Magdalena a partir de la información existente de estaciones hidrológicas por medio del método de transferencia hidrológica.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Evaluar los ambientes hidrológicos de las cuencas aferentes a las estaciones hidrológicas seleccionadas en el estudio con el fin de encontrar similitud entre ellas.
- Encontrar relaciones que permitan explicar el uso de los exponentes “n” para transferir caudales a zonas no medidas.
- Validar los caudales resultantes de cada una de las ecuaciones de transferencia planteadas comparándolos con los caudales medidos por el IDEAM.



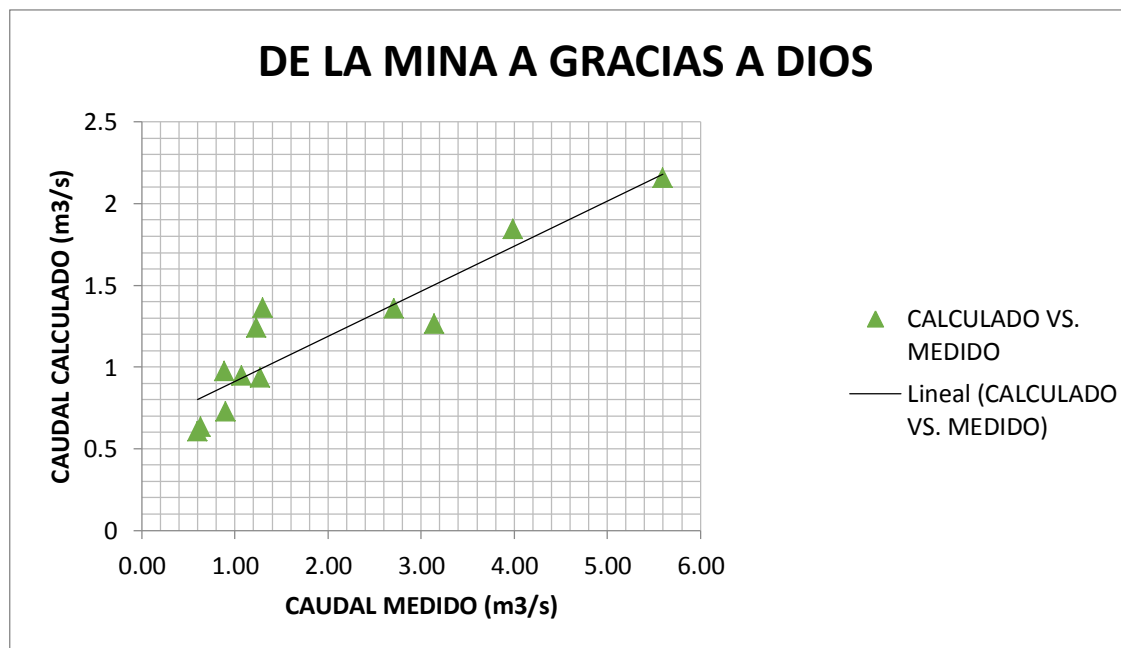
ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

### 3. MARCO DE REFERENCIA

#### 3.1. MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo de las ecuaciones de transferencia, se deben conocer ciertos conceptos claves los cuales ayudaran a cumplir con el objetivo de esta investigación; a partir de estos, se podrá determinar y calibrar la ecuación necesaria para estimar los caudales no medidos en la cuenca baja del rio Magdalena.

**Regresión lineal:** Es una técnica estadística que permite la predicción del comportamiento de una variable respecto a otra (M. Ross, 2007),  $y = ax + b$  (ecuación lineal), donde “a” es la pendiente de la recta, “b” el intercepto con el eje de las ordenadas, “x” la variable independiente y “y” la variable dependiente; existen dos métodos para desarrollar la regresión lineal, para definir la línea recta con la cual se ajustan mejor los datos (ver gráfica 1), el método de la covarianza y el método de mínimos cuadrados.



Gráfica 1- Línea de tendencia entre los caudales calculados por transferencia y los caudales medidos por el IDEAM, de la estación LA MINA a la estación GRACIAS A DIOS



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

**Método de la covarianza:** Requiere que sea calculada la covarianza (Ecuación 1) entre las variables “x,y” y el cuadrado de la desviación estándar (Ecuación 2) para determinar la pendiente de la recta (Ecuación 3), de esta forma:

$$S_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$a = \frac{S_{xy}}{\sigma^2} \quad (3)$$

Una vez calculada la pendiente se procede a encontrar el intercepto “b”, para esto aplicamos la ecuación de la recta reemplazando las variables “x,y” por “ $\bar{x}, \bar{y}$ ”; la razón del cambio de variables se debe a que la pendiente es constante a lo largo de toda la recta, y como las medias de cada variable son conocidas, entonces “b” será igual a (Ecuación 4):

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (4)$$

Con los dos valores calculados “a,b” ya se puede establecer la ecuación de la línea recta que sirve de patrón para el ajuste de la nube de puntos.

**Método de mínimos cuadrados:** Es el método más efectivo para determinar la línea de tendencia en una nube de puntos, es decir, permite representar un grupo de datos mediante una sola función lineal que mejor se ajuste al total de mediciones; su procedimiento consiste en minimizar la suma de los cuadrados de las distancias verticales que hay entre los puntos de los datos observados y los puntos de la línea de ajuste, dicha distancia entre los puntos mencionados recibe el nombre de residuo.

El método de los mínimos cuadrados determina los valores de la pendiente “a” y el intercepto “b” de la recta que mejor se ajusta a los datos experimentales; los errores en las medidas se traducirán en errores de los resultados de “a” y “b” y de esta forma La pendiente de la recta se escribirá  $a \pm \Delta a$ , y la ordenada en el origen  $b \pm \Delta b$  (Torrelavega) (Ver ecuaciones 5,6 y 7).



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

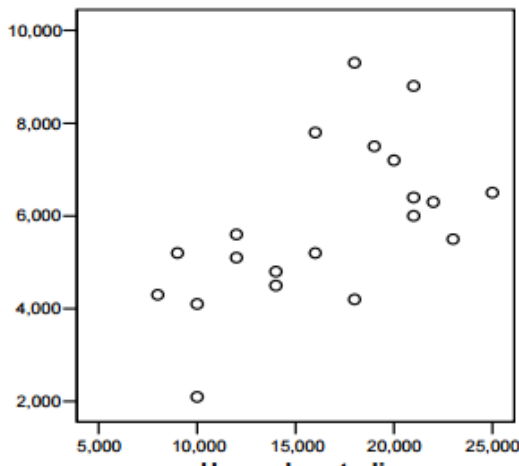
$$a = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{(\sum y_i) - a(\sum x_i)}{n} \quad (6)$$

$$\Delta a = \frac{\sqrt{n} \varepsilon}{\sqrt{n \sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i\right)^2}} \quad (7)$$

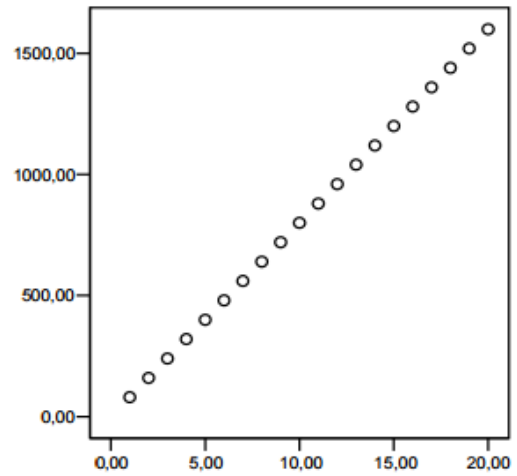
$$\Delta b = \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}}$$

**Coefficiente de correlación lineal de Pearson:** Es un coeficiente pensado para medir el grado de dependencia entre dos variables cuantitativas que se pueden relacionar de forma lineal, los valores arrojados pueden variar entre -1 y 1 siendo uno una relación perfecta y directa (ver gráfica 3); para que esto ocurra las dos variables deben aumentar en la misma medida y esto ocurre cuando la relación entre ambas es exacta.



Gráfica 2-Correlación no perfecta

Fuente: (Martínez Vara de Rey)



Gráfica 3-Correlación perfecta directa

Fuente: (Martínez Vara de Rey)



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

Si la correlación es -1 todos los puntos se encuentran sobre la recta existiendo una correlación que es perfecta e inversa, y si es igual a 0 no existe ninguna relación entre las variables.

Por otro lado, cuando necesitamos evaluar no la relación entre los datos sino la capacidad descriptiva de un modelo ajustado, podemos utilizar el coeficiente de determinación el cual es el cuadrado del coeficiente de correlación lineal de Pearson; en este caso, los valores que puede arrojar oscilan entre 0 y 1, sin embargo, no puede darse una respuesta de si es alto o bajo un valor que se encuentre dentro de este rango, depende en gran parte de la naturaleza de la investigación (Martínez Vara de Rey); para este trabajo se considera de buena fiabilidad aquellos datos que tengan un coeficiente de determinación a partir de 0.7.

El valor de la correlación según (Torrelavega) se obtiene mediante la fórmula:

$$r = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2][n(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2]}} \quad (8)$$

**Coefficiente de Nash-Sutcliffe:** Por lo general es un coeficiente que se utiliza en el área de hidrología, tiene como función dar una idea de que tan eficiente puede ser la simulación que se emplea para un proyecto de predicciones, se calcula de la siguiente manera:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (9)$$

Sus resultados pueden oscilar entre  $(-\infty, 1.0]$  siendo 1.0 una simulación perfecta; de acuerdo a (Juan Cabrera, 2012) algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 1-Valores referenciales del criterio de Nash

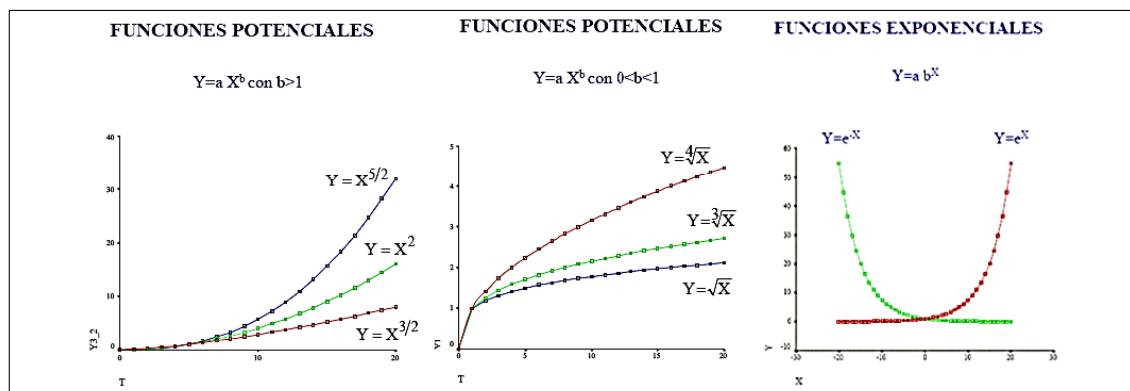
E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: (Juan Cabrera, 2012)



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

**Regresión no lineal:** La regresión lineal no siempre da buenos resultados porque a veces la relación entre  $Y$  y  $X$  no se ajusta a una recta, en algunos casos se exhibe algún grado de curvatura. La estimación directa de los parámetros de funciones no-lineales es un proceso bastante complicado, no obstante, a veces se pueden aplicar las técnicas de regresión lineal por medio de transformaciones de las variables originales; los modelos más usados para este tipo de transformaciones son el potencial, exponencial y logarítmico. (Ver gráfica 4)



Gráfica 4-Modelos no lineales

Fuente: (Rivas)

### 3.2. MARCO TEÓRICO

Para la transferencia de caudales entre estaciones medidas y no medidas se ha tomado como ejemplo el artículo publicado en junio del 2006 en la revista de la asociación americana de los recursos hídricos titulado: “Estimación De Caudal Asociado a la Geometría Hidráulica, En La Región del Medio Atlántico, EE.UU.” (Yusuf & Rajbir, 2006); el objetivo de esta investigación fue la de estimar caudales para flujos no medidos en la región del medio atlántico, donde se utilizaron caudales medios anuales observados y la geometría hidráulica asociada a datos de 75 estaciones de aforo en la meseta de los Apalaches, la cordillera y el valle, y las provincias de Piamonte de la región del atlántico medio; con estas estaciones se desarrollaron un conjunto de funciones que relacionan el caudal al área de drenaje y la geometría hidráulica del caudal; los resultados de las relaciones entre caudales promedio anual y del agua superficial, ancho y profundidad de flujo, tenían coeficientes de determinación que oscilaron entre (0.55-0.91); mientras que el coeficiente de determinación entre velocidad de flujo



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

media y caudal anual fueron de (0.44-0.54); por otro lado, la relación entre el área de drenaje y el caudal medio, tenían coeficientes de determinación bastante altos, los cuales oscilaban entre (0.95-0.98).

La última relación dio como conclusión cuales eran las mejores variables para la estimación de caudales en zonas no instrumentadas, teniendo en cuenta que ésta última uso el método de transferencia de caudales, se hace una breve descripción de la aplicación de este método el cual es base fundamental para el presente trabajo.

El método de transferencia consiste de las siguientes ecuaciones:

$$EC3: Q_u = Q_g \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (10)$$

$$EC4: Q_u = Q_g * \tan \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (11)$$

$$EC5: Q_u = Q_g * \arctan \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (12)$$

Donde:

$Q_u$ : Caudal sitio no medido

$Q_g$ : Caudal sitio medido o estación índice

$A_u$ : Área de drenaje sitio no medido

$A_g$ : Área de drenaje sitio medido o estación índice

El procedimiento para transferir el caudal de un sitio medido a uno no medido es el siguiente:

**Paso 1:** Seleccionar una cuenca, para este caso, la cuenca baja del río Magdalena.

**Paso 2:** Identificar todos los sitios medidos por estaciones hidrológicas.

**Paso 3:** Normalizar los datos dividiendo el caudal medido en su área de drenaje ( $m^3/s/km^2$ ).

**Paso 4:** Trazar los datos normalizados de caudal sobre una gráfica y chequear si los hidrogramas de caudal normalizados coinciden o no; si coinciden, la ecuación





ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

EC3 es la ecuación de transferencia más adecuada, pero si no coincide, las ecuaciones EC4 y EC5 son las ecuaciones de transferencia más adecuadas.

**PASO 5:** Basado en las comparaciones visuales de los hidrogramas de flujo normalizado en el paso 4, selecciona una de las estaciones medidas río abajo para el sitio no medido como una estación representativa o indicativa para el afluente.

**PASO 6:** Selecciona la ecuación de transferencia apropiada y luego el caudal de transferencia de la estación representativa o indicativa para alguna estación no medida en el afluente.

**RESULTADOS:** Valores aproximados de los caudales no medidos por las estaciones hidrológicas.

Además del artículo anterior, en la república de Perú, en diciembre del 2010 elaboraron una investigación titulada: “Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac” (Ministerio de Agricultura; Autoridad Nacional del Agua; Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos hídricos; Administración Local del Agua Chillón Rimac Lurin, 2010); en mencionada investigación utilizaron el método de transferencia como modelación hidrológica, donde relacionaron variables como son: el área, el caudal y la precipitación de la cuenca; de esta forma utilizaron la siguiente ecuación:

$$Q_s = \left( \frac{A_s}{A_c} \right) \left( \frac{P_s}{P_c} \right) Q_c \quad (13)$$

Dónde:

Q<sub>s</sub>= caudal de la cuenca no medida (m<sup>3</sup>/s)

Q<sub>c</sub>= caudal de la cuenca medida (m<sup>3</sup>/s)

A<sub>s</sub>= área de la cuenca no medida (km<sup>2</sup>)

A<sub>c</sub>=área de la cuenca medida (km<sup>2</sup>)

Para el presente trabajo, se tomará como base el primer método de transferencia mencionado, esto debido a que no se obtienen datos de precipitación de las diferentes estaciones para aplicar la ecuación recomendada en el estudio realizado en la república de Perú.



#### **4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El curso del río Magdalena se ha dividido en tres partes muy bien diferenciadas que son Alto Magdalena, medio Magdalena y bajo Magdalena según su perfil altitudinal y su aptitud para la navegación. Este trabajo se enfocará en el bajo Magdalena por ser el objetivo del estudio.

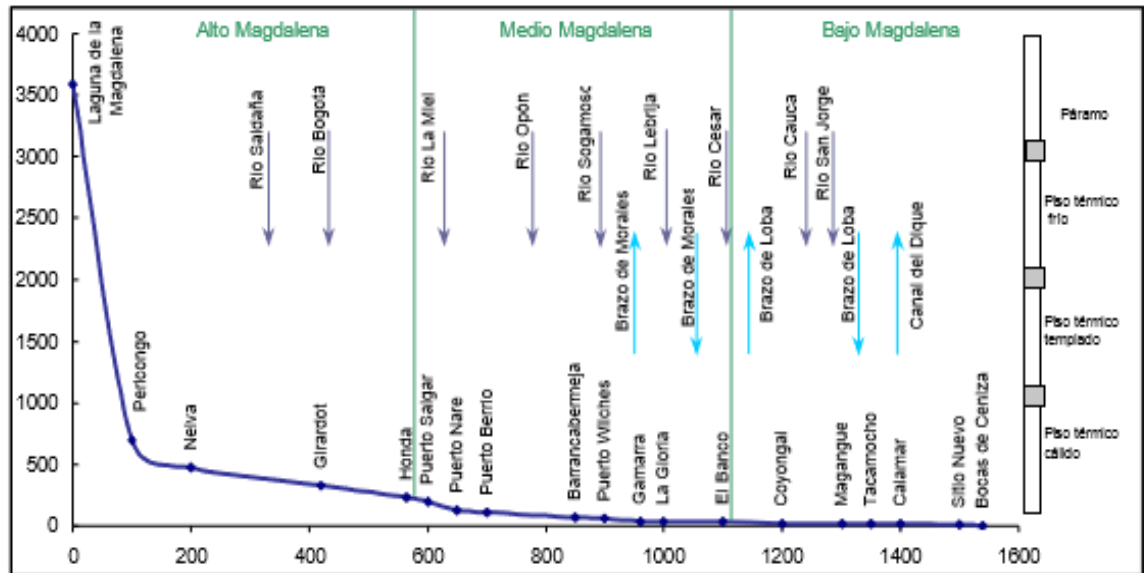
El Bajo Magdalena se extiende desde El Banco hasta la desembocadura del río Magdalena en Bocas de Ceniza y en la bahía de Cartagena a través del canal del Dique. En este tramo el cauce fluye por la llanura del Caribe con una pendiente muy suave y forma innumerables ciénagas que regulan las crecientes almacenando agua en los períodos lluviosos y devolviéndola al río en los secos. Estos humedales conforman un complejo extenso que se extiende desde la Ciénaga Grande de Santa Marta, al pie de la Sierra Nevada del mismo nombre, hasta el canal del Dique y la depresión Momposina, que constituye un delta interior en el que confluyen los ríos Cauca, Cesar y San Jorge. En este sector se encuentran entre otros los municipios de El Banco, Barranco de Loba, Pinillos, Magangué y Mompós.

Esta zona ofrece excelentes oportunidades de aprovechamiento de los recursos naturales si no se actúa en contra de ellos. Por ejemplo, los habitantes precolombinos de la zona del río San Jorge habilitaron una gran extensión para la agricultura que abarcó una superficie de cerca de 100.000 hectáreas, que es mayor que la extensión de tierras adecuadas con que cuenta el país en la actualidad.

Trabajar apoyándose en la naturaleza, y no luchando contra ella, permite soluciones mucho más racionales y económicas. De ahí que se considere como un grave error la iniciativa de algunos sectores de desecar la depresión Momposina en lugar de utilizar su potencial natural. El canal del Dique conecta el río, desde Calamar, con la bahía de Cartagena, dotando a Cartagena de las características propias de un puerto fluvial, pero a su vez, produce una abundante sedimentación en su bahía por la alta carga de materiales que transporta el río. En este sector de la cuenca, los regímenes de precipitación y humedad vuelven a disminuir. A continuación, la gráfica 5 presenta el perfil longitudinal del río Magdalena a lo largo de la cuenca y la ilustración 2 los afluentes de la misma:



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



Gráfica 5-PERFIL DEL RIO MAGDALENA. Fuente: Adaptado de CORMAGDALENA-IDEAM, 2001, y datos de perfil longitudinal suministrados por CORMAGDALENA.

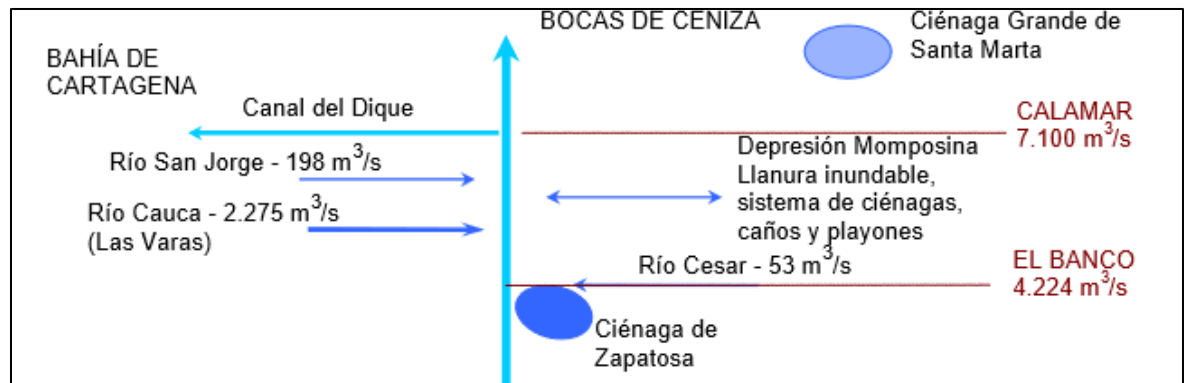


Ilustración 1-Afluentes del río Magdalena para la cuenca baja. Fuente: CORMAGDALENA-IDEAM, 2001.



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

#### 4.1. DATOS DEL ESTUDIO

La tabla 2 relaciona información correspondiente a las estaciones hidrológicas pertenecientes a la cuenta baja del río Magdalena y la ilustración 2 muestra su ubicación:

**Tabla 2-Datos de estaciones hidrológicas**

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	ÁREA DE DRENAJE (km <sup>2</sup> )	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	REGIONAL	DEPTO	MUNICIPIO	CORRIENTE
GRACIAS A DIOS HDA	425	9.13N	73.32W	46. m.s.n.m	MAGDALENA	CESAR	CURUMANI	ANIMITO
RIONUEVO	163542	8.48N	74.15W	23. m.s.n.m	ATLANTICO	BOLIVAR	ALTOS DEL ROSARIO	BZO QUITASOL
MAGANGUE-ESPERANZA	246771	9.15N	74.44W	18. m.s.n.m	ATLANTICO	BOLIVAR	MAGANGUE	BZO DE LOBA
LA MINA	474	10.41N	73.16W	429. m.s.n.m	MAGDALENA	CESAR	VALLEDUPAR	BADILLO
LAS FLORES	373	10.05N	73.14W	112. m.s.n.m	MAGDALENA	CESAR	LA PAZ	MAGIRIAIMO
PTE SALGUERO	3754	10.23N	73.14W	113. m.s.n.m	MAGDALENA	CESAR	VALLEDUPAR	CESAR
CANTACLARO	106	10.05N	73.43W	120. m.s.n.m	MAGDALENA	CESAR	VALLEDUPAR	GARUPAL
PTE CANOAS	10080	9.38N	73.38W	45. m.s.n.m	MAGDALENA	CESAR	EL PASO	CESAR
CALAMAR	257438	10.15N	74.54W	8. m.s.n.m	ATLANTICO	BOLIVAR	CALAMAR	MAGDALENA
PTO RICO HDA	957	10.3N	74.08W	55. m.s.n.m	MAGDALENA	MAGDALENA	ARACATACA	FUNDACION
FUNDACION	992	10.31N	74.11W	55. m.s.n.m	MAGDALENA	MAGDALENA	FUNDACION	FUNDACION
GANADERIA CARIBE	705	10.34N	74.07W	67. m.s.n.m	MAGDALENA	MAGDALENA	ARACATACA	ARACATACA

Fuente: IDEAM



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



Ilustración 2-Ubicación estaciones de la cuenca baja del Magdalena

Fuente: IDEAM-CORMAGDALENA

No.	ESTACIÓN
1	EL BANCO
2	GRACIAS A DIOS HDA
3	RIONUEVO
4	MAGANGUE ESPERANZA
5	LA MINA
6	LAS FLORES
7	PTE SALGUERO
8	CANTA CLARO
9	PTE CANOAS
10	CALAMAR
11	PTO RICO HDA
12	FUNDACION
13	GANADERIA CARIBE



## 5. METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo se basa en métodos estadísticos que conlleven a encontrar una o varias ecuaciones para el cálculo de caudales para sitios no medidos a partir de la información existente para las estaciones seleccionadas medida y registrada por el IDEAM de la cuenca baja del río Magdalena.

Se tomó como base el artículo **ESTIMACIÓN DE CAUDAL Y ASOCIADA GEOMETRÍA HIDRÁULICA, EN LA REGIÓN DEL MEDIO ATLÁNTICO, EE.UU** de la **REVISTA DE LA ASOCIACIÓN AMERICANA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS** el cual planteaba 3 ecuaciones que permitieran hallar los caudales deseados y se presentan a continuación:

$$EC3: Q_u = Q_g \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (10)$$

$$EC4: Q_u = Q_g * \tan \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (11)$$

$$EC5: Q_u = Q_g * \arctan \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (12)$$

Donde:

$Q_u$ : Caudal sitio no medido

$Q_g$ : Caudal sitio medido o estación índice

$A_u$ : Área de drenaje sitio no medido

$A_g$ : Área de drenaje sitio medido o estación índice

Adicional a las 3 ecuaciones anteriores, se propone una cuarta ecuación, basada en la ecuación (EC3), la cual se relaciona a continuación:

$$EC6: Q_u = Q_g \left( \frac{A_u}{A_g} \right)^n \quad (14)$$

Con ella se busca encontrar un exponente  $n$  que permita hallar los caudales no medidos con mayor precisión que las ecuaciones (EC3), (EC4) y (EC5); éste  $n$  fue calculado al despejarlo en la ecuación (EC6) para cada estación índice y



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

observada; adicional a esto, con el fin de encontrar aun mayor precisión, se optó por encontrar un segundo  $n$  aplicando el método iterativo.

Para realizar un análisis exhaustivo, se trabajó con base en caudales máximos mensuales, caudales mínimos mensuales y caudales medios diarios medidos y registrados por el IDEAM para las estaciones en estudio. Ver tabla 2 para conocer información relacionada a las estaciones hidrológicas como área de drenaje, ubicación y demás.

A continuación, se detallará claramente el trabajo realizado con cada una de las estaciones hidrológicas y con cada uno de los grupos de caudales seleccionados para el estudio (caudales máximos mensuales, caudales mínimos mensuales y caudales medios diarios) y las estaciones.

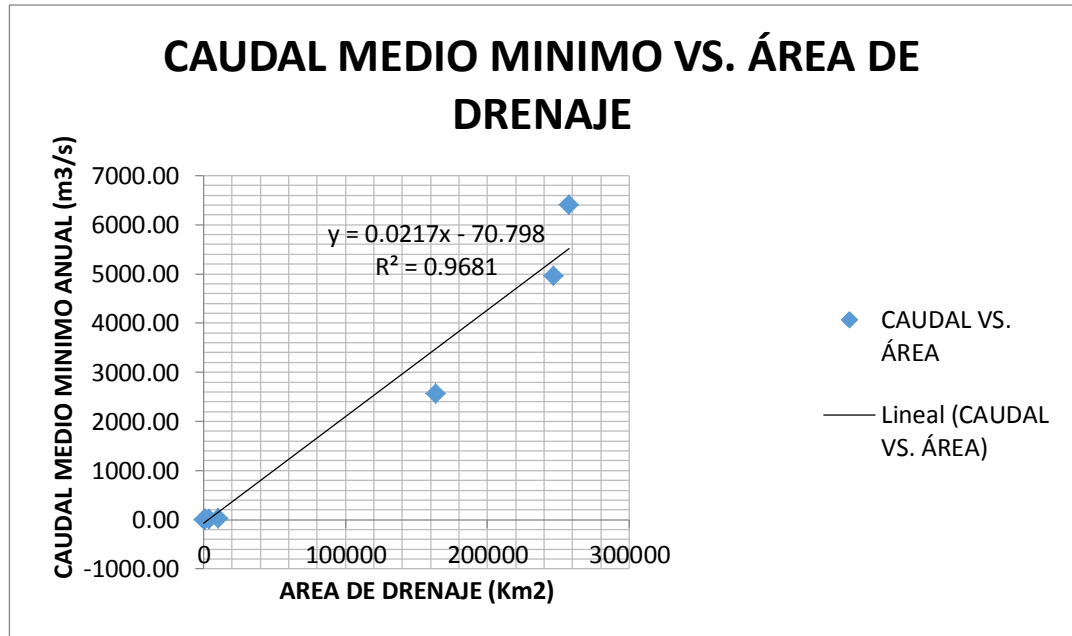
### 5.1. CAUDALES MINIMOS Y MAXIMOS MENSUALES

Estos dos grupos de caudales se trabajaron de la misma manera por la similitud de sus datos en cuanto a cantidad y presentación. Cabe aclarar que para los caudales máximos mensuales no se contaron con las 13 estaciones nombradas en la tabla anterior, sino únicamente con 12. Los datos de la estación de El banco no fueron proporcionados por el IDEAM.

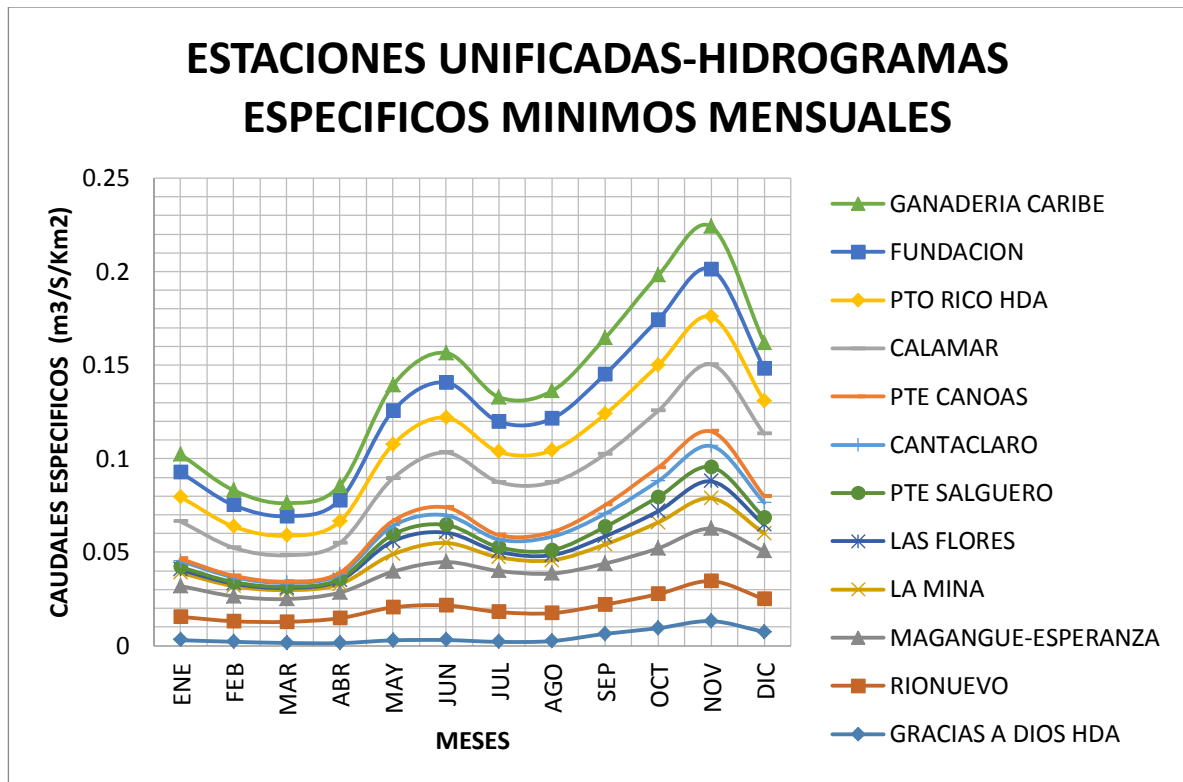
1. Conociendo el caudal medio (mínimo/máximo) multianual para cada estación, y el área aferente de cada una de ellas, se relacionan en una gráfica con el fin de verificar si existe una linealidad entre mencionada relación y entre las 12 estaciones mencionadas; teniendo de esta forma lo siguiente (ver gráfica 6). El coeficiente de determinación demuestra que existe una fuerte relación entre el área aferente de la estación y su caudal.
2. A partir de los caudales máximos y mínimos medios proporcionados por el IDEAM y las áreas de drenaje de cada estación, se calcula el caudal específico con la relación entre el caudal (máximo o mínimo) y el área de drenaje, con el fin de graficar el Hidrograma y visualizar el comportamiento de las lecturas de caudales. Este paso se efectúa para cada una de las estaciones con el fin de comparar sus hidrogramas específicos. (Ver gráfica 7).



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



Gráfica 6- Tendencia entre la relación de caudales sobre área



Gráfica 7-Hidrogramas Específicos para Q, min mensuales





ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

- Para realizar la transferencia de caudales se selecciona una estación como índice; como ya se conocen sus caudales mensuales y el área de drenaje, para cada una de las estaciones restantes se calculan los caudales aplicando las ecuaciones (3), (4), (5), (6) y la (7) sería igual a la (6) pero con el  $n$  iterado. Este paso se efectúa para todas las estaciones. (Ver tabla 3)

Tabla 3 - Caudales calculados para la mina con estación índice gracias a dios (Q. Max.)												N iterado	4.1	
ESTACIÓN	ECUACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	promedio
LA MINA	IDEAM	7556.0	5777.0	6541.0	30.1	58.2	48.3	22.2	30.5	42.6	76.9	70.6	29.0	1690.2
	3	3710.6	3974.9	5519.6	22.4	41.7	21.3	12.1	24.6	33.2	63.1	47.6	23.8	1124.6
	Error	51%	31%	16%	26%	28%	56%	45%	19%	22%	18%	33%	18%	30%
	4	6791.7	7275.6	10102.9	41.0	76.3	39.1	22.2	45.1	60.8	115.5	87.2	43.5	2058.4
	Error	10%	26%	54%	36%	31%	19%	0%	48%	43%	50%	24%	50%	33%
	5	2794.2	2993.2	4156.4	16.9	31.4	16.1	9.1	18.6	25.0	47.5	35.9	17.9	846.8
	Error	63%	48%	36%	44%	46%	67%	59%	39%	41%	38%	49%	38%	47%
	N	7.5	4.4	2.6	3.7	4.1	8.5	6.5	2.9	3.3	2.8	4.6	2.8	4.5
	6	5422.5	5808.8	8066.1	32.7	60.9	31.2	17.7	36.0	48.6	92.2	69.6	34.7	1643.4
	Error	28%	1%	23%	9%	5%	35%	20%	18%	14%	20%	1%	20%	16%
	7	5204.1	5574.9	7741.3	31.4	58.5	29.9	17.0	34.6	46.6	88.5	66.8	33.3	1577.2
	Error	31%	3%	18%	4%	1%	38%	23%	13%	10%	15%	5%	15%	15%

En la tabla anterior se puede visualizar cada uno de los caudales calculados, el error correspondiente a la comparación entre los caudales hallados y los registrados por el IDEAM, el  $n$  calculado para cada mes y el promedio de todos ellos y el  $n$  iterado. Estos  $n$  permiten calcular los caudales con un error menor a los encontrados con las ecuaciones (EC3), (EC4) y (EC5). Estos datos corresponden únicamente a los caudales máximos obtenidos para la estación de La mina tomando como índice la estación de Gracias a Dios.

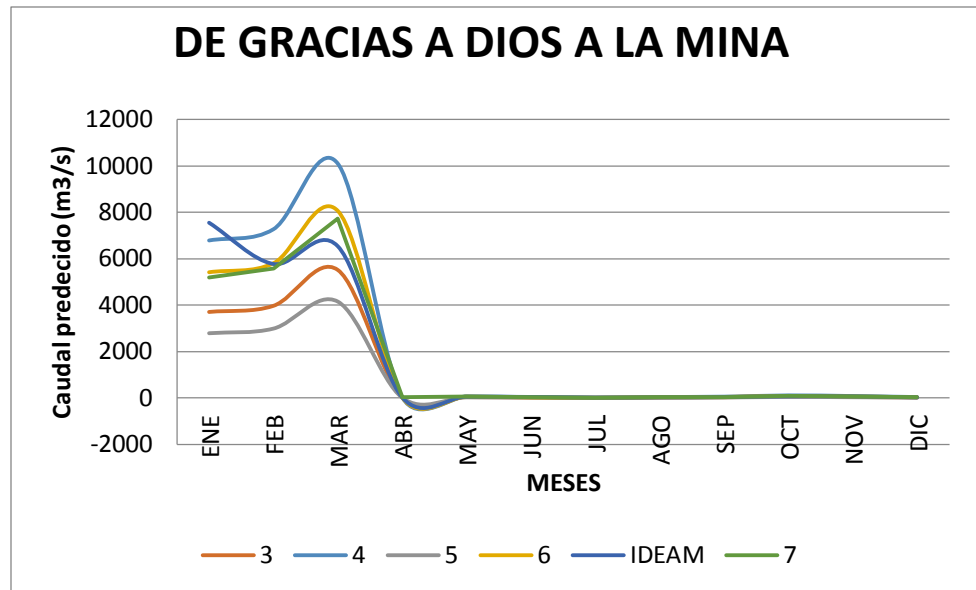
Se debe tomar como índice cada una de las estaciones y transferir los caudales a todas las estaciones de la cuenca.

- Con base en los datos encontrados en el paso anterior se grafican los caudales encontrados con cada ecuación Vs los meses, luego se escoge la ecuación que presenta menores errores, que en todos los casos fue la ecuación propuesta iterando el  $n$  (EC 7), y se busca el coeficiente de determinación considerando una tendencia lineal debido a que los caudales estimados deben aproximarse a los caudales observados; el coeficiente de

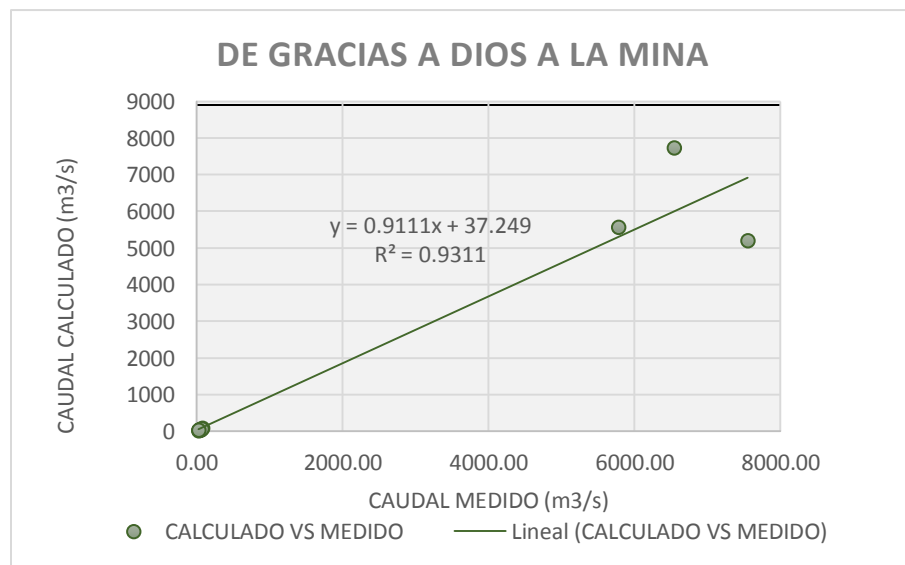


ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

determinación será el encargado de expresar que tan efectiva es la transferencia desde la estación indicada.



Gráfica 8-Comparación de Caudales máximos mensuales encontrados para Estación La mina con estación Gracias a Dios como índice.



Gráfica 9-Coeficiente de Determinación de La mina con estación índice Gracias a Dios



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

## 5.2. CAUDALES MEDIOS DIARIOS

Este grupo de caudales se trabajaron de forma diferente por el volumen de datos con los que se contaban, simplificando en mayor medida la información. Los datos procedentes del IDEAM cuentan con el dato de caudal para cada uno de los días del año y a su vez para cada uno de los años y para cada una de las estaciones seleccionadas.

1. Obedeciendo a la necesidad de simplificar los datos, se tomó un dato de caudal diario de cada uno de los años en estudio (de 1963 a 2014) y se realizó el promedio de todos ellos. Por ejemplo, se seleccionaron los datos enero 1 de cada uno de los años y se promediaron. Esto se realizó con el fin de trabajar con un único grupo de datos y no discriminar la información para cada uno de los años. Adicional a esto, cada dato se dividió entre el área de drenaje ya conocida para la estación trabajada consiguiendo así los caudales específicos medios diarios multianuales consignados en la siguiente tabla:

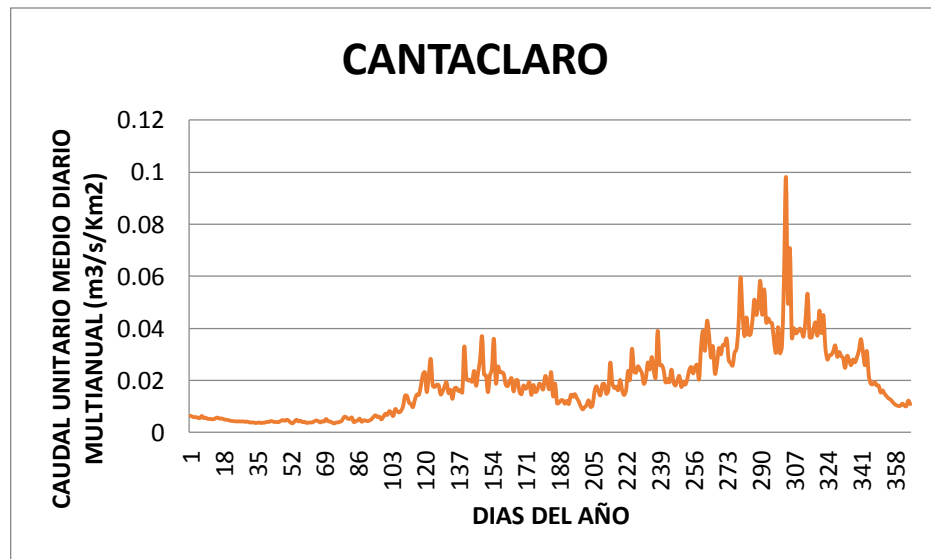
<b>tabla 4 – Caudales Específicos medios diarios multianuales (m<sup>3</sup>/s) estación cantaclaro</b>												
<b>DIA</b>	<b>ENERO</b>	<b>FEBRE</b>	<b>MARZO</b>	<b>ABRIL</b>	<b>MAYO</b>	<b>JUNIO</b>	<b>JULIO</b>	<b>AGOST</b>	<b>SEPTI</b>	<b>OCTUB</b>	<b>NOVIE</b>	<b>DICIE</b>
1	0.006	0.004	0.004	0.005	0.022	0.022	0.017	0.027	0.024	0.027	0.036	0.026
2	0.006	0.004	0.004	0.005	0.028	0.024	0.023	0.019	0.019	0.026	0.040	0.028
3	0.006	0.004	0.004	0.006	0.018	0.036	0.014	0.017	0.018	0.031	0.038	0.027
4	0.006	0.004	0.004	0.007	0.017	0.019	0.019	0.018	0.020	0.032	0.039	0.029
5	0.006	0.004	0.005	0.006	0.018	0.025	0.011	0.016	0.022	0.041	0.040	0.032
6	0.006	0.004	0.004	0.006	0.018	0.023	0.011	0.020	0.018	0.060	0.039	0.036
7	0.006	0.004	0.004	0.005	0.015	0.023	0.012	0.016	0.020	0.046	0.037	0.031
8	0.006	0.004	0.004	0.006	0.016	0.022	0.012	0.014	0.018	0.037	0.044	0.026
9	0.006	0.004	0.004	0.007	0.018	0.018	0.011	0.016	0.021	0.044	0.053	0.031
10	0.005	0.004	0.005	0.007	0.019	0.018	0.012	0.024	0.024	0.038	0.037	0.022
11	0.005	0.004	0.004	0.008	0.015	0.020	0.011	0.020	0.025	0.038	0.037	0.019
12	0.005	0.004	0.004	0.007	0.016	0.021	0.014	0.032	0.023	0.043	0.040	0.019
13	0.005	0.004	0.004	0.006	0.013	0.016	0.014	0.024	0.025	0.051	0.042	0.019
14	0.006	0.004	0.004	0.009	0.017	0.020	0.015	0.023	0.026	0.045	0.037	0.018
15	0.006	0.004	0.004	0.008	0.017	0.020	0.013	0.025	0.020	0.049	0.047	0.018
16	0.005	0.004	0.004	0.008	0.016	0.016	0.012	0.024	0.033	0.058	0.038	0.015
17	0.005	0.005	0.004	0.008	0.016	0.015	0.010	0.023	0.039	0.045	0.045	0.016



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

18	0.005	0.005	0.005	0.010	0.015	0.018	0.009	0.019	0.031	0.055	0.033	0.015
19	0.005	0.005	0.006	0.014	0.033	0.017	0.010	0.021	0.043	0.042	0.028	0.014
20	0.005	0.005	0.006	0.014	0.021	0.018	0.011	0.027	0.038	0.044	0.030	0.013
21	0.005	0.004	0.005	0.012	0.020	0.019	0.012	0.024	0.029	0.042	0.030	0.013
22	0.004	0.004	0.005	0.011	0.020	0.014	0.010	0.029	0.033	0.042	0.031	0.012
23	0.004	0.004	0.006	0.010	0.020	0.018	0.010	0.024	0.023	0.035	0.033	0.011
24	0.004	0.005	0.004	0.013	0.024	0.016	0.016	0.021	0.026	0.031	0.029	0.010
25	0.004	0.004	0.004	0.015	0.018	0.016	0.018	0.039	0.032	0.040	0.031	0.010
26	0.004	0.005	0.005	0.015	0.023	0.019	0.016	0.026	0.030	0.030	0.029	0.010
27	0.004	0.004	0.005	0.018	0.028	0.018	0.014	0.026	0.034	0.033	0.029	0.011
28	0.004	0.004	0.004	0.022	0.037	0.017	0.018	0.024	0.034	0.059	0.025	0.010
29	0.004	0.004	0.005	0.023	0.022	0.022	0.019	0.019	0.036	0.098	0.029	0.010
30	0.004		0.005	0.016	0.022	0.020	0.015	0.021	0.028	0.050	0.028	0.012
31	0.004		0.004		0.016		0.016	0.019		0.071		0.011

Estos datos dan como resultado el hidrograma Específico de la estación que se esté manejando, para ejemplificar, se tiene la estación Cantaclaro:

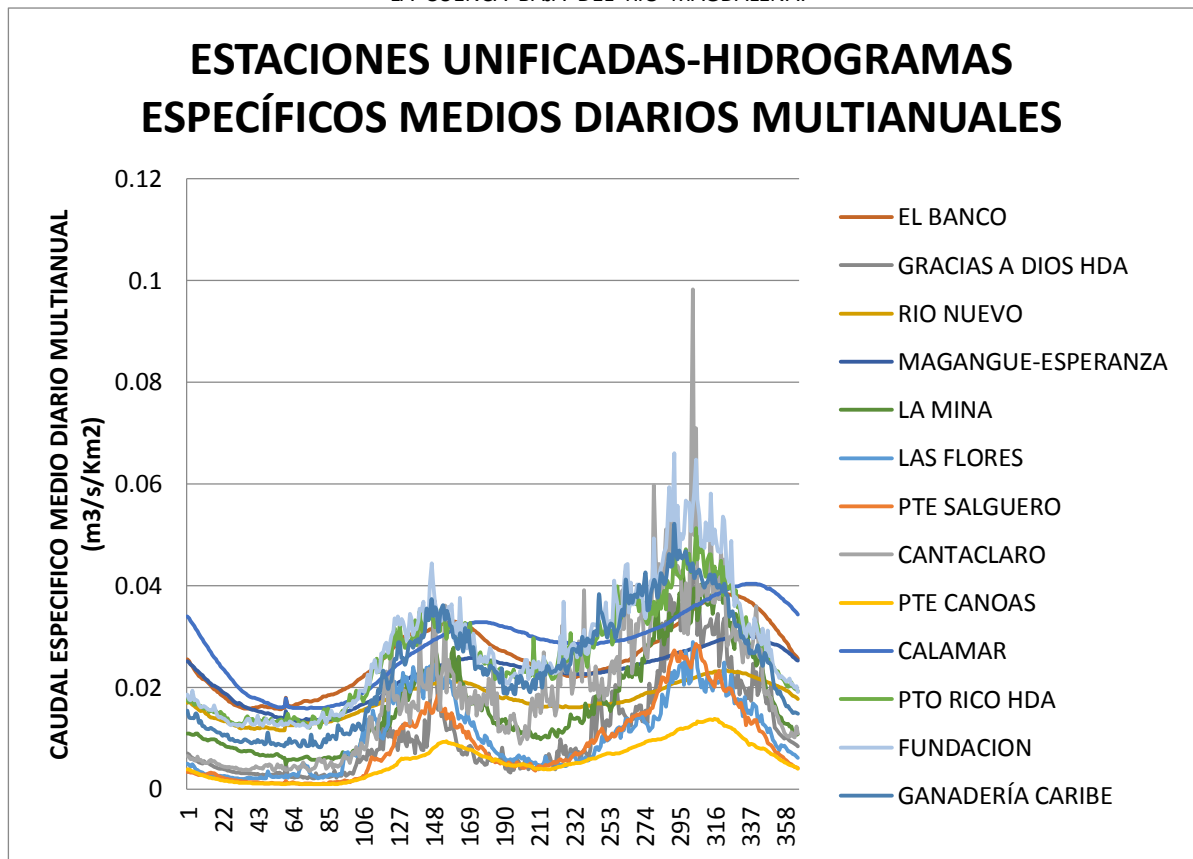


Gráfica 10-Hidrograma Específico Estación Cantaclaro para Q, mínimos mensuales

Este paso al igual que en los caudales máximos y mínimos mensuales se repite para cada una de las estaciones.



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



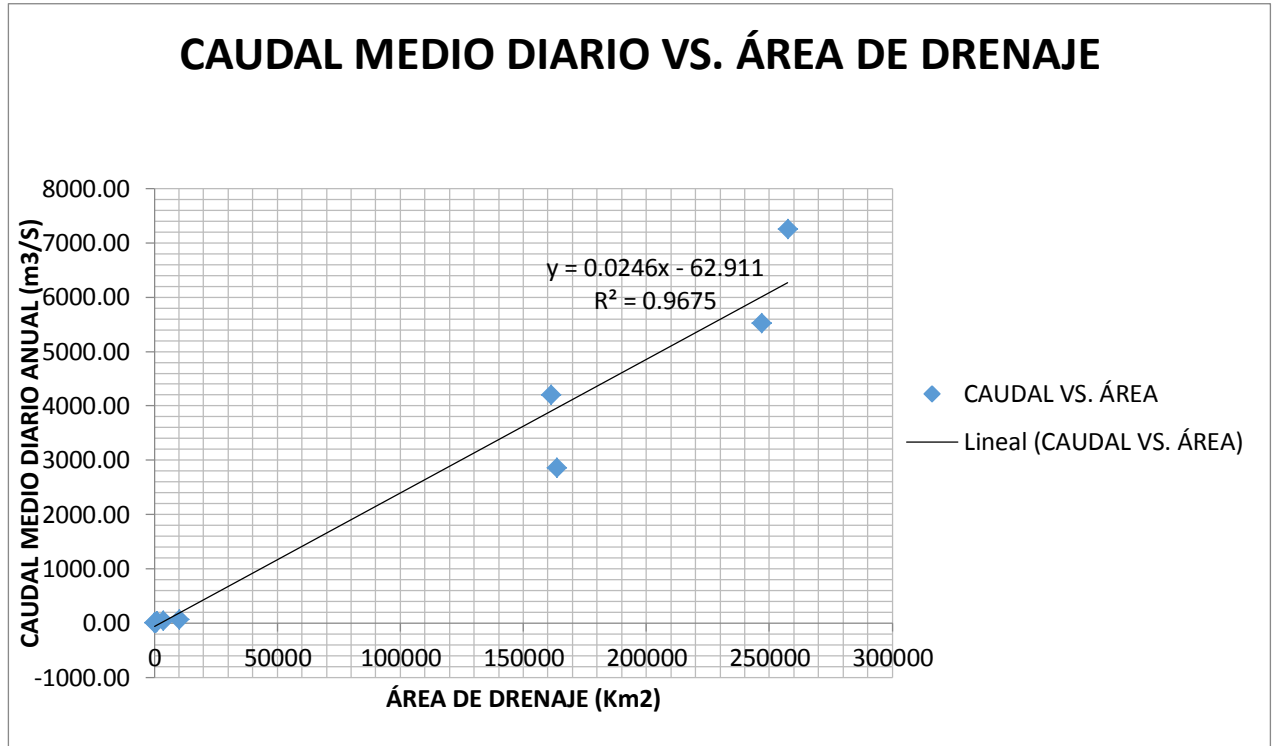
Gráfica 11-Hidrogramas Específicos para Q, medios diarios.

2. Conociendo el caudal medio diario multianual para cada estación, y el área aferente de cada una de ellas, se relacionan en una gráfica con el fin de verificar si existe una linealidad entre mencionada relación y entre las 13 estaciones mencionadas; teniendo de esta forma lo siguiente (ver gráfica 12). El coeficiente de determinación demuestra que existe una fuerte relación entre el área aferente de la estación y su caudal.
3. Usando los caudales medios diarios multianuales se transfieren caudales seleccionando una estación como índice igual que el procedimiento realizado para los caudales mínimos y máximos mensuales; como ya se conocen sus caudales diarios y el área de drenaje, para cada una de las estaciones restantes se calculan los caudales aplicando las ecuaciones (3), (4), (5), (6) y la (7) sería igual a la (6) pero con el  $n$  iterado. Este paso se efectúa para todas las estaciones.



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

Para ejemplificar, se relaciona a continuación un fragmento de los datos obtenidos únicamente para el mes de enero de la transferencia realizada desde la estación de “cantaclaro” a la estación “el banco”(Ver tabla 5).



Gráfica 12-Tendencia entre la relación de caudales sobre área

tabla 5- Transferencia de caudales de cantaclaro a el banco											N iterado	1,02	Coef. Nash E		
MES	DIA S	IDEA M	EC 3	ERRO R	EC 4	ERRO R	EC 5	ERRO R	n	EC 6	ERRO R	EC 7	ERRO R	$(Q_{sim,j} - Q_i)^2$	$(Q_i - \bar{Q})^2$
ENERO	1	4117,8 2	1047,1 5	75%	1,3 3	100%	1,0 8	100%	1,1 9	1861,2 2	55%	1212,4 3	71%	8441300, 17	6672,13
	2	4044,5 6	999,08	75%	1,2 6	100%	1,0 3	100%	1,1 9	1775,7 8	56%	1156,7 7	71%	8339340, 17	24006,25
	3	3971,3 6	949,18	76%	1,2 0	100%	0,9 8	100%	1,2 0	1687,0 8	58%	1098,9 9	72%	8250480, 76	52049,98
	4	3881,6 4	960,52	75%	1,2 2	100%	0,9 9	100%	1,1 9	1707,2 4	56%	1112,1 3	71%	7670206, 41	101036,6 3
	5	3793,0 8	913,01	76%	1,1 6	100%	0,9 4	100%	1,1 9	1622,7 9	57%	1057,1 1	72%	7485506, 74	165182,6 6
	6	3718,8 2	895,34	76%	1,1 3	100%	0,9 2	100%	1,1 9	1591,3 8	57%	1036,6 5	72%	7194034, 52	231056,2 5
	7	3643,5 9	1028,3 7	72%	1,3 0	100%	1,0 6	100%	1,1 7	1827,8 3	50%	1190,6 8	67%	6016764, 31	309040,2 3



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN  
 LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

8	3585,18	899,17	75%	1,14	100%	0,93	100%	1,19	1598,20	55%	1041,09	71%	6472378,69	377394,14
9	3535,87	919,73	74%	1,16	100%	0,95	100%	1,18	1634,74	54%	1064,90	70%	6105716,06	440407,19
10	3487,97	841,10	76%	1,06	100%	0,87	100%	1,19	1494,98	57%	973,86	72%	6320781,97	506273,88
11	3480,26	852,60	76%	1,08	100%	0,88	100%	1,19	1515,42	56%	987,17	72%	6215461,68	517316,54
12	3441,10	824,47	76%	1,04	100%	0,85	100%	1,19	1465,42	57%	954,60	72%	6182689,57	575172,16
13	3386,23	827,98	76%	1,05	100%	0,85	100%	1,19	1471,65	57%	958,66	72%	5893112,96	661412,72
14	3330,92	887,60	73%	1,12	100%	0,92	100%	1,18	1577,63	53%	1027,69	69%	5304860,88	754432,15
15	3270,21	928,26	72%	1,17	100%	0,96	100%	1,17	1649,90	50%	1074,77	67%	4819929,82	863595,68
16	3212,87	860,85	73%	1,09	100%	0,89	100%	1,18	1530,08	52%	996,72	69%	4911328,49	973442,35
17	3164,36	875,43	72%	1,11	100%	0,90	100%	1,18	1555,99	51%	1013,60	68%	4625762,32	1071524,43
18	3129,00	829,78	73%	1,05	100%	0,86	100%	1,18	1474,86	53%	960,75	69%	4701321,69	1145977,99
19	3078,38	793,44	74%	1,00	100%	0,82	100%	1,19	1410,26	54%	918,67	70%	4664372,16	1256907,81
20	3057,41	784,24	74%	0,99	100%	0,81	100%	1,19	1393,91	54%	908,02	70%	4619894,82	1304377,24
21	3003,64	748,46	75%	0,95	100%	0,77	100%	1,19	1330,32	56%	866,59	71%	4566971,07	1430087,34
22	2958,18	719,76	76%	0,91	100%	0,74	100%	1,19	1279,31	57%	833,37	72%	4514833,85	1540885,59
23	2916,49	708,90	76%	0,90	100%	0,73	100%	1,19	1260,00	57%	820,79	72%	4391957,92	1646131,18
24	2878,21	693,36	76%	0,88	100%	0,72	100%	1,19	1232,39	57%	802,80	72%	4307303,49	1745829,69
25	2830,46	688,06	76%	0,87	100%	0,71	100%	1,19	1222,96	57%	796,65	72%	4136369,25	1874276,21
26	2779,82	692,55	75%	0,88	100%	0,71	100%	1,19	1230,94	56%	801,86	71%	3912334,27	2015500,11
27	2743,97	687,07	75%	0,87	100%	0,71	100%	1,19	1221,20	55%	795,51	71%	3796522,17	2118565,42
28	2706,21	690,32	74%	0,87	100%	0,71	100%	1,19	1226,98	55%	799,28	70%	3636374,35	2229940,37
29	2670,69	664,42	75%	0,84	100%	0,69	100%	1,19	1180,94	56%	769,29	71%	3615346,67	2337264,02
30	2653,28	677,94	74%	0,86	100%	0,70	100%	1,19	1204,97	55%	784,94	70%	3490713,14	2390801,13
31	2639,38	633,14	76%	0,80	100%	0,65	100%	1,19	1125,34	57%	733,07	72%	3634047,72	2433971,30
<b>PROMEDIOS</b>	<b>4199,50</b>	<b>3040,95</b>	<b>0,45</b>	<b>3,85</b>	<b>1,00</b>	<b>3,14</b>	<b>1,00</b>	<b>1,08</b>	<b>5405,01</b>	<b>0,56</b>	<b>3520,92</b>	<b>0,44</b>	<b>E</b>	<b>-2,77</b>

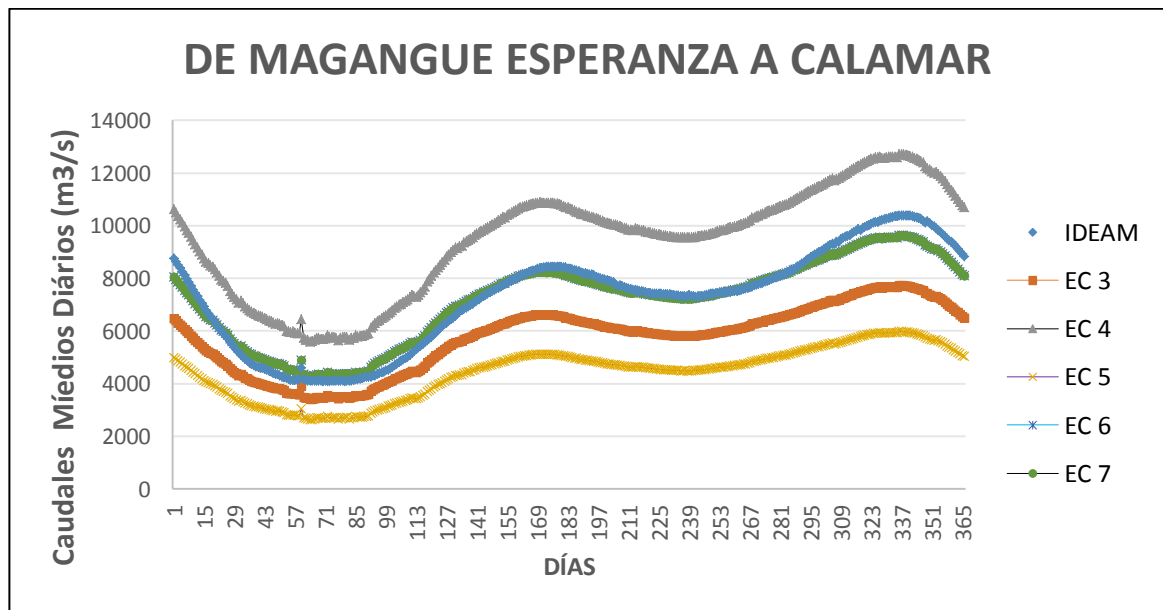


ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

En la tabla anterior se puede visualizar cada uno de los caudales calculados, el error resultante de la comparación entre los caudales registrados por el IDEAM y los calculados con cada una de las ecuaciones, el  $n$  calculado para cada mes y el promedio de todos ellos, el  $n$  iterado y además de esto el coeficiente de Nash (E). Los  $n$  permiten calcular los caudales con un error menor a los encontrados con las ecuaciones (EC3), (EC4) y (EC5) y el coeficiente de Nash que mide que tan eficiente puede ser la simulación. Estos datos corresponden únicamente a los caudales obtenidos para la estación de El Banco tomando como índice la estación de Cantaclaro.

Se debe tomar como índice cada una de las estaciones y transferir los caudales a todas las estaciones de la cuenca.

4. Con base en los datos encontrados en el paso anterior se grafican los caudales encontrados con cada ecuación Vs los días, ver ejemplo (gráfica 13), luego se escoge la ecuación que presenta menores errores, que en todos los casos fue la ecuación propuesta iterando el  $n$  (EC 7), y de acuerdo al coeficiente de Nash (E) ya calculado, se puede verificar que tan efectiva es la transferencia desde la estación indicada.



Gráfica 13-Comparación de Caudales Medios diarios encontrados para Estación Calamar con estación Magangué Esperanza como índice.





ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

## 6. RESULTADOS

Aplicando la metodología explicada anteriormente, se presentan las siguientes tablas con los resultados para cada uno de los grupos de caudales trabajados respecto a cada estación seleccionada. Las tablas 7 y 8 de caudales máximos y mínimos mensuales respectivamente, relacionan el exponente  $n$  y el coeficiente de determinación y la tabla 9 de caudales medios diarios relacionan el exponente  $n$  y el coeficiente de nash. Acompañando cada una de las tablas se encuentra un cuadro de convenciones que especifica los rangos de valores que pueden tomar tanto el coeficiente de determinación como el coeficiente de nash para ser acertados o no.

tabla 6 - Caudales máximos mensuales													
RESUMEN DE "n" PROMEDIO MULTIANUAL Y COEFICIENTE DE DETERMINACION		GRACIAS A DIOS HDA	RIONUEVO	MAGANGUE-ESPERANZA	LA MINA	LAS FLORES	PTE SALGUERO	CANTACLARO	PTE CANOAS	CALAMAR	PTO RICO HDA	FUNDACION	GANADERIA CARIBE
GRACIAS A DIOS HDA	n		0.090	0.001	4.100	3.000	0.015	0.300	-1.700	0.001	-5.000	6.500	10.000
	R <sup>2</sup>		0.583	0.465	0.931	0.103	0.187	0.926	0.540	0.388	0.582	0.474	0.597
RIONUEVO	n	0.800		1.560	0.780	1.000	1.000	0.700	1.380	2.100	0.750	0.800	0.730
	R <sup>2</sup>	0.583		0.803	0.529	0.279	0.305	0.495	0.886	0.736	0.5775	0.572	0.531
MAGANGUE-ESPERANZA	n	0.900	1.450		0.850	0.600	1.350	0.300	1.550	7.400	0.800	0.800	0.800
	R <sup>2</sup>	0.465	0.803		0.341	0.095	0.215	0.475	0.729	0.989	0.397	0.413	0.336
LA MINA	n	4.600	-0.150	-0.100		4.300	-2.000	0.580	-2.000	0.001	-8.500	7.300	14.500
	R <sup>2</sup>	0.931	0.529	0.341		0.092	0.174	0.757	0.513	0.256	0.624	0.484	0.640
LAS FLORES	n	-45.0	-0.100	0.050	-23.0		-2.000	4.500	-1.450	0.100	-4.500	5.000	-7.000
	R <sup>2</sup>	0.103	0.279	0.095	0.092		0.003	0.107	0.284	0.078	0.160	0.177	0.135
PTE SALGUERO	n	0.600	-0.400	-0.200	-0.300	0.900		0.480	-6.500	0.001	4.200	4.500	3.700
	R <sup>2</sup>	0.187	0.305	0.215	0.174	0.003		0.076	0.180	0.201	0.185	0.145	0.186
CANTACLARO	n	0.200	0.100	0.010	0.400	0.008	-1.500		-1.500	0.700	-1.900	2.000	-2.200
	R <sup>2</sup>	0.926	0.495	0.475	0.757	0.107	0.076		0.463	0.421	0.447	0.384	0.460
PTE CANOAS	n	0.500	1.250	1.320	0.540	0.620	0.100	0.310		1.360	0.010	1.360	0.100
	R <sup>2</sup>	0.540	0.886	0.729	0.513	0.284	0.180	0.463		0.651	0.806	0.816	0.745
CALAMAR	n	0.950	2.100	7.700	0.880	1.000	1.500	0.800	1.500		0.850	0.900	0.830
	R <sup>2</sup>	0.388	0.736	0.989	0.256	0.078	0.201	0.421	0.651		0.316	0.345	0.259



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

PTO RICO HDA	n	1.700	0.660	0.750	2.900	2.000	-0.200	0.750	-0.100	0.800		0.500	0.770
	R <sup>2</sup>	0.582	0.578	0.397	0.624	0.160	0.185	0.447	0.806	0.316		0.945	0.982
FUNDACION	n	1.800	0.700	0.700	1.300	1.900	-0.250	0.700	-0.100	0.770	-0.800		0.800
	R <sup>2</sup>	0.474	0.572	0.413	0.484	0.177	0.145	0.384	0.816	0.345	0.945		0.905
GANADERIA CARIBE	n	2.500	0.670	0.730	1.800	0.015	0.010	0.000	0.001	0.900	0.750	0.500	
	R <sup>2</sup>	0.597	0.531	0.316	0.640	0.135	0.186	0.460	0.745	0.259	0.982	0.905	

CONVENCIONES PARA R <sup>2</sup>		
EXCELENTE	0.90-1.00	
BUENO	0.70-0.89	
ACEPTABLE	0.50-0.69	
REGULAR	0.30-0.49	
INACEPTABLE	0.00-0.29	

tabla 7 - Caudales mínimos mensuales													
RESUMEN DE "n" PROMEDIO MULTIANUAL Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN		GRACIAS A DIOS HDA	RIONUEVO	MAGANGUE-ESPERANZA	LA MINA	LAS FLORES	PTE SALGUERO	CANTA CLARO	PTE CANOAS	CALAMAR	PTO RICO HDA	FUNDACION	GANADERIA CARIBE
	GRACIAS A DIOS HDA	n		1.15	1.20	5.31	3.90	0.73	0.93	0.75	1.24	2.50	2.34
R <sup>2</sup>			0.56	0.62	0.85	0.60	0.80	0.82	0.82	0.58	0.73	0.73	0.70
RIONUEVO	n	1.30		1.67	1.12	1.31	1.69	1.18	1.86	2.04	1.00	1.02	1.04
	R <sup>2</sup>	0.56		0.84	0.80	0.90	0.78	0.69	0.76	0.81	0.80	0.78	0.70
MAGANGUE-ESPERANZA	n	1.32	1.68		1.15	1.31	1.59	1.21	1.83	6.10	1.03	1.06	1.09
	R <sup>2</sup>	0.62	0.84		0.75	0.64	0.75	0.83	0.74	1.00	0.80	0.82	0.75
LA MINA	n	11.60	1.10	1.13		4.79	0.23	1.45	0.45	1.16	1.94	1.70	1.98
	R <sup>2</sup>	0.85	0.80	0.75		0.83	0.96	0.80	0.96	0.70	0.92	0.89	0.88
LAS FLORES	n	-1.60	1.20	1.22	4.47		0.87	0.73	0.89	1.26	2.48	2.38	3.15
	R <sup>2</sup>	0.60	0.90	0.64	0.83		0.78	0.61	0.74	0.59	0.78	0.73	0.67
PTE SALGUERO	n	1.02	1.37	1.40	0.56	0.93		0.89	0.93	1.43	0.11	0.09	0.20
	R <sup>2</sup>	0.80	0.77	0.75	0.96	0.78		0.81	0.98	0.70	0.97	0.97	0.96
CANTA CLARO	n	0.67	1.11	1.15	1.33	0.56	0.77		0.77	1.18	1.50	1.46	1.55
	R <sup>2</sup>	0.82	0.69	0.83	0.80	0.62	0.81		0.80	0.80	0.83	0.84	0.80
PTE CANOAS	n	0.97	1.53	1.53	0.66	0.93	0.95	0.89		1.59	0.34	0.37	0.46
	R <sup>2</sup>	0.82	0.76	0.74	0.96	0.74	0.98	0.80		0.69	0.95	0.94	0.95
CALAMAR	n	1.35	2.12	6.07	1.17	1.35	1.62	1.22	1.88		1.06	1.09	1.11
	R <sup>2</sup>	0.58	0.81	1.00	0.70	0.59	0.70	0.80	0.69		0.75	0.77	0.70
PTO RICO HDA	n	3.26	0.99	1.03	2.05	2.87	0.62	1.62	0.03	1.06		2.46	1.82
	R <sup>2</sup>	0.73	0.80	0.80	0.92	0.78	0.97	0.83	0.95	0.75		0.99	0.98
FUNDACION	n	3.00	1.02	1.06	1.77	2.63	-	1.54	0.04	1.09	-		1.28



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

							0.51				2.43		
	R <sup>2</sup>	0.73	0.78	0.82	0.89	0.73	0.97	0.84	0.94	0.77	0.99		0.98
GANADERIA CARIBE	n	4.07	1.03	1.06	2.11	3.35	0.09	1.58	0.20	1.10	1.68	1.26	
	R <sup>2</sup>	0.70	0.70	0.75	0.88	0.67	0.96	0.80	0.95	0.70	0.98	0.98	

CONVENCIONES PARA R <sup>2</sup>		
EXCELENTE	0.90-1.00	
BUENO	0.70-0.89	
ACEPTABLE	0.50-0.69	
REGULAR	0.30-0.49	
INACEPTABLE	0.00-0.29	

tabla 8 - Caudales medios diarios														
RESUMEN DE "n" PROMEDIO MULTIANUAL Y COEFICIENTE DE NASH		EL BANCO	GRACIAS A DIOS HDA	RIONUEVO	MAGANGUE-ESPERANZA	LA MINA	LAS FLORES	PTE SALGUERO	CANTACLARO	PTE CANOAS	CALAMAR	PTO RICO HDA	FUNDACION	GANADERIA CARIBE
EL BANCO	n		1.270	27.100	0.570	1.130	1.260	1.610	1.150	1.850	1.100	1.030	1.030	1.060
	E		-0.221	0.875	0.725	0.197	-0.235	-0.624	-0.361	-0.486	0.732	0.486	0.327	0.274
GRACIAS A DIOS HDA	n	1.100		1.030	1.070	5.000	3.170	0.750	0.760	0.730	1.110	1.940	2.020	2.400
	E	-3.738		-8.094	-6.111	0.461	0.507	0.715	0.676	0.667	-4.105	-0.918	-0.170	-0.112
RIONUEVO	n	-26.500	1.210		1.600	1.070	1.200	1.540	1.120	1.750	2.080	0.950	0.950	1.000
	E	0.923	-0.302		0.811	0.027	-0.345	-0.757	-0.597	-0.725	0.744	0.435	0.269	0.064
MAGANGUE-ESPERANZA	n	0.730	1.240	1.670		1.120	1.250	1.510	1.120	1.700	6.200	1.000	1.000	1.030
	E	0.769	-0.325	0.740		-0.139	-0.586	-0.654	-0.375	-0.582	0.960	0.372	0.223	0.205
LA MINA	n	1.070	8.100	0.990	1.030		4.100	0.440	1.100	0.600	1.070	1.650	1.670	1.800
	E	-1.129	0.503	-3.024	-2.184		0.589	0.387	0.591	0.870	-1.306	0.401	0.692	0.740
LAS FLORES	n	1.1	-0.4	1.050	1.080	3.1		0.820	0.630	0.770	1.110	1.850	1.920	2.130
	E	-1.695	0.524	-4.442	-3.879	0.637		0.658	0.521	0.654	-2.584	0.049	0.356	0.393
PTE SALGUERO	n	1.210	0.940	1.100	1.140	0.700	0.950		0.810	0.580	1.180	0.310	0.240	0.420
	E	-2.867	0.830	-6.605	-4.909	0.756	0.732		0.736	0.758	-3.187	-0.173	0.369	0.286
CANTACLARO	n	1.020	0.500	0.950	1.000	0.950	0.450	0.700		0.710	1.030	1.150	1.150	1.150
	E	-2.774	0.675	-5.685	-4.419	0.559	0.487	0.596		0.699	-2.875	-0.361	0.384	0.272
PTE CANOAS	n	1.500	0.800	1.350	1.400	0.620	0.870	0.750	0.760		1.450	0.380	0.350	0.460
	E	-1.178	0.742	-3.672	-2.725	0.903	0.632	0.748	0.720		-1.347	0.412	0.647	0.685



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

CALAMAR	N	1.220	1.270	2.150	6.350	1.150	1.270	1.560	1.150	1.740		1.020	1.050	1.070
	E	0.722	-0.286	0.524	0.948	-0.054	-0.474	0.647	-0.371	-0.456		0.491	0.121	0.189
PTO RICO HDA	N	1.005	2.700	0.920	0.960	1.850	2.550	-0.400	1.350	0.150	1.000		1.500	1.500
	E	0.230	0.117	-0.429	-0.178	0.633	0.047	-0.170	0.223	0.206	0.040		0.906	0.863
FUNDACION	N	1.000	2.650	0.910	0.950	1.800	2.500	-0.400	1.350	0.150	1.000	1.800		1.600
	E	-0.535	0.238	-1.543	-0.887	0.765	0.180	0.010	0.367	0.403	-0.535	0.871		0.901
GANADERIA CARIBE	N	1.000	3.400	0.910	0.950	2.050	3.000	0.100	1.250	0.360	1.000	1.350	1.500	
	E	-0.363	0.262	-1.662	-1.208	0.783	0.240	0.269	0.567	0.606	-0.571	0.825	0.899	

CONVENCIONES PARA COEFICIENTE DE NASH ( E )		
EXCELENTE	>0.8	
MUY BUENO	0.6-0.8	
BUENO	0.4-0.6	
SATISFACTORIO	0.2-0.4	
INSUFICIENTE	<0.2	



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 9-TRANSFERENCIA DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS														RANGOS	
RESUMEN DE "n" PROMEDIO MULTIANUAL Y COEFICIENTE DE NASH	EL BANCO	GRACIAS A DIOS HDA	RIONUEVO	MAGANGUE- ESPERANZA	LA MINA	LAS FLORES	PTE SALGUERO	CANTACLARO	PTE CANOAS	CALAMAR	PTO RICO HDA	FUNDACION	GANADERIA CARIBE	MINIMO	MAXIMO
EL BANCO	n		27.10	0.57						1.10				-27.10	1.10
	E		0.88	0.72						0.73					
	Ag/Aug		0.99	0.65						0.63				0.63	0.99
GRACIAS A DIOS HDA	n						0.75	0.76	0.73					0.73	0.76
	E						0.71	0.68	0.67						
	Ag/Aug						0.11	4.01	0.04					0.04	4.01
RIONUEVO	n	26.50		1.60						2.08				-26.50	2.08
	E	0.92		0.81						0.74					
	Ag/Aug	1.01		0.66						0.64				0.64	1.01
MAGANGUE- ESPERANZA	n	0.73	1.67							6.20				0.73	6.20
	E	0.77	0.74							0.96					
	Ag/Aug	1.53	1.51							0.96				0.96	1.53
LA MINA	n								0.60		1.67	1.80		0.60	1.80
	E								0.87		0.69	0.74			
	Ag/Aug								0.05		0.48	0.67		0.05	0.67
LAS FLORES	n				3.05		0.82		0.77					0.77	3.05
	E				0.64		0.66		0.65						
	Ag/Aug				0.79		0.10		0.04					0.04	0.79
PTE SALGUERO	n		0.94		0.70	0.95		0.81	0.58					0.58	0.95
	E		0.83		0.76	0.73		0.74	0.76						
	Ag/Aug		8.83		7.92	10.06		35.42	0.37					0.37	35.42
CANTACLARO	n		0.50			0.45	0.70		0.71					0.45	0.71
	E		0.67				0.60		0.70						
	Ag/Aug		0.25				0.03		0.01					0.01	0.25
PTE CANOAS	n		0.80		0.62	0.87	0.75	0.76			0.35	0.46		0.35	0.87
	E		0.74		0.90	0.63	6.00	0.72			0.65	0.69			
	Ag/Aug		23.72		21.27	27.02	2.69	95.09			10.16	14.30		2.69	95.09
CALAMAR	n	1.22		6.35										1.22	6.35
	E	0.72		0.95											
	Ag/Aug	1.60		1.04										1.04	1.60
PTO RICO HDA	n				1.85							1.50	1.50	1.50	1.85
	E				0.63							0.91	0.86		
	Ag/Aug				2.02							0.96	1.36	0.96	2.02
FUNDACION	n				1.80						1.80		1.60	1.60	1.80
	E				0.76						0.87		0.90		
	Ag/Aug				2.09						1.04		1.41	1.04	2.09
GANADERIA CARIBE	N				2.05				0.36		1.35	1.50		0.36	2.05
	E				0.78				0.61		0.82	0.90			
	Ag/Aug				1.49				0.07		0.74	0.71		0.07	1.49



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

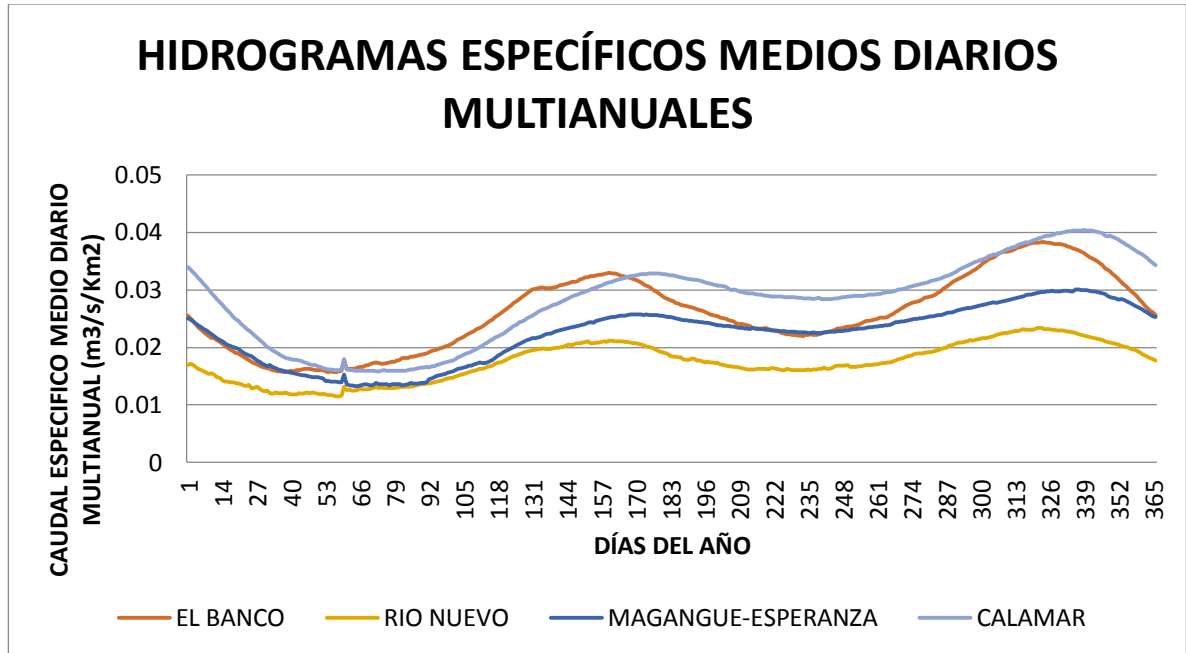
<b>Tabla 10-CLASIFICACION DE ESTACIONES POR AFLUENTE</b>		
<b>GRUPO</b>	<b>ESTACIONES</b>	<b>RIO</b>
<b>1</b>	CALAMAR	<b>MAGDALENA</b>
	MAGANGUE-ESPERANZA	
	EL BANCO	
	RIONUEVO	
<b>2</b>	FUNDACION	<b>FUNDACIÓN</b>
	GANADERIA CARIBE	
	PTO RICO HDA	
<b>3</b>	PTE SALGUERO	<b>CESAR</b>
	PTE CANOAS	
	LA MINA	
	GRACIAS A DIOS	
	LAS FLORES	
	CANTACLARO	

En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos para los caudales medios diarios, donde se puede observar un patrón en las estaciones para las cuales según el coeficiente de Nash adopta valores por encima de 0.6. Las estaciones que presentan una efectiva transferencia entre sí, se encuentran cercanas a un mismo afluente y presentan similitudes hidrológicas, de esta manera, podemos calcular el caudal en zonas no medidas cercanas a estos afluentes utilizando la (EC6) siempre y cuando la relación de área de acuerdo a la estación que se toma como base, cumpla con las estipuladas en la tabla 10 o que en el peor de los casos, corresponda a una relación similar; esto teniendo en cuenta que la relación de áreas esta expresada como  $A_g/A_{ug}$ , donde  $A_g$  corresponde al área de la estación base y  $A_{ug}$  al área de la zona desconocida; por otra parte, el exponente “n” hallado para utilizarlo en la (EC6), también se expresa en la tabla 9 donde debe cumplir con las mismas condiciones para la relación de áreas.

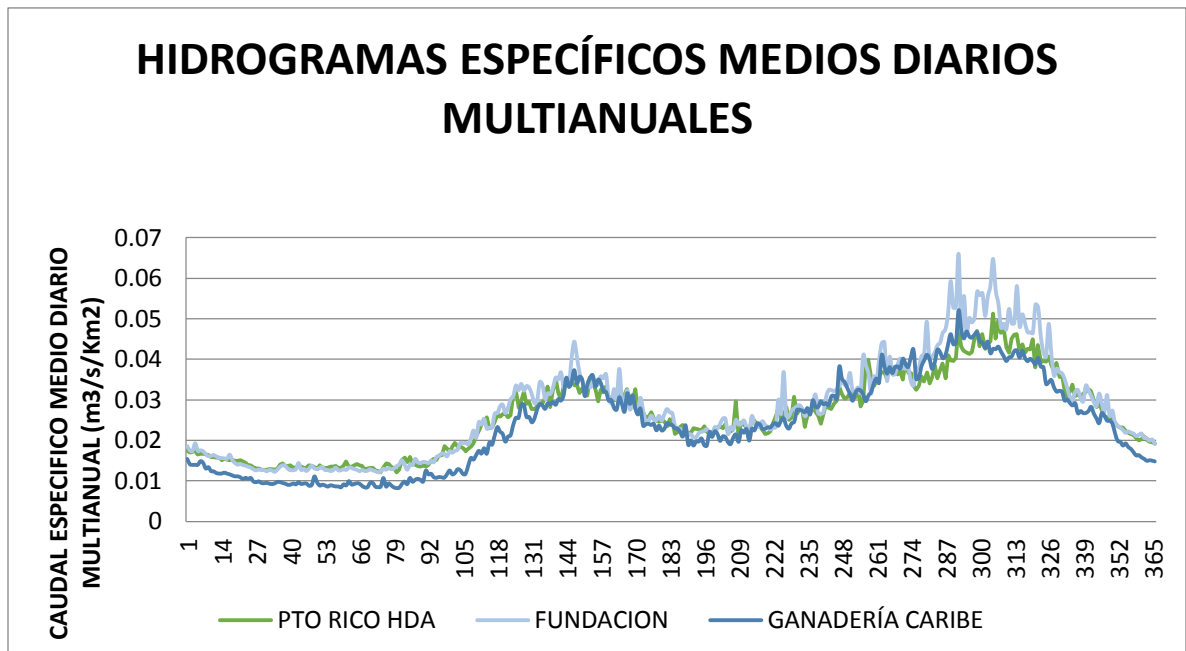
A continuación se presentan las similitudes hidrológicas para cada grupo de la tabla 10:



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



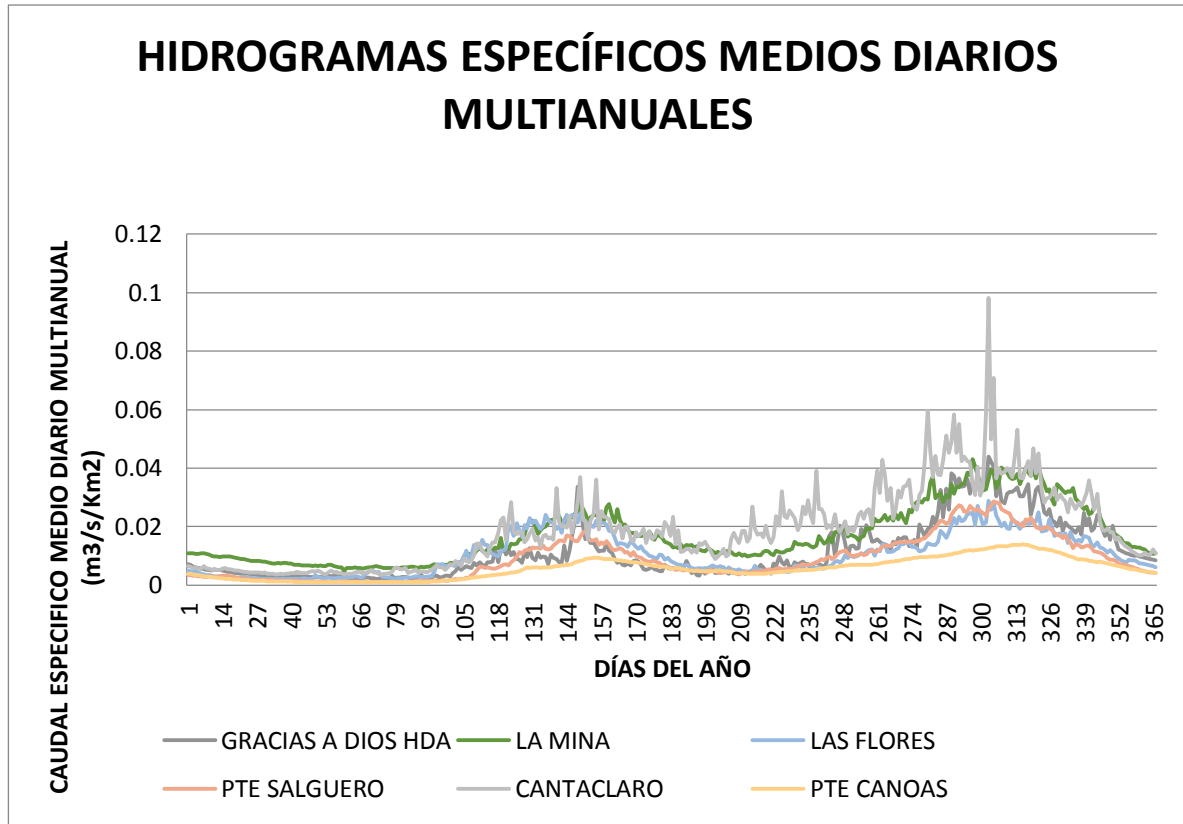
Gráfica 14-Relación de estaciones GRUPO 1: río Magdalena



Gráfica 15-Relación de estaciones GRUPO 2: río Fundación



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



Gráfica 16-Relación de estaciones GRUPO 3: río Cesar

Por otro lado, en la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para los caudales máximos mensuales, donde se puede observar un patrón en las estaciones cuyo coeficiente de determinación adopta superiores a 0.7. Las estaciones que presentan una efectiva transferencia entre sí, se encuentran cercanas a un mismo afluente y presentan similitudes hidrológicas al igual que los caudales medios diarios. De esta manera, podemos calcular el caudal en zonas no medidas cercanas a estos afluentes utilizando la (EC6) siempre y cuando la relación de área de acuerdo a la estación que se toma como índice, cumpla con la relación de áreas especificada en la tabla 11, esto teniendo en cuenta que la relación de áreas esta expresada como  $A_g/A_{ug}$ . Por otra parte, el exponente “n” hallado para utilizarlo en la (EC6), se debe seleccionar de acuerdo a la relación  $A_g/A_{ug}$ .

Las estaciones de Puente Salguero, Las Flores y Pte canoas no se pudieron clasificar en ninguno de los grupos; las dos primeras no presentan afinidad con ninguna de las otras estaciones y la tercera presenta afinidad pero no tiene similitud hidrológica.





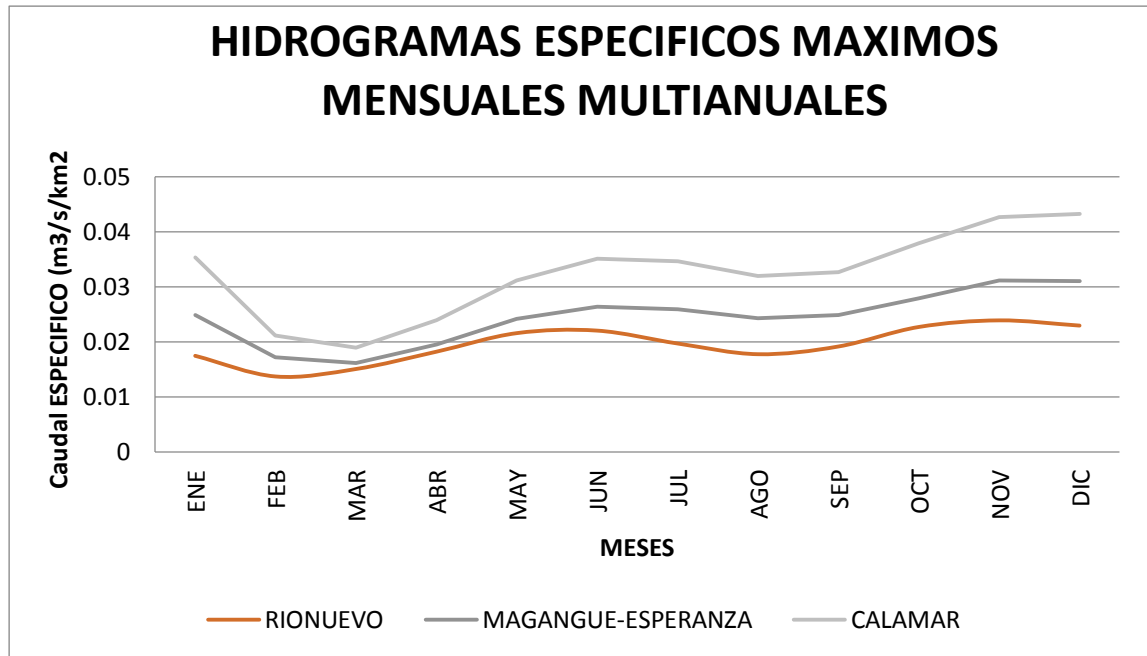
ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

A continuación se presentan las similitudes hidrológicas para cada grupo de la tabla 10:

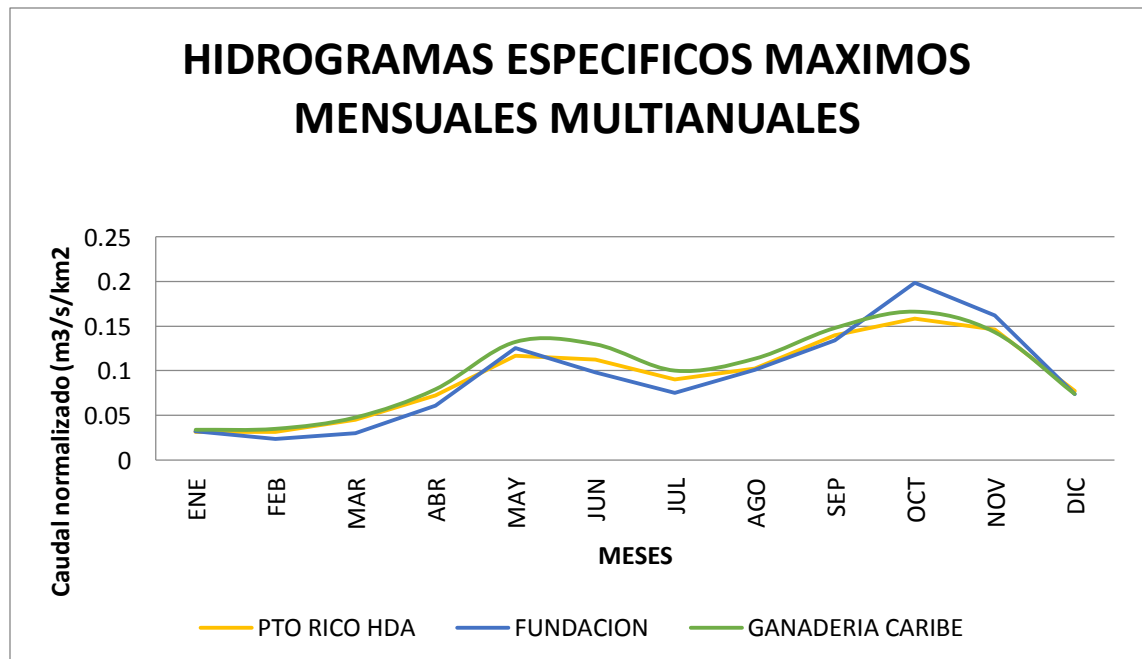
Tabla 11-TRANSFERENCIA DE CAUDALES MAXIMOS MENSUALES														RANGOS	
RESUMEN DE "n" PROMEDIO MULTIANUAL Y COEFICIENTE DE DETERMINACION		GRACIAS A DIOS HDA	RIONUEVO	MAGANGUE-ESPERANZA	LA MINA	LAS FLORES	PTE SALGUERO	CANTA CLARO	PTE CANOAS	CALAMAR	PTO RICO HDA	FUNDACION	GANADERIA CARIBE	MINIMO	MAXIMO
GRACIAS A DIOS HDA	n				4.10			0.30						0.30	4.10
	R <sup>2</sup>				0.93			0.93							
	Ag/Aug				0.90			4.01						0.90	4.01
RIONUEVO	n			1.56					1.38	2.10				1.38	2.10
	R <sup>2</sup>			0.80					0.89	0.74					
	Ag/Aug			0.66					16.22	0.64				0.64	16.22
MAGANGUE-ESPERANZA	n		1.45						1.55	7.40				1.45	7.40
	R <sup>2</sup>		0.80						0.73	0.99					
	Ag/Aug		1.51						24.48	0.96				0.96	24.48
LA MINA	n	4.60						0.58						0.58	4.60
	R <sup>2</sup>	0.93						0.76							
	Ag/Aug	1.12						4.47						1.12	4.47
LAS FLORES	n													0.00	0.00
	R <sup>2</sup>														
	Ag/Aug													0.00	0.00
PTE SALGUERO	n													0.00	0.00
	R <sup>2</sup>														
	Ag/Aug													0.00	0.00
CANTA CLARO	n	0.20			0.40									0.20	0.40
	R <sup>2</sup>	0.93			0.76										
	Ag/Aug	0.25			0.22									0.22	0.25
PTE CANOAS	n		1.25	1.32							0.01	1.36	0.10	0.01	1.36
	R <sup>2</sup>		0.89	0.73							0.81	0.82	0.75		
	Ag/Aug		0.06	0.04							10.53	10.16	14.30	0.04	14.30
CALAMAR	n		2.10	7.70										2.10	7.70
	R <sup>2</sup>		0.74	0.99											
	Ag/Aug		1.57	1.04										1.04	1.57
PTO RICO HDA	n								-0.10			-0.50	0.77	-0.50	0.77
	R <sup>2</sup>								0.81			0.94	0.98		
	Ag/Aug								0.09			0.96	1.36	0.09	1.36
FUNDACION	n								-0.10		-0.80		0.80	-0.80	0.80
	R <sup>2</sup>								0.82		0.94		0.91		
	Ag/Aug								0.10		1.04		1.41	0.10	1.41
GANADERIA CARIBE	n										0.75	0.50		0.50	0.75
	R <sup>2</sup>										0.98	0.91			
	Ag/Aug										0.74	0.71		0.71	0.74



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



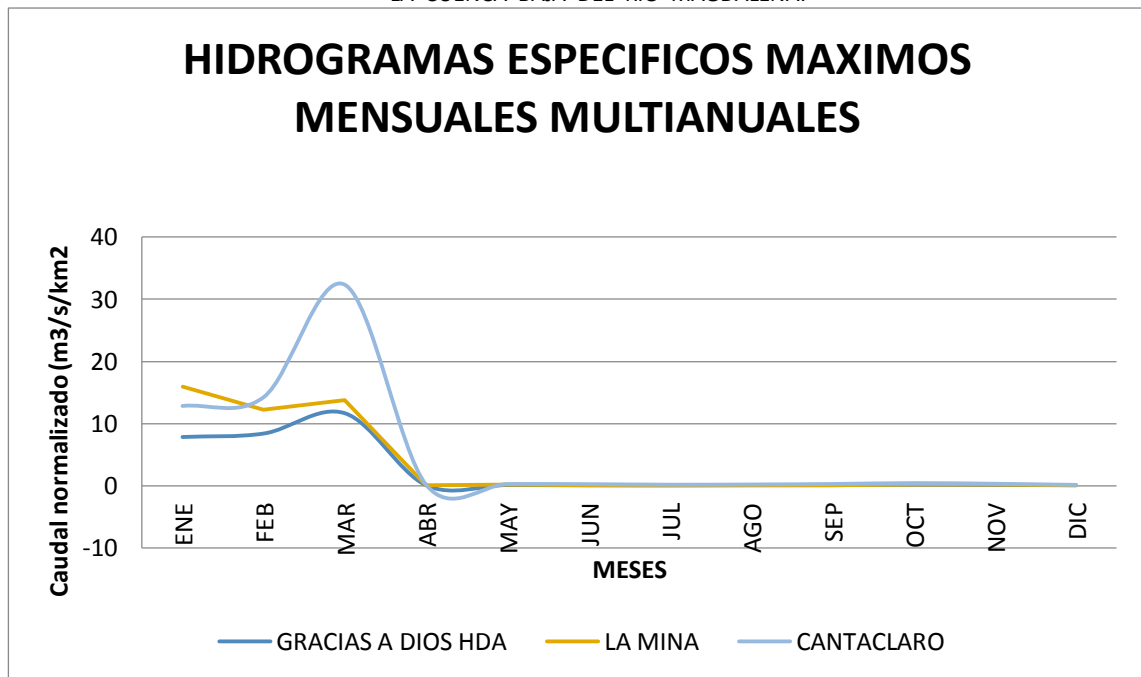
Gráfica 17-Relación de estaciones GRUPO 1: río Magdalena



Gráfica 18-Relación de estaciones GRUPO 2: río Fundación



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



Gráfica 19-Relación de estaciones GRUPO 3: río Cesar

Para terminar, los resultados arrojados en la tabla 12 para caudales mínimos mensuales, permite observar que las estaciones disponibles en la cuenca baja del río Magdalena para este tipo de datos, presentan una efectiva transferencia entre sí reflejando esta afirmación en el coeficiente de determinación que adoptan a la hora de estimar caudales en otra zonas por encima de 0.7. Aunque estas estaciones permitan transferir caudales de este tipo a toda la cuenca, se recomienda transferir los caudales en sectores donde se desarrollen similitudes hidrológicas; para los caudales medios diarios y máximos mensuales, las semejanzas entre los hidrogramas de las estaciones se debían al afluente sobre el cual estaban localizados, pero para los caudales mínimos se ha encontrado que la similitud hidrográfica no dependen del afluente sino de la zona en la que estén ubicadas las estaciones. De esta forma, se puede estimar el caudal en zonas no medidas cercanas a estas ubicaciones utilizando la (EC6) siempre y cuando la relación de área de acuerdo a la estación que se toma como índice, cumpla con la especificada en la tabla 12 o que adopte valores similares; esto teniendo en cuenta que la relación de áreas esta expresada como  $A_g/A_u$ . Por otra parte, el exponente “n” hallado para utilizarlo en la (EC6), se debe seleccionar de acuerdo a la relación  $A_g/A_u$ . A continuación, se presentan los grupos de estaciones con similitud hidrográfica para la transferencia de caudales:

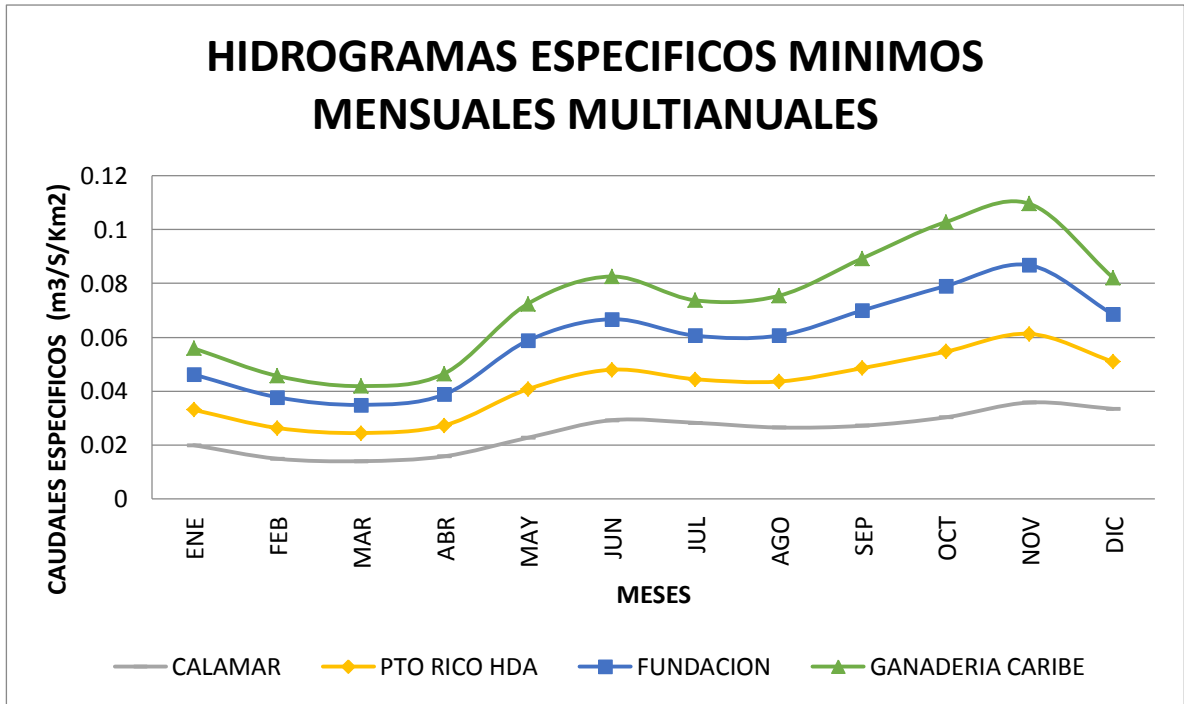


ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

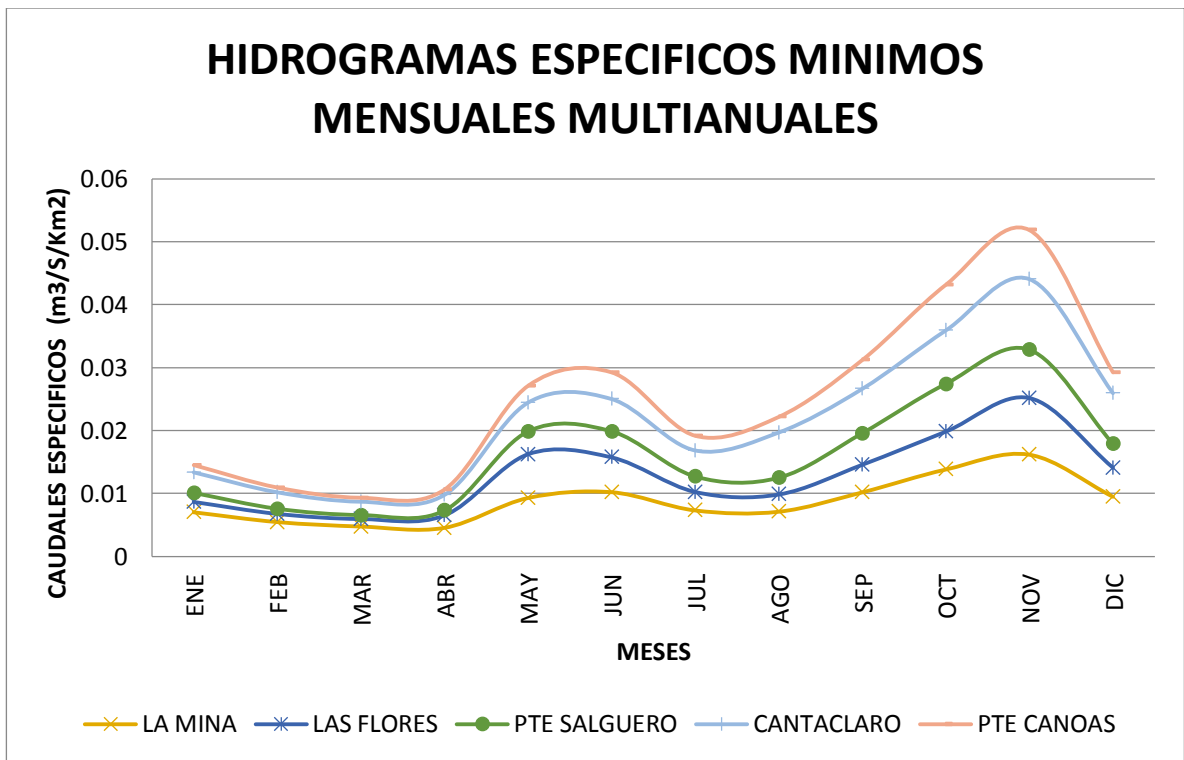
Tabla 12-TRANSFERENCIA DE CAUDALES MÍNIMOS													RANGOS		
RESUMEN DE "n" PROMEDIO MULTIANUAL Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN		GRACIAS A DIOS HDA	RIONUEVO	MAGANGUE- ESPERANZA	LA MINA	LAS FLORES	PTE SALGUERO	CANTACLARO	PTE CANOAS	CALAMAR	PTO RICO HDA	FUNDACION	GANADERIA CARIBE	MINIMO	MAXIMO
GRACIAS A DIOS HDA	n				5.31		0.73	0.93	0.75		2.50	2.34	3.20	0.73	5.31
	R <sup>2</sup>				0.85		0.80	0.82	0.82		0.73	0.73	0.70		
	Ag/Aug				0.90		0.11	4.01	0.04		0.44	0.43	0.60	0.04	4.01
RIONUEVO	n			1.67	1.12	1.31	1.69		1.86	2.04	1.00	1.02	1.04	1.00	2.04
	R <sup>2</sup>			0.84	0.80	0.90	0.78		0.76	0.81	0.80	0.78	0.70		
	Ag/Aug			0.66	345.03	438.45	43.56		16.22	0.64	170.89	164.9	231.97	0.64	438.45
MAGANGUE- ESPERANZA	n		1.68		1.15		1.59	1.21	1.83	6.10	1.03	1.06	1.09	1.03	6.10
	R <sup>2</sup>		0.84		0.75		0.75	0.83	0.74	1.00	0.80	0.82	0.75		
	Ag/Aug		1.51		520.61		65.74	2328.03	24.48	0.96	257.9	248.8	350.03	0.96	2328.03
LA MINA	n	11.60	1.10	1.13		4.79	0.23	1.45	0.45	1.16	1.94	1.70	1.98	0.23	11.60
	R <sup>2</sup>	0.85	0.80	0.75		0.83	0.96	0.80	0.96	0.7	0.92	0.89	0.88		
	Ag/Aug	1.12	0.00	0.00		1.27	0.13	4.47	0.05	0.00	0.50	0.48	0.67	0.00	4.47
LAS FLORES	n		1.20		4.47		0.87		0.89		2.48	2.38		0.87	4.47
	R <sup>2</sup>		0.90		0.83		0.78		0.74		0.78	0.73			
	Ag/Aug		0.00		0.79		0.10		0.04		0.39	0.38		0.00	0.79
PTE SALGUERO	n	1.02	1.37	1.40	0.56	0.93		0.89	0.93	1.43	-0.11	-0.09	0.20	0.11	1.43
	R <sup>2</sup>	0.80	0.77	0.75	0.96	0.78		0.81	0.98	0.7	0.97	0.97	0.96		
	Ag/Aug	8.83	0.02	0.02	7.92	10.06		35.42	0.37	0.01	3.92	3.78	5.32	0.01	35.42
CANTACLARO	n	0.67		1.15	1.33		0.77		0.77	1.18	1.50	1.46	1.55	0.67	1.55
	R <sup>2</sup>	0.82		0.83	0.80		0.81		0.80	0.80	0.83	0.84	0.80		
	Ag/Aug	0.25		0.00	0.22		0.03		0.01	0.00	0.11	0.11	0.15	0.00	0.25
PTE CANOAS	n	0.97	1.53	1.53	0.66	0.93	0.95	0.89			0.34	0.37	0.46	0.34	1.53
	R <sup>2</sup>	0.82	0.76	0.74	0.96	0.74	0.98	0.80			0.95	0.94	0.95		
	Ag/Aug	23.7	0.06	0.04	21.3	27.02	2.69	95.09			10.53	10.16	14.30	0.04	95.09
CALAMAR	n		2.12	6.07	1.17		1.62	1.22			1.06	1.09	1.11	1.06	6.07
	R <sup>2</sup>		0.81	1.00	0.70		0.70	0.80			0.75	0.77	0.70		
	Ag/Aug		1.57	1.04	543.12		68.58	2428.66			269.01	259.51	365.16	1.04	2428.66
PTO RICO HDA	n	3.26	0.99	1.03	2.05	2.87	-0.62	1.62	-0.03	1.06		-2.46	1.82	2.46	3.26
	R <sup>2</sup>	0.73	0.80	0.80	0.92	0.78	0.97	0.83	0.95	0.75		0.99	0.98		
	Ag/Aug	2.25	0.01	0.00	2.02	2.57	0.25	9.03	0.09	0.00		0.96	1.36	0.00	9.03
FUNDACION	n	3.00	1.02	1.06	1.77	2.63	-0.51	1.54	0.04	1.09	-2.43		1.28	2.43	3.00
	R <sup>2</sup>	0.73	0.78	0.82	0.89	0.73	0.97	0.84	0.94	0.77	0.99		0.98		
	Ag/Aug	2.33	0.01	0.00	2.09	2.66	0.26	9.36	0.10	0.00	1.04		1.41	0.00	9.36
GANADERIA CARIBE	n	4.07	1.03	1.06	2.11		-0.09	1.58	0.20	1.10	1.68	1.26		0.09	4.07
	R <sup>2</sup>	0.70	0.70	0.75	0.88		0.96	0.80	0.95	0.70	0.98	0.98			
	Ag/Aug	1.66	0.00	0.00	1.49		0.19	6.65	0.07	0.00	0.74	0.71		0.00	6.65



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



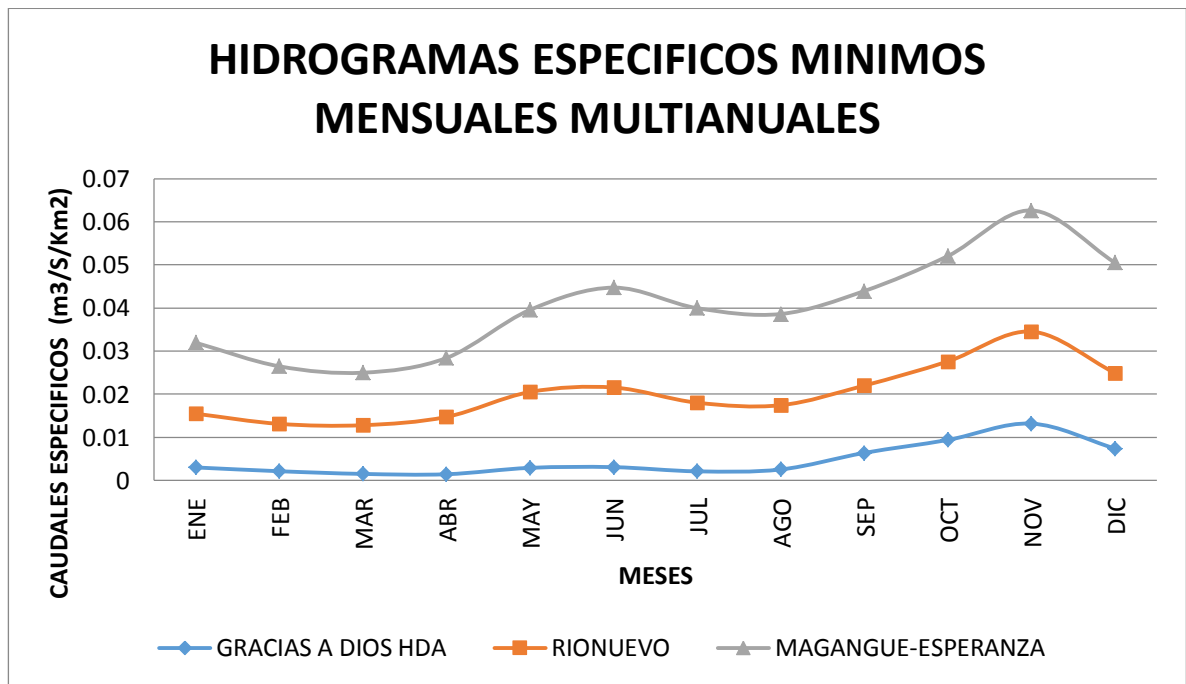
Gráfica 20-Grupo 1: Relación de estaciones por similitud hidrológica



Gráfica 21-Grupo 2: Relación de estaciones por similitud hidrológica



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.



Gráfica 22-Grupo 3: Relación de estaciones por similitud hidrográfica



## CONCLUSIONES

- No es posible encontrar un exponente “n” regional único para la ecuación de transferencia de caudales en la cuenca baja del río Magdalena, debido a la heterogeneidad de los resultados encontrados.
- La transferencia de caudales máximos mensuales y medios diarios en la cuenca baja del río Magdalena se puede realizar, si y solo si, la estación no instrumentada se encuentra cerca al mismo afluente de la estación índice, para garantizar similitud hidrológica.
- El exponente “n” se puede utilizar únicamente para las relaciones de área entre la estación índice y la estación no medida ( $A_g/A_{ig}$ ) consignadas en la tabla 9, 11 y 12.
- La altura de las estaciones sobre el nivel del mar no influye en la transferencia de caudales, ya que aun cuando existen estaciones con esta similitud, como es el caso de las estaciones del grupo 1, se puede transferir caudales entre estaciones que no la tienen mostrando una eficiencia dentro de los mismos rangos de precisión.



## RECOMENDACIONES

- Al encontrar el exponente “n” para la transferencia de caudales medios diarios, se encontró que este iba variando de acuerdo a la relación de áreas que existía entre la estación de referencia y la estación medida; se recomienda verificar el tipo de tendencia que existe entre mencionada relación y el exponente calculado.
- Si se requiere transferir caudales mínimos mensuales, se recomienda tomar la estación índice más cercana al sitio no medido para garantizar una semejanza hidrológica, obedeciendo a los resultados obtenidos; por otro lado, para la transferencia de caudales máximos mensuales y medios diarios se debe tomar una estación índice que se encuentre dentro del mismo afluente que el sitio no medido.





## BIBLIOGRAFÍA

- (IDEAM), I. d. (s.f.). Recuperado el 10 de Febrero de 2015, de <http://www.ideam.gov.co>
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Recuperado el 29 de Abril de 2015, de IMEFEN: [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Cadavid, J. D., & Carvajal, L. F. (2013). MODELO AUTORREGRESIVO BILINEAL APLICADO A LA PREDICCIÓN MENSUAL DE CAUDALES EN COLOMBIA. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- M.Ross, S. (2007). *Introducción a la Estadística*. Barcelona: Reverté S.A.
- Martínez Vara de Rey, C. C. (s.f.). *UNIVERSIDAD DE SEVILLA*. Recuperado el 26 de Abril de 2015, de <http://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf>
- Ministerio de Agricultura; Autoridad Nacional del Agua; Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos hídricos; Administración Local del Agua Chillón Rimac Lurin. (2010). *Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac* (Vol. 1). Lima, PERU.
- Obregón, N., Fragala, F., & Prada, L. (2003). *CINARA-Universidad del Valle*. Recuperado el 06 de Mayo de 2015, de REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN HIDROINFORMÁTICA: <http://cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/61.pdf>
- POVEDA J., G., VELEZ U., J. I., MESA S., O. J., CEBALLOS, L. I., ZULUAGA, M. D., & HOYOS, C. D. (2002). ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÍNIMOS PARA COLOMBIA MEDIANTE REGIONALIZACIÓN Y APLICACIÓN DE LA CURVA DE RECESIÓN DE CAUDALES. *Meteorología Colombiana*, 73-80.
- POVEDA, G., MESA, O., CARVAJAL, L. F., HOYOS, C. D., MEJIA, J. F., CUARTAS, A., y otros. (2002). PREDICCIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN RÍOS COLOMBIANOS USANDO MÉTODOS NO LINEALES. *Meteorología Colombiana*, 101-110.
- Rivas, G. (s.f.). *REGRESION NO LINEAL*. Recuperado el 1 de Mayo de 2015, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/15397/1/10003-18133-1-PB.pdf>



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

- Salazar, J. F., Poveda, G., & Salazar, L. F. (2006). *bdigital*. Recuperado el 8 de Mayo de 2015, de Balances Hidrológicos y Estimación de Caudales Extremos: [http://www.bdigital.unal.edu.co/4575/1/AA\\_4041.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/4575/1/AA_4041.pdf)
- Torrelavega. (s.f.). *ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA*. Recuperado el 9 de Enero de 2015, de Ajuste por mínimos cuadrados: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/fisica-i/practicas-1/Ajuste%20por%20minimos%20cuadrados.pdf>
- TORRES GALLARDO, A. D., & PEÑARANDA GÓMEZ, G. A. (2006). *REGIONALIZACION DE CAUDALES MINIMOS POR METODOS ESTADISTICOS DE LA CUENCA MAGDALENA CAUCA*. Bogotá D.C: Universidad de La Salle.
- Yusuf, M. M., & Rajbir, S. P. (2006). ESTIMACIÓN DE CAUDAL ASOCIADO A LA GEOMETRÍA HIDRÁULICA, EN LA REGIÓN DEL MEDIO ATLÁNTICO, EE.UU. *ASOCIACIÓN AMERICANA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS*.



ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA HIDROLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO MAGDALENA.

## ANEXOS

- Datos de caudales mínimos mensuales, máximos mensuales y medios diarios otorgados por el IDEAM en formato txt.
- Hojas de cálculo para cada uno de los caudales estudiados donde se ve reflejado el proceso realizado con cada uno de ellos para el desarrollo del presente trabajo.
- Trabajo de grado en archivo digital.

**Nota:** Los siguientes anexos se entregan a través de medio magnético (CD) debidamente marcado.