

01162

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS REGIONAL DE SEQUÍAS

JORGE OMAR HERNÁNDEZ REYES

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)**

DIRECTOR DE TESIS : DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL

CIUDAD UNIVERSITARIA, 1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.


A Josefina

*No desaparece lo que
muere, sólo lo que se
olvida.*

CONTENIDO

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>El hombre y la sequía.</i>	1
1.2 <i>Definición de sequía.</i>	2
1.3 <i>Clasificación de las sequías.</i>	4
1.4 <i>Efectos de los daños por sequías.</i>	4
1.5 <i>Situación actual del país.</i>	5
1.5.1 <i>El agua en México.</i>	5
1.5.2 <i>La sequía en México</i>	6
2. CARACTERÍSTICAS DEL EVENTO SEQUÍA	12
2.1 <i>Variables y series aleatorias hidrológicas.</i>	12
2.2 <i>Análisis de series hidrológicas por medio de secuencias de observaciones.</i>	13
2.3 <i>Registros.</i>	14
2.4 <i>Nivel de truncamiento.</i>	15
2.5 <i>Componentes de una sequía.</i>	17
2.6 <i>Intervalo de tiempo.</i>	18
2.7 <i>Inter - eventos.</i>	19
3. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS	21
3.1 <i>Ajuste a una distribución de probabilidad.</i>	21
3.2 <i>Análisis de frecuencias utilizando factor de frecuencias (KT).</i>	22
3.3 <i>Prueba de bondad de ajuste.</i>	22
3.4 <i>Prueba de independencia.</i>	23
3.5 <i>Funciones de distribución de probabilidad.</i>	24
3.5.1 <i>Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel).</i>	24
3.5.2 <i>Distribución normal.</i>	25
3.5.3 <i>Distribución log-normal de dos parámetros.</i>	26
3.5.4 <i>Distribución gamma de dos parámetros.</i>	27
3.5.5 <i>Distribución exponencial de dos parámetros.</i>	27

4. MODELACIÓN PUNTUAL	29
4.1 Modelación de sequías.	29
4.2 Estimación de componentes.	29
4.3 Modelación de los déficits máximos.	34
4.4 Modelación de las duraciones máximas.	35
4.5 Modelación del tiempo de ocurrencia de los déficits máximos.	36
4.6 Modelación del número de sequías en un año.	40
4.7 Ejemplo de aplicación.	43
4.7.1 Déficit máximo.	43
4.7.2 Duración máxima.	45
4.7.3 Tiempo de ocurrencia del déficit máximo.	46
4.7.4 Número de sequías en un año.	48
4.8 Sequía sintética.	49

5. ANÁLISIS REGIONAL	51
5.1 Sitios en estudio.	51
5.2 Eventos históricos y de diseño en los sitios de estudio.	52
5.3 Fisiografía.	56
5.4 Identificación de regiones meteorológicamente homogéneas.	60
5.4.1 Trazos multidimensionales.	60
5.4.2 Análisis de varianza.	62
5.5 Análisis regional por correlación y regresión.	81
5.5.1 Ecuaciones regionales.	86
5.6 Método de estaciones año.	92
5.7 Análisis de resultados.	97

6. CONCLUSIONES	112
------------------------	------------

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 1

ANEXO 2

APÉNDICE 1

RESUMEN

En los últimos años, las sequías han tomado una gran importancia a nivel mundial por los efectos que producen; nuestro país, aún en regiones que no se caracterizan por ser áridas, se ha visto afectado en la última década. Los principales problemas son: la caída en la producción agrícola, la afectación al ganado, problemas de origen social como lo es la migración campesina, y degradación de las condiciones de salud pública.

En México el fenómeno de la sequía ha sido estudiado; sin embargo, la mayoría de los estudios se han limitado al análisis de las pérdidas en diferentes ramas de la producción, así como a su extensión en el tiempo y en el espacio.

Este trabajo analiza los procesos internos del fenómeno con el objetivo de inferir eventos con cierta probabilidad de ocurrencia. Se basa en el análisis de los escurrimientos y en la teoría de las secuencias de observaciones. El método consiste en establecer un nivel de truncamiento o umbral que intersecte al hidrograma de los gastos medios diarios, el cual es una serie aleatoria continua, para que de esto se generen las series de sequía que son modeladas.

Dentro de los criterios existentes se aceptó como nivel de truncamiento a aquel gasto que es excedido un cierto porcentaje de las veces (95%, 90% y 85%), en el registro histórico de los gastos medios diarios.

El modelo fue aplicado tanto en forma puntual como regional. La región utilizada comprende 5 estaciones hidrométricas de la región hidrológica 36 (Nazas-Aguanaval), 4 de la región hidrológica 10 (Sinaloa) y 1 de la región hidrológica 24 poniente (Río Conchos).

El método se presenta en forma detallada para la estación El Palmito, la cual se consideró como la de mayor importancia por haber estado situada donde actualmente se encuentra la Presa Lázaro Cárdenas (El Palmito), la cual es la de mayor capacidad e importancia en la región.

La modelación puntual se realizó con la aplicación de las funciones de distribución de probabilidad univariadas Gumbel, gamma, exponencial, lognormal y normal. Todas ellas estimadas por las técnicas de momentos y máxima verosimilitud.

Para la construcción del modelo regional, se consideraron como variables independientes de la ecuación de regresión, a 13 características fisiográficas o meteorológicas de cada uno de los sitios involucrados.

La delimitación de la región meteorológicamente homogénea se llevó a cabo con la aplicación del método de los trazos multidimensionales y con la ayuda de la técnica del análisis de varianza.

Como resultado de la aplicación del modelo puntual y regional se calcularon sequías sintéticas, se obtuvieron ecuaciones regionales para periodos de retorno y se dibujaron curvas regionales de igual probabilidad de excedencia de diferentes eventos.

La información que se obtiene de este trabajo es importante para la región, ya que brinda una idea cuantitativa de la magnitud del fenómeno, además de un sustento técnico para la posible toma de decisiones en la administración del recurso.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta, cualquier forma de vida, desde la más sencilla hasta la más compleja, sería inconcebible sin la presencia del agua; las primeras civilizaciones tampoco se podrían imaginar sin ella. El hombre a lo largo de su existencia ha sufrido por la escasez del agua; esto, debido en muchas ocasiones, al fenómeno natural conocido como sequía. Máxime en ambientes áridos y semiáridos en donde la sequía parece ser un aspecto inevitable.

1.1 El hombre y la sequía.

No existe una región en donde la sequía no haya afectado las actividades del hombre en una u otra época. A lo largo de los años, los impactos de la sequía se han sentido en la agricultura, suministro de agua urbana, industria, generación de energía, recreación y en muchas otras actividades relacionadas con el agua y la sociedad.

Muchas sociedades han aceptado las sequías como “caprichos de la naturaleza” o “actos de Dios”, que tenían que ser soportados. En tiempos modernos la interacción de la sociedad con el agua, ha producido un cambio de actitud, esto, como un resultado de la creciente competencia y demanda conflictiva del suministro de agua debido a su escasez.

Además, un cambio de actitud con relación a la necesidad y la capacidad para “interactuar con nuestro destino” ha promovido estrategias y esfuerzos en la predicción y control de la escasez de agua (Yevjevich, Da Cunha, 1983).

El problema real surge, no de la ocurrencia de las sequías a lo largo de los años, sino del fracaso de establecer hábitos y crear una cultura que esté mucho más en armonía con la realidad del medio ambiente que nos rodea.

Cuando una sequía se presenta, la gente está forzada a ajustarse a nuevas relaciones dentro de su medio ambiente. Las migraciones temporales o permanentes han sido una forma común de ajuste social. Otros impactos sociales de las sequías son: el desempleo, daños a la salud pública y en algunos casos alteraciones radicales del orden social existente.

La actitud ante las sequías depende de algunos factores de naturaleza individual o colectiva. Algunos factores suelen ser creencias y tradiciones culturales, las cuales crean dificultades en la obtención de apoyo para programas técnicamente basados, para la mitigación de los impactos de la sequía, y por tanto, en el diseño de estrategias para hacer frente a la sequía (Yevjevich, 1967).

En los últimos años las sequías se han dejado sentir fuertemente en distintos lugares del mundo, su continua ocurrencia; al parecer, está asociada a los cambios climáticos que la tierra está sufriendo, cambios que seguramente son debidos a la contaminación del planeta ; por ello, ahora que la sociedad ha reconocido a la sequía como un verdadero desastre natural con el cual deberá convivir, se debe hacer un esfuerzo en el estudio del fenómeno, el cual a pesar de ser investigado desde hace varias décadas, encierra toda una serie de procesos internos los cuales justifican su imperante necesidad de estudio.

1.2 Definición de sequía.

Un primer paso muy importante en un análisis científico es definirlo claramente y especificar las componentes del problema a investigar. Esto requiere, separar el problema de otros tópicos asociados y formular definiciones no ambiguas de los conceptos importantes. El estudio del evento “sequía” no es la excepción. Es obviamente necesario decidir exactamente cual es el significado del término “sequía” antes de que se desarrolle y utilice cualquier análisis (Dracup, 1980).

Es esencial distinguir la diferencia entre aridez y sequía. A pesar de que aridez y sequía, son caracterizados por la falta de agua, éstos son dos conceptos distintos. Aridez es un estado climático permanente, mientras que sequía es un proceso extremo de tiempo y área. Sequía y aridez son frecuentemente asociados, debido a que las regiones áridas son aquellas, en las cuales la ausencia de lluvia es alta.

También es conveniente definir el término desertificación. Dicho término es uno de los impactos dramáticos de la sequía, que, combinado con las actividades humanas, es la degeneración de ecosistemas en prácticamente zonas desérticas.

Una vez presentados los conceptos anteriores, con el fin de evitar posibles confusiones de terminología, se procede a establecer una definición de sequía.

Las diversas definiciones dependen de puntos de vista profesionales o de actividades económicas afectadas (meteorología, hidrología, geografía, desarrollo de recursos hidráulicos, etc.; o tales como agricultura, industria, navegación, recreación, etc.)

Al parecer, hay tantas definiciones de sequía como investigadores relacionados con el tema, y por tanto, no se ha encontrado una definición objetiva de sequía que sea universalmente aceptada.

Desde el punto de vista de la meteorología, una sequía se presenta cuando la precipitación, durante un cierto periodo de tiempo es significativamente menor al promedio, o cuando es menor a cierto valor crítico que define la iniciación de la sequía.

Desde el punto de vista hidrológico, una sequía ocurre cuando se presenta un déficit de agua, pero teniendo en cuenta, además de la precipitación, el escurrimiento superficial y subsuperficial y el almacenamiento.

Desde el punto de vista económico y social, la definición de sequía considera no sólo la disponibilidad del agua; sino también, la demanda de ésta. Esto significa que la sequía depende tanto del uso del agua, como del destino y distribución de los usuarios. La consideración de déficits para periodos durante los cuales la demanda excede la disponibilidad debe afectar la definición de sequía. Por esta razón, desde este punto de vista, la definición meteorológica de sequía obviamente no es satisfactoria, ya que a nadie le preocuparía que la precipitación fuera menor a la promedio sobre el océano o en un área donde no se desempeñan actividades humanas. Un déficit, para ser considerado como sequía tiene que durar por un tiempo lo suficientemente prolongado y estar distribuido sobre un área de extensión significativa. Déficits que ocurren durante periodos cortos y/o tienen sólo efectos locales, no deberían, en principio, ser identificados como sequías.

Por tanto, la definición que se deriva de todo lo anterior y que se acepta para efectos de este trabajo es: Una sequía ocurre cuando se tiene un déficit significativo en cuanto a precipitación, escurrimiento y almacenamiento, y éste se distribuye en el tiempo y en el espacio. Además, se debe tener muy en cuenta que la palabra "significativo" nos indica que los impactos económicos, sociales y ambientales de la sequía son importantes para el hombre. Esto implica que el déficit debe exceder cierto valor crítico y que éste afecte por lo menos un área crítica.

El criterio para establecer la magnitud crítica de la sequía depende generalmente de factores económicos. Los valores críticos para el suministro de agua para uso agrícola, son relacionados a los efectos de la reducción de agua en los cultivos. En tanto que para los usos doméstico e industrial dependen de los requerimientos de agua para la sobrevivencia, hábitos higiénicos, la producción industrial, etc.; estos valores dependen mucho de los estándares de vida en la región en consideración.

1.3 Clasificación de las sequías.

De acuerdo al atlas nacional de riesgos en México (Secretaría de Gobernación, 1991), la clasificación de las sequías se realiza en función del clima prevaleciente o por su magnitud. Cabe mencionar que en este tipo de clasificaciones siempre se tiene una componente de origen subjetivo.

Por clima

- a) Permanentes: se producen en zonas de climas áridos.
- b) Estacionales: se observan en sitios con temporadas lluviosas y secas, bien definidas.
- c) Contingentes: se presentan en cualquier época del año debido a periodos prolongados de calor, a falta de lluvias o a la coincidencia de ambos.
- d) Invisibles: ocurren cuando las lluvias del verano no cubren las pérdidas de humedad por evaporación.

Por magnitud

- a) Leves: son aquellas que tienen como causa la escasez parcial de lluvias y no repercuten de manera importante en la producción y en la economía.
- b) Moderadas: son las originadas por una disminución significativa en la precipitación pluvial, que afecta a la producción agrícola.
- c) Severas: son las que se producen por la disminución general o total de lluvias, con daños cuantiosos a la producción.
- d) Extremadamente severas: son producto del proceso permanente de escasez de agua, que provoca crisis en la agricultura y en la ganadería, con los consiguientes efectos al conjunto de la economía y la sociedad.

1.4 Efectos de los daños por sequías.

Si se analiza el comportamiento social ante la sequía, considerándola como un desastre natural, se puede observar que la característica importante de la sequía, es la realidad de que no puede ser considerada como un fenómeno muy frecuente para cierta área.

Se puede explicar entonces por qué la población está, por lo general, inadecuadamente preparada para enfrentar una sequía. Las personas tienden a reaccionar preferentemente a problemas de emergencia. Los problemas causados por la sequía tienden a ser tomados en cuenta hasta que ocurren o atrapan la atención de todos.

Las sequías, junto con las inundaciones, ciclones tropicales y sismos, son considerados responsables de más del 90 % de todas las pérdidas causadas, por fuerzas naturales, al ambiente del hombre.

Cuando se ha declarado una sequía, los daños que causa dependen de su duración e intensidad, y en función de lo anterior, de la necesidad de agua que tengan en ese lapso los seres vivos y de las actividades económicas en desarrollo. Al presentarse una sequía, sus efectos se manifiestan en:

- a) Desequilibrio ecológico: deshidratación y muerte de la flora; migración y/o muerte de la fauna; degradación y/o destrucción de los bosques, y debilitamiento, aridez y desertificación de los suelos.
- b) Deterioro de la producción agrícola: pérdida de cultivos y el consecuente empobrecimiento de los campesinos; escasez de alimentos que deriva en desabasto y encarecimiento de los productos.
- c) Disminución del hato ganadero.
- d) Reducción de la actividad industrial: redundancia en cortes de producción y descenso en la calidad de los productos, lo cual repercute en la capacidad de expansión de la economía, en los niveles de captación de divisas y en la generación de empleos.
- e) Deterioro de los rangos de salud pública: provoca falta de higiene y sus consecuencias en la generación de epidemias, hambrunas y mortandad.
- f) Migración campesina: migraciones masivas del área rural ante las condiciones negativas de subsistencia.

1.5 Situación actual del país.

1.5.1 El agua en México.

En términos generales, la precipitación ocurre durante los cuatro a seis meses de temporada lluviosa y una parte importante se concentra en áreas poco pobladas. El 82 % del volumen de almacenamiento de agua en las presas está debajo de la cota de los 500 msnm, mientras que el 76 % de la población vive por arriba de esta nivel (Estadísticas del medio ambiente INEGI, 1994).

De acuerdo con las distribuciones espaciales de la lluvia y la temperatura, 52.7 % del territorio tiene déficit hídrico (desértico, árido y semiárido) mientras 47.3 % es húmedo y subhúmedo. Menos de la tercera parte del escurrimiento superficial ocurre en el 75 % del territorio, donde se concentran los mayores núcleos de población, las industrias y las tierras de riego, lo que provoca insuficiencias en las aguas superficiales y subterráneas para el abastecimiento y a la vez conduce a la sobreexplotación de acuíferos y obliga a hacer transferencias entre cuencas. La contaminación, por otra parte, ha reducido el potencial de uso de varios acuíferos, ríos y cuerpos de agua. Paradójicamente, en el 25 % restante del territorio, la abundancia de agua también representa un problema severo.

En vista de los problemas de escasez de agua, exacerbados éstos por los patrones de consumo excesivo, desde hace algún tiempo, y particularmente en los años recientes, México ha venido adoptando instrumentos legales e institucionales, así como parámetros, mediante los cuales pueda regularse la utilización del agua, así como los procedimientos de recarga, las áreas más sensibles, algunos aspectos socio-organizativos y administrativos, las particularidades de cada cuerpo de agua, así como un conjunto de medidas de protección de los recursos hídricos, entre otros. Todos estos aspectos están comprendidos tanto en la Ley de aguas nacionales como en el Reglamento de la Ley de aguas nacionales.

1.5.2 La sequía en México

En nuestro país, el fenómeno de la sequía se ha dejado sentir intensamente a lo largo de los años. Desde 1930 se ha observado que las fluctuaciones climáticas tienden a favorecer la ocurrencia de la sequía en México (Castorena.1980).

De acuerdo a un estudio realizado (artículo presentado por Jaime Sancho y Cervera en 1980) en el periodo de 1910 a 1977 se tuvieron un total de 38 años secos. En este lapso de tiempo se tuvieron periodos secos consecutivos que duraron por varios años: 1917-1928, 1932-35, 1937-39, 1949-51, 1969-72 y 1975-77. Los años que destacaron por la presencia de sequías muy intensas fueron: 1935, 1953, 1957, 1960, 1962 y 1977.

En lo que respecta a los Estados de la República, los más afectados en el periodo fueron: Coahuila, con 22 sequías reportadas en el periodo, Nuevo León con 18, Chihuahua con 13 y Sonora y Tamaulipas con 12 años cada uno. Con la información de este periodo se elaboró una regionalización del riesgo de sequía en México, como se muestra en la figura 1.1.

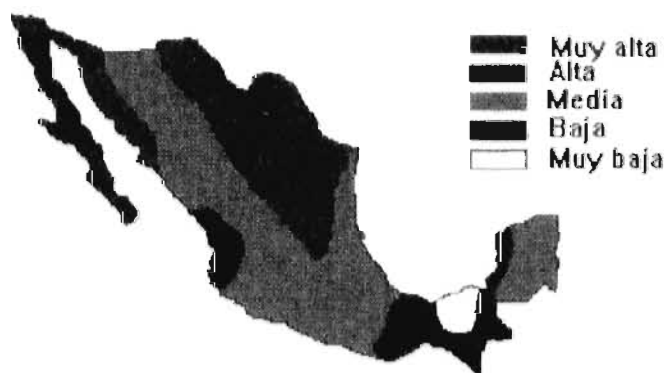


Figura 1.1 Riesgo de la sequía en México.

En la década de los 80's, de acuerdo a información proveniente de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y de la Comisión Nacional del Agua, prácticamente en todos los estados de la república mexicana se presentó el fenómeno de la sequía, inclusive, en algunos estados como el de Coahuila, se tuvo sequía en todo el periodo de diez años. La tabla 1.1 y la figura 1.2 muestran la ocurrencia de la sequía en dicho periodo en las diferentes entidades y las pérdidas correspondientes en la agricultura.

Por otra parte, en la década de los 90's, los estados del norte del país han sufrido de manera importante por los impactos de la sequía. Los principales problemas en estas últimas épocas de estiaje son: la caída en la producción agrícola, insuficiencia en el abasto de agua potable a poblaciones, la pérdida de cabezas de ganado por falta de agua y alimento, y por último, la notable migración de productores del campo hacia las ciudades y Estados Unidos.

En lo que respecta a la producción agrícola, en la mayoría de los estados del norte del país, miles de toneladas de alimentos se han dejado de producir debido a la suspensión de ciclos de verano a causa de la sequía.

En las principales ciudades de algunas entidades se ha tenido que establecer un racionamiento en el suministro de agua potable, llegando a casos extremos, donde el agua se ha llegado a racionar de ocho a doce horas, de dos a tres veces a la semana, para cerca de 100 colonias.

También, en estados como el de Chihuahua, la migración de campesinos a las ciudades de la entidad y a Estados Unidos, ha mermado la población en los ejidos y comunidades rurales e indígenas. Otro problema se presenta debido a la falta de programas de desarrollo para el campo, como lo es el estado de Baja California, donde se presenta un fenómeno de migración interna que concentra al 82 % de la población en municipios fronterizos.

Por último, cabe mencionar la constante aparición, en los últimos años, de las llamadas enfermedades del agua como el cólera y otras. La ocurrencia de éstas ha propiciado la implementación de programas de salud preventiva en los diferentes estados de la república mexicana.

**Tabla 1.1 AFECTACIONES POR SEQUÍAS EN EL PERIODO 1979-1988.
PÉRDIDAS**

ENTIDAD	HECTÁREAS EN MILES	IMPORTE (MILLONES \$)*	AÑOS DE OCURRENCIA EN EL PERIODO
1. Aguascalientes	495	78	5
2. Campeche	85	7	1
3. Chiapas	428	42	5
4. Chihuahua	612	50	4
5. Coahuila	260	20	10
6. Colima	36	1	2
7. Durango	1287	66	9
8. Guanajuato	4525	234	10
9. Guerrero	741	32	8
10. Hidalgo	441	11	4
11. Jalisco	1973	175	7
12. México	288	4	4
13. Michoacán	608	46	6
14. Morelos	129	4	4
15. Nayarit	143	10	3
16. Nuevo León	397	40	8
17. Oaxaca	738	3	4
18. Puebla	862	63	6
19. Querétaro	507	29	8
20. Quintana Roo	67	3	1
21. San Luis Potosí	775	15	5
22. Sinaloa	408	25	5
23. Sonora	26	4	4
24. Tamaulipas	1116	47	8
25. Tlaxcala	506	35	7
26. Veracruz	250	15	3
27. Yucatán	82	3	1
28. Zacatecas	2672	150	9
TOTAL	20412	1212	

FUENTE: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Administración del Agua.

- Datos proporcionados hasta el año **1986** por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

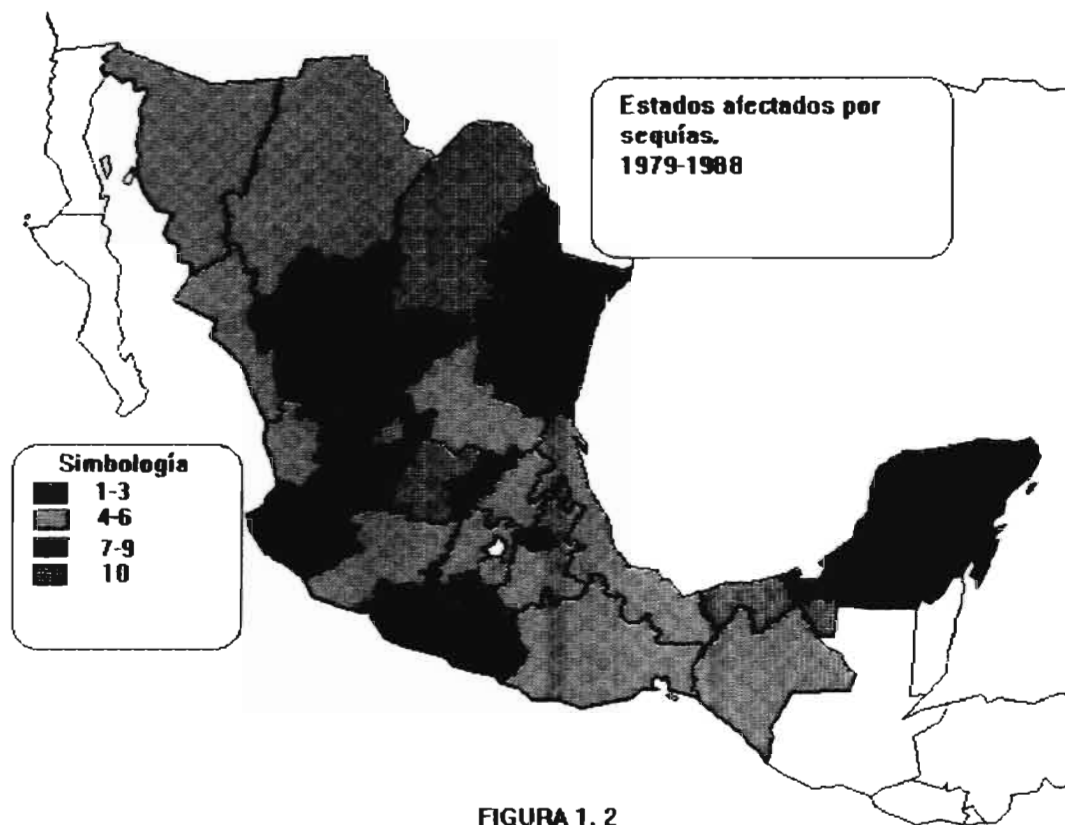


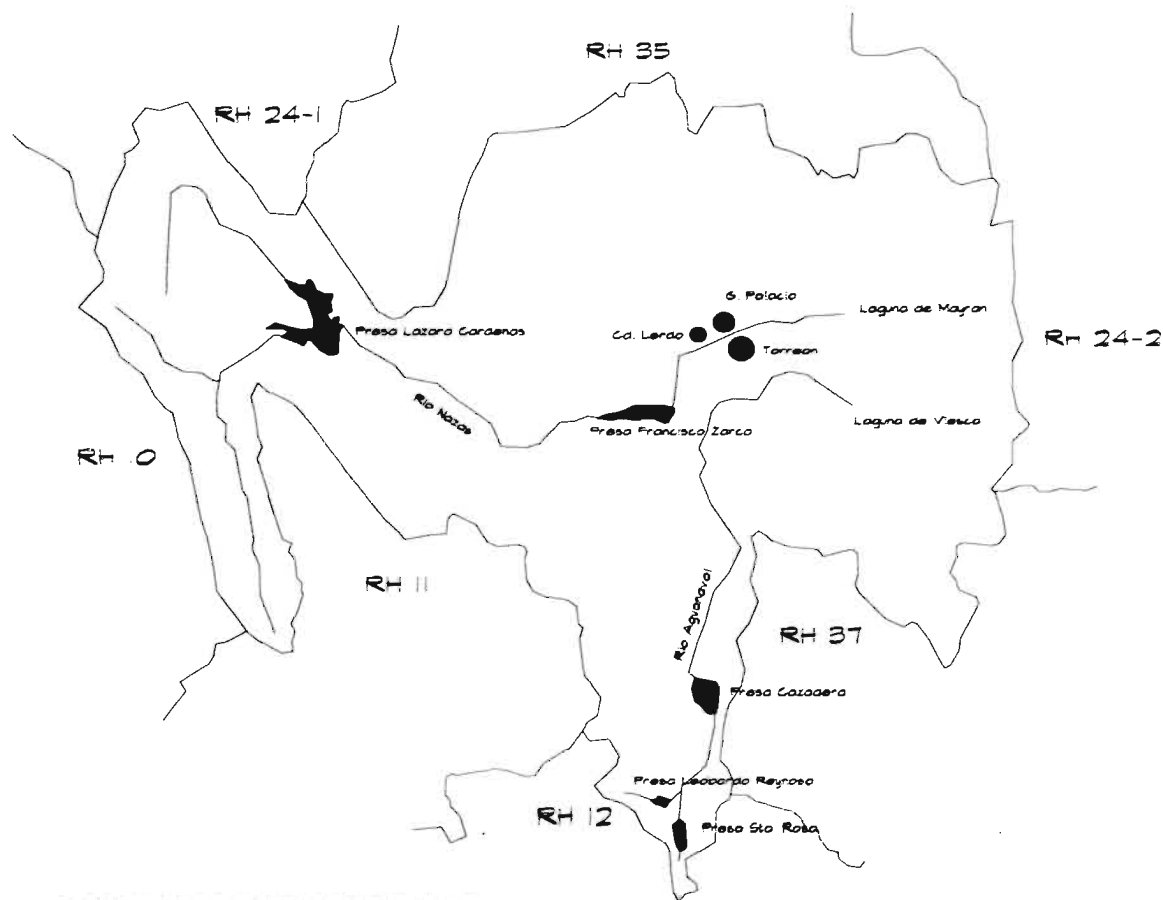
FIGURA 1.2

La región hidrológica No. 36 es la que se ha elegido para aplicar el análisis, ya que es una región donde el fenómeno de las sequías se deja sentir frecuentemente y afecta de manera muy importante todo tipo de actividades.

La región es una cuenca cerrada que está formada por las subcuencas de los ríos Nazas y Aguanaval. Tiene una superficie de 94,372 km², de los cuales el 63.2 % corresponde al Nazas y el restante al Aguanaval. Comprende parte de los estados de Coahuila, Durango (la mayor parte de la región se encuentra en este estado) y una pequeña parte de Zacatecas. Los ríos Nazas y Aguanaval drenan naturalmente hacia las lagunas de Mayran y de Viesca respectivamente, sin embargo, desde la construcción de las presas de la región y debido a que el agua se distribuye en canales al distrito de riego, éstas se desecaron hace ya muchos años. La figura 1.3 muestra el panorama general de la región.

Dentro de las actividades económicas más importantes en la región se encuentran la agricultura, la cual destacó por muchos años por la producción de algodón y alfalfa y ahora lo hace entre otros con la vid y el sorgo; la ganadería, dentro de la cual destaca de manera muy importante la ganadería lechera, ya que con ésta la región abastece la demanda de algunas ciudades importantes, y también la cría de ganado, destinado al abastecimiento de carne. Todas estas actividades son muy sensibles a la sequía y por ello la necesidad de investigar el fenómeno en la región.

El objetivo de este trabajo es el de investigar las sequías en la región, con el propósito de evaluarlas cuantitativamente en función de su magnitud y duración. La línea de investigación que se sigue es, más que evaluar sus impactos en las diferentes ramas de la producción; el análisis de los procesos internos del fenómeno. Lo anterior con el fin de que sea una herramienta técnicamente sustentada para una posterior integración con otras líneas de investigación, todo esto, teniendo como objetivo común la mitigación de los impactos de las sequías ante las actividades del hombre.



Elaborado con información de boletines hidrológicos

Figura 1.3 Región Hidrológica No. 36.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DEL EVENTO SEQUÍA

En este capítulo se presentan las consideraciones teóricas adoptadas para el análisis de las sequías, partiendo de la clasificación de las variables hidrológicas, para llegar a la teoría de secuencias de observaciones, la cual proporciona el método de investigación de series hidrológicas donde intervienen dos procesos (procesos que se intersectan). Después de tener la base teórica se procede a la identificación de las características del evento sequía, y a establecer una serie de criterios que ayuden a la evaluación del evento, con fines de posterior modelación (en estos dos últimos puntos se siguen los criterios propuestos por Zelenhasic y Salvai 1987).

2.1 Variables y series aleatorias hidrológicas.

Las variables y series aleatorias, a su vez, pueden ser discretas y continuas. Las variables son discretas cuando sólo pueden ocurrir algunos eventos aleatorios determinados. Un caso simple es cuando sólo ocurren valores enteros en algún proceso contable.

Las variables aleatorias son continuas cuando puede ser observado cualquier valor en un intervalo dado. El gasto que fluye por un río, con valores $Q > 0$, es una variable continua (Yevjevich, 1972).

Una variable discreta puede tener sólo secuencias o series discretas, mientras una variable continua puede tener tanto series discretas como continuas. La mayoría de las variables hidrológicas son continuas de series continuas. El nivel del agua subterránea, el nivel de un lago, la descarga de un río, la temperatura del agua o su contenido de oxígeno, pueden tener cualquier valor en el rango de sus fluctuaciones y en cualquier tiempo.

Las series discretas son obtenidas al promediar valores dentro de los intervalos de tiempo, o por medio de observaciones en tiempos discretos, y por medio de alguna regla de selección de valores particulares.

2.2 Análisis de series hidrológicas por medio de secuencias de observaciones.

La mayoría de las técnicas de variables matemáticas, para la investigación de las estructuras de las series hidrológicas, están basadas de alguna manera en el concepto de dos procesos que se interceptan uno al otro (Guerrero, 1975).

Este concepto es el que prevalece en la teoría de las secuencias de observaciones (runs) o también conocida como la teoría general de intersección (general crossing theory).

El término “secuencia de observaciones” es definido como una secuencia de un mismo tipo, precedido y sucedido por una o más observaciones de otro tipo. Dicha definición es fácil de entender si se observa la figura 2.1, la cual muestra que la secuencia de observaciones llamada S, es precedida y sucedida por una secuencia de mediciones llamada D.

La figura 2.1 representa una serie continua de una variable X_t . Al seleccionar un valor arbitrario X_0 , la serie es interceptada en muchos puntos, y por tanto, la relación del valor constante X_0 a todos los otros valores de x_t sirve como base para varias definiciones de secuencias de observaciones. Sin embargo, el parámetro X_0 no necesariamente es una constante, éste puede ser un parámetro cambiante, una función determinística, una variable estocástica, o una combinación de éstas. Por simplicidad el valor X_0 es asumido como una constante arbitraria, la cual debe ser seleccionada antes de que las secuencias de observaciones sean investigadas.

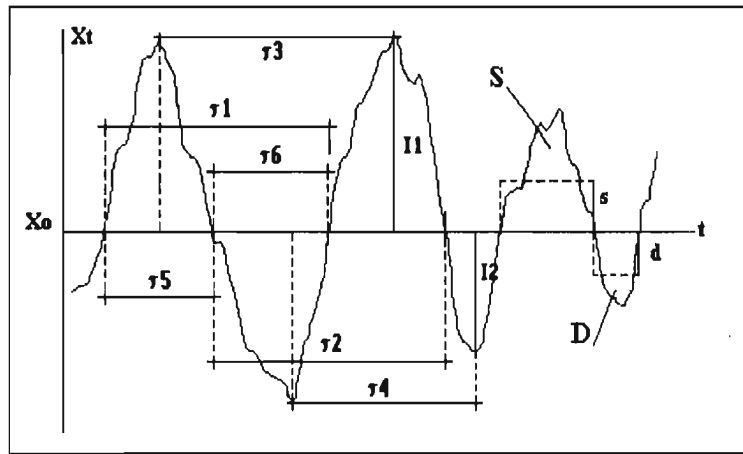


Figura 2.1 Secuencias de observaciones.

Las secuencias de observaciones que son usadas en la literatura son las siguientes (ver figura 2.1):

- τ_1 distancia entre cruces ascendentes.
- τ_2 distancia entre cruces descendentes.

τ_3	distancia entre máximos sucesivos.
τ_4	distancia entre mínimos sucesivos.
τ_5	distancia entre cruce ascendente y cruce descendente sucesivos.
τ_6	distancia entre cruce descendente y cruce ascendente sucesivos.
S	integral positiva entre cruce ascendente y cruce descendente sucesivo.
D	integral negativa entre cruce descendente y cruce ascendente sucesivos.
l_1	valor máximo para un τ_3 dado.
l_2	valor mínimo para un τ_6 dado.
s	promedio positivo, S/τ_5
d	promedio negativo, D/τ_6 .

Por otra parte, después de definir las secuencias es necesario nombrarlas. Todas las secuencias de mediciones relacionadas con $(X_t - X_0) > 0$, son llamadas secuencias positivas, en tanto que aquellas con $(X_t - X_0) < 0$, son llamadas secuencias negativas.

Todas estas secuencias de observaciones pueden ser aplicadas a varios problemas de Hidrología y Recursos Hidráulicos, sin embargo, algunos de ellos son más importantes que otros. Nuestro caso obviamente corresponde a las secuencias de observaciones negativas y las de mayor importancia son: D, la cual es llamada déficit, τ_6 , llamada duración, además algunas otras que son concebidas en particular para este análisis.

De esta manera, establecida la base teórica, se procede a definir una secuencia de análisis para las sequías, para lo cual se acepta una simbología particular y ciertos criterios de selección y evaluación que se describirán a continuación.

2.3 Registros.

Antes de entrar de lleno al análisis de las sequías será necesario contar con información confiable debidamente registrada. Dicha información consta de los registros de escurrimientos para las cuencas en estudio, la cual está contenida en boletines hidrológicos.

Los registros son representados gráficamente mediante hidrogramas anuales, los cuales representan la variación del escurrimiento en el tiempo. De esta representación gráfica, como se verá más adelante, se determinan todas las componentes de la sequía.

Ahora bien, en el análisis de las sequías, una componente muy importante es la magnitud de los déficits, la cual está íntimamente relacionada con el hidrograma; por tanto, son utilizados registros de escurrimientos medios diarios. La utilización de dichos gastos proporciona una buena representación gráfica y en consecuencia se pueden evaluar con aceptable precisión las magnitudes de los déficits (área comprendida entre el hidrograma y el nivel de truncamiento), los cuales son expresados en unidades de volumen.

2.4 Nivel de truncamiento.

Obviamente, para iniciar el estudio de las sequías, se requiere de un parámetro que pueda distinguir o separar los flujos de sequía de los no considerados como sequía. Dicho parámetro, en otras palabras, es un criterio de selección de flujos bajos, el cual es parte fundamental para la determinación de las componentes de la sequía.

Este parámetro es conocido como nivel de truncamiento o gasto de referencia (Q_r). Su función, como ya se dijo, es la de establecer un límite o nivel, el cual proporcione con certeza sólo los flujos bajos en una corriente. Así para gastos menores al nivel de truncamiento durante algún periodo de tiempo, significarán la presencia de un déficit.

Existen varios criterios para determinar el nivel de truncamiento (Zelenhasic, Salvai, 1987). Un primer criterio es el de considerar el nivel de truncamiento igual a cierto porcentaje de la media de los gastos; por ejemplo, utilizar 75 por ciento de la media, o inclusive la media (ver figura 2.2).

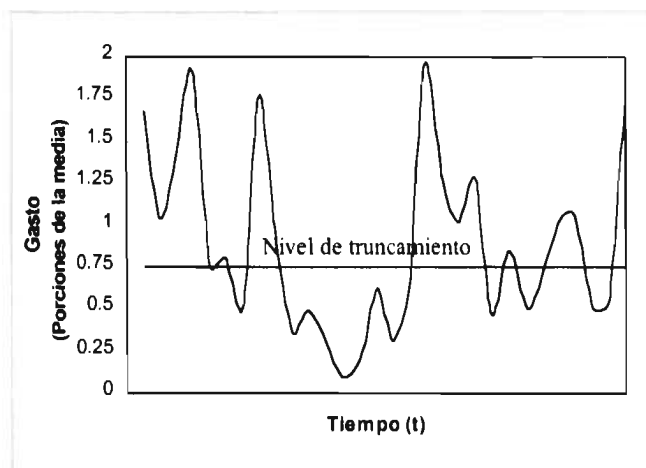


Figura 2.2 Nivel de truncamiento como cierto porcentaje de la media.

El otro criterio es el considerar el nivel de truncamiento como aquel valor del gasto, para el cual, cierto porcentaje de los gastos lo exceden; por ejemplo, un nivel de truncamiento del 90 por ciento ($Q_{r_{90\%}}$) significa, que a dicho nivel, el 90 por ciento de los gastos, en el registro histórico, lo igualan o lo exceden (ver figura 2.3).

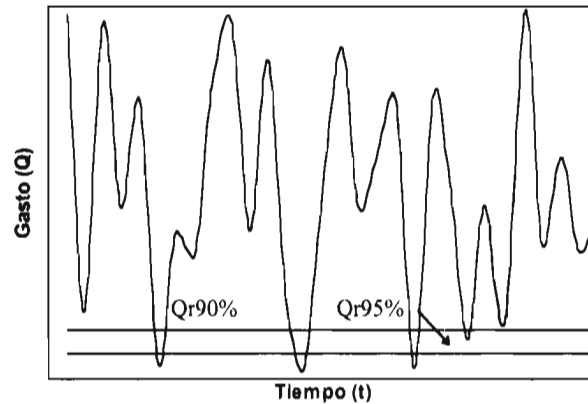


Figura 2.3 Nivel de truncamiento como aquel gasto que es excedido un cierto porcentaje de veces.

Ambos criterios han sido utilizados por diferentes autores, su empleo dependerá básicamente del comportamiento de la corriente que se esté analizando.

En corrientes donde se tengan eventos extremos muy altos, la utilización de porcentajes de la media como nivel de truncamiento no es conveniente debido a que dichos eventos provocan que la media se aleje de los flujos bajos (ver figura 2.4).

También se puede utilizar la mediana como gasto de referencia; sin embargo, tanto porcentajes de la media como la mediana, para los sitios en estudio, se alejaron de los flujos bajos y por ello se decidió trabajar con aquellos gastos que son excedidos un cierto porcentaje de veces (95%, 90% y 85%).

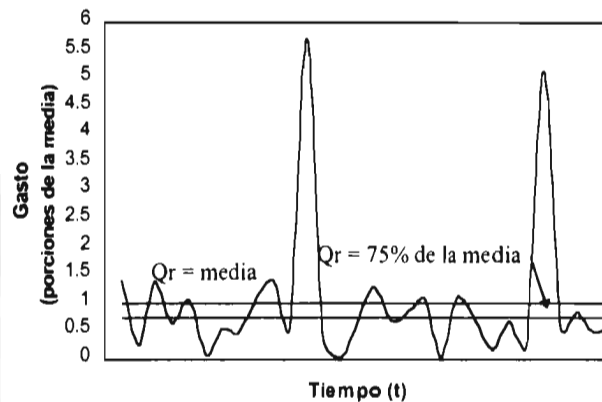


Figura 2.4 Nivel de truncamiento como porcentajes de la media con la presencia de eventos extremos muy altos.

2.5 Componentes de una sequía.

Cada evento de sequía está compuesto por seis parámetros, los cuales son descritos a continuación y también son mostrados en la figura 2.5.

1. Déficit (D).

Representa la escasez en un cierto periodo de tiempo, debido a la presencia de flujos bajos. El déficit o severidad, como también es conocido, es el área comprendida entre el hidrograma y el nivel de truncamiento, y por tanto es un volumen.

Por lo anterior, el déficit queda expresado de la siguiente manera

$$D_v = Q_r T_v - \int_{\tau_b(v)}^{\tau_e(v)} Q_t dt \quad (2.1)$$

$$Q_t < Q_r$$

donde

- D_v v-ésima sequía registrada en el año
- Q_t variable continua; gastos medios diarios
- Q_r nivel de truncamiento
- T_v duración de la v-ésima sequía
- $\tau_b(v)$ tiempo de inicio de la v-ésima sequía
- $\tau_e(v)$ tiempo de terminación de la v-ésima sequía

2. Duración (T).

La duración es el número de días consecutivos para los cuales el gasto Q_t es menor que el gasto de referencia Q_r .

3. Tiempo de inicio de la sequía (τ_b).

El inicio de la sequía está determinado por el momento en que el gasto Q_t , al descender, se cruza con el gasto de referencia.

4. Tiempo de terminación de la sequía (τ_e).

De manera similar que el tiempo de inicio, el tiempo de terminación esta determinado por el momento en que el gasto Q_t , ahora al ascender, se cruza nuevamente con el gasto de referencia.

5. Tiempo de ocurrencia (τ).

Por simplicidad se acepta que el tiempo de ocurrencia de la sequía se exprese de la manera siguiente.

$$\tau = \frac{1}{2}(\tau_b + \tau_e) \quad (2.2)$$

6. Número de orden (v).

Debido a que se tienen una serie de déficits en el periodo de tiempo analizado, a éstos se les asigna un número de orden.

Otros parámetros que se podrían considerar son: el número total de déficits (k) en el intervalo de tiempo analizado, el déficit de mayor magnitud (D_{max}) y el déficit de mayor duración ($T(D_{max})$)

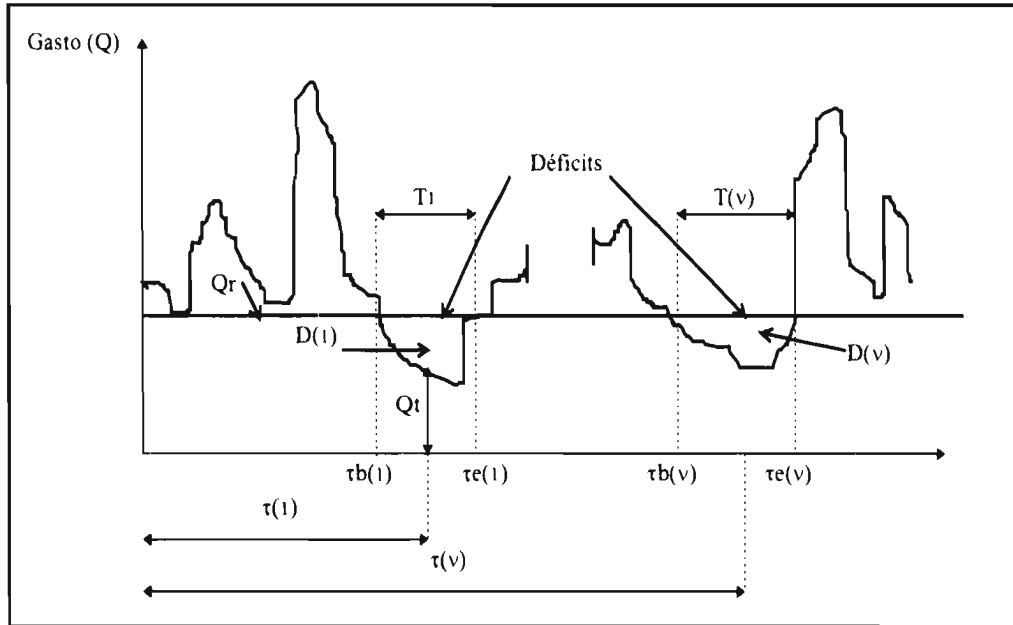


Figura 2.5 Componentes de una sequía.

2.6 Intervalo de tiempo.

Para el análisis de sequías se requiere definir el intervalo de tiempo con el cual se trabaja. Esto es muy importante ya que del intervalo de tiempo se obtendrán parámetros como el déficit máximo y otros. Es práctica común considerar el intervalo de tiempo como un año completo; sin embargo, se pueden utilizar partes particulares del año, como por ejemplo, la temporada de algún cultivo para un análisis específico. Ahora bien, cuando se utiliza un año completo, dicho intervalo de análisis puede empezar en cualquier parte del año, por ejemplo, puede ser conveniente que el inicio del intervalo se presente en aquel mes que se caracterice por tener siempre una notable presencia de flujos bajos. Aspectos como el anterior pueden ayudar a evitar que una sequía sea dividida en dos años diferentes.

Aún con la consideración anterior, si se tiene un déficit dividido en dos años, éste se cuantificará como un sólo déficit y se le asignará a aquel año al cual pertenece el tiempo de

ocurrencia ($\tau = \frac{1}{2}(\tau_b + \tau_e)$).

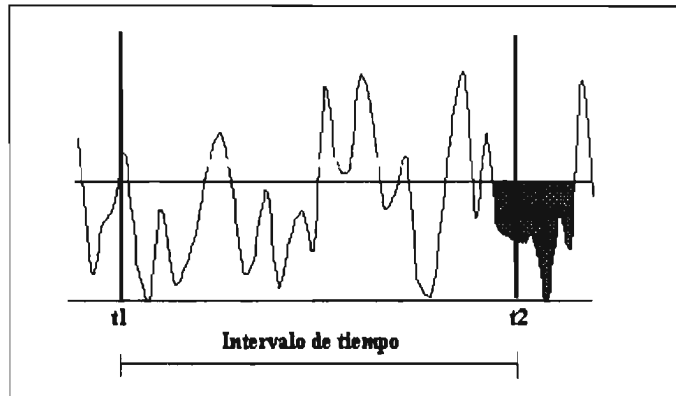


Figura 2.6 Intervalo de tiempo.

2.7 Inter - eventos.

Introducidos en el análisis de las sequías, será necesario, como se verá más adelante, calcular todos los déficits en el intervalo de tiempo seleccionado, estos déficits serán ordenados y se obtendrá el déficit máximo y otros elementos.

En el proceso anterior se encontrará con déficits muy pequeños los cuales en la mayoría de los casos serán insignificantes. Por tanto, a dichos déficits se les puede tratar con las hipótesis simplificadoras siguientes:

1. Todos aquellos déficits observados que satisfagan la condición

$$D < 0.01 \text{ Déficit máx.} \quad (2.3)$$

no son considerados como eventos de sequía, ya que son insignificantes en comparación con las sequías medias y severas con respecto al déficit (tales como D_1 y D_2 en la figura 2.7).

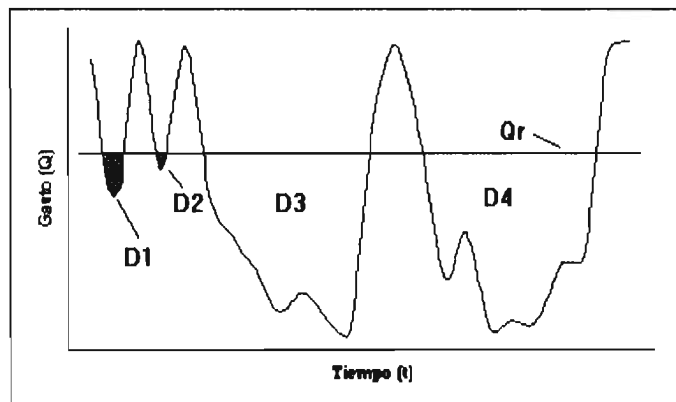


Figura 2.7 Déficits despreciables.

2. En ocasiones, dentro de un déficit considerable, el gasto Qt , puede exceder el nivel de truncamiento Qr , durante un periodo de tiempo muy corto $\Delta T_{v,v+1}$ (figura 2.8), y de esta manera dividir lo que era prácticamente una sequía, en dos partes.

Si el periodo de tiempo $\Delta T_{v,v+1}$, el cual es nombrado tiempo del inter - evento, es relativamente muy pequeño y además $\Delta V_{v,v+1}$, nombrado volumen del inter - evento, también lo es comparado con el déficit D_{v+1} , los déficits D_v y D_{v+1} pueden ser asumidos como uno solo.

$$D'_v = D_v + D_{v+1} \quad (2.4)$$

Con la correspondiente duración

$$T'_v = T_v + T_{v+1} \quad (2.5)$$

El criterio de selección de periodos de tiempo $\Delta T_{v,v+1}$ pequeños puede ser el utilizado por Zelenhasic (1987), quien consideró arbitrariamente, intervalos menores a 6 días para este parámetro.

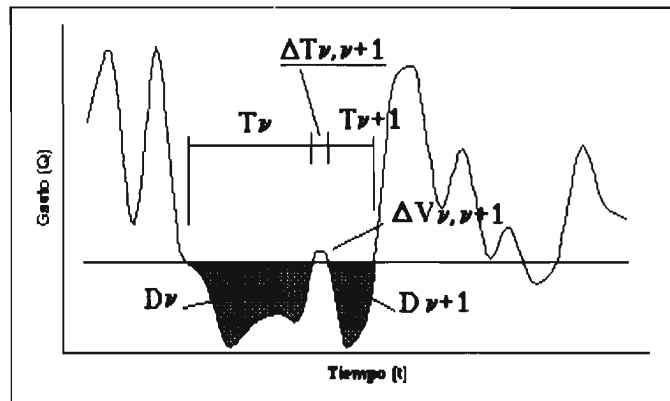


Figura 2.8 Inter - evento.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

La magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. El objetivo del análisis de frecuencias de información hidrológica, es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad (Chow, Maidment, 1994). Para ello, estos modelos requieren que la información hidrológica tenga un comportamiento aleatorio, que sea independiente e idénticamente distribuida.

3.1 Ajuste a una distribución de probabilidad.

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información en la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados (Maidment, 1993). El ajuste de distribuciones requiere entonces de la estimación de parámetros, los cuales pueden ser calculados por diferentes técnicas: momentos, máxima verosimilitud, mínimos cuadrados, momentos de probabilidad pesada, etc..

Las técnicas de estimación de parámetros utilizadas aquí son la de momentos y de máxima verosimilitud por ser las más comúnmente usadas y ofrecer una buena estimación sin la complejidad matemática que otras técnicas requieren.

El método de los momentos fue desarrollado por Pearson en 1902. Él consideró que unos buenos estimadores de los parámetros de una función de probabilidad son aquellos para los cuales los momentos de la función de densidad de probabilidad, alrededor del origen, son iguales a los momentos correspondientes de la información de la muestra.

El método de máxima verosimilitud fue desarrollado por Fisher (1922). Éste se basa en que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la función de verosimilitud.

La aplicación de las técnicas anteriores a las diferentes distribuciones de probabilidad, para la determinación de sus correspondientes parámetros, queda fuera de los propósitos de este trabajo, por tanto, las expresiones que se presentan para calcular dichos parámetros fueron extraídas de diferentes textos.

3.2 Análisis de frecuencias utilizando factor de frecuencias (K_T).

En el análisis de frecuencias de una función de distribución como la Gumbel

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}} \quad (3.1)$$

donde

$F(x)$ función de distribución de probabilidad

x variable aleatoria

μ, α parámetros de la función

se tiene que el evento x , puede despejarse y dejarse en función de la probabilidad $F(x)$ y de los parámetros μ y α , dicho en otras palabras, la función de distribución de probabilidad es invertible. Sin embargo, existen funciones de distribución de probabilidad, como la normal, que no son fácilmente invertibles, requiriéndose un método alternativo para calcular las magnitudes de los eventos.

La ecuación para calcular los eventos en estos casos es

$$X_T = \mu + K_T \sigma \quad (3.2)$$

la cual puede aproximarse a

$$X_T = \bar{X} + K_T S \quad (3.3)$$

\bar{X} = media de la muestra

S = desviación estándar de la muestra

K_T es llamado factor de frecuencia y es una función del periodo de retorno y del tipo de distribución de probabilidad.

La ecuación del factor de frecuencia (3.2) fue propuesta por Chow (1951), y se aplica a muchas distribuciones de probabilidad utilizadas en el análisis de frecuencia hidrológica.

3.3 Prueba de bondad de ajuste.

La bondad de ajuste de una distribución de probabilidad puede probarse comparando los valores teóricos contra los valores muestrales. La prueba de bondad de ajuste es un criterio de selección entre distribuciones en competencia (Kite, 1978).

Las pruebas más comúnmente usadas son la Chi-cuadrada y la Kolmogorov-Smirnov; sin embargo, aquí es utilizada la prueba del error estándar de ajuste, que está dada por

$$EE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n - m} \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

x_i	eventos registrados
y_i	eventos calculados
n	tamaño de registro
m	número de parámetros de la distribución

3.4 Prueba de independencia

Tanto para funciones de distribución continuas como discretas, es necesario garantizar la independencia de los eventos antes de iniciar el análisis de frecuencias. Para probar independencia se utiliza el coeficiente de autocorrelación serial de retraso k (Salas, 1980), el cual es una medida de dependencia lineal

$$rk = \frac{ck}{c_0} \quad (3.5)$$

$$ck = \frac{1}{(N - k)} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X}) \quad (3.6)$$

ck es la función de autocovarianza, c_0 es la varianza y tanto éstos como todas los demás estadísticos deberán ser insesgados para la aplicación de las funciones de distribución de probabilidad. Esto con el fin de eliminar el sesgo de las muestras relativamente pequeñas.

La representación gráfica del coeficiente de autocorrelación serial es llamado correlograma, el cual contiene la relación del retraso k (en las abscisas) contra el coeficiente rk (ordenadas). La muestra se considera independiente cuando no más del 10 % de los valores de rk , rebasan los límites de confianza al 95%.

$$\limite(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{N - k - 1}}{N - k} \quad (3.7)$$

Otro aspecto es, que para las funciones de distribución anteriores, la probabilidad requerida para estimar un evento, es la de no excedencia, y teniendo en cuenta que; periodo de retorno es el tiempo que en promedio un evento es igualado o excedido (Aparicio, 1993).

Se tiene

$$P = F(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (3.8)$$

T, es el periodo de retorno en años, expresado por la relación

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (3.9)$$

donde n, es el tamaño de la muestra, y m, el orden del evento considerando que se ordenan de mayor a menor.

3.5 Funciones de distribución de probabilidad.

Como se mencionó anteriormente, se presentan a continuación las funciones de distribución de probabilidad que se aplicarán al análisis de sequías con sus correspondientes parámetros estimados por momentos y máxima verosimilitud.

3.5.1 Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel)

Para estimar un evento, invirtiendo la función de distribución de probabilidad (3.1) se tiene:

$$X_T = \mu + \alpha \{-\ln[-\ln F(X)]\} \quad (3.10)$$

Estimación de parámetros por momentos.

Los parámetros son μ y α , los cuales pueden estimarse en función a la media y a la desviación estándar.

$$\begin{aligned} \mu &= \bar{x} - 0.45S \\ \alpha &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} S \end{aligned} \quad (3.11)$$

Estimación de parámetros por máxima verosimilitud.

Se tiene un sistema de ecuaciones que debe satisfacer lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 \mu_{j+1} &= \mu_j + \delta\mu_j \\
 \alpha_{j+1} &= \alpha_j + \delta\alpha_j \\
 \delta\mu_j &= (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_j}{N} \\
 \delta\alpha_j &= (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_j}{N} \\
 P &= N - \sum_{i=1}^n e^{-yi} \\
 R &= N - \sum_{i=1}^n yi + \sum_{i=1}^n yie^{-yi}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Donde:

$$yi = \frac{xi - \mu}{\alpha} \tag{3.13}$$

El criterio de convergencia es:

$$\begin{aligned}
 \frac{P}{\alpha} &\approx 0 \\
 \frac{R}{\alpha} &\approx 0
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

3.5.2 Distribución normal.

$$F(X) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{3.15}$$

Estimación de parámetros por momentos y máxima verosimilitud

Como es una función que difícilmente se puede invertir, se utiliza el factor de frecuencia (ecuación 3.3). K_T se evalúa de la manera siguiente:

$$K_T = \omega - \frac{2.515517 + 0.802853\omega + 0.010328\omega^2}{1 + 1.4327788\omega + 0.189269\omega^{22} + 0.001308\omega^3} \tag{3.16}$$

Para calcular ω se tiene:

Si $P < 0.5$

$$\omega = \left[\ln \left(\frac{1}{P^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

$$K_T = -K_T$$

Si $P > 0.5$

$$\omega = \left[\ln \left(\frac{1}{(1-P)^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

Para ambos casos

$$P = 1 - \frac{1}{T}$$

3.5.3 Distribución log-normal de dos parámetros.

$$F(X) = \frac{1}{2\sqrt{\pi} X \sigma_Y} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(X) - \mu_Y}{\sigma_Y} \right)^2} \quad (3.19)$$

Estimación de parámetros por momentos y máxima verosimilitud

De igual manera que la normal se utiliza el factor de frecuencia, sólo que con el cambio siguiente.

$$X_T = \exp\{\mu_Y + K_T \sigma_Y\} \quad (3.20)$$

Donde:

$$\mu_Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln X_i \quad (3.21)$$

$$\sigma_Y = \left[\frac{\sum (\ln X_i - \mu_Y)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

Para evaluar K_T se procede de igual manera que para la distribución normal, se utilizan las ecuaciones 3.16 y 3.17 o 3.18, según sea el caso.

3.5.4 Distribución gamma de dos parámetros.

$$F(X) = \frac{X^{\beta-1} e^{-\frac{X}{\alpha}}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} \quad (3.23)$$

Otra vez la función no es invertible y por ello se utiliza la aproximación siguiente.

$$X \approx \alpha \beta \left\{ 1 - \frac{1}{9\beta} + K_T \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right\}^3 \quad (3.24)$$

Estimación de parámetros por momentos

$$\begin{aligned} \beta &= \left(\frac{\bar{X}}{S} \right) \\ \alpha &= \frac{S^2}{\bar{X}} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Estimación de parámetros por máxima verosimilitud

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1 + \sqrt{1 + 4/3A}}{4A} \\ A &= \ln \bar{X} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \ln X_i \\ \alpha &= \frac{\bar{X}}{\beta} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Nuevamente K_T es evaluado con las expresiones antes mencionadas.

3.5.5 Distribución exponencial de dos parámetros.

$$F(X) = 1 - e^{-\frac{X - K_T}{\beta}} \quad (3.27)$$

Para estimar un evento invirtiendo la función se tiene:

$$X = -LN[1 - F(X)]\beta + X_0 \quad (3.28)$$

Estimación de parámetros por momentos.

β y X_0 son los parámetros de la función y se estiman de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \beta &= S \\ X_0 &= \bar{X} - S \end{aligned} \quad (3.29)$$

Estimación de parámetros por máxima verosimilitud.

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_w)}{n-1} \\ X_0 &= X_w - \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (i - X_w)}{n-1} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Donde x_w es valor más chico de la muestra.

Todas las distribuciones anteriores son aplicables a eventos extremos máximos. En el caso de la modelación del número de sequías en el intervalo de tiempo, como se verá más adelante, se utiliza la función de distribución de probabilidad discreta de Poisson.

La forma en que se realizaron los ajustes de los datos a las funciones de distribución vistas con anterioridad, fue con hojas de cálculo realizadas en el programa excel. El anexo 1 muestra, a manera de ilustración, la hoja de cálculo utilizada para cada función.

CAPÍTULO 4

MODELACIÓN PUNTUAL

La modelación puntual es aquella que encuentra modelos matemáticos que logran reproducir y generar, con cierta confiabilidad, un evento para un sitio en particular. Para ello se requiere de eventos históricos que ayuden a establecer, a partir de sus características estadísticas, los parámetros de dicho modelo.

En este caso, los eventos a modelar son diferentes componentes de las sequías, por tanto, la secuencia a seguir será calcular estas componentes y luego ajustarlas a funciones de distribución de probabilidad aplicables a eventos hidrológicos.

4.1 Modelación de sequías.

Las componentes que se modelan son las de mayor importancia. Indudablemente los déficits máximos (severidades máximas) y duraciones máximas son de principal interés, luego en orden de importancia les sigue el tiempo de ocurrencia y finalmente el número de sequías en un año.

Las tres primeras componentes, de acuerdo a su naturaleza, se analizan mediante funciones de distribución de probabilidad para máximos, mientras que para el número de sequías en un año, k , se utiliza la función de distribución discreta de Poisson, ya que se considera que este parámetro sigue el comportamiento de una variable aleatoria de dicha distribución.

4.2 Estimación de componentes.

El intervalo de tiempo considerado es de un año calendario completo, es decir, su inicio es el 1 de Enero y su terminación el 31 de Diciembre. Se utilizan registros de gastos medios diarios. El gasto de referencia es aceptado como aquel gasto para el cual, cierto porcentaje de los gastos lo exceden.

El registro hidrológico es representado gráficamente por medio del hidrograma de los gastos medios diarios, a su vez se establece el gasto de referencia o nivel de truncamiento, el cual determina todas las componentes de sequía para cada año de estudio.

Las componentes que se determinan en función del nivel de truncamiento son:

- Número total de déficits que se presentan en el año calendario. Para ello se debe tener en cuenta que déficits muy pequeños serán omitidos de acuerdo al criterio visto en el capítulo anterior.
- Magnitudes de los déficits (severidades). Éstos son cuantificados en unidades de volumen, su magnitud es igual al área comprendida entre el hidrograma y el nivel de truncamiento. La evaluación de los déficits se lleva a cabo mediante la discretización de rectángulos de un ancho igual a un intervalo de tiempo de un día.
- Duración de los déficits.
- Tiempo de inicio y de terminación de los déficits. Con estas dos componentes se determina el tiempo de ocurrencia.

Estas componentes se determinan para cada año de análisis y para cada sitio en estudio, obteniéndose en resumen: los déficits máximos, duraciones máximas, tiempo de ocurrencia de los déficits máximos y los correspondientes tiempo de inicio y de terminación, y por último, el número de sequías en el intervalo de tiempo.

A continuación se presenta el cálculo de las diferentes componentes para la estación El Palmito, para 17 años de registro (1929-1945).

Cabe mencionar que esta estación sólo cuenta con registros hasta 1945, ya que después de este año, se puso en marcha la presa Lázaro Cárdenas, y por tanto, la estación se cambió de sitio hacia aguas abajo de la cortina; por lo cual, los registros ya están afectados por la regulación de la presa.

El primer paso es establecer el gasto de referencia, se tiene una muestra de 17 años, y por tanto, un registro de 17x365 días, a este único registro se calculan los diferentes gastos que cumplan con la condición del nivel de truncamiento.

De este cálculo se tiene :

$$Q_{r_{95\%}} = 0.733 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{r_{90\%}} = 1.051 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{r_{85\%}} = 1.344 \text{ m}^3/\text{s}$$

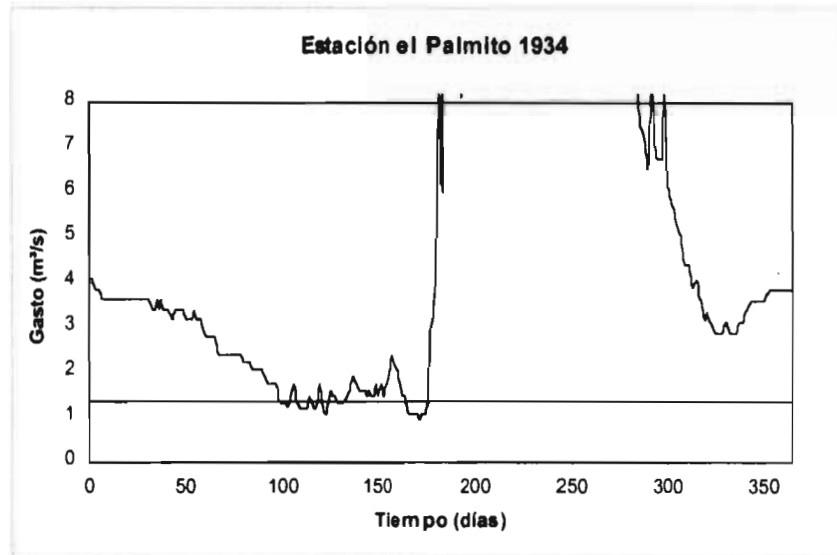
Además de esto, también se calculó, sólo para comparación, el gasto de referencia como ciertos porcentajes de la media y la mediana. De lo anterior se puede observar que en nuestro caso, el criterio elegido para el nivel de truncamiento es el más apropiado, ya que los otros se alejan de los flujos mínimos.

$$Q_{r_{100\text{media}}} = 41.418 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{r_{75\text{media}}} = 36.064 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{r_{\text{mediana}}} = 6.439 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como ilustración del método se presenta el cálculo completo del año 1934 para un gasto de referencia $Q_{r85\%}$, y al final de esto, se presenta el resumen de datos para la estación El Palmito para los diferentes niveles de truncamiento (tablas 4.1, 4.2 y 4.3).



sequía				
1	τ_b	Inicio	8-abr	98 avo día
	τ_e	fin	14-abr	104 avo día
	T	duración		7 (días)
	τ	tiempo de ocurrencia		101 avo día
	D	Severidad		12.2688 miles m^3
		Intereventos		0
		$(Q_r - Q_t)_{Total}$		0.142
2	τ_b	Inicio	17-abr	107 avo día
	τ_e	fin	28-abr	118 avo día
	T	duración		12 (días)
	τ	tiempo de ocurrencia		113 avo día
	D	Severidad		96.1632 miles m^3
		Intereventos		1 -1
		$(Q_r - Q_t)_{Total}$		1.113

sequía				
3	τ_b	Inicio	1-may	121 avo día
	τ_e	fin	3-may	123 avo día
	T	duración		3 (días)
	τ	tiempo de ocurrencia		122 avo día
	D	Severidad		53.7408 miles m ³
		intereventos		0
		(Qr-Qt)Total		0.622
4	τ_b	Inicio	15-jun	166 avo día
	τ_e	fin	25-jun	176 avo día
	T	duración		11 (días)
	τ	tiempo de ocurrencia		171 avo día
	D	Severidad		219.2832 miles m ³
		intereventos		0
		(Qr-Qt)Total		2.538

Se tuvo un déficit que no se consideró por ser insignificante.

Como se puede ver, para este año, la sequía número cuatro es la máxima en cuanto a déficit y duración, por tanto es la que se registra en el resumen de datos.

Tabla 4.1

ESTACIÓN EL PALMITO		Dmax	T(Dmax)	τ (Dmax)	τ_b (Dmax)	τ_e (Dmax)
Qr(95%)=0.733m ³ /s						
año	k	miles m ³	días	avo. día	avo. día	avo. día
1929	0	0.0000	0	0	0	0
1930	2	543.1960	27	133	120	146
1931	1	231.9840	22	131	120	141
1932	1	1866.4120	67	147	114	180
1933	1	0.2592	1	134	134	134
1934	0	0.0000	0	0	0	0
1935	1	656.2944	34	143	126	159
1936	0	0.0000	0	0	0	0
1937	3	38.4480	17	168	160	176
1938	1	754.5310	50	148	123	172
1939	5	23.4140	1	171	171	171
1940	0	0.0000	0	0	0	0
1941	3	251.2510	24	133	121	144
1942	0	0.0000	0	0	0	0
1943	4	404.4380	22	147	136	157
1944	0	0.0000	0	0	0	0
1945	2	559.0080	49	158	134	182

Tabla 4.2

ESTACIÓN EL PALMITO		Dmax miles m ³	T(Dmax) días	τ(Dmax) avo. día	τb(Dmax) avo. día	τe(Dmax) avo. día
año	k					
1929	3	161.7408	14	153	146	159
1930	2	1328.9180	38	128	109	146
1931	1	686.9370	25	129	117	141
1932	1	3755.5480	74	144	107	180
1933	3	64.3680	5	148	146	150
1934	1	7.6030	1	172	172	172
1935	1	1724.0250	53	134	108	160
1936	2	250.3780	17	167	159	175
1937	2	863.3080	37	160	142	178
1938	1	2435.7880	77	134	96	172
1939	1	870.5660	50	147	122	171
1940	2	99.7920	8	162	158	165
1941	2	993.6000	43	123	102	144
1942	2	49.2480	3	144	143	145
1943	1	1657.0650	59	130	101	159
1944	3	71.7120	10	152	147	156
1945	1	2316.5560	87	139	96	182

Tabla 4.3

ESTACIÓN EL PALMITO		Dmax miles m ³	T(Dmax) días	τ(Dmax) avo. día	τb(Dmax) avo. día	τe(Dmax) avo. día
año	k					
1929	1	1414.5408	59	154	125	183
1930	3	2243.7216	40	127	107	146
1931	1	1616.1984	32	127	111	142
1932	1	5710.9536	80	143	103	182
1933	2	538.1850	24	139	127	150
1934	4	219.2832	11	171	166	176
1935	1	3253.7376	63	129	98	160
1936	2	1106.0841	47	163	140	186
1937	1	2370.9880	75	149	112	186
1938	1	4503.2540	88	129	85	172
1939	2	2153.6928	59	144	115	173
1940	2	470.7936	24	119	107	130
1941	2	2031.8688	48	121	97	144
1942	4	353.3760	18	143	134	151
1943	1	3190.0600	65	127	95	159
1944	2	431.6544	22	146	135	156
1945	1	4363.2864	87	139	96	182

De las tablas de resumen se observa que para un gasto de referencia del 95%, existen años sin la presencia de sequía. Lo anterior también sucede con la mayoría de las estaciones.

4.3 Modelación de los déficits máximos.

Del resumen de datos obtenido para la estación El Palmito, se lleva a cabo la prueba de independencia de la muestra mediante el uso del correlograma (fig. 4.1). De éste se concluye que los déficits máximos tienen un comportamiento aleatorio, ya que los puntos que rebasan a los límites de confianza son menores a un 10 %.

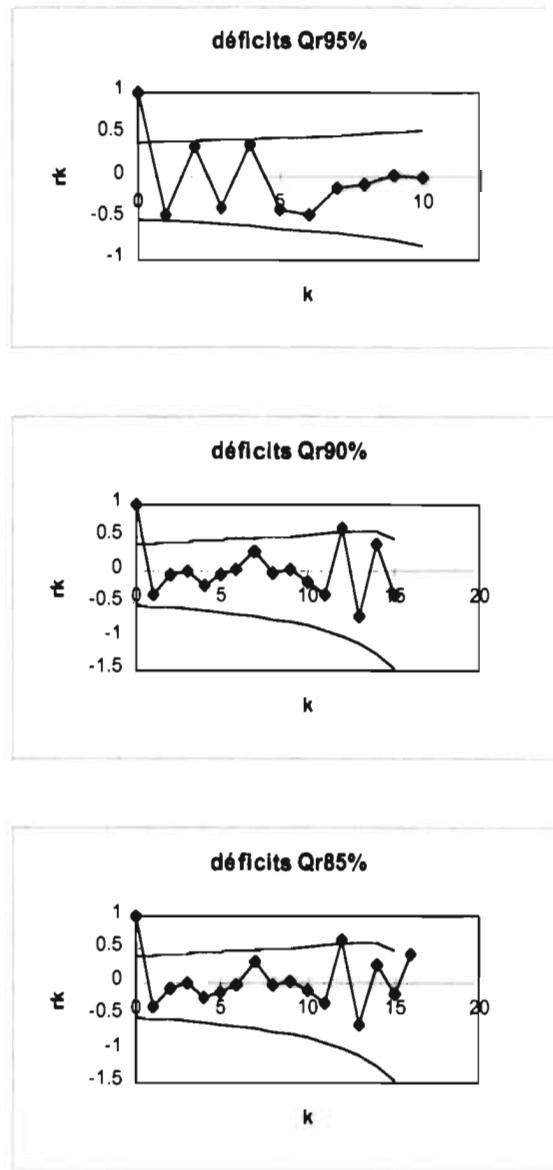


Figura 4.1 Correlogramas de los déficits máximos.

A continuación se presenta el ajuste del evento déficit máximo, a las funciones de distribución de probabilidad vistas con anterioridad. Las distribuciones que mejor se ajustaron, de acuerdo al criterio del error estándar de ajuste, son: la gamma por máxima verosimilitud para Qr90% y Qr95%, y la exponencial, también por máxima verosimilitud, para Qr85%, como se puede ver en la tabla 4.4.

4.4 Modelación de las duraciones máximas.

Cabe mencionar, que en todos los años, la duración máxima correspondió al déficit máximo. Por tanto, es equivalente, en este caso, las duraciones de los déficits máximos y las duraciones máximas. La figura 4.2 muestra también la independencia dichas duraciones.

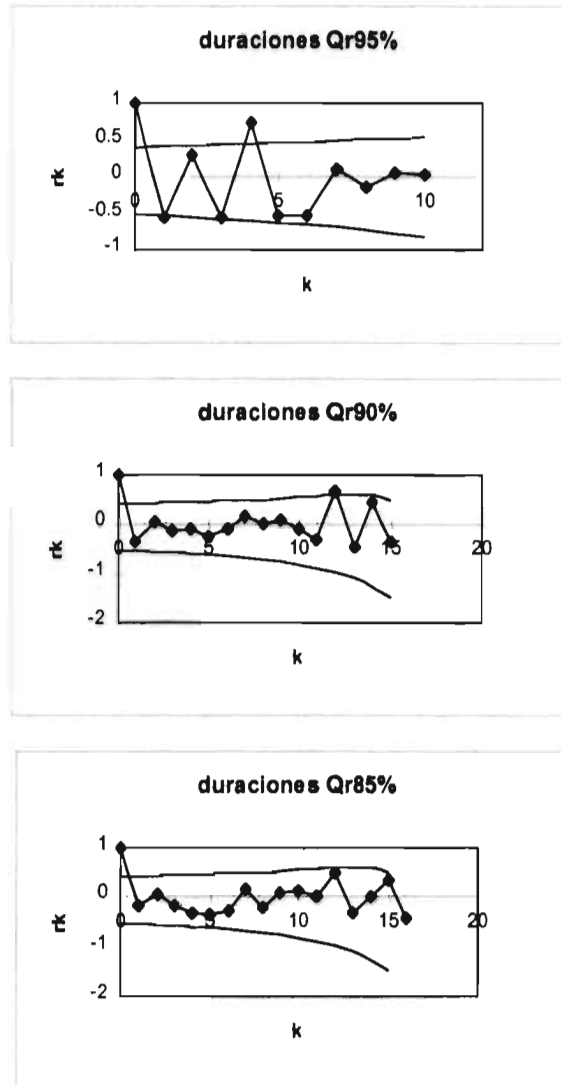


Figura 4.2 Correlogramas de las duraciones máximas.

Las funciones de distribución Gumbel por máxima verosimilitud (Qr95%), Gumbel por momentos (Qr90%) y normal (Qr85%) fueron las que mejor ajuste proporcionaron. A continuación se presenta esto (ver tabla 4.5).

4.5 Modelación del tiempo de ocurrencia de los déficits máximos

Nuevamente, antes de iniciar el análisis de frecuencias será necesario asegurar que se está trabajando con muestras independientes, esto es, que la ocurrencia de un evento no tiene nada que ver con la ocurrencia de otro. Por ello se presenta también el correlograma (fig. 4.3).

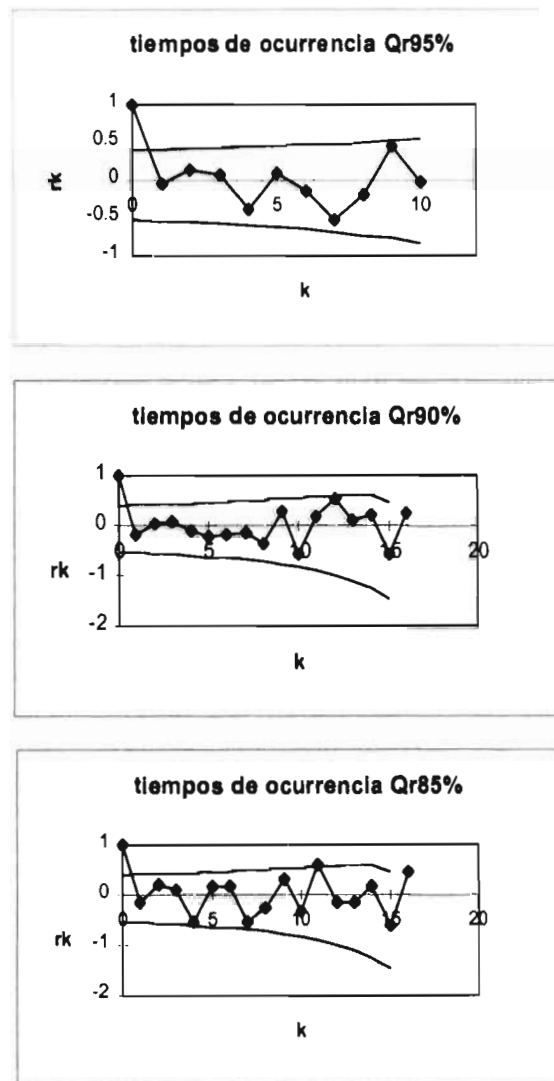


Figura 4.3 Correlogramas de los tiempos de ocurrencia de los déficits máximos.

Tabla 4.4 Ajustes de los déficits máximos anuales, para diferentes niveles de truncamiento en la estación El Palmito

Nivel de truncamiento 85%

déficit histórico	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
5710.9538	18.0000	0.94444	5026.540	5204.521	5135.902	4719.572	6730.675	4860.776	5925.537	5337.818
4503.2540	9.0000	0.88889	4106.495	4072.038	4112.558	4110.513	4703.148	3982.346	4628.678	4225.143
4363.2864	6.0000	0.83333	3548.898	3409.579	3500.855	3696.479	3688.084	3451.501	3711.568	3564.629
3253.7378	4.5000	0.77778	3140.065	2939.556	3067.338	3365.004	3032.797	3081.583	3131.819	3088.424
3190.0600	3.6000	0.72222	2810.887	2574.978	2705.536	3078.454	2562.146	2747.617	2682.131	2712.637
2370.9880	3.0000	0.66667	2530.725	2277.096	2411.250	2818.997	2199.322	2480.436	2314.709	2399.841
2243.7216	2.5714	0.61111	2283.066	2026.241	2156.112	2576.367	1906.668	2244.235	2004.058	2129.992
2153.6928	2.2500	0.55556	2057.693	1807.074	1929.031	2343.744	1662.718	2029.290	1734.960	1891.027
2031.8688	2.0000	0.50000	1847.656	1614.637	1722.710	2115.974	1454.128	1828.971	1497.599	1675.051
1616.1984	1.8000	0.44444	1647.732	1442.496	1531.651	1888.218	1272.025	1638.297	1285.272	1476.181
1414.5408	1.6364	0.38889	1463.649	1286.776	1351.665	1655.595	1110.164	1453.098	1093.199	1289.994
1106.0841	1.5000	0.33333	1260.953	1144.614	1179.571	1412.966	963.903	1269.412	917.850	1113.209
538.1850	1.3846	0.27778	1065.358	1013.838	1012.413	1153.508	829.562	1082.867	758.544	942.883
470.7936	1.2857	0.22222	860.783	892.769	847.043	866.958	703.945	887.768	607.199	776.024
431.6544	1.2000	0.16667	637.829	780.036	780.036	679.454	535.483	583.835	675.119	468.162
353.3760	1.1250	0.11111	377.960	674.592	503.210	121.449	449.590	427.273	338.101	436.538
219.2832	1.0588	0.05556	26.672	575.641	303.760	-487.610	314.157	94.146	215.928	247.178
		error est.	369.931	445.985	376.810	468.132	455.440	424.770	324.730	331.770

Nivel de truncamiento 90%

déficit histórico	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
3755.548	18.0000	0.94444	2923.954	3040.391	3011.537	2723.133	6103.813	2623.060	3052.916	3301.381
2435.788	9.0000	0.88889	2321.396	2299.508	2263.601	2324.879	3249.507	2102.475	2307.440	2395.521
2316.556	6.0000	0.83333	1957.263	1866.119	1833.279	2053.813	2116.952	1787.880	1871.385	1885.469
1667.065	4.5000	0.77778	1689.800	1558.625	1531.002	1838.958	1502.154	1556.802	1561.965	1533.714
1328.918	3.6000	0.72222	1474.435	1320.114	1298.138	1649.494	1116.636	1370.738	1321.975	1287.404
993.600	3.0000	0.66667	1291.163	1125.236	1108.806	1479.754	853.663	1212.396	1125.889	1054.594
870.566	2.5714	0.61111	1129.141	960.469	949.298	1321.022	664.088	1072.416	960.101	878.477
863.308	2.2500	0.55556	981.700	817.742	811.479	1168.838	521.991	945.033	816.489	729.159
724.025	2.0000	0.50000	844.291	691.847	690.135	1019.828	412.364	826.318	689.614	600.364
686.937	1.8000	0.44444	713.499	579.231	581.533	870.827	325.761	713.318	578.500	487.705
260.378	1.6364	0.38889	588.462	477.357	483.038	718.643	256.057	603.564	473.994	388.179
161.741	1.5000	0.33333	460.463	384.353	392.864	559.912	199.194	494.706	380.414	299.861
99.792	1.3846	0.27778	332.502	298.798	309.677	390.171	152.283	364.163	294.328	221.459
71.712	1.2857	0.22222	198.667	219.586	232.471	202.707	113.200	268.525	214.626	152.255
64.368	1.2000	0.16667	52.808	145.842	160.576	-14.148	80.325	142.509	140.424	92.229
49.248	1.1250	0.11111	-117.201	78.869	93.837	-285.014	52.329	-4.372	71.014	42.572
7.603	1.0588	0.05556	-345.710	12.069	33.802	-683.468	27.860	-201.794	7.785	7.785
		error est.	297.388	274.487	290.857	409.233	790.143	384.578	270.410	239.346

Nivel de truncamiento 95%

déficit histórico	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
1666.4120	12.0000	0.91667	1252.618	1269.055	1247.654	1212.844	4185.366	1060.778	1275.394	1371.820
754.5310	6.0000	0.83333	947.872	902.817	878.680	999.845	1563.061	823.544	906.197	905.901
656.2944	4.0000	0.75000	759.980	688.582	667.852	849.689	780.587	677.276	690.231	650.461
559.0080	3.0000	0.66667	618.602	536.580	520.612	724.770	438.079	567.217	537.001	478.752
543.1960	2.4000	0.68333	501.325	418.677	407.819	611.965	260.022	475.921	418.146	352.352
404.4380	2.0000	0.50000	397.701	322.344	316.663	504.385	158.110	395.254	321.034	254.641
251.2510	1.7143	0.41667	301.500	240.896	240.215	396.809	96.141	320.364	238.928	176.903
231.9840	1.5000	0.33333	207.965	170.342	174.441	284.004	57.065	247.551	167.804	114.349
38.4480	1.3333	0.25000	112.147	108.109	117.010	159.086	32.026	172.959	105.068	64.590
23.4140	1.2000	0.16667	6.451	62.440	66.629	8.929	15.994	90.679	48.949	27.020
0.2592	1.0909	0.08333	-128.278	2.081	23.557	-204.069	5.973	-14.203	-1.817	3.840
		error est.	224.985	214.014	220.590	265.725	833.800	276.240	212.367	196.090

* Estimados tanto por momentos como por máxima verosimilitud

** Estimados por máxima verosimilitud

Tabla 4.5 Ajustes de las duraciones asociadas a los déficits máximos anuales, para la estación El Palmito

Nivel de truncamiento 85%

duración histórica	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
88	18.0000	0.94444	94.084	96.808	94.410	89.385	110.102	88.488	126.917	94.410
87	9.0000	0.88889	79.984	79.472	80.790	80.061	88.105	62.069	98.541	80.790
80	6.0000	0.83333	71.464	69.332	72.322	73.723	75.718	58.189	81.942	72.322
75	4.5000	0.77778	65.206	62.137	65.986	68.649	67.068	55.340	70.165	65.986
65	3.6000	0.72222	60.167	56.556	60.816	64.263	60.391	53.045	61.030	60.816
63	3.0000	0.66667	55.878	51.996	56.375	60.291	54.921	51.093	53.566	56.375
59	2.5714	0.61111	52.087	48.140	52.422	56.577	50.255	49.367	47.256	52.422
59	2.2500	0.55556	48.637	44.801	48.810	53.016	46.154	47.796	41.789	48.810
48	2.0000	0.50000	45.422	41.855	45.438	49.529	42.463	46.332	36.968	45.438
47	1.8000	0.44444	42.362	39.220	42.225	48.043	39.067	44.939	32.654	42.225
40	1.6364	0.38889	39.389	36.836	39.103	42.482	35.879	43.585	28.753	39.103
32	1.5000	0.33333	36.441	34.660	38.016	38.768	32.831	42.243	25.191	36.016
24	1.3846	0.27778	33.447	32.658	32.699	34.796	29.857	40.880	21.914	32.699
24	1.2857	0.22222	30.315	30.805	29.671	30.410	26.885	39.454	16.880	29.671
22	1.2000	0.16667	26.902	29.079	26.209	25.335	23.813	37.900	16.056	26.209
18	1.1250	0.11111	22.924	27.465	22.278	18.998	20.465	38.089	13.414	22.278
11	1.0588	0.05556	17.577	25.949	17.240	9.674	16.377	33.654	10.932	17.240
error est.			7.086	10.084	6.640	5.200	8.530	16.550	13.665	6.300

Nivel de truncamiento 90%

duración histórica	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
87	18.0000	0.94444	85.121	88.165	87.055	79.873	151.617	84.986	104.352	97.665
77	9.0000	0.88889	69.372	68.800	69.411	69.458	95.621	69.182	79.052	75.112
74	6.0000	0.83333	59.855	57.473	58.892	62.378	69.898	59.631	64.252	61.955
59	4.5000	0.77778	52.864	49.436	51.280	56.710	54.389	52.616	53.752	52.604
53	3.6000	0.72222	47.235	43.201	45.255	51.811	43.785	46.967	45.607	45.321
50	3.0000	0.66667	42.445	38.108	40.223	47.374	35.979	42.160	38.952	39.337
43	2.5714	0.61111	38.210	33.801	35.869	43.225	29.943	37.911	33.326	34.240
38	2.2500	0.55556	34.356	30.071	32.001	39.248	25.109	34.044	28.452	29.786
37	2.0000	0.50000	30.765	26.780	28.493	35.353	21.133	30.440	24.153	25.816
25	1.8000	0.44444	27.346	23.837	25.251	31.458	17.787	27.009	20.307	22.216
17	1.6364	0.38889	24.026	21.174	22.204	27.481	14.916	23.677	16.828	18.901
14	1.5000	0.33333	20.733	16.743	19.298	23.332	12.413	20.372	13.652	15.614
10	1.3846	0.27778	17.388	16.507	16.484	18.895	10.200	17.016	10.731	12.906
8	1.2857	0.22222	13.890	14.437	13.710	13.996	8.212	13.506	8.026	10.135
5	1.2000	0.16667	10.078	12.509	10.911	8.328	6.390	9.680	5.508	7.461
3	1.1250	0.11111	5.634	10.706	7.987	1.248	4.671	5.221	3.152	4.842
1	1.0588	0.05556	-0.339	9.012	4.713	-9.167	2.946	-0.772	0.939	2.227
error est.			6.777	9.047	7.588	6.985	19.144	6.800	8.072	7.229

Nivel de truncamiento 95%

duración histórica	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
67	12.0000	0.91667	58.150	58.783	58.801	56.713	114.324	59.776	73.538	68.706
50	8.0000	0.83333	46.405	44.668	46.129	48.244	84.212	47.493	52.536	50.209
49	4.0000	0.75000	39.163	36.412	38.386	42.274	42.757	39.920	40.250	39.393
34	3.0000	0.66667	33.715	30.554	32.648	37.308	30.485	34.221	31.533	31.678
27	2.4000	0.58333	29.195	26.010	27.984	32.823	22.460	29.494	24.772	25.641
24	2.0000	0.50000	25.201	22.297	23.972	28.545	16.783	25.317	19.248	20.649
22	1.7143	0.41667	21.493	19.158	20.363	24.268	12.641	21.440	14.677	16.351
22	1.5000	0.33333	17.889	16.439	16.988	19.783	9.240	17.670	10.531	12.533
17	1.3333	0.25000	14.195	14.040	13.711	14.817	6.588	13.808	6.962	9.056
1	1.2000	0.16667	10.122	11.895	10.365	8.847	4.387	9.548	3.770	5.810
1	1.0909	0.08333	4.930	9.954	6.625	0.378	2.484	4.117	0.882	2.693
error est.			5.944	7.577	6.290	5.739	18.070	5.380	7.105	6.000

* Estimados tanto por momentos como por máxima verosimilitud

** Estimados por máxima verosimilitud

Tabla 4.6 Ajustes del tiempo de ocurrencia asociado a los déficits máximos, en la estación El Palmito

Nivel de truncamiento 85%

T ocurrencia histórico	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
171	18.0000	0.94444	165.320	166.904	163.333	162.587	162.513	166.651	180.409	162.277
163	9.0000	0.88889	157.121	156.823	157.381	157.166	156.605	157.341	165.377	156.603
154	6.0000	0.83333	152.167	150.927	153.419	153.480	152.711	152.319	156.583	152.622
149	4.5000	0.77778	148.528	146.743	150.296	150.630	149.664	148.631	150.344	149.839
146	3.6000	0.72222	145.597	143.497	147.630	147.979	147.078	145.661	145.505	147.292
144	3.0000	0.66667	143.104	140.846	145.243	145.670	144.776	143.133	141.550	145.011
143	2.5714	0.61111	140.899	138.604	143.036	143.510	142.656	140.899	138.207	142.899
143	2.2500	0.55556	138.893	136.662	140.939	141.439	140.652	138.866	135.311	140.894
139	2.0000	0.50000	137.023	134.949	138.907	139.412	138.717	136.971	132.757	138.949
139	1.8000	0.44444	135.244	133.417	136.894	137.384	136.809	135.167	130.472	137.022
129	1.6364	0.38889	133.516	132.031	134.858	135.314	134.888	133.415	128.405	135.072
129	1.5000	0.33333	131.801	130.785	132.757	133.154	132.912	131.677	126.516	133.058
127	1.3846	0.27778	130.080	129.601	130.534	130.844	130.832	129.913	124.782	130.927
127	1.2857	0.22222	128.239	128.523	128.108	128.294	128.572	128.067	123.175	128.600
127	1.2000	0.16667	126.254	127.520	125.339	125.343	126.006	126.055	121.678	126.942
121	1.1250	0.11111	123.941	126.581	121.938	121.658	122.873	123.711	120.279	122.675
119	1.0588	0.05556	120.832	125.700	117.046	116.236	118.406	120.560	118.964	117.971
error est.			3.290	4.400	3.410	3.887	3.640	3.180	4.882	3.710

Nivel de truncamiento 90%

T ocurrencia histórico	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
172	18.0000	0.94444	170.978	172.563	168.962	168.244	168.440	172.744	189.364	168.110
167	9.0000	0.88889	162.776	162.478	163.029	162.820	162.475	164.022	173.119	162.399
162	6.0000	0.83333	157.819	156.578	159.076	159.133	158.541	158.752	163.616	158.592
160	4.5000	0.77778	164.178	162.393	155.957	156.181	155.460	154.880	156.873	155.587
163	3.6000	0.72222	151.247	149.146	153.294	153.630	152.845	151.763	151.643	153.021
152	3.0000	0.66667	148.752	146.494	150.910	151.319	150.515	149.110	147.370	150.721
148	2.5714	0.61111	146.547	144.251	148.702	149.159	148.369	146.765	143.757	148.591
147	2.2500	0.55556	144.540	142.308	146.606	147.087	146.340	144.631	140.628	146.569
144	2.0000	0.50000	142.669	140.594	144.573	145.059	144.379	142.642	137.867	144.606
144	1.8000	0.44444	140.889	139.061	142.559	143.031	142.446	140.749	135.398	142.661
139	1.6364	0.38889	139.160	137.675	140.521	140.959	140.497	138.910	133.164	140.692
134	1.5000	0.33333	137.445	136.409	138.416	138.798	138.494	137.086	131.124	138.659
134	1.3846	0.27778	135.703	135.244	136.189	136.488	136.383	135.234	129.248	136.506
130	1.2857	0.22222	133.881	134.166	133.757	133.936	134.089	133.297	127.512	134.164
129	1.2000	0.16667	131.896	133.162	130.980	130.984	131.483	131.185	125.894	131.467
128	1.1250	0.11111	129.582	132.223	127.565	127.297	128.299	128.725	124.382	128.182
123	1.0588	0.05556	126.471	131.341	122.651	121.874	123.755	125.417	122.961	123.402
error est.			3.228	4.875	2.671	2.743	2.860	2.692	6.625	2.899

Nivel de truncamiento 95%

T ocurrencia histórico	periodo de retorno	probabilidad 1-1/T	Función de distribución de probabilidad							
			gumbel	exponencial	gamma	normal*	log normal*	gumbel**	exponencial**	gamma**
171	12.0000	0.91667	167.044	167.481	166.435	166.054	165.292	165.744	172.177	165.235
168	6.0000	0.83333	158.948	157.751	160.164	160.216	159.252	158.059	160.255	159.361
158	4.0000	0.75000	153.958	152.059	155.838	156.100	155.127	153.320	153.281	155.305
148	3.0000	0.66667	150.200	148.021	152.300	152.677	151.777	149.755	148.332	151.984
147	2.4000	0.58333	147.084	144.888	149.151	149.585	148.814	146.797	144.494	149.026
147	2.0000	0.50000	144.331	142.329	146.189	146.636	146.043	144.184	141.358	146.241
143	1.7143	0.41667	141.775	140.165	143.266	143.688	143.322	141.757	138.707	143.490
134	1.5000	0.33333	139.290	138.291	140.243	140.596	140.525	139.398	135.410	140.644
133	1.3333	0.25000	136.744	136.637	136.946	137.172	137.490	136.982	134.384	137.535
133	1.2000	0.16667	133.936	135.158	133.051	133.057	133.929	134.316	132.572	133.860
131	1.0909	0.08333	130.367	133.820	127.655	127.219	129.035	130.919	130.933	128.760
error est.			4.335	5.089	4.430	4.803	4.750	4.800	4.057	4.790

* Estimados tanto por momentos como por máxima verosimilitud

** Estimados por máxima verosimilitud

El mejor ajuste fue el de la distribución exponencial por máxima verosimilitud para Qr95%, gamma por momentos para Qr90% y Gumbel por momentos para Qr85% (ver tabla 4.6).

4.6 Modelación del número de sequías en un año.

A diferencia de los demás eventos, aquí se tiene que el número de sequías sigue el comportamiento de una variable de la distribución de Poisson, donde se considera que el evento ocurre con un velocidad constante. El parámetro de esta distribución discreta es considerado como el número promedio de ocurrencias del evento por unidad de tiempo (Canavos, 1994).

La función de distribución de probabilidad de Poisson esta dada por:

$$P(x, \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad (4.1)$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, \lambda > 0$$

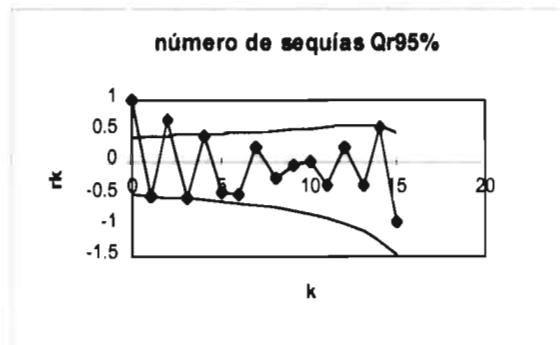
En nuestro caso, el parámetro es obtenido como la media del número de sequías ocurridas en cada año, por tanto se tiene:

$$\lambda_{95\%} = 1.411764706$$

$$\lambda_{90\%} = 1.705882353$$

$$\lambda_{85\%} = 1.823529412$$

Aún para esta función de distribución se requiere de muestras independientes, así lo demuestra el correlograma, aplicado al resumen de datos para la estación El Palmito en lo que respecta al número de sequías presentadas en un año (fig. 4.4).



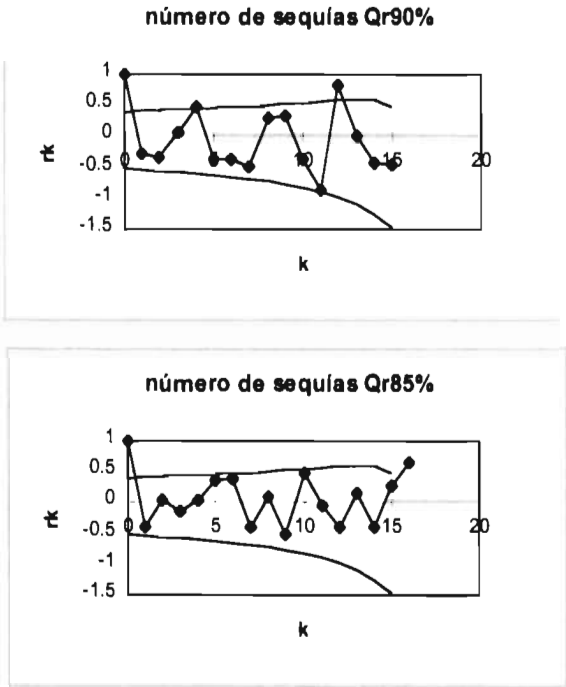
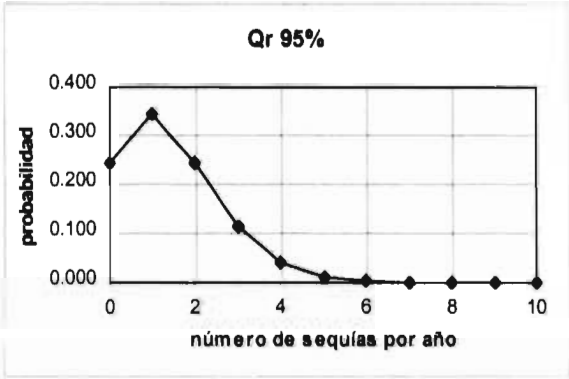


Figura 4.4 Correlogramas del número de sequías en un año.

Utilizando la función de distribución se encontró las probabilidad de ocurrencia de diferentes valores de k (número de sequías en un año). Dichas probabilidades se presentan en la figura 4.5.



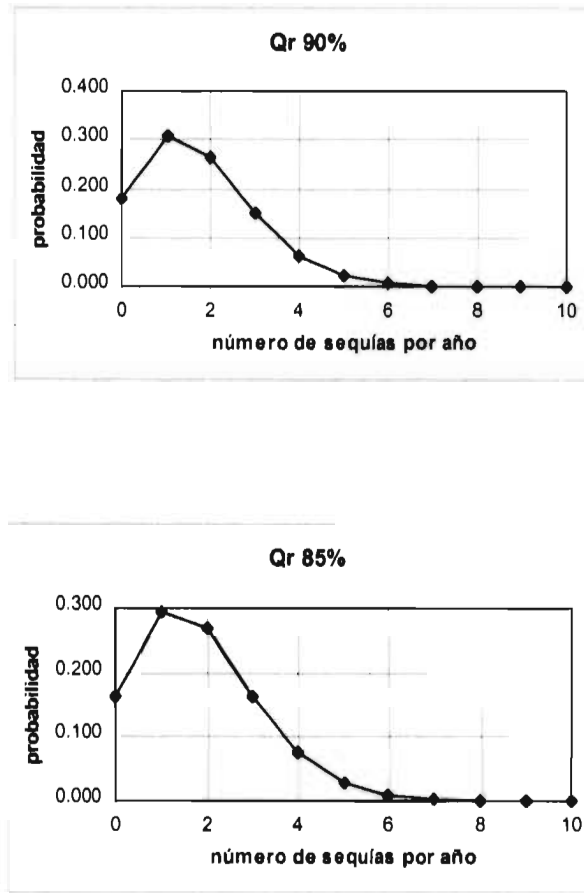


Figura 4.5 Probabilidades de ocurrencia de k, de acuerdo a la distribución de Poisson.

4.7 Ejemplo de aplicación.

El objetivo final de esta modelación puntual, es estimar, para diferentes periodos de retorno, las componentes de una sequía, esto con el fin de aplicar esta información a políticas de operación y planeación de recursos hidráulicos.

Es por ello, que para la estación El Palmito, para un gasto de referencia del 85 % y 90% y 95%, se pueden estimar: déficit máximo, duración máxima, tiempo de ocurrencia del déficit máximo y número de sequías esperado en un año. Por tanto, si se desea estimar estas componentes, por ejemplo, para un periodo de retorno de 10 y 50 años ($P=F(x)=1-1/T=0.9, 0.98$) se tiene:

4.7.1 Déficit máximo.

- Qr 95%.

El mejor ajuste fue la distribución gamma por máxima verosimilitud, por tanto, utilizando la ecuación 3.24 se obtienen los eventos para $P=0.9$ y $P=0.98$ (la figura 4.6 muestra el ajuste de la función).

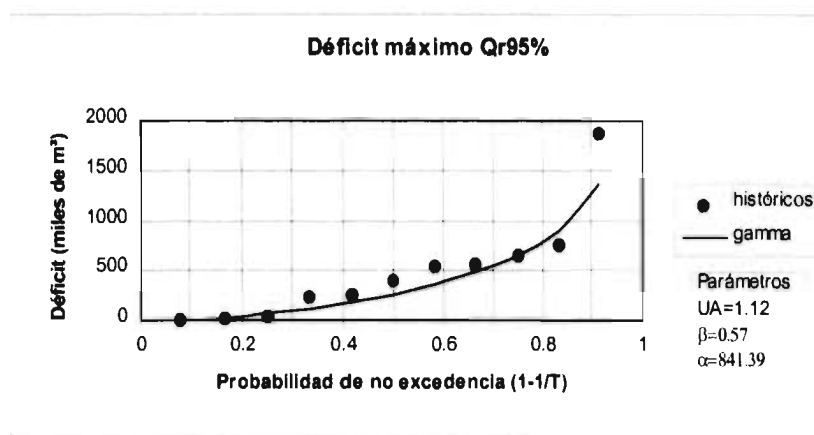


Figura 4.6 Ajuste del déficit máximo a la función de distribución gamma de dos parámetros.

$$D_{max_{10}} = 1245.966 \text{ miles de m}^3/s$$

$$D_{max_{50}} = 2419.984 \text{ miles de m}^3/s$$

- Qr 90%.

Nuevamente el mejor ajuste fue la distribución gamma por máxima verosimilitud, y al utilizar la ecuación 3.24 se obtienen los eventos para $P=0.9$ y $P=0.98$.

$$D_{max_{10}} = 2530.571 \text{ miles de m}^3/s$$

$$D_{max_{50}} = 4704.257 \text{ miles de m}^3/s$$

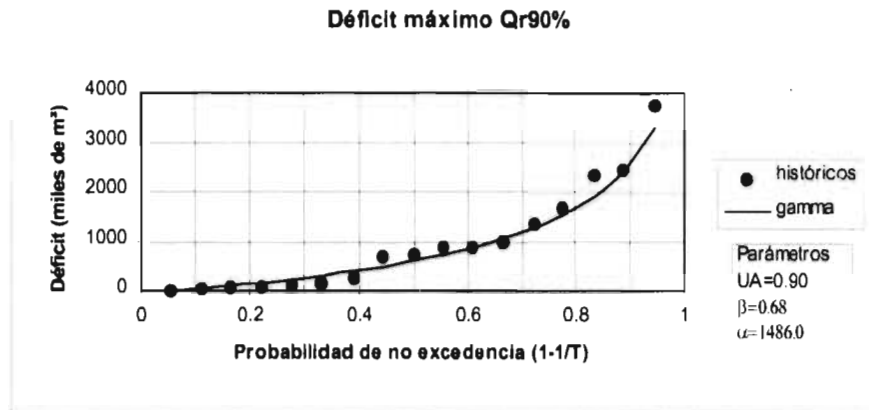


Figura 4.7 Ajuste del déficit máximo a la función de distribución gamma de dos parámetros.

• Qr 85%.

El mejor ajuste fue la distribución exponencial de dos parámetros por máxima verosimilitud, la figura 4.8 lo muestra. Utilizando la ecuación 3.28 se obtiene el déficit máximo para P=0.9 y P=0.98.

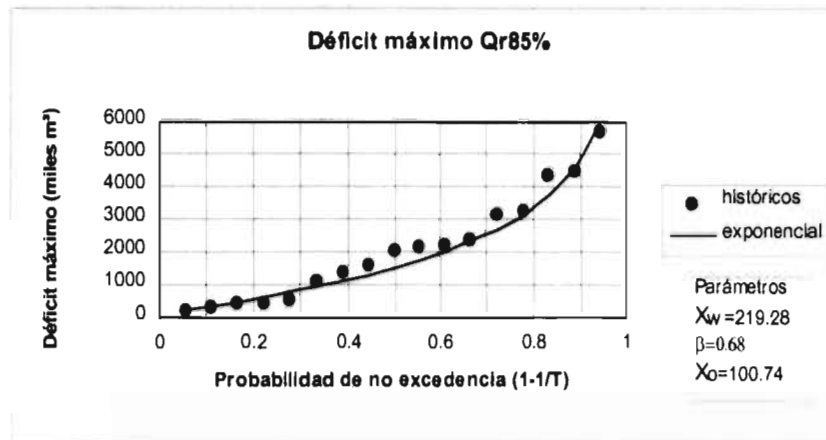


Figura 4.8 Ajuste del déficit máximo a la función de distribución exponencial de dos parámetros.

$$D_{\max_{10}} = 4741.004 \text{ miles de m}^3$$

$$D_{\max_{50}} = 7984.410 \text{ miles de m}^3$$

4.7.2 Duración máxima.

- Qr95%

El mejor ajuste fue la función Gumbel estimada por máxima verosimilitud, por tanto, de la ecuación 3.10 se determina la duración para los periodos de retorno elegidos:

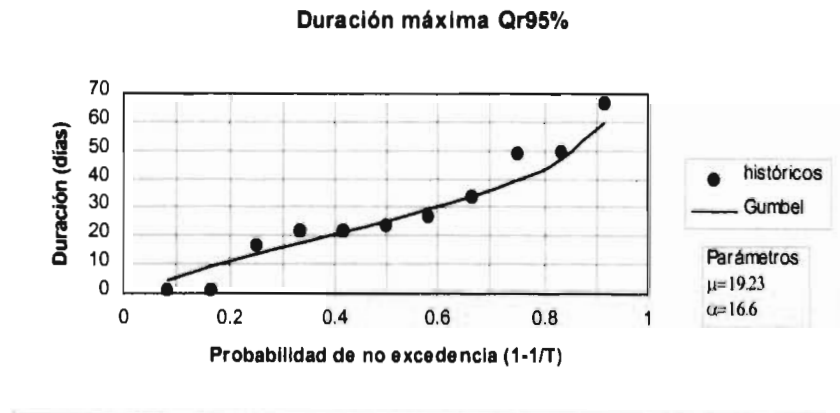


Figura 4.9 Ajuste de la duración máxima a la función de distribución Gumbel.

$$T_{max_{50}} = T(D_{max_{10}}) = 57 \text{ días}$$

$$T_{max_{50}} = T(D_{max_{50}}) = 84 \text{ días}$$

- Qr90%

Al igual que en el caso anterior, la función Gumbel es el mejor ajuste ; sin embargo, ahora con parámetros estimados por momentos (ver figura 4.10).

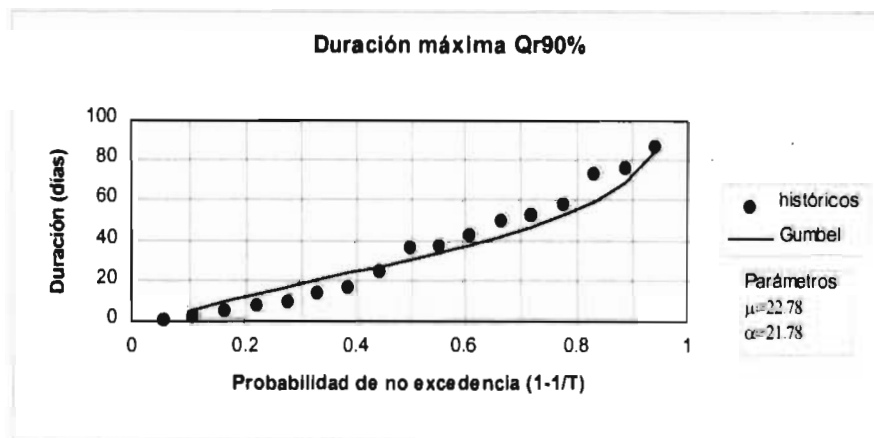


Figura 4.10 Ajuste de la duración máxima a la función de distribución Gumbel.

$$T_{\max_{10}} = T(D_{\max_{10}}) = 72 \text{ días}$$

$$T_{\max_{50}} = T(D_{\max_{50}}) = 108 \text{ días}$$

- Qr85%

En este caso el mejor ajuste fue la distribución normal, por tanto, de la ecuación 3.3 se determina la duración para los periodos de retorno requeridos.

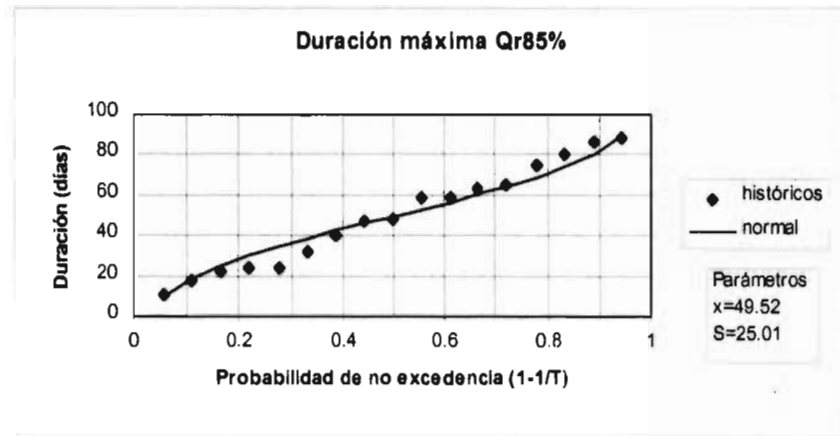


Figura 4.11 Ajuste de la duración máxima a la función de distribución normal.

$$T_{\max_{10}} = T(D_{\max_{10}}) = 82 \text{ días}$$

$$T_{\max_{50}} = T(D_{\max_{50}}) = 101 \text{ días}$$

4.7.3 Tiempo de ocurrencia del déficit máximo.

- Qr95%.

La Función de distribución exponencial por máxima verosimilitud fue el mejor ajuste. De la ecuación 3.28 se estima el tiempo de ocurrencia del déficit máximo para los periodos de retorno.

$$\tau (D_{\max})_{10} = 169 \text{ avo día (18 Junio)}$$

$$\tau (D_{\max})_{50} = 197 \text{ avo día (16 Julio)}$$

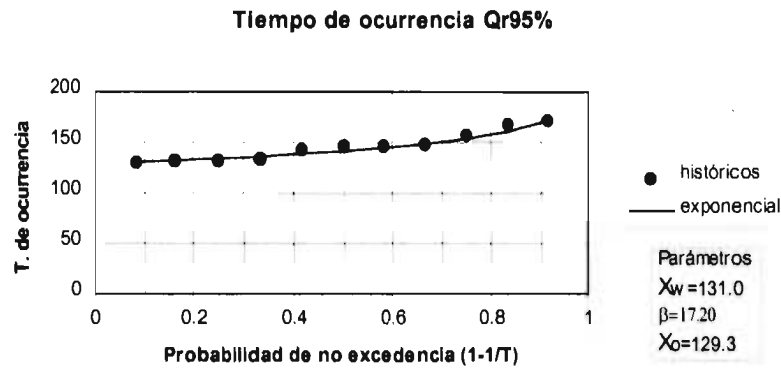


Figura 4.12 Ajuste del tiempo de ocurrencia a la función de distribución exponencial.

• Qr90%.

Ahora la Función de distribución gamma por momentos fue el mejor ajuste. La figura 4.13 muestra el ajuste del tiempo de ocurrencia del déficit máximo para los periodos de retorno. Para estimar los eventos se utiliza la ecuación 3.24.

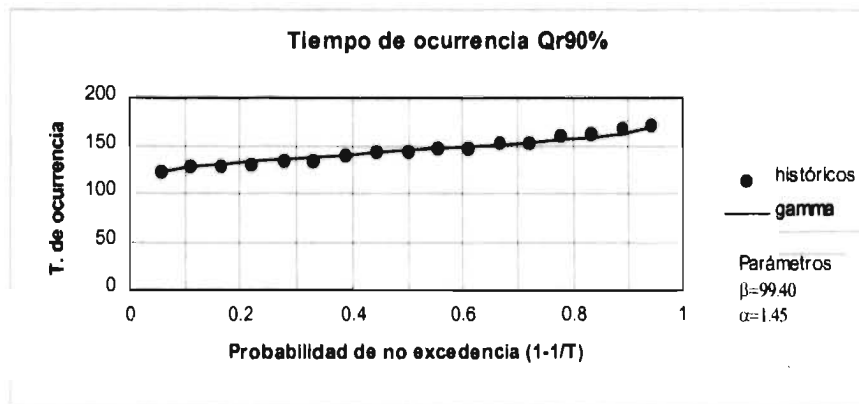


Figura 4.13 Ajuste del tiempo de ocurrencia a la función de distribución gamma.

$$\tau (D_{max})_{10} = 164 \text{ avo día (13 Junio)}$$

$$\tau (D_{max})_{50} = 176 \text{ avo día (25 Junio)}$$

- Qr85%.

En esta ocasión la Función de distribución Gumbel por momentos fue el mejor ajuste. Otra vez se utiliza la ecuación 3.10, de la cual se obtiene el tiempo de ocurrencia del déficit máximo (la figura 4.14 muestra el ajuste).

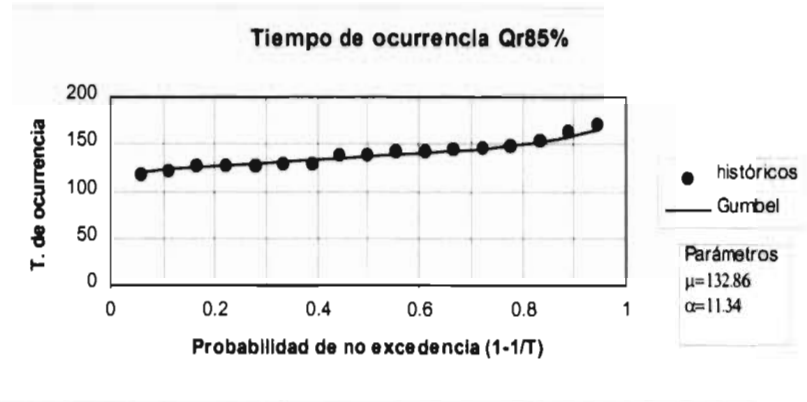


Figura 4.14 Ajuste del tiempo de ocurrencia a la función de distribución Gumbel.

$$\tau (D_{max})_{10} = 159 \text{ avo día (8 Junio)}$$

$$\tau (D_{max})_{30} = 178 \text{ avo día (27 Junio)}$$

Por otra parte, se tiene que el tiempo de ocurrencia promedio de las sequías máximas es $\overline{\tau(D_{max})} = 147$ avo día (27 Mayo) para Qr95%, $\overline{\tau(D_{max})} = 140$ avo día (20 Mayo) para Qr90% y, $\overline{\tau(D_{max})} = 145$ avo día (25 mayo) para Qr85%.

4.7.4 Número de sequías en un año.

De la figura 4.5 se puede observar que para Qr85% y Qr90%, la máxima probabilidad de ocurrencia le corresponde a $k=1$ y es ligeramente mayor a $k=2$; por otra parte, para Qr95% la máxima también corresponde a $k=1$; sin embargo, el segundo lugar lo ocupan, prácticamente, tanto $k=0$ como $k=2$.

4.8 Sequía sintética.

Con los datos pronosticados por el modelo, se puede generar una sequía sintética con periodo de retorno de 10 años y compararla con sequías históricas cercanas a dicho periodo de retorno.

- Qr95%

La sequía generada tienen un déficit de 1245.966 miles de m³ y una duración de 57 días. Por otra parte la histórica, que corresponde al año de 1932, tiene un periodo de retorno de 12 años con respecto al déficit máximo, su déficit es de 1866.412 miles de m³ y su duración de 67 días. La figura 4.15 muestra la comparación de estas sequías.

- Qr90%

La sequía generada tienen un déficit de 2530.571 miles de m³ y una duración de 72 días. Por otra parte la histórica, que corresponde al año de 1938, tiene un periodo de retorno de 9 años con respecto al déficit máximo, su déficit es de 2435.788 miles de m³ y su duración de 77 días. La figura 4.16 muestra la comparación de estas sequías.

- Qr85%

En este caso, de la modelación se tiene un déficit de 4741.004 miles de m³ y una duración de 82 días, mientras que la histórica, que nuevamente corresponde al año de 1938, tiene un déficit de 4503.254 miles de m³ y una duración de 88 días. La figura 4.17 muestra la comparación de estas sequías.

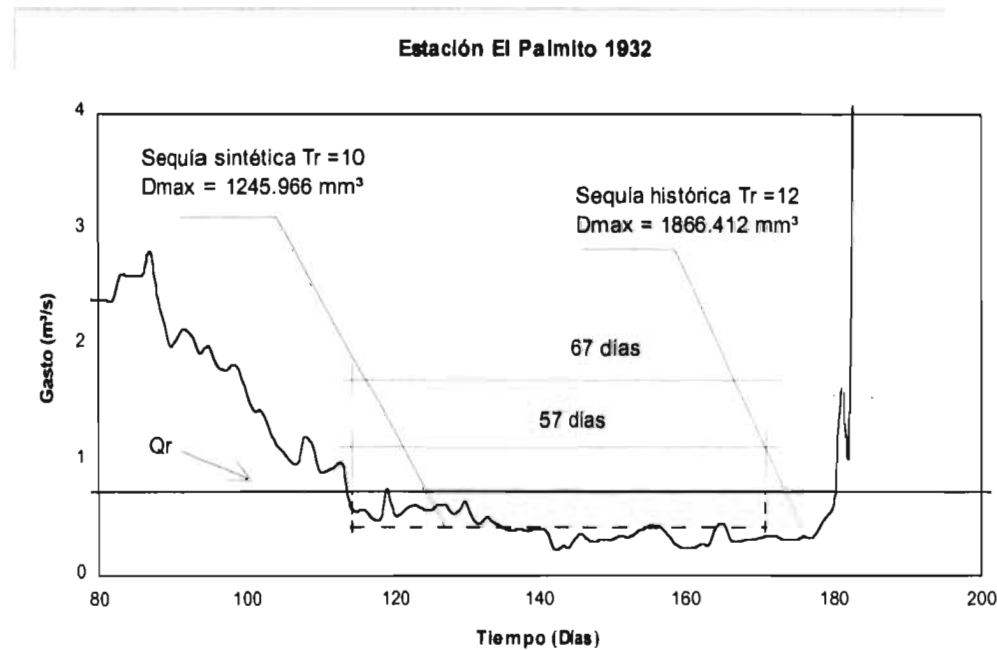


Figura 4.15 Comparación de una sequía sintética con una histórica Qr95%.

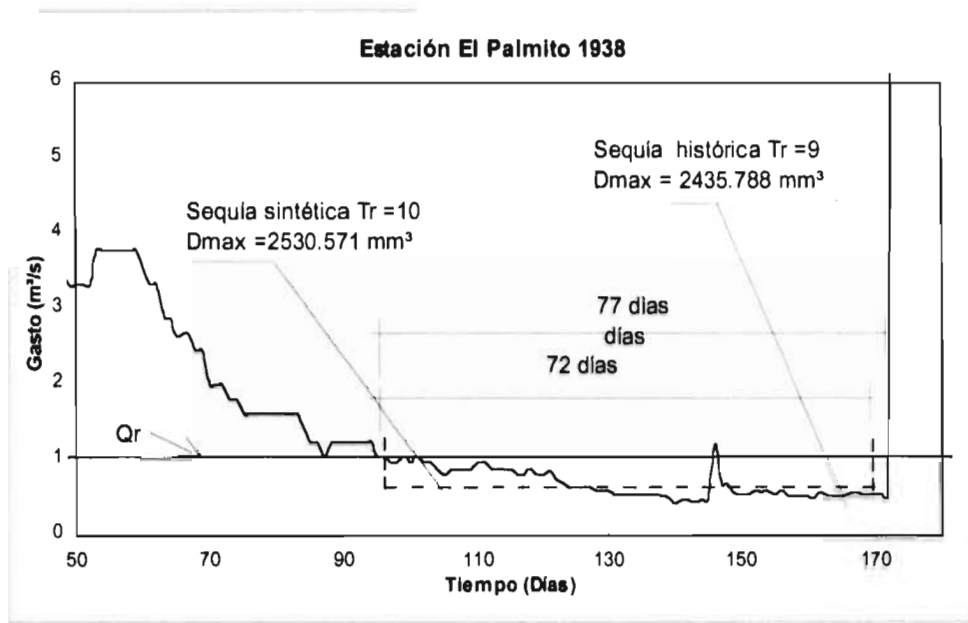


Figura 4.16 Comparación de una sequía sintética con una histórica $Q_r90\%$.

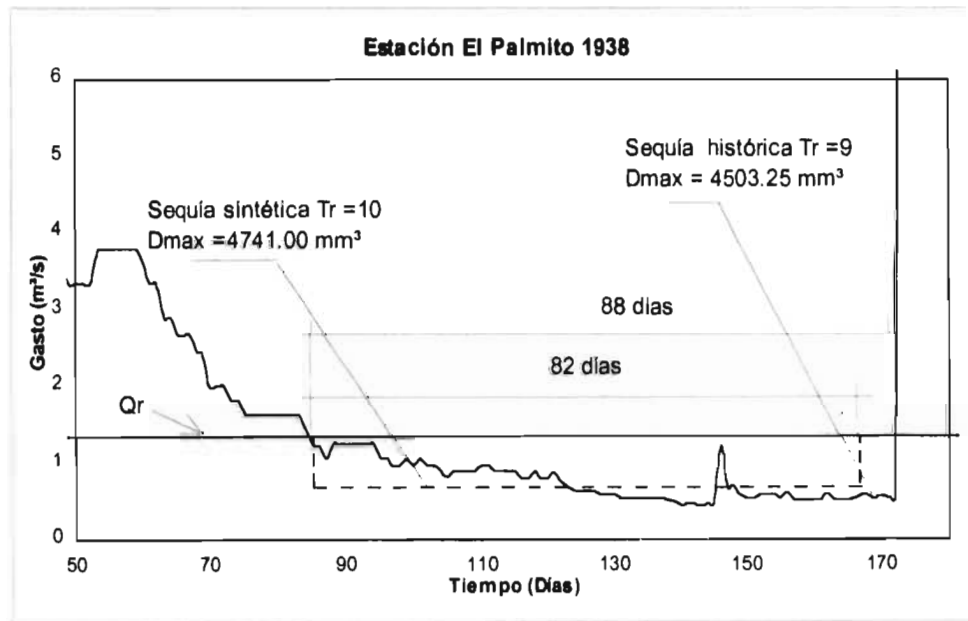


Figura 4.17 Comparación de una sequía sintética con una histórica $Q_r85\%$.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS REGIONAL

El análisis regional se utiliza cuando en un sitio de interés no se cuente con información hidrológica, o cuando además de la modelación puntual del sitio, se involucren a otras estaciones con el propósito de mejorar la estimación. Ahora bien, para predecir o inferir eventos en un sitio sin información (datos de escurrimiento), es necesario recurrir a sitios vecinos, para que a través de ellos, se establezcan ecuaciones de predicción en la región. Para dichas ecuaciones, las características fisiográficas y meteorológicas juegan un papel muy importante.

5.1 Sitios en estudio.

El objetivo del trabajo es regionalizar la sequía en la región hidrológica 36; sin embargo, al analizar ésta, se tienen problemas de poca información, y lo que es más importante; la mayoría de las estaciones de la región se encuentran aguas abajo de las presas Lázaro Cárdenas (El Palmito) y Francisco Zarco (Las Tórtolas), puestas en marcha en 1946 y 1968, respectivamente. Este problema ocasiona que los hidrogramas de las estaciones aguas abajo de las presas, cambien substancialmente a partir de 1946 debido a la regulación de éstas. Por tanto las estaciones de la región, con las cuales se podrá contar, serán aquellas que estén aguas arriba del Palmito, o que tengan suficiente información hasta antes de 1946.

Bajo esta consideración, sólo se tienen cuatro estaciones : Salomé Acosta, Sardinas, El Palmito y Cañón de Fernández.

Por tanto, con el fin de aumentar el número de estaciones de estudio, se incluyeron en el análisis estaciones de la región hidrológica 10 (Sinaloa) y 24 (24 poniente), que obviamente, cumplen también con las consideraciones anteriores.

El total de las estaciones son las siguientes:

Región 36	Región 10	Región 24
Salomé Acosta	Piactla	San Antonio
Sardinas	Acatitán	
El Palmito	Santa Cruz	
Cañón Fdez.	La Huerta	

5.2 Eventos históricos y de diseño en los sitios de estudio.

Los eventos de sequía para los sitios en estudio, calculados con los procedimientos descritos anteriormente para los tres niveles de truncamiento, se presentan en el anexo 2. En tanto que los eventos de diseño para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, obtenidos del mejor ajuste, se presentan a continuación en las tablas 5.1 a 5.3.

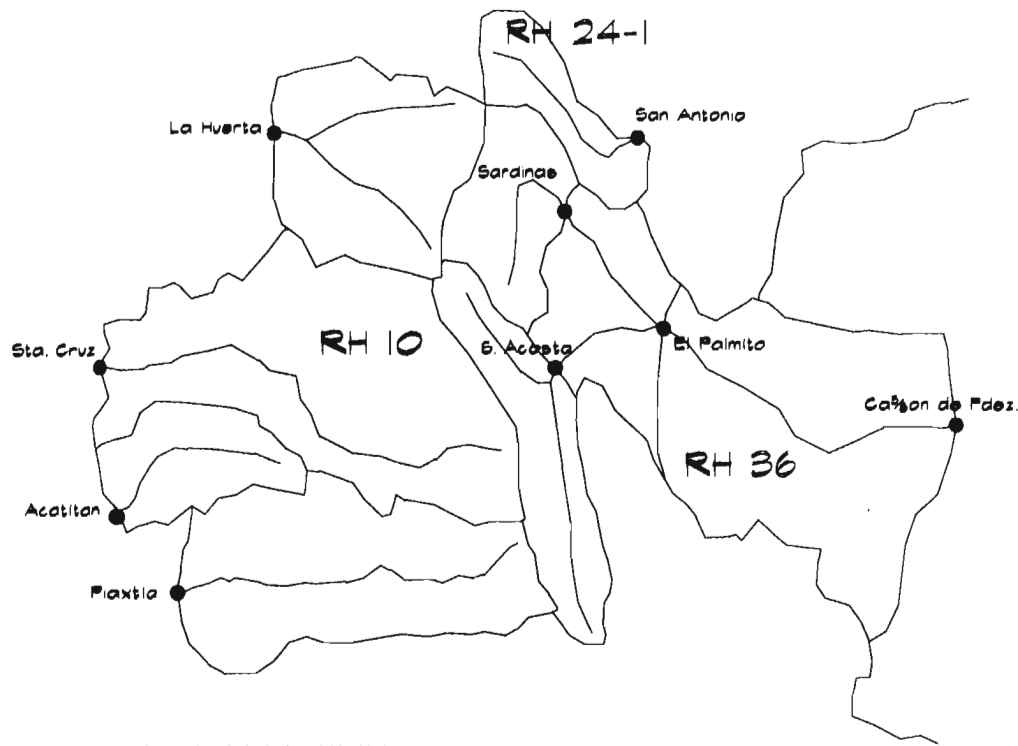


Figura 5.1 Cuencas usadas en el análisis.

Tabla 5.1 Eventos de diseño Qr85%.

Qr85%
Déficit

región	estación	T (años)					mejor ajuste	
		2	5	10	20	50		100
36	Salomé Acosta	950.4956	170.2423	2229.8809	2718.7385	3351.5145	3825.6911	Gumbel máx.
	El Palmito	1497.5985	3344.1456	4741.0046	6137.8636	7984.4107	9381.2696	exponencial máx.
	Cañon de Fdez.	515.8840	1152.9652	1633.0460	2117.4324	2767.3216	3267.0506	gamma máx.
	Sardinas	274.1704	667.1908	964.4992	1261.8076	1654.8280	1952.1364	exponencial máx.
10	La Huerta	2166.6867	5087.6650	7297.2998	9506.9346	12427.9130	14637.5478	exponencial máx.
	Santa Cruz	2987.9045	5332.4798	6884.7928	8373.8084	10301.1865	11745.4852	Gumbel máx.
	Acatitan	454.8585	698.6499	826.2076	931.5181	1050.0091	1128.9873	normal
	Plaxtla	7470.1860	12052.4057	14449.9420	16429.3158	18656.4331	20140.8801	normal
24	San Antonio	142.4003	359.8753	531.9069	709.5420	952.2634	1141.4510	gamma máx.

Qr85%
Duración

región	estación	T (años)					mejor ajuste	
		2	5	10	20	50		100
36	Salomé Acosta	47.6110	67.4736	77.8661	86.4461	96.1000	102.5347	normal
	El Palmito	49.5293	70.5744	81.5857	90.6766	100.9052	107.7229	normal
	Cañon de Fdez.	36.0685	67.4307	89.3826	110.7381	138.5511	159.4618	gamma máx.
	Sardinas	51.9998	83.3756	99.7923	113.3456	128.5953	138.7598	normal
10	La Huerta	45.4210	81.9937	107.2134	131.5617	163.0728	186.6487	gamma
	Santa Cruz	48.1665	71.9159	84.3422	94.6012	106.1442	113.8380	normal
	Acatitan	59.8749	78.3739	88.0530	96.0440	105.0352	111.0281	normal
	Plaxtla	67.5998	96.9404	112.2921	124.9663	139.2269	148.7320	normal
24	San Antonio	40.6796	70.2145	89.7692	108.5266	132.8061	151.0001	Gumbel máx.

Qr85%
Tiempo de ocurr.

región	estación	T (años)					mejor ajuste	
		2	5	10	20	50		100
36	Salomé Acosta	139.5555	150.6859	156.5096	161.3176	166.7273	170.3331	normal
	El Palmito	137.0233	149.8756	158.3850	166.5474	177.1128	185.0300	Gumbel mom.
	Cañon de Fdez.	149.1999	162.1619	168.9439	174.5431	180.8431	185.0422	normal
	Sardinas	135.611	151.1512	159.2823	165.9952	173.5483	178.5826	normal
10	La Huerta	123.7028	167.3457	200.3602	233.3747	277.0176	310.0321	exponencial máx.
	Santa Cruz	139.0902	153.5244	161.4595	168.2130	176.0340	181.3793	gamma mom.
	Acatitan	138.0859	150.5592	158.8175	166.7391	176.9929	184.6766	Gumbel máx.
	Plaxtla	125.0384	141.5349	152.3815	162.9337	176.4947	186.6568	Gumbel máx.
24	San Antonio	139.1723	164.3770	177.5647	188.4524	200.7027	208.868	normal

Tabla 5.2 Eventos de diseño Qr90%.

Qr90%		Déficit						mejor ajuste
región	estación	T (años)						
		2	5	10	20	50	100	
36	Salomé Acosta	335.9252	910.3902	1377.1665	1865.1776	2538.5003	3067.0602	gamma máx.
	El Palmito	600.3638	1661.4940	2530.5719	3442.4969	4704.2575	5696.7772	gamma máx.
	Cañon de Fdez.	376.7436	625.0797	755.0156	862.2889	982.9888	1063.4393	normal
	Sardinas	107.4665	320.8462	568.6456	912.0882	1552.0825	2212.0889	lognormal
10	La Huerta	866.8581	2657.0126	4179.8903	5805.4991	8084.5493	9894.4499	gamma máx.
	Santa Cruz	1591.8995	2932.2479	3819.6751	4670.9166	5772.7615	8598.4391	Gumbel mom.
	Acatitan	178.3902	337.7886	443.3242	544.5565	675.5913	773.7835	Gumbel mom.
24	Piactla	4812.0809	7926.4377	9555.9500	10901.2535	12414.9387	13423.8596	normal
	San Antonio	55.3247	185.2824	348.7281	587.8070	1057.7010	1564.6392	lognormal

Qr90%		Duración						mejor ajuste
región	estación	T (años)						
		2	5	10	20	50	100	
36	Salomé Acosta	33.7648	53.0598	63.1555	71.4905	80.8686	87.1194	normal
	El Palmito	30.7648	55.4538	71.8001	87.4798	107.7756	122.9845	Gumbel mom.
	Cañon de Fdez.	35.4205	55.8826	69.4303	82.4255	99.2466	111.8516	Gumbel máx.
	Sardinas	31.2082	60.6090	81.5213	102.9216	128.9216	149.2423	gamma máx.
10	La Huerta	24.6903	56.8979	81.2621	105.6262	137.8338	162.1979	exp máx.
	Santa Cruz	34.5953	56.6469	71.2469	85.2516	103.3793	116.9634	Gumbel máx.
	Acatitan	42.9999	63.1070	73.6276	82.3132	92.0860	98.5999	Gumbel máx.
24	Piactla	57.5713	86.6580	101.8769	114.4414	128.5785	138.0014	normal
	San Antonio	25.2021	52.9944	78.4813	108.5323	156.3053	199.3252	lognormal

Qr90%		Tiempo de ocurr.						mejor ajuste
región	estación	T (años)						
		2	5	10	20	50	100	
36	Salomé Acosta	144.0110	155.3802	161.5607	166.7851	172.7967	176.8828	gamma mom.
	El Palmito	144.5729	157.1355	163.9892	169.7955	176.4906	181.0494	gamma mom.
	Cañon de Fdez.	152.5555	166.6553	174.0327	180.1234	186.9764	191.5441	normal
	Sardinas	142.4666	155.3654	162.1143	167.6862	173.9555	178.1341	normal
10	La Huerta	139.3322	158.5902	168.6659	176.9843	186.3438	192.5823	normal
	Santa Cruz	141.5160	154.6228	163.3006	171.6246	182.3991	190.4731	Gumbel máx.
	Acatitan	147.5567	159.6602	166.2488	171.8228	178.2420	182.6081	gamma mom
24	Piactla	131.732	151.4803	162.5572	172.0999	183.2734	190.9839	gamma mom.
	San Antonio	148.9999	176.0963	190.2739	201.9787	215.1485	223.9266	normal

Tabla 5.3 Eventos de diseño Qr95%.

Qr95%
Déficit

región	estación	T (años)					mejor ajuste	
		2	5	10	20	50		100
36	Salomé Acosta	115.0156	347.8589	523.6468	699.6347	932.2780	1108.2659	exponencial mom.
	El Palmito	254.6409	789.2848	1245.9661	1734.3421	2419.9841	2965.0267	gamma máx.
	Cañon de Fdez.	169.5485	301.2623	370.1783	427.0745	491.0920	533.7617	normal
	Sardinas	570.9936	935.0765	1176.1311	1407.3564	1706.6539	1930.9352	Gumbel máx.
10	La Huerta	351.1944	1273.8260	2499.6993	4361.1504	8157.7022	12383.4788	lognormal
	Santa Cruz	524.5116	1267.6738	1845.3807	2437.0324	3240.2642	3863.3661	gamma máx.
	Acatitan	84.4479	152.3854	203.7781	255.1708	323.1082	374.5009	exponencial máx.
	Piaxtla	2656.4858	4147.4288	4927.5289	5571.5691	6296.2189	6779.2219	normal
24	San Antonio	23.7740	73.9457	133.8950	218.5963	379.4598	548.0444	lognormal

Qr95%
Duración

región	estación	T (años)					mejor ajuste	
		2	5	10	20	50		100
36	Salomé Acosta	13.6140	32.4536	46.7052	60.9568	79.7964	94.0480	exponencial mom.
	El Palmito	25.3174	44.1379	56.5987	68.5514	84.0229	95.6166	Gumbel máx.
	Cañon de Fdez.	19.1249	31.0202	37.2440	42.3824	48.1639	52.0175	normal
	Sardinas	21.3014	43.3942	60.1068	76.8193	98.9121	115.6247	exponencial máx.
10	La Huerta	21.4358	42.5939	58.5858	74.5777	95.7179	111.7098	exponencial máx.
	Santa Cruz	26.6211	38.7239	49.3853	59.6121	72.8495	82.7691	Gumbel máx.
	Acatitan	35.5010	50.1800	59.2598	67.5398	77.7232	85.0551	gamma mom.
	Piaxtla	46.9988	71.9618	87.9750	102.8582	121.5099	135.1169	gamma mom.
24	San Antonio	15.8969	30.6770	41.1618	51.4310	64.8801	75.0348	lognormal

Qr95%
Tiempo de ocurr.

región	estación	T (años)					mejor ajuste	
		2	5	10	20	50		100
36	Salomé Acosta	146.9129	160.3419	169.2331	177.7617	188.8012	197.0737	Gumbel máx.
	El Palmito	141.3585	157.1187	169.0408	180.9630	198.7232	208.6453	exponencial máx.
	Cañon de Fdez.	163.7499	175.8334	182.1558	187.3755	190.5368	197.1630	normal
	Sardinas	146.8999	158.5152	164.5972	169.6101	175.2555	179.0184	normal
10	La Huerta	134.7499	153.3014	161.4819	168.2356	175.8346	180.8996	normal
	Santa Cruz	147.8441	158.2559	163.8932	168.6470	174.1046	177.8069	gamma mom.
	Acatitan	150.5000	157.4242	161.0471	184.0382	165.8498	169.6468	normal
	Piaxtla	132.6755	142.4708	147.7828	152.2666	157.4190	160.9169	gamma mom.
24	San Antonio	158.7893	182.5241	194.9428	205.1954	216.7313	224.4204	normal

5.3 Fisiografía.

Las características fisiográficas son las propiedades físicas de una cuenca, y son de vital importancia para inferir el comportamiento hidrológico de una cuenca que no cuenta con información (Acreman, 1986).

En el caso de los eventos de sequía, tales como el déficit, duración y tiempo de ocurrencia, no se tiene la seguridad de qué características fisiográficas o meteorológicas son significativas en la predicción de dichos eventos; sin embargo, las características que se consideran son las más comunes, esperando que dentro de éstas, estén aquellas que sí logren reproducir el fenómeno con buena aceptación.

Las características fisiográficas empleadas son las siguientes:

1. Área- área drenada hasta la estación.
2. Long. cauce- longitud de la cauce principal.
3. Perímetro- perímetro del parteaguas de la cuenca.
4. Orden- orden de la cauce principal.
5. Scuenca- pendiente media de la cuenca.
6. Scauce- pendiente media del cauce principal.
7. Elevación- elevación media de la cuenca.
8. P. forma- parámetro de forma de la cuenca.
9. Densidad d.- densidad de drenaje.
10. Lat. cent.- latitud del centroide de la cuenca.
11. Long. cent.- longitud del centroide de la cuenca.

Las características meteorológicas son :

12. hp- precipitación media anual
13. Coef. esc.- coeficiente de escurrimiento de la cuenca.

La forma en que se estiman las diferentes características se presenta a continuación.

- Área (Km²).

El área drenada de la cuenca es el área encerrada por el parteaguas en proyección horizontal. Ésta es estimada utilizando un planímetro y planos de INEGI a escala 1:250,000, además de que es corroborada en los boletines hidrológicos.

- Long. cauce (km).

La longitud del cauce principal es determinada, también en proyección horizontal, mediante la utilización del longímetro.

- hp (mm).

La precipitación media anual es obtenida como el promedio de la precipitaciones medias anuales del periodo de análisis, las cuales están registradas en boletines hidrológicos.

- Perímetro (km).

El perímetro del parteaguas es obtenido mediante el uso del longímetro.

- Orden (sin dimensiones).

El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación en una cuenca. El procedimiento que se sigue es considerar como corrientes de orden uno, aquellas que no tienen tributarios; de orden dos, a las que sólo tienen tributarios de orden uno; de orden tres, aquellas corrientes con dos o más tributarios de orden dos, etc.

- Scuenca (m/Km).

Para la pendiente media de la cuenca se aplica el método de Horton, el cual consiste en trazar una malla ortogonal sobre la cuenca, cuyo eje principal (x) debe aproximarse al sentido del cauce principal.

Una vez dibujada la malla, se mide la longitud de cada una de sus líneas comprendidas dentro de la cuenca, y se cuentan el número de intersecciones y tangencias de cada una de las líneas con las curvas de nivel.

La pendiente de la cuenca en cada dirección se evalúa:

$$\begin{aligned} S_x &= \frac{N_x D}{L_x} \\ S_y &= \frac{N_y D}{L_y} \end{aligned} \quad (5.1)$$

donde

- D desnivel entre curvas de nivel.
- L_x, L_y longitud total de las líneas de la malla, en la dirección correspondiente.
- N_x, N_y número total de intersecciones y tangencias con las curvas de nivel, en la dirección correspondiente.
- S_x, S_y pendiente de la cuenca en la dirección correspondiente.

Ahora bien, Horton establece que la pendiente media de la cuenca puede determinarse como

$$S_c = \frac{ND \sec \theta}{L} \quad (5.2)$$

donde

- $L = L_x + L_y$
- $N = N_x + N_y$
- $\theta =$ ángulo entre las líneas de la malla y las curvas de nivel.

Para fines prácticos se acepta ignorar el término $\sec \theta$, o también considerar la pendiente media de la cuenca, como el promedio aritmético de las pendientes S_x y S_y .

$$S_c = \frac{S_x + S_y}{2} \quad (5.3)$$

- Scauce (n/km).

Se utilizó el método de Taylor-Schwarz, el cual considera que el río está formado por una serie de canales con pendiente uniforme, cuyo tiempo de recorrido es igual al del río. Por tanto el río será dividido en tramos de igual longitud, teniendo en cuenta que a mayor sea el número de tramos, mejor será la aproximación al perfil real.

La expresión es la siguiente

$$S = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (5.4)$$

donde

- n número de tramos en que se divide el río.
- S_1, S_2, \dots, S_n pendiente de cada tramo $(E_1 - E_i)/\Delta x$.

- Elevación (msnm).

La elevación media de la cuenca se obtiene aplicando el método de las intersecciones, o de la malla, como también es conocido. Este método requiere de una malla, que por lo menos, contenga 100 intersecciones dentro de la cuenca. La elevación media se calcula como el promedio de las elevaciones de las intersecciones.

- Parámetro de forma (1/Km).

Es la relación entre el perímetro y el área de una cuenca.

$$P. \text{ forma} = P/A$$

- Densidad de drenaje (1/km).

Ésta es una relación entre la longitud total de tributarios (perennes e intermitentes) y el área drenada. Proporciona la longitud de tributarios por unidad de área drenada.

$$\text{Densidad } d. = L/A$$

- Latitud y latitud del centroide de la cuenca.

El centroide de la cuenca es importante, ya que en este punto se concentran las características hidrológicas y meteorológicas de una cuenca.

El procedimiento para calcular las coordenadas de este punto es: primero descomponer el área de la cuenca en una serie de figuras regulares, cuyos centroides (X, Y) y áreas (Ai) sean conocidas, luego aplicar las expresiones siguientes.

$$X_c = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n X_i A_i$$

$$Y_c = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n Y_i A_i$$
(5.5)

donde

- X_i distancia del centroide de la figura i al eje vertical de referencia.
- Y_i distancia del centroide de la figura i al eje horizontal de referencia.
- A_i área de la figura.
- A_t área total de la cuenca.
- X_c distancia del centroide de la cuenca al eje vertical de referencia.
- Y_c distancia del centroide de la cuenca al eje horizontal de referencia.

- Coeficiente de escurrimiento.
Indica que tanto escurre del volumen que se precipita.

$$C = \frac{V_e}{V_{II}}$$
(5.6)

donde

- V_e volumen de escurrimiento medio anual.
- V_{II} volumen de precipitación medio anual.

A continuación se presenta el resumen de características fisiográficas y meteorológicas para las estaciones en estudio.

Tabla 5.4 Fisiografía de los sitios en estudio

región	estación	área	long. cauce	hp	perímetro	orden	Scuenca
36	Salomé Acosta	6476.00	170.00	479.53	612.50	4	0.0356
	El Palmito	19270.00	444.25	399.42	962.00	4	0.0299
	Cañon de Fdez.	34548.00	630.50	258.19	1432.00	4	0.0233
	Sardinas	5522.00	102.50	414.52	437.00	4	0.0313
10	La Huerta	6149.00	117.00	1019.94	388.00	4	0.0412
	Santa Cruz	8919.00	180.00	1068.89	500.00	4	0.0532
	Acatitan	1884.00	115.00	1046.59	213.00	3	0.0497
	Piaxtla	5307.00	142.00	1044.76	350.00	4	0.0496
24	San Antonio	2750.00	94.50	300.00	346.50	4	0.0468

región	estación	Scauce	elevación	p. forma	densidad d.	lat. cent.	long. cent.	coef. esc.
36	Salomé Acosta	0.0041	2477.14	0.0946	0.0263	24.94	105.54	0.1589
	El Palmito	0.0035	2218.04	0.0499	0.0231	25.42	105.33	0.1552
	Cañon de Fdez.	0.0026	2052.17	0.0414	0.0182	25.35	104.96	0.1290
	Sardinas	0.0151	2491.54	0.0791	0.0186	26.00	105.14	0.2376
10	La Huerta	0.0157	2217.57	0.0631	0.0171	25.53	106.42	0.1820
	Santa Cruz	0.0561	1689.60	0.0561	0.0205	24.70	106.18	0.1990
	Acatitan	0.0113	726.92	0.1131	0.0515	24.32	106.55	0.2000
	Piaxtla	0.0169	1644.52	0.0660	0.0239	24.15	105.98	0.2080
24	San Antonio	0.0050	1893.62	0.1260	0.2419	26.43	106.60	0.1937

5.4 Identificación de regiones meteorológicamente homogéneas.

Para poder inferir eventos dentro de una región, es obviamente de vital importancia, definir qué sitios conforman dicha región. Estas estaciones deberán, más que ser geográficamente cercanas, tener un comportamiento similar para poder predecir con aceptable precisión los diferentes eventos (Nathan, McMahon, 1990).

El método que se utiliza en este trabajo, para la determinación de regiones meteorológicamente homogéneas, es el de los trazos multidimensionales.

5.4.1 Trazos multidimensionales.

Si sólo dos variables son necesarias para especificar similitud hidrológica entre diferentes cuencas, entonces un plano bidimensional serviría para mostrar la similitudes (o agrupaciones) entre éstas.

Con datos que contengan un número mayor de dimensiones, la tarea es más que difícil, mientras que con técnicas multivariadas, es posible graficar los dos primeros factores en un diagrama, para revelar similitudes dentro de las variables más importantes. Sin embargo, una técnica simple y más comprensible, es la aproximación gráfica presentada por Andrews (1972), en la cual un punto en el espacio multidimensional es representado por una curva bidimensional vía la función

$$f(x) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \text{sen}(t) + X_3 \text{cos}(t) + X_4 \text{sen}(2t) + X_5 \text{cos}(2t) + \dots \quad (5.7)$$

Las variables X_1, X_2, \dots representan cada una de las variables normalizadas utilizadas para caracterizar a la cuenca y la función es dibujada en el rango $-\pi$ a $+\pi$. Andrews mostró que la diferencia entre las curvas es proporcional a la distancia métrica Euclidiana, y por tanto, las variaciones de las n-dimensiones, las cuales están localizadas una de otra en el espacio multidimensional, producen curvas similares, y consecuentemente puntos distantes en el espacio multidimensional aparecen como funciones distantes.

El hecho de que esta función preserva las distancias, hace que ésta sea una técnica ideal para la comparación visual de grupos homogéneos.

Grupos de cuencas similares aparecerán como una banda de curvas espaciadas cercanamente. Cualquier cuenca que quede por fuera de la banda identificada puede ser asumida como perteneciente a otro grupo.

La función de Andrews también permite asignar una nueva cuenca a algún grupo. La curva asociada con la nueva cuenca es comparada con las curvas de los diferentes grupos para determinar el más apropiado. Por este aspecto, el método tiene una considerable ventaja sobre otros análisis tradicionales discriminantes; es posible identificar una cuenca la cual no pertenezca a los grupos existentes, y por ello, ser un indicativo de la inapropiedad de las ecuaciones de predicción.

El grado de similitud entre la cuenca donde se desea inferir y el grupo más cercano, también indica el grado de confianza que puede ser esperado por el uso de las ecuaciones de predicción.

Una característica del método, que no es inmediatamente aparente, es que los resultados dependen del orden en el cual las variables son clasificadas (Everitt, 1978). Las primeras variables están asociadas con componentes cíclicas de frecuencia baja y las últimas con componentes de frecuencia alta. Como las frecuencias bajas son más fácilmente apreciadas, es más útil asociar la variable más importante con X_1 , la segunda más importante con X_2 , y así sucesivamente.

Obtención de los grupos homogéneos.

Como se ha mencionado anteriormente, gran parte de el método se basa en la determinación de grupos gráficamente bien definidos. Para lograr esto, el primer paso consiste en retirar las curvas que sobresalgan de cada grupo bien definido. Una cuenca es subjetivamente identificada como sobresaliente, si todo su trazo o parte de él, cae fuera de la región densa del grupo. Después de retirar todas las curvas sobresalientes, se calcula una curva representativa del grupo, la cual es la media de todos los trazos pertenecientes a las cuencas del grupo.

Una vez establecidas las curvas representativas de los diferentes grupos, si se tiene una cuenca sin información, en la cual se desea inferir un evento (es decir, aplicar una técnica regional), ésta se asignará a algún grupo por comparación visual (figura 5.2). Sin embargo, lo más deseable es que exista un criterio objetivo, para lo cual el método presenta también los criterios siguientes:

1. El mejor de los criterios es la suma de los cuadrados de las diferencias (SS) entre el j-ésimo grupo (S_j) y el trazo de la k-ésima cuenca (T_k) bajo consideración

$$SS = \sum (S_{ji} - T_{ki})^2 \tag{5.8}$$

La cuenca es asignada al grupo que corresponde el menor valor de SS.

2. El segundo criterio es la medida del coseno del patrón de similitud (CS).

$$CS = \frac{\sum (S_{ji} \cdot T_{ki})}{\sqrt{\sum S_{ji}^2 \sum T_{ki}^2}} \tag{5.9}$$

El criterio CS varía entre -1 y 1. Para dos curvas idénticas $CS = 1$

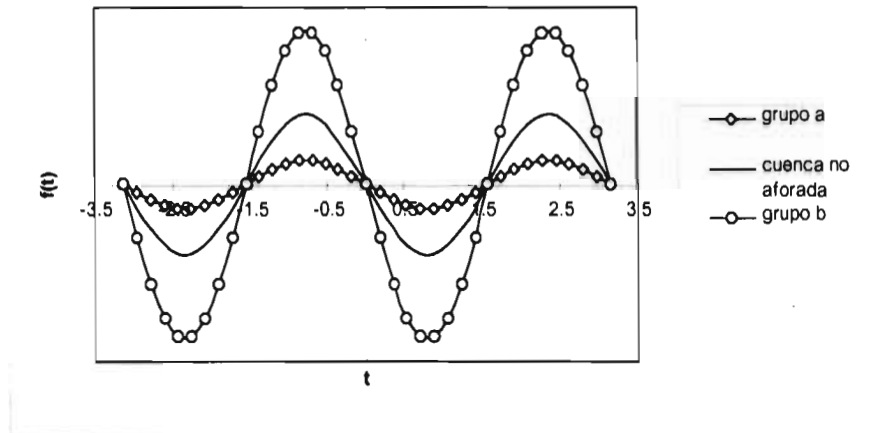


Figura 5.2 Asignación de una nueva cuenca a grupos establecidos.

Los criterios anteriores son utilizados básicamente cuando se tiene un número considerable de estaciones, en nuestro caso sólo se tienen nueve, y por ello se espera que visualmente sea suficiente para determinar las regiones.

Por tanto, para la aplicación de la expresión de Andrews (5.7) para las diferentes cuencas, primeramente será necesario conocer las variables significativas para predecir el evento analizado, así como el orden de importancia de éstas. Para tal propósito se recurre el análisis de varianza, el cual se presenta en la siguiente sección. Una vez definido lo anterior se procederá a trazar las curvas y definir las regiones homogéneas.

5.4.2 Análisis de varianza.

La técnica del análisis de varianza es en realidad un análisis de la variación de las medias, y éste se logra mediante la participación de la variación total en las observaciones, en componentes especificados por el modelo matemático (Canavos, 1994).

En nuestro caso, el análisis de varianza es utilizado como una herramienta que proporciona el número de variables realmente significativas para la predicción del evento, además del orden de importancia de dichas variables (información indispensable para la aplicación de técnicas regionales).

Regresión lineal múltiple.

En la mayoría de las ocasiones, una variable dependiente es función de algunas otras cantidades. Por ejemplo, el gasto máximo anual en un sitio puede ser relacionado con el área de la cuenca drenada, la pendiente del cauce principal, la precipitación media, etc., dando origen a un modelo lineal general de la forma

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p \quad (5.10)$$

Lo anterior para regresión lineal simple. Por tanto, haciendo una analogía con el modelo lineal general, elevando al cuadrado ambos lados de la ecuación y sumando para todas las observaciones, se tiene

$$\underline{Y}'\underline{Y} = n\bar{Y}^2 + \left(\underline{\hat{\beta}}'\underline{X}'\underline{Y} - n\bar{Y}^2\right) + \left(\underline{Y}'\underline{Y} - \underline{\hat{\beta}}'\underline{X}'\underline{Y}\right) \quad \text{Suma total de cuadrados}$$

que se divide en tres partes

$$n\bar{Y}^2 \quad \text{Suma de cuadrados debido a la media.}$$

$$\underline{Y}'\underline{Y} - \underline{\hat{\beta}}'\underline{X}'\underline{Y} = \sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad \text{Suma de cuadrados de los residuales.}$$

$$\underline{\hat{\beta}}'\underline{X}'\underline{Y} - n\bar{Y}^2 = \sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad \text{Suma de cuadrados debido a la regresión.}$$

Por consiguiente, una medida de qué porcentaje de la variación en Y es explicada por la ecuación de regresión, es el coeficiente de determinación múltiple R²; el cual es expresado de la manera siguiente

$$R^2 = \frac{\text{Suma de cuadrados debido a la regresión}}{\text{Suma de cuadrados con respecto a la media}}$$

$$R^2 = \frac{\left(\underline{\hat{\beta}}'\underline{X}'\underline{Y} - n\bar{Y}^2\right)}{\left(\underline{Y}'\underline{Y} - n\bar{Y}^2\right)} \quad (5.14)$$

El coeficiente de correlación múltiple r², es calculado como la raíz cuadrada positiva de R².

Muy frecuentemente la distribución de la suma de cuadrados es presentada en la forma de una tabla de análisis de varianza (ANOVA). En la ANOVA un cuadrado medio es simplemente una suma de cuadrados dividido por sus grados de libertad.

Tabla 5.5 Tabla ANOVA para regresión múltiple.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Media	1	$n\bar{Y}^2$	
Regresión	p-1	$\underline{\hat{\beta}}'\underline{X}'\underline{Y} - n\bar{Y}^2$	
Residual	n-p	$\underline{Y}'\underline{Y} - \underline{\hat{\beta}}'\underline{X}'\underline{Y}$	σ^2
Total	n	$\underline{Y}'\underline{Y}$	

El error estándar de la ecuación de regresión σ , es estimado por S, donde

$$S^2 = (\underline{Y}' \underline{Y} - \underline{\hat{\beta}}' \underline{X}' \underline{Y}) / (n - p) \quad (5.15)$$

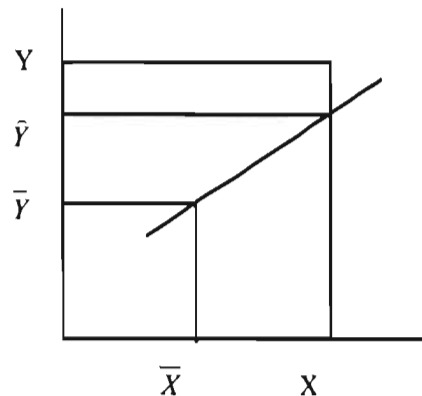


Figura 5.3 Componentes de Y.

Pruebas de hipótesis.

Hipótesis nula. H_0 expresa que no hay diferencias significativas entre las medias poblacionales; es decir $\mu_1 = \mu_2 = \dots$. La hipótesis alternativa denotada como H_a plantea que al menos una media es diferente. En la prueba, si H_0 se rechaza, se acepta H_a .

Nivel de significancia. Se selecciona el nivel deseado, generalmente 5% ($\alpha=0.05$). Los valores correspondientes para los diferentes niveles de significancia y grados de libertad se presentan en el apéndice 1.

- Estadístico t

Una prueba de $H_0: \beta_i = 0$ contra $H_a: \beta_i \neq 0$, es equivalente a probar la hipótesis que indica si la i -ésima variable independiente no contribuye, significativamente, para explicar la variación de la variable dependiente. Si $H_0: \beta_i = 0$ es aceptada, se puede decir que por regla general la i -ésima variable independiente debe ser eliminada del modelo. Para esto se hace uso del estadístico t de Student.

$$t = \frac{\hat{\beta}_i - \beta_0}{S_{\hat{\beta}_i}} \quad (5.16)$$

$\hat{\beta}_i$ es el i -ésimo coeficiente estimado por la regresión, β_0 es un valor propuesto, que generalmente es cero, lo cual establece que no existe ninguna asociación lineal entre X y Y, y $S_{\hat{\beta}_i}$ se obtiene de la manera siguiente

$$S_{\hat{\beta}_i} = (C_{ii}^{-1} S^2)^{1/2} \quad (5.17)$$

donde

C_{ii}^{-1} i-ésimo elemento diagonal de la matriz $(\underline{X}' \underline{X})^{-1}$.

S^2 estimación de σ^2 de la tabla ANOVA.

H_0 se rechaza si $|t| > t_{1-\alpha/2, n-p}$. Lo cual indica que la variable debe pertenecer en el modelo.

- Estadístico F

Existe otro estadístico que indica si la ecuación de regresión, explica o no una cantidad significativa de la variación en Y. La manera de hacerlo es probar la hipótesis $H_0: \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_p = 0$ contra H_a : al menos una de las β 's no es cero. Para hacer esto se utiliza el estadístico F, el cual se calcula como

$$F = \frac{(\hat{\beta}' \underline{X}' \underline{Y} - n \bar{Y}^2) / (p-1)}{(\underline{Y}' \underline{Y} - \hat{\beta}' \underline{X}' \underline{Y}) / (n-p)} \quad (5.18)$$

H_0 se rechaza si F excede $F_{1-\alpha, p-1, n-p}$. Lo cual es indicativo de que la ecuación de regresión explica la variación en Y.

Por tanto para encontrar las mejores variables de predicción será necesario garantizar las pruebas de hipótesis anteriores. Primero que la ecuación, en su conjunto, sea capaz de explicar a la variable respuesta (F), y luego, que individualmente cada variable sea significativa para tal propósito (t).

Ahora bien, como ya se dijo, la no aprobación del estadístico t (H_0 aceptada) para alguna de las variables, significaría su eliminación del modelo; sin embargo, también existe otra prueba para determinar si las variables eliminadas no contribuyen realmente.

La prueba consiste en verificar nuevamente al estadístico F, pero con una nueva variante. La hipótesis es; que las últimas k variables dependientes no contribuyen significativamente a explicar la variación lineal en Y. Esto es equivalente a comparar $H_0: \beta_{p-k+1} = \beta_{p-k+2} = \dots = \beta_p = 0$ contra H_a : al menos una de las β 's no es cero.

Para esto, se acepta como modelo completo a aquél que contiene todas las p variables, mientras que el modelo reducido es aquél obtenido por la eliminación de las últimas k variables independientes. El modelo contiene p-k variables independientes.

La nueva expresión para el estadístico F es

$$F = \frac{(Q_2 - Q_1) / k}{Q_1 / (n-p)} \quad (5.19)$$

donde

- Q_2 suma de cuadrados debido a la regresión del modelo completo, con $p-1$ grados de libertad.
- Q_1 suma de cuadrados de los residuales del modelo completo, con $n-p$ grados de libertad.
- Q_2^* suma de cuadrados debido a la regresión del modelo reducido, con $p-k-1$ grados de libertad.

H_0 se rechaza si F excede $F_{1-\alpha, k, n-p}$, Lo cual implica que de las k variables, al menos uno si explica una cantidad significativa de la variación en Y , por tanto, no todos deberían ser eliminados. Por otro lado, si se acepta, las k variables son eliminadas.

Ilustración del método.

Como ilustración del método se presenta lo siguiente. Se tienen en principio nueve observaciones del déficit máximo (variable independiente) para cierto nivel de truncamiento y periodo de retorno, para ello se tienen cinco variables independientes, las cuales son: el área drenada, la precipitación media, elevación media de la cuenca, densidad de drenaje y el orden de corriente. La tabla 5.6 muestra el resumen del análisis de varianza, del cual se observa que las dos pruebas de hipótesis no se cumplen.

La ecuación de regresión no explica la variación del déficit, ya que dado

$$F = 7.5263$$

$$F_{0.95, 5, 3} = 9.01$$

no se cumple

$$F > F_{1-\alpha, p-1, n-p}$$

Mientras que por otra parte, se presume que tanto la elevación de la cuenca como la densidad de drenaje deben salir del modelo, ya que el estadístico t no cumple con la condición

$$|t| > t_{1-\alpha/2, n-p}$$

debido a que se tiene

$$|t| = 0.0518, 0.8470$$

$$t_{0.975, 3} = 3.182$$

Si deben o no salir del modelo se determinará más adelante, por lo pronto en la tabla 5.7 se presenta el análisis de varianza para el modelo reducido. En ésta se puede observar que se cumplen las hipótesis. Tanto la ecuación como cada variable contribuyen a predecir al déficit.

$$15.867 > 5.41$$

$$2.747, 5.786, 2.826 > 2.571$$

Sin embargo, se prueba nuevamente el estadístico F entre el modelo completo y el reducido para comprobar si realmente las variables eliminadas no son significativas para explicar la variación del déficit.

De la tabla 5.6 se obtienen $Q_2 = 27.6267$, $Q_1 = 2.2024$ y $n-p=3$, y de la tabla 5.7, que corresponde al modelo reducido, $Q_2^* = 26.9938$ ($p-k-1$ grados de libertad =3). Al aplicar la ecuación 5.19 se tiene

$$F = \frac{(27.6267 - 26.9938) / 2}{2.2024 / 3}$$

además

$$F_{0.95,2,3} = 9.55$$

Por tanto se acepta H_0 ($F < F_{1-\alpha,k,n-p}$), y por ello las variables si deben ser eliminadas.

De esta manera la tabla 5.7 es la que contiene a las variables significativas, así como los coeficientes de la ecuación de regresión. Por otra parte, las variables podrán ser clasificadas en orden de importancia de acuerdo al valor del estadístico t, lo cual es importante para la utilización de la ecuación de Andrews.

$$\text{Déficit} = -50.810 + 9.167\text{área} + 0.751\text{hp} + 18.906\text{orden}$$

1	hp
2	área
3	orden

Ahora bien, el análisis de varianza requiere que dado el número de parámetros p , y el número de observaciones n , se cumpla con la condición

$$p \leq (n-1)$$

En nuestro caso, se cuenta con 13 características fisiográficas y 9 estaciones, por tanto, el número de características que se pueden involucrar en el análisis será sólo de 7. Por esta razón, para determinar las variables significativas, será necesario probar diferentes combinaciones de 7 variables dentro de las 13 disponibles.

Bajo esta consideración se tendrían demasiadas combinaciones, sin embargo, si se tiene en cuenta que en la predicción del evento deberán intervenir variables que físicamente tengan relación con él (por ejemplo, para el caso del déficit, es muy probable que la precipitación es una variable importante), y además de experiencias en otros estudios (Clausen, Person, 1995), se pueden establecer ciertas variables que sean utilizadas como base en el análisis. Por tanto, se prueban variables tales como: área, hp, densidad d., elevación, lat. cent. y long. cent. en combinación con otras, esperando que las primeras prevalezcan.

Se puede dar el caso de que varias combinaciones de variables cumplan con las hipótesis antes vistas, por tanto, se acepta como criterio de selección, de la mejor combinación de variables, al mínimo error estándar de la regresión.

Finalmente, otro requisito del análisis de varianza es, que para poder aplicarlo a una serie de datos, requiere de que éstos estén distribuidos normalmente (Gutierrez, 1994). Por ello, las muestras correspondientes a la fisiografía y a los eventos de diseño para los diferentes periodos de retorno, deberán ser normalizados previamente. Teorías como la de correlación y regresión están basadas en que las variables tengan una distribución normal (asimetría =0 y curtosis =3).

El proceso de transformación que se utiliza en este trabajo, por considerarlo como una aceptable alternativa, es el de Box-Cox de primera potencia, ya que con él se obtienen muestras con asimetría cero.

La expresión para Box-Cox de primera potencia es la siguiente (Box, Cox, 1964)

$$y = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} \quad (5.20)$$

$$-4 \leq \lambda \leq 4$$

Tabla 5.6 Resumen del análisis de varianza para el modelo completo.

<i>Estadísticos de la regresión</i>							
R múltiple		0.962375075					
R cuadrado		0.926165785					
R cuadrado ajustado		0.803108761					
Error Estándar		0.856818559					
Observaciones		9					
<i>Análisis de Varianza</i>							
	<i>grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F</i>	<i>F crítico</i>		
Regresión	5	27.62676662	5.525353324	7.52631385	9.01		
Residual	3	2.20241413	0.734138043				
Total	8	29.82918075					
	<i>coeficientes</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Valor -P</i>	<i>inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>t crítico</i>
constante	-61.72813615	17.44026124	-3.539404331	0.00762649	-117.230883	-6.2253891	3.182
área	11.63767772	4.826430978	2.411238818	0.04242611	-3.72219412	26.9975496	
hp	0.818171444	0.190926588	4.285267202	0.00266841	0.210557261	1.42578563	
elevación	3.87888E-12	7.47737E-11	0.051874936	0.95990026	-2.3408E-10	2.4184E-10	
densidad d.	3.12114E-05	3.68461E-05	0.847075781	0.42156906	-8.6049E-05	0.00014847	
orden	20.46850703	8.540962286	2.396510645	0.04341248	-6.71267234	47.6496864	

Tabla 5.7 Resumen del análisis de varianza para modelo reducido.

<i>Estadísticos de la regresión</i>							
R múltiple		0.951287263					
R cuadrado		0.904947456					
R cuadrado ajustado		0.847915929					
Error Estándar		0.753039112					
Observaciones		9					
<i>Análisis de Varianza</i>							
	<i>grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F</i>	<i>F crítico</i>		
Regresión	3	26.99384123	8.997947078	15.8674949	5.41		
Residual	5	2.835339519	0.567067904				
Total	8	29.82918075					
	<i>coeficientes</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Valor -P</i>	<i>inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>t crítico</i>
constante	-50.81051413	10.95133959	-4.639661997	0.00166694	-78.9617828	-22.659245	2.571
área	9.16734442	3.336310893	2.74774885	0.02514625	0.591098253	17.7435906	
hp	0.751127272	0.129811133	5.786308556	0.00041154	0.417437676	1.08481687	
orden	18.90618592	6.688503992	2.826668855	0.02226409	1.712867145	36.0995047	

Una vez establecidos todos los criterios y requisitos necesarios, se procede a la identificación de las regiones homogéneas. El primer paso es normalizar los datos mediante Box-Cox de primera potencia, luego de esto, se realiza el análisis de varianza para la determinación de las variables X_1 , X_2 , etc, y finalmente, se lleva a cabo el trazo de la función de Andrews para los sitios de análisis. Lo anterior para todos los eventos de sequía, para los diferentes niveles de truncamiento y periodos de retorno analizados.

La normalización de la fisiografía es presentada en la tabla 5.8, mientras que los eventos de diseño, en las tablas 5.9 a 5.11. El proceso de normalización proporcionó prácticamente asimetría cero, excepto para el tiempo de ocurrencia de Qr85% y Qr90%.

Del resumen del análisis de varianza (tabla 5.12) se observa que las variables que resultaron ser significativas para el déficit son principalmente hp, área, orden y densidad d., esto para Qr85% y Qr90%, mientras que para Qr95%, sólo las tres primeras. En lo que respecta a la duración, sólo para Qr95% se tiene un grupo bien definido; hp y elevación, para los otros niveles de truncamiento sólo se puede destacar la presencia de la latitud del centriode. Por último, para el tiempo de ocurrencia, la latitud del centriode y la longitud del centriode son las de mayor aparición, aunque para el caso de Qr95% la densidad d. es de considerable significancia.

Con la información de la tabla 5.12 son graficadas las curvas de Andrews para los tres eventos, para los tres niveles de truncamiento y diferentes periodos de retorno, sin embargo, las curvas para el déficit son las que determinan las regiones por ser el evento de mayor importancia dentro de la sequía. De acuerdo a estas curvas se acepta que existen dos regiones dentro de las nueve estaciones. Definitivamente las estaciones de la región hidrológica 10 forman una región, y la estación de la región 24 (San Antonio) junto con las de la región 36 forman otra. Por tanto, para la regionalización de la región hidrológica 36 se tendrán sólo cinco estaciones y con ellas se desarrollarán los métodos regionales.

Las curvas en las cuales se aprecia de una manera muy clara, la agrupación de los sitios, se presentan en las figuras 5.4 a 5.9.

Tabla 5.8 Fisiografía normalizada

BOX-COX primera	área	long. cauce	hp	perímetro	orden	Scuena	Scauce
λ	-0.241233394	-1.823400526	0.212399532	-0.476795145	-0.5	2.154927709	-0.2841949
1	3.64631	0.5483789	12.76018	1.99898	1.0000	-0.4637019	-13.26231
2	3.76174	0.5484177	12.09497	2.01803	1.0000	-0.4638118	-14.03411
3	3.81213	0.5484216	10.60775	2.03173	1.0000	-0.4639120	-15.58136
4	3.62675	0.5483076	12.22793	1.98181	1.0000	-0.4637869	-8.06664
5	3.64003	0.5483330	15.79720	1.97507	1.0000	-0.4635721	-7.94113
6	3.68339	0.5483835	16.00238	1.98899	1.0000	-0.4632190	-4.45980
7	3.47316	0.5483300	15.90985	1.93459	0.8453	-0.4633327	-9.05837
8	3.62176	0.5483606	15.90218	1.96891	1.0000	-0.4633358	-7.70360
9	3.53177	0.5482887	11.10386	1.96829	1.0000	-0.4634202	-12.34207
coef. asimetría	9.98483E-07	3.26881E-05	-0.000234106	-0.000949978	-3	-0.000458056	-2.89128E-05
curtosis	0.461631199	0.338630365	0.242881015	0.485227917	1.357142857	0.288054523	0.344735401

	elevación	p. forma	densidad d.	lat. cent.	long. cent.	coef. esc.
λ	3.170700349	-0.305865311	-2.846976367	-1.846956982	4	1.570056078
1	18198894227.48	-3.45585	-11064.989	0.5400070	31017612.39	-0.60145
2	12820680048.62	-4.90912	-16009.016	0.5400563	30771476.96	-0.60274
3	10020301199.67	-5.38986	-31560.723	0.5400493	30341377.45	-0.61135
4	18536453319.45	-3.83420	-29666.530	0.5401124	30550047.92	-0.57022
5	12812068230.24	-4.34259	-37690.370	0.5400672	32065131.38	-0.59303
6	5409789185.24	-4.62134	-22490.868	0.5399814	31776853.32	-0.58643
7	373045167.19	-3.09829	-1632.966	0.5399393	32222098.54	-0.58603
8	4965251897.65	-4.23869	-14530.096	0.5399198	31538110.17	-0.58279
9	7765301565.67	-2.89136	-19.619	0.5401518	32282623.72	-0.58852
coef. asimetría	6.02246E-10	5.83298E-05	0.000176804	0.00056072	-0.17851372	0.000293066
curtosis	0.374151628	0.357927113	0.341880085	0.374375904	0.280349697	0.45691408

Tabla 5.9 Eventos de diseño normalizados Qr85%
BOX-COX primera déficit85

	2	5	10	20	50	100
λ	-0.055876276	0.01280153	-0.066168537	-0.035478444	0.019881821	0.066500077
1	5.69624	5.30991	6.03895	6.89545	8.80886	10.98968
2	6.00226	8.55146	6.48072	7.50175	9.83783	12.58941
3	5.27244	7.37803	5.84998	6.70580	8.58421	10.71789
4	4.81857	6.78144	5.52153	6.30766	7.98534	9.85083
5	6.24521	9.01825	6.72357	7.82036	10.36916	13.41895
6	6.45257	9.07069	6.69120	7.72846	10.14320	13.00543
7	5.18332	6.83152	5.42281	6.07081	7.46060	8.96080
8	7.02379	9.98560	7.09437	8.21182	10.86114	14.02937
9	4.33098	6.11317	5.13629	5.85621	7.34850	8.97833
asimetría	4.36872E-05	-1.8254E-05	-7.33007E-06	0.00041719	0.000142724	-1.19587E-05
curtosis	0.39122872	0.33635191	0.314814944	0.300852195	0.290964475	0.286769928

BOX-COX primera duración85

	2	5	10	20	50	100
λ	-0.39689784	-4	-3.034561864	-1.011711087	-0.754297008	-1.011362672
1	1.97574	0.249999988	0.3295363	0.97757	1.28338	0.97962
2	1.98419	0.249999990	0.3295363	0.97808	1.28491	0.98006
3	1.91238	0.249999988	0.3295365	0.97998	1.29360	0.98291
4	1.99444	0.249999995	0.3295366	0.98017	1.29174	0.98203
5	1.96548	0.249999994	0.3295366	0.98133	1.29732	0.98377
6	1.97823	0.249999991	0.3295364	0.97852	1.28644	0.98053
7	2.02302	0.249999993	0.3295365	0.97867	1.28613	0.98032
8	2.04637	0.249999997	0.3295367	0.98095	1.29372	0.98248
9	1.94069	0.249999990	0.3295365	0.97980	1.29255	0.98258
asimetría	-0.000774568	0.35132452	-0.000139619	4.07042E-05	5.58257E-05	2.95928E-05
curtosis	0.481141678	0.33291515	0.374241597	0.324843988	0.305808236	0.292450955

BOX-COX primera tiempo de ocu85

	2	5	10	20	50	100
λ	3.428631534	-2.1	-4	-4	-4	-4
1	6583035.77	0.47617778	0.24999999958	0.24999999963	0.249999999676	0.24999999970
2	6182439.90	0.47617763	0.24999999960	0.24999999968	0.249999999746	0.24999999979
3	8278096.91	0.47617959	0.24999999969	0.24999999973	0.249999999766	0.24999999979
4	5966680.20	0.47617786	0.24999999961	0.24999999967	0.249999999724	0.24999999975
5	4353891.41	0.47618029	0.24999999984	0.24999999992	0.249999999958	0.24999999997
6	6508085.36	0.47617826	0.24999999963	0.24999999969	0.249999999740	0.24999999977
7	6348376.31	0.47617775	0.24999999961	0.24999999968	0.249999999745	0.24999999979
8	4517189.53	0.47617599	0.24999999954	0.24999999965	0.249999999742	0.24999999979
9	6521265.86	0.47617990	0.24999999975	0.24999999980	0.249999999846	0.24999999987
asimetría	0.000211651	-0.04264904	1.146645242	1.637035218	1.649305007	1.442292323
curtosis	0.544853615	0.42596392	0.553613567	0.699169193	0.756432027	0.733729566

Tabla 5.10 Eventos de diseño normalizados Qr90%
déficit90

BOX-COX primera	2	5	10	20	50	100
λ	-0.091606616	-0.137666872	-0.215336241	-0.247860652	-0.118707963	0.032348428
1	4.50927	4.42087	3.66453	3.41063	5.10226	9.16744
2	4.84116	4.64685	3.78479	3.49855	5.33682	9.97833
3	4.57623	4.26984	3.52921	3.27916	4.70628	7.81737
4	3.80419	3.98193	3.45904	3.28959	4.90249	8.74598
5	5.04219	4.81064	3.87279	3.56367	5.52902	10.71516
6	5.36032	4.84371	3.85768	3.53760	5.41093	10.17315
7	4.12682	4.00510	3.39379	3.18801	4.53704	7.42104
8	5.89574	5.15336	3.99856	3.63175	5.67274	11.12800
9	3.35818	3.72422	3.32748	3.20389	4.73847	8.30420
asimetría	0.000907575	0.000548571	2.39127E-05	0.000238333	0.000186865	-0.000101224
curtosis	0.426726261	0.346105357	0.300794081	0.281772124	0.298261772	0.317514211

BOX-COX primera	2	5	10	20	50	100
λ	-1.368613243	-4	-2.607723891	0.55138042	0.000594733	-0.480853674
1	0.72475	0.249999968	0.38347	17.28248	4.39857	1.83693
2	0.72395	0.249999974	0.38347	19.53051	4.68657	1.87401
3	0.72513	0.249999974	0.38347	18.84148	4.60390	1.86441
4	0.72408	0.249999981	0.38347	21.53199	4.86623	1.89228
5	0.72159	0.249999976	0.38347	21.86828	4.93327	1.89963
6	0.72495	0.249999976	0.38347	19.22901	4.64481	1.86899
7	0.72642	0.249999984	0.38347	18.82596	4.52881	1.85096
8	0.72782	0.249999996	0.38347	22.93842	4.86356	1.88509
9	0.72184	0.249999968	0.38347	22.22535	5.05941	1.91662
asimetría	0.000187634	1.18038601	7.22285E-05	-1.91596E-05	-0.000422595	1.6593E-05
curtosis	0.447403264	0.614509	0.540923541	0.317176374	0.369155071	0.418345275

BOX-COX primera	2	5	10	20	50	100
λ	4	-4	-2.29159345	-4	-4	-4
1	107528333.07	0.2499999957	0.4363738	0.2499999968	0.24999999720	0.24999999745
2	109216329.87	0.2499999959	0.4363739	0.2499999970	0.24999999742	0.24999999767
3	135410233.33	0.2499999968	0.4363744	0.2499999976	0.24999999795	0.24999999814
4	102989333.39	0.2499999957	0.4363738	0.2499999968	0.24999999727	0.24999999752
5	94220626.04	0.2499999960	0.4363741	0.2499999975	0.24999999793	0.24999999818
6	100267961.58	0.2499999956	0.4363739	0.2499999971	0.24999999774	0.24999999810
7	118515661.17	0.2499999962	0.4363740	0.2499999971	0.24999999752	0.24999999775
8	75284426.98	0.2499999953	0.4363738	0.2499999972	0.24999999778	0.24999999812
9	123220769.21	0.2499999974	0.4363750	0.2499999985	0.24999999883	0.24999999901
asimetría	-0.25963951	1.175058764	1.863544895	1.69578419	1.371822267	1.104014266
curtosis	0.516793851	0.582677192	0.80597818	0.78592285	0.719790045	0.640338242

Tabla 5.11 Eventos de diseño normalizados Qr95%
déficit95

BOX-COX primera	2	5	10	20	50	100
λ	-0.01432077	0.05966938	0.08533156	0.06305531	-0.04910396	-0.12817852
1	4.58744	7.00269	8.27549	8.11061	5.80812	4.62528
2	5.32580	8.19409	9.81054	9.52274	6.47423	5.00170
3	4.94901	6.80046	7.69241	7.37606	5.34265	4.31345
4	6.06744	8.44775	9.70484	9.19057	6.23397	4.84347
5	5.62208	8.91705	11.12844	11.04228	7.27886	5.47047
6	5.98986	8.90963	10.54436	10.07302	6.67191	5.09509
7	4.29816	5.86155	6.72837	6.63362	5.03063	4.15136
8	7.45589	10.79083	12.49063	11.46100	7.11136	5.28331
9	3.09778	4.90632	6.07898	6.41527	5.15121	4.32524
asimetría	-4.4716E-05	3.8782E-06	0.00030551	-0.00020619	-6.8388E-05	-4.1433E-05
curtosis	0.53222157	0.43607241	0.36131248	0.31471059	0.30341338	0.31655396

duración95

BOX-COX primera	2	5	10	20	50	100
λ	-0.63349974	-1.62665336	-0.77223509	-0.06253007	0.60276284	0.98976602
1	1.27663	0.61262	1.22840	3.62448	21.5843	89.6927
2	1.37474	0.61346	1.23757	3.71495	22.3188	91.1899
3	1.33511	0.61246	1.21569	3.34019	15.4859	49.4621
4	1.35118	0.61343	1.24018	3.80206	24.7965	110.2665
5	1.35208	0.61338	1.23908	3.77946	24.2781	106.5367
6	1.38112	0.61315	1.23120	3.60721	20.3426	78.9194
7	1.41403	0.61371	1.23957	3.70353	21.2184	81.1041
8	1.44082	0.61417	1.25413	4.02254	28.2898	128.8186
9	1.30487	0.61241	1.22158	3.49236	18.8586	71.5232
asimetría	9.7319E-06	0.00030148	0.00027467	5.7455E-05	-0.00019415	-0.00020677
curtosis	0.43057788	0.36979138	0.48131087	0.53599681	0.51815427	0.47843665

tiempo de ocu95

BOX-COX primera	2	5	10	20	50	100
λ	-0.47309207	-2.43352498	-2.29159345	-2.0167554	-1.94508708	-1.78733239
1	1.91430	0.4109248	0.4363742	0.4958316	0.514097	0.559449
2	1.91063	0.4109247	0.4363742	0.4958321	0.514098	0.559453
3	1.92428	0.4109251	0.4363747	0.4958330	0.514097	0.559449
4	1.91429	0.4109247	0.4363739	0.4958301	0.514094	0.559440
5	1.90598	0.4109246	0.4363738	0.4958299	0.514094	0.559441
6	1.91490	0.4109247	0.4363739	0.4958300	0.514093	0.559440
7	1.91657	0.4109247	0.4363738	0.4958290	0.514091	0.559435
8	1.90445	0.4109242	0.4363729	0.4958263	0.514088	0.559429
9	1.92150	0.4109252	0.4363751	0.4958352	0.514101	0.559458
asimetría	1.63E-05	-0.00096957	4.9854E-06	-0.00033687	1.3866E-05	-0.0009291
curtosis	0.40839773	0.55932544	0.57270684	0.52438776	0.4442797	0.39560902

Tabla 5.12 Resultados del análisis de varianza con fines de agrupación de regiones
Qr85%

Deficit(D)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	hp	hp	hp	hp	hp	hp	hp
x2	long. cauce	hp	área	área	área	área	área
x3	orden		orden	orden	orden	orden	orden
x4			densidad d.	densidad d.	densidad d.	densidad d.	densidad d.

Duración(T)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	hp	Scauce	Scauce	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.
x2	densidad d.	hp	lat. cent.	hp	hp	hp	Scauce
x3	Scauce	lat. cent.					

Tiempo ocu(t)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	long. cauce	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.
x2	lat. cent.	long. cent.	long. cent.	long. cent.	long. cent.	long. cent.	long. cent.
x3		área	área	área	área	área	área
x4			hp	hp	hp	hp	hp

Qr90%

Deficit(D)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	hp	hp	hp	hp	hp	hp	orden
x2	long. cauce	área	área	área	orden	orden	hp
x3	orden	orden	orden	área	área	área	
x4		densidad d.	densidad d.	densidad d.	densidad d.	densidad d.	

Duración(T)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	long. cauce	hp	Scauce	long. cent.	long. cent.	lat. cent.	long. cent.
x2	hp	Scauce	lat. cent.	orden	orden	Scuena	lat. cent.
x3	densidad d.						orden

Tiempo ocu(t)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	lat. cauce	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	long. cent.	long. cent.
x2	long. cent.	long. cent.	long. cent.	long. cent.	long. cent.	lat. cent.	lat. cent.
x3						área	área

Qr95%

Deficit(D)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	Scauce	hp	hp	hp	hp	hp	hp
x2	área	orden	orden	orden	orden	orden	orden
x3		área	área	área	elevación	elevación	área
x4							lat. cent.

Duración(T)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	hp	hp	hp	hp	hp	hp	hp
x2	long. cauce	elevación	elevación	elevación	elevación	elevación	elevación

Tiempo ocu(t)		Tr(años)					
variable		2	5	10	20	50	100
x1	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.	lat. cent.
x2	densidad d.	densidad d.	densidad d.	densidad d.	densidad d.	long. cauce	long. cauce
x3	long. cauce				long. cauce	densidad d.	densidad d.
x4						long. cent.	long. cent.
x5							elevación

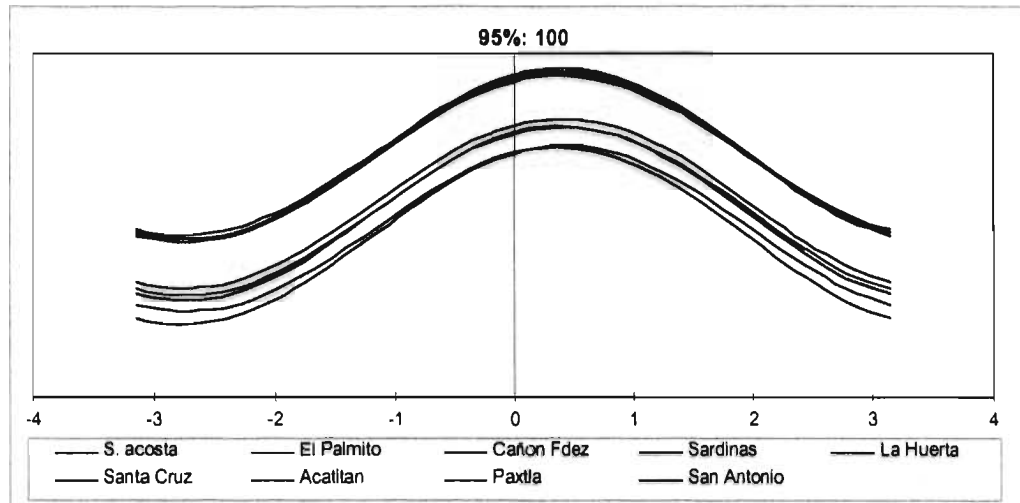


Figura 5.4 Curvas de Andrews para Qr 95% y para periodo de retorno de 100 años.

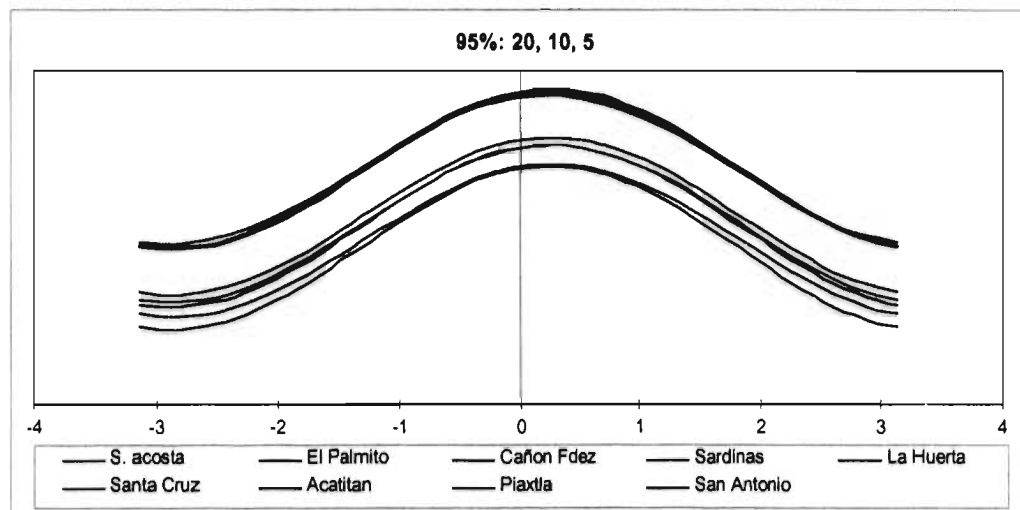


Figura 5.5 Curvas de Andrews para Qr95% y periodo de retorno de 20, 10 y 5 años.

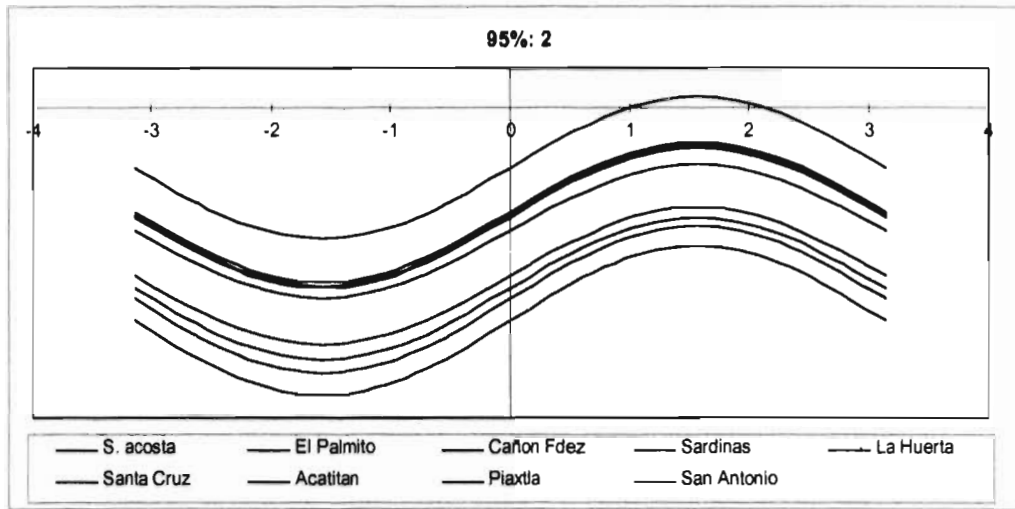


Figura 5.6 Curvas de Andrews para Q_r 95% y periodo de retorno de 2 años.

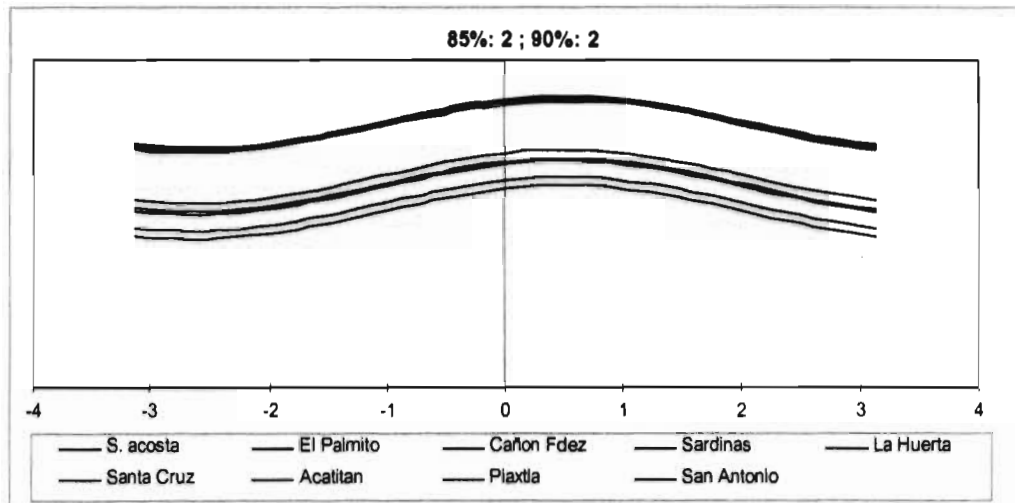


Figura 5.7 Curvas de Andrews para Q_r 85% y Q_r 90%, y periodo de retorno de 2 años en ambos casos.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

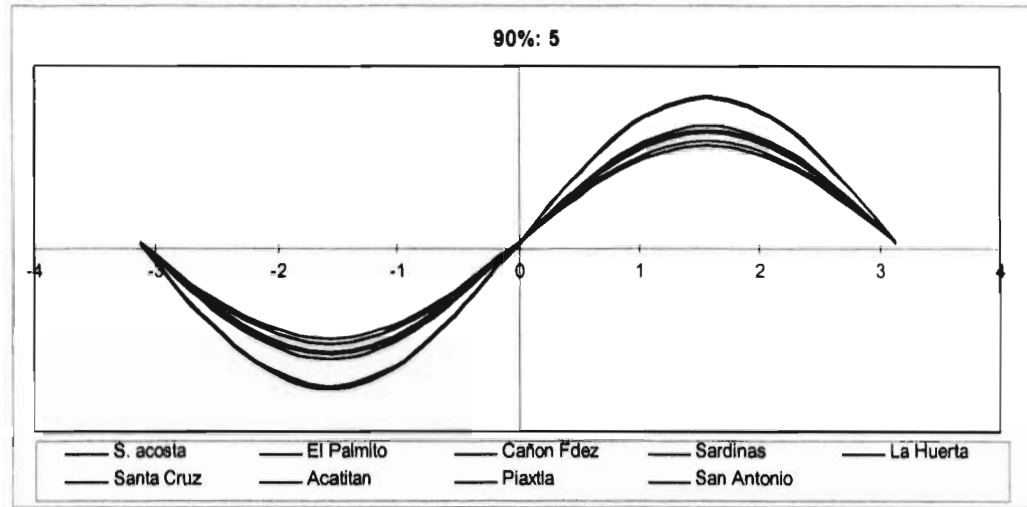


Figura 5.8 Curvas de Andrews para Qr 90% y periodo de retorno de 5 años.

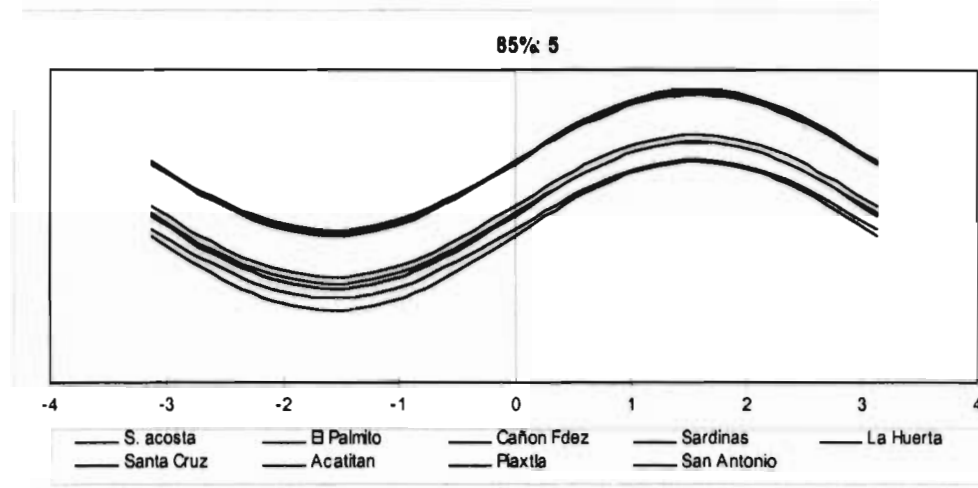


Figura 5.9 Curvas de Andrews para Qr 85% y periodo de retorno de 5 años.

El procedimiento para calcular un evento mediante esta opción será: primero obtener los parámetros regionales, luego utilizarlos en la distribución característica para obtener un evento para cualquier periodo de retorno.

Con el fin de encontrar una distribución característica se analizaron los errores estándar de ajuste de las diferentes distribuciones, para todos los sitios, eventos y niveles de truncamiento. De esto se concluyó que no se puede obtener una distribución representativa de la región, y por tanto, se procede con la primera alternativa.

Una vez definido que se trabajará con la primera opción del método se realiza el análisis de varianza para todos los eventos y periodos de retorno. De las tabla 5.13 se concluye que para el déficit, básicamente las variables significativas son área, hp y densidad, esto para Qr 85% y Qr90%, mientras que para Qr95% la densidad de drenaje es sustituida por la latitud del centroide.

En el caso de la duración se incluyó como variable independiente al déficit, ya que se espera que físicamente exista relación entre ellos. De la tabla 5.14 se observa que el déficit es significativo para Qr95% en compañía de hp y lat. cent., para Qr90% sólo en algunas ocasiones, y para Qr85% en ningún caso, en éste el área, lat. cent. y Scauce son las significativas.

Por último, para el tiempo de ocurrencia (tabla 5.15) se incluyó además del déficit, a la duración, sin embargo, estos dos no resultaron ser significativas para ningún evento y nivel de truncamiento. Para Qr85% y Qr90% la lat. cent., long. cent. y el área son las significativas, y para Qr95% el área es sustituida por la longitud del cauce.

Finalmente, cabe mencionar la presencia de características tales como la longitud del cauce y la pendiente del cauce para periodos de retorno pequeños, en lo que respecta al déficit y la duración.

Tabla 5.13 Regresión para el déficit.

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
constante	-8219.334435	constante	-13716.91514	constante	-17.57142739	constante	-21.70810781	constante	-34.09198166	constante	-50.96872005
lat. cent.	3109.257262	área	16.82834314	área	5.339140219	área	6.519997848	área	9.871264362	área	14.34696071
long. cauc	11926.13175	lat. cent.	25280.17448	hp	0.345843864	hp	0.407004741	hp	0.589233026	hp	0.830272504
hp	0.465786735	hp	0.738655387	densidad d.	1.78398E-05	densidad d.	2.20944E-05	densidad d.	3.44214E-05	densidad d.	5.12264E-05

Q_{90%}

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
constante	-4600.626025	constante	-12.55472079	constante	-4.518846356	constante	-1.675159854	constante	-4.597388831	constante	-2158.973291
hp	0.198949357	hp	0.244189029	hp	0.140360075	hp	0.104312213	hp	0.250392467	hp	0.723600139
long. cauc	8387.804219	área	3.841434131	área	1.779464049	área	1.052234769	área	1.850867818	long. cauc	3937.660965
área	0.800859645	densidad d.	1.29105E-05	densidad d.	6.76376E-06	densidad d.	4.6885E-06	densidad d.	1.09264E-05		

Q_{95%}

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
constante	-35.2922586	constante	-44.9080712	constante	-13805.77646	constante	-11907.2795	constante	-5423.501718	constante	-3037.026712
área	11.19437444	área	13.12138271	área	17.91069194	área	14.55617799	área	6.048879652	área	3.067869837
hp	0.300770356	hp	0.721259719	hp	2.204549466	hp	1.907182462	hp	0.86945392	hp	0.480064363
Scauce	0.362367937	Scauce	0.373990379	lat. cent	25408.17766	lat. cent	21921.88768	lat. cent	9992.764325	lat. cent	5600.56434

Tabla 5.14 Regresión para la **duración**.**Qr5%**

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
constante	1.482660441	constante	0.249990981	constante	0.328469062	constante	-10.80106909	constante	-43.73450945	constante	-13.10705903
area	0.054972708	area	1.25219E-08	area	7.66235E-07	area	0.005437405	area	0.022533713	area	0.007192271
Scauce	0.005220423	lat. cent.	1.66211E-05	lat. cent.	0.00197165	lat. cent.	21.77511803	lat. cent.	83.21231003	lat. cent.	26.03722047
hp	0.02915567	Scauce	1.06398E-09	Scauce	2.30477E-08						

Qr90%

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
constante	-13.48185289	constante	0.249999824	constante	0.366829276	constante	-20760.18075	constante	-2616.065032	constante	-297.2253857
Scauce	0.000307498	Scauce	2.21566E-09	lat. cent.	0.03079481	lat. cent.	38461.04426	lat. cent.	4850.489036	area	0.062309886
long. cauce	25.9129401	area	4.80649E-08	D10	2.77161E-06	D20	2.458000957	D50	0.087449758	lat. cent.	553.0732231
								area	0.197196801	long. cent.	5.54908E-09

Qr95%

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
constante	-831.6202367	constante	-1.467355477	constante	-47.07165308	constante	-845.0796735	constante	-15808.85819	constante	-96702.17319
lat. cent.	861.1189939	lat. cent.	3.846745799	hp	0.006292156	hp	0.137210476	hp	2.963335658	hp	20.1187063
D2	0.023881049	D5	0.000381597	lat. cent.	89.22468024	lat. cent.	1567.259994	lat. cent.	29216.85345	lat. cent.	178548.896
long. cauce	670.6595748			D10	0.004607068	D20	0.07663704	D50	2.640223124	D100	25.56697019

Tabla 5.15 Regresión para el tiempo de ocurrencia.

Q10%

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
Intercept	-38152620.19	Intercept	0.476157978	Intercept	0.249999545	Intercept	0.2499995	Intercept	0.249999492	Intercept	0.249999505
perimetro	22432059.65	long. cent.	6.63777E-13	lat. cent.	8.33466E-07	lat. cent.	9.17013E-07	lat. cent.	9.32815E-07	lat. cent.	9.08077E-07
				long. cent.	7.82649E-17	long. cent.	7.67189E-17	long. cent.	7.51106E-17	long. cent.	7.40259E-17
				area	5.23019E-10	area	5.28821E-10	area	5.37606E-10	area	5.3962E-10

Q10%

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
Intercept	-877055614.2	Intercept	0.2499996	Intercept	0.433704961	Intercept	0.249999599	Intercept	0.249999626	Intercept	0.249999656
long. cent.	16.69779354	lat. cent.	7.30303E-07	lat. cent.	0.004876264	lat. cent.	7.3164E-07	lat. cent.	6.82296E-07	lat. cent.	6.27501E-07
area	129285563.5	long. cent.	1.05372E-16	long. cent.	7.01832E-13	long. cent.	1.00709E-16	long. cent.	9.47426E-17	long. cent.	9.05898E-17
		area	6.40404E-10	area	3.78368E-06	area	5.50653E-10	area	5.02361E-10	area	4.67864E-10

Q15%

2		5		10		20		50		100	
x	β	x	β	x	β	x	β	x	β	x	β
Intercept	1.6960396	Intercept	0.410909455	Intercept	0.429915884	Intercept	0.468222789	Intercept	0.476939602	Intercept	0.469528767
area	0.023719303	long. cent.	3.39729E-13	lat. cent.	0.005480175	lat. cent.	0.020522573	lat. cent.	0.022183546	lat. cent.	0.046544826
long. cent.	4.31644E-09	area	1.33995E-06	long. cent.	5.08844E-13	long. cent.	2.48032E-12	long. cent.	4.24106E-12	long. cent.	1.0311E-11
				long. cauc	0.006351727	long. cauce	0.029996552	long. cauc	0.045673052	long. cauc	0.117556648

5.5.1 Ecuaciones regionales

Una vez definidas las variables significativas, y obtenidos los coeficientes de regresión, se presentan las ecuaciones regionales para los diferentes periodos de retorno. Estas ecuaciones son aplicadas para la estación El Palmito con fines de comparación con la modelación puntual. Los eventos obtenidos por la ecuaciones predictivas son sujetos al proceso de desnormalización.

- **Déficit.**

Qr85%.

$$D_2 = -8219.334435 + 3109.257262 \text{long. cauce} + 11926.13175 \text{hp} + 0.465786735 \text{lat. cent.}$$

$$D_5 = -13716.91514 + 16.82834314 \text{área} + 25280.17448 \text{lat. cent.} + 0.738655387 \text{hp.}$$

$$D_{10} = -17.57142739 + 5.339140219 \text{hp} + 0.345843864 \text{área} + 1.78398 \text{E-}05 \text{densidad d.}$$

$$D_{20} = -21.70810781 + 6.519997848 \text{hp} + 0.407004741 \text{área} + 2.20944 \text{E-}05 \text{densidad d.}$$

$$D_{50} = -34.09198166 + 9.871264362 \text{hp} + 0.589233026 \text{área} + 3.44214 \text{E-}05 \text{densidad d.}$$

$$D_{100} = -50.96872005 + 14.34696071 \text{hp} + 0.830272504 \text{área} + 5.12264 \text{E-}05 \text{densidad d.}$$

Qr90%.

$$D_2 = -4600.626025 + 0.198949357 \text{long. cauce} + 8387.804219 \text{hp} + 0.800859645 \text{área}$$

$$D_5 = -12.55472079 + 0.244189029 \text{área} + 3.841434131 \text{hp} + 1.29105 \text{E-}05 \text{densidad d.}$$

$$D_{10} = -4.518846356 + 0.140360075 \text{área} + 0.345843864 \text{hp} + 1.779464049 \text{densidad d.}$$

$$D_{20} = -1.675159854 + 0.104312213 \text{hp} + 1.052234769 \text{área} + 4.6885 \text{E-}06 \text{densidad d.}$$

$$D_{50} = -4.597388831 + 0.250392467 \text{hp} + 1.850867818 \text{área} + 1.09264 \text{E-}05 \text{densidad d.}$$

$$D_{100} = -2158.973291 + 0.723600139 \text{hp} + 3937.660965 \text{long. cauce}$$

Qr95%.

$$D_2 = -35.2922586 + 11.19437444 \text{área} + 0.300770356 \text{Scauce} + 0.362367937 \text{hp}$$

$$D_5 = -44.9080712 + 13.12138271 \text{área} + 0.721259719 \text{Scauce} + 0.373990379 \text{hp}$$

$$D_{10} = -13805.77646 + 17.91069194 \text{hp} + 2.204549466 \text{área} + 25408.17766 \text{lat. cent.}$$

$$D_{20} = -11907.2795 + 14.55617799 \text{hp} + 1.907182462 \text{área} + 21921.88768 \text{lat. cent.}$$

$$D_{50} = -5423.501718 + 6.048879652\mathbf{hp} + 0.86945392\mathbf{área} + 9992.764325\mathbf{lat. cent.}$$

$$D_{100} = -3037.026712 + 3.067869837\mathbf{hp} + 0.480064363\mathbf{área} + 5600.56434\mathbf{lat. cent.}$$

• **Duración.**

Qr85%.

$$T_2 = 1.482660441 + 0.054972708\mathbf{hp} + 0.005220423\mathbf{Scauce} + 0.02915567\mathbf{área}$$

$$T_5 = 0.249990981 + 1.25219\mathbf{E-08Scauce} + 1.66211\mathbf{E-05área} + 1.06398\mathbf{E-09lat. cent.}$$

$$T_{10} = 0.328469062 + 7.66235\mathbf{E-07lat. cent.} + 0.00197165\mathbf{área} + 2.30477\mathbf{E-08Scauce}$$

$$T_{20} = -10.80106909 + 0.005437405\mathbf{lat. cent.} + 21.77511803\mathbf{área}$$

$$T_{50} = -43.73450945 + 0.022533713\mathbf{lat. cent.} + 83.21231003\mathbf{área}$$

$$T_{100} = -13.10705903 + 0.007192271\mathbf{lat. cent.} + 26.03722047\mathbf{área}$$

Qr90%.

$$T_2 = -13.48185289 + 0.000307498\mathbf{long. cauce} + 25.9129401\mathbf{Scauce}$$

$$T_5 = 0.249999824 + 2.21566\mathbf{E-09Scauce} + 4.80649\mathbf{E-08área}$$

$$T_{10} = 0.366829276 + 0.03079481\mathbf{lat. cent.} + 2.77161\mathbf{E-06D}_{10}$$

$$T_{20} = -20760.18075 + 38461.04426\mathbf{lat. cent.} + 2.458000957\mathbf{D}_{20}$$

$$T_{50} = -2616.065032 + 4850.489036\mathbf{lat. cent.} + 0.087449758\mathbf{D}_{50} + 0.197196801\mathbf{área}$$

$$T_{100} = -297.2253857 + 0.062309886\mathbf{lat. cent.} + 553.0732231\mathbf{área} + 5.54908\mathbf{E-09long. cent.}$$

Qr95%.

$$T_2 = -831.6202367 + 861.1189939\mathbf{lat. cent.} + 0.023881049\mathbf{D}_2 + 670.6595748\mathbf{long. cauce}$$

$$T_5 = -1.467355477 + 3.846745799\mathbf{D}_5 + 0.000381597\mathbf{lat. cent.}$$

$$T_{10} = -47.07165308 + 0.006292156\mathbf{D}_{10} + 89.22468024\mathbf{lat. cent.} + 0.004607068\mathbf{hp}$$

$$T_{20} = -845.0796735 + 0.137210476\mathbf{hp} + 1567.259994\mathbf{lat. cent.} + 0.07663704\mathbf{D}_{20}$$

$$T_{50} = -15808.85819 + 2.963335658\mathbf{hp} + 29216.85345\mathbf{lat. cent.} + 2.640223124\mathbf{D}_{50}$$

$$\tau_{100} = -96702.17319 + 20.1187063\text{hp} + 178548.896\text{lat. cent.} + 25.56697019\text{D}_{100}$$

• **Tiempo de ocurrencia.**

Qr85%.

$$\tau_2 = -38152620.19 + 22432059.65\text{perímetro}$$

$$\tau_5 = 0.476157978 + 6.63777\text{E-13long. cauce}$$

$$\tau_{10} = 0.249999545 + 8.33466\text{E-07lat. cent.} + 7.82649\text{E-17long. cauce} + 5.23019\text{E-10área}$$

$$\tau_{20} = 0.2499995 + 9.17013\text{E-07lat. cent.} + 7.67189\text{E-17long. cauce} + 5.28821\text{E-10área}$$

$$\tau_{50} = 0.249999492 + 9.32815\text{E-07lat. cent.} + 7.51106\text{E-17área} + 5.37606\text{E-10long. cent.}$$

$$\tau_{100} = 0.249999505 + 9.08077\text{E-07lat. cent.} + 7.40259\text{E-17área} + 5.3962\text{E-10long. cent.}$$

Qr90%.

$$\tau_2 = -877055614.2 + 16.69779354\text{área} + 129285563.5\text{long. cent.}$$

$$\tau_5 = 0.2499996 + 7.30303\text{E-07long. cent.} + 1.05372\text{E-16área} + 6.40404\text{E-10lat. cent.}$$

$$\tau_{10} = 0.433704961 + 0.004876264\text{long. cent.} + 7.01832\text{E-13área} + 3.78368\text{E-06lat. cent.}$$

$$\tau_{20} = 0.249999599 + 7.3164\text{E-07long. cent.} + 1.00709\text{E-16área} + 5.50653\text{E-10lat. cent.}$$

$$\tau_{50} = 0.249999626 + 6.82296\text{E-07long. cent.} + 9.47426\text{E-17área} + 5.02361\text{E-10lat. cent.}$$

$$\tau_{100} = 0.249999656 + 6.27501\text{E-07long. cent.} + 9.05898\text{E-17área} + 4.67864\text{E-10lat. cent.}$$

Qr95%.

$$\tau_2 = 1.6960396 + 0.023719303\text{long. cent.} + 4.32\text{E-09área}$$

$$\tau_5 = 0.410909455 + 3.39729\text{E-13long. cent.} + 1.33995\text{E-06área}$$

$$\tau_{10} = 0.429915884 + 0.005480175\text{long. cent.} + 5.08844\text{E-13long. cauce} + 0.006351727\text{lat.cent.}$$

$$\tau_{20} = 0.468222789 + 0.020522573\text{long. cent.} + 2.48032\text{E-12long. cauce} + 0.029996552\text{lat.cent.}$$

$$\tau_{50} = 0.476939602 + 0.022183546\text{long. cent.} + 4.24106\text{E-12long. cauce} + 0.045673052\text{lat.cent.}$$

$$\tau_{100} = 0.469528767 + 0.046544826\text{long. cent.} + 1.0311\text{E-11long. cauce} + 0.117556648\text{lat.cent.}$$

Datos pronosticados por las ecuaciones de regresión

Estación El Palmito

Déficit

Qr65%	
D ₂ =	5.97504418
D ₅ =	8.04048584
D ₁₀ =	6.41039776
D ₂₀ =	7.38742374
D ₅₀ =	9.61684184
D ₁₀₀ =	12.222838

Qr90%	
D ₂ =	4.81318495
D ₅ =	4.64252966
D ₁₀ =	3.76440449
D ₂₀ =	3.46966864
D ₅₀ =	5.21866342
D ₁₀₀ =	9.26160062

Qr95%	
D ₂ =	5.37036445
D ₅ =	7.92615154
D ₁₀ =	10.1092878
D ₂₀ =	9.59792413
D ₅₀ =	6.42394159
D ₁₀₀ =	4.94023551

Parámetro λ de box-cox de primera potencia

$$y = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}$$

Qr65%	
D ₂ =	-0.05587628
D ₅ =	0.01280153
D ₁₀ =	-0.06616854
D ₂₀ =	-0.03547844
D ₅₀ =	0.01988182
D ₁₀₀ =	0.06650008

Qr90%	
D ₂ =	-0.09160662
D ₅ =	-0.13766687
D ₁₀ =	-0.21533624
D ₂₀ =	-0.24786065
D ₅₀ =	-0.11870796
D ₁₀₀ =	0.03234843

Qr95%	
D ₂ =	-0.01432077
D ₅ =	0.05966938
D ₁₀ =	0.08533156
D ₂₀ =	0.06305531
D ₅₀ =	-0.04910396
D ₁₀₀ =	-0.12817852

Eventos desnormalizados

Déficit (miles m³)

$$x = (y\lambda + 1)^{1/\lambda}$$

Qr65%	
D ₂ =	1437.57211
D ₅ =	2107.06172
D ₁₀ =	4193.87692
D ₂₀ =	5254.68019
D ₅₀ =	6634.72875
D ₁₀₀ =	7674.09472

Qr90%	
D ₂ =	570.994497
D ₅ =	1641.72189
D ₁₀ =	2269.39764
D ₂₀ =	2785.45945
D ₅₀ =	3428.28668
D ₁₀₀ =	3297.81931

Qr95%	
D ₂ =	267.231382
D ₅ =	658.654994
D ₁₀ =	1464.34257
D ₂₀ =	1817.63306
D ₅₀ =	2248.27711
D ₁₀₀ =	2502.95375

Datos pronosticados por las ecuaciones de regresión

Estación El Palmito

Duración

Q85%	
T ₂ =	1.96882643
T ₅ =	0.24999999
T ₁₀ =	0.32953642
T ₂₀ =	0.97917493
T ₅₀ =	1.28958968
T ₁₀₀ =	0.98156165

Q90%	
T ₂ =	0.72494666
T ₅ =	0.24999997
T ₁₀ =	0.3834707
T ₂₀ =	19.5479478
T ₅₀ =	4.68063668
T ₁₀₀ =	1.87043989

Q95%	
T ₂ =	1.36126815
T ₅ =	0.61323066
T ₁₀ =	1.23599888
T ₂₀ =	3.71831102
T ₅₀ =	22.8224515
T ₁₀₀ =	95.4964587

Parámetro λ de box-cox de primera potencia

$$y = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}$$

Q85%	
T ₂ =	-0.39689784
T ₅ =	-4
T ₁₀ =	-3.03456186
T ₂₀ =	-1.01171109
T ₅₀ =	-0.75429701
T ₁₀₀ =	-1.01136267

Q90%	
T ₂ =	-1.36861324
T ₅ =	-4
T ₁₀ =	-2.60772389
T ₂₀ =	0.55138042
T ₅₀ =	0.00059473
T ₁₀₀ =	-0.48085367

Q95%	
T ₂ =	-0.63349974
T ₅ =	-1.62665336
T ₁₀ =	-0.77223509
T ₂₀ =	-0.06253007
T ₅₀ =	0.60276284
T ₁₀₀ =	0.98976602

Eventos desnormalizados
Duración (días)

$$x = (y\lambda + 1)^{1/\lambda}$$

Q85%	
T ₂ =	46.1203709
T ₅ =	69.8454955
T ₁₀ =	86.1804279
T ₂₀ =	101.236763
T ₅₀ =	118.562692
T ₁₀₀ =	129.880475

Q90%	
T ₂ =	34.5957617
T ₅ =	55.7299902
T ₁₀ =	72.0781255
T ₂₀ =	87.6094881
T ₅₀ =	107.139737
T ₁₀₀ =	118.659564

Q95%	
T ₂ =	22.8841433
T ₅ =	39.9125386
T ₁₀ =	54.6477058
T ₂₀ =	68.8522538
T ₅₀ =	86.9714203
T ₁₀₀ =	100.129993

Datos pronosticados por las ecuaciones de regresión

Estación El Palmito

Tiempo de ocurrencia

Q85%	
$\tau_2=$	7115972.13
$\tau_5=$	0.4761784
$\tau_{10}=$	0.25
$\tau_{20}=$	0.25
$\tau_{50}=$	0.25
$\tau_{100}=$	0.25

Q90%	
$\tau_2=$	123098682
$\tau_5=$	0.25
$\tau_{10}=$	0.436374248
$\tau_{20}=$	0.25
$\tau_{50}=$	0.25
$\tau_{100}=$	0.25

Q95%	
$\tau_2=$	1.91808873
$\tau_5=$	0.41092495
$\tau_{10}=$	0.43637454
$\tau_{20}=$	0.4958331
$\tau_{50}=$	0.51409838
$\tau_{100}=$	0.55945303

Parámetro λ de box-cox de primera potencia

$$y = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}$$

Q85%	
$\tau_2=$	3.42863153
$\tau_5=$	-2.1
$\tau_{10}=$	-4
$\tau_{20}=$	-4
$\tau_{50}=$	-4
$\tau_{100}=$	-4

Q90%	
$\tau_2=$	4
$\tau_5=$	-4
$\tau_{10}=$	-2.29159345
$\tau_{20}=$	-4
$\tau_{50}=$	-4
$\tau_{100}=$	-4

Q95%	
$\tau_2=$	-0.47309207
$\tau_5=$	-2.43352498
$\tau_{10}=$	-2.29159345
$\tau_{20}=$	-2.0167554
$\tau_{50}=$	-1.94508708
$\tau_{100}=$	-1.78733239

Eventos desnormalizados
tiempo de ocurrencia (avo. día)

$$x = (y\lambda + 1)^{1/\lambda}$$

Q85%	
$\tau_2=$	142.760302
$\tau_5=$	154.365993
$\tau_{10}=$	164.628159
$\tau_{20}=$	171.774162
$\tau_{50}=$	180.341417
$\tau_{100}=$	186.329237

Q90%	
$\tau_2=$	148.962979
$\tau_5=$	163.1832433
$\tau_{10}=$	171.0414282
$\tau_{20}=$	177.0522108
$\tau_{50}=$	184.1884404
$\tau_{100}=$	188.9686788

Q95%	
$\tau_2=$	152.98631
$\tau_5=$	167.526774
$\tau_{10}=$	178.161966
$\tau_{20}=$	187.97725
$\tau_{50}=$	198.651912
$\tau_{100}=$	208.706555

Más adelante, los valores obtenidos por este método serán comparados con los históricos y los puntuales.

5.6 Método de estaciones año.

El método de estaciones año se aplica cuando se tiene poca información en un sitio, y se pretende mejorar la estimación mediante la inclusión de otras estaciones pertenecientes a una región, y también para estimar eventos en sitios sin información (Cunnane, 1988).

Este método propone conformar un sólo registro formado por los eventos históricos de las estaciones pertenecientes a la región meteorológicamente homogénea. Este único registro debe contener datos sin dispersión, por lo cual cada evento es estandarizado mediante la remoción de la media correspondiente.

A este registro se le aplica un análisis de frecuencias, obteniendo el mejor ajuste para los diferentes eventos de sequía y para los distintos niveles de truncamiento. Para llevar a cabo el análisis de frecuencias, individualmente las series de datos de los sitios de la región deben ser independientes y cumplir, en general, con los requisitos para dicho fin. Las distribuciones de probabilidad ajustadas son las que se vieron en el capítulo 3.

Ahora bien, al inferir un evento en un sitio con poca información, es necesario aplicar el proceso de des-estandarización para conocer el valor final pronosticado. Para esto, sólo bastará con multiplicar el evento inferido por la media de los históricos correspondiente a la estación en estudio. Sin embargo, cuando se desee pronosticar un evento en un sitio sin información, no existe tal media de los históricos, y por tanto se recurre a alguna relación que exista entre las características fisiográficas y las medias de los eventos históricos de las estaciones con información, tratando de encontrar una relación válida para toda la región.

La relación que se utiliza, generalmente, es el evento modulado (D_{med} , T_{med} , τ_{med} , etc.) contra el área drenada de la cuenca. Tal relación es presentada gráficamente, por lo cual se puede encontrar un ajuste polinómico que permita realizar inferencias.

El método de estimación en cuencas sin información fue aplicado nuevamente en la estación El Palmito, por fines ya conocidos. Los registros cumplen con el requisito de independencia. Para la relación entre el evento modulado y una característica fisiográfica, se probaron las características más significativas proporcionadas por el análisis de varianza; sin embargo, el área resultó ser la mejor relación. Por tanto, en la aplicación del método se presenta un ajuste polinómico a tal relación, del cual se hace la inferencia.

Como ilustración, las figuras 5.10 y 5.11 muestran el ajuste polinómico de la relación área - déficit medio y el ajuste de la muestra única modulada, respectivamente. Lo anterior para $Q_{r85\%}$, este proceso se siguió para todos los niveles y para los distintos eventos.

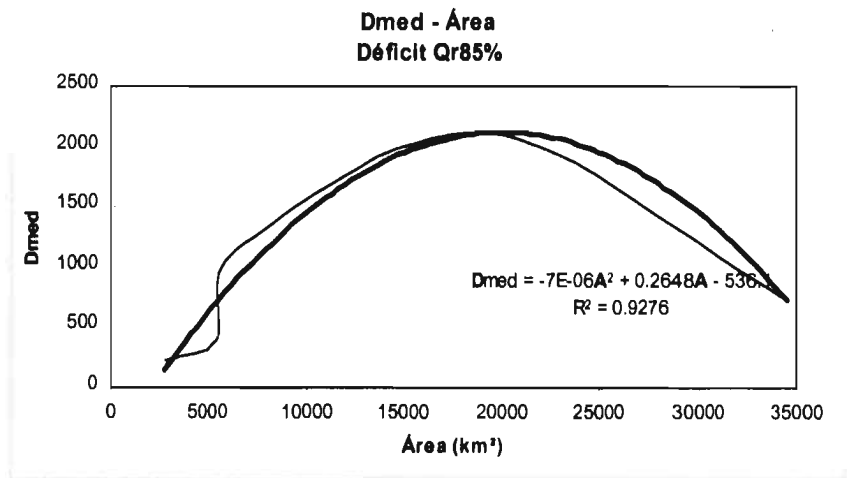


Figura 5.10 Relación área - Déficit medio.

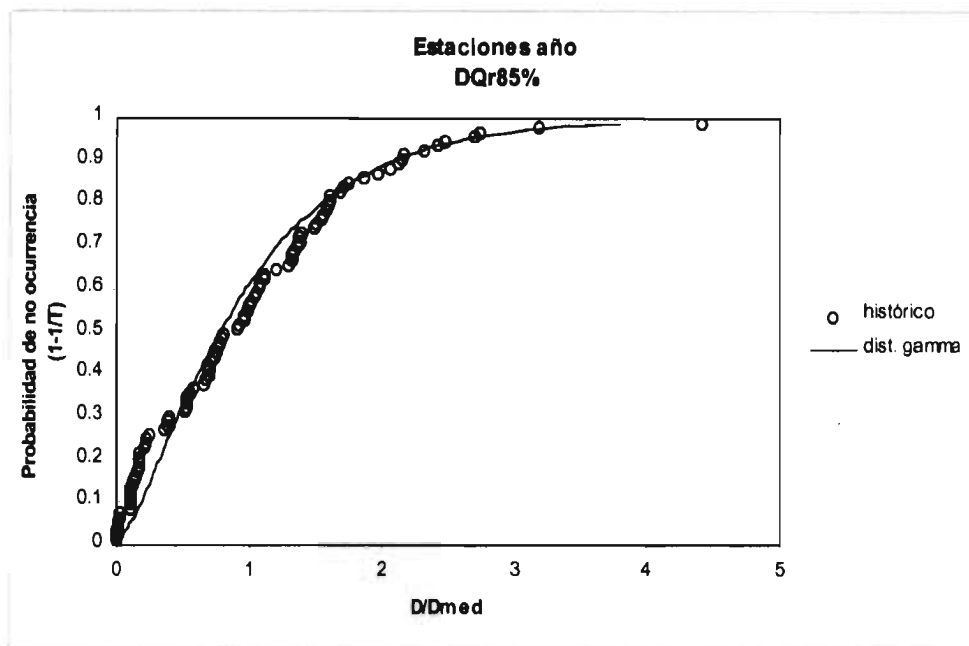


Figura 5.11 Ajuste de muestra única del método estaciones año.

ESTACIONES AÑO

Déficit

Análisis de frecuencias muestra única

Qr85%	
D/Dmed ₂ =	0.7865
D/Dmed ₅ =	1.5467
D/Dmed ₁₀ =	2.0902
D/Dmed ₂₀ =	2.6247
D/Dmed ₅₀ =	3.3271
D/Dmed ₁₀₀ =	3.8586

Qr90%	
D/Dmed ₂ =	0.64128
D/Dmed ₅ =	1.61272
D/Dmed ₁₀ =	2.37969
D/Dmed ₂₀ =	3.17095
D/Dmed ₅₀ =	4.25136
D/Dmed ₁₀₀ =	5.09305

Qr95%	
D/Dmed ₂ =	1.2617
D/Dmed ₅ =	1.9412
D/Dmed ₁₀ =	2.378
D/Dmed ₂₀ =	2.7845
D/Dmed ₅₀ =	3.2944
D/Dmed ₁₀₀ =	3.6666

Para la estación EL PALMITO

Área (km²) = 19270

Qr	Polinomio de ajuste	Dmed (miles m³)	
		pronosticado	real
85%	Dmed = -7E-06A ² + 0.2648A - 538.1	1967.2657	2115.9811
90%	Dmed = -3E-06A ² + 0.1257A - 241.94	1066.3003	1019.8325
95%	Dmed = -1E-06A ² + 0.0606A - 145.79	650.6391	484.476

Eventos pronosticados

Déficit (miles m³)

Qr85%	
D ₂ =	1547.254473
D ₅ =	3042.769858
D ₁₀ =	4111.978766
D ₂₀ =	5163.482283
D ₅₀ =	6545.28971
D ₁₀₀ =	7590.89143

Qr90%	
D ₂ =	683.7970564
D ₅ =	1719.64382
D ₁₀ =	2537.464161
D ₂₀ =	3381.184938
D ₅₀ =	4533.226443
D ₁₀₀ =	5430.720743

Qr95%	
D ₂ =	820.9113525
D ₅ =	1263.020621
D ₁₀ =	1547.21978
D ₂₀ =	1811.704574
D ₅₀ =	2143.465451
D ₁₀₀ =	2385.633324

ESTACIONES AÑO

Duración

Análisis de frecuencias muestra única

Qr85%	
T/Tmed ₂ =	1.00000
T/Tmed ₅ =	1.51127
T/Tmed ₁₀ =	1.77878
T/Tmed ₂₀ =	1.99963
T/Tmed ₅₀ =	2.24813
T/Tmed ₁₀₀ =	2.41376

Qr90%	
T/Tmed ₂ =	0.77102
T/Tmed ₅ =	1.53873
T/Tmed ₁₀ =	2.09105
T/Tmed ₂₀ =	2.63583
T/Tmed ₅₀ =	3.35342
T/Tmed ₁₀₀ =	3.89762

Qr95%	
T/Tmed ₂ =	0.86243
T/Tmed ₅ =	1.58889
T/Tmed ₁₀ =	2.06987
T/Tmed ₂₀ =	2.53124
T/Tmed ₅₀ =	3.12843
T/Tmed ₁₀₀ =	3.57594

Para la estación EL PALMITO

Área (km²) = 19270

Qr	Polinomio de ajuste	Tmed (miles m ²)	
		pronosticado	real
85%	Tmed = -2E-08A ² + 0.00064A + 45.715	50.621142	49.5294118
90%	Tmed = 6E-09A ² - 0.0002A + 36.825	35.1989974	35.3528412
95%	Tmed = -4E-08A ² + 0.0014A + 16.889	29.013684	28.5454545

Eventos pronosticados

Duración (días)

Qr85%	
T ₂ =	50.621142
T ₅ =	76.50221327
T ₁₀ =	90.04387497
T ₂₀ =	101.2235542
T ₅₀ =	113.802908
T ₁₀₀ =	122.1872877

Qr90%	
T ₂ =	27.13913098
T ₅ =	54.16175327
T ₁₀ =	73.80268351
T ₂₀ =	92.77657332
T ₅₀ =	116.0370219
T ₁₀₀ =	137.1923162

Qr95%	
T ₂ =	25.02227149
T ₅ =	46.09955237
T ₁₀ =	60.0545541
T ₂₀ =	73.44059749
T ₅₀ =	90.76727944
T ₁₀₀ =	103.7511932

ESTACIONES AÑO

Tiempo de ocurrencia

Análisis de frecuencias muestra única

Qr85%	
$\tau/\tau_{med2} =$	1.00000
$\tau/\tau_{med50} =$	1.12584
$\tau/\tau_{med10} =$	1.19168
$\tau/\tau_{med20} =$	1.24603
$\tau/\tau_{med50} =$	1.30719
$\tau/\tau_{med100} =$	1.34796

Qr90%	
$\tau/\tau_{med2} =$	0.99992
$\tau/\tau_{med50} =$	1.12055
$\tau/\tau_{med10} =$	1.18386
$\tau/\tau_{med20} =$	1.23577
$\tau/\tau_{med50} =$	1.29439
$\tau/\tau_{med100} =$	1.33347

Qr95%	
$\tau/\tau_{med2} =$	0.9985
$\tau/\tau_{med50} =$	1.10153
$\tau/\tau_{med10} =$	1.15545
$\tau/\tau_{med20} =$	1.19995
$\tau/\tau_{med50} =$	1.25003
$\tau/\tau_{med100} =$	1.28341

Para la estación EL PALMITO

Área (km²) = 19270

Qr	Polinomio de ajuste	τ_{med} (miles m ²)	τ_{med} (miles m ²)
		pronosticado	real
85%	$\tau_{med} = -1E-12A^3 + 8E-08A^2 - 0.0013A + 142.48$	139.980047	139.411765
90%	$\tau_{med} = 2E-08A^2 - 0.0007A + 148.46$	142.397658	145.058824
95%	$\tau_{med} = 6E-08A^2 - 0.002A + 160.1$	143.839974	146.636364

Eventos pronosticados

Tiempo de ocurrencia (avo. día)

Qr85%	
$\tau_2 =$	139.980047
$\tau_5 =$	157.5951361
$\tau_{10} =$	166.8114224
$\tau_{20} =$	174.419338
$\tau_{50} =$	182.9805177
$\tau_{100} =$	188.6875042

Qr90%	
$\tau_2 =$	142.3862662
$\tau_5 =$	159.5636957
$\tau_{10} =$	168.5504119
$\tau_{20} =$	175.9707538
$\tau_{50} =$	184.3181045
$\tau_{100} =$	189.883005

Qr95%	
$\tau_2 =$	143.624214
$\tau_5 =$	158.4440466
$\tau_{10} =$	166.199898
$\tau_{20} =$	172.6007768
$\tau_{50} =$	179.8042827
$\tau_{100} =$	184.605661

5.7 Análisis de resultados.

En esta sección se presenta la comparación de los resultados de los diferentes métodos aplicados para la estación El Palmito. Los eventos históricos, y su periodo de retorno asociado, son comparados con los obtenidos de la modelación puntual, análisis regional por correlación y regresión, y análisis regional por el método de estaciones año. Tal comparación se lleva a cabo tanto cuantitativamente como gráficamente.

Para el caso del déficit, el método de estaciones año se alejó un poco de los déficits históricos para Qr90% y Qr95%, en tanto que los otros dos métodos se ajustan mucho mejor.

Para Qr85% los tres métodos se aproximan bastante bien, destacando el método de correlación y regresión por ser el más desfavorable.

En lo que respecta a la duración y al tiempo de ocurrencia, los tres métodos se aproximan muy bien para todos los niveles de truncamiento.

Por otra parte, de acuerdo a la probabilidad asociada a un evento, en función de la modelación puntual y sus mejores ajustes para las estaciones de la región, se construyeron curvas de igual probabilidad de excedencia de tener ciertos eventos.

Para el déficit se realizaron curvas de igual probabilidad de tener déficits mayores de 5000, 4000, 3000, 2000, 1000, 500 y 200 miles de m³. En el caso de la duración esto se hizo para curvas de igual probabilidad de que se presenten sequías con duraciones mayores de 150, 100, 50, 20 y 10 días. Por último, para el tiempo de ocurrencia las curvas de igual probabilidad se realizaron para los casos de tener sequías en Abril, Mayo, Junio y Julio, que es la época de estiaje en la región.

Las curvas fueron realizadas para Qr85%, ya que se considera que este evento es realmente significativo. Las probabilidades de cada estación fueron asignadas al centroide de sus respectivas cuencas, lo cual sirvió de base para la construcción de las curvas mediante el programa surfer.

De la construcción de las curvas se puede concluir que la estación El Palmito es la que presenta mayor probabilidad de tener eventos de sequía, El periodo de retorno de déficits mayores a 5 millones de m³ es prácticamente de diez años en este sitio, mientras que déficits mayores a 200 mil m³ se presentan cada año.

Comparación del déficit histórico con el obtenido por los diferentes métodos

Déficit (miles m³)

Qr85%	est. año	correlación	mod. puntual
D ₂ =	1547.25447	1437.57211	1497.5985
D ₅ =	3042.76986	2107.06172	3344.1456
D ₁₀ =	4111.97877	4193.87692	4741.0046
D ₂₀ =	5183.48228	5254.66019	6137.8636
D ₅₀ =	6545.28971	6634.72875	7984.4107
D ₁₀₀ =	7590.89143	7674.09472	9381.2696

Qr90%	est. año	correlación	mod. puntual
D ₂ =	683.797056	570.994497	600.3638
D ₅ =	1719.64382	1641.72189	1661.4940
D ₁₀ =	2537.46416	2269.39764	2530.5719
D ₂₀ =	3381.18494	2785.45945	3442.4969
D ₅₀ =	4533.22644	3428.28668	4704.2575
D ₁₀₀ =	5430.72074	3297.81931	5696.7772

Qr95%	est. año	correlación	mod. puntual
D ₂ =	820.911352	267.231382	254.6409
D ₅ =	1263.02062	658.654994	789.2848
D ₁₀ =	1547.21978	1464.34257	1245.9661
D ₂₀ =	1811.70457	1817.63306	1734.3421
D ₅₀ =	2143.46545	2248.27711	2419.9841
D ₁₀₀ =	2385.63332	2502.95375	2965.0267

Prob. no exced.	Def. hist. 85%	Def. hist. 90%
0.944	5710.9536	3755.5480
0.889	4503.254	2435.7880
0.833	4363.2864	2316.5560
0.778	3253.7376	1724.0250
0.722	3190.06	1657.0650
0.667	2370.988	1328.9180
0.611	2243.7216	993.6000
0.556	2153.6928	870.5660
0.500	2031.8688	863.3080
0.444	1616.1984	686.9370
0.389	1414.5408	250.3780
0.333	1106.0841	161.7408
0.278	538.185	99.7920
0.222	470.7936	71.7120
0.167	431.6544	64.3680
0.111	353.376	49.2480
0.056	219.2832	7.6030

Prob. no exced.	Def. hist. 95%
0.917	1866.412
0.833	754.531
0.750	656.2944
0.667	559.008
0.583	543.196
0.500	404.438
0.417	251.251
0.333	231.984
0.250	38.448
0.167	23.414
0.083	0.2592

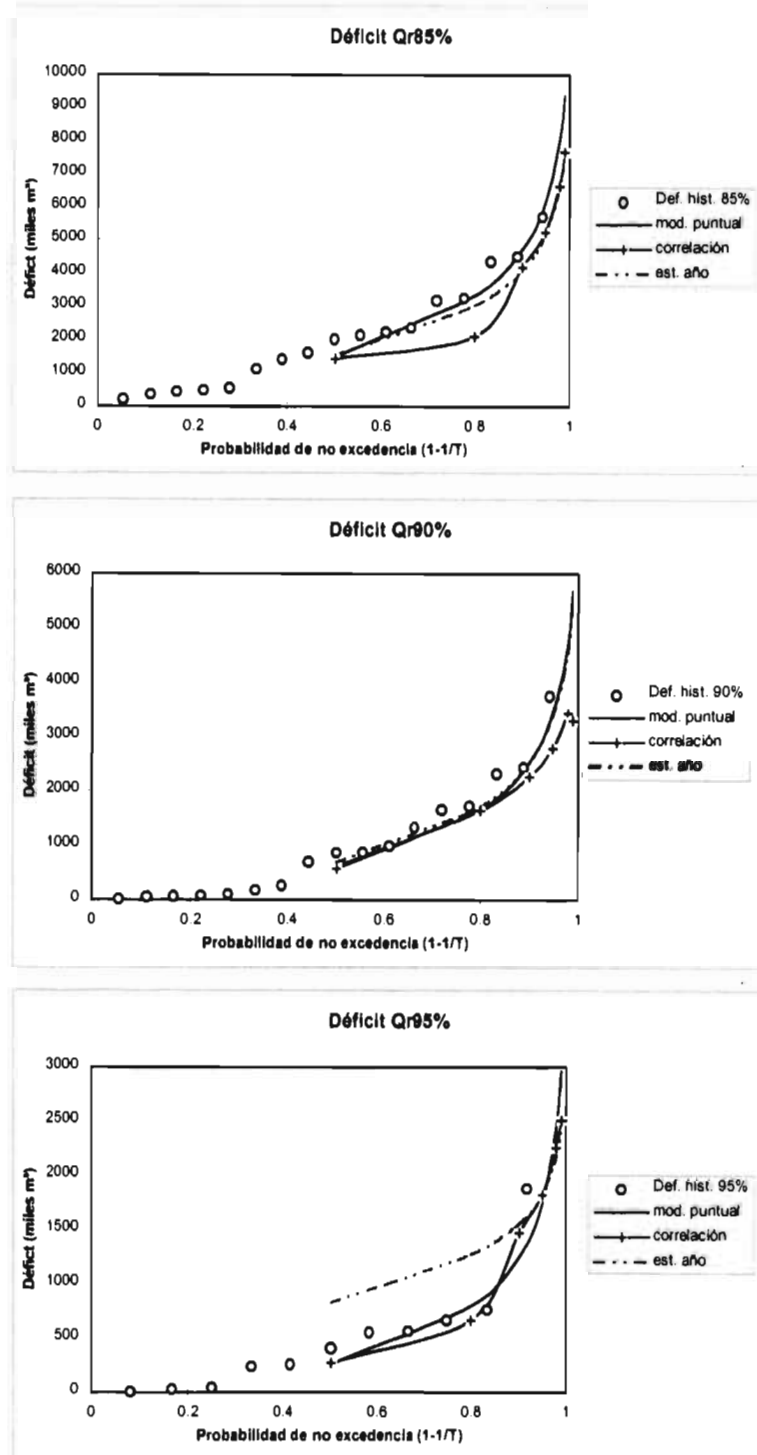


Figura 5.12 Diferentes métodos utilizados para el déficit máximo.

Comparación de la duración histórica con la obtenida por los diferentes métodos

Duración (días)

Qr85%	est. año	correlación	mod. puntual
T2 =	50.6211	46.1204	49.5293
T5 =	76.5022	69.8455	70.5744
T10 =	90.0439	86.1804	81.5857
T20 =	101.2236	101.2368	90.6766
T50 =	113.8029	118.5627	100.9052
T100 =	122.1873	129.8805	107.7229

Qr90%	est. año	correlación	mod. puntual
T2 =	27.1391	34.5958	30.7648
T5 =	54.1618	55.7300	55.4538
T10 =	73.6029	72.0781	71.8001
T20 =	92.7786	87.6095	87.4798
T50 =	118.0370	107.1397	107.7756
T100 =	137.1923	118.6596	122.9845

Qr95%	est. año	correlación	mod. puntual
T2 =	25.0223	22.8841	25.3174
T5 =	46.0996	39.9125	44.1379
T10 =	60.0546	54.6477	56.5987
T20 =	73.4406	68.8523	68.5514
T50 =	90.7673	86.9714	84.0229
T100 =	103.7512	100.1300	95.6166

Prob. no exced.	Dur. hist. 85%	Dur. hist. 90%
0.944	88	87
0.889	87	77
0.833	80	74
0.778	75	59
0.722	65	53
0.667	63	50
0.611	59	43
0.556	59	38
0.500	48	37
0.444	47	25
0.389	40	17
0.333	32	14
0.278	24	10
0.222	24	8
0.167	22	5
0.111	18	3
0.056	11	1

Prob. no exced.	Dur. hist. 95%
0.917	67
0.833	50
0.750	49
0.667	34
0.583	27
0.500	24
0.417	22
0.333	22
0.250	17
0.167	1
0.083	1

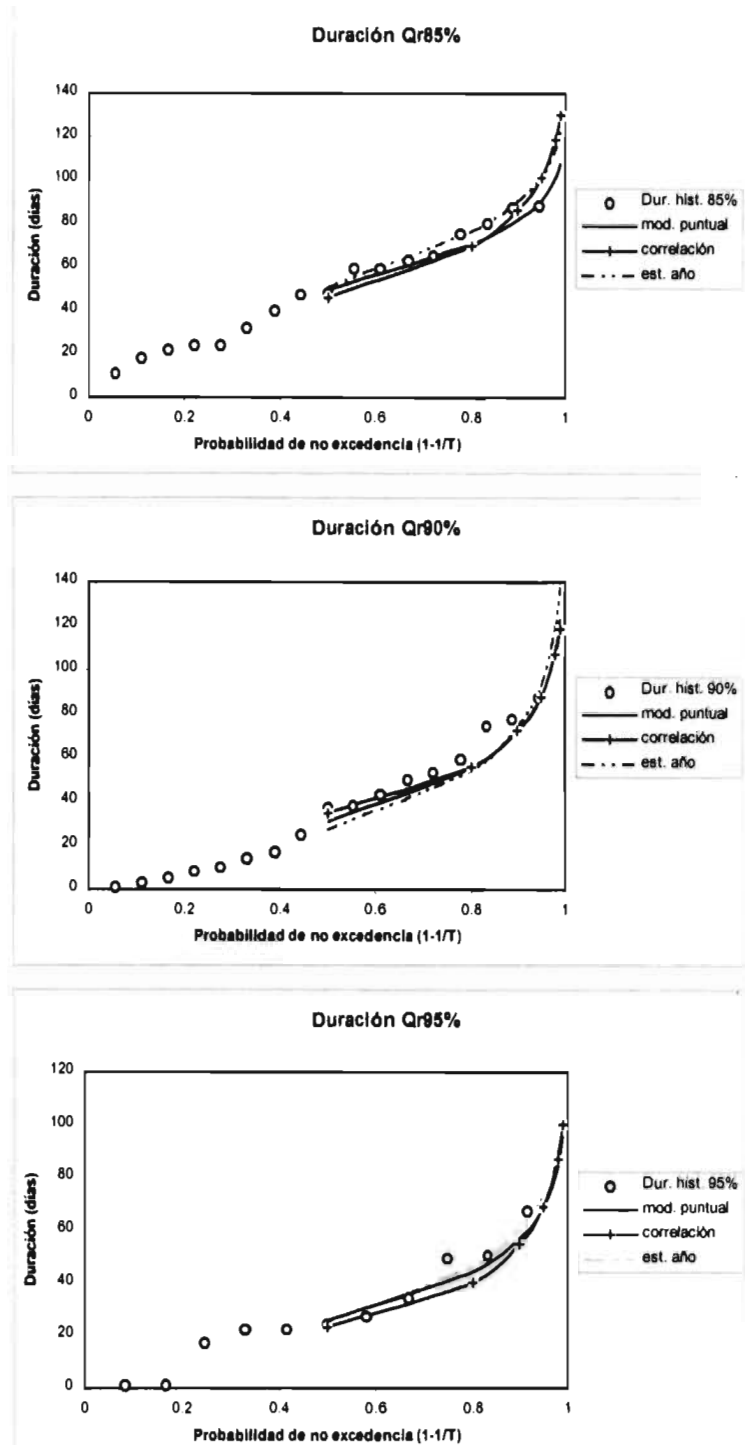


Figura 5.13 Diferentes métodos utilizados para la duración.

Comparación del tiempo de ocurrencia histórico con el obtenido por los diferentes métodos

Tiempo de ocurrencia (avo. día)

Qr85%	est. año	correlación	mod. puntual
τ2=	139.9800	142.7603	137.0233
τ5=	157.5951	154.3660	149.8756
τ10=	166.8114	164.6282	158.3850
τ20=	174.4193	171.7742	166.5474
τ50=	182.9805	180.3414	177.1128
τ100=	188.6875	186.3292	185.0300

Qr90%	est. año	correlación	mod. puntual
τ2=	142.3863	148.9630	144.5729
τ5=	159.5637	163.1832	157.1355
τ10=	168.5504	171.0414	163.9892
τ20=	175.9708	177.0522	169.7955
τ50=	184.3181	184.1884	176.4906
τ100=	189.8830	188.9687	181.0494

Qr95%	est. año	correlación	mod. puntual
τ2=	143.6242	152.9863	141.3585
τ5=	158.4440	167.5268	157.1187
τ10=	166.1999	178.1620	169.0408
τ20=	172.6008	187.9773	180.9630
τ50=	179.8043	198.6519	196.7232
τ100=	184.6057	208.7066	208.6453

Prob. no exced.	Tie. hist. 85%	Tie. hist. 90%
0.944	171	172
0.889	163	167
0.833	154	162
0.778	149	160
0.722	146	153
0.667	144	152
0.611	143	148
0.556	143	147
0.500	139	144
0.444	139	144
0.389	129	139
0.333	129	134
0.278	127	134
0.222	127	130
0.167	127	129
0.111	121	128
0.056	119	123

Prob. no exced.	Tie. hist. 95%
0.917	171
0.833	168
0.750	158
0.667	148
0.583	147
0.500	147
0.417	143
0.333	134
0.250	133
0.167	133
0.083	131

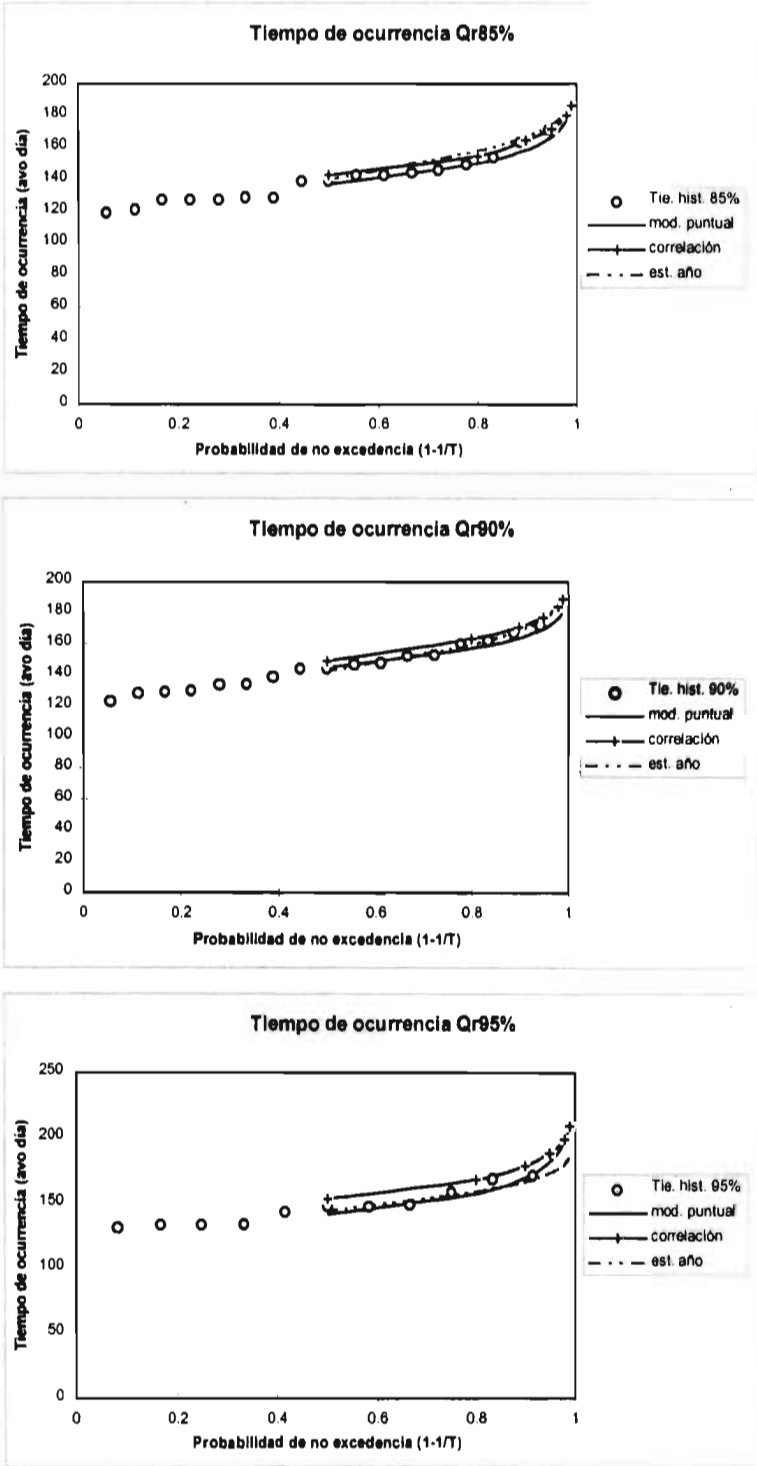


Figura 5.14 Diferentes métodos utilizados para el tiempo de ocurrencia.

Déficit

Figura 5.15 Déficit Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $D > 5000$ miles m^3

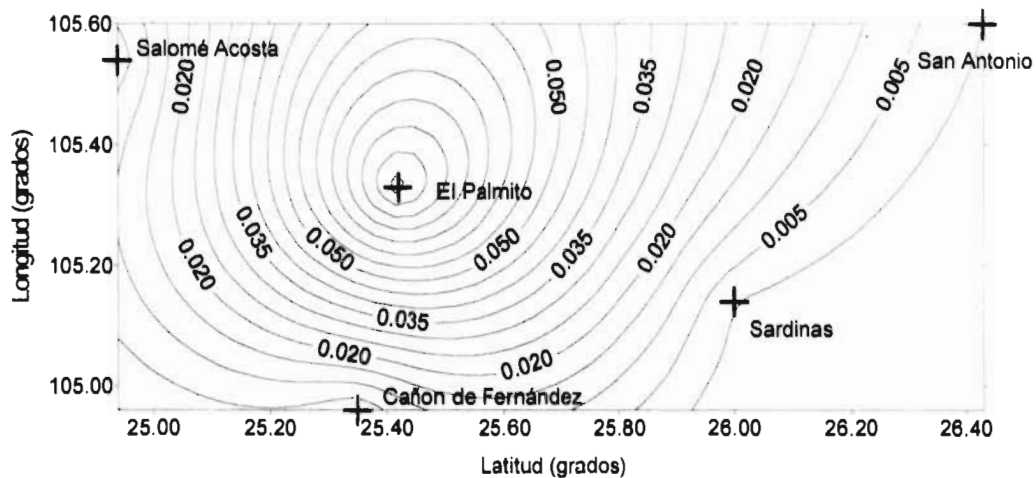


Figura 5.16 Déficit Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $D > 4000$ miles m^3

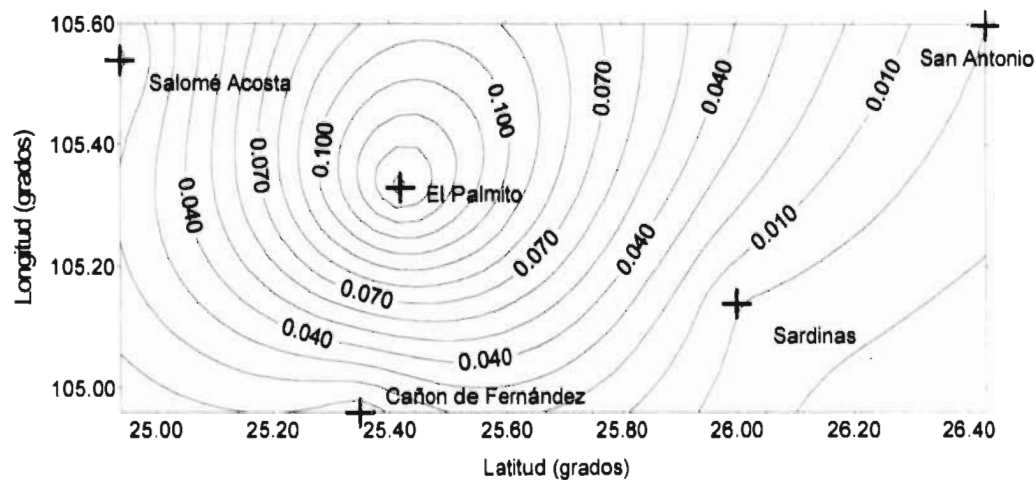


Figura 5.17 Déficit Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $D > 3000$ miles m^3

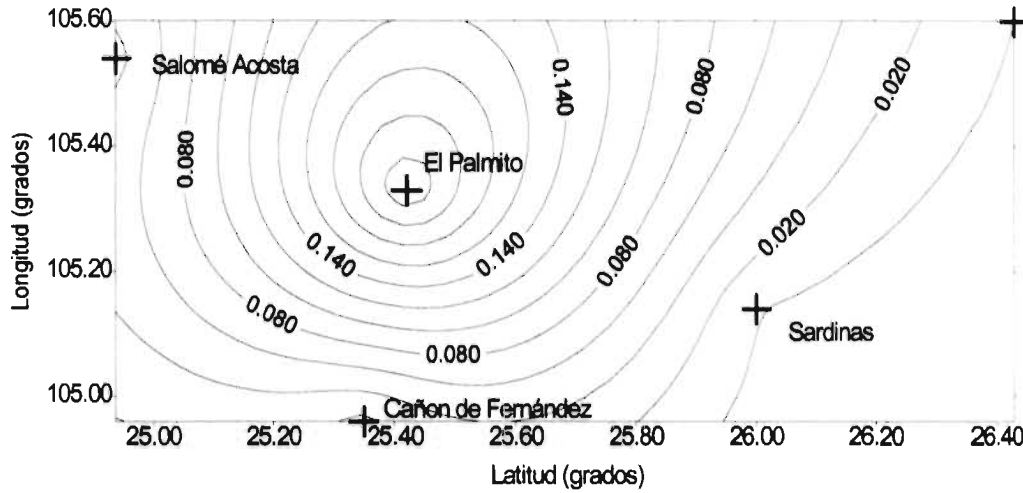


Figura 5.18 Déficit Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $D > 2000$ miles m^3

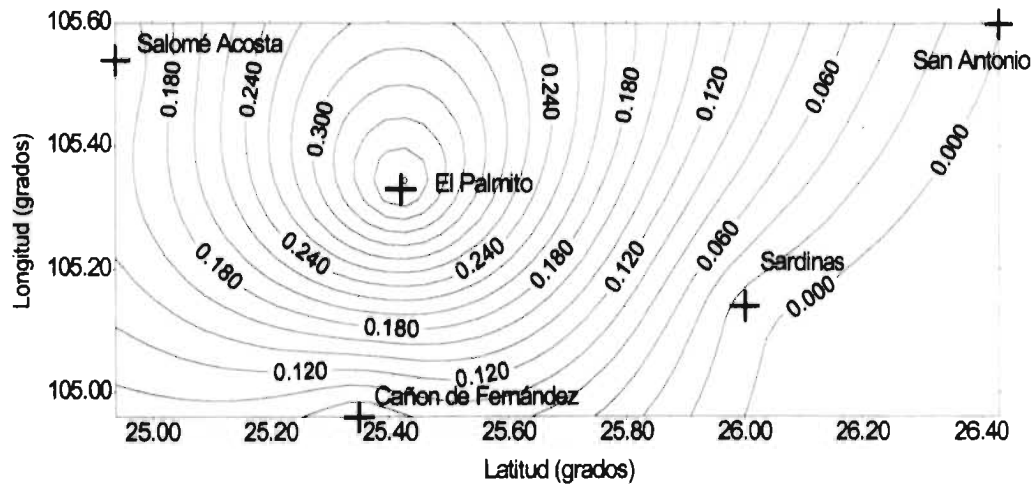


Figura 5.19 Déficit Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $D > 1000$ miles m^3

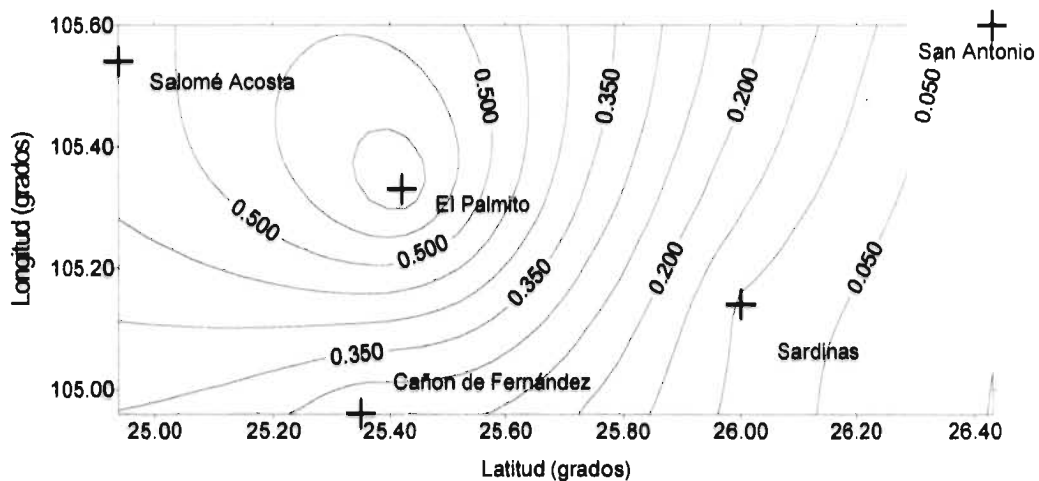


Figura 5.20 Déficit Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $D > 500$ miles m^3

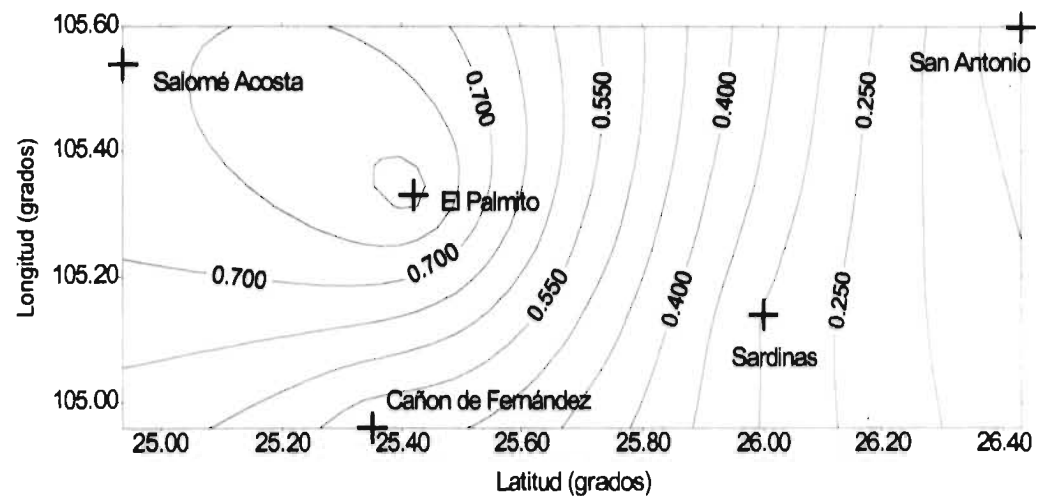
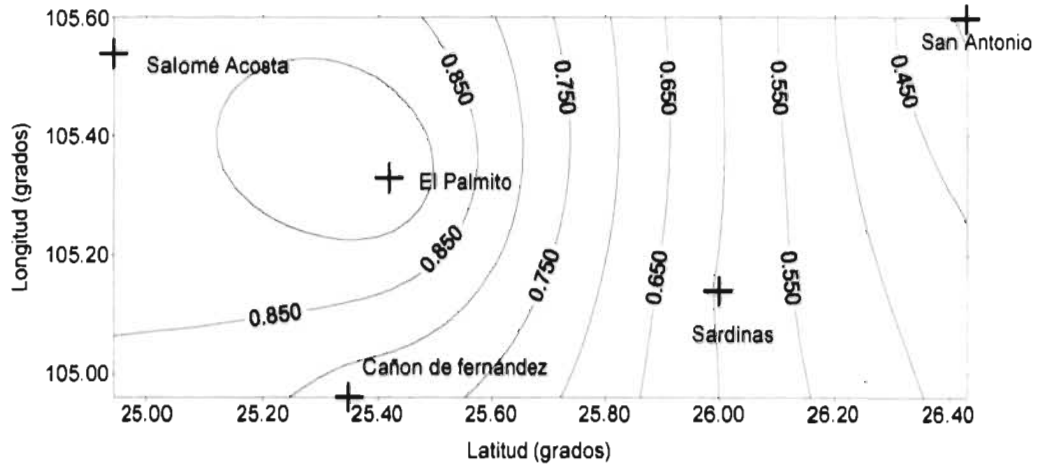


Figura 5.21 Déficit Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $D > 200 \text{ miles m}^3$



Duración

Figura 5.22 Duración Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $T > 150 \text{ Días}$

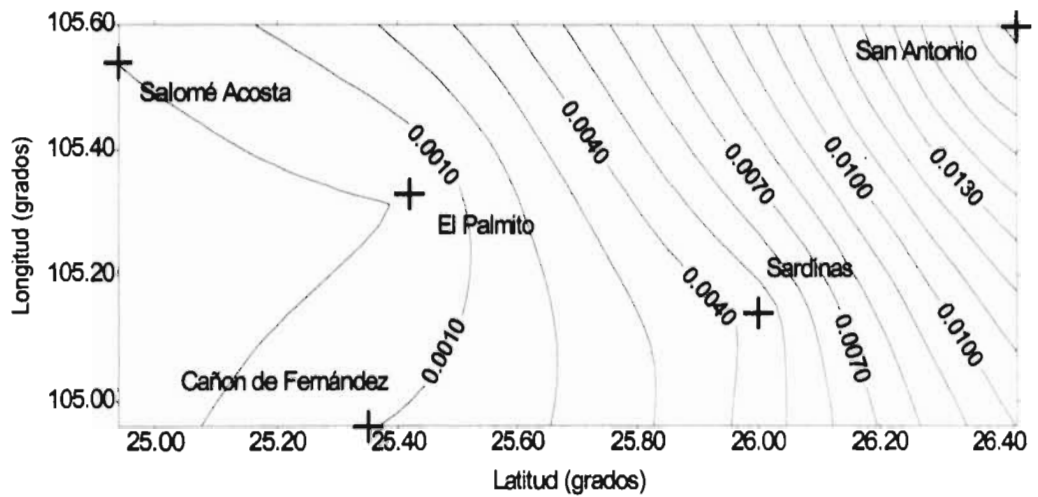


Figura 5.23 Duración Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $T > 100$ Días

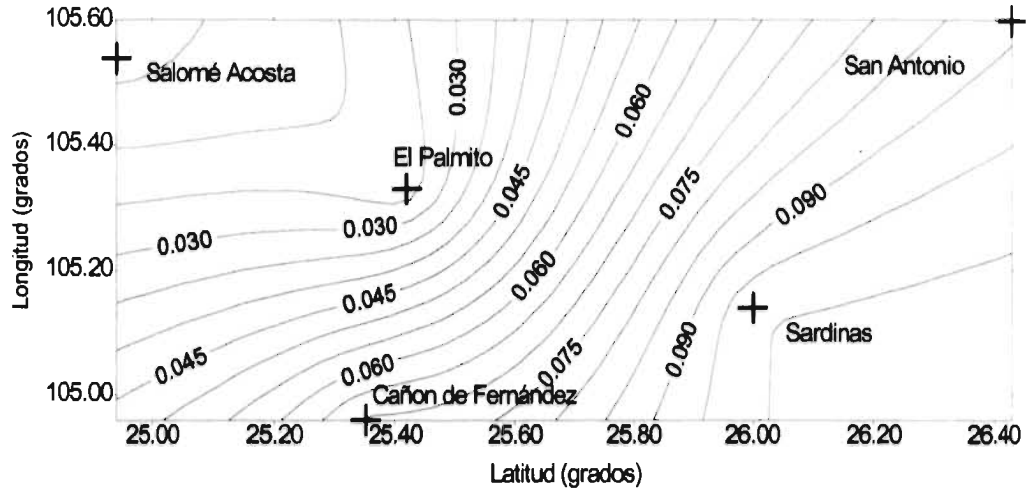


Figura 5.24 Duración Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
 $T > 50$ Días

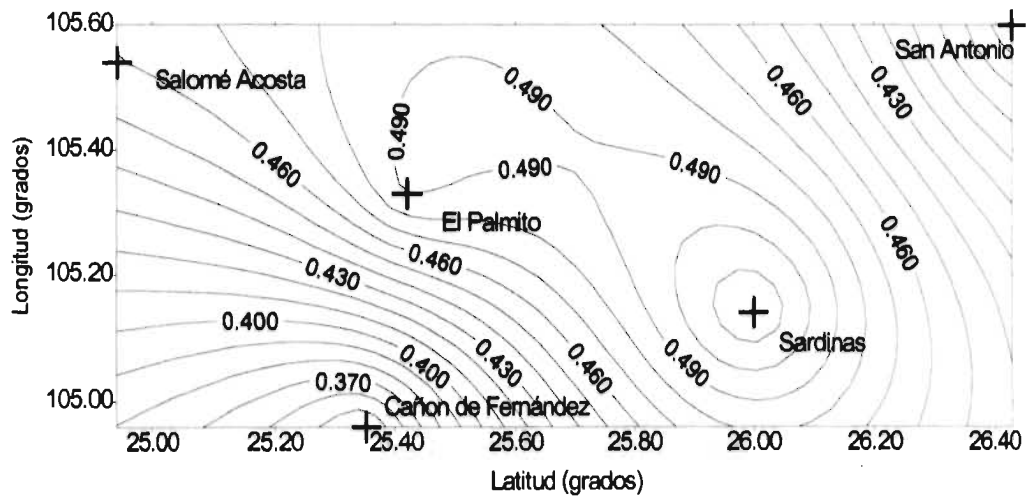


Figura 5.25 Duración Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
T > 20 Días

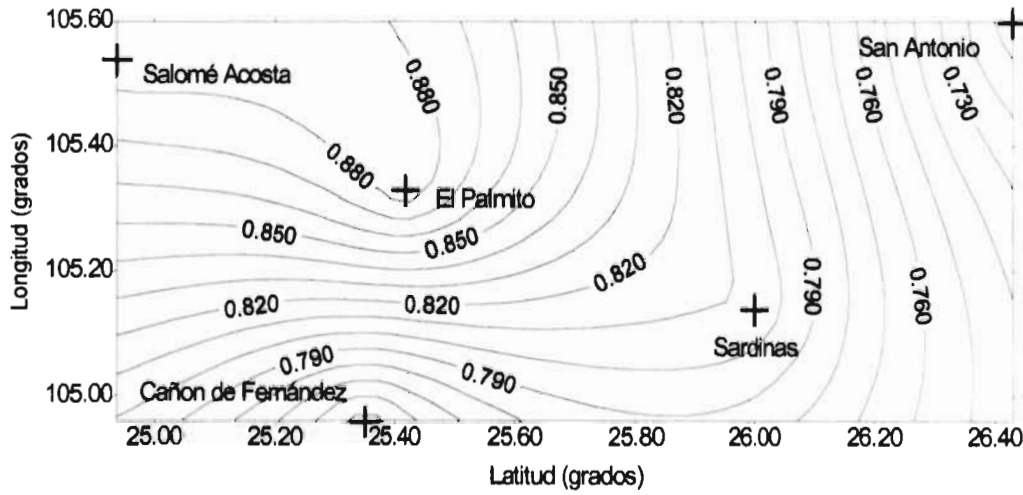
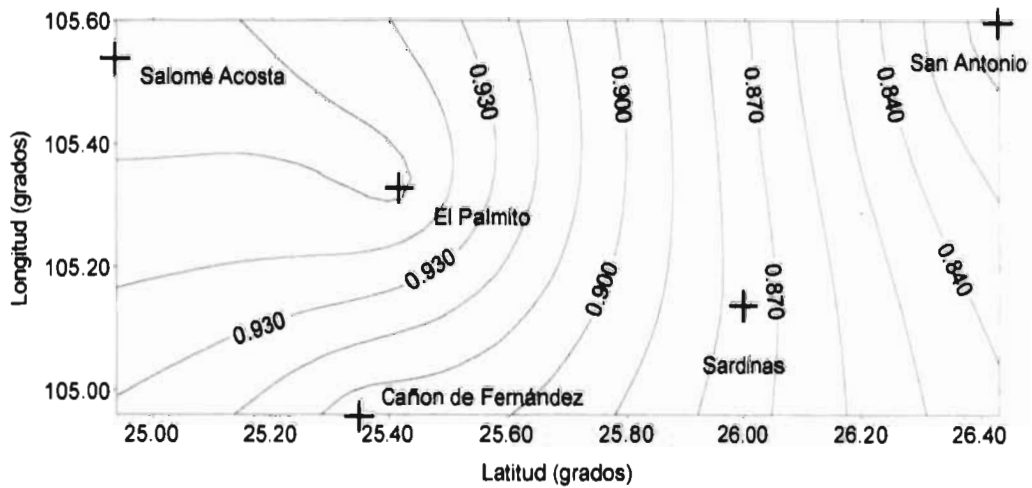


Figura 5.26 Duración Qr85%, curvas de igual probabilidad de excedencia.
T > 10 Días



Tiempo de ocurrencia.

Figura 5.27 Tiempo de ocurrencia $Qr85\%$, curvas de igual probabilidad. Probabilidad de τ en el mes de **ABRIL**.

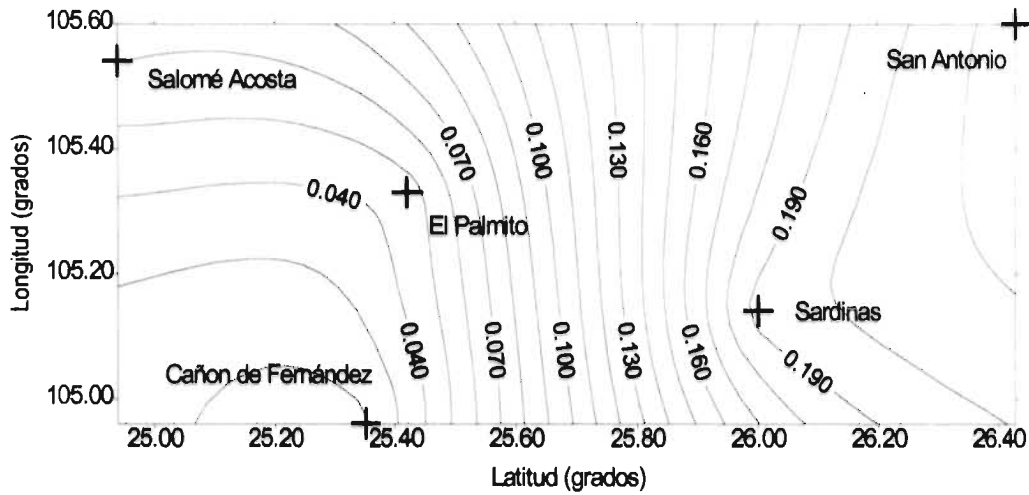


Figura 5.28 Tiempo de ocurrencia $Qr85\%$, curvas de igual probabilidad. Probabilidad de τ en el mes de **MAYO**.

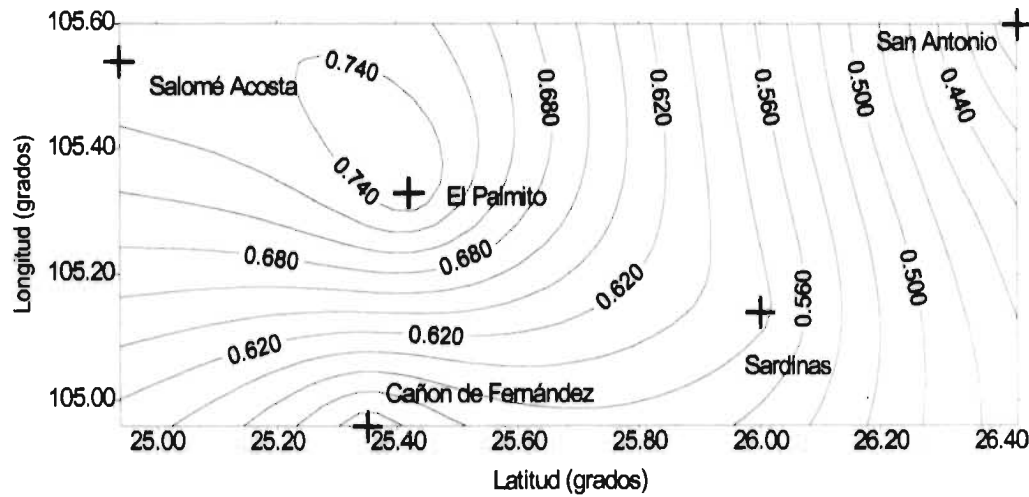


Figura 5.29 Tiempo de ocurrencia $Qr_{85\%}$, curvas de igual probabilidad. Probabilidad de τ en el mes de **JUNIO**.

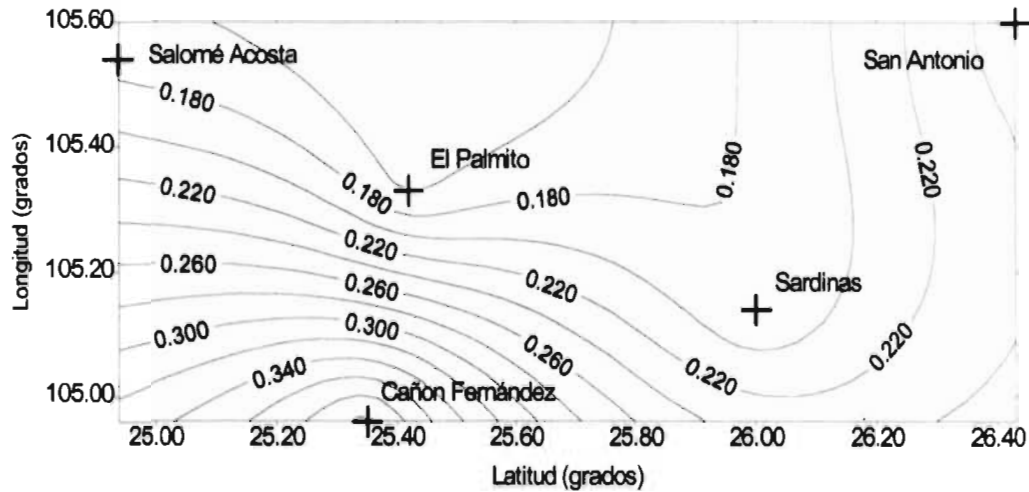
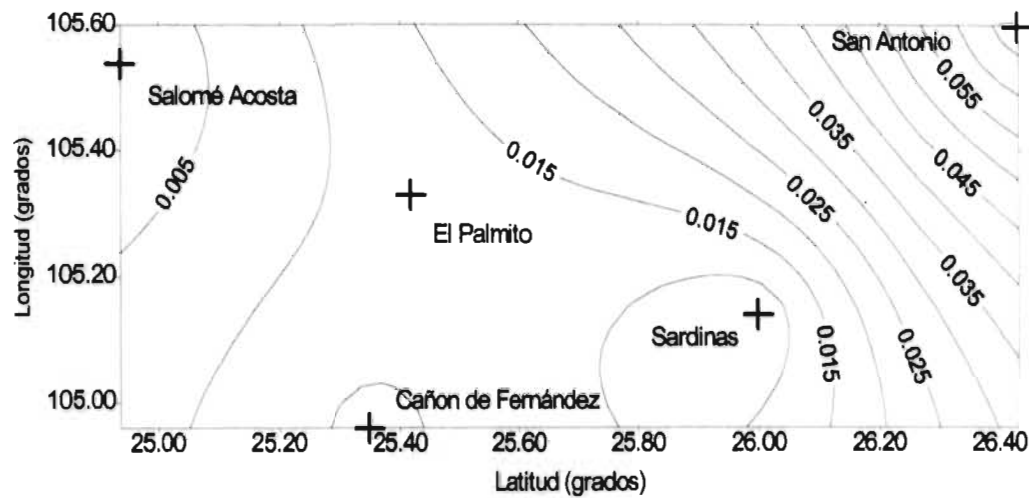


Figura 5.30 Tiempo de ocurrencia $Qr_{85\%}$, curvas de igual probabilidad. Probabilidad de τ en el mes de **JULIO**.



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Del trabajo se puede concluir que la región estudiada es realmente propensa a la sequía. Se tienen déficits históricos de más de 5 millones de m^3 , con duraciones cercanas a los 100 días. Los gastos de referencia, los cuales en la mayoría de los casos son inferiores a $1 m^3/s$, son muy pequeños comparados, por ejemplo, con el río Papaloapan y el Coatzacoalcos, los cuales aproximadamente presentan un gasto de $200 m^3/s$ y de $50 m^3/s$ respectivamente para un nivel de truncamiento de 95%. La ocurrencia de los déficits máximos se presentó en los meses de estiaje abril, mayo y junio.

Otra de las conclusiones que se obtienen de este trabajo, es que el ajuste de los diferentes eventos de sequía a las funciones de distribución fue aceptable. No se encontró una función de distribución que se ajustara de manera general para cada evento. El hecho de considerar más funciones de distribución como la doble Gumbel, por ejemplo, o las mismas funciones, pero de tres parámetros, tal vez mejoraría la estimación. Inclusive el utilizar funciones bivariadas o técnicas de estimación de parámetros como el método de los momentos L, puede ser un tema de posterior investigación.

Otro punto relacionado con esto, es que debido a la poca información de gastos medios diarios y consecuentemente de eventos de sequía en los diferentes sitios, se tuvieron registros del orden de 20 años (la longitud de registro más pequeña que se manejó en el análisis fue de 10 años y correspondió a la estación Cañón de Fernández), lo cual, sin representar una grave problema en el análisis, sí limita un poco las expectativas de éste. El análisis podría ser mejor corroborado en regiones del país donde se tenga más información disponible, sobre todo en el aspecto de los escurrimientos vírgenes, los cuales son aquellos que no tienen la influencia de algún tipo de obra hidráulica aguas arriba, que modifique su comportamiento aleatorio.

A pesar de lo anterior, las sequías sintéticas generadas, mediante la estimación puntual univariada del déficit y duración, para los diferentes niveles de truncamiento, tienen una aceptable aproximación a las históricas seleccionadas para comparación.

En lo que respecta al análisis regional, en primera instancia se puede mencionar al grupo de variables que contribuyó a predecir a los eventos. Las variables o características fisiográficas que contribuyeron a predecir al déficit son principalmente el área de la cuenca, la precipitación media de la cuenca y la densidad de drenaje. Para la duración y el tiempo de ocurrencia, se incluyó al déficit, y al déficit y la duración, respectivamente, ya que se pensaba que los eventos estarían inter-relacionados entre sí; sin embargo, sólo para la duración, el déficit fue significativo en algunos casos. Las variables significativas para la duración resultaron ser la precipitación media, latitud del centroide y área, mientras que para el tiempo de ocurrencia lo fueron la latitud y longitud del centroide, y el área.

A pesar de que se ha mencionado a un grupo de características fisiográficas por evento, el grupo de características no fue el mismo para todos los periodos de retorno, sino que éstas fueron las que prevalecieron en la mayoría de los casos. Por ejemplo, para periodos de retorno pequeños cabe mencionar la notable presencia de las características del cauce, tales como la longitud y la pendiente.

Se puede decir que los resultados del análisis de varianza para las variables significativas fue el esperado, ya que es lógico que para los eventos estudiados, el área de la cuenca y la precipitación media de la cuenca contribuyan significativamente a predecirlos. En el caso de la longitud y latitud del centroide, ya en otros estudios se había encontrado su importancia. Se puede concluir entonces que las trece características fisiográficas utilizadas en el análisis son suficientes para la predicción de los eventos de sequía.

Por otra parte, la transformación Box - Cox de primera potencia condujo, prácticamente en la totalidad, a muestras con asimetría igual a cero. De lo cual se puede concluir que es suficiente como proceso de normalización con fines de la aplicación de técnicas regionales.

En la identificación de las regiones meteorológicamente homogéneas, no fue necesaria la aplicación de los criterios presentados para agrupar una curva dentro de un racimo definido, esto debido a que el número de curvas fue de nueve, lo cual facilitó la identificación visual. Las estaciones de la región hidrológica No. 36 se agruparon sólo con la estación perteneciente a la región hidrológica No. 24, dando origen a la región de estudio, la cual en total se conformó de cinco estaciones solamente. Las estaciones de la región hidrológica No. 10 conformaron la otra región.

Una vez que se definieron los sitios pertenecientes a la región de interés, se aplicaron las técnicas regionales : correlación y regresión y el método de estaciones año.

En el caso de la técnica de correlación y regresión, el trabajo se hubiera simplificado bastante de haber encontrado una distribución característica que se ajustara para todos los sitios y para cada evento; sin embargo, aunque en algunos casos (dados los tres eventos y los tres niveles de truncamiento) se presentó que hasta en cinco sitios, el mejor ajuste fue la misma función de distribución, se prefirió trabajar este método mediante la opción de calcular una ecuación para cada periodo de retorno (2, 5, 10, 20, 50 y 100 años), para cada nivel de truncamiento (95%, 90% y 85%) y para cada evento (déficit, duración y tiempo de

ocurrencia). Esto implicó llevar a cabo un análisis de varianza para cada una de las condiciones mencionadas con anterioridad, con el fin de obtener las variables significativas así como los coeficientes de regresión que también proporciona este análisis. Las ecuaciones regionales tienen una estructura similar, sin embargo, éstas varían de acuerdo al periodo de retomo y al nivel de truncamiento.

La técnica de correlación y regresión se aplicó para la estación El Palmito, por lo tanto, se usó para tratar de mejorar la estimación en dicha estación. Si se deseara utilizarla para una estación sin información bastaría con utilizar las ecuaciones regionales, las cuales sólo requieren de las características fisiográficas de la cuenca donde se desea hacer la estimación.

Los resultados que se obtuvieron de este método nos indican que no hubo una mejoría en la estimación, esto si se compara con la estimación puntual. En el caso del déficit y el tiempo de ocurrencia la modelación puntual se ajusta mejor a los eventos históricos, mientras que para la duración los dos métodos son prácticamente indistintos.

Tal vez esto se puede atribuir a que el número de estaciones pertenecientes a la región es pequeño, y a que éstas tienen, como ya se mencionó, relativamente poca información.

El método de estaciones-año, el cual puede ser aplicado para sitios con poca información y para sitios con nula información, se aplicó también para la estación El Palmito.

La relación área de la cuenca contra el evento medio resultó ser la mejor, a pesar de que también se probaron a las características fisiográficas más significativas según el análisis de varianza para cada evento. En este punto nuevamente la cantidad de sitios de estudio influyó notablemente, ya que si el número fuera mayor, seguramente la curva producto de la relación área contra evento medio se uniformizaría mucho más, y por lo tanto se podría ajustar mejor a algún tipo de curva. Las curvas que se utilizaron para representar la relación área - déficit medio, área - duración media y área - tiempo de ocurrencia medio fueron de origen polinómico, y no obstante a los pocos puntos, los coeficientes de correlación entre la curva real y el polinomio ajustado fueron de alrededor de 0.90. El grado de los polinomios fue de segundo grado en todos los casos, excepto para el tiempo de ocurrencia de nivel de truncamiento de 85%.

Los resultados para el déficit indican que no hubo una mejoría en la estimación, ya que para los niveles de truncamiento de 90% y 95% existe una notable diferencia entre los eventos pronosticados por este método y los históricos, e inclusive con respecto a los estimados por correlación y regresión. Para el caso de la duración y del tiempo de ocurrencia si fue aceptable la estimación.

Finalmente, una de las conclusiones más importantes para la región es que la estación El Palmito, la cual corresponde al sitio donde se encuentra la Presa de mayor importancia y la de mayor capacidad en la región, ya que almacena el agua para el distrito de riego, es la que presenta una mayor probabilidad de tener déficits considerables.

En este sitio la probabilidad de que se presente un déficit mayor a los 5 millones de m³ es de aproximadamente de 0.10, lo cual corresponde a un periodo de retorno de 10 años; para un millón de m³ la probabilidad de excedencia es de 0.60 y en el caso de 200 mil m³ la ocurrencia es prácticamente cada año.

En lo que respecta a la duración, toda la región presenta probabilidades del mismo orden. La probabilidad de tener duraciones mayores a 100 días varía desde 0.030 hasta 0.090 en la estación San Antonio. Para el caso de duraciones mayores a 10 días la probabilidad en la estación El Palmito y prácticamente en toda la región es del orden de 0.90, lo cual significa a tener sequías de diez días, en promedio cada año.

Las probabilidades para el tiempo de ocurrencia se analizaron para los meses de estiaje de abril, mayo, junio y julio.

El mes con mayor probabilidad de ocurrencia de sequías fue mayo, el cual presentó, para la estación El Palmito, una probabilidad de 0.75. El mes de junio fue el segundo con mayor probabilidad de incidencia y correspondió a la estación Cañón de Fernández, con un valor de 0.38. Los meses de abril y julio quedaron en tercero y cuarto lugar respectivamente, destacando julio por la baja probabilidad.

El hecho de que mayo y junio sean los meses con mayor probabilidad de ocurrencia de sequías es entendible, ya que éstos son los meses más calurosos y de menos precipitación en el año. El mes de julio se caracteriza por la presencia de las lluvias en los últimos días.

La conclusión general que se puede hacer de este trabajo, es que aunque el análisis de las sequías en la región fue cuantitativo y dado que se obtuvieron resultados muy interesantes, las condiciones de poca información sí limitan un poco las expectativas del análisis. Sin embargo, el análisis representa una herramienta sustentada técnicamente la cual proporciona un panorama mucho más real del fenómeno en la región. El trabajo representa una metodología que puede ser aplicada en otras regiones, y combinada con otras áreas de investigación tales como el manejo de recursos hidráulicos.

BIBLIOGRAFÍA

Acreman, M. C. and Sinclair, C. D., *Clasification of drainage basins according to their physical characteristics: an application for flood frequency analysis in Scotland*, J. Hydrol., 84: 365-380, 1986.

Box G, E.P. and Cox D, R., *J.R. Stat. Soc., Series B*, 26, 211-246 , 1964.

Aparicio, F. J., *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, Limusa, México D.F., 1993.

Canavos, G. C., *Probabilidad y Estadística: Aplicaciones y Métodos*, McGraw Hill, 1994.

Castorena, G., Sánchez, M., Florescano, E., *Análisis Histórico de las Sequías en México*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, México D.F., 1980.

Chow, V. T., Maidment, D. and Mays, L., *Hidrología Aplicada*, McGraw Hill, New York, USA, 1994.

Clausen, B. and Pearson, C. P., *Regional Frequency Analysis of annual Maximum Steamflow Drought*, Journal of Hydrology, 173, p.p. 111-130, 1995.

Cunnane, C., *Methods and Merits of Regional Flood Frequency Analysis*, Journal of Hydrology, 100, p.p. 269-290, 1988.

Dracup, J. A., Lee, K. S. and Paulson, E. G, *On the Definition of Droughts*, Water Resources Research, Vol 16, No. 2, p.p. 297-302, 1980.

Dracup, J. A., Lee, K. S. and Paulson, E. G, *On the Estatical Characteristics of Drought Events*, Water Resources Research, Vol. 16, No. 2, p.p. 289-296, 1980.

Guerrero, P., *Analysis of drought characteristics by the theory of runs*, Hydrol. Pap. 80, Col. State Univ., Fort Collins, 1975.

Gutiérrez, M. A., *Modelos de Transferencia de Información Hidrológica*, Tesis Profesional Para Obtener el Título de Maestro en Ingeniería Hidráulica, UNAM, México D.F., 1994.

Haan, C. T., *Statistical Methods in Hydrology*, The Iowa State University Press/Ames, Iowa, USA, 1982.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, *Estadísticas del Medio Ambiente*, México D.F., 1994.

Kite, G., *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*, Water Resources Publications, Colorado, USA, 1978.

Maidment, D. R., *Handbook of Hydrology*, McGraw Hill, New York, USA, 1993.

Nathan, R. J., McMahon, T. A., *Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalisation*, Journal of Hydrology, 121, p.p. 217-238, 1990.

Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V. and Lane, W., *Applied Modeling of Hydrologic time series*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, 1980.

Sancho y Cervera, J., Arias, D., *Análisis Estadístico de las Sequías en México*, V Congreso Nacional de Hidráulica, Vol. 3, Noviembre de 1978.

Secretaría de Gobernación, *Atlas Nacional de Riesgos*, México, D.F., Diciembre de 1991.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Boletines Hidrológicos*, Boletines No. 29, 35 y 36, Regiones Hidrológicas 24 Poniente, 36 y 10, 1969-1977.

Yevjevich, V., *An objective approach of definitions and investigation of continental hydrologic droughts*, Hydrol. Pap. 23, Colo. State Univ., Fort Collins, 1967.

Yevjevich, V., *Stochastic Processes in Hydrology*, Water Resources Publications, Colorado USA, 1972.

Yevjevich, V., Da Cunha, L. and Vlachos, E., *Coping with Droughts*, Water Resources Publications, Colorado, USA, 1983.

Zelenhasic, E. and Salvai, A., *A Method of Streamflow Drought Analysis*, Water Resources Research, Vol. 23, No. 1, p.p. 156-168, 1987.

ANEXO 1

Hojas de cálculo utilizadas para el ajuste de los eventos de sequía.

Tabla A.1.1 Hoja de cálculo de la función Gumbel por momentos.

No. de orden	déficits miles m³	p. de retorno años	F(x) 1-1/T	gumbel	error
1	5710.9536	18.0000	0.9444	5026.5397	468422.44
2	4503.2540	9.0000	0.8889	4105.4952	158212.10
3	4363.2864	6.0000	0.8333	3548.8976	663229.07
4	3253.7376	4.5000	0.7778	3140.0646	12921.56
5	3190.0600	3.6000	0.7222	2810.8671	143787.23
6	2370.9880	3.0000	0.6667	2530.7251	25515.94
7	2243.7216	2.5714	0.6111	2283.0659	1547.97
8	2153.6928	2.2500	0.5556	2057.6927	9216.01
9	2031.8688	2.0000	0.5000	1847.6560	33934.35
10	1616.1984	1.8000	0.4444	1647.7323	994.38
11	1414.5408	1.6364	0.3889	1453.5494	1521.67
12	1106.0841	1.5000	0.3333	1260.9526	23984.24
13	538.1850	1.3846	0.2778	1065.3576	277910.97
14	470.7936	1.2857	0.2222	860.7833	152091.99
15	431.6544	1.2000	0.1667	637.8293	42508.07
16	353.3760	1.1250	0.1111	377.9597	604.36
17	219.2832	1.0588	0.0556	28.6718	36332.69
media=	2115.9811			suma=	2052735.051
desv. est.=	1633.8266		error estándar de ajuste=		369.9310793

PARÁMETROS	
μ =	1380.7591
α =	1273.8894

La columna de error corresponde a $(X_{\text{real}} - X_{\text{calculado}})^2$ en todas las hojas de cálculo.

Tabla A. 1.2 Hoja de cálculo para la función Gumbel por máxima verosimilitud.

No. de orden	déficit	yi	exp(-yi)	producto	p. de retorno años	F(x) 1-1/T		
	miles m³						gumbel	error
1	5710.9536	3.5617	0.0284	0.1011	18.0000	0.944444	4860.7762	722801.66
2	4503.2540	2.5677	0.0767	0.1970	9.0000	0.888889	3982.3459	271345.29
3	4363.2864	2.4525	0.0861	0.2111	6.0000	0.833333	3451.5006	831353.39
4	3253.7376	1.5392	0.2146	0.3302	4.5000	0.777778	3061.5831	36923.35
5	3190.0600	1.4868	0.2261	0.3362	3.6000	0.722222	2747.6167	195756.06
6	2370.9880	0.8126	0.4437	0.3606	3.0000	0.666667	2480.4361	11978.89
7	2243.7216	0.7079	0.4927	0.3488	2.5714	0.611111	2244.2354	0.26
8	2153.6928	0.6338	0.5306	0.3363	2.2500	0.555556	2029.2896	15476.15
9	2031.8688	0.5335	0.5865	0.3129	2.0000	0.500000	1828.9707	41167.62
10	1616.1984	0.1914	0.8258	0.1580	1.8000	0.444444	1638.2969	488.34
11	1414.5408	0.0254	0.9749	0.0248	1.6364	0.388889	1453.0984	1486.69
12	1106.0841	-0.2285	1.2567	-0.2871	1.5000	0.333333	1269.4124	26676.15
13	538.1850	-0.6959	2.0055	-1.3957	1.3846	0.277778	1082.8671	296678.63
14	470.7936	-0.7514	2.1199	-1.5928	1.2857	0.222222	887.7579	173859.26
15	431.6544	-0.7836	2.1893	-1.7155	1.2000	0.166667	675.1193	59275.17
16	353.3760	-0.8480	2.3350	-1.9801	1.1250	0.111111	427.2733	5460.80
17	219.2832	-0.9584	2.6075	-2.4990	1.0588	0.055556	94.1460	15659.33
media=	2115.9811	10.2467	17.0000	-6.7533			suma=	2706387.0
desv. est.=	1585.0446						error estándar de ajuste=	424.77

P. iniciales	
μ =	1380.759
α =	1273.889
P. finales	
μ =	1383.6759
α =	1214.95

P=	1.36839E-07
R=	1.01044E-06
P/ α =	1.1263E-10
(-R/ α)=	8.3167E-10

Tabla A.1.3 Hoja de cálculo para la función normal.

No. de orden	déficit miles m³	p. de retorno años	F(x) 1-1/T	W	KT	normal	error
1	5710.9536	18.0000	0.9444	2.4043	1.5936	4719.5725	982836.50
2	4503.2540	9.0000	0.8889	2.0963	1.2208	4110.5131	154245.38
3	4363.2864	6.0000	0.8333	1.8930	0.9674	3696.4787	444632.48
4	3253.7376	4.5000	0.7778	1.7344	0.7645	3365.0039	12380.19
5	3190.0600	3.6000	0.7222	1.6006	0.5891	3078.4540	12455.90
6	2370.9880	3.0000	0.6667	1.4823	0.4303	2818.9966	200711.70
7	2243.7216	2.5714	0.6111	1.3744	0.2818	2576.3670	110652.96
8	2153.6928	2.2500	0.5556	1.2735	0.1394	2343.7439	36119.44
9	2031.8688	2.0000	0.5000	1.1774	0.0000	2115.9739	7073.66
10	1616.1984	1.8000	0.4444	1.2735	-0.1394	1888.2182	73994.77
11	1414.5408	1.6364	0.3889	1.3744	-0.2818	1655.5952	58107.20
12	1106.0841	1.5000	0.3333	1.4823	-0.4303	1412.9656	94176.23
13	538.1850	1.3846	0.2778	1.6006	-0.5891	1153.5082	378622.59
14	470.7936	1.2857	0.2222	1.7344	-0.7645	866.9583	156946.44
15	431.6544	1.2000	0.1667	1.8930	-0.9674	535.4834	10780.47
16	353.3760	1.1250	0.1111	2.0963	-1.2208	121.4490	53790.13
17	219.2832	1.0588	0.0556	2.4043	-1.5936	-487.6103	499698.48
media=	2115.9811					suma=	3287224.524
desv. est.=	1633.8266			error estándar de ajuste=			468.132782

Tabla A.1.4 Hoja de cálculo de función lognormal de dos parámetros.

No. de orden	déficit miles m³	p. de retorno años	F(x) 1-1/T	ln(x)	(lnx-μy)²	W	KT	log normal	error	
1	5710.9536	18.0000	0.9444	8.6501	1.8714	2.4043	1.5936	6730.6747	1039831.06	
2	4503.2540	9.0000	0.8889	8.4126	1.2778	2.0963	1.2208	4703.1478	39957.53	
3	4363.2864	6.0000	0.8333	8.3810	1.2074	1.8930	0.9674	3686.0841	458602.97	
4	3253.7376	4.5000	0.7778	8.0876	0.6487	1.7344	0.7645	3032.7969	48814.81	
5	3190.0600	3.6000	0.7222	8.0678	0.6172	1.6006	0.5891	2562.1456	394276.50	
6	2370.9880	3.0000	0.6667	7.7711	0.2390	1.4823	0.4303	2199.3223	29469.11	
7	2243.7216	2.5714	0.6111	7.7159	0.1881	1.3744	0.2818	1906.6676	113605.41	
8	2153.6928	2.2500	0.5556	7.6749	0.1543	1.2735	0.1394	1662.7183	241055.99	
9	2031.8688	2.0000	0.5000	7.6167	0.1119	1.1774	0.0000	1454.1283	333784.12	
10	1616.1984	1.8000	0.4444	7.3878	0.0112	1.0842	-0.1391	1272.0246	118455.63	
11	1414.5408	1.6364	0.3889	7.2546	0.0008	0.9924	-0.2807	1110.1635	92645.52	
12	1106.0841	1.5000	0.3333	7.0086	0.0748	0.9005	-0.4276	963.9030	20215.47	
13	538.1850	1.3846	0.2778	6.2882	0.9880	0.8067	-0.5837	829.5621	84900.63	
14	470.7936	1.2857	0.2222	6.1544	1.2718	0.7090	-0.7545	703.9449	54359.53	
15	431.6544	1.2000	0.1667	6.0676	1.4751	0.6039	-0.9490	583.8349	23158.90	
16	353.3760	1.1250	0.1111	5.8675	2.0012	2.0963	-1.2208	449.5903	9257.18	
17	219.2832	1.0588	0.0556	5.3904	3.5789	2.4043	-1.5936	314.1571	9001.06	
			sumas=	123.7968	15.7175			SUMA=	3111391.45	
									error estándar de ajuste=	455.44

PARÁMETROS	
μy=	7.282161973
σy=	0.961539621

Tabla A.1.5 Hoja de cálculo para la función gamma por momentos.

No. de orden	déficit miles m ³	p. de retorno años	F(x) 1-1/T	ln(x)	W	KT	gamma	error
2	4503.2540	9.0000	0.8889	8.4126	2.0963	1.2208	4112.5577	152643.56
3	4363.2864	6.0000	0.8333	8.3810	1.8930	0.9674	3500.8546	743788.53
4	3253.7376	4.5000	0.7778	8.0876	1.7344	0.7645	3057.3379	38572.84
5	3190.0600	3.6000	0.7222	8.0678	1.6006	0.5891	2705.5361	234763.36
6	2370.9880	3.0000	0.6667	7.7711	1.4823	0.4303	2411.2501	1621.03
7	2243.7216	2.5714	0.6111	7.7159	1.3744	0.2818	2156.1123	7675.38
8	2153.6928	2.2500	0.5556	7.6749	1.2735	0.1394	1929.0314	50472.74
9	2031.8688	2.0000	0.5000	7.6167	1.1774	0.0000	1722.7097	95579.33
10	1616.1984	1.8000	0.4444	7.3878	1.2735	-0.1394	1531.6507	7148.31
11	1414.5408	1.6364	0.3889	7.2546	1.3744	-0.2818	1351.6647	3953.41
12	1106.0841	1.5000	0.3333	7.0086	1.4823	-0.4303	1179.5710	5400.32
13	538.1850	1.3846	0.2778	6.2882	1.6006	-0.5891	1012.4129	224892.12
14	470.7936	1.2857	0.2222	6.1544	1.7344	-0.7645	847.0425	141563.24
15	431.6544	1.2000	0.1667	6.0676	1.8930	-0.9674	679.4535	61404.40
16	353.3760	1.1250	0.1111	5.8675	2.0963	-1.2208	503.2098	22450.16
17	219.2832	1.0588	0.0556	5.8675	2.4043	-1.5936	303.7601	7136.34
media=	1633.8266		suma=	124.27392			suma=	2129749.92
desv. est.=	2115.9811					error estándar de ajuste=		376.81

PARÁMETROS	
β =	1.6773034
α =	1261.5375

Figura A.1.6 Hoja de cálculo para la función gamma por máxima verosimilitud.

No. de orden	déficit miles m ³	p. de retorno años	F(x) 1-1/T	ln(x)	W	KT	gamma	error
1	5710.9536	18.0000	0.9444	8.6501	2.4043	1.5936	5337.8182	139230.05
2	4503.254	9.0000	0.8889	8.4126	2.0963	1.2208	4225.1426	77345.93
3	4363.2864	6.0000	0.8333	8.3810	1.8930	0.9674	3564.6291	637853.48
4	3253.7376	4.5000	0.7778	8.0876	1.7344	0.7645	3088.4244	27328.46
5	3190.06	3.6000	0.7222	8.0678	1.6006	0.5891	2712.6367	227932.97
6	2370.988	3.0000	0.6667	7.7711	1.4823	0.4303	2399.8410	832.49
7	2243.7216	2.5714	0.6111	7.7159	1.3744	0.2818	2129.9916	12934.51
8	2153.6928	2.2500	0.5556	7.6749	1.2735	0.1394	1891.0266	68993.55
9	2031.8688	2.0000	0.5000	7.6167	1.1774	0.0000	1675.0514	127318.68
10	1616.1984	1.8000	0.4444	7.3878	1.2735	-0.1394	1476.1806	19604.98
11	1414.5408	1.6364	0.3889	7.2546	1.3744	-0.2818	1289.9936	15512.01
12	1106.0841	1.5000	0.3333	7.0086	1.4823	-0.4303	1113.2094	50.77
13	538.185	1.3846	0.2778	6.2882	1.6006	-0.5891	942.8826	163780.17
14	470.7936	1.2857	0.2222	6.1544	1.7344	-0.7645	776.0236	93165.36
15	431.6544	1.2000	0.1667	6.0676	1.8930	-0.9674	609.0437	31466.98
16	353.376	1.1250	0.1111	5.8675	2.0963	-1.2208	436.5379	6915.89
17	219.2832	1.0588	0.0556	5.3904	2.4043	-1.5936	247.1784	778.14
media=	1633.82662		suma=	123.796754			suma=	1651044.43
desv. est.=	2115.98108						error estándar de ajuste=	331.767432

PARÁMETROS	
UA=	0.37511188
β=	1.48276148
α=	1427.05425

Tabla A.1.7 Hoja de cálculo para la función exponencial por momentos.

No. de orden	déficit miles m³	p. de retorno años	F(x) 1-1/T	exponencial	error
1	5710.9536	18.0000	0.9444	5204.5208	256474.21
2	4503.2540	9.0000	0.8889	4072.0385	185946.85
3	4363.2864	6.0000	0.8333	3409.5788	909558.24
4	3253.7376	4.5000	0.7778	2939.5561	98709.99
5	3190.0600	3.6000	0.7222	2574.9783	378325.53
6	2370.9880	3.0000	0.6667	2277.0965	8815.62
7	2243.7216	2.5714	0.6111	2025.2410	47733.78
8	2153.6928	2.2500	0.5556	1807.0738	120144.71
9	2031.8688	2.0000	0.5000	1614.6368	174082.56
10	1616.1984	1.8000	0.4444	1442.4960	30172.54
11	1414.5408	1.6364	0.3889	1286.7756	16323.93
12	1106.0841	1.5000	0.3333	1144.6141	1484.56
13	538.1850	1.3846	0.2778	1013.8382	226246.00
14	470.7936	1.2857	0.2222	892.7587	178054.51
15	431.6544	1.2000	0.1667	780.0363	121369.93
16	353.3760	1.1250	0.1111	674.5915	103179.41
17	219.2832	1.0588	0.0556	575.5414	126919.90
media=	2115.9811			suma=	2983542.3
dev. est.=	1633.8266			error estándar de ajuste=	445.985224

PARÁMETROS	
β =	1633.8266
X_0 =	482.1545

Tabla A.1.8 Hoja de cálculo para la función exponencial por máxima verosimilitud.

No. de orden	déficit miles m³	p. de retorno años	F(x) 1-1/T	X-Xw	exponencial	error
1	5710.9536	18.0000	0.9444	4077.1270	1393.6056	18639493.44
2	4503.2540	9.0000	0.8889	2869.4274	1059.4016	11860119.14
3	4363.2864	6.0000	0.8333	2729.4598	863.9048	12245671.44
4	3253.7376	4.5000	0.7778	1619.9110	725.1976	6393514.40
5	3190.0600	3.6000	0.7222	1556.2334	617.6080	6617509.46
6	2370.9880	3.0000	0.6667	737.1614	529.7008	3390338.50
7	2243.7216	2.5714	0.6111	609.8950	455.3764	3198178.63
8	2153.6928	2.2500	0.5556	519.8662	390.9936	3107108.40
9	2031.8688	2.0000	0.5000	398.0422	334.2040	2882065.76
10	1616.1984	1.8000	0.4444	-17.6282	283.4040	1776341.01
11	1414.5408	1.6364	0.3889	-219.2858	237.4497	1385543.38
12	1106.0841	1.5000	0.3333	-527.7425	195.4968	829169.21
13	538.1850	1.3846	0.2778	-1095.6416	156.9039	145375.31
14	470.7936	1.2857	0.2222	-1163.0330	121.1724	122235.00
15	431.6544	1.2000	0.1667	-1202.1722	87.9072	118162.17
16	353.3760	1.1250	0.1111	-1280.4506	56.7896	87963.48
17	219.2832	1.0588	0.0556	-1414.5434	27.5592	36758.10
media=	2115.9811		suma=	8196.6258	suma=	72835546.8
dev. est.=	1633.8266			error estándar de ajuste=		2203.566

PARÁMETROS	
X_w =	219.2832
β =	512.2891
X_0 =	189.1485

ANEXO 2

Tablas de los eventos de sequía, obtenidos por el método de secuencias de observaciones para las estaciones incluidas en el análisis.

Tabla A.2.1
Resumen de la estación Salomé Acosta

ESTACIÓN SALOME ACOSTA Qr95%=0.382 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	tb(Dmax)	te(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1970	0	0	0	0	0	0
1971	2	2.6784	1	151	151	151
1972	1	3.1968	3*	146	144	147
1973	0	0	0	0	0	0
1974	1	33.696	11	181	186	176
1975	0	0	0	0	0	0
1976	1	21.3408	3	155	154	156
1977	0	0	0	0	0	0
1978	2	476.6688	46	135	112	157
1979	3	14.3424	3	150	149	151
1980	2	737.5104	53*	132	105	158
1981	1	268.4448	26	156	143	168
1982	3	494.0352	46*	143	117	164
1983	2	409.0176	47	144	121	167
1984	2	12.3552	3	127	126	128
1985	2	29.376	10	168	163	172
1986	1	5.3568	7*	151	147	154
1987	0	0	0	0	0	0

ESTACIÓN SALOME ACOSTA Qr90%=0.671 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	tb(Dmax)	te(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1970	2	8.9856	4	151	149	152
1971	1	362.7936	51	141	116	166
1972	1	271.3328	35*	131	113	148
1973	1	3.024	2	157	155	157
1974	2	471.9168	28	174	160	187
1975	1	23.0688	1	155	150	159
1976	1	84.3264	3	155	154	156
1977	2	130.032	60*	123	89	156
1978	2	1597.8816	62	127	96	157
1979	1	413.856	34	136	119	152
1980	2	1662.5952	59	129	100	158
1981	1	605.3184	30	155	140	169
1982	1	1548.2016	74*	143	103	183
1983	1	1153.6128	46*	142	118	167
1984	3	280.1952	18*	144	134	153
1985	1	544.0608	36*	153	134	172
1986	2	345.9456	31	139	124	154
1987	0	0	0	0	0	0

ESTACIÓN SALOME ACOSTA Qr85%=0.728m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	tb(Dmax)	te(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1970	1	410.1408	44*	137	115	159
1971	1	852.5952	42	147	126	167
1972	1	801.9848	44*	125	102	148
1973	2	162	19*	163	152	173
1974	1	1479.2285	77*	144	101	187
1975	2	199.3248	20*	148	136	159
1976	1	125.208	3	155	159	156
1977	2	1140.8256	76	119	81	156
1978	3	2449.3536	63	126	95	157
1979	2	1049.6736	38	134	115	152
1980	2	2470.3488	61	128	98	158
1981	1	1233.1008	40*	151	131	171
1982	1	2639.6928	90*	136	89	183
1983	2	1804.5504	51	142	117	167
1984	1	1239.0624	84*	117	80	153
1985	1	1044.6624	38*	153	134	172
1986	2	1276.8192	70*	134	99	169
1987	2	118.2944	17	153	145	161

* Inter-evento

Tabla A.2.2
Resumen de la estación Sardinás

ESTACIÓN SARDINAS Qr95%=0.12 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1971	0	0	0	0	0	0
1972	1	29.2032	19	139	130	148
1973	1	4.6008	9*	164	158	170
1974	0	0	0	0	0	0
1975	2	43.1138	30*	161	146	176
1976	1	53.3088	43	137	116	158
1977	1	6.912	7*	149	145	152
1978	3	98.7552	33	125	109	141
1979	0	0	0	0	0	0
1980	2	207.4464	50*	133	107	159
1981	1	9.3312	8	162	158	185
1982	0	0	0	0	0	0
1983	1	31.538	12	141	135	146
1984	0	0	0	0	0	0
1985	0	0	0	0	0	0
1986	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	0	0	0	0
1988	0	0	0	0	0	0
1989	1	362.88	76	158	120	195

ESTACIÓN SARDINAS Qr90%=0.172 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1971	3	24.4512	17	126	118	134
1972	1	194.832	50*	125	99	150
1973	2	93.4848	23	161	150	172
1974	1	248.4128	83*	141	97	185
1975	1	259.1136	55	149	122	176
1976	2	263.001	50	134	109	158
1977	1	104.6304	27*	139	125	152
1978	3	302.1408	43*	118	94	414
1979	0	0	0	0	0	0
1980	1	665.28	90	147	102	191
1981	1	63.072	15	158	151	165
1982	0	0	0	0	0	0
1983	3	99.0144	17	138	130	146
1984	1	36.3744	16	124	116	131
1985	2	12.3552	9*	159	154	163
1986	3	8.8992	2	169	168	169
1987	0	0	0	0	0	0
1988	0	0	0	0	0	0
1989	1	749.6928	93	149	103	195

ESTACIÓN SARDINAS Qr85%=0.232m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1971	1	402.4512	92*	124	76	171
1972	1	494.7264	67*	116	82	150
1973	2	228.1824	28	159	145	172
1974	1	710.2944	93	139	93	185
1975	1	559.6128	61	146	116	176
1976	1	648.4356	77	120	62	158
1977	1	328.752	54*	124	95	152
1976	2	695.2608	88*	97	52	141
1979	1	1.1232	2	151	150	151
1980	1	1111.536	89*	147	99	194
1981	1	156.7296	22	155	144	165
1982	1	0.6912	2	150	149	150
1983	1	321.2352	50*	148	120	176
1984	2	161.6544	30	117	102	131
1985	2	70.2432	13	157	151	163
1986	3	66.3552	21	108	98	118
1987	0	0	0	0	0	0
1988	2	53.6544	17	140	132	148
1989	1	1293.2352	130*	143	78	203

Tabla A.2.3
Resumen de la estación Cañon de Fernández

ESTACIÓN CAÑON DE FERNANDEZ Qr95%=0.12 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1937	2	409.1904	36*	171	152	189
1938	2	264.5568	24	161	149	172
1939	1	0.6048	2	162	161	162
1940	0	0	0	0	0	0
1941	2	81.3888	15*	135	126	144
1942	1	38.1024	10*	180	174	185
1943	0	0	0	0	0	0
1944	1	4.4928	2	180	179	180
1945	1	290.2176	38*	162	143	181
1946	3	267.84	26	159	146	171

ESTACIÓN CAÑON DE FERNANDEZ Qr90%=0.271 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1937	2	778.7456	53	163	137	189
1938	1	692.2368	75*	132	91	172
1939	1	132.7968	29*	155	139	171
1940	0	0	0	0	0	0
1941	2	262.3968	46	122	99	144
1942	1	183.168	25*	173	159	186
1943	1	16.848	5*	154	150	157
1944	1	94.4352	21*	169	158	180
1945	1	652.4928	45	159	137	181
1946	3	577.584	47*	146	121	171

ESTACIÓN CAÑON DE FERNANDEZ Qr85%=0.378m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1937	2	1756.425	96*	139	88	109
1938	1	1426.2048	85	130	88	172
1939	1	492.2208	42*	155	133	176
1940	6	12.6144	2	161	160	161
1941	3	549.6738	35*	122	99	144
1942	1	506.1312	41*	166	145	187
1943	2	113.7888	20*	147	137	157
1944	1	280.1952	23	169	158	180
1945	3	1126.656	54*	157	130	184
1946	3	969.6672	45*	146	121	171

Tabla A.2.4
Resumen de la estación Piaxtla

ESTACIÓN PIAXTLA Qr95%= 1.746 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	tb(Dmax)	te(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1958	2	1092.2688	27*	140	126	154
1959	2	964.7424	21	153	143	163
1960	2	4609.008	77	128	90	166
1961	1	1169.1648	35	135	118	152
1962	2	2535.6672	51	147	122	172
1963	1	5216.6592	97*	117	68	165
1964	1	348.8832	18	135	126	143
1965	1	4674.9312	73	137	101	173
1966	3	2867.7888	42*	124	102	146
1967	1	4277.664	85	117	75	159
1968	0	0	0	0	0	0
1969	0	0	0	0	0	0
1970	0	0	0	0	0	0
1971	0	0	0	0	0	0
1972	1	1464.6528	42	130	109	150
1973	0	0	0	0	0	0

ESTACIÓN PIAXTLA Qr90%=2.343 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	tb(Dmax)	te(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1958	2	2725.7474	36	137	119	154
1959	2	3741.7228	50*	144	177	171
1960	1	9833.0976	102*	105	74	178
1961	2	3401.136	51	128	103	153
1962	2	6023.9808	80	133	93	172
1963	1	10328.1696	101	115	65	165
1964	2	1708.3008	34	127	11	144
1965	1	8819.9712	91	128	83	173
1966	2	7312.6368	79*	105	63	146
1967	2	8827.4016	93*	113	66	159
1968	0	0	0	0	0	0
1969	2	265.5072	11	165	160	170
1970	1	46.3968	9	170	166	174
1971	0	0	0	0	0	0
1972	0	4173.0336	63	120	89	151
1973	3	162.2592	6	172	169	174

ESTACIÓN PIAXTLA Qr85%=2.905 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	tb(Dmax)	te(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1958	4	4509.216	38	136	117	154
1959	2	6366.384	57	143	115	171
1960	1	15140.131	114*	122	64	179
1961	3	5931.7056	53	127	101	153
1962	2	10158.6528	87	129	86	172
1963	1	15680.3904	112	110	54	165
1964	2	3533.76	44	123	101	144
1965	1	13465.44	108	121	67	174
1966	2	11326.608	85*	102	58	146
1967	2	13729.392	109	106	52	160
1966	1	57.888	4	165	163	166
1969	2	1292.544	32	131	116	147
1970	1	1674	55	149	122	176
1971	0	0	0	0	0	0
1972	2	7803.216	85	109	67	151
1973	2	1383.824	31*	145	129	161

Tabla A.2.5

Resumen de la estación Acatitan

ESTACION ACATITAN Qr95%=0.128 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1955	2	56.5056	26	160	147	172
1956	0	0	0	0	0	0
1957	1	143.856	61	148	118	178
1958	1	43.632	29*	141	126	151
1959	0	0	0	0	0	0
1960	1	42.3232	27	156	143	169
1961	0	0	0	0	0	0
1962	0	0	0	0	0	0
1963	2	89.7696	25	156	144	168
1964	0	0	0	0	0	0
1965	1	235.008	56*	157	129	185
1966	2	96.5952	24	137	125	148
1967	1	149.904	54	149	122	175
1968	0	0	0	0	0	0
1969	0	0	0	0	0	0
1970	0	0	0	0	0	0
1971	0	0	0	0	0	0
1972	0	0	0	0	0	0
1973	0	0	0	0	0	0

ESTACION ACATITAN Qr85%=0.181 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1955	1	232.6752	42	152	131	172
1956	2	56.5056	22	129	118	139
1957	1	474.336	81	139	61	179
1958	2	219.1104	49	131	107	155
1959	1	78.5504	36	154	136	171
1960	1	277.9488	65*	148	115	181
1961	2	64.0828	26	156	143	166
1962	1	26.4384	42*	153	131	175
1963	2	387.6422	63*	137	105	168
1964	2	25.2288	10	169	164	173
1965	1	513.0432	73	149	113	185
1966	2	277.8624	44	127	105	148
1967	1	436.7392	72	140	104	175
1968	0	0	0	0	0	0
1969	0	0	0	0	0	0
1970	1	49.3344	20	171	161	180
1971	1	0.6912	3*	165	163	166
1972	0	0	0	0	0	0
1973	0	0	0	0	0	0

ESTACION ACATITAN Qr85%=0.239 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1955	1	518.832	65	140	108	172
1956	2	230.0832	42	120	99	140
1957	2	899.424	88	136	92	179
1958	2	533.4336	65	123	91	155
1959	1	316.1376	55	150	123	177
1960	1	653.616	86	139	96	181
1961	1	264.9212	51	143	118	168
1962	1	192.672	45	153	131	175
1963	1	786.8102	85*	135	92	177
1964	1	287.7984	50	149	124	173
1965	1	890.352	77	148	110	186
1966	3	514.944	50	124	99	148
1967	1	841.966	87	132	89	175
1968	0	0	0	0	0	0
1969	0	0	0	0	0	0
1970	1	145.0656	21	170	160	180
1971	1	123.3792	71*	131	93	169
1972	1	58.32	20	149	139	158
1973	0	0	0	0	0	0

Tabla A.2.6

Resumen de la estación Santa Cruz

ESTACION SANTA CRUZ Qr95%=1.60 m³/s		Dmax	T(Dmax)	T'(Dmax)	Tb(Dmax)	Tc(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1944	0	0	0	0	0	0
1945	2	93 6578	4	160	158	161
1946	2	1853 9712	49	139	115	163
1947	1	17 8256	4	159	168	161
1948	1	57 3696	8	135	131	138
1949	0	0	0	0	0	0
1950	0	0	0	0	0	0
1951	1	1011 744	50	144	119	169
1952	2	369 9648	21	147	137	167
1953	2	1870 0416	42	148	127	168
1954	3	602 8992	36	147	130	165
1955	1	27 9336	5	161	169	163
1956	0	0	0	0	0	0
1957	2	492 5664	23	148	137	169
1958	1	595 2096	24	143	131	164
1959	1	1401 1488	42*	152	126	177
1960	1	1816 8032	45	143	121	165
1961	2	72 8352	9	136	132	140
1962	1	1455 5808	32	158	142	173
1963	2	382 9664	27*	127	111	142
1964	0	0	0	0	0	0
1965	1	209 2608	24*	160	146	173
1966	0	0	0	0	0	0
1967	1	763 776	35	128	111	145
1968	0	0	0	0	0	0
1969	0	0	0	0	0	0
1970	0	0	0	0	0	0
1971	0	0	0	0	0	0
1972	0	0	0	0	0	0
1973	0	0	0	0	0	0
1974	0	0	0	0	0	0
1975	0	0	0	0	0	0
1976	1	563 0688	66	140	119	161
1977	0	0	0	0	0	0
1978	2	235 44	7	137	134	140
1979	0	0	0	0	0	0
1980	1	194 864	10	157	152	161
1981	2	3187 4688	23	174	163	185
1982	1	1022 1984	5	165	163	167

ESTACION SANTA CRUZ Qr90%=2.406 m³/s		Dmax	T(Dmax)	T'(Dmax)	Tb(Dmax)	Tc(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1944	0	0	0	0	0	0
1945	1	829 3536	30*	157	142	172
1946	1	5289 9264	90	119	74	163
1947	1	471 4848	15	156	149	163
1948	2	188 1792	13	132	126	138
1949	2	53 136	3	168	167	169
1950	1	511 056	28	138	124	151
1951	3	3674 7648	69*	133	97	168
1952	3	1762 7328	36	144	126	161
1953	2	4418 2368	87	136	104	168
1954	1	3413 8368	70	131	96	165
1955	2	1268 352	37	146	128	164
1956	1	578 016	27*	124	110	137
1957	1	2740 0608	61	141	111	171
1958	1	1796 7744	31	139	124	154
1959	1	3784 9248	60	148	118	177
1960	2	3851 1936	59	136	107	165
1961	1	964 224	25	141	129	163
1962	2	3275 9424	50*	150	124	175
1963	2	2014 5888	47	122	99	145
1964	0	0	0	0	0	0
1965	1	1832 544	41	154	134	174
1966	0	0	0	0	0	0
1967	1	2590 0128	60	131	107	166
1968	0	0	0	0	0	0
1969	0	0	0	0	0	0
1970	1	686 7072	29	161	147	175
1971	1	591 4944	48	144	121	166
1972	1	40 5216	3	148	147	149
1973	0	0	0	0	0	0
1974	3	165 3696	15	137	130	144
1975	0	0	0	0	0	0
1976	2	2695 7664	52	136	110	161
1977	1	134 0928	10	150	145	164
1978	2	1264 2912	41	141	121	161
1979	0	0	0	0	0	0
1980	1	1171 2384	35	147	130	164
1981	2	4210 3584	24	174	162	185
1982	1	801 4464	5	166	163	167

ESTACIÓN SANTA CRUZ Qr85%=2.916 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1944	1	20.3904	3	162	161	163
1945	3	2942.0928	73	136	100	172
1946	1	9676.7136	103	112	61	163
1947	2	1390.6944	25	151	139	163
1948	3	1515.1968	20	129	119	138
1949	3	207.6192	9	159	155	163
1950	1	2026.7712	40	132	112	151
1951	2	7189.2576	86*	134	91	177
1952	3	3461.0112	41	141	121	161
1953	3	7722.864	83*	125	82	168
1954	1	6626.7936	78	128	89	166
1955	1	3309.7248	52*	144	118	170
1956	1	2713.6512	66*	104	70	137
1957	3	5456.6784	66	139	106	171
1958	1	3277.0656	36	137	119	154
1959	2	6494.7744	63	146	115	177
1960	2	6798.2112	73	130	94	166
1961	2	2141.7696	33	137	121	153
1962	1	6654.8736	77	138	100	176
1963	1	5595.4368	82*	123	80	166
1964	1	373.8528	17	136	128	144
1965	1	3932.2368	61	144	114	174
1966	1	79.92	3	166	165	167
1967	1	5226.24.96	73	120	84	156
1968	0	0	0	0	0	0
1969	1	189.648	9	167	163	171
1970	1	2383.1712	46	156	133	178
1971	1	4145.5834	87	125	82	168
1972	1	998.0064	34	133	117	150
1973	0	0	0	0	0	0
1974	3	1728	44*	128	106	151
1975	2	103.0752	8*	173	169	177
1976	2	5264.784	66	129	97	162
1977	1	1073.952	32	140	124	155
1978	2	3421.872	62	132	101	162
1979	0	0	0	0	0	0
1980	2	3125.088	58	136	107	164
1981	3	5269.968	24	174	162	185
1982	1	1022.1984	5	165	163	167

Tabla A.2.7
Resumen de la estación La Huerta

ESTACIÓN LA HUERTA Qr95%=1.822 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	tb(Dmax)	te(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1970	0	0	0	0	0	0
1971	1	2784.2112	72*	129	90	165
1972	2	584.5824	33	133	117	149
1973	0	0	0	0	0	0
1974	3	2047.7664	57	121	93	149
1975	0	0	0	0	0	0
1976	1	4895.5968	58*	132	101	162
1977	1	719.28	40	133	113	152
1978	1	1445.9904	42*	97	73	120
1979	0	0	0	0	0	0
1980	0	0	0	0	0	0
1981	1	239.6736	11	161	156	166
1982	2	178.9344	12	156	150	161
1983	0	0	0	0	0	0
1984	1	85.536	8	126	122	129
1985	0	0	0	0	0	0
1986	2	768.7872	10	159	154	163
1987	0	0	0	0	0	0
1988	3	68.4288	10	149	144	153
1989	1	227.1456	28*	163	149	177
1990	0	0	0	0	0	0
1991	2	19.6992	7	153	150	156
1992	0	58.32	32*	123	107	139
1993	0	0	0	0	0	0
1994	1	178.418	8	130	126	133

ESTACIÓN LA HUERTA Qr90%=2.215 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	tb(Dmax)	te(Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1970	1	6.912	3*	169	167	170
1971	3	5572.1952	92	120	74	165
1972	2	2268.432	57	121	74	165
1973	1	21.0816	7	151	148	154
1974	2	5132.9376	117	91	33	149
1975	1	71.3664	10	155	150	159
1976	2	7002.8064	63*	130	97	162
1977	2	2212.704	50	128	103	152
1978	2	3126.4704	53	94	68	120
1979	1	12.7008	3	168	167	169
1980	0	0	0	0	0	0
1981	1	621.5616	12	161	155	166
1982	1	1819.2384	69	127	93	161
1983	1	216	2	165	165	166
1984	1	585.4464	19	121	112	130
1985	0	0	0	0	0	0
1986	3	1113.0496	11	158	153	163
1987	0	0	0	0	0	0
1988	1	1184.3712	43	135	114	156
1989	2	1301.0976	39	156	137	175
1990	1	166.752	11	153	148	158
1991	1	967.7664	40*	161	140	182
1992	0	0	0	0	0	0
1993	1	348.6376	32	134	118	149
1994	3	487.4688	12*	128	121	134

ESTACION LA HUERTA Qr85%=2.601 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1970	1	878.7744	44	153	131	174
1971	1	9738.2304	129	101	37	165
1972	2	4359.9168	67	116	83	149
1973	3	448.3296	15	152	145	159
1974	2	9260.6976	131	84	19	149
1975	1	560.1312	25	147	135	159
1976	1	10556.784	110*	106	50	162
1977	3	3906.0576	52	128	102	153
1978	3	5002.6464	59	91	62	120
1979	3	454.8096	41	326	306	346
1980	2	101.9532	6	147	144	149
1981	1	1053.216	14	160	153	166
1982	2	4072.464	75	124	87	161
1983	1	103.7864	6	164	161	166
1984	2	1397.6928	30*	117	102	132
1985	0	0	0	0	0	0
1986	2	3727.3824	80*	107	66	148
1987	0	0	0	0	0	0
1988	3	2750.6304	54*	129	101	156
1989	2	3189.9744	68	142	108	175
1990	1	586.7424	15	151	144	158
1991	1	2717.0208	62*	151	120	182
1992	0	0	0	0	0	0
1993	3	2028.24	60	123	94	153
1994	1	2291.9228	57*	124	94	154

Tabla A.2.8
Resumen de la estación San Antonio

ESTACION SAN ANTONIO Qr95%=0.099 m³/s		Dmax	T(Dmax)	t(Dmax)	t _b (Dmax)	t _e (Dmax)
año	k	miles de m³	días	avo día	avo día	avo día
1942	1	23.5008	26	180	167	192
1943	0	0	0	0	0	0
1944	0	0	0	0	0	0
1945	0	0	0	0	0	0
1946	0	0	0	0	0	0
1947	0	0	0	0	0	0
1948	0	0	0	0	0	0
1949	1	1.1232	2	159	158	159
1950	0	0	0	0	0	0
1951	1	55.5552	22	167	156	177
1952	5	7.9488	9	157	153	161
1953	4	87.9552	42	126	105	146
1954	2	5.8752	2	161	161	162
1955	3	152.064	40	150	130	169
1956	2	28.5984	14	225	218	231
1957	2	213.3216	64*	137	103	170
1958	6	84.1536	25	100	88	112
1959	2	12.7872	11	173	168	178
1960	1	5.8752	6	128	125	130
1961	2	23.0688	10	161	156	165
1962	1	40.0032	30*	175	160	190
1963	4	60.0352	17	155	147	163
1964	1	58.32	32*	123	107	139
1965	5	32.2272	11	192	187	197
1966	0	0	0	0	0	0
1967	0	0	0	0	0	0
1968	1	2.4192	6	179	176	181
1969	0	0	0	0	0	0
1970	3	15.7248	10*	169	164	174
1971	0	0	0	0	0	0
1972	0	0	0	0	0	0
1973	0	0	0	0	0	0
1974	0	0	0	0	0	0

SAN ANTONIO		Qr90%=0.133 m³/s				
año	k	Dmax miles de m³	T(Dmax) días	t(Dmax) avo día	tb(Dmax) avo día	te(Dmax) avo día
1942	2	128.4768	48*	168	143	192
1943	0	0	0	0	0	0
1944	0	0	0	0	0	0
1945	1	32.832	23*	169	156	181
1946	0	0	0	0	0	0
1947	1	3.8016	5	161	159	163
1948	1	1.552	3	172	170	173
1949	2	50.976	29*	142	123	160
1950	0	0	0	0	0	0
1951	3	135.0432	162	146	177	177
1952	6	13.8528	37*	142	121	162
1953	4	196.4736	47	123	100	146
1954	5	34.992	20*	87	77	97
1955	2	306.72	57*	141	112	169
1956	4	73.872	16	224	216	231
1957	2	628.8192	103*	145	92	198
1958	5	194.4864	44*	112	88	135
1959	1	96.8544	37*	158	138	178
1960	2	78.5376	37*	111	91	131
1961	2	80.4384	21	155	145	165
1962	2	148.0032	44*	171	149	193
1963	4	114.6528	18	155	146	163
1964	4	174.0096	44*	117	94	139
1965	4	69.8112	14	191	184	197
1966	2	3.3696	7	81	78	84
1967	0	0	0	0	0	0
1968	2	30.1536	12*	178	170	182
1969	0	0	0	0	0	0
1970	2	79.92	25	162	150	174
1971	1	14.6016	11	167	162	172
1972	0	0	0	0	0	0
1973	0	0	0	0	0	0
1974	0	0	0	0	0	0

SAN ANTONIO		Qr85%=0.168 m³/s				
año	k	Dmax miles de m³	T(Dmax) días	t(Dmax) avo día	tb(Dmax) avo día	te(Dmax) avo día
1942	1	303.6098	63*	186	133	199
1943	1	6.2208	9*	151	146	156
1944	0	0	0	0	0	0
1945	1	119.664	34*	164	146	181
1946	1	21.7728	14	164	157	170
1947	2	24.2784	7	160	154	163
1948	2	25.1424	11	168	163	173
1949	2	160.5312	41*	139	118	160
1950	1	6.8984	6	145	143	148
1951	3	296.6112	59*	146	115	177
1952	4	329.616	78*	123	83	162
1953	4	357.3504	66*	113	80	146
1954	6	119.0592	34	81	64	97
1955	2	552.0096	72*	142	102	181
1956	2	294.968	63*	197	163	231
1957	2	984.2688	122*	137	75	198
1958	6	355.1904	62*	104	72	135
1959	1	230.8608	50*	152	126	178
1960	2	308.2752	90*	114	68	160
1961	2	214.6176	44*	143	120	165
1962	2	310.0896	60	164	134	193
1963	5	374.4576	78*	87	48	126
1964	2	414.8928	93*	92	45	139
1965	6	172.8	46	127	104	149
1966	2	130.1184	58*	76	47	105
1967	1	3.024	4	136	134	137
1968	1	118.2816	27*	168	153	182
1969	0	0	0	0	0	0
1970	3	156.9888	26	163	150	175
1971	2	47.8656	11	167	162	172
1972	1	1.2096	3	147	146	148
1973	0	0	0	0	0	0
1974	0	0	0	0	0	0

APÉNDICE 1

Valores cuantiles de las distribuciones F y t de Student.

Tabla 1 Valores cuantiles de la distribución F.

1- α = 0.95										
V ₂	V ₁ = grados de libertad en el numerador									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.45	199.50	215.70	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.97
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.73
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16
35	4.12	3.27	2.87	2.64	2.49	2.37	2.29	2.22	2.16	2.11
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93
200	3.89	3.04	2.65	2.42	2.26	2.14	2.06	1.98	1.93	1.88
500	3.86	3.01	2.62	2.39	2.23	2.12	2.03	1.96	1.90	1.85
1000	3.85	3.01	2.61	2.38	2.22	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84

Tabla 2 Valores cuantiles de la distribución t de Student.

v	to.800	to.900	to.950	to.975	to.990	to.995	to.999
1	1.376	3.078	6.314	12.706	31.820	63.656	318.294
2	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327
3	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214
4	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	0.889	1.397	1.860	2.301	2.896	3.355	4.501
9	0.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	0.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	0.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	0.863	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	0.862	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	0.861	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.860	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	0.859	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	0.858	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	0.858	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	0.857	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.856	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
26	0.856	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	0.855	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	0.855	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	0.854	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.854	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
35	0.852	1.306	1.690	2.030	2.438	2.724	3.340
40	0.851	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
45	0.850	1.301	1.679	2.014	2.412	2.690	3.281
50	0.849	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261
60	0.848	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232
70	0.847	1.294	1.667	1.994	2.381	2.648	3.211
80	0.846	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195
90	0.846	1.291	1.662	1.987	2.368	2.632	3.183
100	0.845	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.140
200	0.843	1.286	1.652	1.972	2.345	2.601	3.131
500	0.842	1.283	1.648	1.965	2.334	2.586	3.107
1000	0.842	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098