



**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**

**VICERRECTORADO ACADÉMICO**

**ESTUDIOS DE POSTGRADO**

**ÁREA DE INGENIERÍA**

**Postgrado en Ingeniería Ambiental**

**Trabajo de Grado de Maestría**

**EVALUACIÓN HISTÓRICA DE LAS SEQUÍAS EXTREMAS DEL RÍO TIRGUA EN  
EL ESTADO COJEDES**

**Presentado por Luis Rumbo**

**Para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental**

**Tutor**

**Edilberto Guevara Pérez, PhD**

**Caracas, Diciembre 2005**

*“Todas las cosas por poder inmortal, cercanas o lejanas,  
indisolublemente; se encuentran unidas unas a otras, de  
tal forma que es imposible cortar el pétalo de una rosa,  
sin hacer temblar una Estrella”.*

*Francis Thompson.*

## **DEDICATORIA**

A mis Padres, Luis Alberto y Emma Cristina.

A mis queridos hermanos, Emma Yulisbeth, Richard José, Glenny Maritza y Gaudys Yulitza.

A mis hijos, Luís Enrique, Irienni Betzabeth, Getzabeth Abigail, Irbin Enrique y Bexaí Anaís.

A mi Esposa Yris Coromoto.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Prof. Edilberto Guevara, por su incondicional colaboración.

Al Prof. Franklin Paredes, por su incondicional colaboración y apoyo.

A la Prof. (a) Nahir Carballo, por su valiosa colaboración.

Al T.S.U. Christian Gómez, por su valiosa colaboración.

Al MARN seccional Portuguesa.

Al MARN seccional Cojedes.

A la UNELLEZ.

## RESUMEN

### EVALUACION HISTÓRICA DE LAS SEQUÍAS EXTREMAS DEL RÍO TIRGUA EN EL ESTADO COJEDES

---

El año 2003 se caracterizó por la severa sequía que afectó la mayor parte del país. En ese momento se especuló que ese fenómeno ocasionó la reducción drástica del gasto medio del río Tirgua. Dado que los municipios San Carlos, Tinaco y Tinaquillo del estado Cojedes se abastecen de agua del referido río, esta investigación tuvo como objetivo evaluar las sequías extremas del río Tirgua. Fue una investigación de tipo retrospectiva y nivel exploratorio – explicativo. Se tomó como base el gasto medio diario del río registrado en la estación hidrométrica Paso Viboral durante el período 1963 – 1993. Se caracterizó la dinámica fluvial por medio de los parámetros: media, moda, mediana y desviación estándar. Se empleó el modelo Wisner a fin de determinar la ocurrencia de períodos secos de 1 a 60 días de duración. Se generó un modelo matemático de tipo exponencial a fin de estimar la ocurrencia de períodos secos de duración variable. Por último, se efectuó un análisis de duración – frecuencia de los caudales mínimos diarios. Se encontró que el río Tirgua posee un caudal medio de 1 - 25 m<sup>3</sup>/s con una elevada probabilidad de ocurrencias de sequías de duración inferior a 15 días continuos. El caudal mínimo se relaciona con la duración (D) en días y el período de retorno (T<sub>r</sub>) en años por medio del modelo:  $Q_{min} = 5,053 \frac{D^{0,105}}{T_r^{0,925}}$ , mientras que el número de períodos secos (n<sub>d</sub>) sigue un patrón en función de la duración (d) en días dado por:  $n_d = 411,322.e^{-0,568.d}$ . Se infiere que la sequía que experimentó el río Tirgua en el 2003 fue un fenómeno inherente a la dinámica propia del río, no obstante se sugiere el estudio de la periodicidad de este tipo de evento.

*Palabras claves: sequía extrema, río Tirgua, gasto medio diario*

---

**ABSTRACT****HISTORICAL EVALUATION OF THE EXTREME DROUGHTS OF THE RIVER  
TIRGUA IN THE STATE COJEDES**

---

The year 2003 was characterized by the severe drought that affected the most portion of the country at that moment was believed that this phenomenon caused the drastic reduction of the mean flow of Tirgua River. As the municipalities San Carlos, Tinaco and Tinaquillo, the river is the source of water supply, this research deals with the description of the extreme droughts of the Tirgua River for the period 1963 - 1993. The basic information is the daily mean flows of the river at Paso Viboral gaging station. First statistical analysis of the flow record was done; finding that mean value is 13 m<sup>3</sup>/s and its standard deviation is 12 m<sup>3</sup>/s. The time series has strong tendency for the occurrence of dry periods. The Wiser model was used to find the behaviour of dry periods for different durations (from 1 to 60 days). The minimum flow are related with the duration (D) and the period of return (T<sub>r</sub>) as follows,  $Q_{min} = 5,053 \frac{D^{0,105}}{T_r^{0,925}}$ , while the number of dry periods (n<sub>d</sub>) follows a pattern given by:  $n_d = 411,322.e^{-0,568.d}$  as a function of duration (d). Apparently the drought of 2003 is only a phenomenon of stochastic occurrence. Nevertheless it is advisable to study the periodicity of that.

*Key words: extreme drought, river Tirgua, flow medium daily*

---

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
INTRODUCCIÓN	
<b>CAPÍTULO I: EL PROBLEMA</b>	
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.2.1 MODELO PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CAUDALES MÍNIMOS.....	11
2.2.2 ANÁLISIS DE SEQUÍAS.....	16
2.3 LIMITACIÓN.....	22

2.4 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE ESTUDIO .....	22
<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO</b>	
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	24
3.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	24
3.3 FASES DEL ESTUDIO .....	24
<b>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA.....	30
4.2 ANÁLISIS DE LOS REGISTROS HISTÓRICOS DE LOS CAUDALES MEDIOS DIARIOS DEL RÍO TIRGUA MEDIDOS EN LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PASO VIBORAL. ....	31
4.3 MODELO WISER PARA LA DETERMINACIÓN DE LA OCURRENCIA DE PERÍODOS SECOS DE DURACIÓN “D”.....	38
4.4 MODELO MATEMÁTICO DEL NÚMERO DE PERÍODOS SECOS EN FUNCIÓN DE SU DURACIÓN “D”.....	44
4.5. ANÁLISIS DE LA DURACIÓN – FRECUENCIA DE LOS CAUDALES MÍNIMOS DEL RÍO TIRGUA. ....	45
4.6 MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMAR EL CAUDAL MÍNIMO ESPERADO EN ÉPOCA DE ESTIAJE COMO UNA FUNCIÓN DE LA DURACIÓN Y EL PERÍODO DE RETORNO. ....	47
<b>CONCLUSIONES</b> .....	53
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	55

**REFERENCIAS** ..... 56

**ANEXOS** ..... 61

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Medidas de tendencia central y dispersión de los registros históricos del caudal medio diario del río Tirgua en la estación hidrométrica Paso Viboral. Periodo: 1963 – 1993. ....	32
<b>Tabla 2.</b> Distribución de frecuencia de los registros históricos del caudal medio diario del río Tirgua en la estación hidrométrica Paso Viboral. Periodo: 1963 – 1993.....	34
<b>Tabla 3.</b> Proyección poblacional del Municipio San Carlos del estado Cojedes en el período 1990 – 2001.....	39
<b>Tabla 4.</b> Resultados del análisis de los períodos secos registrados en la estación hidrométrica Paso Viboral en el período 1963 – 1993.....	41
<b>Tabla 5.</b> Probabilidad de ocurrencias de eventos que involucren sequías en el río Tirgua. ....	43
<b>Tabla 6.</b> Características más resaltantes del modelo matemático exponencial para predecir el número de períodos secos del río Tirgua en función de su duración.....	44
<b>Tabla 7.</b> Promedios cabalgantes del gasto promedio mínimo del río Tirgua en la estación Paso Viboral para duraciones de 7, 15, 30, 45 y 60 días.....	46
<b>Tabla 8.</b> Características más resaltantes del modelo matemático exponencial para predecir el caudal promedio mínimo del río Tirgua en función de su duración y el período de retorno.....	48
<b>Tabla 9.</b> Comparación entre los gastos promedios mínimos del río Tirgua observados y los simulados por el modelo para las diferentes duraciones consideradas.....	51
<b>Tabla 10.</b> Diferencias entre los valores observados y los simulados por el modelo matemático para estimar el caudal promedio mínimo del río Tirgua.....	52

**Tabla 11.** Desviación estándar de las diferencias entre los valores observados y los simulados por el modelo matemático para estimar el caudal promedio mínimo del río Tirgua a las diferentes duraciones consideradas.....53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Cadena de fenómenos del ciclo hidrológico que conducen a la ocurrencia de las sequías.....	9
<b>Figura 2.</b> Histograma de frecuencia de la serie de caudales medios diarios del río Tirgua. Periodo: 1963 – 1993.....	33
<b>Figura 3.</b> Relación entre los valores predichos por el modelo matemático para predecir el número de períodos secos del río Tirgua en función de su duración con los valores observados.....	45
<b>Figura 4.</b> Curvas de frecuencia – duración de los caudales mínimos para el río Tirgua. Estación hidrométrica Paso Viboral.....	47
<b>Figura 5.</b> Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 7 días.....	48
<b>Figura 6.</b> Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 15 días.....	49
<b>Figura 7.</b> Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 30 días.....	49
<b>Figura 8.</b> Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 45 días.....	50
<b>Figura 9.</b> Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 60 días.....	50

## INTRODUCCIÓN

Las actividades antrópicas con el devenir de los años han ocasionado alteraciones en los patrones climáticos del orbe. Cada día ocurren en diferentes partes del mundo eventos extremos: ciclones, ventiscas, tornados, supertormentas, entre otros que traen consigo devastación y algunas veces pérdidas humanas (Guevara, 2003). Venezuela, en el último decenio ha sido azotada por severas sequías presumiblemente a consecuencia de este fenómeno de trascendencia mundial.

Durante el año 2003 los estragos ocasionados por las sequías en Venezuela fueron alarmantes. Una larga cadena de fenómenos climatológicos acaecidos en Sudamérica puso en relieve la vulnerabilidad del abastecimiento de agua a varias regiones del país; la merma hídrica de importantes embalses, la reducción del gasto en múltiples ríos en la región de los llanos, y la ocurrencia de una ola de calor inusualmente alta se conjugaron para alarmar a los venezolanos. En el caso del estado Cojedes los municipios: Falcón, San Carlos, Tinaco y Macapo fueron los más afectados. Dado que el río Tirgua presentó una disminución importante de su caudal en este período, surgió la apremiante necesidad de caracterizar la dinámica de las sequías del referido río a fin de indagar cuan confiable es él como fuente de agua.

La presente es una investigación retrospectiva de campo, la muestra estuvo constituida por los registros de caudales medios diarios del río Tirgua registrados en la estación “Paso Viboral” durante el período 1963-1993. En este documento se presentan los resultados de la investigación estructurados, de la siguiente manera: el Capítulo 1 se centra en el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación; el Capítulo 2 trata de los antecedentes de la investigación, fundamentos teóricos relacionados con el análisis de sequías y caudales mínimos, las limitaciones que tiene asociado el uso de modelos matemáticos como herramienta de predicción y finalmente, la definición de las variables de estudio; el Capítulo 3 detalla los

aspectos metodológicos; el Capítulo 4 aborda la descripción y discusión de los resultados. Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones que se consideraron pertinentes.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

La Tierra, es el único planeta conocido que está cubierto de una capa acuosa líquida. Océanos, ríos, lagos, humedales, nubes, la mayor parte de sus rasgos superficiales están constituidos por agua. La vida misma, cuya presencia es intrínseca de la Tierra, se forma, desarrolla y existe a merced a la presencia de este líquido imprescindible. Desde el espacio o desde la profundidad de su envoltura gaseosa, éste es un mundo de agua. Sin embargo, a pesar de la abundancia global, los seres humanos experimentan problemas de escasez de agua, cada vez más frecuentes, cada vez más intensos, cada vez más devastadores (Delgado y Antón, 2002).

A pesar de que el año 2003 fue el año internacional del agua dulce, 1,2 millones de personas no tienen acceso al líquido potable (3 millones mueren al año por enfermedades relacionadas con esta causa y cuatro de cada 10 viven en zonas donde escasea), y 2,4 millones carecen de saneamiento adecuado (ONU, 2003; Agencia de Noticias EFE, 2003). En muchas ciudades de América Latina el abastecimiento de agua ha disminuido debido a menores caudales o a cambios de los regímenes hídricos. En la región peri-amazónica, desde hace dos o tres décadas, a consecuencia de la deforestación de las cuencas los niveles fluviales han descendido considerablemente durante la estación seca. Al mismo tiempo, durante el período húmedo se producen inundaciones inéditas (Delgado y Antón, 2002).

Venezuela, por su parte, cuenta con abundantes recursos hidráulicos pero confrontan limitaciones para su aprovechamiento debido a la irregular distribución de las precipitaciones y condiciones topográficas y geológicas. Existen regiones donde la disponibilidad de agua es

abundante en comparación con las demandas previsibles. Por lo tanto, los aprovechamientos pueden realizarse sin que la utilización del recurso llegue a comprometer la situación futura, ni a crear problemas entre los diferentes sectores usuarios. Por el contrario, existen regiones del país que han alcanzado tal grado de desarrollo, que sus necesidades de agua consumen una parte apreciable de sus disponibilidades (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2002).

Durante el año 2003, el problema de la sequía de los embalses en Venezuela fue particularmente grave. Se aplicaron racionamientos muy severos como medida para preservar las reservas de aguas a nivel nacional. El caso más emblemático lo constituyó: Camatagua y Lagartijo, los cuales surten al Acueducto Metropolitano de Caracas; también destacaron los embalses: El Isiro, Barrancas y Hueque que abastecen Coro, La Vela y Punto Fijo, y Manuelote y Tulé que surten a Maracaibo (Canizales, 2003). Este evento extremo, no solo tuvo repercusiones en los embalses anteriormente mencionados, sino que afectó a varios cursos de aguas superficiales a lo largo y ancho del país; por ejemplo, el río Guárico cuya naciente se ubica en Belén, estado Carabobo, literalmente desapareció. Igual suerte tuvieron el río Zuata, el Caramacate, el Pao y muchas otros enclavados en estados llaneros (El Siglo, 2003).

Con relación al estado Cojedes, el año 2003 trajo consigo una merma considerable del caudal del río Macapo (principal afluente del río Tinaco), producto de la fuerte sequía que se registró y presumiblemente a la tala efectuada a nivel de las riberas del citado río (Sánchez, 2003A). El río Tirgua, por su parte, disminuyó gradualmente su caudal, sin embargo, no fue necesario implementar políticas de racionamiento severas en las ciudades de San Carlos, Tinaco y Tinaquillo, porque la demanda insatisfecha fue cubierta con agua procedente de fuentes subterráneas (Hernández, 2003A). No obstante, durante mayo de 2003 fue tal la situación del río

Tirgua a la altura del dique toma Las Mercedes que el caudal derivado apenas llegó a 350 litros por segundo, cuando la capacidad de la planta de tratamiento que abastece la ciudad de Tinaquillo es de 2100 litros por segundo, o sea apenas 14 % de la capacidad instalada (Hernández, 2003B). Ante este escenario Hidrocentro – Tinaquillo se vio en la obligación de construir pozos profundos como alternativa para satisfacer la apremiante necesidad de agua (Mireles, 2003).

En el año 2004 el coordinador de la estación experimental adscrita a la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela ubicada en el Municipio Montalbán del estado Carabobo sostuvo que un 48 % de la cuenca alta esta desprovista de vegetación media y alta, asimismo señaló que esta situación se agrava por el sobrepastoreo, tala, quema y la expansión de la frontera agrícola (Elorgas, 2005).

El río Tirgua reviste especial importancia para el estado Cojedes, porque, como se mencionó anteriormente, constituye la principal fuente de agua dulce para los municipios San Carlos, Tinaco y Falcón. Actualmente se derivan cerca de 160 l/s en las cercanías de la estación hidrológica Paso Viboral para abastecimiento humano, y unos 1814 l/s al sistema de riego (Ministerio de Producción y Comercio, 2003). En tal sentido, cualquier evento extremo de sequía afectaría, tanto al sector agrícola del municipio Rómulo Gallegos, como a las poblaciones de San Carlos, Tinaco y Tinaquillo. La relevancia de esta problemática fue discutida en el Foro Ambientalista en Rescate del Río Tirgua organizado por la Alcaldía de San Carlos y la Comisión de Ambiente del Consejo Legislativo efectuado en marzo de 2005. En el referido evento quedó manifiesta la dramática situación del río Tirgua y la necesidad de abordar soluciones concretas con el apoyo del gobierno regional y nacional (Mogollón, 2005).

Por lo expuesto, en esta investigación se ha intentado dar respuesta a las siguientes

interrogantes:

- 1.- ¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de sequías extremas en el río Tigua?
- 2.- ¿Qué período de retorno tendría una sequía extrema que comprometiese el abastecimiento del vital líquido a las comunidades de: San Carlos, Tinaco y Tinaquillo?
- 3.- ¿Realmente, el río Tigua presenta una tendencia a disminuir su caudal de estiaje?;
- 4.- ¿Existe algún patrón en la aparición de años extremadamente secos?;
- 5.- ¿En qué mes hay más probabilidad de que ocurra un agotamiento total del caudal del río?
- 6.- ¿Cuán severas serán las sequías del río Tigua a futuro?

## **1.2 Justificación de la investigación**

Durante la estación seca el caudal del río Tigua mengua a tal magnitud que suele comprometer el abastecimiento de las ciudades de San Carlos, Tinaco y Tinaquillo. Por tanto, se justifica una investigación que clarifique la dinámica de las sequías del río Tigua, especialmente a la altura del dique toma Las Mercedes e inmediatamente aguas abajo de la estación hidrométrica Paso Viboral donde se encuentra la derivación al sistema de riego San Carlos. La comprensión de la ocurrencia de eventos extremos permite realizar una mejor planificación y gestión del recurso agua por parte de las empresas hidrológicas del Estado. Asimismo, la información que se desprende de este estudio sirve como herramienta de diseño de embalses, diques o cualquier otra obra hidráulica de aprovechamiento situada en las inmediaciones de la referida estación hidrométrica. Por último, debe resaltarse que cualquier investigación que genere nuevo conocimiento en torno al recurso agua del Estado origina múltiples beneficios que optimizan la calidad de vida de los habitantes del estado Cojedes.

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo general de la investigación**

Evaluar el comportamiento de la serie histórica de sequías extremas del río Tirgua en el Estado Cojedes a la altura de la estación hidrométrica Paso Viboral.

#### **1.3.2 Objetivos específicos de la investigación**

El objetivo general planteado se cubre con los siguientes objetivos específicos:

- 1.- Caracterizar a través de estadísticos descriptivos el régimen del caudal medio diario del río Tirgua.
- 2.- Estimar el número de períodos secos de diferente duración “d” del río Tirgua a través del modelo propuesto por Wisser (1967).
- 3.- Generar un modelo matemático que estime la variación del número de períodos secos en función de la duración “d”.
- 4.- Generar un modelo matemático para estimar el caudal mínimo esperado en época de estiaje como una función de la duración y el período de retorno.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la investigación

Una de las principales tareas de la hidrología ha sido el análisis de ocurrencia de los caudales máximos. La creciente demanda de agua y la pérdida de calidad del recurso, hacen, sin embargo, que se preste especial atención a su uso óptimo, y por lo tanto, que se estudien también cuidadosamente los caudales mínimos. Si bien, las consecuencias ocasionadas por eventos mínimos de larga duración no son palpables inmediatamente, como en el caso de las crecientes, a largo plazo son tan negativas como las de estas últimas (Guevara, 1992).

A pesar de la importancia que tiene la realización de análisis de caudales mínimos extremos al momento de explotar óptimamente los recursos hídricos superficiales, son pocas las investigaciones que se han publicado en Venezuela. Una de las más relevantes es la de Ojeda y Espinoza (1985), en la cual se evalúa registros históricos en cuatro estaciones hidrológicas en la cuenca de los ríos Caroní, en Arekuna, San Pedro de Las Bocas, La Paragua y Orinoco a la altura de Ciudad Bolívar; se llevó a cabo un análisis de frecuencia de los caudales mínimos extremos, curvas de duración y análisis frecuencia – duración de los caudales mínimos. Los resultados derivados de esta investigación fueron utilizados para estimar las disponibilidades hidráulicas potenciales y aprovechables en la región sur del Orinoco.

Otro trabajo de especial interés es el de Guevara (1996), en el cual se aplica series de Fourier para la predicción estocástica de los caudales medios en los ríos Paragua y Boconó de las cuencas Caroní y Boconó, respectivamente; se determinaron los coeficientes de Fourier tanto para los promedios como para la desviación estándar de los registros históricos. Según el autor, este

procedimiento resultó una buena herramienta para estudiar la estructura de series de caudales mensuales, pues conociendo pocos armónicos de la serie se logra explicar un porcentaje elevado de la varianza de los caudales.

En una investigación reciente, Guevara (2004) estudió los caudales mínimos en la cuenca del río Caroní. Utilizando como información básica proveniente de las series cronológicas de los caudales medios diarios de 8 estaciones de la referida cuenca, aplicó análisis de frecuencia, análisis de frecuencia-duración y curvas de duración, encontrando que la distribución de frecuencia teórica más adecuada para ajustar los valores de campo es la distribución de valores extremos de Gumbel Tipo III; estableció valores regionales únicos para las curvas de frecuencias; estimó un coeficiente modular,  $K_D$ , basado en el período de retorno y la duración,  $D$ , en días de los caudales mínimos.

Con respecto al río Tirgua, sólo se encuentra como referencia el trabajo de Rondón (1988), en el cual se estudia el caudal derivable en épocas de estiaje en el río San Carlos, a la altura de Paso Viboral, utilizando el análisis de los caudales mínimos del período 1942 – 1954. Se hace uso de la distribución de valores extremos de Gumbel Tipo III y el empleo de una distribución de frecuencia acumulada. Aunque, se han realizados otros estudios del río San Carlos, éstos son de carácter netamente descriptivo como por ejemplo, el de Dumith, Homes, Molina y Peña (1999).

## **2.2 Fundamentos teóricos**

La sequía puede considerarse como uno de los desastres naturales severos, que ocurren sobre nuestro planeta. Las causas de las sequías son variables, pero según Carrillo (1999) se pueden agrupar en: sequías meteorológicas, sequías de ubicación geográfica, sequías orográficas y sequías antropogénicas. Las causas meteorológicas se enmarcan dentro de los dos parámetros fundamentales que regulan la precipitación: las características de la masa de aire y la circulación

atmosférica. La humedad disponible y la dirección del viento señalan la posibilidad de ocurrencia de una sequía. La ubicación geográfica de una región es un factor, con frecuencia determinante, en la ocurrencia de diferentes clases de sequías. La latitud, la posición de los centros de alta presión y las corrientes oceánicas producen situaciones de sequías estacionales o permanentes. La orografía o relieve de la zona (montaña o depresiones) es responsable de muchas sequías estacionales o aperiódicas. El factor orográfico tiene particular importancia en la zona tropical. El factor antropológico, es decir, el producido por el hombre, se refiere al mal uso y manejo de la tierra, a la erosión provocada por cultivos no apropiados o al pastoreo de animales. Aunque la acción no es directamente una causa de sequía, contribuye a acentuar la deficiencia de agua, particularmente en las regiones semiáridas. Las principales características de una sequía son: comienzo, terminación, duración, magnitud, intensidad y superficie afectada. El comienzo se refiere a la fecha en que la escasez de agua es aguda, la terminación es la fecha en que la escasez de agua es pequeña, la duración es el tiempo entre el comienzo y la terminación, la magnitud es el volumen del déficit de agua, la intensidad es la relación entre la magnitud y la duración, la superficie afectada es la zona que abarca la sequía.

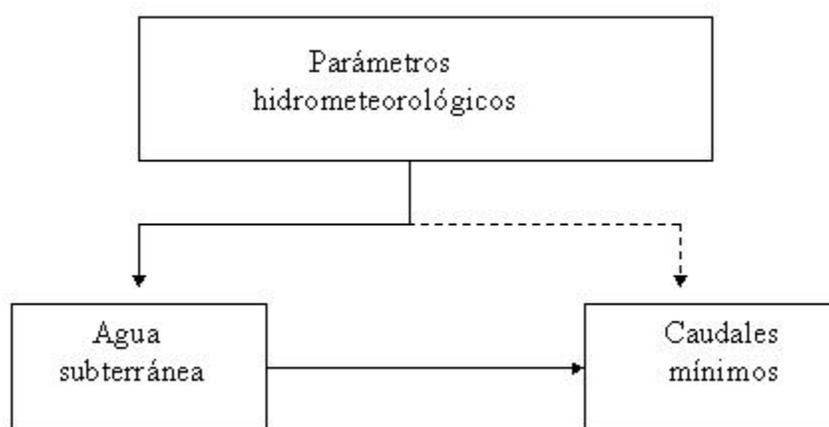
Carrillo (1999) sostiene que existen cuatro métodos para analizar sequías: índices, empíricos, analíticos y de generación de datos. Dentro de los métodos analíticos de sequías, asociadas a cauces superficiales se encuentra el análisis de los caudales mínimos.

La importancia que posee el conocimiento de los caudales mínimos se manifiesta en aspectos como abastecimiento a poblaciones, industria y agricultura, generación de hidroelectricidad, entre otros. Para establecer la relación entre los usos indicados y los eventos mínimos no bastan las técnicas estadísticas tradicionales (análisis de valores mínimos y curva de duración), más bien se

requiere de estimaciones sobre la probabilidad de ocurrencia de los eventos extremos mínimos de diferentes duraciones.

A continuación se presenta los fundamentos teóricos sobre el análisis de las sequías extremas tomando como base la descripción dada por Guevara (1992; 2004). De acuerdo con este autor dicho análisis comprende:

- a. Investigación del origen del fenómeno, es decir de los parámetros hidrometeorológicos que lo ocasionan: precipitación, evaporación, infiltración, entre otros. Se usan procedimientos probabilísticos y determinísticos, así como relaciones funcionales entre los eventos de interés y los parámetros que los ocasionan.
- b. Análisis de los parámetros hidrometeorológicos de salida, tal como flujo base, recarga, almacenamiento, y relación de éstos con el caudal mínimo dentro del sistema de drenaje de la cuenca. Se usan modelos determinísticos (recesión).
- c. Análisis de la cadena de fenómenos del ciclo hidrológico que conducen a la ocurrencia de las sequías (ver Figura 1)



**Figura 1.** Cadena de fenómenos del ciclo hidrológico que conducen a la ocurrencia de las sequías

d. Análisis de los caudales mínimos sin considerar su origen, mediante métodos estadísticos y estocásticos.

De acuerdo con Guevara (1992) los procedimientos determinísticos planteados en los puntos a, b y c, permiten, en general, una estimación directa del caudal mínimo en el futuro inmediato. Dependiendo del número de parámetros que se involucren, estos métodos se tornan muy complicados, haciendo que se prefieran las técnicas estadísticas y estocásticas del punto d, las que se orientan a la determinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento de determinada magnitud. Esto permite una predicción a largo plazo, sin embargo, casi siempre en el sentido de que un evento mínimo ocurra dentro de un período determinado.

De acuerdo con el objetivo que se plantee en el análisis de los caudales mínimos, se deben definir diferentes parámetros que caractericen al evento. En general, los caudales mínimos pueden caracterizarse como se indica a continuación (Guevara, 1992):

A. A través del nivel  $h$ , caudal  $Q$  y volumen  $V$ .

- Como un valor extremo dentro de un período determinado, tal como el caudal diario mínimo de un año.
- Como el promedio del período considerado.
- En relación con un límite mínimo dado, tal como el déficit de agua por debajo de la frontera  $Q_s$  preestablecida.

B. A través de la duración (probabilidad) de ocurrencia de las magnitudes descritas en el punto

A.

Para el caso de los métodos que se desarrollan en la presente investigación, se definen los siguientes parámetros:

**Caudal:**

$Q$  ( $m^3/s$ ): como expresión general de la variable.

$NQ$  ( $m^3/s$ ): caudal menor que un valor  $Q$  dado  $Q_s$

$MNQ$  ( $m^3/s$ ): caudal mínimo, medio del período  $x$  dado.

$NQ_x$  ( $m^3/s$ ): caudal más pequeño del intervalo  $x$ .

$Q_s$  ( $m^3/s$ ): caudal de referencia.

**Día Seco:** cada día del calendario con un caudal menor que el valor de referencia  $Q_s$

**Período seco:** una secuencia de días secos relacionados entre si.

**d (días):** longitud de un período seco, es decir, número de días secos comprendidos en el período seco.

**2.2.1 Modelo para el análisis estadístico de caudales mínimos**

En la mayoría de los casos sólo se dispone de registros hidrométricos de corta duración. La planificación de las obras hidráulicas y la administración de los recursos hídricos requieren del conocimiento de eventos mínimos de baja probabilidad de ocurrencia, los cuales no se encuentran en los períodos de registro. Una de las alternativas para estimar dichos eventos viene a ser el uso de los modelos de valores extremos. Esta técnica asume que la serie de caudales mínimos disponibles constituye una muestra de una población desconocida formada por todos los valores extremos pasados y futuros. Por lo tanto, parte del criterio que dicha muestra, siempre que sea de una longitud suficiente, posee la misma función de distribución de frecuencia que la población a la que se supone pertenecer. De ese modo, se adapta una distribución teórica a la empírica de la serie observada, la misma que se usa a posteriori para extrapolaciones a eventos de

probabilidades deseadas, de excedencia o no excedencia. Otra condición básica para el uso de este tipo de modelos viene a ser la independencia de los valores observados; lo cual se cumple normalmente en series anuales o bianuales (Guevara, 1991; 1992; 2004).

Cuando se usa la serie anual en el modelo de probabilidades existe una relación directa entre la probabilidad de excedencia y el período de retomo, como la que se indica a continuación:

$$p = 1 - P_e = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Donde:

p: probabilidad de no excedencia

Pe: probabilidad de excedencia

T: tiempo de retorno en años

Cuando se trata del análisis de los caudales máximos se usa frecuentemente la probabilidad de no excedencia p. Sabiendo que p y Pe son complementarios, T se calcula como sigue:

$$T = \frac{1}{1 - P_e} \quad (2)$$

A continuación se resume el procedimiento general para el análisis de valores extremos, según Guevara (1992):

- a) Selección de la variable: Q mínimo anual, semestral o diario.
- b) Formación de la serie de valores.
- c) Análisis de la independencia, aleatoriedad, homogeneidad y tendencia de los valores que conforman la serie.

d) Cálculo de los parámetros de la función teórica en función de los estimados para la muestra.

e) Selección de la función de distribución teórica que mejor se adapte a la empírica. Para ello se usa alguna prueba de significancia tal como máxima verosimilitud, Chi-cuadrado o Kolmogorov.

f) Cálculo del valor deseado mediante el uso de la función seleccionada.

g) Estimado de los límites de confianza para el valor calculado.

### **Selección de la variable aleatoria**

En el análisis estadístico de caudales mínimos frecuentemente se toma como variable aleatoria a los valores de caudales más pequeños dentro de un intervalo determinado (año, semestre, mes o día). Otras veces se escoge como eventos extremos al promedio mínimo de períodos mayores que un día (períodos secos de diferente duración).

El procedimiento más indicado para construir la variable según Guevara (1992), consiste en tomar durante la estación seca de cada año los promedios móviles para el período deseado, y extraer el más pequeño de ellos, el mismo que será la variable aleatoria ( $x$ ). El análisis se orienta a determinar, por ejemplo, que el caudal medio mínimo de 10 días de duración en el año posee un valor menor o igual que el límite impuesto ( $x$ ) para un determinado intervalo de recurrencia  $T$ . Para el caso de períodos más largos, como los mensuales, el referido autor recomienda seguir el siguiente proceso para la construcción de la serie de promedios: suponiendo que se dispone de 50 años de caudales medios mensuales y se desea efectuar el análisis de los caudales medios para un período de duración de 8 meses, es decir,  $d = 8$ ; se calculan los promedios cabalgantes de 8 meses; de los  $(n + 1 - d) = 593$  valores obtenidos, se selecciona el menor y se eliminan los  $(d - 1)$

= 7 valores anteriores y posteriores inmediatamente adyacentes al menor indicado. Del resto se selecciona nuevamente el menor y se eliminan los  $(d - 1)$  valores vecinos hacia ambos lados del nuevo valor escogido. Se continúa el procedimiento hasta agotar todos los valores de la serie observada. Los promedios seleccionados conforman la muestra deseada.

En relación con las funciones de distribución de frecuencia, Guevara (1992) sostiene que las funciones de distribución de probabilidades que se usan en el análisis de frecuencia de los caudales mínimos son en gran parte las mismas que se utilizan para el caso de los caudales máximos. Sin embargo recomienda elegir aquellas en las que sólo toman valores iguales o mayores que cero, porque caudales negativos no tienen sentido físico. Lo que más interesa es pues la rama izquierda de la función.

Básicamente se distinguen dos tipos de funciones de distribución de frecuencia: las distribuciones empíricas y las funciones teóricas. La distribución empírica se conoce con el nombre de “plotting position” (posición de graficación). Existen varios métodos para la posición de graficación que se diferencian sólo en el resultado que arrojan. El más comúnmente usado es el de Weibull, dado por:

$$Pe = \frac{m}{n + 1} \quad (3)$$

O lo que es lo mismo:

$$p = \frac{n - m + 1}{n + 1} \quad (4)$$

Donde:

Pe: probabilidad de excedencia

p: probabilidad de no excedencia

$m$ : número de orden correspondiente a cada valor de la serie ordenados en forma creciente

$n$ : es el tamaño de la muestra (número de datos de la serie)

La distribución empírica reproduce a la real en forma muy inexacta y tiene la desventaja de asignar diferentes probabilidades a valores iguales o casi semejantes dentro de la serie; además, asigna probabilidades muy grandes a los caudales altos de la serie observada y muy pequeñas a los bajos (Guevara, 1992).

Con relación a las funciones teóricas de distribución de frecuencia, se debe señalar que las más usadas en el análisis de frecuencia de los caudales mínimos son Log-Normal, Pearson Tipo III, Gamma, y de Valores Extremos Tipo III.

De acuerdo con Ojeda y Espinoza (1985) existen otras maneras de abordar el estudio de los caudales mínimos, diferentes a las señaladas con anterioridad; ellos mencionan la curva de duración y el análisis de frecuencia – duración de caudales mínimos. Otros autores, como Kiely (1999), reseñan técnicas, como las que se indican a continuación:

**Curva de duración de caudal:** la cual es una gráfica generada al contrastar el caudal del río por las ordenadas y el porcentaje de tiempo de excedencia por las abscisas.

**Caudal medio diario:** que es la media de la descarga instantánea en un período de 24 horas.

**Caudal medio diario anual:** referido a la media en un año de los caudales medios diarios.

**Caudal de tiempo seco:** que es el caudal medio diario anual mínimo con un período de retorno seleccionado.

**Caudal base:** que es la contribución al cauce del agua subterránea.

**Caudal de día D:** que es el caudal medio en D días consecutivos.

**Caudal mínimo sostenido:** que se define como el caudal medio más bajo que no se excede durante una duración dada.

**Caudal mínimo:** que es el mínimo caudal observado en el período.

### 2.2.2 Análisis de sequías

El análisis de los eventos extremos mínimos centra la atención en la independencia de los elementos de la serie. El análisis de las sequías (períodos secos), se orienta a demostrar la persistencia de los eventos hidrológicos y meteorológicos. La persistencia se refiere a la tendencia que existe que un período seco (año, día, entre otros) sea seguido por otro seco y que un período húmedo ocurra después de otro húmedo, de acuerdo a un comportamiento similar al de cualquier variable aleatoria.

De acuerdo con lo expuesto, también debe considerarse la independencia de los “períodos secos” dentro de la serie. Los modelos matemáticos que describen ese tipo de proceso son los denominados “estocásticos”. La teoría de los procesos estocásticos es compleja; por ello aquí sólo se estudian modelos sencillos de corta memoria (lo que sucede ahora depende de lo que sucedió ayer), aunque describen el proceso en forma aproximada, se pretende que sirvan como una alternativa en el análisis de sequías y como base para un mejor entendimiento de los modelos más complejos. El análisis de sequías puede enfocarse como una especie de respuesta a las siguientes interrogantes (Guevara, 1992):

¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de un período seco de cierta duración, dependiente de un período húmedo?

¿Cuál es la esperanza matemática del número de períodos secos de determinada duración que pueden ocurrir en un intervalo de  $n$  días?

¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de períodos secos con duración igual o mayor que  $d$ , condicionado a que por lo menos ya haya ocurrido uno de ellos (provisión de la longitud de los períodos secos)?

Para resolver las interrogantes planteadas, se debe utilizar el siguiente procedimiento (caso de una serie anual de caudales diarios durante un determinado período):

- 1.- A todos los caudales menores que el límite mínimo preestablecido  $Q_s$  se les asigna el símbolo binario 1.
- 2.- A los caudales restantes (mayores que  $Q_s$ ) se les asigna el símbolo 0.

Este sistema de codificación proporciona una serie de secuencias enteras de ceros y unos de longitud deseada.

En relación con la segunda interrogante, se debe desarrollar un modelo que simule la ocurrencia de la serie de unos, es decir, los períodos secos. La dependencia de cada elemento de la serie se simplifica a través de la probabilidad condicional, o también de la denominada probabilidad de transición. La probabilidad condicional, es la probabilidad de ocurrencia de un día seco después de otro seco. Las frecuencias relativas calculadas sobre la base de la serie codificada representan la primera aproximación de la probabilidad condicional; se estiman como se indica a continuación:

$$(H)_r = \frac{\text{Número de casos ocurridos}}{\text{Número de casos posibles}} \quad (5)$$

Donde:

$(H)_r$ : frecuencia relativa de ocurrencia del evento

### Ocurrencia de períodos secos de duración “d”

Para este análisis se utiliza el modelo Wisser descrito por Guevara (1992) el cual es una valiosa herramienta para el análisis de sequías. La primera realización de un evento, en este caso día húmedo o día seco, es independiente de cualquier otro evento. Para cada una de las siguientes realizaciones, la probabilidad de ocurrencia de un día húmedo o seco depende de la longitud de la serie inmediatamente anterior a los mismos eventos.

El modelo general asume que la probabilidad de que, por ejemplo, un día seco siga a otro seco, es constante. Es decir, cada realización es dependiente sólo de la realización inmediatamente anterior, además de ser constante; mejor dicho, que posee el mismo valor al inicio y al final de una serie de los mismos eventos. Esta acepción fuertemente simplificada conduce a una cadena de Markov homogénea y estacionaria, la que sin embargo simula el comportamiento real en forma insuficiente.

En este trabajo se usó los siguientes conceptos de probabilidad condicional:

$Y_T$ : Probabilidad de que un día seco siga a otro seco:  $T \rightarrow T$

$X_T$ : Probabilidad de que un día húmedo siga a uno seco:  $T \rightarrow N$

$Y_N$ : Probabilidad de que un día seco siga a uno húmedo:  $N \rightarrow T$

$X_N$ : Probabilidad de que un día húmedo siga a otro húmedo:  $N \rightarrow N$

El número medio de los períodos secos de duración “d” que se esperan en las definiciones anteriores se estima como sigue:

$$M_{(d)} = (2 + (n - d - 1) X_T) \cdot X_T \cdot Y_N \cdot Y_T^{d-1} / (X_T + Y_N) \quad (6)$$

$$d = 1, 2, \dots, n - 1$$

Donde “n” es el número total de los días secos y húmedos.

El número de períodos secos  $N_p$  es:

$$N_p = (1 + (n - 1) X_T) Y_N / (X_N + Y_N) \quad (7)$$

El número de todos los días secos es:

$$N_T = n Y_N / (X_T + Y_N) \quad (8)$$

Para los valores muy grandes de "n" se usan las siguientes aproximaciones:

$$M_{(d)} = n X_T^2 Y_N Y_T^{d-1} / (X_T + Y_N) \quad (9)$$

$$N_p = n X_T \cdot Y_N / (X_T + Y_N) \quad (10)$$

$$N_T = n Y_N / (X_T + Y_N) \quad (11)$$

Los valores de  $Y_N$ ,  $X_T$ ,  $Y_T$ ,  $X_N$  se estiman de los datos observados como sigue:

$$X_T = N_p / N_T \quad \text{Probabilidad de transición } T \rightarrow N \quad (12)$$

$$Y_T = 1 - X_T \quad \text{Probabilidad de transición } T \rightarrow T \quad (13)$$

$$X_N = 1 - Y_N \quad \text{Probabilidad de transición } N \rightarrow N \quad (14)$$

### **Duración de los períodos secos**

Nuevamente tomaremos como referencia a Guevara (1992) para cuantificar la duración de los períodos secos en base al modelo de la serie geométrica (cadenas de Markov homogéneas) y al de la serie logarítmica.

### **Serie geométrica (cadenas de Markov homogénea)**

El modelo más simple de las cadenas de Markov homogéneas viene a ser la probabilidad de ocurrencia de un día seco después de otro día seco. Para simplificar la explicación, se recurre al

modelo de urna, con bolas rojas y negras. Sea “p” la probabilidad de extraer una bola roja, y (1 – p) la de extraer una bola negra. La probabilidad de extraer una serie de bolas rojas de “m” unidades será:

$$p(x = m) = p^m (1 - p) \quad (15)$$

Como se ha indicado anteriormente, uno de los problemas a resolver en el análisis de sequías es la probabilidad de ocurrencia de una serie de duración igual o mayor que “d” ( $d \geq 1$ ). Por lo tanto, restaría calcular la probabilidad (1 – p) para el inicio y final de la serie. Así resulta que la probabilidad de ocurrencia de un período seco mayor o igual que la duración “d” sería:

$$P(x \geq d) = p_d^m \quad (m=2, 3, 4, \dots) \quad (16)$$

La frecuencia absoluta (número) de períodos secos esperados con duración igual o mayor que “d” es:

$$N_{d+m-1} = N_d \cdot p_d^m \quad (m=2, 3, 4, \dots) \quad (17)$$

$$\text{Para: } m = 1, N_{d+m-1} = N_d \quad (18)$$

Donde:

$N_d$ : Frecuencia absoluta observada de los períodos secos con duración mayor o igual que d.

$P_d$ : Se calcula sobre la base de los días secos observados solamente, a diferencia del modelo

Wiser, es decir:

$$P_d = \frac{1 - N^\circ \text{ de períodos secos}}{N^\circ \text{ total de períodos secos}} \geq d \quad (19)$$

$$P_d = 1 - N_d \sum N_d = (\sum N_d - 1) / (\sum N_d) \quad (20)$$

### Serie Logarítmica

La forma de la probabilidad de ocurrencia de un período seco de duración igual o mayor que  $d$  se puede ajustar a una función teórica del siguiente tipo:

$$P_d = 1 - P_o \cdot e^{-k \cdot d} \quad (21)$$

Hasta ahora hay pocos resultados sobre este tipo de investigación. Meier (1970) propuso una serie potencial del siguiente tipo:

$$p(x \geq d) = 1 - \frac{n(1-r)}{N} \cdot \left(1 - \frac{r}{2} + \frac{r^3}{3} + \dots + \frac{r^{m-1}}{m}\right) \quad (22)$$

Donde:

$$M = 1, 2, 3, \dots$$

La serie tiene validez para  $r \leq 1$  y  $d = m + 1$ . Cuando "m" tiende al infinito, el segundo paréntesis del término de la derecha tiende a cero, es decir,  $p(x \geq d) \Rightarrow 0$ . El valor de  $r$  se obtiene de los días secos observados y se da como una función implícita en la siguiente expresión:

$$\frac{r}{\ln(1-r)} = -\frac{n}{N(1-r)} \quad (23)$$

Donde:

$N$ : número de períodos secos  $\geq d$

$n$ : número de días secos de los  $N$  períodos secos

$n/N$ : duración media de un período seco (período seco medio)

En la mayoría de los casos se ha encontrado que la serie logarítmica arroja mejores resultados que la geométrica.

### 2.3 Limitación

Dado que en esta investigación se usó una fracción de la totalidad de los registros históricos existentes sobre los caudales medios diarios del río Tirgua en la estación hidrométrica Paso Viboral, las conclusiones deben tomarse con cautela, pues la mayoría de los fenómenos naturales tienen períodos de retorno muy amplios, razón por la cual los resultados de esta investigación son simplemente aproximaciones razonables de la dinámica real de las sequías del río Tirgua.

### 2.4 Definición de las variables de estudio

En esta investigación se consideró como variable de estudio el caudal medio diario del río Tirgua en la estación hidrométrica Paso Viboral. Los referidos caudales medios diarios provienen de los registros históricos efectuados por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARNR) para el período 1963 – 1993.

Como se ha indicado antes, la nomenclatura usada al referirse al caudal medio diario del río Tirgua, tanto en su caracterización, como en la evaluación de las sequías extremas será la siguiente:

$Q$  ( $m^3/s$ ): como expresión general del caudal.

$NQ$  ( $m^3/s$ ): caudal menor que un valor  $Q$  dado  $Q_s$

$MNQ$  ( $m^3/s$ ): caudal mínimo, medio del período  $x$  dado.

$NQ_x$  ( $m^3/s$ ): caudal más pequeño del intervalo  $x$ .

Día seco: cada día del calendario con un caudal menor que el valor de referencia  $Q_s$

Período seco: una secuencia de días secos relacionados entre si.

d (días): longitud de un período seco, es decir, número de días secos comprendidos en el período seco.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Tipo de investigación

Tomando como referencia a Narváez (1997) la presente, es una investigación retrospectiva según el corte en el tiempo de estudio, pues tomó registros pasados para predecir el comportamiento futuro del caudal del río Tirgua. Mientras, que según la naturaleza de la información obtenida, es de tipo cuantitativa.

#### 3.2 Nivel de investigación

Tomando como referencia a Ramírez (1999) este estudio fusionó aspectos tanto de nivel exploratorio como explicativo.

#### 3.3

##### Fases del estudio

A continuación se presentan las fases que se llevaron a cabo y las actividades que se efectuaron, incluyendo las técnicas de análisis empleada.

**Fase 1.** Descripción física de la cuenca del río Tirgua.

En esta etapa se describió los aspectos geomorfológicos más relevantes de la cuenca del río Tirgua, para lo cual se empleó los resultados reportados por varios autores.

**Fase 2.** Análisis de los registros históricos de los caudales medios diarios del río Tirgua medidos en la estación hidrométrica Paso Viboral.

En el MARN – San Carlos, se recabó los registros históricos de los caudales medios diarios del río Tirgua medidos en la estación hidrológica Paso Viboral para el período 01/01/1963 al

31/12/1993. Dicha estación se ubica en la cota 158 m.s.n.m. del mencionado río y en las coordenadas geográficas: latitud  $09^{\circ} 43' 10''$  y longitud  $68^{\circ} 36' 15''$ . A continuación, se efectuó un análisis estadístico, que consistió en cuantificar varias medidas de tendencia central: media, moda y mediana y medidas de dispersión: desviación estándar y rango. Se aplicó la prueba de Lilliefors para probar el supuesto de normalidad de los registros; esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia entre la función de distribución de probabilidad observada y la función de probabilidad normal con un valor crítico,  $d$ , que depende del número de datos y el nivel de significación seleccionado (Mijares, 1987). Se creó una tabla de frecuencia, la cual permite observar el porcentaje de ocurrencia de algún intervalo de interés; desde el punto de vista hidrológico la representación gráfica de la referida tabla recibe el nombre de curva de duración de gasto; ésta fue elaborada (Vide, 2000).

**Fase 3.** Modelo Wisser para la determinación de la ocurrencia de períodos secos de duración “ $d$ ”

Se estableció un caudal referencial ( $Q_s$ ), el cual es el caudal mínimo de abastecimiento necesario para cubrir la demanda hídrica de la ciudad de San Carlos para el año 2006; el referido caudal se estableció tomando un caudal mínimo de riego de 1500 l/s (Ministerio de Agricultura y Cría, 1992) y una dotación poblacional de 250 l/día.habitante (Azevedo y Acosta, 1976). Para estimar la población del municipio San Carlos se partió de los datos censales reportados por el Instituto Nacional de Estadística. En base de los registros históricos recabados del MARNR – San Carlos y empleando el software Microsoft Excel 2003<sup>TM</sup> se determinó el número de períodos secos de diferentes duraciones (desde 1 día hasta 60 días). Esta información permitió cuantificar el número total de días secos y períodos secos, ambos indicadores caracterizan la dinámica de las sequías del río Tirgua, además permitió determinar la probabilidad de ocurrencia de sequías que comprometan el abastecimiento hídrico de la ciudad de San Carlos.

**Fase 4.** Modelo matemático de decaimiento exponencial que explique el número de períodos secos como una función de su duración “d”.

Tomando como referencia la información generada en la fase anterior se generó un modelo matemático del tipo decaimiento exponencial (Ecuación 24) para pronosticar el número de períodos secos del río Tirgua en función de su duración.

$$n_d = a.e^{-k.d} \quad (24)$$

Donde:

$n_d$ : número de períodos secos

$d$ : duración del período seco en días

$a$ , y  $k$ : constantes del modelo de decaimiento exponencial

La información base se procesó con el software estadístico STATISTICA (versión 6.0, 2000), haciendo uso del módulo Nonlinear Regression, en su función User – Specified Regression Function; con ello, se cuantificó los parámetros de la ecuación (24) ( $a$  y  $k$ ). Se empleó el método de estimación: Quasi – Newton y la función de pérdida (loss function):

$$L = \frac{(obs - pred)^2}{2} \quad (25)$$

Donde:

$L$ . función de pérdida (Loss Function)

$obs$ : valor observado

$pred$ : valor predicho

En cada iteración el software evaluó la función a ajustar (Ecuación 24) en diferentes puntos para estimar la primera y segunda derivada, y emplea esta información para dirigir su búsqueda hacia el establecimientos de los parámetros que minimizan la función de pérdida (STATSOFT, 2000).

Con el propósito de evaluar la calidad predictiva del modelo se calculó: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el porcentaje de la varianza explicada por el modelo, el error estándar de los residuales; asimismo, se graficó los valores predichos por el modelo versus los observados, con el propósito de observar la bondad de ajuste del modelo generado (Montgomery, 1991).

**Fase 5.** Análisis de la duración – frecuencia de los caudales mínimos del río Tirgua.

Tomando como referencia la serie histórica de los caudales medios diarios del río Tirgua recabados en el MARNR – San Carlos se evaluó la severidad de las sequías a través del método análisis de frecuencia – duración de los caudales mínimos referido por Guevara (2004), el cual se explica a continuación:

- 1.- Con los caudales medios diarios, se generó las medias superpuestas o promedios cabalgantes para: 7, 15, 30, 45 y 60 días.
- 2.- De la serie de los promedios cabalgantes para D-días, generados de un registro de  $n$  años de los gastos medios diarios, se seleccionó  $(n-1)$  eventos los cuales representan una serie parcial de los gastos mínimos para la duración D-días. El procedimientos es el siguiente:
  - De la serie original de los promedios móviles se seleccionó el valor mínimo  $Y_i$  al que se asigna un período de retorno (Ecuación 26):

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad (26)$$

Donde:

T: período de retorno, en años

m: número de orden asignado al ordenar los valores en forma creciente

n: número de años de registro

- Teniendo en cuenta que cada  $Y_i$  mínimo seleccionado se puede considerar como una función de los D-1 valores anteriores de  $Y_i$  y además, por ser la serie de los promedios cabalgantes una serie correlacionada en el tiempo, se suele eliminar D valores hacia ambos lados del valor  $Y_i$  seleccionado, con la finalidad de asegurar la independencia de los eventos generados por el modelo de promedios cabalgantes.
- De los valores restantes de la serie se seleccionó nuevamente el mínimo y se calculó su correspondiente,  $T_r$  tomando  $m_2 = m_1 + 1$ . Se eliminó nuevamente D valores hacia arriba y hacia abajo del valor seleccionado.
- Se continuó el proceso anterior, hasta encontrar un evento con  $T = 1$ .
- Los (n-1) valores de los eventos obtenidos mediante el procedimiento explicado para cada duración D se graficaron en un papel semi-logarítmico en función del período de retorno,  $T_r$ .

**Fase 6.** Modelo matemático para estimar el caudal mínimo esperado en época de estiaje como una función de la duración y el período de retorno.

A partir de la información generada en la fase anterior se ajustó a un modelo matemático de tipo exponencial propuesto por Guevara (2004) de la forma:

$$Q_{min} = a \frac{D^c}{T_r^d} \quad (27)$$

Donde:

$Q_{\min}$ : caudal mínimo del río para una duración y período de retorno definido,  $m^3/s$

D: duración, días

Tr: período de retorno, años

a, c, d: constantes adimensionales del modelo

El método de ajuste fue el de mínimos cuadrados. Con el objeto de evaluar la calidad predictiva del modelo se calculó: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el porcentaje de la varianza explicada por el modelo, el error estándar de los residuales; asimismo, se graficó los valores predichos por el modelo versus los observados, con el propósito de observar la bondad de ajuste del modelo generado (Montgomery, 1991).

## CAPÍTULO IV

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Descripción de la cuenca del río Tirgua

La cuenca del río San Carlos o Tirgua está ubicada al noroccidente del país, abarcando porciones importantes de los estados: Yaracuy, Carabobo y Cojedes. La cuenca alta y media se ubica astronómicamente entre las coordenadas 9° 04' 00'' a 10° 36' 00'' de latitud norte y 68° 12' 00'' a 68° 41' 00'' de longitud oeste, ocupando un área de 1.497,3 Km<sup>2</sup> hasta el sitio de interés denominado Paso Viboral, correspondiendo al Estado Cojedes 323,5 Km<sup>2</sup>; que en términos porcentuales equivalen a 21,8 % (Desarrollos Hidráulicos Cojedes, Canagro International y Ministerio del Ambiente y de Los Recursos Naturales Renovables, 1997), (ver Figura 1 del Anexo).

Con respecto a su morfología, el paisaje de montaña es predominante, existen pendientes fuertes, piedemontes, colinas y filas secundarias; están enmarcadas en los Grupos Caracas (Formación Las Brisas y Formación Las Mercedes), Grupo Cristales (Formación Nirgua y Aroa) y por el sur el complejo El Tinaco. Asimismo, se encuentran depresiones altas con pendientes de 0 a 5 % y 5 a 12 % al norte de la cuenca, con alturas entre 600 y 700 metros sobre el nivel del mar (msnm) y acumulación coluvio – aluvial del cuaternario: Salom en el Estado Yaracuy, y Bejuma y Montalbán en el Estado Carabobo. En ellas, predomina la actividad agropecuaria intensiva y desarrollo agroindustrial, además de existir importantes centros poblado. En la parte sur se encuentran planicies intermedias con suelos de buena calidad, clasificados según su capacidad de uso como: I, II y III; éstos, se encuentran al suroeste de la ciudad de San Carlos, predominando la actividad agropecuaria (DHC, Canagro International y MARNR, 1997).

Según DHC, Canagro International y MARNR (1997), en la cuenca media y alta predomina el bosque húmedo premontano (BH-P), mientras que en la cuenca baja prevalecen: sabanas, herbazales, matorrales y bosques de galería. Con relación al clima, señalan la existencia de dos épocas bien definidas: sequía y lluvias; temperaturas oscilante entre los 22 a 28 ° C, siendo menor en la cuenca alta media, donde varía entre 17 a 20 ° C, con precipitaciones de 1400 a 2100 mm/año.

El río San Carlos nace en la confluencia de la fila de Bejuma y la fila de Aguirre, en el cerro San Isidro ( $\approx 1480$  msnm), llevando el nombre de río Aguirre y luego río Tirgua. Es denominado río San Carlos desde la confluencia del río Orupe y el río Tirgua, al llegar a la frontera política del estado Cojedes con el estado Carabobo. Los principales ríos tributarios del río San Carlos son: Bejuma, Aguirre, Onoto, Orupe, San Pedro, Cabuy y Mapuey (Ruiz, 1990).

#### **4.2 Análisis de los registros históricos de los caudales medios diarios del río Tirgua medidos en la estación hidrométrica Paso Viboral.**

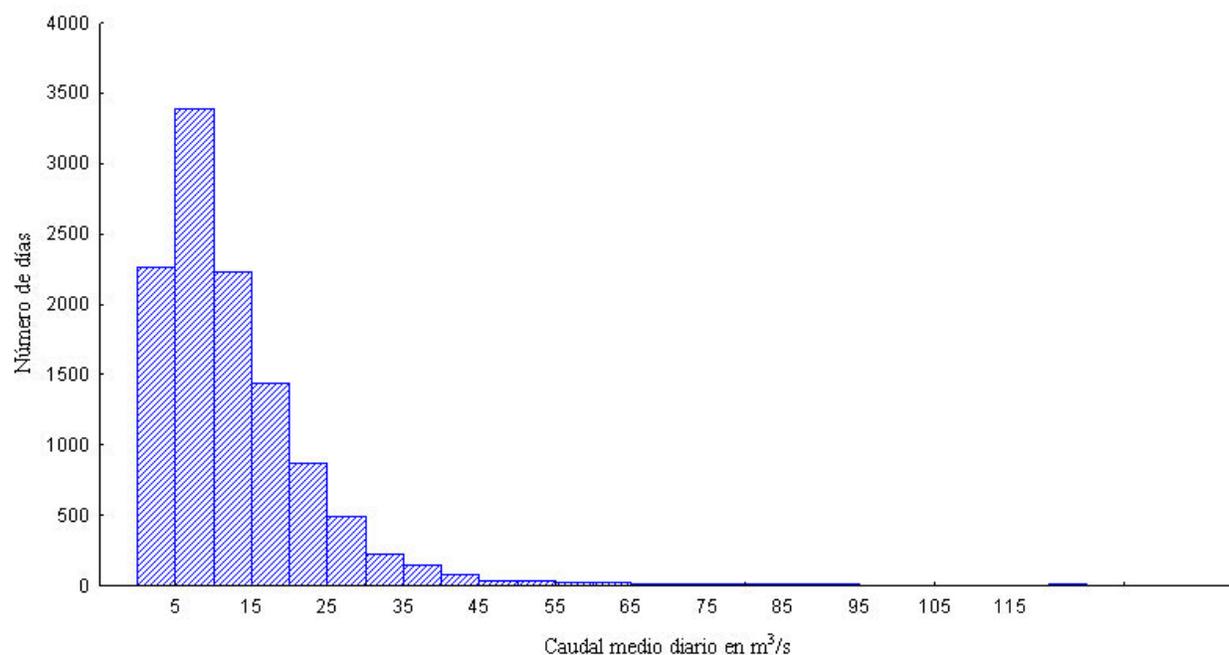
Los parámetros estadísticos de los registros históricos de los caudales del río Tirgua en Paso Viboral se presentan en la Tabla 1. Observando las cifras dadas en la tabla se encuentra que el gasto medio diario del río Tirgua experimentó variaciones extremas en el lapso temporal acotado entre el 01/01/1963 y el 31/12/1993, pues el rango es bastante amplio ( $279,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ); no obstante, la baja desviación estándar reveló que la ocurrencia de eventos extremos fue en cierta medida poco frecuente.

**Tabla 1.** Medidas de tendencia central y dispersión de los registros históricos del caudal medio diario del río Tirgua en la estación hidrométrica Paso Viboral. Periodo: 1963 – 1993.

<b>Medidas de tendencia central</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>
Media	13,0
Moda	6,7 <sup>A</sup>
Mediana	10,2
<b>Medidas de dispersión</b>	
Desviación estándar	11,7
Rango	279,6
Mínimo valor registrado	0,4
Máximo valor registrado	280,0

**Nota:** el número de registros validos empleados en la determinación de estos estadísticos fue de 11322. <sup>A</sup>: frecuencia de moda igual a 100 casos.

En la Figura 2 se presenta la función de densidad de probabilidad ( $F_{dp}$ ) de la serie de caudales analizados, aquí se muestra la manera como se distribuye el gasto medio diario del río Tirgua entre 1963 y 1993. En el 25 % de los registros (2784 días) el caudal fue inferior a 5,72 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, los valores fuera de rango “outliers” se ubican por encima de 33,83 m<sup>3</sup>/s; aproximadamente 4 % de los registros (459 días). Aunque la ocurrencia de grandes avenidas salta a la vista, es notorio que las sequías han ocurrido con mayor frecuencia que las crecidas (Ver Figura 2 del Anexo).



**Figura 2.** Histograma de frecuencia de la serie de caudales medios diarios del río Tirgua. Período: 1963 – 1993.

En la Tabla 2 se presenta la distribución de frecuencia para la variable caudal medio diario del río Tirgua en Paso Viboral, donde el intervalo de clase se especificó en  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los datos de la referida tabla evidencian un claro sesgo de los registros hacia la ocurrencia de caudales bajos (Ver Figura 3 del Anexo). Hay que hacer notar que el 32,5 % de los registros se ubican entre  $2,5$  y  $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Tabla 2.** Distribución de frecuencia de los registros históricos del caudal medio diario del río Tirgua en la estación hidrométrica Paso Viboral. Periodo: 1963 – 1993.

<b>Rango (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Casos</b>	<b>Casos acumulado</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
0,0<=x<2,5	501	501	4,4	4,4
2,5<=x<5,0	1760	2261	15,5	19,9
5,0<=x<7,5	1917	4178	16,9	36,9
7,5<=x<10,0	1439	5617	12,7	49,6
10,0<=x<12,5	1190	6807	10,5	60,1
12,5<=x<15,0	1056	7863	9,3	69,4
15,0<=x<17,5	805	8668	7,1	76,5
17,5<=x<20,0	610	9278	5,3	81,9
20,0<=x<22,5	537	9815	4,7	86,6
22,5<=x<25,0	369	10184	3,2	89,9
25,0<=x<27,5	284	10468	2,5	92,4
27,5<=x<30,0	204	10672	1,8	94,2
30,0<=x<32,5	130	10802	1,1	95,4
32,5<=x<35,0	97	10899	0,8	96,2
35,0<=x<37,5	87	10986	0,7	97,0
37,5<=x<40,0	64	11050	0,5	97,5
40,0<=x<42,5	40	11090	0,3	97,9
42,5<=x<45,0	38	11128	0,3	98,2
45,0<=x<47,5	21	11149	0,1	98,4
47,5<=x<50,0	17	11166	0,1	98,6
50,0<=x<52,5	15	11181	0,1	98,7
52,5<=x<55,0	23	11204	0,2	98,9
55,0<=x<57,5	13	11217	0,1	99,0
57,5<=x<60,0	6	11223	0,1	99,1
60,0<=x<62,5	12	11235	0,1	99,2
62,5<=x<65,0	7	11242	0,1	99,2
65,0<=x<67,5	8	11250	0,1	99,3

**Tabla 2.** Continuación.

<b>Rango (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Casos</b>	<b>Casos acumulado</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
67,5<=x<70,0	8	11258	0,1	99,4
70,0<=x<72,5	5	11263	0,1	99,4
72,5<=x<75,0	3	11266	0,1	99,5
75,0<=x<77,5	6	11272	0,1	99,5
77,5<=x<80,0	5	11277	0,1	99,6
80,0<=x<82,5	5	11282	0,1	99,6
82,5<=x<85,0	2	11284	0,1	99,6
85,0<=x<87,5	2	11286	0,1	99,6
87,5<=x<90,0	5	11291	0,1	99,7
90,0<=x<92,5	2	11293	0,1	99,7
92,5<=x<95,0	4	11297	0,1	99,7
95,0<=x<97,5	3	11300	0,1	99,8
97,5<=x<100,0	1	11301	0,1	99,8
100,0<=x<102,5	1	11302	0,1	99,8
102,5<=x<105,0	1	11303	0,1	99,8
105,0<=x<107,5	2	11305	0,1	99,8
107,5<=x<110,0	3	11308	0,1	99,8
110,0<=x<112,5	0	11308	0,1	99,8
112,5<=x<115,0	1	11309	0,1	99,8
115,0<=x<117,5	1	11310	0,1	99,8
117,5<=x<120,0	1	11311	0,1	99,9
120,0<=x<122,5	1	11312	0,1	99,9
122,5<=x<125,0	1	11313	0,1	99,9
125,0<=x<127,5	2	11315	0,1	99,9
127,5<=x<130,0	1	11316	0,1	99,9
130,0<=x<132,5	0	11316	0,1	99,9
132,5<=x<135,0	1	11317	0,1	99,9

**Tabla 2.** Continuación.

<b>Rango (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Casos</b>	<b>Casos acumulado</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
135,0<=x<137,5	1	11318	0,0	99,9
137,5<=x<140,0	0	11318	0,0	99,9
140,0<=x<142,5	1	11319	0,0	99,9
142,5<=x<145,0	0	11319	0,0	99,9
145,0<=x<147,5	1	11320	0,0	99,9
147,5<=x<150,0	0	11320	0,0	99,9
150,0<=x<152,5	0	11320	0,0	99,9
152,5<=x<155,0	0	11320	0,0	99,9
155,0<=x<157,5	0	11320	0,0	99,9
157,5<=x<160,0	0	11320	0,0	99,9
160,0<=x<162,5	0	11320	0,0	99,9
162,5<=x<165,0	1	11321	0,0	99,9
165,0<=x<167,5	0	11321	0,0	99,9
167,5<=x<170,0	0	11321	0,0	99,9
170,0<=x<172,5	0	11321	0,0	99,9
172,5<=x<175,0	0	11321	0,0	99,9
175,0<=x<177,5	0	11321	0,0	99,9
177,5<=x<180,0	0	11321	0,0	99,9
180,0<=x<182,5	0	11321	0,0	99,9
182,5<=x<185,0	0	11321	0,0	99,9
185,0<=x<187,5	0	11321	0,0	99,9
187,5<=x<190,0	0	11321	0,0	99,9
190,0<=x<192,5	0	11321	0,0	99,9
192,5<=x<195,0	0	11321	0,0	99,9
195,0<=x<197,5	0	11321	0,0	99,9
197,5<=x<200,0	0	11321	0,0	99,9
200,0<=x<202,5	0	11321	0,0	99,9

**Tabla 2.** Continuación.

<b>Rango (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Casos</b>	<b>Casos acumulado</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
202,5<=x<205,0	0	11321	0,0	99,9
205,0<=x<207,5	0	11321	0,0	99,9
207,5<=x<210,0	0	11321	0,0	99,9
210,0<=x<212,5	0	11321	0,0	99,9
212,5<=x<215,0	0	11321	0,0	99,9
215,0<=x<217,5	0	11321	0,0	99,9
217,5<=x<220,0	0	11321	0,0	99,9
220,0<=x<222,5	0	11321	0,0	99,9
222,5<=x<225,0	0	11321	0,0	99,9
225,0<=x<227,5	0	11321	0,0	99,9
227,5<=x<230,0	0	11321	0,0	99,9
230,0<=x<232,5	0	11321	0,0	99,9
232,5<=x<235,0	0	11321	0,0	99,9
235,0<=x<237,5	0	11321	0,0	99,9
237,5<=x<240,0	0	11321	0,0	99,9
240,0<=x<242,5	0	11321	0,0	99,9
242,5<=x<245,0	0	11321	0,0	99,9
245,0<=x<247,5	0	11321	0,0	99,9
247,5<=x<250,0	0	11321	0,0	99,9
250,0<=x<252,5	0	11321	0,0	99,9
252,5<=x<255,0	0	11321	0,0	99,9
255,0<=x<257,5	0	11321	0,0	99,9
257,5<=x<260,0	0	11321	0,0	99,9
260,0<=x<262,5	0	11321	0,0	99,9
262,5<=x<265,0	0	11321	0,0	99,9
265,0<=x<267,5	0	11321	0,0	99,9
267,5<=x<270,0	0	11321	0,0	99,9

**Tabla 2.** Continuación.

<b>Rango (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Casos</b>	<b>Casos acumulado</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
270,0<=x<272,5	0	11321	0,0	99,9
272,5<=x<275,0	0	11321	0,0	99,9
275,0<=x<277,5	0	11321	0,0	99,9
277,5<=x<280,0	0	11321	0,0	99,9
280,0<=x<282,5	1	11322	0,0	100,0

Adicionalmente al análisis estándar de los parámetros estadísticos de la serie de caudales analizados del río Tirgua en la estación Paso Viboral, se aplicó el test de Lilliefors para evaluar el supuesto de normalidad de la referida variable (Lilliefors, 1967: citado por [STATSOFT, 2000](#)). El estadístico D máximo, que mide la máxima diferencia entre la distribución acumulativa muestral y la distribución acumulativa normal, fue igual a 0,15; éste, fue estadísticamente significativo. Ante ello, se concluye que la distribución de la muestra evaluada dista de seguir un comportamiento normal.

#### **4.3 Modelo Wisser para la determinación de la ocurrencia de períodos secos de duración “d”.**

Tomando como referencia la evolución de la población del Municipio San Carlos desde 1990 a 2001 (Tabla 3) reportado por el Instituto Nacional de Estadística – PNUD – Gobernación del Estado Cojedes (2001) se desarrolló un modelo de crecimiento poblacional de tipo logarítmico a través de un análisis de regresión. Dicho modelo fue usado para pronosticar el número de habitantes que existirá en el año 2006. El modelo matemático fue el siguiente:

$$P = 2,8732 \times 10^6 \cdot \ln(t) - 2,1756 \times 10^7 \quad (28)$$

Donde:

P: población estimada para el tiempo t, número de habitantes

t: período que se desea pronosticar, año

**Tabla 3.** Proyección poblacional del Municipio San Carlos del estado Cojedes en el período 1990 – 2001.

<b>Año</b>	<b>Población (habitantes)</b>
1990	68540
1991	70121
1992	71675
1993	73205
1994	74707
1995	76182
1996	77626
1997	79044
1998	80431
1999	81786
2000	83096
2001	84327

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadística – PNUD – Gobernación del Estado Cojedes (2001).

El modelo señalado tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,999, mientras que la desviación estándar de los residuales fue de 176,5. De acuerdo a la Ecuación (28) la población del Municipio San Carlos para el año 2006 será de 91812 habitantes con un intervalo de predicción entre 91277 y 92347 habitantes, ambos al 95 %.

A fin de determinar el caudal mínimo de abastecimiento ( $Q_s$ ) se consideró un gasto crítico derivable para riego de  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (Ministerio de Agricultura y Cría, 1992) y una dotación mínima de  $0,25 \text{ m}^3/\text{día.hab}$ . Tomando en cuenta ambos indicadores, y la Ecuación (28), se encontró que el caudal mínimo de abastecimiento se ajusta a la siguiente expresión:

$$Q_s = 8,314 \cdot \ln(t) - 61,451 \quad (29)$$

Donde:

$Q_s$ : caudal mínimo que debe aportar el río Tirgua para cubrir la demanda del año  $t$ ,  $m^3/s$

$t$ : año a pronosticar

De la Ecuación (29) se deduce que el caudal mínimo que debe aportar el río Tirgua para cubrir la demanda total de agua del Municipio San Carlos y el sistema de riego para el año 2006 debe ser igual a  $1,766 m^3/s$  ( $1.766 l/s$ ).

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos en el análisis de los períodos secos registrados entre 1963 y 1993 sobre el río Tirgua en la estación hidrométrica Paso Viboral de acuerdo al Modelo Wiser. Es evidente que existe una tendencia a ocurrir sequías de corta duración, a lo sumo de 30 días (1 evento). Si la dinámica del gasto medio diario se mantiene igual que en el período evaluado, para el año 2006 no solamente se espera la ocurrencia de días donde el caudal mínimo que debe aportar el río Tirgua no cubrirá la demanda del Municipio San Carlos y el sistema de riego, sino que las sequías se extenderán por varios días. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de considerar nuevas alternativas de aprovechamiento hidráulico, que atenúen al déficit hídrico que se presentará en los años venideros. Por otro lado, si la intervención antrópica de la cuenca del río Tirgua se mantiene, la situación se agudizaría, pues la frecuencia e intensidad de las sequías serán más acentuadas que en el pasado y al cabo de pocos años la principal fuente de agua del municipio no podrá cubrir la demanda por lapsos de tiempo prolongados.

**Tabla 4.** Resultados del análisis de los períodos secos registrados en la estación hidrométrica Paso Viboral en el período 1963 – 1993.

Duración del período seco en días (D)	Número de períodos secos de duración d (Nd)	Sumatoria de períodos secos con duración mayor o igual a d	Totalidad de períodos secos	Número de los días secos	Número de días secos de duración igual a d
1	247	696	3399	247	3399
2	103	449	2703	206	3152
3	69	346	2254	207	2946
4	48	277	1908	192	2739
5	38	229	1631	190	2547
6	27	191	1402	162	2357
7	22	164	1211	154	2195
8	19	142	1047	152	2041
9	15	123	905	135	1889
10	15	108	782	150	1754
11	12	93	674	132	1604
12	9	81	581	108	1472
13	9	72	500	117	1364
14	9	63	428	126	1247
15	7	54	365	105	1121
16	7	47	311	112	1016
17	5	40	264	85	904
18	4	35	224	72	819
19	4	31	189	76	747
20	4	27	158	80	671
21	3	23	131	63	591
22	3	20	108	66	528
23	3	17	88	69	462
24	3	14	71	72	393
25	1	11	57	25	321

**Tabla 4.** Continuación

Duración del período seco en días (D)	Número de períodos secos de duración d (Nd)	Sumatoria de períodos secos con duración mayor o igual a d	Totalidad de períodos secos	Número de los días secos	Número de días secos de duración igual a d
26	1	10	46	26	296
27	2	9	36	54	270
28	3	7	27	84	216
29	0	4	20	0	132
30	1	4	16	30	132
31	1	3	12	31	102
32	0	2	9	0	71
33	1	2	7	33	71
34	0	1	5	0	38
35	0	1	4	0	38
36	0	1	3	0	38
37	0	1	2	0	38
38	1	1	1	38	38
39	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0

**Tabla 4.** Continuación

Duración del período seco en días (D)	Número de períodos secos de duración d (Nd)	Sumatoria de períodos secos con duración mayor o igual a d	Totalidad de períodos secos	Número de los días secos	Número de días secos de duración igual a d
50	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0

En la Tabla 5 se da un resumen del análisis probabilístico en torno a la ocurrencia de períodos secos en el río Tirgua aplicando las ecuaciones (12), (13) y (14) a la Tabla 4. El hecho de que la probabilidad de que un día seco siga a uno seco sea del 79 %, pone de manifiesto el riesgo económico y humano que se correría si se emplease las aguas del río Tirgua como única fuente de abastecimiento tanto para la población del Municipio San Carlos como para el sistema de riego.

**Tabla 5.** Probabilidad de ocurrencias de eventos que involucren sequías en el río Tirgua.

Evento	Probabilidad (%)
Probabilidad de que un día húmedo siga a uno seco ( $X_T$ )	20,476
Probabilidad de que un día seco siga a uno húmedo ( $Y_N$ )	8,785
Probabilidad de que un día seco siga a uno seco ( $Y_T$ )	79,524
Probabilidad de que un día húmedo siga a uno húmedo ( $X_N$ )	91,215

#### 4.4 Modelo matemático del número de períodos secos en función de su duración “d”.

Tomando como base los datos dados en la Tabla 4 y considerando la duración de período seco, “d”, como variable independiente y el número de períodos secos de duración d, “n<sub>d</sub>”, como variable dependiente se desarrolló un modelo matemático de decaimiento exponencial a fin de estimar el número de períodos secos en función de su duración (ver Ecuación 24). El ajuste de los parámetros del modelo de decaimiento propuesto, arrojó la siguiente expresión:

$$n_d = 411,322.e^{-0,568.d} \quad (30)$$

Donde:

n<sub>d</sub>: número de períodos secos

d: duración del período seco en días

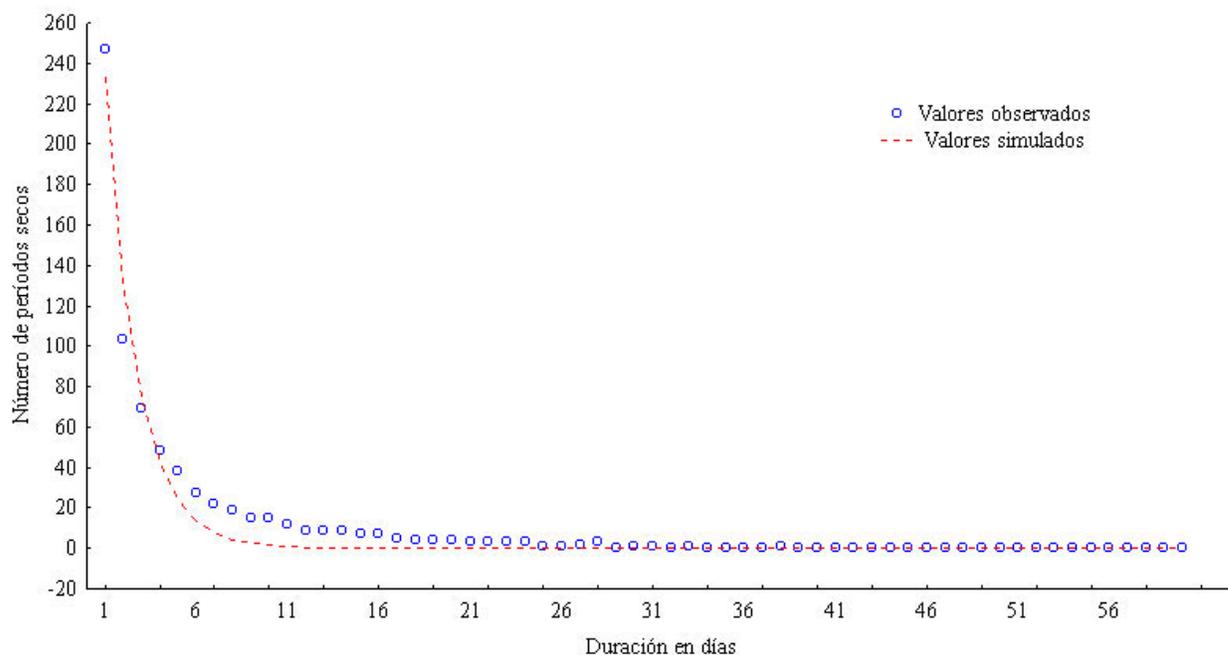
En la Tabla 6 se dan las características de la bondad de ajuste del modelo (30).

**Tabla 6.** Características más resaltantes del modelo matemático exponencial para predecir el número de períodos secos del río Tigua en función de su duración.

Parámetro	Valor
Varianza explicada por el modelo (R <sup>2</sup> )	81 %
Coefficiente de correlación	0,9
Casos efectivos incluidos (N)	60
Media de los residuales	2,6
Desviación estándar de los residuales	6,3
Función de pérdida (final loss)	2815,6

En la Figura 3 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos aplicando el modelo dado por la Ecuación (30) y los correspondientes valores observados. Del análisis de la figura se

desprende que el modelo se ajusta moderadamente bien a la serie de datos empíricos, en tal sentido, dicho modelo es utilizable para predecir los períodos secos en el río Tigrúa.



**Figura 3.** Relación entre los valores predichos por el modelo matemático para predecir el número de períodos secos del río Tigrúa en función de su duración con los valores observados.

#### 4.5. Análisis de la duración – frecuencia de los caudales mínimos del río Tigrúa.

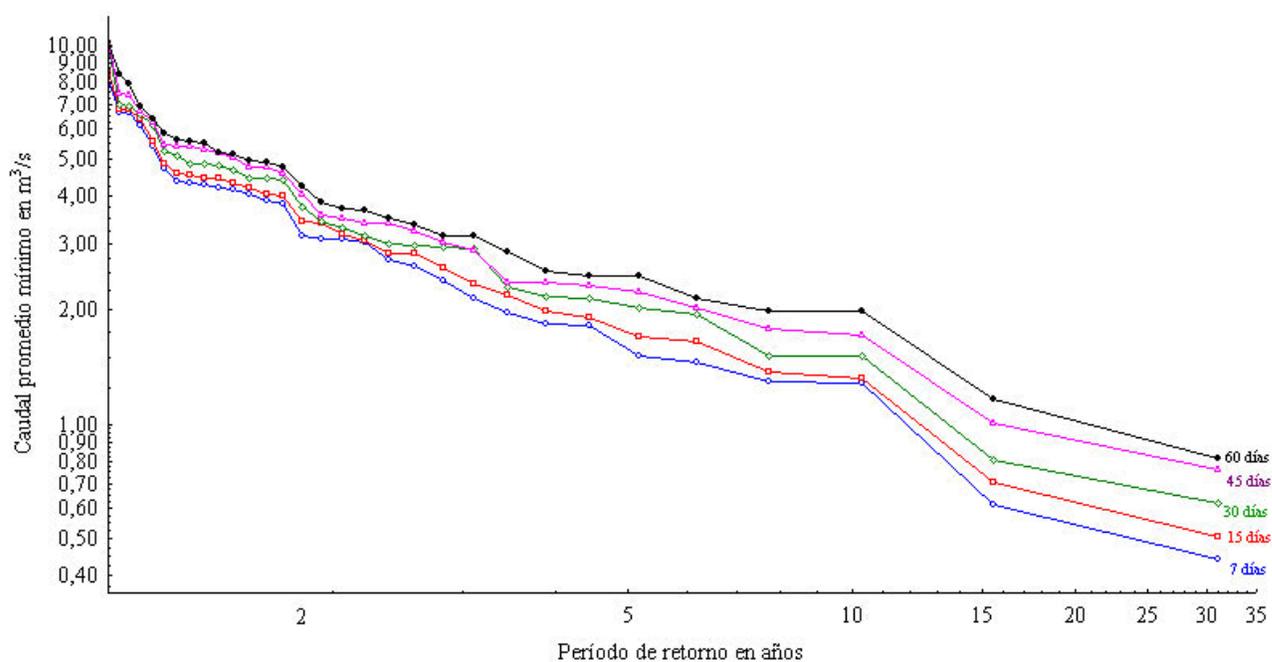
La Figura 4 y la Tabla 7 muestran la manera como se distribuye el caudal promedio mínimo del río Tigrúa en función de la duración (7, 15, 30, 45 y 60 días) y el período de retorno. Se observa que la ocurrencia de pequeños caudales (menores a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) durante varios días consecutivos (7, 15 y 30 días) posee períodos de retornos que oscilan entre 15 y 30 años, razón por la cual se infiere que la actual disminución de caudal es un fenómeno inherente a la dinámica de su régimen hidrológico y presumiblemente, sigue un patrón cíclico.

El análisis realizado solo se refiere a la serie empírica (valores observados), pues la obtención

de la serie teórica implicaría el ajuste de los valores observados a una distribución de frecuencia teórica definida, como por ejemplo la Weibull (distribución de valores extremos Tipo III de Gumbel), a fin de extrapolar los datos hasta el doble de la serie original.

**Tabla 7.** Promedios cabalgantes del gasto promedio mínimo del río Tirgua en la estación Paso Viboral para duraciones de 7, 15, 30, 45 y 60 días.

	<b>D = 7 días</b>	<b>D = 15 días</b>	<b>D = 30 días</b>	<b>D = 45 días</b>	<b>D = 60 días</b>
<b>AÑO DE REGISTRO</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>
1963	3,08	3,18	3,31	3,51	3,71
1964	4,03	4,20	4,83	5,19	5,20
1965	2,73	2,81	2,94	3,02	3,13
1966	4,33	4,60	4,87	5,06	5,16
1967	4,72	4,86	5,25	5,47	5,65
1968	3,13	3,39	3,42	3,57	3,86
1969	3,07	3,44	3,74	4,04	4,23
1970	4,17	4,52	5,11	5,41	5,54
1971	4,22	4,32	4,86	5,43	5,85
1972	3,90	4,06	4,47	4,75	4,97
1973	2,38	2,59	3,00	3,38	3,48
1974	1,97	2,18	2,31	2,37	2,54
1975	1,83	1,92	2,17	2,33	2,47
1976	1,46	1,70	1,96	2,04	2,15
1977	1,28	1,38	1,52	1,73	2,00
1978	3,03	3,06	3,15	3,25	3,36
1979	4,35	4,47	4,48	4,60	4,79
1980	4,29	4,48	4,66	4,77	4,93
1981	3,81	4,01	4,43	5,33	5,56
1982	6,66	6,79	6,94	7,40	8,40
1983	6,17	6,38	6,54	6,67	6,91
1984	6,62	6,79	6,89	7,44	7,89
1985	2,15	2,35	2,91	2,87	3,14
1986	1,52	1,66	2,02	2,23	2,46
1987	2,61	2,81	2,97	3,40	3,65
1988	0,44	0,51	0,62	0,76	0,81
1989	1,30	1,33	1,52	1,79	1,99
1990	0,62	0,71	0,81	1,01	1,17
1991	5,42	5,57	6,11	6,27	6,36
1992	1,85	1,98	2,16	2,36	2,84
1993	8,14	8,57	9,89	10,14	10,20



**Figura 4.** Curvas de frecuencia – duración de los caudales promedio mínimos del río Tirgua en la estación hidrométrica Paso Viboral.

#### **4.6 Modelo matemático para estimar el caudal mínimo esperado en época de estiaje como una función de la duración y el período de retorno.**

Ajustando el caudal promedio mínimo, la duración y el período de retorno a la Ecuación (27), se generó el siguiente modelo:

$$Q_{\min} = 5,053 \frac{D^{0,105}}{Tr^{0,925}} \quad (31)$$

Donde:

$Q_{\min}$ : caudal promedio mínimo del río en la estación hidrométrica Paso Viboral, m<sup>3</sup>/s

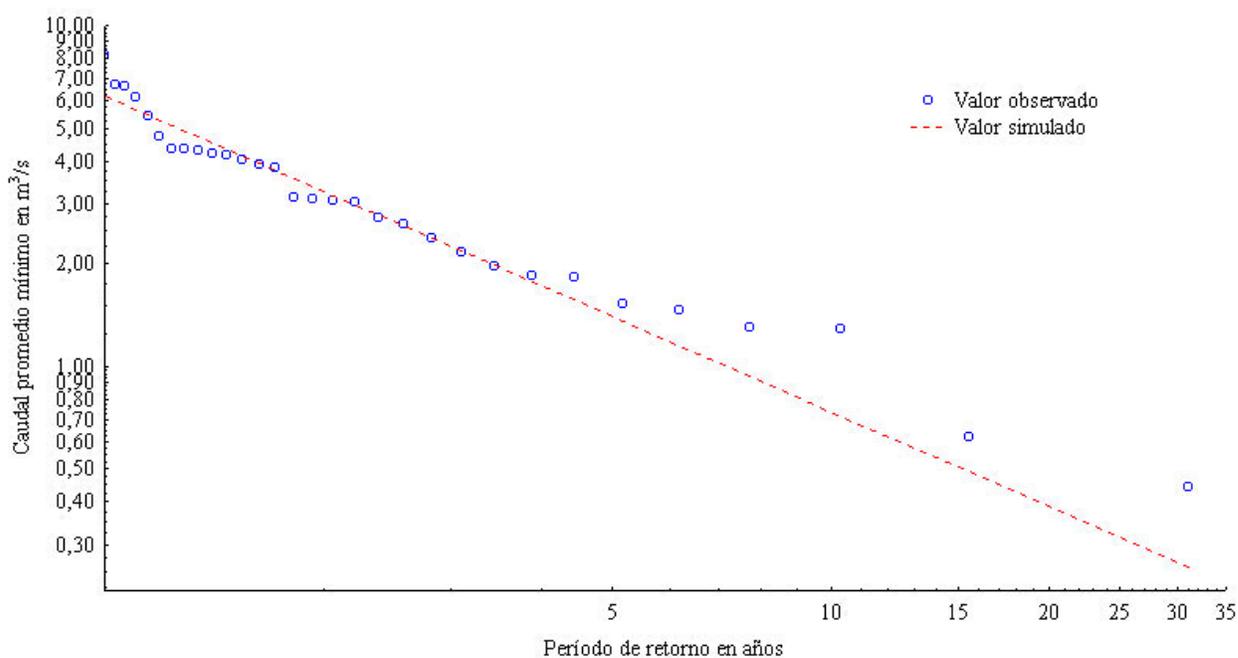
$T_r$ : período de retorno del evento, años

$D$ : duración del evento, días

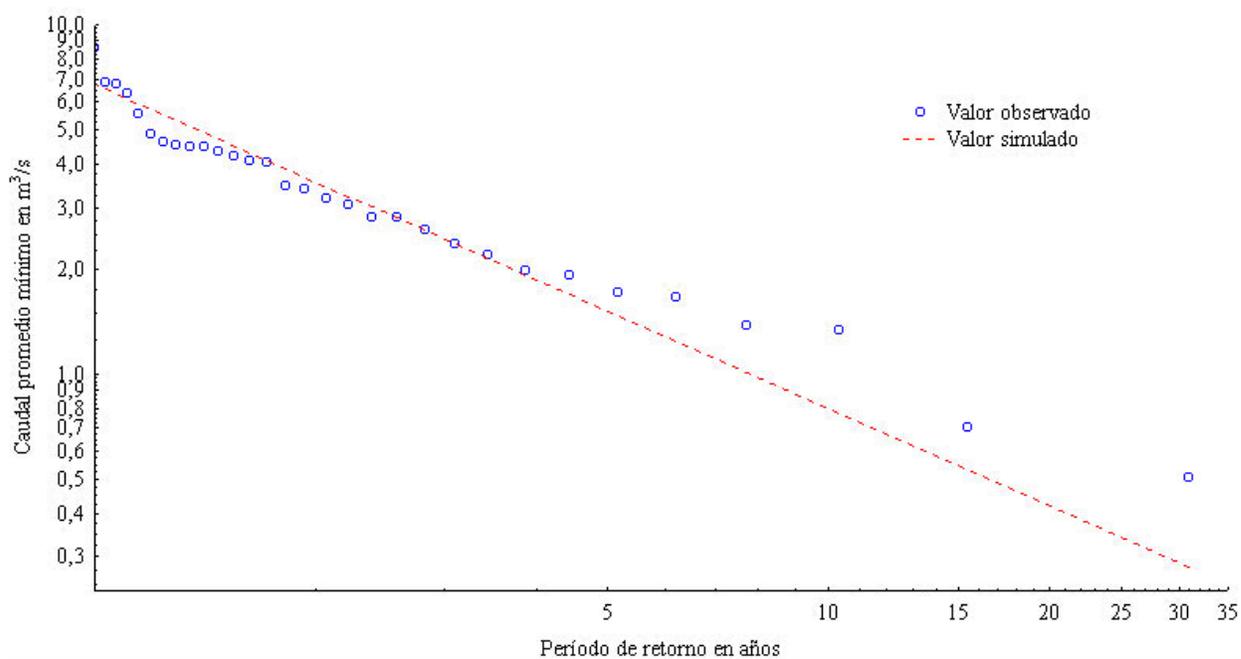
La Tabla 8 resume las características más relevantes del modelo encontrado. Las Figuras 5 a la 9, junto a las Tablas 9 a la 11 muestran la bondad de ajuste del modelo (31) para diferentes duraciones. Se observa que en la medida que el período de retorno y la duración aumentan, el modelo subestima ligeramente el caudal promedio mínimo; no obstante, dicho modelo puede emplearse como herramienta preliminar para la estimación del régimen hidrológico del río Tirgua.

**Tabla 8.** Características más resaltantes del modelo matemático exponencial para predecir el caudal promedio mínimo del río Tirgua en función de su duración y el período de retorno.

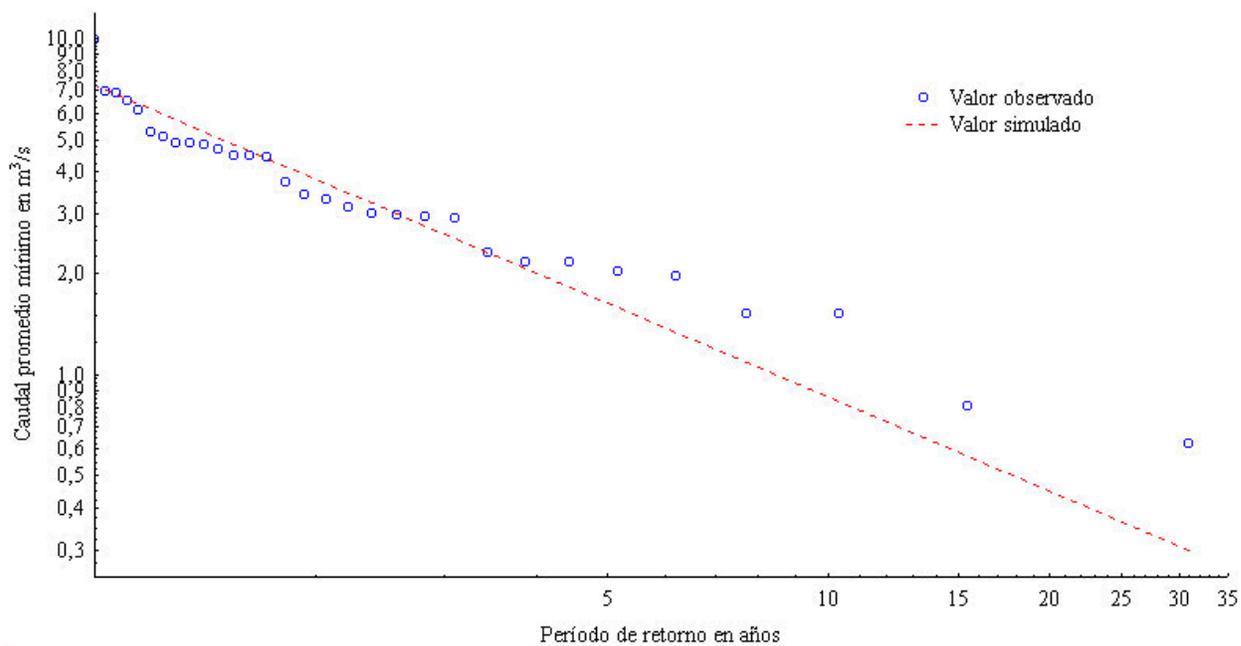
Parámetro	Valor
Varianza explicada por el modelo ( $R^2$ )	91,48
Casos efectivos incluidos (N)	155
Media de los residuales	0,059
Desviación estándar de los residuales	0,588
Función de pérdida (final loss)	53,906



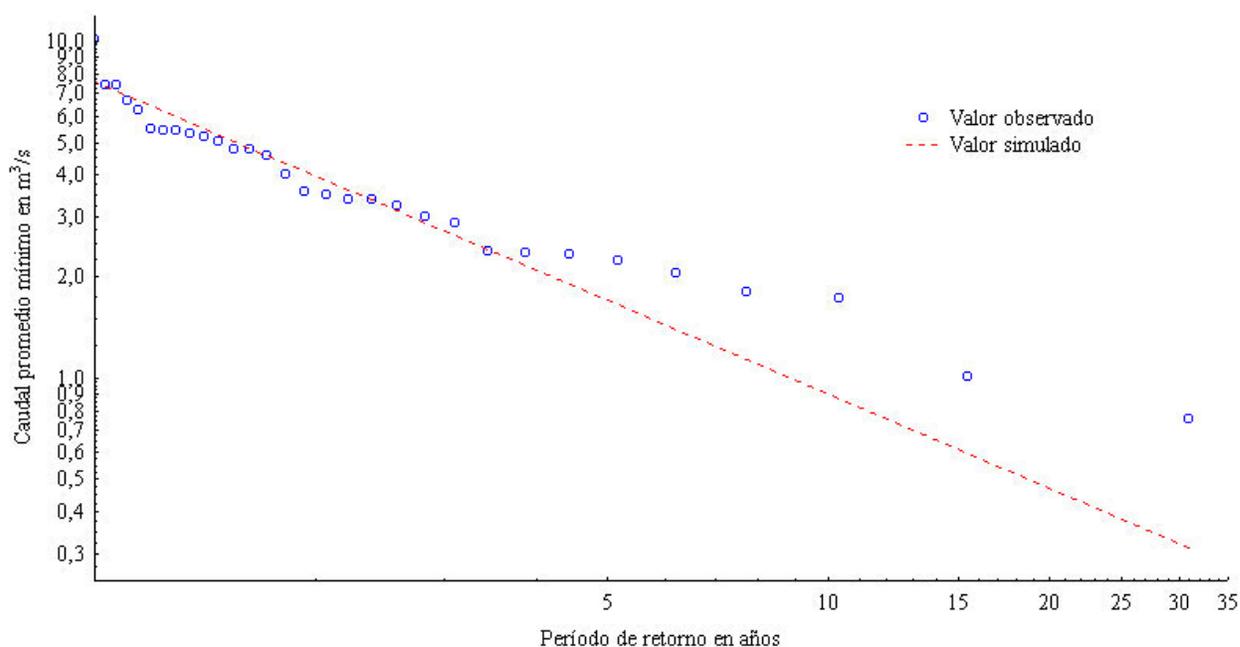
**Figura 5.** Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 7 días.



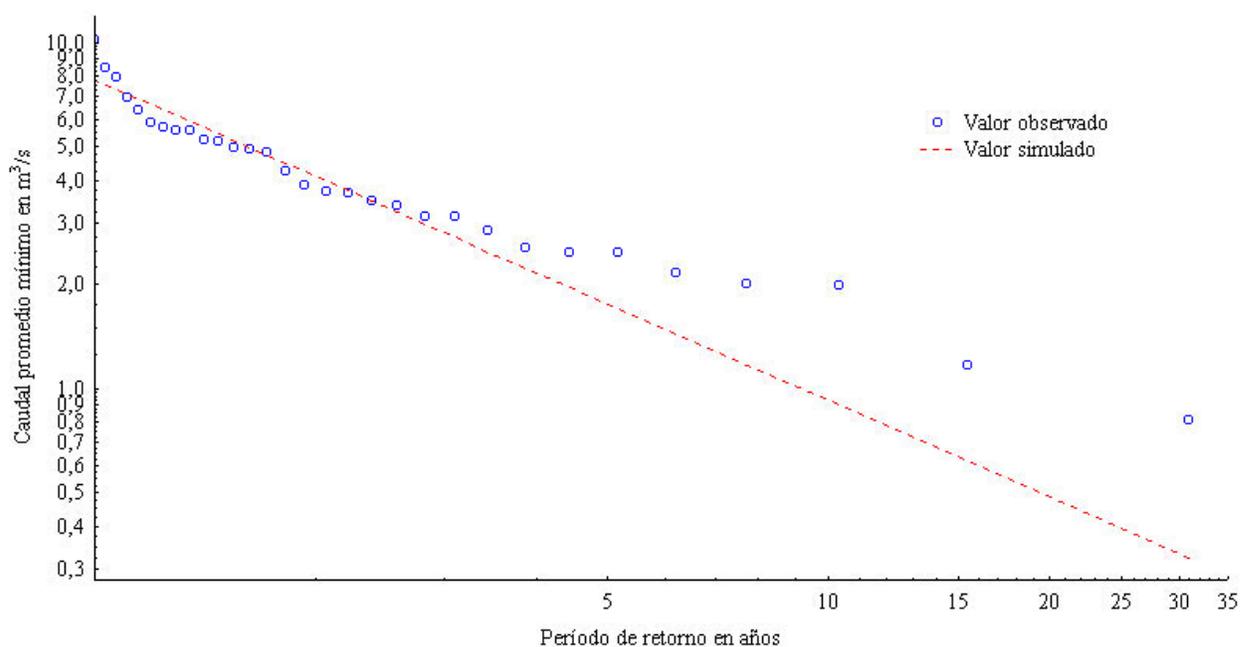
**Figura 6.** Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 15 días.



**Figura 7.** Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 30 días.



**Figura 8.** Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 45 días.



**Figura 9.** Relación entre los valores predichos por el modelo y los valores observados a una duración de 60 días

**Tabla 9.** Comparación entre los gastos promedios mínimos del río Tirgua observados y los simulados por el modelo para las diferentes duraciones consideradas.

<b>Gasto expresado en m<sup>3</sup>/s</b>									
<b>7 DÍAS</b>		<b>15 DÍAS</b>		<b>30 DÍAS</b>		<b>45 DÍAS</b>		<b>60 DÍAS</b>	
<b>OBSERVADO</b>	<b>SIMULADO</b>	<b>OBSERVADO</b>	<b>SIMULADO</b>	<b>OBSERVADO</b>	<b>SIMULADO</b>	<b>OBSERVADO</b>	<b>SIMULADO</b>	<b>OBSERVADO</b>	<b>SIMULADO</b>
0,44	0,26	0,51	0,28	0,62	0,30	0,76	0,31	0,81	0,32
0,62	0,49	0,71	0,53	0,81	0,57	1,01	0,60	1,17	0,62
1,28	0,71	1,33	0,77	1,52	0,83	1,73	0,87	1,99	0,90
1,30	0,93	1,38	1,01	1,52	1,09	1,79	1,13	2,00	1,17
1,46	1,15	1,66	1,24	1,96	1,34	2,04	1,40	2,15	1,44
1,52	1,36	1,70	1,47	2,02	1,58	2,23	1,65	2,46	1,70
1,83	1,57	1,92	1,70	2,16	1,83	2,33	1,90	2,47	1,96
1,85	1,77	1,98	1,92	2,17	2,07	2,36	2,16	2,54	2,22
1,97	1,98	2,18	2,14	2,31	2,30	2,37	2,40	2,84	2,48
2,15	2,18	2,35	2,36	2,91	2,54	2,87	2,65	3,13	2,73
2,38	2,38	2,59	2,58	2,94	2,77	3,02	2,89	3,14	2,98
2,61	2,58	2,81	2,79	2,97	3,01	3,25	3,14	3,36	3,23
2,73	2,78	2,81	3,01	3,00	3,24	3,38	3,38	3,48	3,48
3,03	2,97	3,06	3,22	3,15	3,47	3,40	3,62	3,65	3,73
3,07	3,17	3,18	3,43	3,31	3,69	3,51	3,86	3,71	3,97
3,08	3,36	3,39	3,65	3,42	3,92	3,57	4,09	3,86	4,22
3,13	3,56	3,44	3,86	3,74	4,15	4,04	4,33	4,23	4,46
3,81	3,75	4,01	4,07	4,43	4,37	4,60	4,56	4,79	4,70
3,90	3,94	4,06	4,27	4,47	4,60	4,75	4,80	4,93	4,95
4,03	4,14	4,20	4,48	4,48	4,82	4,77	5,03	4,97	5,19
4,17	4,33	4,32	4,69	4,66	5,04	5,06	5,26	5,16	5,43
4,22	4,52	4,47	4,89	4,83	5,27	5,19	5,49	5,20	5,66
4,29	4,71	4,48	5,10	4,86	5,49	5,33	5,73	5,54	5,90
4,33	4,90	4,52	5,30	4,87	5,71	5,41	5,96	5,56	6,14
4,35	5,08	4,60	5,51	5,11	5,93	5,43	6,18	5,65	6,38
4,72	5,27	4,86	5,71	5,25	6,15	5,47	6,41	5,85	6,61
5,42	5,46	5,57	5,92	6,11	6,36	6,27	6,64	6,36	6,85
6,17	5,65	6,38	6,12	6,54	6,58	6,67	6,87	6,91	7,08
6,62	5,83	6,79	6,32	6,89	6,80	7,40	7,10	7,89	7,31
6,66	6,02	6,79	6,52	6,94	7,02	7,44	7,32	8,40	7,55
8,14	6,20	8,57	6,72	9,89	7,23	10,14	7,55	10,20	7,78

**Tabla 10.** Diferencias entre los valores observados y los simulados por el modelo matemático para estimar el caudal promedio mínimo del río Tirgua.

<b>DIFERENCIA ENTRE EL VALOR OBSERVADO Y EL SIMULADO</b>				
<b>7 DÍAS</b>	<b>15 DÍAS</b>	<b>30 DÍAS</b>	<b>45 DÍAS</b>	<b>60 DÍAS</b>
0,18	0,23	0,32	0,45	0,49
0,13	0,18	0,24	0,41	0,55
0,57	0,56	0,69	0,86	1,09
0,37	0,37	0,43	0,66	0,83
0,31	0,42	0,62	0,64	0,71
0,16	0,23	0,44	0,58	0,76
0,26	0,22	0,33	0,43	0,51
0,08	0,06	0,10	0,20	0,32
-0,01	0,04	0,01	-0,03	0,36
-0,03	-0,01	0,37	0,22	0,40
0,00	0,01	0,17	0,13	0,16
0,03	0,02	-0,04	0,11	0,13
-0,05	-0,20	-0,24	0,00	0,00
0,06	-0,16	-0,32	-0,22	-0,08
-0,10	-0,25	-0,38	-0,35	-0,26
-0,28	-0,26	-0,50	-0,52	-0,36
-0,43	-0,42	-0,41	-0,29	-0,23
0,06	-0,06	0,06	0,04	0,09
-0,04	-0,21	-0,13	-0,05	-0,02
-0,11	-0,28	-0,34	-0,26	-0,22
-0,16	-0,37	-0,38	-0,20	-0,27
-0,30	-0,42	-0,44	-0,30	-0,46
-0,42	-0,62	-0,63	-0,40	-0,36
-0,57	-0,78	-0,84	-0,55	-0,58
-0,73	-0,91	-0,82	-0,75	-0,73
-0,55	-0,85	-0,90	-0,94	-0,76
-0,04	-0,35	-0,25	-0,37	-0,49
0,52	0,26	-0,04	-0,20	-0,17
0,79	0,47	0,09	0,30	0,58
0,64	0,27	-0,08	0,12	0,85
1,94	1,85	2,66	2,59	2,42

**Tabla 11.** Desviación estándar de las diferencias entre los valores observados y los simulados por el modelo matemático para estimar el caudal promedio mínimo del río Tirgua a las diferentes duraciones consideradas.

<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>				
<b>7 DÍAS</b>	<b>15 DÍAS</b>	<b>30 DÍAS</b>	<b>45 DÍAS</b>	<b>60 DÍAS</b>
0,49	0,51	0,64	0,62	0,64
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR GENERAL: 0,59</b>				

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos con esta investigación se verifica empíricamente que:

- 1.- El río Tirgua posee un caudal medio de  $13,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , con una desviación estándar de  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ . El caudal oscila regularmente entre  $2,5$  y  $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- 2.- El río Tirgua muestra una tendencia a presentar sequías de 7 y 30 días de duración cada 15 a 30 años. Entendiéndose por día seco aquel cuyo gasto promedio mínimo sea igual o inferior a  $1,766 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- 3.- El caudal promedio mínimo del río Tirgua se ajusta a un modelo como el descrito por la Ecuación (31) en función de su duración, “D” y el período de retorno, “Tr”.
- 4.- Los períodos secos se ajustan a un modelo como el descrito por la Ecuación (30) en función de su duración “d”.

## RECOMENDACIONES

En función de los resultados que se desprenden de este estudio se recomienda las siguientes acciones:

- 1.- A medida que se disponga de mayor información, se recomienda actualizar los modelos presentados.
- 2.- Se recomienda utilizar los resultados de esta investigación sólo para estudios preliminares y de planificación.
- 3.- Se recomienda llevar a cabo el análisis teórico utilizando una distribución probabilística teórica, como por ejemplo la Weibull (distribución de valores extremos Tipo III de Gumbel), a fin de extrapolar los datos hasta el doble de la serie original.

## REFERENCIAS

~~Ramones, R. y Vivas, I. (2001) *Curvas de intensidad—duración—frecuencia de lluvias en el estado Cojedes*. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora, Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales. Cojedes, Venezuela. pp. 1-2; p. 45; pp. 45-46 y anexo 2.~~

~~Ramones, R. y Vivas, I. (2001) *Curvas de intensidad—duración—frecuencia de lluvias en el estado Cojedes*. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora, Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales. Cojedes, Venezuela. pp. 1-2; p. 45; pp. 45-46 y anexo 2.~~

~~Ramones, R. y Vivas, I. (2001) *Curvas de intensidad—duración—frecuencia de lluvias en el estado Cojedes*. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora, Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales. Cojedes, Venezuela. pp. 1-2; p. 45; pp. 45-46 y anexo 2.~~

~~Ramones, R. y Vivas, I. (2001) *Curvas de intensidad—duración—frecuencia de lluvias en el estado Cojedes*. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora, Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales. Cojedes, Venezuela. pp. 1-2; p. 45; pp. 45-46 y anexo 2.~~

Agencia de Noticias EFE (2003, Marzo 05) *Crisis del agua “sin precedentes” en el planeta*. El Nacional, Sección Calidad de vida p. 2/5.

Azevedo, J. y Acosta, G. (1976) *Manual de hidráulica*. Harla México. México. pp. 482 – 487.

Canizales, M. (2003, Marzo 23) *El agua en concesión*. El Nacional, p. 2/17.

- Carrillo, J. (1999) *Agroclimatología*. Editorial Innovación Tecnológica. CDCH – Universidad Central de Venezuela. pp. 213 – 246.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2002) *Análisis del sector agua potable y saneamiento en Venezuela*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.cepis.org.pe/index.htm> [Consulta: 2003, Enero 03]
- Delgado, C. y Antón, D. (2002) *Sequía en un mundo de agua*. [Libro en línea]. Disponible: <http://www.cosmovisiones.com/sequia/index.htm> [Consulta: 2002, Diciembre 26]
- Desarrollos Hidráulicos Cojedes [DHC], Canagro International y Ministerio del Ambiente y de Los Recursos Naturales Renovables [MARNR] (1997) *Diagnóstico de la calidad de las aguas superficiales en el Estado Cojedes*. Cojedes: Empresa Regional DHC
- Dumith, D., Homes, P., Molina, G. y Peña, R. (1999) *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río San Carlos*. Documento de la Empresa Regional Desarrollos Hidráulicos Cojedes. Cojedes.
- El Siglo (2003, Mayo 23) *El verano secó a los ríos*. El Siglo, B – 14.
- Elorgas, E. (2005, Enero 12) *El río Tirgua se está secando cada día más*. La Noticia de Cojedes, p. 2.
- Guevara, E. (1991). *Hidrología: Una introducción a la ciencia hidrológica aplicada*. CDCH – UC.
- Guevara, E. (1992) *Métodos hidrológicos para el análisis de sequías*. Ingeniería UC, 1(1), pp. 25-34.

- Guevara, E. (1996) *Aplicación de las series de Fourier para la generación estocástica de variables ambientales*. Trabajo de investigación no publicado, Universidad de Carabobo, Carabobo.
- Guevara, E. (2003) *El hombre y su ambiente: Contaminación y conservación ambiental*. Universidad de Carabobo. Valencia – Venezuela. pp. 11-29
- Guevara, E. (2004) *Modelación de los caudales mínimo en la cuenca del río Caroní*. Proyecto de investigación subvencionado por el CDCH de la Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
- Guevara, E. y Cartaya, H. (2004) *Hidrología ambiental*. CDCH-UC. pp 243 – 245.
- Hernández, C. (2003A, Abril 02) *Se muere el río Macapo ante mirada inerte del estado*. La Noticia de Cojedes, p. 2.
- Hernández, C. (2003B, Mayo 15) *Disminución del río Tirgua afecta captación de agua para Tinaquillo*. La Noticia de Cojedes, p. 15.
- HIDROCENTRO (2004) *Sistema separado San Carlos-Tinaco*. Tríptico presentado en el foro: el agua como factor de desarrollo para el estado. San Carlos, Cojedes
- Instituto Nacional de Estadística – PNUD – Gobernación del Estado Cojedes (2001) *XIII Censo general de población y vivienda del estado Cojedes*. Documento técnico editado por INE en Noviembre 2002.
- Kiely, G. (1999) *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión* (José Miguel Veza Trad.) Islas Gran Canaria, España: Mc Graw Hill. p. 279.
- Meier, R. (1970) *Niedrigwasseranalyse, 2*. Fortbildungslehrgang fuer Hydrologie, Muenchen, Alemania.

- Mijares, F. (1987) *Fundamentos de hidrología de superficie* Noriega Editores. México. pp. 264 – 265.
- Ministerio de Agricultura y Cría (1992) *Memoria del ciclo agrícola 1992: Sistema de riego San Carlos – Estado Cojedes*. Documento técnico del Ministerio de Agricultura y Cría.
- Ministerio de Producción y Comercio (2003). *Caudales derivados para el sistema de riego y estación de bombeo del río Tirgua*. Datos no publicados.
- Mireles, R. (2003, Mayo 20) *La sequía ha obligado a Hidrocentro a racionar el servicio de agua potable*. La Noticia de Cojedes, p. 12.
- Mogollón, R. (2005, Marzo 12) *Realizado foro ambientalista en rescate del río Tirgua*. La Noticia de Cojedes, p. 3.
- Montgomery, D. (1991) *Diseño y análisis de experimentos* (Lic. Jaime Delgado Saldivar Trad.)  
México: Grupo Editorial Iberoamericana. pp. 429 – 462.
- Murray, S. (1991) *Estadística*. (Traducción Rafael Hernández Heredero; Revisión técnica Lorenzo Abellanas Rapun) Segunda edición. Mc. Graw Hill. pp. 440 – 477.
- Naciones Unidas [ONU]* (2003) [Página Web en línea]. Disponible:  
<http://www.un.org/spanish/events/water/pag1.htm> [Consulta: 2003, Abril 22]
- Narváez, R. (1997) *Orientaciones prácticas para la elaboración de informes de investigación*. Segunda edición. Universidad nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Vicerrectorado Puerto Ordaz. pp. 34-41.
- Ojeda, R. y Espinoza, J. (1985) *Análisis de los caudales mínimos en la región sur de Venezuela*. Trabajo de grado de Ingeniería Civil no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia. pp. 22 – 37.

Ramírez, T. (1999) *Como hacer un proyecto de investigación*. Editorial Panapo de Venezuela. Venezuela. pp. 60 – 144.

Ravelo, S. (1997) *Abastecimiento de agua: Teoría y diseño*. Editorial Innovación Tecnológica. UCV. Tercera edición ampliada. pp. 8 – 13.

Rondón, G. (1988) *Determinación de caudales derivables en épocas de estiajes en el río San Carlos – Sitio Paso Viboral*. Documento del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables; Zona 8. Cojedes.

Ruiz, J. (1990) *Principales características morfológicas de cinco cuencas del Estado Cojedes, su correlación e inferencias en el aspecto cualitativo del escurrimiento*. Trabajo de investigación, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora, San Carlos.

Sánchez, A. (2003, Abril 10) *No le podemos devolver el agua al río Macapo*. La Noticia de Cojedes, p. 5.

STATISTICA (versión 6.0) [Programa de computación en DC]. (2000). Disponible: <http://www.statsoft.com>

STATSOFT (2000) *Nonlinear Estimation Procedures. Function Minimization Algorithms*. Manual electrónico del STATISTICA 6.0. Disponible: <http://www.statsoft.com>

Vide, J. (2000) *Ingeniería Fluvial*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. pp. 77-138.

Wiser, E. (1967) *An analysis of runs of precipitation events*. Proceedings Int. Hydrology Symp., Fort Collins

# ANEXOS

**Figura 1.** Mapa del estado Cojedes, con punto de cierre en la estación Paso Viboral.

**Figura 2.** Ubicación de la Cuenca del río Tirgua con punto de cierre en la estación Paso Viboral.

**Figura 3.** Hidrograma del caudal medio diario del río Tirgua en la estación Paso Viboral para el período 1963 a 1993.

**Figura 4.** Curva de duración de los gastos medios diarios del río Tirgua en el lapso 1963 a 1993.

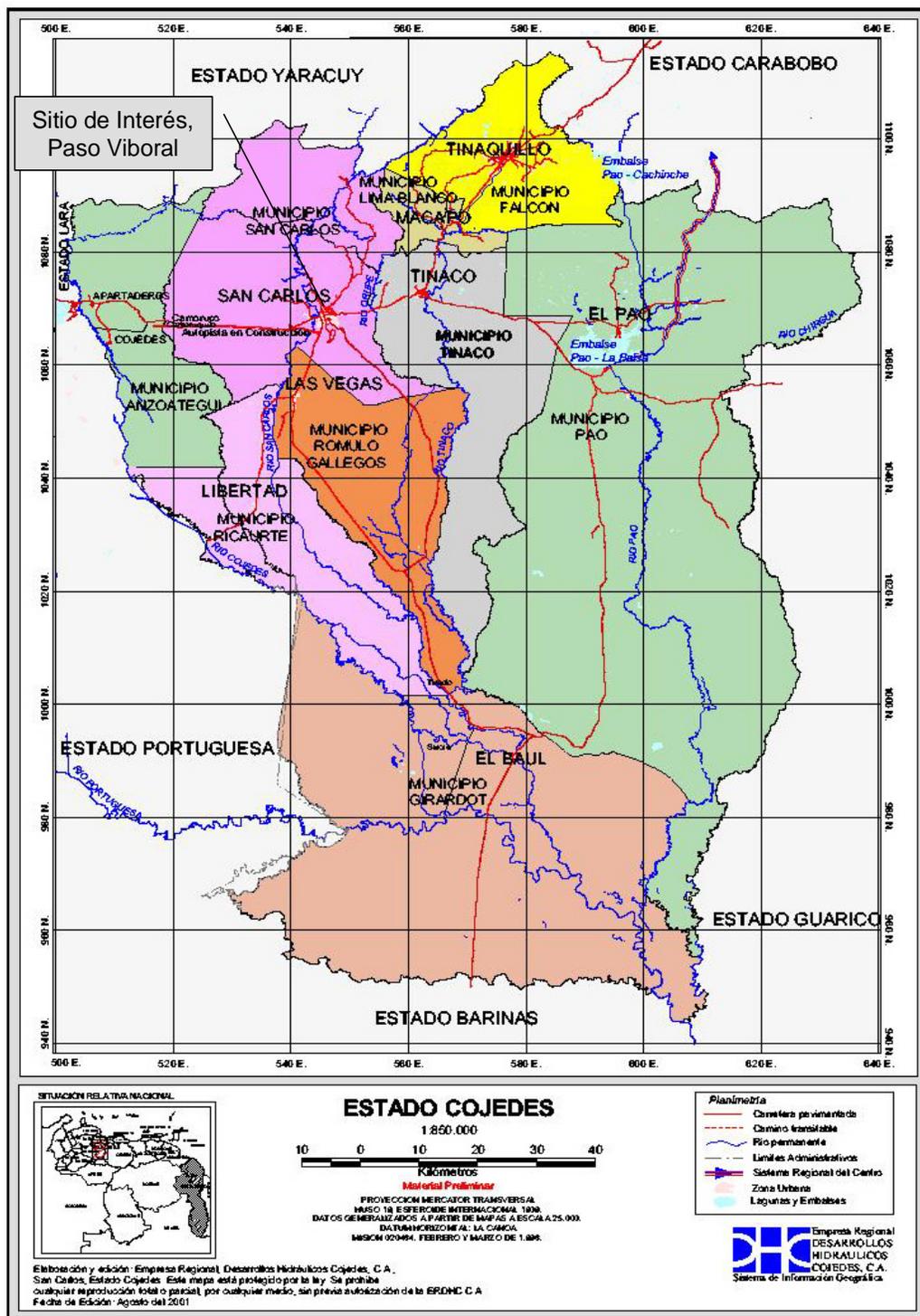
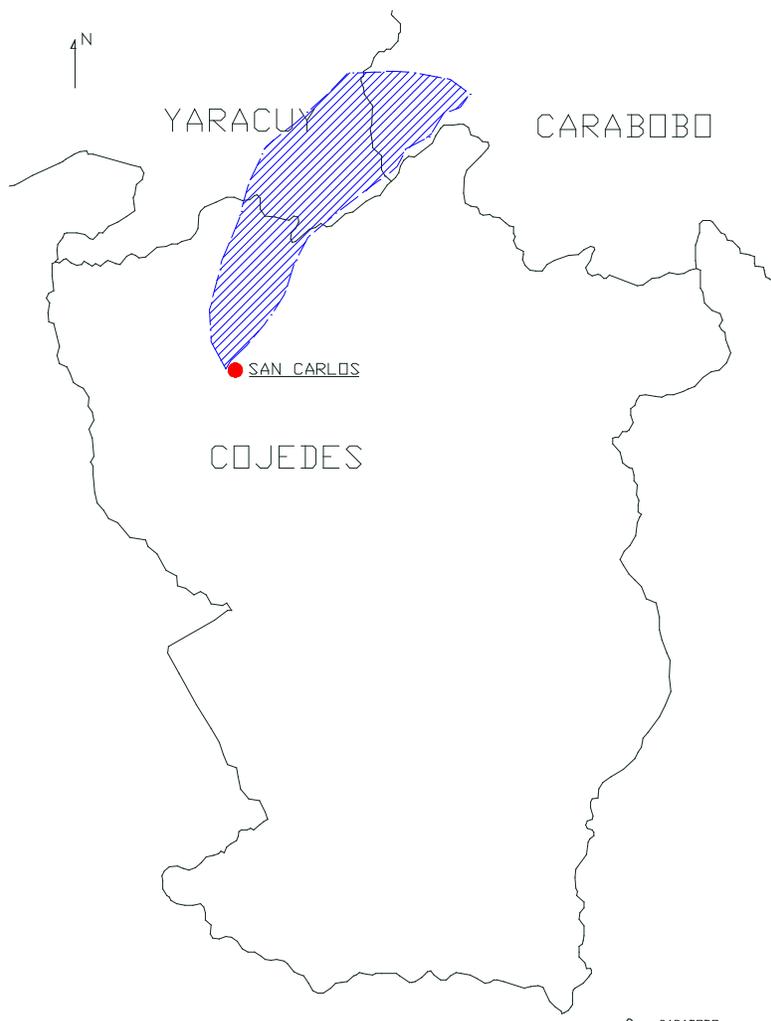
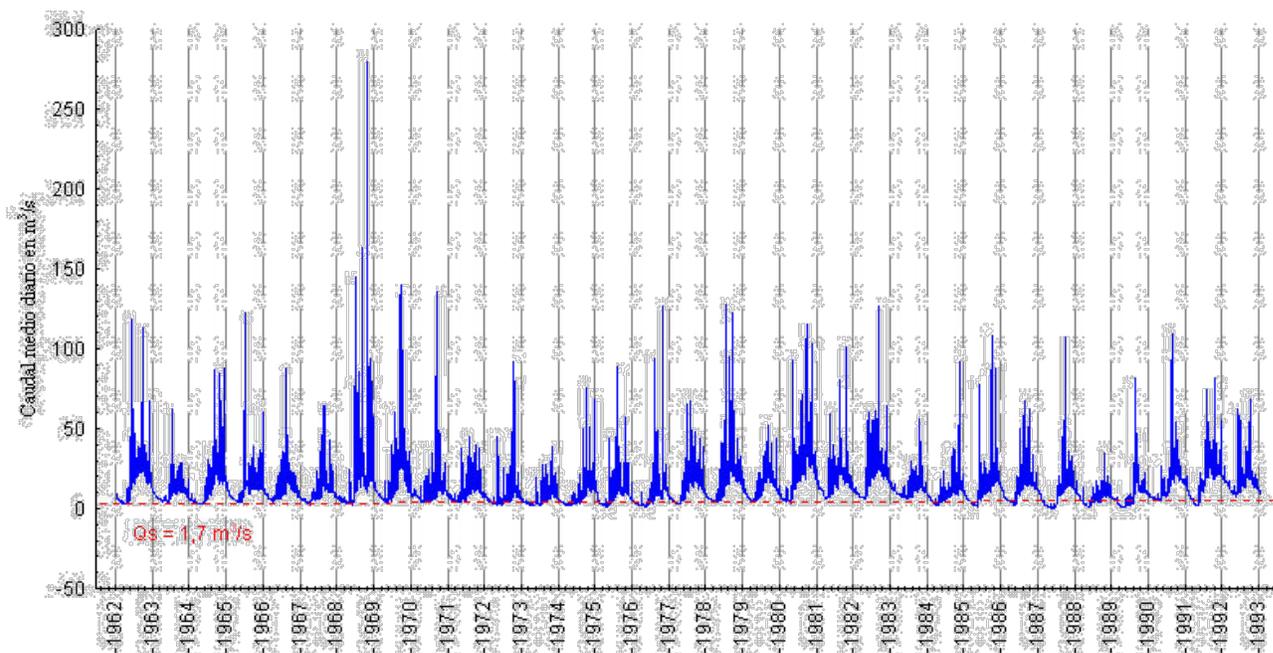


Figura 1. Mapa del estado Cojeques, con punto de cierre en la estación Paso Viboral.

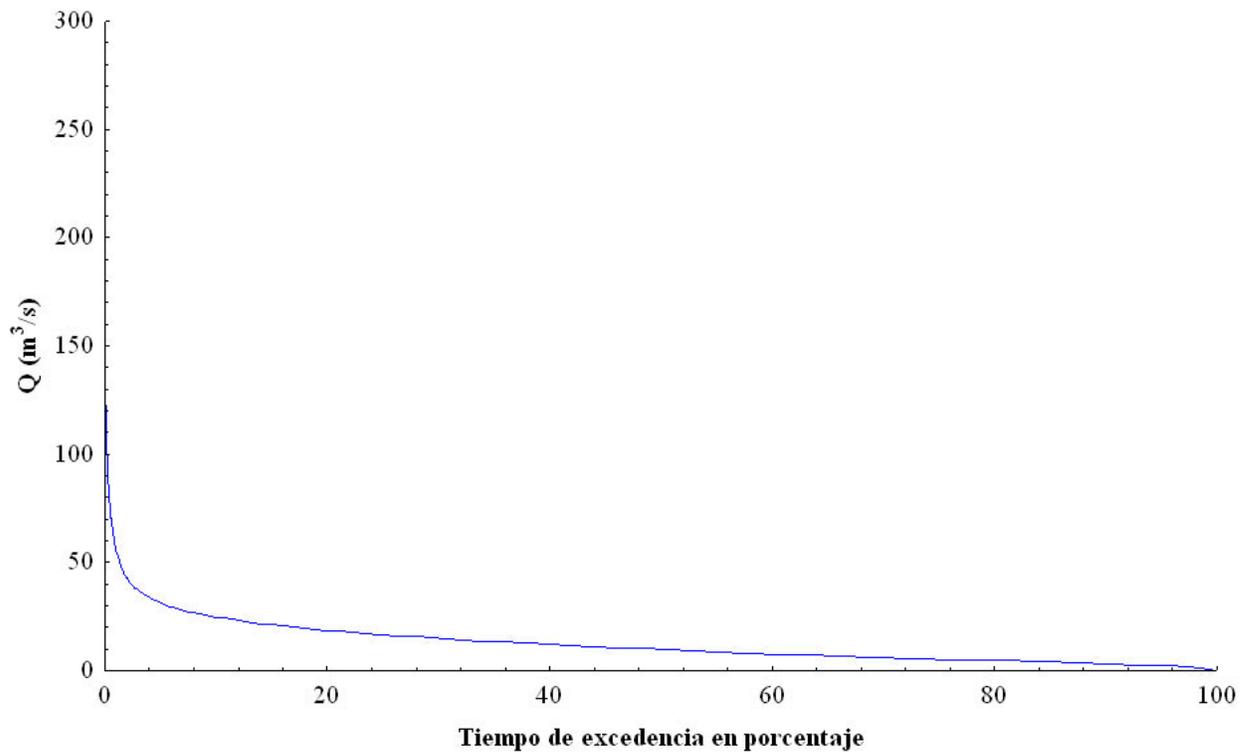


**Figura 2.** Ubicación de la Cuenca del río Tigua con punto de cierre en la estación Paso Viboral.



**Figura 3.** Hidrograma del caudal medio diario del río Tigrá en la estación Paso Viboral para el período 1963 a 1993.

**Nota:**  $Q_s$ : caudal mínimo de abastecimiento del Municipio San Carlos para el año 2006



**Figura 4.** Curva de duración del río Tirgua en la estación Paso Viboral para el período 1963 a 1993.