

Identificación y análisis de sequías en la Región Hidrológica Número 10, Sinaloa

Carlos Escalante
Lilia Reyes

Universidad Nacional Autónoma de México

Se presenta una técnica para la identificación de sequías que junto con un proceso de simulación de muestras sintéticas permite pronosticar el inicio, la duración, la severidad, y la terminación de las sequías. Se describen las técnicas de análisis de frecuencias de gastos mínimos anuales, tanto a nivel puntual como regional en sitios con escasa o nula información. Para la construcción del modelo regional se realizó, previamente, un proceso de delimitación de regiones homogéneas. Las técnicas son aplicadas a los registros de 42 estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica No. 10, ubicada en el noroeste de México. Los resultados proveen una forma de establecer zonas de ocurrencia de las sequías además de desarrollar ecuaciones regionales para la estimación de eventos de sequía para diferentes periodos de retorno tanto en forma puntual como regional.

Palabras clave: sequías, análisis de frecuencia de gastos mínimos, delimitación de regiones homogéneas, análisis regional, simulación de muestras sintéticas.

Introducción

En la República Mexicana existe una gran variedad de climas y condiciones hidrometeorológicas que van desde las desérticas en el norte y noroeste del país, hasta las del trópico húmedo prevalecientes en el sureste. Más del 65% de la superficie del País es árida o semi-árida, y recibe apenas el 20% del escurrimiento en ríos. No obstante, en este lugar se localizan las dos terceras partes de la población, el 70% de la industria manufacturera y el 90% de la superficie de agricultura de riego, lo que conlleva una demanda importante de agua.

Gran parte del territorio nacional se ve afectado año tras año con la ocurrencia de tormentas tropicales, ciclones, huracanes y sequías de diversa intensidad, cuyos efectos de diferente magnitud van desde la pérdida de vidas humanas, hasta los daños materiales y económicos de toda índole.

El análisis hidrológico de los eventos extremos se ha concentrado en el estudio de las avenidas y sus efectos, y se le ha prestado poca atención a las sequías, aún cuando estas últimas provocan daños de igual o mayor magnitud que las primeras.

En los últimos años se han registrado en México tres periodos críticos de sequía, el primero de 1948-1954, el segundo de 1960 a 1964 y finalmente el más reciente de 1993 a 1996. La frecuencia con que se presenta es, en promedio, de diez años y con duraciones de uno a tres años. Si bien éstas son estadísticas promedio a nivel nacional, es importante conocer su comportamiento tanto puntual como regionalmente.

Los daños causados por las sequías en los sectores agrícola, ganadero y forestal de México durante el periodo 1988-1994 se aprecian en el cuadro 1 (Comisión Nacional del Agua, 1995). Comparando los efectos provocados por la sequía en el año de 1995 en algunos estados de la República (cuadro 2), con aquellos del periodo 1988-1994 (cuadro 1), se observa un incremento importante en los daños. Estas condiciones llevaron a declarar al titular de la Secretaría de Agricultura como la peor sequía de los últimos cuarenta años al periodo de 1993 a 1995 (Juárez, 1995).

El Programa Emergente de Sequías determinó que la precipitación acumulada en 1995 registró valores del 40% por debajo del normal histórico, situación que no se presentaba en la zona norte del País desde 1982, además de que durante 1994 las lluvias en algunas

1. Daños causados por las sequías en los sectores agrícola, ganadero y forestal en México en el periodo 1988-1994

Número	Entidad	Agricultura Hectáreas dañadas	Ganadería Cabezas de ganado	Forestal Hectáreas dañadas	Número incendios
1	Chihuahua	857,778	100,070	59,561	780
2	Estado de México	556,059	12	51,363	4,845
3	Zacatecas	530,752	19,088	57,229	91
4	Oaxaca	522,496	0	69,455	232
5	Durango	482,581	2,200	125,998	1,370
6	Guanajuato	470,164	30	13,852	90
7	Jalisco	249,093	300	63,140	759
8	Puebla	207,740	60	12,124	395
9	Guerrero	204,427	654	82,620	1,258
10	Tamaulipas	141,322	1,775	59,370	50
11	Aguascalientes	134,538	0	4,287	33
12	Chiapas	133,820	387	117,237	615
13	San Luis Potosí	112,967	14,840	9,929	67
14	Veracruz	104,907	7,129	9,023	271
15	Yucatán	88,257	3,014	10,693	57
16	Nuevo León	82,276	8,560	30,621	45
17	Tlaxcala	67,318	0	4,881	332
18	Quintana Roo	60,734	0	153,411	251
19	Morelos	57,090	0	6,796	1,053
20	Nayarit	51,942	80	25,810	238
21	Campeche	48,103	0	310	0
22	Coahuila	32,928	28,796	171,681	182
23	Baja California	19,930	1,347	14,325	58
24	Michoacán	2,680	0	60,853	2,912
25	Querétaro	1,302	0	4,847	40
26	Hidalgo	0,021	10,431	3,039	220
27	Tabasco	861	0	284	0
28	Colima	765	0	2,812	18
29	D.F.	669	0	11,099	1,279
30	Baja California Sur	0	34,980	0	0
31	Sinaloa	0	35,559	1,494	0
32	Sonora	0	32,985	26,480	16
Total		5,224,970	302,297	1,264,624	17,557

entidades federativas fueron menores a las normales (Serrano, 1995).

En 1995 la sequía se vio agudizada, además de la escasa precipitación, por el uso irracional del líquido en periodos previos y por la contaminación de los mantos acuíferos.

En el campo, la falta de lluvias ocasionó severos estragos. La Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, SAGAR, estimó que en el ciclo otoño-invierno (1994-1995) se sembraron 180 mil hectáreas menos que el promedio de los cinco años anteriores en los distritos de riego.

En el sector ganadero en las cinco entidades más afectadas se registró una pérdida de 200 mil cabezas, además de la disminución de peso en 4 millones de cabezas, lo que provocó la venta masiva de ganado al 50% de su precio normal.

La grave sequía también causó severas repercusiones en la ocupación de los campesinos que dejaron de percibir alrededor de 20 millones de jornales directos. Se estima que un millón 200 mil campesinos abandonaron sus tierras. Por si fuera poco, se presentaron serios conflictos en el abasto de agua potable a las ciudades y a las comunidades rurales, con los conse-

2. Daños causados por las sequías en los estados de la República Mexicana más afectados durante 1995

Número	Entidad	Agricultura Hectáreas dañadas	Ganadería Cabezas de ganado
1	Chihuahua	524,500	160,000
2	Zacatecas	40% cultivos	25,000
3	Durango	5,500	6,000
4	Tamaulipas	26,000	6,000
5	San Luis Potosí	3,500	6,000
6	Nuevo León	2,700	10,000
7	Coahuila	200,000	40,000
8	Baja California Sur	0	80,000
9	Sinaloa	87,000	0

cuentes problemas de salud. El cólera repuntó en diversos estados, presentándose en promedio seiscientos casos por semana (Limón, 1995).

La escasez del líquido se tradujo en un conflicto entre usuarios de agua para riego y los habitantes de las ciudades. Un ejemplo de esto fue la disputa por el suministro de agua de la presa El Cuchillo entre la zona metropolitana de Monterrey y las zonas de riego de Tamaulipas.

Si bien el hombre puede hacer poco para evitar las sequías, cuenta con la capacidad de reducir al mínimo sus efectos, mediante el análisis y una mejor comprensión del fenómeno.

Definición de sequía y aridez

Sequía

Se tienen dificultades para encontrar una definición que sea ampliamente aceptada para el término sequía (Yevjevich, 1983). Las definiciones dependen del enfoque con que se traten, ya sea desde el punto de vista profesional (meteorología, hidrología, geografía, desarrollo de los aprovechamientos hidráulicos, etc.) o de la actividad económica que afectan (agricultura, industria, producción de energía eléctrica, suministro de agua para consumo doméstico, la navegación y la recreación). Sin embargo, puede establecerse que una sequía ocurre cuando se presenta un significativo déficit de agua (valor crítico) tanto en el tiempo como en el espacio.

La palabra significativo, quiere decir que los impactos ambientales, económicos y sociales de la sequía son muy importantes para el ser humano. El criterio

para establecer el valor crítico de la sequía depende generalmente de factores económicos. Por ejemplo, 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 o la producción industrial.

Por todo lo anterior una sequía es generalmente definida como escasez con referencia a necesidades específicas del agua en relación con el suministro y la demanda.

Con el fin de definir y comparar las características de las sequías se ha propuesto un conjunto de índices. La mayoría de ellos han intentado identificar las características meteorológicas de las sequías. Este es el caso de los índices de Lang, Martonne, Thornthwaite, Prescott, Capot-Rey, Bailey, Moral y Palmer. A pesar de sus limitaciones, es benéfico el uso de estos índices, particularmente de los más elaborados como el de Palmer (Alley, 1984), debido a que proporcionan una medida comparativa del impacto y de la severidad de las sequías que ocurrieron en varios sitios en diferentes ocasiones.

Aridez

La definición de aridez, en términos de planeación y manejo de recursos hídricos según Wiener (1972), está relacionada con las condiciones y el acceso del recurso agua que limitan seriamente la sobrevivencia o el crecimiento de una economía. En términos operativos, una región o un país son considerados áridos o semiáridos cuando la cantidad o la calidad, o ambas condiciones del agua representan una variable crítica que controla su planeación y desarrollo.

Para definir el término de aridez, se debe partir de las características de la superficie terrestre; geomorfología y vegetación, las cuales afectan el clima hasta presentar las condiciones comunes de desertificación. Sin embargo, la definición más formal está en función de las causas que la originan y a menudo se basan en comparaciones entre precipitación y algunas medidas de potencial de evaporación, un buen ejemplo de lo anterior es la publicación de la UNESCO (1979). Esta definición se fundamenta en el valor del cociente de la altura de precipitación media anual con respecto a la evapotranspiración potencial media anual P/ETP . Valores de esta relación definen tres grados de aridez: < 0.03 para la zona hiperárida, $0.03-0.20$ para la zona árida y $0.20-0.50$ para la zona semiárida. Se pueden definir algunas subclasificaciones basadas en temperatura, longitud del periodo anual seco y régimen estacional de precipitación.

Es importante señalar la diferencia conceptual que existe entre aridez y sequía, toda vez que ambas condiciones se caracterizan por la ausencia de agua:

- La aridez es un estado climático permanente.
- La sequía es un proceso extremo que se presenta en el tiempo y en el espacio.

La sequía y la aridez frecuentemente se asocian entre sí, debido a que las regiones más secas son usualmente aquellas donde la variabilidad de la precipitación es más alta.

La mayor parte de las características hidrológicas para las zonas definidas como áridas y semiáridas son similares ya que presentan un nivel bajo de humedad, valores altos de insolación, variación extrema de temperatura y precipitación media anual relativamente baja. Por otro lado, un escenario común en las zonas clasificadas como semiáridas es que el 90% de la precipitación total anual ocurre tan sólo en el 10% del periodo de lluvias de la región.

Identificación de sequías

Las sequías son identificadas mediante su inicio, duración, severidad terminación y extensión en el espacio. Un primer paso en el proceso de identificación consiste en establecer el llamado nivel de truncamiento (umbral), el cual permite distinguir las sequías de otros eventos en los datos históricos. Los estadísticos muestrales como la media y la mediana de las series registradas se utilizan generalmente para definir el nivel de truncamiento. Puede decirse que el uso de la mediana es útil para el análisis de duraciones, mientras que la media lo es para el de severidades. Sin embargo, un análisis completo de sequías relaciona simultáneamente la duración y la severidad. Lo anterior no resulta práctico ya que involucra el uso de dos niveles diferentes de umbral. Un procedimiento sugerido para evitar la controversia en la selección de este nivel es el de *Normalización de la muestra analizada*, que remueve el sesgo (coeficiente de asimetría muestral igual a cero) y se espera con esto que la media y la mediana de la muestra coincidan, sin embargo, las dos medidas de tendencia central usualmente no son idénticas, aún después de la transformación normalizante (Logarítmica, Box-Cox o Box-Cox de Doble Potencia), por lo tanto es recomendable utilizar la media como umbral ya que es más sensitiva al considerar los valores extremos de la serie de datos.

La técnica de identificación de las características de una sequía desarrollada por Mohan (1991), puede

aplicarse al análisis de series de tiempo periódicas, ya sea de escurrimientos o precipitaciones mensuales.

Para determinar la ocurrencia de la sequía se calcula mes a mes el valor de la media de la serie analizada, ubicando así el umbral que separa los potenciales eventos de sequía y excedencias. La suma algebraica de estos eventos se multiplica por un factor de peso para el siguiente mes y el producto, positivo o negativo, es sumado a los valores mensuales de la serie, siendo la suma el escurrimiento o precipitación efectiva. Si $T(t)$ representa el umbral (media de la serie) para el periodo de tiempo t , $Q(t)$ el escurrimiento o precipitación registrada en el periodo de tiempo t , $E(t)$ el escurrimiento o precipitación efectiva y $D(t)$ la diferencia (positiva o negativa) en el periodo de tiempo t , entonces:

$$E(t) = Q(t) + D(t-1) \cdot W(t) \quad (1)$$

$$D(t) = Q(t) - T(t) \quad (2)$$

donde $W(t)$ es un factor de peso para el mes t dado por:

$$W(t) = 0.1 \left[1 + T(t) / \sum_{t=1}^{12} T(t) / 12 \right] \quad (3)$$

Si el coeficiente de variación entre los periodos de escurrimiento o precipitación mensual es grande $C_v > 25\%$, ($C_v = \sigma / \bar{Q}(t)$) el valor del umbral se calculará con la ecuación:

$$T(t) = \bar{Q}(t) - \sigma_1^2 / \bar{Q}(t) \quad (4)$$

$\bar{Q}(t)$ = escurrimiento o lluvia media mensual para el mes t

σ_1 = desviación estándar del escurrimiento o lluvia mensual para el mes t .

Utilizando (1), (2) y (3) el escurrimiento o precipitación efectiva para cada mes de registro debe calcularse para retrasar el efecto de excedencia o déficit de escurrimiento o precipitación del mes precedente. Para el primer mes de registro el retraso se considera igual a cero, tal que el flujo efectivo sea igual al registrado.

Son pocos los parámetros que se requieren para probar el inicio y la terminación de las sequías. El primer parámetro, el déficit medio mensual (DMM) es calculado para cada uno de los meses empleando (2). El DMM no sólo considera los meses con diferencias negativas, ya que para aquellos con resultado positivo el valor que se le asigna es igual a cero. La suma de los

12 valores del DMM producen el déficit medio anual (DMA). Los otros parámetros necesarios son el valor más alto de escurrimiento o precipitación media mensual, la suma de los dos más altos valores de escurrimiento o precipitación media mensual y así sucesivamente hasta obtener la suma de los 12 valores que producen el escurrimiento o precipitación media mensual.

Para establecer el inicio de las sequías se compara la suma de las diferencias negativas a lo largo de la serie de tiempo, con una escala de 12 valores calculados por interpolación lineal entre el máximo valor de $T(t)$ (MMM) y el DMA. Así se obtendrá un incremento mensual X por la expresión:

$$x = \frac{DMA - MMM}{11} \quad (5)$$

El primer valor de la escala será igual a MMM, siendo el máximo déficit que puede ocurrir en un mes. El segundo valor en la escala será $MMM + 1X$, el tercero será $MMM + 2X$ y así sucesivamente hasta $MMM + 11X$ el cual es equivalente a DMA.

Para evaluar las sequías primero se establece que no existe alguna al inicio del registro disponible. Las diferencias $D(t)$ se calculan mes a mes hasta encontrar una diferencia negativa, y es en este mes donde se considera la presencia de una posible sequía. El valor absoluto de la diferencia negativa es comparado con el primer valor de la escala (MMM), si son iguales se considera que la sequía potencial ha iniciado. Si MMM no es igualado, entonces se obtiene la diferencia del siguiente mes y, si es negativa, se suma a la diferencia negativa del mes anterior y se compara con el segundo valor de la escala, es decir $MMM + 1X$, si este valor es excedido por el valor absoluto de los dos déficit combinados se considera que la sequía está presente iniciándose en el mes anterior. En general, se deben analizar secuencialmente las diferencias mes por mes y compararse con los 12 valores de la escala. Si en cualquier tiempo el valor de la suma de las diferencias negativas del primero hasta el n -ésimo mes exceden el valor de $MMM + (n-1) \cdot X$, la sequía está presente teniendo como inicio el primer mes.

Simultáneamente con la prueba secuencial se debe realizar la suma de las diferencias desde el primer mes analizado y si en algún momento de las once pruebas la suma es positiva la sequía se considera que ha terminado. Otra forma de identificar la terminación de una sequía es cuando dos meses consecutivos presentan diferencias positivas.

Para comprobar esta finalización se deben cumplir dos condiciones, la primera requiere la identificación

de la terminación de manera temporal, es decir, revisar todas la diferencias algebraicas del primer mes hasta el n -ésimo mes, si la suma algebraica se convierte en negativa, antes que la condición de terminación sea satisfecha, entonces se considera que la sequía sólo ha sido interrumpida temporalmente. La segunda condición comprende la realización de diez análisis secuenciales que consisten en sumar el escurrimiento o precipitación registrada del primer al tercer mes y compararla con la suma de los tres valores más altos de escurrimiento o precipitación media mensual. Si la primera suma es más alta que la segunda, la sequía se considera como terminada, pero si no ocurre esto, se sumarán los primeros cuatro meses para posteriormente compararlos con la suma de los cuatro valores más altos de escurrimiento o precipitación media mensual. Se considera entonces que la sequía ha terminado cuando la comparación de la suma de los escurrimientos o precipitaciones del n -ésimo mes es mayor que el valor de la suma del escurrimiento o precipitación media mensual del n -ésimo mes. Cuando la comparación involucra los 12 meses, el valor considerado será la media anual del escurrimiento o precipitación. Una vez que la sequía ha terminado, la prueba para el comienzo de la siguiente será cuando se presente una nueva diferencia negativa.

Análisis estocástico de sequías

Con el objetivo de determinar la ocurrencia de las sequías en el largo plazo y de algunas de sus características particulares, se propone llevar a cabo un proceso de generación de muestras sintéticas a través del modelado de las series de tiempo periódicas, ya sea de escurrimientos o de precipitaciones mensuales. La complejidad del modelo de generación depende de la exactitud demandada, ya que se pueden usar modelos tan simples como los Autorregresivos $AR(p)$, los Autorregresivos de Promedios Móviles $ARMA(p,q)$, anuales o periódicos con parámetros constantes o periódicos, o más complejos como los $AR(p)$ o $ARMA(p,q)$ multivariados. Cabe mencionar que la técnica de generación sintética empleada, debe ser capaz de preservar las principales características estadísticas de las series originales.

En este trabajo se utilizan los modelos $ARMA(p,q)$ periódicos con parámetros periódicos, cuya estructura es (Salas, 1988):

$$Z_{v,\tau} = \sum_{j=1}^p \phi_{j,\tau} Z_{v,\tau-j} - \sum_{j=1}^q \theta_{j,\tau} \xi_{v,\tau-j} + \xi_{v,\tau} \quad (6)$$

donde

$Z_{v,\tau}$ = variable periódica normal estándar

$\phi_{i,\tau}$ = parámetros autorregresivos periódicos

$\theta_{i,\tau}$ = parámetros de promedios móviles periódicos

$\xi_{v,\tau}$ = variable aleatoria normal independiente

v = año analizado

τ = periodo analizado (mes)

El procedimiento consiste en generar diez mil muestras sintéticas, ya sea de escurrimientos o precipitaciones, y junto con el procedimiento de identificación descrito anteriormente, se obtienen algunas características importantes de las sequías:

- La probabilidad de que se presente en el sitio de estudio.
- La probabilidad de que se inicie en un mes específico.
- El establecimiento de una duración (meses) determinada.
- La probabilidad de que se inicie y termine en un mes determinado.

Estas características puntuales permitirán construir isolíneas que caracterizarán a nivel regional la severidad e intensidad de las sequías.

Análisis de sequías

Las sequías pueden analizarse a nivel puntual y a nivel regional. En el primer caso se refiere a un sitio en particular como por ejemplo la sección transversal de un río, un proyecto de pequeña extensión, un esquema modesto de irrigación o una pequeña área que puede caracterizarse por su centro o por una estación de observación. Cuando los parámetros que caracterizan a las sequías cambian significativamente sobre un área, se debe considerar la componente regional del fenómeno de manera similar a las características de las sequías puntuales.

La importancia del conocimiento de las características de las sequías radica en los siguientes propósitos:

- Evaluar su impacto para el diseño y operación de los aprovechamientos hidráulicos.
- Determinar las medidas de mitigación de sus efectos.
- Valorar su riesgo.
- Desarrollar políticas y estrategias para su manejo.

En los términos en que se ha planteado este trabajo, el estudio explora las técnicas estadísticas disponibles para el conocimiento de las características de las sequías con propósitos de diseño y operación de los aprovechamientos hidráulicos. Con este fin, se propone el empleo de distribuciones de probabilidad para el análisis de eventos extremos mínimos tanto en forma puntual como regional. El análisis se enfoca al tratamiento de eventos extremos mínimos anuales con duración de un día, aunque se puede extender fácilmente para diferentes duraciones.

Análisis puntual de sequías

El análisis de frecuencias de gastos mínimos anuales es de gran importancia para, entre otras acciones, diseñar plantas de tratamiento, plantas hidroeléctricas, elaborar proyectos de irrigación y construir embalses. En el análisis de frecuencias de sequías interesa conocer la probabilidad de ocurrencia $F(x)$ de que una sequía anual X sea menor o igual que un determinado valor fijo x , llamada la sequía de diseño, en un número determinado de años en promedio $\bar{T}_r$, llamado periodo de retorno.

La probabilidad de ocurrencia $F(x)$ se determina con base en los registros de gastos mínimos anuales obtenidos de n años de observación. Se supone que estos n valores son una muestra de una población infinita de gastos mínimos, que puede tener diferentes duraciones: uno, tres, siete, 14, treinta, sesenta, noventa o ciento ochenta días. El escurrimiento mínimo anual, o la descarga mínima diaria en el año es definida como:

$$Q_r = \min [Q_i] \quad i = 1, 2, \dots, 365 \text{ días} \quad (7)$$

el cual es un indicador de la severidad de la sequía experimentada en el año. Aunque la duración de la mayor intensidad de la sequía no es representada, el escurrimiento mínimo anual ofrece una medida significativa de la dependencia del río en el suministro de agua. El conocimiento de la distribución de probabilidad del escurrimiento mínimo anual contribuye a la evaluación de los riesgos de la sequía, teniendo aplicaciones en las esferas ecológica, económica y social.

Una aproximación empírica para determinar la forma de la distribución de probabilidad teórica de gastos mínimos es ajustar las principales funciones de distribución de probabilidad a los registros de gastos mínimos observados y decidir por algún criterio adecuado la función que se ajusta mejor a dichos registros.

Se han publicado muchos artículos sobre las aplicaciones de la estadística teórica al análisis de frecuen-

cias de avenidas (máximos), pero el análisis de frecuencias de sequías (mínimos) ha sido relativamente escaso, aún y cuando los daños que éstas provocan pueden ser del orden o mayores que las primeras. La razón de esta diferencia en el estudio del fenómeno pudiera encontrarse en que los efectos de las avenidas son de consecuencias inmediatas (inundaciones), mientras que los de las sequías es lento y acumulativo en el tiempo.

Como ya se ha mencionado, la forma para determinar la distribución de probabilidad empírica $F(x)$, que corresponda al comportamiento de los gastos mínimos registrados en la zona en estudio, es la de ajustar las funciones de distribución de probabilidad disponibles a los datos observados y seleccionar el mejor modelo por alguno de los cuatro criterios siguientes: soporte teórico, bondad de ajuste, parsimonia y facilidad de aplicación.

Tradicionalmente la selección de una distribución ha sido basada en la teoría de valores extremos propuesta por Gumbel (1954). Para llevar a cabo tal análisis se debe cumplir con las siguientes dos restricciones

- Las distribuciones utilizadas deben tener un límite inferior igual o mayor a cero, ya que las sequías observadas son mayores o iguales con cero.
- La función de distribución debe estar formada a lo más de tres parámetros, debido a que el tamaño de la muestra registrada es pequeño y los errores muestrales grandes.

Considerando las restricciones anteriores, los análisis de eventos extremos mínimos, tanto el puntual como el regional (técnica de estaciones-año), se llevarán a cabo mediante el empleo de las funciones de distribución de probabilidad Lognormal de tres parámetros, Gamma de tres parámetros, Valores Extremos tipo I (Gumbel) para mínimos, Valores Extremos Tipo III (Weibull) y General de Valores Extremos (GVE) para mínimos, cuyas funciones de densidad o de distribución de probabilidad se presentan a continuación. Las técnicas de estimación de parámetros para cada una de ellas puede encontrarse en algunas publicaciones especializadas (Kite (1988), Raynal (1987, 1994, 1995a, 1995b)).

Función de densidad Lognormal con tres parámetros

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0) \sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{\ln(x - x_0) - \mu_y}{\sigma_y}\right]^2} \quad (8)$$

donde: x_0 = parámetro de ubicación; μ_y = parámetro de escala; σ_y = parámetro de forma.

Función de densidad Gamma con tres parámetros

$$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left[\frac{x - x_0}{\alpha} \right]^{\beta-1} e^{-\left[\frac{x - x_0}{\alpha} \right]} \quad (9)$$

donde: x_0 = parámetro de ubicación; α = parámetro de escala; β = parámetro de forma

Distribución de Valores Extremos tipo I (Gumbel) para mínimos.

En la distribución Gumbel para mínimos se utiliza el principio de simetría

$$F(x)_{\min} = 1 - F(x)_{\max} = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{-x - x_0}{\alpha}\right)}} = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{w - x}{\alpha}\right)}} \quad (10)$$

donde: w = parámetro de ubicación; α = parámetro de escala

Distribución de Valores Extremos tipo III (Weibull)

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x - \gamma}{\beta - \gamma}\right)^\alpha} \quad (11)$$

donde: α = parámetro de escala igual al orden de la menor derivada de la función de probabilidad sin ser igual a cero con $x = \gamma$; β = característica de la sequía (una localización o valor central del parámetro); γ = límite inferior para x .

Distribución General de Valores Extremos (GVE) para mínimos

$$F(x) = \exp \left\{ -\left[1 - \beta(w - x)/\alpha \right]^{1/\beta} \right\} \quad (12)$$

donde α , β , y w son parámetros de escala, forma y ubicación, respectivamente.

Análisis regional de sequías

Debido a que en la mayoría de las ecuaciones se requiere del análisis de sequías en sitios con escasa o nula información hidrométrica, se debe recurrir a las técnicas regionales. Los métodos explorados en este trabajo son el de estaciones-año y el de correlación y regresión múltiple.

Las técnicas regionales requieren que la información proveniente de las estaciones involucradas en el análisis

lisis tenga un comportamiento homogéneo de alguna manera cuantificable. Nathan y Mc Mahon (1990) han desarrollado una metodología de regionalización que trata acerca de los problemas asociados con la correcta selección de la técnica de agrupamiento, con la definición de la región homogénea y finalmente, con la predicción del grupo de membresía al cual pertenecería una nueva cuenca en el estudio.

La técnica fue desarrollada para identificar regiones homogéneas utilizando primeramente ecuaciones de regresión múltiple, donde las variables dependientes son los gastos máximos anuales y las independientes se seleccionan de entre un grupo de características fisiográficas y/o climatológicas que mejor describan el fenómeno en estudio.

En este trabajo se emplearán los gastos mínimos anuales con duración de un día como una variable dependiente e indicador de las sequías. Finalmente, la no homogeneidad de los grupos seleccionados es investigada y minimizada usando una técnica de graficación multidimensional (Andrews, 1972), en el que un punto en el espacio multidimensional es representado por una curva en dos dimensiones vía la función

$$f(x) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \sin(t) + x_3 \cos(t) + x_4 \sin(2t) + x_5 \cos(2t) + \dots \quad (13)$$

donde $x_1, x_2, \dots$ representa cada una de las variables usadas para significar a la cuenca, y la función se dibuja en el rango $-\pi$ a π . Andrews mostró que la diferencia entre dos curvas es proporcional a la distancia métrica euclidiana, por lo tanto, las n variables dimensionales localizadas una cerca de la otra en el espacio multidimensional representarán curvas similares. El hecho que esta función preserva las distancias la hace ideal para la comparación visual de los grupos homogéneos, ya que las cuencas similares aparecerán como curvas cercanamente espaciadas.

Técnica de estaciones-año

Para estimar un evento de diseño, este método considera el tratamiento de una sola muestra de datos conformada por un registro modulado de eventos, el cual una vez construido es ajustado a un conjunto de distribuciones de probabilidad. La secuencia puede resumirse como sigue:

Paso 1. Probar la homogeneidad y consistencia de los datos Q_i registrados en cada estación dentro de la región analizada. (Q_i = *gasto mínimo anual*, para $i = 1$ hasta el tamaño de muestra n).

Paso 2. Obtener los estadísticos muestrales como la media, la varianza, etc.

Paso 3. Realizar para cada serie de datos registrados la prueba de independencia de eventos, mediante la prueba del correlograma (Salas, 1980).

Paso 4. Obtener para cada una de las estaciones involucradas una muestra modulada de la forma $Q_i/Qmed_j$, para $i = 1$ hasta n_i y $j = 1$ hasta m , donde n es el tamaño de la muestra registrada, m es el número de estaciones en la región meteorológicamente homogénea y $Qmed_j$ es la media de los eventos registrados en cada estación.

Paso 5. Formar un solo registro con todos los eventos $Q_i/Qmed_j$, para posteriormente ordenarlos de menor a mayor, asignarles un periodo de retorno ($Tr = (n+1)/m$) y una probabilidad de excedencia ($Pr = 1 - (1/Tr)$), donde m = *número de orden* y n = *tamaño de la muestra*.

Paso 6. Al registro obtenido en el paso 5, se le aplicarán las diferentes distribuciones de probabilidad para el análisis de mínimos (Weibull, Gumbel, etc.), y seleccionar aquel que proporcione el mínimo error estándar de ajuste (Kite, 1988).

Paso 7. Para un periodo de retorno determinado se obtiene la relación regional $Q_i/Qmed_k$ donde k es cualquier sitio dentro de la región homogénea.

Paso 8. Si se quiere estimar en una cuenca con escasa información, basta multiplicar la relación regional obtenida en el paso anterior por el valor $Qmed_j$ correspondiente a la estación j analizada. Por el contrario, si se desean realizar estimaciones en cuencas no aforadas dentro de la región, se propone la construcción de una relación $Qmed\text{-Área}$, para que a partir de ella se pueda inferir el valor correspondiente de $Qmed$, para el área de la cuenca en el sitio no aforado k .

Técnica de correlación y regresión múltiple

El objetivo del análisis de regresión múltiple es seleccionar una ecuación óptima combinando variables independientes de las cuales se puede estimar una respuesta. La ecuación es aquella que mejor describe la actual relación entre las variables independientes y dependientes (aproximación física) o aquella la cual estima mejor a las variables dependientes de las independientes (aproximación estadística), si la verdadera relación física no es conocida.

Las características en la frecuencia de sequías como son la magnitud y duración (variables dependientes) pueden expresarse en términos de índices geomorfológicos y factores de clima de la cuenca (variables independientes). La dependencia e independencia de las variables se estima para cada sitio aforado median-

te un proceso de correlación y regresión discriminante, donde la aportación de cada variable independiente es probada hasta lograr un modelo de regresión en el cual todas las variables que en él intervengan sean estadísticamente significativas (prueba del estadístico t) para la predicción de la variable dependiente analizada (Hann, 1977). En la práctica el número de variables independientes no debe exceder aproximadamente un tercio del número de observaciones. Por lo tanto se debe tener cuidado de no arriesgar la confiabilidad de la estimación de los coeficientes por incluir variables de más.

El modelo de regresión puede ser del tipo (14).

$$Y = a X_1^{b_1} \dots X_n^{b_n} \quad (14)$$

donde: Y = variable dependiente, X_i = características fisiográficas o climatológicas del sitio en estudio, a , b_i = conjunto de parámetros a estimarse de los datos.

Cabe mencionar que existen dos opciones para establecer la variable dependiente y llevar a cabo el procedimiento anteriormente mencionado, la primera considera los eventos de diseño para diferentes periodos de retorno, obtenidos mediante la mejor distribución de probabilidad ajustada a cada una de los registros de las estaciones analizadas en la región; la segunda considera los parámetros de una distribución de probabilidad que se asume como representativa para toda la región en estudio. La secuencia de análisis de esta técnica es la siguiente:

Paso 1. Recabar la información sobre gastos mínimos anuales en cada una de las estaciones de la región estudiada, así como la determinación de las características fisiográficas y climatológicas de los sitios analizados.

Los siguientes 15 índices geomorfológicos y climáticos fueron seleccionados en este estudio como variables independientes en los modelos de predicción regional de sequías:

Área drenada (km^2), precipitación media anual (mm), pendiente media de la cuenca (m/km), elevación media de la cuenca (msnm), longitud de la corriente principal (km), pendiente de la corriente principal (m/km), parámetro de forma (1/km), densidad de corrientes (Nc/km), densidad de drenaje (km/km^2), latitud del centroide de la cuenca (grados), longitud del centroide de la cuenca (grados), coeficiente de escurrimiento (adimensional), orden de la corriente principal (número), perímetro del parteaguas (km) y temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$)

Paso 2. Probar la homogeneidad y consistencia de toda la información recabada.

Paso 3. Obtener los estadísticos muestrales como la media, la varianza, etcétera.

Paso 4. Realizar para cada serie de datos registrados la prueba de independencia de eventos, mediante la prueba del correlograma (Salas, 1988).

Paso 5. Verificar la normalidad de los datos (coeficiente de asimetría $g = 0$ y coeficiente de curtosis $k = 3$). Continuar con el paso siguiente en caso de que las muestras para cada estación sean normales. De lo contrario, se deberá realizar la transformación normalizante (Proceso de Box-Cox, o cualquier otro). Este paso se debe realizar, tanto para los gastos mínimos anuales como para la información fisiográfica y meteorológica de cada estación, ya que la técnica de correlación múltiple considera que las muestras (variables independientes y dependientes) tienen una relación multivariada normal, que se debe respetar al aplicar el método.

Paso 6. Al registro de gastos mínimos anuales se le deberán ajustar las diferentes distribuciones de probabilidad para el análisis de mínimos y seleccionar el que proporcione el mínimo error estándar de ajuste. Si es posible caracterizar a toda la región con la misma distribución de probabilidad para lo cual será conveniente asociar los parámetros de ésta con las características físicas y/o climáticas. En caso contrario, se deberá obtener en cada sitio el evento de diseño para un periodo de retorno determinado, ejemplo Q_{20} , para posteriormente considerarlas como variables dependientes del modelo de correlación. La desventaja de esta última opción es que se tendría que repetir tantas veces como periodos de retorno se requiera analizar (dos, cinco, diez, veinte, cincuenta o cien años).

Paso 7. Ya sea que se pueda o no caracterizar a la región con una distribución de probabilidad, se deberá construir el sistema de ecuaciones normales y resolverlo para obtener las ecuaciones regionales. Se recuerda que para determinar el número de variables independientes deben incluirse en el modelo de regresión se realizará un análisis de varianza (Hann, 1977).

Paso 8. Para realizar estimaciones en cuencas con nula información será necesario determinar las características físicas y climáticas más relevantes (de acuerdo con el análisis del paso anterior) y sustituirlas en las ecuaciones regionales resultantes.

Aplicaciones

La Región Hidrológica No. 10 se encuentra ubicada al noroeste de la República Mexicana, entre los $105^{\circ} 30'$ y 109° de longitud oeste, y los $23^{\circ} 30'$ y $28^{\circ} 30'$ de latitud norte. Es una de las regiones más importantes en el país tanto por lo que se refiere al grupo de corrien-

3. Algunas características de las estaciones de la Región Hidrológica Número 10

Estación	Periodo	Tamaño (años)	Área (km²)	Estación	Periodo	Tamaño (años)	Área (km²)
SM Zapotitlán	1960-1981	22	34,450	Los Molinos	1958-1970	13	501
San Blas	1941-1950	10	33,590	Naranjo	1939-1985	47	2,064
La Tina	1960-1983	24	275	Zopilote	1939-1985	47	666
Bamiceri	1951-1982	32	223	Guamuchil	1938-1973	36	1,645
Las Canas	1948-1971	24	29,529	Pericos	1960-1985	26	270
El Mahone	1966-1985	20	29,428	Tierra Blanca	1933-1939	7	11,614
Choix	1955-1983	29	1,403	Puente Sud-Pacífico	1924-1958	35	11,434
Huites	1941-1993	53	26,020	Palos Blancos	1939-1985	47	11,409
Palo Dulce	1957-1985	29	6,323	El Varejonal	1960-1966	7	10,987
Chinipas	1965-1985	21	5,098	Badiraguato	1959-1985	27	1,018
San Francisco	1941-1973	33	17,531	Guatenipa	1965-1985	21	8,252
San Ignacio	1967-1985	19	10,920	La Huerta	1969-1985	17	6,149
Veranera	1952-1965	14	4,106	P. Cañedo	1932-1953	22	4,086
Urique	1967-1985	19	4,000	Sanalona	1944-1985	42	3,657
Guerachic	1953-1965	13	6,262	Picachos	1937-1943	7	3,280
Álamos	1948-1969	22	2,270	Tamazula	1962-1984	23	2,241
Cazanate	1967-1985	19	1,813	El Bledal	1938-1985	48	371
Jaina	1941-1986	46	8,179	Santa Cruz	1943-1985	43	8,919
Toahayana	1957-1985	29	5,281	Acatitlán	1955-1985	31	1,884
Tecusiapa	1957-1985	29	3,773	Ixpallino	1953-1983	31	6,166

tes caudalosas que la forman, como también en lo referente a los usos que se les da; lo que ha propiciado la creación de una zona que figura desde el punto de vista agrícola entre las más productivas del país. La necesidad de contar con agua suficiente para desarrollar todo el potencial agrícola de esta región, ha he-

cho necesario realizar un proceso de identificación y análisis de las posibles sequías que se pueden presentar en ella. El contar con un panorama de este fenómeno permitirá tomar decisiones en la región para el mejor aprovechamiento del recurso.

La región se divide en nueve grandes cuencas, las cuales son identificadas por el nombre del río principal al que drenan: Fuerte, Sinaloa, Mocorito, de la Laguna de Caimanero, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla y Quelite. Dentro de esta zona de estudio se dispone de información en 42 estaciones hidrométricas de volúmenes de escurrimiento mensual y anual, además de gastos mínimos anuales con duración de un día. Las principales características fisiográficas y climatológicas de cada cuenca se presentan en el cuadro 3.

Identificación de sequías

Una vez que se cuenta con los registros de volúmenes de escurrimiento se puede establecer la presencia de sequías en la región. Con el objetivo de mostrar el proceso de identificación de sequías, se tomarán los volúmenes de escurrimiento mensual registrados en la estación La Huerta (cuadro 4).

En primer término se determinarán los volúmenes excedentes o deficitarios a partir de la estimación del

4. Volúmenes de escurrimiento mensual (Mm³) en la estación La Huerta

Mes	Año				
	1969	1970	1971	1972	1973
Enero	82.60	127.30	8.90	143.40	50.90
Febrero	65.80	35.60	5.60	13.50	208.60
Marzo	13.40	22.40	5.70	7.70	34.70
Abril	10.10	9.90	4.20	5.00	9.90
Mayo	9.30	6.90	3.30	6.60	6.80
Junio	10.00	7.80	24.20	18.10	9.30
Julio	136.60	46.80	96.90	44.60	51.50
Agosto	60.00	123.20	343.20	73.40	323.30
Septiembre	50.50	213.20	76.50	160.60	238.30
Octubre	22.60	61.06	112.40	184.50	31.40
Noviembre	10.00	11.40	33.10	304.00	11.40
Diciembre	59.50	8.40	51.00	46.80	8.80

5. Estadísticos muestrales, umbrales y factores de peso en la estación La Huerta

Mes	Media	Varianza	CV	T	W
Enero	82.62	3032.83	0.66	45.91	0.33
Febrero	65.82	6915.80	1.26	-39.25	-0.27
Marzo	16.78	142.34	0.71	8.29	0.06
Abril	7.82	8.73	0.37	6.70	0.05
Mayo	6.58	4.58	0.32	5.88	0.04
Junio	13.88	49.33	0.50	10.32	0.08
Julio	75.28	1636.36	0.53	53.54	0.38
Agosto	184.62	19013.05	0.74	81.63	0.58
Septiembre	147.82	6795.56	0.55	101.84	0.72
Octubre	82.39	4489.21	0.81	27.90	0.20
Noviembre	73.98	16626.58	1.74	-150.76	-1.05
Diciembre	34.9	597.36	0.70	17.78	0.13
Promedio				14.15	

umbral $T(t)$. Para el cálculo de $T(j)$, donde j denotará el mes en cuestión, será necesario calcular el valor de la media y la varianza mensual para obtener el valor del coeficiente de variación (CV). Los estadísticos mensuales se muestran en el cuadro 5, y dado que $CV > 25\%$, entonces se empleará (4) para el cálculo del umbral. Para el caso de la estación analizada el umbral para el mes de enero es $T(1) = 82.62 - 3032.83/82.62 = 45.91 \text{ Mm}^3$ y el factor de peso $W(1) = 0.1(1. + 45.9185)/14.152 = 0.3314$ millones de metros cúbicos. Siguiendo este procedimiento se obtiene el valor del umbral y los factores de peso para los meses restantes (cuadro 5).

Calculando el valor del déficit medio mensual de acuerdo a (2) para el primer año (1969) y el mes de enero: $D(1) = 82.6 - 45.9185 = 36.68 \text{ Mm}^3$. Los valores

6. Valor de las diferencias (Mm^3) para los cinco años de registro de la estación La Huerta

Mes	1969	1970	1971	1972	1973
Enero	36.68	81.38	-37.01	97.48	4.98
Febrero	105.05	74.85	44.85	52.75	247.85
Marzo	5.10	14.10	-2.59	-0.59	26.40
Abril	3.39	3.19	-2.50	-1.70	3.19
Mayo	3.41	1.01	-2.58	0.71	0.91
Junio	-0.32	-2.52	13.87	7.77	-1.02
Julio	83.05	-6.74	43.35	-8.94	-2.04
Agosto	-21.63	41.56	261.56	-8.23	241.66
Septiembre	-51.34	111.35	-258.34	58.75	136.45
Octubre	-5.30	33.15	84.49	156.59	3.49
Noviembre	160.76	162.16	183.86	454.76	162.16
Diciembre	41.71	-9.38	33.21	29.01	-8.98

7. Valores de déficit (Mm^3) para los cinco años de registro de la estación La Huerta

Mes	1969	1970	1971	1972	1973
Enero	0	0	37.01	0	0
Febrero	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	2.59	0.59	0
Abril	0	0	2.50	1.70	0
Mayo	0	0	2.58	0	0
Junio	0.32	2.52	0	0	1.02
Julio	0	6.74	0	8.94	2.04
Agosto	21.63	0	0	8.23	0
Septiembre	51.34	0	258.34	0	0
Octubre	5.30	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0	0
Diciembre	0	9.38	0	0	8.98

para los siguientes años se muestran en el cuadro 6, y como puede observarse existen valores de déficit positivos y negativos, los primeros indican un volumen excedente mientras que los segundos presentan un volumen faltante. Como es lógico nos interesan sólo los valores negativos, por lo tanto los valores positivos se considerarán como cero (cuadro 7) y se obtendrán los valores de **DMM** y **DMA** (cuadro 8).

Para establecer si existe o no la presencia de la sequía se requiere calcular los 12 valores de la escala (cuadro 9), para esto emplearemos (5) donde el incremento de los valores de la escala será $X = (39.76941 - 101.8482)/11 = -5.644$.

El siguiente paso será comparar los valores de la suma de los déficit contra los valores de la escala. La comparación será entre el valor absoluto del déficit del primer mes con valor negativo, contra el primer valor de la escala y si este último es igualado entonces se dirá que la sequía ha empezado. Si el valor de la escala no fue igualado, el déficit del segundo mes se suma

8. Valores de déficit medio mensual **DMM** y **DMA** en la estación La Huerta

Mes	DMM	Mes	DMM
Enero	7.40	Julio	3.54
Febrero	0	Agosto	5.97
Marzo	0.63	Septiembre	15.33
Abril	0.84	Octubre	1.06
Mayo	0.51	Noviembre	0
Junio	0.77	Diciembre	3.67
DMA = 39.76			

9. Valores de la escala para estimar el inicio de la sequía

Punto	Valor	Punto	Valor
1	101.84	7	67.98
2	96.20	8	62.34
3	90.56	9	56.69
4	84.91	10	51.05
5	79.27	11	45.41
6	73.63	12	39.76

con el del mes anterior y se comparará con el segundo valor de la escala, si este fue excedido por el valor absoluto de la combinación de los dos déficit la sequía se considerará que ha iniciado desde el primer mes.

En general el valor absoluto de la suma de los déficit ocurridos desde el primer mes del año serán probados secuencialmente hasta los 12 valores de la escala. Si para cualquier instante de tiempo la suma de los valores de los déficit desde el primero hasta el n -ésimo mes excede el valor $MMM_i + (n - 1) \times$ la sequía ha empezado desde el primer mes.

Para establecer la duración y la severidad de la sequía se utilizarán los valores del escurrimiento efectivo y los valores de los umbrales. La metodología plantea que una vez que se ha identificado la presencia de la sequía se toma el valor del escurrimiento efectivo del mes de inicio y se compara con el valor más grande de los umbrales, si este último es menor que el primero, la sequía continúa, así se sumará el valor del escurrimiento efectivo del siguiente mes y si la suma de estos dos excede la suma de los dos valores mayores de los umbrales la sequía ha terminado. De otra forma, se sumará el valor de escurrimiento efectivo del siguiente mes y se comparará con la suma de los tres valores más grandes de los umbrales. En general la sequía terminará cuando la suma de los escurrimientos efectivos sea mayor que la suma de los valores de los umbrales.

Para identificar la presencia de sequías en la región hidrológica en estudio se elaboró un programa de cómputo que al aplicarlo en la estación La Huerta se obtuvo la información que se presenta en el cuadro 10.

Para el primer año, se observa que la suma del déficit es menor que el valor de la escala ($78.61556 < 84.9176$) y se establece que para el primer año de registro no existe sequía. Es importante explicar que para el valor de déficit del mes julio el valor se tomó como cero ya que el valor de D fue positivo por lo tanto el valor de la escala no avanza y se mantiene la comparación con el valor anterior de la escala.

Para el siguiente año se presentaron déficit para los meses 6, 7 y 12, lo primero que se observa es que del mes 7 al 12 existen más de tres meses con diferencias

10. Proceso de identificación de sequías en la estación La Huerta

	Mes	Déficit	Suma de déficit	Valores de la escala
Año 1				
	6	0.32	0.32	101.84
	7	0	0.32	101.84
	8	21.63	21.96	96.20
	9	51.34	73.30	90.56
	10	5.30	78.61	84.91
Año 2				
	6	2.52	2.52	101.84
	7	6.74	9.26	96.20
	12	9.38	9.38	101.84

positivas por lo que se deberá de entender que existen dos periodos probables de sequías, de junio a julio y el segundo en diciembre. La presencia de diferencias positivas se deberá de interpretar como una interrupción de la sequía y no como una terminación de la misma, siempre y cuando se cuenten con no más de tres meses con diferencias positivas, en caso contrario se considerará que la sequía ha terminado y se analizarán dos periodos probables con la presencia del fenómeno en estudio. Así, para el primer periodo del segundo año: $9.269246 < 96.20465$ por lo que no existe sequía en este periodo, y para el segundo periodo: $9.383669 < 101.8482$ y no existe sequía en este periodo. Se concluye que no existe sequía en este año. Con este mismo criterio se analizaron los siguientes años y se concluyó que bajo esta técnica de identificación no se presentaron sequías durante el periodo registrado en la estación La Huerta.

En el cuadro 11 se muestran los resultados del proceso de identificación para las estaciones que presentaron sequía en la región en estudio. Las estaciones La Tina, El Quelite, Cazanate, Guerachic, Pericos, Palo Dulce, La Veranera, Bamicori, Picachos, San Miguel Zapotitlán, Chinipas, El Bledal, Naranjo, Molinos, La Huerta, Jaina y Guamuchil, no presentaron sequías. La magnitud de la sequía (Mm^3) está asociada con su duración (meses), pero se puede considerar como un déficit *anual* siempre y cuando la duración sea menor o igual a 12 meses.

Realizando un análisis muy general de los resultados obtenidos mediante la información histórica de las estaciones observadas, se pueden establecer los siguientes comentarios:

- De acuerdo con la situación geográfica de las estaciones, la zona más afectada históricamente por las sequías es la parte sur de la región.

11. Duración, magnitud e intensidad de las sequías en la Región Hidrológica Número 10

Estación	Año sequía	Duración (meses)	Magnitud (Mm³)	Estación	Año sequía	Duración (meses)	Magnitud (Mm³)
San Francisco	10	2	316.19	Huites	11	3	484.05
	16	3	128.96		17	2	9.65
Puente Sud-Pacífico	7	3	544.31	Toahayana	1	4	64.70
	34	1	19.56		6	1	32.00
Acatitlán	3	4	61.47	Álamos	20	3	3.92
	28	1	8.45	Tecusiapa	5 y 6	15	175.24
San Blas	27	2	210.10		12, 13 y 14	27	245.67
	32	2	276.99	T. Blanca	7	4	0.17
	33	2	318.80	P. Cañedo	19	1	97.29
Santa Cruz	9	2	20.29		20	1	81.79
	15	2	142.59		21	1	93.29
	42	1	95.59	Piactla	8	4	163.51
Ixpalino	4	2	175.98	Choix	3 y 4	14	106.48
	5	4	244.80	Urique	3	4	4.13
	30	1	38.88		4	2	9.62
Sanalona	2	6	119.36	Zopilote	3	3	3.18
	3	6	110.96	Varejonal	1	4	102.40
	4	6	94.96		2	5	145.08
	5	6	72.86		3	9	105.32
	10	6	85.79		4	6	251.50
	11	3	37.90		10	1	30.28
	14 y 15	6	125.77		11	1	32.58
	22 y 23	8	145.45	San Ignacio	3	2	14.01
	27	6	92.51	Las Cañas	3	6	521.53
Badiraguato	11	3	49.25		4	6	283.77
El Mahone	3	2	104.48		5	9	783.39
	5	2	76.97		6	6	433.23
	6	2	68.09		7	7	441.33
	13	3	177.58		8	3	89.78
	15	1	17.99		17	2	306.77
Tamazula	8	3	58.94		23	3	283.87
	18	2	26.15				
	21	2	2.19				

- La duración promedio de las sequías es de cuatro meses, teniendo un rango de variación desde uno hasta 27 meses consecutivos con la presencia del fenómeno.
- La magnitud promedio de las sequías es de 148 Mm³ anuales, teniendo un rango entre 0.174 y 783.390 Mm³ anuales.

Con el fin de determinar algunas características que describen el posible comportamiento del fenómeno de la sequía se procedió a realizar la generación de diez mil muestras sintéticas mediante el modelo periódico ARMA(1,1) (Salas, 1988) en cada una de las estaciones de la región hidrológica. Para cada muestra generada, de cada estación, se aplicó el esquema de iden-

tificación de sequías y se registraron los meses de inicio y de término, la duración y la magnitud del evento. Estas características fueron promediadas en el largo plazo y así fue posible obtener la probabilidad de ocurrencia de cada una de ellas. A manera de ejemplo se presentan en el cuadro 12 los estadísticos de la muestra original (estación Huites) junto con los promedios de las muestras generadas, donde se observa que no existen diferencias significativas, por lo que el modelo de generación propuesto si preservó los estadísticos de la muestra original, cumpliéndose con el requisito de la modelación estocástica. De la aplicación de la técnica de identificación de sequías a cada una de las diez mil muestras generadas se obtuvieron las siguientes conclusiones estadísticas:

12. Estadísticos de la muestra histórica y promedio de las 10,000 muestras generadas para la estación Huites, Sin.

Mes	Media histórica	Media generada	Desv. std. histórica	Desv. std. generada	Coef. asim. histórico	Coef. Asim. generado
Enero	426.98	285.44	936.51	645.40	3.81	3.90
Febrero	188.42	126.24	288.71	284.95	2.64	3.46
Marzo	103.20	87.83	148.99	176.91	2.70	3.29
Abril	31.85	25.96	32.96	24.15	3.04	2.20
Mayo	18.77	16.47	12.58	11.79	2.14	1.85
Junio	74.27	75.29	62.42	70.59	0.86	1.79
Julio	662.05	665.66	296.26	305.92	1.14	1.48
Agosto	1087.93	1104.33	552.38	527.83	1.55	0.90
Septiembre	682.27	687.16	363.30	314.84	0.20	0.30
Octubre	275.68	256.74	254.38	238.96	1.74	1.97
Noviembre	97.95	86.33	148.40	147.30	3.72	3.20
Diciembre	245.09	193.68	385.29	510.66	3.53	3.77

13. Probabilidad (%) de la duración mensual de la sequía en la estación Huites

Duración	0	1	2	3	4	5	6
Probabilidad (%)	16	0.6	13.4	17.6	46	5.5	0.8

14. Probabilidad (%) de inicio y fin de la sequía en un mes particular en Huites

Mes inicio	Mes final							
	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Febrero	29.0	63.0	8.0					
Marzo	0.6	39.0	60.6					
Abril		0.2	99.0	0.8				
Mayo		0.6	22.7	75.6	1.1			
Junio			3.9	52.0	42.0	1.3		
Julio				43.2	27.1	27.6	1.3	0.8
Agosto				4.4	18.6	21.2	53.1	1.8
Septiembre							50.0	50.0

- La probabilidad de que se presente una sequía en la estación Huites es del 84 por ciento.
- La probabilidad de que la sequía inicie en un mes en particular es: febrero (2.4%), marzo (5.9%), abril (17.1%), mayo (9.2%), junio (11.7%), julio (28.4%) y agosto (9.2 por ciento).
- La probabilidad (%) de que la sequía dure un número determinado de meses se aprecia en el cuadro 13.
- La probabilidad (%) de que la sequía inicie y termine en un mes en particular será como se indica en el cuadro 14.
- En cuanto a la magnitud de la sequía se obtuvo un déficit mínimo *anual* de 0.03 Mm³; un máximo de 1376.1 Mm³ y un promedio de 540.012 millones de metros cúbicos.
- Si se realiza una comparación entre los resultados de la identificación de sequías considerando sólo la muestra histórica y los obtenidos mediante la generación sintética se puede decir que: la duración más grande de la sequía histórica es de tres meses, pero se tiene un 46% de probabilidad que ésta dure hasta cuatro meses; la magnitud del déficit puede ser a largo plazo de un 12% más grande que la lograda con la información histórica (de 484 Mm³ a 540 Mm³ *anuales*); el mes más probable para iniciar una sequía es julio.

Con la aplicación de esta metodología en toda la región es posible establecer zonas de ocurrencia de la sequía, lo cual permite utilizarla como un instrumento

15. Distribuciones empíricas de mejor ajuste y eventos de diseño ($Q_T = \text{m}^3/\text{s}$) para cada estación de la Región Hidrológica Número 10

Estación	Func.	Método	E.E.	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}
Tierra Blanca	W	M	0.34	1.03	0.79	0.73	0.71	0.70
Puente Sud Pacífico	W	M	0.97	2.36	0.71	0.35	0.21	0.13
Palos Blancos	W	M	0.59	0.66	0.26	0.20	0.18	0.77
La Huerta	GVE	M	0.16	1.87	1.42	1.22	1.08	0.95
Picachos	GVE	M	0.02	0.23	0.01	0.14	0.12	0.09
Badiraguato	W	M	0.18	0.20	0	0	0	0
Tamazula	W	M	0.32	0.35	0.18	0.15	0.14	0.14
Acatitlán	VEI	M	0.26	0.12	0.06	0.05	0.04	0.04
Ixpallino	LN3	MV	0.17	0.87	0.58	0.50	0.45	0.40
Piactla	VEI	M	0.19	1.04	0.42	0.19	0.05	0
Sanalona	W	M	0.75	0.16	0	0	0	0
El Bledal	GVE	M	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Pericos	GVE	M	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
S.M. Zapotitlán	LN3	MV	0.32	0.96	0.37	0.19	0.09	0.00
Chinipas	LN3	MV	0.16	0.65	0.39	0.32	0.29	0.26
Urique	W	M	0.94	2.19	1.44	1.30	1.25	1.23
Los Molinos	GVE	M	0.02	0.02	0	0	0	0
Naranjo	GVE	M	0.24	0	0	0	0	0
San Blas	W	M	2.69	4.44	1.97	1.46	1.25	1.14
Mahone	GVE	M	7.06	1.15	0	0	0	0
Huites	LN3	M	0.58	3.78	2.04	1.43	1.04	0.63
San Francisco	GVE	M	0.19	2.83	1.96	1.59	1.33	1.07
Guerachic	GVE	M	0.23	1.15	0.80	0.70	0.64	0.61
Bamicori	W	M	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Las Cañas	GVE	M	3.04	6.10	0.43	0	0	0
Choix	W	M	0.15	0.04	0	0	0	0
Quelite	W	M	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Santa Cruz	LN3	M	0.32	1.55	0.87	0.63	0.46	0.31
Toahayana	W	M	0.36	0.50	0.21	0.16	0.14	0.13
Jaina	LN3	MV	0.13	0.33	0.10	0.04	0.01	0
Palo Dulce	W	M	0.39	0.59	0.29	0.24	0.22	0.21
La Veranera	VEI	M	0.15	1.16	0.86	0.66	0.47	0.22
Tecusiapa	W	M	0.41	0.50	0.21	0.16	0.14	0.14
Puente Cañedo	W	M	0.26	0.02	0	0	0	0
Varejonal	W	M	1.95	1.0	0	0	0	0

de planeación para la operación de los aprovechamientos hidráulicos.

Una vez identificada la presencia de una sequía, se requiere de su análisis para propósitos de diseño de las obras hidráulicas.

Análisis de frecuencias de gastos mínimos en el sitio

Para cada uno de los sitios de la región se ajustaron las distribuciones univariadas para mínimos (ecuaciones 8 a 12) a los registros de gastos mínimos anuales con un día de duración y se seleccionó aquella distribución que proporcionara el mínimo valor del error estándar de ajuste (Kite, 1988).

En el cuadro 15 son presentados, el nombre de la estación, la función que mejor se ajusta (W = Weibull, GVE = General de Valores Extremos, VEI = Gumbel, LN3 = Lognormal con tres parámetros), el método utilizado para la obtención de sus parámetros (M = Momentos, MV = Máxima Verosimilitud), el mínimo error estándar de ajuste (E.E.) que le corresponde a la distribución seleccionada y los eventos de diseño ($Q_T = \text{m}^3/\text{s}$) para periodos de retorno $Tr = 2, 5, 10, 20, 50$ años.

Análisis de frecuencias de gastos mínimos en la región

Para llevar a cabo el análisis regional de sequías se procederá con los siguientes pasos:

1. Determinar las características fisiográficas de la región en estudio.

2. Obtener los valores de gastos mínimos diarios anuales disponibles en la región.

3. Obtener las características estadísticas de cada una de las estaciones analizadas.

4. Aplicar las técnicas de agrupación de regiones meteorológicamente homogéneas.

5. Realizar un análisis de frecuencias puntual para cada estación de la región, obteniendo los eventos de diseño para los periodos de retorno de dos, cinco, diez, veinte y cincuenta años (cuadro 15).

6. Normalizar los valores de las características fisiográficas del punto 1 y los eventos de diseño del punto 5, para ser utilizados en la técnica de correlación y regresión múltiple. Esto implica que el coeficiente de asimetría muestral = 0 y el de curtosis = 3.

El proceso de Normalización utilizado es conocido como de Box-Cox de doble potencia (TSPT):

$$y = \frac{x^T - 1}{T} \quad (15)$$

$$t_i = (|y_i - \bar{y}|)^y \quad (16)$$

donde: T = parámetro de transformación normalizante primera potencia ($-4 < T < 4$).

Si no se encuentra entonces $T = 0$ e $y = \ln(x)$

γ = parámetro de transformación normalizante segunda potencia

t_i = i -ésimo elemento de la serie transformada TSPT y tiene el mismo signo de $(y_i - \bar{y})$

y = media de la serie transformada por Box-Cox

Los parámetros normalizantes TSTP para las características fisiográficas, climatológicas y eventos de diseño para diferentes periodos de retorno en la Región Hidrológica No. 10 se presentan en el cuadro 16.

7. Discriminar las características fisiográficas que deben intervenir en el modelo de regresión múltiple, mediante la aplicación de un análisis de varianza (cuadro 17).

En general se trabajará con un modelo de seis variables las cuales serán de acuerdo a su orden de importancia: elevación media de la cuenca, pendiente del cauce principal, área de la cuenca, precipitación media anual, densidad de corrientes y latitud del centroide.

Cabe mencionar que también se realizó este procedimiento considerando a los gastos máximos anuales como la variable dependiente y también se obtuvieron seis variables significativas que de acuerdo con su importancia, son: área de la cuenca, precipitación media anual, pendiente de la cuenca, longitud del cauce

16. Parámetros normalizantes T y γ para variables analizadas en la Región Hidrológica Número 10

Característica	T	γ	Característica	T	γ
Área de la cuenca	0.18	1.05	Centroide: Longitud	0	1.169
Precipitación media	0	1.458	Coeficiente de escurrimiento	0	0.72
Pendiente cuenca			Orden corriente principal		
Elevación media cuenca	0	0.581	Perímetro	0.203	1.05
Longitud	0.35	1.138	Temperatura	0	1.832
Pendiente cauce	0	1.11	Q_2	0.16	1.051
Parámetro de forma	0.598	1.11	Q_5	0.177	2.18
Frecuencia cuenca	-0.078	0.914	Q_{10}	0.0627	2.598
Densidad de drenaje	-0.48	1.03	Q_{20}	0.0423	2.02
Centroide: Latitud	0	1.185	Q_{50}	0.0145	1.42

17. Variables significativas para gastos con $T_r = 2, 5, 10, 20$ y 50 años

2 años	5 años	10 años	20 años	50 años
Área	Área	Área	Precipitación	Área
Elevación	Precipitación	Precipitación	Elevación	Precipitación
Pendiente cauce	Elevación	Elevación	Pendiente cauce	Elevación
Densidad de corriente	Pendiente cauce	Pendiente cauce	Densidad de corriente	Pendiente cauce
Latitud centroide	Densidad de corriente	Densidad de corriente	Latitud centroide	Densidad de corriente
Coeficiente escurrimiento	Latitud centroide	Latitud centroide	Perímetro	Latitud centroide

18. Delimitación de regiones homogéneas

Región A	San Miguel Zapotitlán, La Tina, Chinipas, Urique, Álamos, Cazanate, Toahayana, Los Molinos, Naranjo, Zopilote, San Blas, El Mahone, Huites, Palo Dulce, San Francisco, San Ignacio, Guerachic, Bamicori, Las Cañas, Choix, La Veranera, Jaina, Tecusiapa	Región B	Tierra Blanca, Puente Sud Pacífico, Palos Blancos, El Varejonal, La Huerta, Puente Cañedo, Picachos, Badiraguato, Tamazula, Acatitlán, Ixpalino, Piaxtla, Guatenipa, El Bledal, Santa Cruz, El Quelite, Guamuchil, Pericos
----------	--	----------	--

19. Valores de los parámetros t y α en el proceso de normalización

Característica	Región A		Región B	
	t	α	t	α
Área drenada	0.6144	1.395	0.245	1.119
Precipitación media anual			0	1.039
Pendiente media de la cuenca			0	0.119
Elevación media de la cuenca			0	0.224
Longitud corriente principal	0.4056	1.233	0.4797	0.911
Pendiente cauce principal	-0.125	1.113	0	1.038
Parámetro de forma	-2.953	1.64	-0.726	1.356
Densidad de corrientes	0	1.38		
Densidad de drenaje	-2.61	0.915	-0.479	1.212
Centroide: Latitud			0	0.755
Centroide: Longitud			0	1.138
Coefficiente de escurrimiento	0	0.524		
Orden corriente principal				
Perímetro del parteaguas	0.5933	1.2	0.33	0.983
Temperatura media anual	0	2.039	0	
Q_2	0.332	1.013	0.216	0.956
Q_5	0.237	1.465	0.1997	2.703
Q_{10}	0.161	1.301	0.003	3.175
Q_{20}	0.138	1.039	-0.0576	2.763
Q_{50}	0.877	1.12	-0.284	1.999

principal, densidad de corrientes y la longitud del centroide.

8. Construir las ecuaciones regionales por la técnica de correlación y regresión múltiple o por la de estaciones-año para cada una de las regiones homogéneas dentro de la zona en estudio.

Para establecer la ecuación que definan el comportamiento de regiones homogéneas es necesario identificar el número de regiones que se pueden presentar en la zona en estudio y las estaciones que las conforman. Siguiendo la metodología propuesta por Nathan y Mc Mahon (1990) se pudieron ubicar a las estaciones analizadas dentro de dos regiones homogéneas (cuadro 18).

Técnica de correlación y regresión múltiple

Como ya se ha mencionado, esta técnica consiste en determinar una serie de ecuaciones de regresión donde la variable dependiente puede ser el evento de di-

seño para un determinado periodo de retorno o los parámetros de la distribución de probabilidad que se puede considerar como representativa dentro de la región homogénea.

De acuerdo con la delimitación se tienen dos regiones homogéneas y de acuerdo con los resultados del cuadro 15, no se cuenta con una distribución que represente a cada región, por lo que se desarrollarán las ecuaciones regionales considerando a los eventos de diseño Q_T , como la variable dependiente del modelo (cuadro 15).

Para la determinación de las variables independientes se debe realizar nuevamente el proceso de discriminación (pasos 6 y 7), sólo que ahora se considera únicamente a las estaciones que pertenecen a cada región. Los parámetros de la transformación normalizante para cada región se muestran en el cuadro 19, en los cuadros 20 y 21 se presentan las variables significativas para la predicción de cada uno de los eventos de diseño en las regiones homogéneas A y B.

20. Variables significativas para la estimación de las sequías para diferentes periodos de retorno en la Región A

2 años	5 años	10 años	20 años	50 años
Área drenada	Área drenada	Área drenada	Área drenada	Área drenada
Elevación media de la cuenca	Elevación media de la cuenca	Elevación media de la cuenca	Elevación media de la cuenca	Elevación media de la cuenca
Pendiente cauce principal	Parámetro de forma	Parámetro de forma	Parámetro de forma	Parámetro de forma
Parámetro de forma				

21. Variables significativas para la estimación de las sequías para diferentes periodos de retorno en la Región B

2 años	5 años	10 años	20 años	50 años
Área drenada	Área drenada	Pendiente del cauce principal	Longitud del cauce principal	Longitud del cauce principal
Pendiente del cauce principal	Pendiente del cauce principal	Densidad de corrientes	Pendiente del cauce principal	Pendiente del cauce principal
Densidad de corrientes	Densidad de corrientes	Latitud del centroide	Densidad de corrientes	Densidad de corrientes
Latitud del centroide	Latitud del centroide		Latitud del centroide	Latitud del centroide

22. Valores normalizados inferidos con las ecuaciones regionales

Estación	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}
Guatenipa	2.9593	4.41347	4.5588	2.71987	4.0717
Guamuchil	-1.09496	-1.3312	-1.45113	-1.2916	-1.4688
Álamos	-2.48079	-6.11194	-8.58902	-26.179	-46.0842
La Tina	1.7455	0.3719	-7.07332	-24.2703	-37.75
Zopilote	-2.76	-5.93633	-10.6973	-18.436	-27.63
Cazanate	-1.842	-5.61437	-10.5508	-31.63	-54.8795
Ignacio	1.4357	4.7486	22.727	20.271	33.19150

23. Eventos de diseño de algunas estaciones estimados por la técnica de regresión

Estación	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}
Guatenipa	5.132	3.106165	3.4383	1.7733	2.06281
Guamuchil	0.05825	0.0146117	0.1173	0.01222	0.008399
Álamos	0.01544	0.00477	0.013133	0.00539	0.005164
La Tina	4.04822	0.505396	0.014737	0.005757	0.007416
Zopilote	0.00676	0.00507	0.011429	0.007208	0.007416
Cazanate	0.065945	0.005674	0.01153	0.004549	0.004505
Ignacio	3.14253	1.5359	1.324804	1.148536	1.48779

En conclusión, la región A tendrá como variables significativas: área drenada, elevación media de la cuenca y parámetro de forma, mientras que la región B quedará definida por área drenada, densidad de corrientes,

pendiente del cauce principal, latitud del centroide, longitud del cauce principal.

Para la región A la inferencia para los gastos con periodo de retorno de dos, cinco, diez, veinte y cincuenta años podrá realizarse con las ecuaciones:

$$Q_2 = 1.410386 + (0.00084546 \text{ Area}) + (0.001234164 \text{ Elev.}) + (1.33869E - 05 \text{ P. forma})$$

$$Q_5 = 2.03179 + (0.0011399 \text{ Area}) + (0.00176331 \text{ Elev.}) + (2.2129E - 05 \text{ P. forma})$$

$$Q_{10} = 2.171837 + (0.0011665 \text{ Area}) + (0.0018801 \text{ Elev.}) + (2.24623E - 05 \text{ P. forma})$$

$$Q_{20} = 1.7831135 + (0.00053299 \text{ Area}) + (0.0015599 \text{ Elev.}) + (1.06026E - 05 \text{ P. forma})$$

$$Q_{50} = 1.9774034 + (0.00111035 \text{ Area}) + (0.0017252 \text{ Elev.}) + (1.87534E - 05 \text{ P. forma})$$

Mientras que para la región B la inferencia se realizará con:

$$Q_2 = 1.708 + (0.09034 \text{ Area}) + (0.7308 \text{ P. cauce}) + (378.266 \text{ Dens.}) + 1.4604 \text{ Lat. cent.})$$

$$Q_5 = 7.29 + (0.123876 \text{ Area}) + (2.193474 \text{ P. cauce}) + (1610.52 \text{ Dens.}) + 8.33662 \text{ Lat. cent.})$$

$$Q_{10} = 33.051 + (3.234056 \text{ P. cauce}) + (8141.364 \text{ Dens.}) + (30.3384 \text{ Lat. cent.})$$

$$Q_{20} = 28.79 + (1.01699 \text{ Long.}) + (11.78489 \text{ P. cauce}) + (6423.93 \text{ Dens.}) + 9.717 \text{ Lat. cent.})$$

$$Q_{50} = 46.2395 + (22.38482 \text{ P. cauce}) + (12.535 \text{ Lat. cent.}) + (1.016989 \text{ Long.}) + 10357.64 \text{ Dens.})$$

Con las ecuaciones anteriores se realizará, como ejemplo de su aplicación, la estimación de gastos para las cuencas Guatenipa y Guamuchil localizadas en la región A y para las estaciones Álamos, La Tina, Zopilote, Cazanate e Ignacio ubicadas en la región B.

Es importante destacar que para el empleo de estas ecuaciones es necesario normalizar los valores de las variables empleadas para posteriormente sustituirlos en las ecuaciones regionales.

Los valores normalizados de los gastos estimados para cada una de las estaciones se presentan en el cuadro 22 y los valores finales (desnormalizados utilizando el proceso inverso de las ecuaciones 15 y 16) en el cuadro 23.

Estimación por el método de Estaciones-Año

Este método al igual que el anterior suministra una forma de inferir información en sitios con escasa o nula información. La metodología consiste en agrupar todos los registros de las cuencas que forman la región hidrológicamente homogénea para manejarlo como una sola estación, una vez recopilada la información se procede a determinar la o las funciones de distribución de probabilidad que se ajustan mejor a la región, para esto se utiliza el criterio del menor error estándar.

Aplicando las funciones de distribución de probabilidad para mínimos en las regiones A y B, se obtuvo que en la primera se ajusta la función de distribución GVE, mientras que la región B fue la distribución Log-normal con tres parámetros. Para estimar un evento de diseño para una cuenca con escasa o nula información basta con multiplicar en el primer caso la relación Q/Q_{medio} por el valor del gasto medio real y para el segundo la relación Q/Q_{medio} por el valor inferido de Q_{medio} a través de la relación $\text{Áreas-}Q_{medio}$. En el cuadro 24 se presentan los valores inferidos para las mismas estaciones del cuadro 23.

Cabe mencionar que también se aplicó la técnica de Estaciones-Año considerando la información de las 42 estaciones en su conjunto y los resultados no fueron buenos, esto marca la importancia de realizar previamente el proceso de delimitación de regiones homogéneas.

Conclusiones

Se ha presentado una técnica de identificación de las principales características que definen puntualmente la presencia de las sequías y junto con el proceso de generación de muestras sintéticas es posible determinar estas características a nivel regional.

24. Eventos de diseño de algunas estaciones estimados por la técnica Estaciones-Año

Estación	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}
Guatenipa	5.086	0.727	0.681	0.667	0.663
Guamuchil	0.133	0.089	0.083	0.081	0.081
Álamos	0.218	0.082	0.043	0.022	0.005
La Tina	0.006	0.002	0.001	0.001	0
Zopilote	0.006	0.002	0.001	0.001	0
Cazanate	0.154	0.057	0.030	0.015	0.003
Ignacio	1.441	0.541	1.288	1.145	0.033

Se han presentado las técnicas disponibles para el análisis de las sequías tanto puntual como regionalmente. No obstante que se han aplicado a la estimación de eventos mínimos anuales con duración de un día, estas técnicas pueden emplearse para diferentes duraciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que el proceso de delimitación de regiones homogéneas es de vital importancia para la construcción de los modelos regionales, ya que a pesar de lo que pueda pensarse, la inclusión en el modelo de información en exceso puede perjudicar en lugar de beneficiar a la estimación de los eventos de diseño.

En el caso particular de las regiones estudiadas, el mejor método de estimación regional fue el de Estaciones-Año. Sin embargo, pudieran mejorarse los resultados si técnicas como la de Avenida Índice, Box-Cox Regional, Inferencia Bayesiana o las distribuciones Mezcladas o Multivariadas se aplican en la modelación regional.

Se recomienda la aplicación de las técnicas expuestas para las fases de planeación, diseño y operación de los aprovechamientos hidráulicos en las regiones susceptibles de ser afectadas por el fenómeno de las sequías.

Agradecimientos

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Recibido: junio, 1997
Aprobado: octubre, 1997

Referencias

Alley, W. M. 1984. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *J. Climate Appl. Meteorology* 27(7):1100-1109.
Andrews, D. F. 1972. Plots of high dimensional data. *Biometrics* 28:125-136.
Comisión Nacional del Agua. 1995. *Programa Hidráulico 1995-2000*. Documento preliminar para el análisis en el

Consejo Consultivo Nacional para el desarrollo sustentable. México: Comisión Nacional del Agua. 69p.
Gumbel, J. E. 1954. Statistical theory of droughts. *Proceedings of American Society of Civil Engineers* 80(439).
Hann, C. T. 1977. *Statistical methods in hydrology*. USA: The Iowa State University Press. 163p.
Juárez, V. M. 1995. Sequía, escasez y desperdicio en el yermo mexicano. *Epoca* (México) 208:16-21.
Kite, G.W. 1988. *Frequency and risk analyses in hydrology*. USA: Water Resources Publications. 257p.
Limón, D. 1995. Es necesario iniciar una cultura del agua. *Epoca* (México) 208:22-23.
Mohan, S. y C. Rangacharga. 1991. A modified method for drought identification. *Hydrological Science Journal* 36(1):11-21.
Nathan, R. J. y J. Mc Mahon. 1990. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology* 121:217-238.
Raynal, J. 1987. Computation of probability weighted moments estimators for the parameters of the general extreme value distribution (maxima and minima). *Hydrological and Science Technology Journal* 3(1-3):47-52.
Raynal, J. y J. Douriet. 1994. Moment parameter estimators for the general extreme value distribution for the minima. *Hydrological and Science Technology Journal* 10(1-4):118-125.
Raynal, J. 1995a. Maximum likelihood parameter estimators for the general extreme value distribution for the minima. *Hydrological and Science Technology Journal* 10(1-4):140-149.
Raynal, J. 1995b. Sextile parameter estimators for the general extreme value distribution for the minima. *Hydrological and Science Technology Journal* 11(1-4):150-159.
Salas, J. D., J. W. Delleur, V. Yevjevich y W. L. Lane. 1988. *Applied modeling of hydrological time series*. USA: Water Resources Publications. 484p.
Serrano, N. C. 1995. En marcha el programa emergente de sequía. *Epoca* (México) 208:24-25.
UNESCO. 1979. *Map of the world distribution of arid regions*. MAB Tech. (Notes 7). Paris: UNESCO.
Wiener, A. 1972. *The role of water in development, an analysis of principles of comprehensive planning*. Chapter 32, p.p. 419-428. USA: Mc Graw-Hill, Water Resources and Environmental Engineering Series.
Yevjevich, V. 1983. *Coping with droughts*. USA: Water Resources Publications 417p.

Abstract

Escalante, C. & L. Reyes. "Identification and analysis of draughts in Hydrological Region 10, Sinaloa". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol XIII. Num. 2, pages. 23-43. May-August, 1998.

A technique for the identification of droughts, that may be used with a synthetic simulation procedure to predict the duration, severity, onset and termination of drought, is presented. Numerous techniques based on frequency analysis are available to estimate droughts at gauged sites with adequate flood flow records. However, drought estimates are often required at sites with either inadequate or no drought records. For such sites, regional analysis procedures are used and considered to be applicable to the ungauged watersheds located within the homogeneous region. These procedures were applied to 42 gauged stations located in Northern Mexico. Results provided a means of establishing drought risk zones. Furthermore, point and regional equations for estimating drought events for different return periods were developed.

Key words: Droughts, drought frequency analysis, delimitation of homogeneous region, regional models, synthetic simulation procedure.

Dirección institucional de autores:

Carlos Escalante, Lilia Reyes

Dirección División de Estudios de Posgrado,
Facultad de Ingeniería, UNAM
Apartado Postal 70-560 Ciudad Universitaria
04510 México, D.F.
Teléfono: (5) 622 32 77