

01162



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS CON EL TÍTULO:

"CARACTERIZACIÓN MUNICIPAL DE SEQUÍAS"

QUE PRESENTA

SAID L. NAVARRETE AVILA

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL

(HIDRÁULICA)

Director de tesis: Dr. Óscar A. Fuentes M.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Agradecimientos

A Ruth y Miguel Ángel, mis padres, que gracias a su total apoyo llegué hasta este momento de mi vida.

A Elena, princesa mía, a tu lado he aprendido todo, gracias, mi amor.

A todos mis compañeros y amigos, hombres y mujeres, dentro y fuera de la escuela, por estar presentes en el momento indicado, tolerarme, estimularme, inspirarme, tenerme paciencia y corregirme.

A los profesores, investigadores y personal de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, Instituto de Geografía, Municipio de Ixmiquilpan y SAGARPA; que estuvieron dispuestos a cooperar en todo lo necesario para integrar este trabajo.

Un agradecimiento especial a CONACYT por otorgarme la beca que me sirvió para concluir mis estudios de maestría.

Los nombres no importan, ellos saben de su generosa y desinteresada ayuda.

Contenido

OBJETIVOS	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. CONOCIMIENTO GENERAL DEL CLIMA Y LA SEQUÍA	7
2.1. Climatología e hidrología	7
2.2. Circulación atmosférica y el clima en México	8
2.3. Definición de sequía	10
2.4. Causas de la sequía	13
2.5. Identificación de la sequía	16
2.6. Índices de sequías	19
2.7. Pronóstico de sequías	20
3. EFECTOS, RESPUESTAS Y SEGUIMIENTO DE LA SEQUÍA	23
3.1. Impactos de la sequía	23
3.2. Medidas tomadas	28
3.3. Sistema de vigilancia y alerta temprana	32
3.4. Seguimiento de sequías	33
3.5. Mitigación y planeación para la sequía	34

4. ANÁLISIS DE SEQUÍAS	37
4.1. Caracterización de sequías municipales	37
4.2. Análisis de frecuencias de eventos extremos	38
4.3. Generación sintética de valores por medio de modelos estocásticos	43
4.4. Análisis de sequías meteorológicas	48
4.5. Análisis de sequías hidrológicas	53
4.6. Análisis económico	59
5. APLICACIÓN	65
5.1. Ubicación y datos geográficos	65
5.2. Situación socio-demográfica	65
5.3. Situación económica	67
5.4. Características climáticas y fisiográficas	68
5.5. Análisis de sequía en el municipio de Ixmiquilpan	68
5.5.1. Análisis meteorológico	69
5.5.2. Análisis hidrológico	88
5.5.3. Análisis económico	105
5.5.4. Evaluación de resultados	117
6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	121
ANEXO	125
BIBLIOGRAFIA	140

Objetivos

OBJETIVOS GENERALES

El presente trabajo tiene los objetivos siguientes:

1. Comprender los aspectos básicos que generan la sequía
2. Entender los efectos y respuestas tomadas ante la presencia de una sequía
3. Dar a conocer los aspectos científicos y técnicas que sirven para analizar una sequía

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una caracterización de sequía en el municipio de Ixmiquilpan en el estado de Hidalgo
2. Generar predicciones de variables para elaborar las normas de planeación
3. Elaborar un análisis económico para hacer la planeación que permita responder ante la presencia de una sequía en el municipio
4. El método seguido en este trabajo pueda ser aplicado a cualquier otro municipio o entidad de México

Para alcanzar los objetivos, el trabajo se organizó de la siguiente manera:

El primer capítulo es una introducción sobre el tema de la sequía donde se especifica la visión sobre el fenómeno, el conocimiento sobre el mismo y se dan a conocer los alcances de este trabajo.

En un segundo capítulo se estudian los aspectos generales que ayudan a comprender el origen de la sequía así como las variables que intervienen y lo

modifican. Se define el concepto según diversos puntos de vista de los sectores involucrados.

En el tercer capítulo se hace un resumen de los efectos causados por la sequía, las respuestas tomadas y su supervisión. Se definen los aspectos fundamentales que conforman un sistema de alerta temprana, la planificación adecuada y sistemática.

En el cuarto capítulo se estudian los aspectos científicos que sirven para analizar una sequía desde el punto de vista de la ingeniería, se dan las expresiones matemáticas y estadísticas que son el instrumento para generar las predicciones de variables deseadas.

En el quinto capítulo se aplican los conocimientos para hacer la caracterización municipal de la sequía para generar eventos de diseño y predicciones de variables como son la duración, intensidad, periodicidad de la sequía tanto anual como mensual y su probabilidad de ocurrencia. Posteriormente con estos resultados se realiza un análisis económico y se establecen las normas de planificación que permitan enfrentar el fenómeno.

En el sexto y último capítulo se dan recomendaciones sobre los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo.

1 Introducción

El estudio de la sequía en las últimas décadas ha tomado importancia relevante en el mundo ya que sus impactos son cada vez más trascendentes. Se ha intentado hacer diversos análisis sobre el tema, la mayoría se dedican a las causas y proporcionan un pronóstico para tomar las medidas necesarias y afrontar el fenómeno natural antes de que se torne en desastre natural, algunos han tratado de resolverlo y controlarlo, pero se sabe que es un evento recurrente que se presenta con cierta periodicidad y no es posible, hasta el momento, modificar las variables para evitarlo.

Los esfuerzos y recursos de los gobiernos se han enfocado a mitigar sus impactos negativos y dar opciones a la población; así que, el sitio de estudio ya sea un estado o un municipio, con capacidad de dar respuesta ante la presencia de fenómenos extraordinarios, sufrirá en menor grado los impactos negativos de tales eventos. Estos gobiernos se auxilian de la tecnología aplicada a sistemas de medición y supervisión que se han vuelto más eficientes, por ejemplo, el empleo de redes de radares y de imágenes generadas por satélites meteorológicos, han hecho que los pronósticos sean mas certeros.

Antes de realizar un análisis, cabe aclarar que los déficits de agua no siempre llevan a una sequía, ya que esta se presenta solo cuando dicho déficit acumulado afecte las actividades humanas. Para estudiar este fenómeno hidrometeorológico extremo, se identifican los periodos de excedencia y de escasez. Así, se verá que los déficits de humedad no implican necesariamente sequía.

Una vez analizada la sequía y su ocurrencia en el sitio de estudio, es muy importante llevar a cabo la planeación adecuada para prevenir y afrontar los impactos; además con el auxilio de los sistemas de supervisión, es posible

formar sistemas de alerta para actuar eficazmente con antelación en beneficio de la sociedad y de su economía. Se reitera, que las acciones del hombre que realice en la naturaleza sean para su beneficio y no intervengan negativamente en los fenómenos naturales. En particular, en las actividades industriales que generan y emiten gases de invernadero, en la tala y deforestación inmoderada, en la explotación irracional de suelos y fuentes de agua, en la contaminación del medio ambiente y en otras acciones que modifiquen el equilibrio ecológico. Ello ha provocado que el clima regional y global sufra cambios significativos que se traducen en calentamiento generalizado.

Los trabajos de investigación sobre el tema de la sequía en México se han basado principalmente en el estudio del fenómeno a partir de la precipitación y su déficit. Se han seguido métodos que por medio de índices muestran la magnitud del problema, se han hecho análisis de la sequía para generar un pronóstico a largo plazo y realizar planificación del uso del agua. Sin embargo, es necesario, entender el fenómeno desde su génesis y comprender las variables físicas que intervienen. Es decir, la dinámica en la atmósfera, sus anomalías y como afectan en la presencia de precipitación y su distribución en el espacio y el tiempo. También es importante tomar en cuenta que los impactos de una sequía serán menos adversos en la medida que la sociedad y sus dirigentes inviertan y se tomen las medidas pertinentes para prevenir y mitigar estos efectos.

Cuando la sequía se presenta, el riesgo del incremento de enfermedades es real y tangible, sobre todo las infecciones respiratorias por el aire contaminado, y las gastrointestinales ya que no se pueden mantener las condiciones mínimas de higiene de la sociedad. Además, cuando la sequía en una región tiene una larga duración se tienen pérdidas económicas severas, el campo se abandona porque los campesinos y ganaderos perdieron cultivos y ganado, así que deben buscar en otros lugares donde satisfacer sus necesidades básicas. Sin embargo, la magnitud y severidad de una sequía son relativos, ya que los efectos negativos están en función de las zonas afectadas y existencia de asentamientos humanos, de las actividades humanas y su desarrollo

económico que en su totalidad dependen de la existencia de agua. Las sequías evolucionan lentamente; es decir, el inicio es imperceptible, son de larga duración y abarcan grandes áreas. Se detectan una vez que están presentes los efectos por falta de agua y los daños que causa.

En los países en vías de desarrollo como el nuestro a pesar de que se cuenta con el material humano capaz de estudiar el tema y dar soluciones, no se cuenta con los recursos económicos y la infraestructura suficiente para combatir los estragos de la sequía. A pesar de que la cantidad de agua en el planeta es abundante, sólo una pequeña parte es apta para el uso y consumo humano, aunado a esto, la distribución del agua en el espacio y el tiempo es muy variable; es decir, no es uniforme. La sobreexplotación, el desperdicio y la contaminación tanto de pozos, de corrientes y depósitos naturales, así como la falta de tratamiento del agua residual, hacen de este recurso natural renovable sea escaso y motivo de disputas en la actualidad por su posesión.

Desde la perspectiva de un ingeniero, la sequía se analiza a partir de una la precipitación, también se diseña con la base de láminas de lluvia. El agrónomo centra su interés en la productividad de la tierra, el cambio de evapotranspiración, en el uso consuntivo y en general en la afectación del campo para prácticas de cultivo y desarrollo de ganado. El economista se enfoca en la relación entre la disminución de la productividad y los efectos en la economía de la región. Otros interesados son los biólogos, los climatólogos y demás especialistas en ciencias naturales y sociales que estudian el fenómeno. En conjunto, todos los profesionales se deben involucrar el entendimiento del fenómeno desde su origen, los efectos, la prevención, las respuestas, el análisis, la supervisión, la planificación, para que se integre un estudio multidisciplinario que ayude a la sociedad a enfrentar este fenómeno extremo.

2 Conocimiento general del clima y la sequía

2.1. Climatología e hidrología

El tiempo atmosférico es la condición de la atmósfera en un periodo breve de tiempo, generalmente de un día. El clima es la manifestación día a día del tiempo atmosférico por un periodo de tiempo determinado y representa las condiciones promedio en ese periodo. (Magaña, 1995). Las variables físicas principales que intervienen, se relacionan y dependen entre sí, las cuales hacen que el tiempo atmosférico se modifique, estas son la temperatura, la presión atmosférica, la velocidad del viento, la precipitación, la humedad relativa, la radiación solar. La climatología estudia el comportamiento del clima en sus manifestaciones y sus efectos sobre la corteza terrestre.

La hidrología estudia la ocurrencia, circulación y distribución del agua en la superficie terrestre, así como su relación con el medio ambiente y los seres vivos que coexisten dentro de él (Aparicio, 1997). Generalmente el estudio del ciclo del agua parte de la precipitación, posteriormente su distribución en la corteza terrestre, esto es, el escurrimiento sobre y por debajo de la corteza; considera a las corrientes superficiales, manantiales, la infiltración a través de los estratos de suelo, el depósito y almacenamiento, la evaporación, la transpiración y la evapotranspiración, entre otros fenómenos.

2.2 Circulación atmosférica y el clima en México

Existe una interacción entre la atmósfera, el continente y el océano, ya que de este último se obtiene la mayor parte del agua que se evapora, se condensa en la atmósfera y posteriormente se precipita sobre el continente y el océano mismo. Esta relación es la que permite que la vida continúe ya que provee de humedad y agua suficiente para que los seres vivos puedan subsistir en el interior de los continentes. El agua circula en todo el globo terráqueo y lo hace de manera desigual, de la misma forma el agua evaporada en un lugar no precipita en el mismo sitio, por lo que existen zonas donde la precipitación es mayor que la evaporación y en otras ocurre lo contrario. En latitudes medias se presentan precipitaciones relacionadas con frentes fríos polares, es diferente en regiones subtropicales y polares; debido a la circulación de la atmósfera. Esta circulación no es regular y en ocasiones sufre de cambios temporales que provocan en algunas regiones sequías. La circulación de la atmósfera y la interacción con la vida en la Tierra se encuentran en equilibrio, este es muy fácil de alterar al modificar alguna de sus variables. Para entender mejor los efectos sobre el clima y los ecosistemas de la interacción entre la atmósfera y la corteza se analiza el efecto invernadero.

Efecto invernadero

Este es un fenómeno natural necesario para sustentar la vida en la tierra. Entre la Tierra y su atmósfera se pueden presentar condiciones que existen dentro de un invernadero. Cuando la radiación solar pasa a través de una superficie plástica o un cristal, calienta el aire interior, la superficie y la cubierta vegetal; una vez que la temperatura interior se ha incrementado, el invernadero irradia energía de regreso hacia el exterior hasta alcanzar el balance.

La radiación solar consiste en ondas cortas que llegan a la atmósfera terrestre, parte de ella es reflejada de regreso al espacio y otra es absorbida por la atmósfera, esta a su vez llega a la superficie en donde es también reflejada o absorbida. La Tierra emite radiación de ondas largas hacia el exterior y los

gases que se encuentran en la atmósfera absorben parte de ellos que a su vez re-irradian de regreso hacia la superficie. Por lo anterior se tiene una temperatura interior promedio global de 15°C. Si no existiera la atmósfera y sus gases, la temperatura sería de -18°C la cual no podría sustentar la vida como se conoce. Los gases mencionados se les llama gases de invernadero y los principales son el dióxido de carbono, vapor de agua, metano, óxido nitroso, clorofluorocarbonos y ozono.

El clima mexicano

La modulación del clima mexicano y la ocurrencia de las lluvias se lleva a cabo por varios fenómenos, entre los principales se encuentran los ciclones tropicales, las ondas del este, el monzón mexicano y la Zona Inter Tropical de Convergencia. El Niño es un modulador del clima, que en ocasiones ocurre. Así mismo existen dos factores en general que controlan la distribución de la precipitación pluvial en México:

- ❖ *La orografía.* Factor geográfico permanente como son la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico.
- ❖ *El relieve.* En donde los fenómenos se transforman al pasar por esta, zona de costa, sierra, mesetas y planicies.

En México las lluvias de tipo orográfico y ciclónicas son las que se presentan en la temporada de lluvias. Cuando existen anomalías que modifiquen su ocurrencia, los efectos negativos en el sector agropecuario son graves.

En México existe gran variedad de climas por sus latitudes tropicales, medias, así como por su topografía. Sin embargo dominan los cálidos secos y muy secos.

El invierno mexicano se caracteriza por condiciones secas excepto en el Golfo de México y el noroeste donde se presentan lluvias de invierno; esta estación va de los meses de noviembre hasta abril. En el verano que va de mayo a

octubre se presenta la mayor parte de la precipitación existiendo un periodo de lluvias mínimas entre los meses de julio y agosto que se le llama sequía intraestival o canícula.

La temporada de ciclones tropicales comienza en junio y termina en noviembre. Gran parte de la dinámica atmosférica de verano en México esta relacionada con la presencia de la Zona Inter Tropical de Convergencia en el Pacífico del este.

2.3. Definición de sequía

La sequía es una característica recurrente del clima que se origina por una deficiencia en la precipitación durante un periodo de tiempo prolongado que resulta en déficit de humedad y afecta tanto a los ecosistemas como a las actividades humanas.

Este fenómeno se presenta en diversas regiones climáticas, en las cuales se registran valores de precipitación medios considerados normales y valores mínimos extremos correspondientes a cada región; además, para que se presente una sequía, debe considerarse el balance que existe entre el déficit en el régimen de lluvias con la evapotranspiración, la humedad en el suelo y otras variables; de manera tal que al interactuar no sean capaces de soportar la vida de forma eficiente.

Se trata de un fenómeno natural que tiene repercusión directa en el medio ambiente. Un ejemplo de un efecto es la disminución de los volúmenes en los almacenamientos de agua y en el caudal de las corrientes superficiales, por lo que las poblaciones se ven afectadas ya que se presentan problemas de abastecimiento de agua que a su vez impacta a las actividades agropecuarias y finalmente, se presentan pérdidas económicas.

La sequía se presenta también en sitios no poblados por el ser humano, por lo que afecta solamente al ecosistema, pero esto no es tema de análisis en este

trabajo. Existen regiones donde la precipitación siempre es escasa lo que provoca un permanente déficit de humedad, a este estado se le llama aridez.

La aridez es un estado permanente del clima en donde el promedio de precipitación es muy bajo y se registran altas temperaturas además los seres vivos que cohabitan estas regiones se han adaptado a estas condiciones. Lo anterior marca una diferencia entre sequía y aridez.

Las definiciones de sequía se presentan de dos formas, la conceptual y la operacional.

Definición conceptual de sequía

La sequía es un prolongado periodo de tiempo con lluvia deficiente que provoca daños severos en los cultivos y el ganado que resulta en pérdidas económicas.

Esta definición ayuda a comprender el concepto general de sequía y es una base para establecer políticas de asistencia y auxilio a la población afectada. Tiene un sustento científico y por medio de índices se determina el nivel crítico por el cual y solo bajo esta circunstancia, se declara una región afectada por la sequía. En varios países se han formulado planes y fondos de ayuda ante la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, estos tienen por finalidad hacer eficiente la asistencia, la distribución de recursos económicos, mitigar los riesgos y controlar los daños. En México se estableció el Fondo de Ayuda para Desastres Naturales que tiene un propósito semejante.

Definición operacional de sequía

Una sequía se presenta cuando las lluvias en un determinado periodo de tiempo son menores al valor medio; es decir, ocurren déficits que provocan disminución en el caudal medio de los ríos y ocasiona daños en el crecimiento de los cultivos.

Ayuda a identificar el inicio, final, duración y magnitud de una sequía, entendiendo magnitud a la extensión y grado de severidad. En una definición operacional de sequía se deben dar valores medios y compararlos con los mínimos que se registren. Intervienen una o más variables físicas como la temperatura, humedad en el medio ambiente, láminas de lluvia, gastos en el cauce de un río, humedad del suelo, evapotranspiración, las cuales se registran en series históricas de 30 a 50 años para calcular un valor medio o umbral, entonces cuando se presenten los mínimos se determina cuanto se desvía ese valor del promedio. Son necesarios registros anuales, mensuales, diarios y hasta horarios. Además con esta definición se pueden dar las características de la sequía y la probabilidad de recurrencia con varios grados de severidad.

Sequía meteorológica

Ocurre cuando las condiciones atmosféricas dominantes presentan una escasa o nula precipitación, alta temperatura y baja humedad ambiental. Es relativa a la región climática que se analice, así para climas tropicales y subtropicales se refiere a días en los que no se presente lluvia, en cambio para climas secos y muy cálidos se refiere a la ausencia de lluvia en la estación o año que se espera se presente.

Sequía hidrológica

Es cuando el volumen de escurrimiento se encuentra bajo el valor medio debido a la ausencia de precipitación. Se toma en cuenta todos los procesos hidrológicos desde el déficit en la precipitación, la disminución del caudal en las corrientes superficiales y subsuperficiales, en el bajo volumen de los almacenamientos y depósitos y el abatimiento de los niveles freáticos y, por lo tanto la escorrentía y la infiltración disminuyen también.

Sequía agrícola

La sequía se presenta cuando la lámina de agua no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos y por lo tanto, estos sufren estragos o se pierden. Esta ligada con la sequía meteorológica e hidrológica ya que una vez que existe un déficit en el régimen de lluvias y en la humedad del suelo, se genera un desequilibrio entre el balance del uso consuntivo y la evapotranspiración lo que ocasiona daños en los cultivos. Se caracteriza por la escasa o nula disponibilidad de agua en los estratos del perfil del suelo para los requerimientos de las plantas, depende de la etapa de desarrollo en la que se encuentre cada especie vegetal y se puede cuantificar con la productividad por hectárea sembrada.

Sequía socioeconómica

Debido a la ausencia de lluvias, no se pueden abastecer las demandas de agua de una sociedad para todos los requerimientos. Está asociada con los elementos meteorológicos, hidrológicos y agrícolas así como las pérdidas económicas que haya ocasionado el déficit de agua en un prolongado periodo de tiempo. Los requerimientos de agua de la sociedad se refieren al agua destinada a procesos industriales, generación de energía eléctrica, consumo humano, riego y depósito, navegación y recreación. La demanda de agua depende de la población, la tasa de crecimiento y del nivel de desarrollo de la sociedad.

2.4. Causas de la sequía

La sequía resulta de procesos naturales, en general de fluctuaciones climáticas asociadas con anomalías a gran escala en la circulación atmosférica, estas modificaciones se originan cuando el sol calienta la atmósfera lo que provoca que el aire se mueva al haber cambios de temperatura y además, debido a la rotación terrestre el viento se desplaza de oeste a este en grandes masas o corrientes. En verano, el aire caliente se concentra en el ecuador y el aire frío

en los polos, produciéndose corrientes de aire caliente que circula hacia los polos. En invierno es en sentido contrario, el aire frío sopla hacia el ecuador en un recorrido mayor y esto en conjunto hace que se modifique el clima.

La causa inmediata de las sequías es la disminución predominante del movimiento del viento, a lo que se le llama subsidencia, lo que resulta en alta presión que inhibe la posible formación de nubes y lo que a su vez produce una baja humedad relativa y déficit de precipitación. Las regiones desérticas se encuentran bajo la influencia de un estado de altas presiones durante la mayor parte del año, en cambio, las demás regiones climáticas experimentan estos estados de alta presión en ciertos intervalos de tiempo dependiente de la estación y es cuando se puede presentar la sequía; sin embargo, debido a las anomalías en la circulación atmosférica, estos estados pueden prolongarse y hacer que la sequía dure meses o hasta años.

Lo anterior se relaciona directamente con la concentración de la mayor parte de la humedad en los polos, durante el periodo frío, debido a los cambios de dirección de las corrientes de los vientos lo que impide que la humedad necesaria llegue a otras zonas, entonces la sequía también se asocia con un "enfriamiento global" que es cuando ocurren otros fenómenos meteorológicos como las granizadas y heladas en el mismo lapso. Las causas principales que intervienen para la ocurrencia de las sequías, además se ven intensificadas por otros factores climáticos, que son los factores exógenos como:

- *Manchas solares*. Ocurren en ciclos de 11 o de 15 años, también existen ciclos de 80 y 150 años.
- *Efecto invernadero concentrado*. Es la retención del calor proveniente del sol. Se debe a la concentración excesiva de CO₂ y otros gases por la combustión industrial y de automóviles.
- *Acumulación de polvo*. Producido en épocas de gran actividad volcánica, se genera una capa que impide que los rayos solares calientes la tierra uniformemente.

El efecto invernadero concentrado es una manifestación de otra anomalía pero que tiene su origen en las acciones del hombre y es el calentamiento global. Hay otros factores que intensifican la sequía como es la presencia de El Niño.

Aunque se conoce como actúa el clima en el medio ambiente y que en ocasiones resulta en el empobrecimiento de los recursos hidráulicos, también se sabe que hay factores externos asociados con la acción del hombre que intensifican las problemáticas, estos son los factores endógenos, dentro de los cuales se citan:

- *Tamaño de la población.* Al existir una población muy grande, los requerimientos de agua se incrementan.
- *Disputas por la posesión del agua.* Dentro de los usos que se les da el agua, se dan prioridades a algunos sectores productivos pero se afectan otros intereses.
- *Pobre calidad del agua.* Después del uso del agua en las industrias, las poblaciones y el campo, retorna contaminada a las fuentes a corrientes superficiales, océanos y otros.
- *Sobreexplotación de fuentes de abastecimiento.* La demanda de agua sobrepasa la capacidad de recarga de acuíferos, de lagos y de todas las fuentes de abastecimiento.
- *Infraestructura urbana deficiente y no suficiente.* Los sistemas de abastecimiento y alcantarillado presentan fugas por donde se pierde una gran parte del gasto extraído de las fuentes. Las aguas residuales se mezclan con las pluviales y no se cuentan con suficientes plantas de tratamiento de agua.
- *Legislación.* Aunque existen leyes en donde se aclara la posesión de tierra, su uso y explotación, estas no se cumplen y las instituciones que se encargan de esto no actúan eficientemente.

2.5. Identificación de la sequía

Debido a que son muchas las variables que intervienen y son causa de la sequía, es difícil de detectar así que se reconoce por los efectos que provoca. Existen características intrínsecas de la sequía y con ellas se trata de facilitar su estudio, estas son la duración en el tiempo, la magnitud que involucra la extensión afectada y el grado de severidad. Con los parámetros anteriores la Secretaría de Gobernación en el año 2000 hizo una clasificación de la sequía según la característica que intervenga, así se tiene:

Sequía según la duración

- *Corta*. La sequía en un periodo de tiempo relativamente corto, que pueden ser desde días hasta semanas.
- *Larga*. La duración va de meses hasta años.

Sequía según su extensión

- *Local*. Afecta solo una región pequeña, como una cuenca pequeña, un municipio o un estado pequeño.
- *Regional*. Puede afectar todo un estado o conjunto de ellos, cuencas grandes y hasta un país completo.
- *Continental*. La sequía se presenta y afecta mas de un país o un continente completo.

También por su extensión, puede clasificarse por el porcentaje del área afectada en estudio (Medina y Espinosa, 1988).

- *Local*. *menor al 10*
- *Vasta* *de 11 a 20*
- *Muy vasta* *de 21 a 30*
- *Extraordinaria* *de 31 a 50*
- *Catastrófica* *mayor de 50*

Sequía según el grado de severidad o magnitud

- *Leve*. Escasez parcial de lluvias y no afecta severamente la producción y el desarrollo económico de la población.
- *Moderada*. Disminución significativa de la precipitación que afecta sobre todo la producción agrícola.
- *Severa*. Disminución general o total de lluvias que causa daños cuantiosos en todos los sectores productivos.
- *Extrema*. Déficit permanente de humedad y escasez de agua que produce crisis en la agricultura y en la ganadería con efectos severos en el conjunto de la economía y la sociedad.

Las anteriores clasificaciones están relacionadas entre sí, ya que una sequía de larga duración implica que sus impactos se vean también intensificados, además estos crecen cuando la sequía se extiende a regiones más grandes.

Hay factores que se toman como características y de ellas se auxilia para poder hacer las clasificaciones. Estas características son un indicador que manifiestan las causas que provocan la sequía y se pueden cuantificar, a su vez, los indicadores se pueden entender como síntomas que en conjunto contribuyen a la existencia de una sequía.

- ◆ Alta presión, fuertes vientos, baja humedad relativa y altas temperaturas.
- ◆ Déficit en la precipitación menor que el promedio o umbral durante un periodo determinado.
- ◆ Poca o nula humedad presente en el suelo y que no puede ser aprovechada por las plantas.
- ◆ Incremento del volumen de evapotranspiración.
- ◆ Disminución en el caudal de las corrientes superficiales.
- ◆ Disminución en el volumen de los depósitos de agua como lagunas, lagos y almacenamientos como estanques y vasos.
- ◆ Abatimiento del nivel freático.

- ◆ Baja en el volumen de fuentes de abastecimiento interiores como acuíferos y corrientes subterráneas y subsuperficiales.

Los indicadores se relacionan entre sí y siguen una secuencia determinada como en el ciclo hidrológico. Por lo que es importante conocer las causas primarias que llevaron a la alteración y disminución en el régimen de lluvias que es el punto donde generalmente se parte para hacer un estudio dentro del proceso cíclico como es que se considera a la sequía.

Regiones afectables

Ahora bien, cada región presenta características climáticas propias, algunas no son factibles para la supervivencia del hombre pero en la mayoría el ser humano se ha adaptado para establecer comunidades. La sequía puede presentarse en cualquier zona pero hay regiones que son más sensibles a la presencia del fenómeno por su ubicación geográfica. Las zonas afectables se encuentran en franjas a los 30° de latitud norte y sur a partir de la línea del ecuador que corresponden a zonas con altas presiones con vientos secos y descendentes y en donde no se presentan lluvias.

Grandes extensiones del territorio mexicano se encuentran dentro de esta franja como es el caso de los desiertos de África, Asia y Oceanía. Estas son zonas áridas y semiáridas con presencias de flora y fauna desértica, sin embargo grandes poblaciones se han asentado en el interior de estas regiones. Las regiones con latitudes más cercanas al ecuador son regiones tropicales y subtropicales en donde las lluvias son abundantes pero que también son susceptibles a padecer de sequía debido a fluctuaciones climáticas y las alteraciones del clima como lo son el calentamiento global y El Niño. Las regiones localizadas entre las subtropicales y las áridas como es el caso del Bajío mexicano padecen también de estos cambios climáticos extremos y es en esta región en donde se localizan la mayoría de los terrenos cultivables.

2.6. Índices de sequía

La forma en que se determina la intensidad y la severidad de una sequía es por medio de índices. El resultado es un simple número que puede ser usado para determinar el momento en que en una zona debe de aplicarse auxilio y además darle una solución a la sequía ya que muestra la severidad de esta. Generalmente los índices se dibujan en una gráfica contra el tiempo para mostrar el desarrollo de la sequía.

Los índices de sequías hacen uso de información de lluvia, caudales de corrientes superficiales, volúmenes de los sistemas de abastecimiento de agua. Posteriormente analiza los datos y por medio de correlaciones y conversiones matemáticas se obtiene una escala que es fácil de entender. Cada índice se calcula con variaciones en la escala del tiempo y es por ello que se hace uso de más de uno. La mayoría de los índices muestran la variación entre el valor histórico normal de precipitación en un periodo de tiempo y el valor anómalo extremo. Los diversos índices son usados según la necesidad de quien los emplea y su generación varía según las características topográficas, geográficas y climáticas de cada región.

- ❖ Por ciento del normal.
- ❖ Índice de precipitación estandarizado.
- ❖ Índice de Palmer.
- ❖ Índice de humedad en los cultivos.
- ❖ Índice de suministro de agua superficial.
- ❖ Índice de Reclamación de Sequía.
- ❖ Deciles.

En este trabajo se hace uso de los deciles. Fue desarrollado por Gibbs y Maher (1967) para evitar algunas de las debilidades dentro del "por ciento de aproximación normal." La técnica que ellos desarrollaron divide la distribución

de ocurrencias sobre una precipitación a largo plazo y la guarda en una décima parte de la distribución. El primer decil es la cantidad de lluvia no excedida por el más bajo 10% de las ocurrencias de la precipitación. El segundo es la cantidad de la precipitación no excedida por el más bajo 20% de ocurrencias. Esta escala continúa hasta que la cantidad de lluvia identificada por el décimo sea la cantidad de la precipitación más grande dentro del registro a largo plazo. Por la definición, el quinto decil es la mediana, y es la cantidad de la precipitación no excedida por 50% de las ocurrencias encima del período de registro. Los deciles se agrupan en cinco clasificaciones. Una desventaja de este sistema es que, a partir de un registro climatológico largo se necesita calcularlos con mayor precisión.

Clasificación de Deciles

1-2: *menores, 20% mucho más debajo de lo normal*

3-4: *siguientes menores, 20% debajo de lo normal*

5-6: *medio, estado normal*

7-8: *siguientes mas altos, 20% sobre lo normal*

9-10: *mas alto, 20% mucho mas arriba de lo normal*

2.7. Pronóstico de sequías

El pronóstico de tiempo atmosférico es la probabilidad de que la temperatura, humedad relativa, presión o cualquier otra variable climática se manifieste de cierta manera en un periodo determinado. En la actualidad los pronósticos a tres días son muy precisos pero no así los a largo plazo que en el caso de la sequía interesan más, porque con ellos se puede tomar medidas para prevenir algún daño en las actividades de la sociedad y en particular en la agricultura. Todos los pronósticos tienen cierto grado de incertidumbre y el mejor pronóstico es que de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con predicciones a largo plazo y que proporcionen su distribución en el espacio y el tiempo, es decir, que tan grande y cuanto dura el fenómeno.

Con la obtención y medición de datos de variables físicas y el uso de técnicas estadísticas combinadas con el uso de modelos matemáticos se puede realizar el pronóstico. La dificultad para hacer pronósticos de sequías se debe a que los datos medidos y registrados tanto a nivel de superficie como en la atmósfera no son suficientes; entonces se hace uso de técnicas estadísticas como la generación de muestras sintéticas por medio de modelos estocásticos para obtener una muestra suficiente para elaborar el pronóstico.

La climatología es de gran ayuda para elaborar pronósticos más certeros sobre las condiciones del clima y sus manifestaciones. Los climatólogos se basan en valores medios o promedio de las diferentes variables que intervienen en la dinámica climatológica, generalmente se dan valores en el momento de temperatura, precipitación, humedad y todas aquellas variables que se pueden medir directamente por medio de instrumentos muy precisos, en cambio para generar pronósticos del tiempo atmosférico es necesario contar con registros de datos estadísticos de por lo menos treinta años. En este trabajo se elabora un pronóstico de lámina de lluvia y de volumen de escurrimiento, los datos faltantes para completar la muestra se infieren por medio de muestras sintéticas.

El reto presente es manejar datos de diferentes variables y correlacionarlos entre ellos para poder generar tanto pronósticos de sequías, como diseñar sistemas de alerta temprana y planificar ante un evento de este tipo.

La capacidad de adaptación de un país, de un estado o de un municipio ante las condiciones adversas de los fenómenos hidrometeorológicos depende del avance tecnológico, los recursos de las instituciones y la disponibilidad de información, entonces los municipios que carecen de recursos económicos son más vulnerables; así que para enfrentar los efectos se diseñan planes de adaptación ya que los costos para evitar y remediar los daños son mucho mayores que los costos de prevención.

3 Efectos, respuestas y seguimiento de la sequía

3.1. Impactos de la sequía

Secuencia de impactos de la sequía

La sequía produce numerosos impactos que son medidos por sectores, como el productivo y de la economía, el científico, ambiental y el social; estos impactos llegan más allá del sitio o región que experimenta la sequía física; ya que el agua es indispensable para nuestra subsistencia, para producir y proporcionar los servicios básicos.

Los impactos normalmente son llamados directos o indirectos y siguen una secuencia ya que intervienen diversos sectores que dependen el uno del otro. Una vez que se presentan las anomalías en el clima, las cuales causan la sequía. Los primeros impactos que se presentan son la disminución de la precipitación, de la humedad en el medio ambiente y aumento de temperatura; esto a su vez lleva a reducción en los niveles de los almacenamientos de agua, disminución en los caudales de las corrientes superficiales, en la humedad del suelo y baja en el nivel freático.

Posteriormente las cosechas se reducen, el suelo se empobrece y existe baja productividad en habitats como bosques y pastizales; aumenta el riesgo de incendios, de la mortalidad de ganado y de fauna terrestre y acuática; estos son algunos ejemplos de impactos directos.

Las consecuencias de estos impactos ilustran los impactos indirectos, que por lo general son los que afectan las actividades del hombre.

Los impactos directos o primarios son normalmente biofísicos. De hecho, la relación entre los impactos es confuso y es difícil proponer estimaciones financieras de daños y perjuicios.

Los impactos de la sequía pueden listarse como medioambientales, agropecuarios y otros sectores primarios, económico y social. Los impactos indirectos son los que se pueden cuantificar y se estudian primero para analizar posteriormente los impactos directos, esto para a su vez poder comprender mejor el fenómeno.

Impactos Medioambientales

Las pérdidas medioambientales son el resultado de la pérdida de los cultivos ya existentes, gran mortalidad de animales, afectación en el hábitat de la fauna y pobreza en la calidad del aire y del agua; mayor riesgo de incendios en bosques y pastizales; degradación de calidad del paisaje; la pérdida de biodiversidad y erosión del suelo. Algunos de los efectos son a corto plazo y están condicionados al rápido retorno de las condiciones normales de las lluvias al final de la sequía. Otros efectos medioambientales son de mediano y largo plazo, incluso pueden ser permanentes.

Con la presencia de sequías también los problemas de plagas de insectos y de enfermedades en los bosques, pastizales y terrenos cultivados aumenta, lo que provoque que reduzcan su crecimiento. La incidencia y aumento de incendios en los bosques es muy notable durante el periodo de sequías extendidas que a su vez ponen a tanto a poblaciones humanas como de animales. Otros impactos son:

1. Incremento de la vulnerabilidad de especies animales con los depredadores por la concentración de las especies cerca de las fuentes de agua

2. Migración y concentración de fauna (pérdida de fauna en algunas áreas y aumento considerable en otras)
3. Mayor riesgo a las especies en peligro de extinción
4. Pérdida de suelo húmedo y rico en nutrientes
5. Baja calidad del agua (aumentos de salinidad, temperatura, pH, turbiedad, etc)

Impactos agropecuarios y en otros sectores productivos

Afecta directamente la producción de cultivos que dependen de las lluvias de temporal entre los meses de marzo y octubre, se manifiesta por un mal desarrollo o impide el crecimiento del cultivo, entre octubre y enero se presentan sequías de temporada y heladas que no permiten madurar y cosechar los cultivos. Las cosechas que se lograron pueden contener un bajo contenido de nutrientes como carbohidratos compuestos (almidones) y proteínas. Cuando se presenta sequía y se pretendía sembrar maíz se sustituye por trigo, ya que el maíz requiere de una gran cantidad de humedad al inicio de su desarrollo. Así mismo, se destinan terrenos de cultivo para sembrar forraje y alimentar al ganado pero se pierde espacio para cultivos de consumo humano. La desnutrición y muerte del hato ganadero sobreviene con la ausencia de agua y alimentos. Además las enfermedades y plagas se incrementan.

Otro sector afectado es el de la minería y la industria de la extracción, debido a que requiere de una gran cantidad de agua para los procesos de la misma extracción, limpieza, separación de minerales y otros.

Los impactos en el sector agropecuario se traducen en:

1. Alto costo de alimentos y agua para el ganado
2. Alto costo de agua de riego para los cultivos
3. Limitación de tierras para labrar
4. Pérdida de maderas por baja calidad y por la existencia de incendios
5. Pérdida de recursos de los bosques y pastizales

Impacto económico

El ingreso reducido para los campesinos y granjeros tiene un efecto mayor. Minoristas y otros que proporcionan servicios a campesinos y ganaderos enfrentan la reducción de su negocio. Esto lleva al desempleo, riesgo del crédito aumentado para las instituciones financieras, déficits importantes y pérdida de rédito del impuesto local que potencialmente recaba el gobierno federal. El ingreso que también es afectado pero en menor medida es la industria del turismo y recreación. Los precios de los alimentos, la energía, y otros productos aumentan cuando los suministros esenciales son escasos. En algunos casos, bajas locales de ciertos sectores se ven reflejados cuando esa región importa productos de la región que está siendo afectada directamente por la sequía. El suministro de agua reducido daña la navegabilidad de ríos y el resultado es el aumento en las tarifas del transporte ya que los productos deben ser transportados por vía terrestre a lugares más lejanos. Por último la fuerza de producción también puede agotarse significativamente.

En general todas las industrias dependen del consumo de agua, desde las del sector primario hasta las industrias de transformación y proceso, producción de bienes y materiales.

1. Pérdida del ingreso para campesinos y ganaderos y otros directamente afectados por la quiebra de su medio de subsistencia
2. Desempleo relacionado directamente por la baja producción debido a la sequía
3. Elevado costo de transporte de agua
4. Disminución de los precios de la tierra
5. Pérdida en los suministros de agua potable
6. Incrementos en los precios de alimentos por baja producción, importación y especulación en los precios
7. Aumento de la demanda de energía y reducción del suministro debido a baja producción de plantas generadoras
8. Sustitución de combustibles más caros para generar energía que se perdió en plantas hidroeléctricas

9. Puesta en marcha de fondos de emergencia para mitigar los daños

Impacto social

Los impactos sociales involucran a la seguridad pública principalmente en protección civil y el sector salud, además los conflictos entre los usuarios de agua son mayores, esto a su vez se traduce en la reducción de la calidad de vida y faltas de equidad en la distribución de ayuda por los programas de alivio del desastre. Muchos de los impactos especificados como económico y medioambiental tienen los componentes sociales también.

La sequía representa uno de los detonadores naturales más importantes para la desnutrición y el hambre. A veces se atribuyen equivocadamente muertes que son el resultado del hambre a la sequía en lugar de a las causas subsecuentes como son la guerra o la disputa civil.

Así mismo, el incremento en las enfermedades cardiovasculares por el aumento de estrés y depresión, infecciones respiratorias y gastrointestinales por la contaminación del aire por partículas procedentes de la erosión eólica y en general debidas a que la baja disponibilidad de agua para satisfacer la demanda de la población no permite mantener las condiciones mínimas de higiene. Otros impactos sociales son:

1. Aumento de enfermedades alérgicas causadas por las concentraciones de la fauna
2. Aumento de los conflictos por disputas de tierra y fuentes de abastecimiento de agua
3. Reducción o modificación de actividades recreativas
4. La falta de equidad en la distribución de ayuda para mitigar los efectos de la sequía
5. Pérdida de sitios culturales y de valores estéticos
6. Aumento de las migraciones de la población (rural a las áreas urbanas, trabajadores migratorios a otras regiones productivas o a otros países)

3.2. Medidas tomadas

La Secretaría de Gobernación diseñó el Atlas Nacional de Riesgos, en ese documento se describen los fenómenos hidrometeorológicos que mayor daño han causado a México y el lugar donde se desarrollaron.

En México los efectos en la población por la sequía en tiempos prehispánicos fueron pérdidas parciales o totales de cultivos sobre todo el maíz, en consecuencia se tenía que consumir las reservas de invierno, pero al prolongarse la sequía por más de dos años, también se perdían las semillas disponibles para futuros cultivos, entonces los efectos negativos se prolongaban por años. Se contaba con recursos alternativos como raíces, pescado y camarón, pero no era suficiente. No se contaba con grandes almacenamientos pero sí con un buen sistema de riego en la zona central, al tener canales que se alimentaban de los lagos. Se cultivaba en terrazas lo que evitaba los deslaves en el suelo y pérdida del mismo con todo y nutrientes. En declives se utilizaban camellones y cajetes para conducir agua, en los pantanos se construían chinampas. Se practicaba la rotación de cultivos y manejaban las técnicas de fertilización con compostas y lodos. Estos conocimientos se olvidaron a raíz de la conquista, se dejaron de usar terrazas y la organización de propiedad castellana era cultivar en parcelas ubicadas en llanuras de los valles y se perdieron las chinampas al secarse los lagos.

El sistema europeo de *cultivo extensivo* utiliza métodos para fertilizar la tierra como el dejar reposar la tierra por años, dejar en barbecho anual una parte de las tierras abandonadas con estiércol y esparciendo en los campos una capa de humus procedente de suelos no cultivados. Para estos métodos se necesitan grandes terrenos de cultivos, ganado de tiro, otros terrenos de cultivo para alimentar el ganado y terrenos para extracción del humus. Después se difunde la *agricultura intensiva* en la revolución agrícola del siglo XVIII, los cultivos eran utilizados exclusivamente para consumo humano y del ganado, después en la Revolución Industrial al campo mexicano se le agregaron las máquinas como tractores, segadoras, trilladoras, desgranadoras,

empacadoras, etc. Se difundían las nuevas técnicas de cultivo salidas del Colegio Nacional de Agricultura pero los costos de operación se incrementaron considerablemente al tener que abastecer y mantener las nuevas máquinas. Sólo se beneficiaron los cultivos donde se extraen materias primas: henequén, arroz, trigo, caña de azúcar, algodón y los cultivos de exportación, ya que estos sí podían pagar los insumos y el mantenimiento.

Por medio de la cuantificación de las pérdidas económicas y humanas es como se establece la vulnerabilidad de una sociedad ante la presencia de la sequía y es como se toman decisiones para destinar recursos. Dentro de los cuales están los que tienen por objetivo desarrollar modelos físicos para reconocer las relaciones entre variables meteorológicas y la forma que impactan en zonas específicas. Al usar estos modelos se pueden hacer pronósticos que permiten a la población tomar medidas de prevención tanto estructurales como institucionales, adaptación de los servicios de emergencia e información.

En México, más de la tercera parte de la población depende totalmente de los ingresos económicos de la agricultura, además esta actividad es un impulsor de otras actividades como la ganadería, el comercio y el transporte, es decir, es un activador de la cadena productiva del país. Al campo mexicano además de la sequía lo afectan las heladas, las inundaciones, los huracanes, las plagas, la contaminación del agua y del suelo.

Medidas institucionales (tomadas por las autoridades)

1. *Almacenamiento de alimentos.* Los granos se almacenan y con la presencia de fenómenos extraordinarios como la sequía se usan para abastecer a la población. Cuando no son suficientes se importan de otros municipios, estados o países. En la antigüedad en la gran Tenochtitlán, se invadían a los pueblos aledaños para arrebatárles los granos, en la época colonial se almacenaban en positos y alhóndigas, en las ciudades, reales de minas y puertos de la Nueva España desde el siglo XVI, pero los productores en época de sequías se negaban a almacenar granos en estos sitios públicos.

Ya en la época independiente se promulgó una ley de almacenes generales de depósitos como la CONASUPO.

2. *Control de las existencias.* Aún se hacen inspecciones e inventarios en las haciendas, en los molinos y depósitos de granos básicos almacenados para cuantificar los volúmenes. Cuando ocurre la sequía, se debe vender o se requisaban los granos para enviarlos a los lugares más poblados y afectados. Se emiten mandatos, decretos y bandos para ordenar el envío de granos a esas zonas y se multa a los intermediarios y especuladores. Fue efectiva esta medida hasta la sequía del siglo XIX cuando fue necesario importar granos de los Estados Unidos.
3. *Exención de impuestos.* Por la presión de los grupos mas desfavorecidos al perder su producto y no poder pagar los impuestos, se pide que se les eximiese del pago de estas cargas fiscales. En la antigüedad, la iglesia también exento del pago del diezmo a estos productores afectados. Se restringió la exportación de granos para proteger el consumo interno.
4. *Desarrollo científico.* En el siglo XVIII se proporcionaban semillas y animales de tiro para sembrar y el transporte fue necesario para conducir el producto. Cuando ocurrió la sequía de 1785, el virrey ordenó las "siembras extraordinarias" que consistían en sembrar en tierras calientes y templadas en extensiones mayores a las acostumbradas. En la actualidad, dentro de los centros de investigación, se mejoran las semillas por medio de manipulación genética para hacerlas más resistentes y productivas, aunque ha creado gran controversia el desarrollo de semillas transgénicas por su posible daño a la salud al contener sustancias como hormonas.
5. *Fondo Nacional para Desastres Naturales.* Esta medida se toma una vez que un municipio o entidad federativa a sido afectada y siniestrada por un fenómeno natural, en este caso la sequía, se trata de una medida que destina recursos económicos para reconstruir la infraestructura dañada, pagar indemnizaciones a las familias que perdieron su patrimonio, creación de empleo temporal. No es una medida preventiva.

6. *Plan DN-III*. Este plan implementado por el ejercito por ordenes del gobierno central, se trata de una medida de rescate, búsqueda, salvamento de personas. El ejercito con todo el material humano y equipo disponible, implementa campañas de salvamento, refugio, alimentación, servicios médicos, empleo temporal, desalojo de escombros, reparación y servicios sociales como escuelas temporales y actividades culturales. Sin embargo, en el caso de una sequía, es muy difícil que se implemente el plan, debido a que su presencia y efectos son de lento desarrollo y las pérdidas no son instantáneas.

Medidas operacionales (tomadas por especialistas)

1. Ahorro y racionamiento de agua
2. Importación de agua
3. Desarrollo de fuentes alternas de suministro
4. Perforación de nuevos pozos
5. Generación de lluvia artificial
6. Establecimiento de cultivos que requieran menos agua
7. Reducción de superficies sembradas
8. Producción agrícola con criterio de déficit hídrico
9. Reuso de agua
10. Desalación de agua marina
11. Uso de cultivos resistentes a condiciones ambientales extremas

Los institutos y entidades académicas analizan el fenómeno, generan predicciones de variables como láminas de lluvia disponible en déficit, gastos mínimos de las corrientes, es decir, modelan eventos de diseño con una probabilidad de ocurrencia y periodo de retorno; con lo cual, al tener un resultado numérico permite tomar medidas preventivas por medio de la planificación.

3.3. Sistema de vigilancia y alerta temprana

Mediante el uso de información meteorológica e hidrológica obtenida en el mismo sitio de estudio y por imágenes de radar y satélite se hace una vigilancia oportuna del desarrollo del fenómeno estudiado. Se cuantifican las características de las sequías como su duración, periodicidad, déficit e intensidad con el objetivo de desarrollar un sistema para la detección, supervisión, pronóstico y evaluación de las sequías en zonas específicas como un municipio, subcuenca, cuenca, región o estado. La atención se centra en aquellos sitios más vulnerables a ser dañados como los terrenos cultivables, las zonas de pastoreo y las fuentes de abastecimiento de agua para la industria y la población.

Este sistema de vigilancia y alerta debe ser capaz de identificar las sequías con anticipación para poder planificar adecuadamente, debe proporcionar la distribución espacial y temporal con la información a nivel de superficie, con la ayuda de mediciones de radar y satélites.

El método utiliza los datos de precipitación y de caudales en las corrientes principales dentro del sitio de estudio, así como de las zonas con influencia dentro de la misma región como las subcuencas, esto con el objeto de hacer el análisis de la sequía; por medio del índice de deciles se estima las características; posteriormente se proporcionan los eventos de diseño para diferentes periodos de retorno, es decir, los gastos estimados del déficit y duración. Los periodos de retorno usados para el análisis de sequías van de los 2, 5, 10, 20 hasta 50 y 100 años.

Con la predicción de las variables anteriores se dan las normas de planeación y diseño, es decir, se desarrollan planes de acción a nivel tanto puntual como regional para implementar estrategias preactivas o de prevención para afrontar la sequía.

Los resultados obtenidos permiten apreciar la distribución geográfica del fenómeno de la sequía a lo largo del tiempo que va de lo mensual a lo anual, siendo de mayor interés para el sector agropecuario en análisis mensual ya que permite establecer los programas de siembra y cosecha. Es muy importante difundir los resultados de manera oportuna y clara, orientada a los diferentes niveles, desde operativo como los campesinos, ganaderos, empresarios, hasta tomadores de decisiones como lo son las autoridades gubernamentales y de la iniciativa privada.

3.4. Seguimiento de sequías

Las observaciones son llevadas a cabo por instrumentos en tierra en el sitio de interés, ya sea por medio de estaciones hidrométricas en el caso de caudales y por estaciones meteorológicas en el caso de alturas de precipitación, temperaturas y otras variables, otros instrumentos muy útiles en la actualidad son los radares y satélites, cabe resaltar que el seguimiento de una sequía se realiza una vez que ya se haya identificado el fenómeno, es decir, cuando los registros de déficit de humedad y de lluvia hayan sido capaces de causar daños a las actividades humanas.

El seguimiento sirve para identificar y vigilar las características propias de la sequía tales como son la extensión, duración, intensidad y por supuesto que indican el momento en el cual la sequía ha terminado y cuando las condiciones normales comiencen a recuperarse.

En la actualidad, el uso de radares y satélites se ha extendido, pero depende de su disponibilidad y de los recursos que los gobiernos y sus tomadores de decisiones apliquen para contar con sistemas de radares y de imágenes de satélites tanto en las zonas que son mas afectadas históricamente como en el resto del territorio nacional. La realidad en México es que se cuenta con una red de radares que cubre solo unas cuantas cuencas, además la mayor parte de ellas no han sido instrumentadas, es decir no existen estaciones hidrométricas y meteorológicas suficientes. En el municipio de Ixmiquilpan

solamente se cuenta con datos de precipitación proporcionados en tierras por las estaciones meteorológicas.

3.5. Mitigación y planeación para la sequía

Los efectos negativos en la población se pueden mitigar si se cuenta con una infraestructura suficiente y un alto nivel de tecnología. Lo anterior se consigue:

- Destinando mayor recursos económicos al campo
- Mejorando la infraestructura
- Fondo de prevención
- Racionalización y tratamiento del agua
- Mejorando la eficiencia y las técnicas de cultivo en los distritos de riego
- Uso de semillas mejoradas, resistentes a condiciones adversas
- Evitar el sobrepastoreo y la deforestación
- Evitar el sobrerriego y mejorar los sistemas de drenaje para evitar la salinización

Se tiende a afrontar las sequías cuando se sienten los efectos, sin embargo, es posible mitigar sus efectos conociendo su distribución temporal y espacial. Por medio de diversos puntos de vista se logran resultados mejores.

Científico. Establece teorías, desarrolla métodos para predecir el fenómeno, y establecer sistemas de alerta temprana, generalmente son los especialistas que trabajan en instituciones gubernamentales o privadas.

Tomador de decisiones. Responsable de un sistema hidráulico, da soluciones inmediatas y viables, son los gobiernos y autoridades que cuentan además con recursos económicos.

Usuario. Se preocupa por quedarse sin agua y sus repercusiones. Son los campesinos y agricultores, los ganaderos, los piscicultores y silvicultores, los

empresarios y comerciantes que tienen como recurso primario el agua, y la sociedad en general.

Para lo anterior se establecen planes hidráulicos regionales los cuales designan el agua de cada cuenca a los distintos tipos de usos, estos planes toman en cuenta la disponibilidad y demanda de agua, que dependen de valores medios y de valores en déficit, y de tendencias productivas pero no consideran condiciones hidrológicas extremas como la sequía. El plan debe prever la posibilidad de escasez de agua, se pronostica la sequía o se detecta temporalmente, luego se establece el periodo de conservación de agua a lo largo de la duración probable de la sequía.

Con el uso racional del agua se previene efectivamente una sequía además se debe considerar la recarga de acuíferos, conservación de la calidad del agua, evitar la contaminación de ella, evitar fugas y desperdicios en redes de distribución, aplicar tarifas justas y autosuficientes, establecer sanciones por desperdicio de agua, disminuir o prohibir el uso no esencial del agua.

Diversos estudios en todo el mundo han presentado un conjunto de pasos que forman un plan para enfrentar la sequía. Este plan es el resultado de una investigación patrocinada por la National Science Foundation (Don Wilhite, 1990). Este plan se ha modificado y actualizado según las necesidades y en este caso se presenta ante un escenario municipal y estatal.

Integrar una comisión para la sequía.

Definir el propósito y los objetivos del plan para la sequía.

Participación de los usuarios y resolver los conflictos entre ellos.

Inventariar los recursos disponibles e identificar los grupos en riesgo.

Desarrollar una estructura organizacional y preparar un plan ante la sequía.

Integrar los aspectos científicos y planes de acción.

Difundir el plan propuesto y cooperar para la retroalimentación.

Implantar el plan.

Desarrollo de programas de educación.

Evaluación posterior al periodo de sequía.

4 Análisis de sequías

El estudio que se realiza en este trabajo es un análisis puntual, en particular se analiza el municipio de Ixmiquilpan en el estado de Hidalgo. Por medio de este estudio se establecen algunas normas de planeación y en particular, permiten elaborar los procedimientos de prevención de sequías para el sector agrícola.

Para elaborar el análisis municipal de las sequías se requiere de datos de escurrimiento y altura de precipitación, posteriormente se utilizan diversos estadísticos muestrales como son la media, desviación estándar, varianza, entre otros, los cuales describen a la muestra.

Se divide el *análisis en meteorológico* y en *análisis hidrológico*, para ambos el primer procedimiento consiste en obtener la *caracterización de sequías*, posteriormente el *análisis de frecuencias de eventos extremos* y por último la *generación de muestras sintéticas* por medio de modelos estocásticos.

4.1 Caracterización de sequías municipales

La caracterización de una sequía consiste en proporcionar la duración, magnitud, periodicidad e intensidad de cada periodo de sequía, así como los valores máximos y promedio de la sequía en el sitio de estudio.

La *duración* representa el conjunto de meses o años que la sequía está presente en el lugar y afecta las actividades humanas, de la misma duración se puede obtener el *tiempo de inicio* y el *tiempo de finalización* del fenómeno, es decir, cuando las condiciones normales son recuperadas. Generalmente se toma un valor medio o umbral a partir del cual se considera el déficit y según el estudio económico, si este o el conjunto de déficits afectaron el sistema productivo y por lo tanto el social, entonces es cuando se determina que ha

iniciado la sequía. Lo mismo sucede cuando las lluvias inician y comienzan a recuperarse las condiciones normales, así solamente se considera que la sequía ha terminado.

Toda sequía tiene una *magnitud*, que es la medida principal de su severidad, generalmente se toma la altura de precipitación mínima en milímetros o el caudal en sequía medido en volumen o en gasto mínimos. Otra característica es la *intensidad* de la sequía que se calcula con el cociente de la magnitud entre la duración. Finalmente en este estudio se considera la *periodicidad* que mide desde el inicio de una sequía hasta el inicio de la siguiente y toma en cuenta el periodo de tiempo en el cual no existe sequía, se mide también en meses o años. Una vez caracterizada la sequía en el sitio de estudio se procede a hacer el análisis de frecuencias y la generación de muestras sintéticas.

4.2 Análisis de frecuencias de eventos extremos

El objetivo principal de este análisis de frecuencias es obtener la probabilidad de que ocurra un cierto valor mínimo tanto de escurrimiento o de altura de precipitación e indica si es menor o igual a otro valor fijo o evento de diseño en un determinado número de años. Para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia y del periodo de retorno se sigue la secuencia siguiente:

- A. Para el análisis meteorológico se utilizan datos de altura de precipitación, las cuales se ordenan en orden ascendente, y se aplican las funciones de probabilidad para mínimos; el periodo de retorno y la probabilidad de ocurrencia se obtienen de la siguiente manera:

$$Tr = \frac{n+1}{m}$$

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

- B. Para el análisis hidrológico se usan datos de gastos o volúmenes acumulados en déficit, la duración y el tiempo de ocurrencia calculados; estos se anotan en orden descendente, y se aplican las funciones de probabilidad para máximos; se obtiene el periodo de retorno y la probabilidad de ocurrencia de la siguiente manera:

$$Tr = \frac{n+1}{m}$$

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

Tr es el periodo de retorno

P es la probabilidad de ocurrencia

n es el número de datos en el registro de la estación

m es el orden o lugar que le corresponde a cada dato

Suele ocurrir que la muestra presente datos muy dispersos, entonces se hace uso de pruebas estadísticas llamadas de independencia y de homogeneidad que garantizan que la muestra contiene datos de una sola población y que correspondan uno con el otro, es decir, que no haya datos fuera de lo normal.

Pruebas de homogeneidad

Cuando el hombre interviene en la naturaleza con acciones depredadoras como son la tala inmoderada para apertura de nuevas áreas de cultivo, explotación de la madera, cuando rectifica los cauces de los ríos, por la construcción de embalses, entre otros, y también cuando la naturaleza produce eventos extremos como incendios forestales, terremotos, erupciones volcánicas y deslizamiento de taludes; provoca que al hacer mediciones de variables en dichas áreas afectadas, exista falta de homogeneidad en los datos que fue inducida por dichas acciones, esto se ve reflejado en los estadísticos muestrales cuando existen tendencias hacia alguno de ellos u ocurren saltos

repentinos. Para detectar estas anomalías se desarrollaron las siguientes pruebas:

A. Prueba estadística de Helmer

Se analiza el signo de las desviaciones de cada evento Q de la serie j para $i = 1, 2, 3, n$ con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S , de lo contrario se considera como un cambio C .

La serie se considera homogénea si se cumple

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1}$$

B. Prueba estadística t de Student

La pérdida de homogeneidad de la serie puede ser resultado del cambio abrupto en la media. La serie se subdivide en dos conjuntos de tamaño:

$n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$, entonces el estadístico de la prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}}$$

$\bar{x}_1, \bar{x}_2, S_1^2, S_2^2$ son las medias y varianzas correspondientes a cada parte del registro.

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas y con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$

Si y solo si el valor absoluto de t_d es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie de gastos Q se considera no homogénea.

Prueba de independencia de eventos

Esta prueba sirve para determinar si la muestra se compone de variables aleatorias y se aplica la prueba de Anderson, para lo cual se hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tipos de retraso k .

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2}; \text{ para } r_0^j = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, n/3$$

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}$$

además los límites al 95% de confianza para r_k^j se puede obtener como

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k}$$

se genera la gráfica de los valores estimados para r_k^j (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondiente límites de confianza y se forma el correlograma de la muestra.

Si solo el 10% de los valores r_k^j sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie de gastos Q es independiente y por lo tanto sigue las leyes de la probabilidad.

Posteriormente, la muestra se debe ajustar a diferentes *funciones de probabilidad*, en este trabajo se hacen uso tanto para valores máximos como para mínimos.

- ❖ Distribución Normal
- ❖ Distribución Log Normal de dos parámetros
- ❖ Distribución Log Normal de tres parámetros
- ❖ Distribución Gamma con tres parámetros
- ❖ Distribución de valores extremos tipo Gumbel

Al ajustar la muestra a las diferentes funciones de probabilidad, se elige la que proporcione el menor error y esto se determina mediante una prueba de bondad de ajuste o de estimación de error, la cual tiene la siguiente forma.

$$EE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\bar{Q}_T^j - Q_T^j)^2}{n_j - mp} \right]^{1/2}$$

\bar{Q}_T^j son los eventos ordenados de mayor a menor para máximos y de menor a mayor para mínimos para un periodo de retomo asignado $T = \frac{n+1}{m}$ y una probabilidad de no excedencia $P = 1 - \frac{1}{T}$ para máximos y $P = \frac{1}{T}$ para mínimos

n longitud en años del registro analizado

m número de orden del registro

$m = 1$ para el evento más grande

$m = n$ para el evento más chico

mp número de parámetros de la distribución ajustada.

lo anterior dependiendo si es un análisis para máximos o para mínimos.

La distribución que mejor se ajuste es la que proporcione el mínimo valor del estadístico *EE* y si tienen valores similares, entonces, se deberá optar por aquella distribución que tenga el menor número de parámetros.

Las diferentes funciones de probabilidad y los estadísticos muestrales se desarrollan en el anexo.

4.3 Generación sintética de valores por medio de modelos estocásticos

Este procedimiento genera muestras sintéticas con la finalidad de determinar la ocurrencia de sequías tanto hidrológicas como meteorológicas anuales y mensuales a largo plazo. Las técnicas utilizadas deben de preservar las características estadísticas de la muestra original.

Al generar las muestras sintéticas, se pueden obtener las características de sequías con diferentes duraciones, ya que la muestra es ampliada, así como también se pueden obtener probabilidades condicionales de pasar de un periodo húmedo a uno seco, esto facilita la planeación sobre todo en el sector agropecuario. El principio para generar esta nuevas muestra se basa en el concepto de serie de tiempo.

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones, realizadas de forma secuencial, normalmente a intervalos iguales (Escalante, 2002). Pueden ser anuales o periódicas (mensuales, semanales, diarias u horarias).

En este caso se observan las series de tiempo meteorológicas e hidrológicas con datos de precipitación y escurrimiento anual o mensual en una estación de medición (univariada), en otros casos se hace uso de datos en varias estaciones de medición (multivariadas). Estas series se describen por medio de sus estadísticos muestrales como son la media, desviación estándar, coeficiente de asimetría, coeficiente de curtosis, distribución de probabilidad y de la estructura de dependencia en el tiempo (Salas et al, 1988).

La mayoría de las técnicas para la modelación de las series de tiempo requieren que los datos tengan una distribución normal. Para lograr lo anterior, la serie registrada se transforma en otra, es decir, se normaliza, posteriormente esta nueva serie de tiempo se debe estandarizar.

Normalización de la serie de tiempo:

$$y_t = \ln x_t$$

Estandarización de la serie de tiempo:

$$z_t = \frac{y_t - \bar{y}}{S_y}$$

x_t es valor original de la serie de tiempo

y_t es el valor normalizado de la serie de tiempo

\bar{y} es la media del conjunto de datos de la serie de tiempo

S_y es la varianza insesgada del conjunto de datos de la serie de tiempo.

Una vez obtenida la nueva serie de tiempo normalizada y estandarizada se procede a aplicar los modelos estocásticos. En este trabajo se utilizan los modelos auto regresivos $AR(p)$ para series anuales y $PAR(1)$ para series mensuales, las cuales se describen a continuación:

1. Modelo auto regresivo anual $AR(1)$

El modelo tiene la siguiente forma:

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_t = \sigma_\varepsilon \xi_t$$

$\phi_1 = r_1$ es el coeficiente autoregresivo que se calcula de la forma:

$$r_k = \frac{Ck}{Co} = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (z_t - \bar{z})(z_{t+k} - \bar{z})}{\sum_{t=1}^n (z_t - \bar{z})^2}$$

σ_ε^2 es la varianza de los residuales que se calcula como:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{n}{(n-1)} \sigma_y^2 (1 - \phi_1^2)$$

σ_y^2 es la varianza de la serie de tiempo normalizada

además se debe cumplir con la condición de estacionareidad

$$-1 < \phi_1 < 1$$

ξ_t es un valor con origen en números aleatorios que se obtiene como:

$$\xi_1 = \left[2 \ln \left(\frac{1}{U_1} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi U_2)$$

$$\xi_2 = \left[2 \ln \left(\frac{1}{U_1} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \text{sen}(2\pi U_2)$$

U_1, U_2 } son números aleatorios con distribución uniforme en el intervalo de 0 a -1

2. Modelo autoregresivo anual AR(2)

El modelo tiene la forma:

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_t = \sigma_\varepsilon \xi_t$$

los parámetros autoregresivos se calculan de la siguiente forma:

$$\phi_1 = \frac{r_1(1-r_2)}{1-r_1^2}$$

$$\phi_2 = \frac{r_2 - r_1^2}{1-r_1^2}$$

la condición de estacionariedad que se debe cumplir es la siguiente:

$$\phi_1 + \phi_2 < 1$$

$$\phi_2 - \phi_1 < 1$$

$$-1 < \phi_2 < 1$$

la serie de residuales se obtiene para $t = 3, 4, \dots, n$ considerando lo siguiente:

$$\varepsilon_1 = 0$$

$$\varepsilon_2 = 0$$

$$\varepsilon_t = z_t - \phi_1 z_{t-1} - \phi_2 z_{t-2}$$

la varianza insesgada de los residuales se obtiene por la expresión:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{n}{(n-2)} \sigma^2 \frac{(1+\theta_2)}{(1-\theta_2)} \left[(1-\phi_2)^2 - \theta_1^2 \right]$$

3. Modelo autoregresivo periódico PAR(1)

La forma del modelo es:

$$Z_{v,\tau} = \phi_{1,\tau} Z_{v,\tau-1} + \varepsilon_{v,\tau}$$

$$\varepsilon_{v,\tau} = \sigma_{\varepsilon\tau} \xi_{v,\tau}$$

los parámetros autoregresivos se calculan como:

$$\phi_{1,\tau} = r_{1,\tau} \quad \text{para} \quad \tau = 1, 2, \dots, \omega$$

se debe cumplir que:

$$-1 < \phi_{1,\tau} < 1$$

la serie de residuales se obtiene a partir de la expresión:

$$\varepsilon_{v,\tau} = Z_{v,\tau} - \phi_{1,\tau} Z_{v,\tau-1}$$

la varianza de los residuales se obtiene a partir de la expresión:

$$\sigma_{\varepsilon\tau}^2 = 1 - \phi_{1,\tau}^2$$

Para el caso de las series anuales, se debe elegir el que proporcione el mejor ajuste y para ello se hace uso del criterio de información de Akaike. Por medio de este, se determina el mejor modelo que describe el comportamiento de la serie de tiempo.

$$CIA(p) = n \ln(\sigma \varepsilon^2) + 2p$$

p es el número de parámetros del modelo

$\sigma \varepsilon^2$ es la varianza de residuales

la mejor opción es la que proporcione el mínimo error del valor CIA

Se deben generar las suficientes muestras, tales que sus estadísticos sean lo mas cercanos a la muestra original, para esto se generan una cantidad suficiente para que se uniformicen los valores aleatorios. La generación de muestras sintéticas es para datos tanto de precipitación media anual como para gastos medios mensuales. Se deben generar muestras con diferentes modelos y compararlos para escoger los mas cercanos a la original.

4.4. Análisis de sequías meteorológicas

Por medio de este análisis es posible determinar el comportamiento histórico del déficit de lluvia para cada sitio analizado, y no necesariamente considera la parte hidrológica, o su ocurrencia dentro del sitio, es decir, después de que la lluvia cae puede distribuirse a lo largo del terreno en forma de escurrimiento, o se puede infiltrar, evaporar o depositar, entonces solamente considera el potencial del volumen de agua que el municipio puede captar para su aprovechamiento y que se considera para el caso de los cultivos de temporal.

En primer lugar, de la serie de datos o muestra de precipitación, se calcula el valor medio y el umbral que en este caso es 5% mayor al valor medio, debido a que en ocasiones al finalizar un periodo con déficit, se tiene una lámina de lluvia que es igual a la media o mayor, pero no significa que realmente el periodo de sequía haya concluido, sino solamente una interrupción temporal.

$$hp_{m2} = 1.05 * hp_{m1}$$

hp_{m1} es el valor medio de los datos de precipitación anual

hp_{m2} es el umbral

A partir de este valor se determinan los valores con déficit y superávit, posteriormente se registran los años acumulados con déficit. Se hace la caracterización de la sequías, es decir, a cada periodo de déficit se determina su duración, periodicidad que se contabiliza a partir del primer periodo con déficit hasta el nuevo siguiente, luego se contabiliza el déficit acumulado de altura de precipitación y por último la intensidad que es el resultado del cociente del déficit acumulado y su duración.

Cálculo de los componentes que integran la caracterización de la sequía meteorológica.

1. *Déficit o superávit.* Este valor D o S resulta de la diferencia entre el dato hp_i y el umbral hp_{m2} y es expresado en valores positivos o negativos de altura de precipitación.

$$DoS = hp_i - hp_{m2}$$

D o S es el déficit o superávit registrado

hp_i es el valor de altura de precipitación del año i

hp_{m2} es el umbral

2. *Duración D(v).* Se anota solamente la duración de los años consecutivos con déficit y este representa un periodo de sequía, el cual termina hasta que se presente un año con superávit. El periodo de sequía puede durar solamente un año.
3. *Periodicidad P(v).* Este valor se calcula al contar los años que transcurren desde el primer año de un periodo con déficit hasta el siguiente periodo de años también con déficit. En el caso que el periodo dure un año, se cuenta hasta que se presente otro periodo igual o mayor en duración.

4. *Magnitud $M(v)$* . Resulta de la suma de los valores negativos, es decir de los déficits de cada periodo de sequía. Representa una lámina negativa que se encuentra por debajo del umbral o la cantidad de agua que hace falta para completar este valor, se expresa en milímetros.

$$M(v) = \sum D_i$$

5. *Intensidad $I(v)$* . Se calcula con el cociente de la magnitud de cada periodo de sequía entre su duración.

$$I(v) = \frac{M(v)}{D(v)}$$

Con los resultados anteriores se hace un registro general y un condensado en el cual se adiciona el valor de la intensidad, además se calcula el valor medio de cada característica. Del registro anterior se obtienen los valores máximos, es decir, los más adversos que representan la máxima duración, magnitud e intensidad de los periodos de sequía con la finalidad de compararlos con la media.

Posteriormente se obtiene la lámina disponible en déficit que se obtiene mediante el residuo del valor medio de la muestra original y el valor medio de la intensidad del déficit.

$$lam = hp_{m1} - Im$$

lam es la lámina disponible en déficit

hp_{m1} es el valor medio de los datos de precipitación anual

Im es la media de la intensidad de los periodos de sequía

A continuación, se calculan los *deciles* de la lluvia los cuales representan la escala a partir de la cual se determina si las láminas presentes son normales o se encuentran por debajo o arriba de ese valor, así para nuestro caso, interesa

el primer decil que es el que se encuentra muy por debajo de lo normal; el cual se debe comparar los datos del registro original, para observar las láminas de lluvia que representan las sequías más adversas que tienen probabilidad de ocurrir en el municipio.

Este índice para identificación de sequía fue desarrollado por los investigadores Gibas y Maher en el año de 1967. Los diez valores se obtienen ordenando la muestra de menor a mayor magnitud, el valor más grande se le asigna la variable $hp(n)$ y al más pequeño $hp(1)$, en donde n es el tamaño total del registro. Cada decil se obtiene así:

$$decil(1) = hp(1) + constante$$

$$decil(i) = decil(i - 1) + constante$$

$$constante = \frac{hp(n) - hp(1)}{10}$$

El siguiente procedimiento es el *análisis de frecuencias de eventos extremos*, el cual se debe aplicar para valores mínimos. La secuencia de cálculo se describió en el apartado anterior. Una vez elegida la función de probabilidad que proporcione el mínimo error, se hace el ajuste de la muestra original para calcular nuevos valores de altura de precipitación.

Lo anterior se realiza con la expresión de estimación de eventos correspondiente a cada función de probabilidad, es decir, se calculan ciertos parámetros en donde intervienen los estadísticos muestrales como la media y la varianza para que en la nueva expresión de estimación quede únicamente de una variable la cual es el periodo de retorno calculado de la serie ordenada. Sucesivamente se van calculando todos los valores nuevos de la serie calculada.

En seguida con los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años y su correspondiente probabilidad de ocurrencia, se calculan los eventos de diseño

de la misma manera que los eventos de la serie anterior, es decir, por medio de la expresión de eventos en función de una sola variable.

Se comparan las láminas estimadas por medio del modelo elegido con las láminas del registro original y se anota la lámina más desfavorable y posible de ocurrir en el sitio con su periodo de retorno correspondiente.

Posteriormente se generan *muestras sintéticas por medio de modelos estocásticos* con la finalidad de pronosticar eventos a futuro, es decir, se calculan eventos de sequía a largo plazo. Para el caso del análisis meteorológico se hace uso de los modelos $AR(1)$ y $AR(2)$. En ambos casos se calculan los coeficientes autoregresivos que forman el correlograma y que son indispensables para calcular los parámetros autoregresivos que forman el modelo estocástico correspondiente. A través del criterio de Aikake se determina cual de los dos modelos es el más adecuado para generar los nuevos valores.

La nueva serie sintética consta del mismo número de valores que la muestra original y para garantizar que se conserven los estadísticos iniciales se generan cerca de 10, 000 muestras. El siguiente procedimiento es obtener la caracterización de la serie sintética como en el caso de la serie original, por medio de este proceso es posible determinar la probabilidad condicional de que cuando exista un periodo húmedo ocurra un periodo seco, esto se determina con la simple observación y cuantificación de todos y cada uno de los periodos de sequía.

Por último, a través de los datos de lluvia mensuales, se determina mes a mes que porcentaje medio de lluvia le corresponde del total anual y con ese porcentaje se calculan las láminas mensuales en déficit para que la suma de la lámina anual disponible en déficit.

4.5. Análisis de sequías hidrológicas

Este análisis toma en cuenta la parte de la lluvia que escurre hacia los cauces de corrientes superficiales, que es el volumen factible de extraer para abastecer de agua potable a la población, la demanda de riego y para almacenamiento. Es muy importante cuantificar este volumen con el que cae a la superficie para así obtener el volumen que se ha depositado, evaporado e infiltrado.

Este análisis parte con el cálculo del nivel de truncamiento o umbral que en este estudio se considera el 85% de la media. Representa el volumen mínimo y a partir del cual todos los que lo igualen o sean menores que él, generan una sequía hidrológica; este valor es similar al primer decil en el caso del análisis de sequías meteorológicas.

$$Q_r(85\%) = 0.15 * Q_i$$

El déficit o superávit resulta de la diferencia entre el valor Q_i y el umbral $Q_r(85\%)$ que es expresado en valores positivos o negativos de gasto diario.

A este registro de gastos diarios se le convierte en un registro de volumen de escurrimiento, para este caso se considera un flujo constante durante todo el día lo que implica que las 24 horas del día fluye la misma cantidad de agua.

$$V = \frac{Q_i * (365 * 24 * 60 * 60)}{1 \times 10^6}$$

Una vez que se cuenta con el registro de los volúmenes con déficit y superávit, se hace la *caracterización de la sequía*, en donde en primer lugar se anota año por año los eventos que presentaron déficit, se calcula el volumen acumulado, el día de inicio y final de cada periodo, el tiempo de ocurrencia o día medio en que representa un día en el año entre el día que inicia y el día que finaliza el déficit. El cálculo de estos componentes se describe a continuación:

1. *Déficit*. Este valor $D(v)$ o severidad expresado en volumen es el área comprendida entre el hidrograma y el nivel Q_r .

$$D(v) = Q_r [\tau_\rho(v) - \tau_\beta(v)] - \int_{\tau_\beta(v)}^{\tau_\rho(v)} Q_t$$

$D(v)$ es el v -ésimo déficit registrado

Q_t son los gastos medios diarios

Q_r es el nivel de truncamiento

$\tau_\beta(v)$ es el tiempo de inicio del déficit

$\tau_\rho(v)$ es el tiempo final del déficit

2. *Duración*. La duración $T(v)$ del déficit es el número de días, meses o años consecutivos para los cuales el gasto Q_t es menor que el gasto Q_r

$$T(v) = \tau_\rho(v) - \tau_\beta(v)$$

3. *Tiempo de inicio del déficit*. $\tau_\beta(v)$

Se determina por el momento en que $Q_t < Q_r$ y es medido en días

4. *Tiempo final del déficit*. $\tau_\rho(v)$

Se determina por el momento en que $Q_t > Q_r$, también se mide en días

5. *Tiempo de ocurrencia*. $\tau(v)$

$$\tau(v) = \frac{1}{2} [\tau_\rho(v) + \tau_\beta(v)]$$

Posteriormente se procede a realizar el *análisis de frecuencias de eventos extremos* como en el caso del análisis meteorológico. Ya que se hayan cumplido las pruebas, se modela el registro de magnitud, duración y tiempo de ocurrencia con las diferentes distribuciones de probabilidad y se elige la que proporcione el mínimo error. En este caso, se hace un análisis de frecuencias para distribuciones de probabilidad para máximos, ya que los datos representan precisamente valores máximos de magnitud o volumen acumulado en déficit, máxima duración del periodo de déficit y del tiempo de ocurrencia. El procedimiento para realizar las pruebas y hacer el ajuste se describe en el apartado 4.2.

Con la función de probabilidad elegida, se hace la estimación de eventos como en el caso del análisis meteorológico para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años con su respectiva probabilidad de ocurrencia para la magnitud del déficit, duración y tiempo de ocurrencia. Con los resultados obtenidos se compara el valor obtenido para el periodo de retorno que mas se aproxime al más probable del registro original. El siguiente valor con su correspondiente periodo de retorno es el máximo valor que puede ocurrir en el lugar en un mediano plazo.

El siguiente cálculo de este análisis es la *caracterización mensual de la sequía*. En este estudio se emplea el método del investigador llamado Mohan que lo desarrollo el año de 1991. Esta técnica de identificación de las características de la sequía lo desarrollo para determinar la ocurrencia de la sequía mes tras mes. El procedimiento que se lleva a cabo se describe a continuación:

1. Se calcula el valor de la media y del coeficiente de variación, mes a mes de la serie analizada.
2. Se determina el factor de peso para el mes t:

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

$W(t)$ es el factor de peso para cada mes t

$T(t)$ es el umbral mensual

3. Si el coeficiente de variación es mayor al 25% el valor del umbral se calcula como:

$$T(\tau) = \bar{V}(\tau) - \frac{\sigma_{\tau}^2}{\bar{V}(\tau)}$$

$\bar{V}(t)$ es el volumen de escurrimiento mensual para el mes t

σ_{τ} es la desviación estándar del escurrimiento para el mes t

4. Se obtiene la nueva serie periódica, llamada efectiva

$$S_{\mu,\tau} = E_{\mu,\tau-1} - T(\tau-1)$$

$$E_{\mu,\tau} = V_{\mu,\tau} + S_{\mu,\tau} W(\tau)$$

5. Se obtiene la serie periódica de diferencias negativas o déficits y positivas o superávits.

$$D_{\mu,\tau} = E_{\mu,\tau} - T(\tau)$$

6. Se calcula el déficit medio mensual DMM considerando a los superávits como cero y el déficit medio anual DMA .

$$DMM = \frac{\sum_{\tau=1}^{12} D_{\mu,\tau}}{NA}$$

$$DMA = \sum_{\tau=1}^{12} DMM$$

NA es el número de años en el registro.

7. Para determinar el inicio de un periodo de sequía se obtienen la escala de doce valores:

$$x = \frac{DMA - MMM}{11}$$

MMM es el valor máximo de las lluvias medias anuales $T(t)$

El primer valor de la escala es MMM y los siguientes se calculan como $MMM+nx$, para $n=1$ hasta 11.

8. Intensidad y severidad de la sequía medida

$$Y = \frac{\sum \text{Déficitreal}}{\sum DMM}$$

$$YD = \frac{\sum \text{Déficitreal}}{\sum DMM} \text{Duración}$$

Una vez obtenidos los umbrales, se realiza una prueba secuencial en la cual se determina para cada año, el mes de inicio y termino, la duración, la magnitud de los periodos de déficit y la periodicidad con la que se presentan. Las diferencias se calculan mes a mes hasta encontrar una diferencia negativa y es en ese mes en 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, si son iguales se considera que la sequía potencial ha iniciado. Si el primer valor de la escala 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, si este valor es excedido por el valor absoluto de los dos déficit combinados se considera que la sequía esta presentándose desde el primer mes. Se debe analizar en secuencia las diferencias mes por mes y compararse con los doce valores de la

escala. 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 indicar el final de la sequía es cuando dos meses consecutivos presentan diferencias positivas.

Al concluir con el proceso de identificación se determina el número total de periodos de sequía en el periodo analizado, el mes de inicio y final de cada sequía, la duración en meses de la sequía, la suma total de las diferencias negativas que ocurren durante la sequía que representa la magnitud potencial, la suma de los déficit considerando las diferencias positivas que es la magnitud real de la sequía, la intensidad de la sequía y la severidad que se calculan por medio de las expresiones mostradas en el anexo. También se deben de calcular los valores medios de cada resultado y se deben de comparar con las estimaciones obtenidas por medio del análisis de frecuencia anual.

Por último, el siguiente proceso es la *generación sintética de valores por medio de modelos estocásticos*, en este caso para datos de un registro mensual se utilizó el modelo autoregresivo periódico PAR(p) que se describe en el apartado 4.3. Es necesario calcular los coeficientes que forman el correlograma, con los cuales se calculan los parámetros autoregresivos que forman el modelo estocástico.

Como cualquier modelo estocástico, se deben generar un número aproximado de 10, 000 muestras con la finalidad de garantizar la conservación los estadísticos iniciales. Con esta nueva muestra ampliada, se hace una caracterización de la sequía media mensual por el método de Mohan, es decir, se obtienen eventos de sequía a largo plazo y sus características como son su duración, probabilidad de ocurrencia e intensidad; así como las probabilidades de que inicie un periodo seco en determinado mes del año. También es necesario comparar estos resultados generados sintéticamente con la muestra histórica original.

Es muy importante mencionar que esta técnica es un procedimiento que sirve para obtener valores, pero es necesario realizar un análisis cualitativo y proporcionar información completa, descriptiva y real para posteriormente llevar a cabo la planeación adecuada.

4.6. Análisis económico

Se hace un análisis que compara la producción de los cultivos de maíz y alfalfa al existir condiciones de escasez de agua.

La primera comparación resulta al relacionar los deciles de lluvia calculados con la superficie sembrada y se relaciona con la superficie cosechada. La relación anterior sirve para determinar el índice de eficiencia de los cultivos que se determina de la siguiente manera:

$$IE = \frac{\text{superficie cosechada}}{\text{superficie sembrada}}$$

Al comparar las producciones anuales de cada cultivo con las precipitaciones ocurridas; se determina si en los años con baja producción y por lo tanto pérdidas económicas, corresponden con periodos de sequía. Es muy importante este segundo análisis ya que así se podrá determinar si realmente la sequía impacta considerablemente la economía local y cuales fueron las medidas tomadas en esos años de escasez.

Para cada cultivo se tiene una cierta producción en peso y las ganancias obtenidas en miles de pesos; cuando se considera la superficie cosechada representa el beneficio obtenido o real; si se compara la producción que se obtendría con la superficie sembrada, entonces se tiene el beneficio esperado, es decir, es el beneficio potencial. Al hacer la diferencia entre las ganancias esperadas y las ganancias obtenidas se calculan las pérdidas económicas; los resultados se representan en una tabla para cada cultivo y este análisis se realiza para las lluvias más representativas.

Finalmente se determina cual sería el volumen de agua que se debe extraer de la corriente para regar las superficies sembradas de maíz y alfalfa. Esto es un caso hipotético, ya que se sabe que la calidad de agua actual de la corriente principal no permite la extracción para satisfacer cualquier demanda. Este cálculo toma en cuenta la cantidad de agua que requieren los cultivos para su desarrollo, es decir, el uso consuntivo, además de las pérdidas por evaporación e infiltración y las ganancias por precipitación. Los datos utilizados son los que se obtuvieron en el análisis meteorológico e hidrológico.

En primer lugar, es necesario calcular el valor del volumen de infiltración para lo cual se utiliza un método empírico que determina los coeficientes de infiltración y de escurrimiento.

Solamente una parte de la lluvia total es la que genera el volumen de escurrimiento directo y se calcula de la siguiente manera:

$$hpe = \frac{Ved}{Ac}$$

hpe es la lluvia efectiva

Ved es el volumen de escurrimiento directo

Ac es el área de la cuenca

El volumen de escurrimiento directo se obtiene a partir del hidrograma en donde se separa el gasto base del directo por el método más simple que es trazar una línea horizontal a partir del punto de levantamiento hasta el final del escurrimiento directo.

Una vez calculada la lluvia efectiva, se procede al cálculo del coeficiente de infiltración media ϕ por medio de aproximaciones sucesivas. Es decir, se parte de un valor inicial del coeficiente que divide al hietograma en dos, se suman todas las alturas superiores que son las diferencias de cada $hp - \phi$, si la suma coincide con la hpe entonces ese valor es el coeficiente buscado.

Posteriormente se calcula el coeficiente de escurrimiento a partir de la altura total de lluvia que en este caso es la media anual. Con esta precipitación media se multiplica por el área de la cuenca y se tiene el volumen llovido, por lo tanto:

$$C_e = \frac{V_{ed}}{VII}$$

VII es el volumen llovido

Ce es el coeficiente de escurrimiento

El volumen de infiltración potencial en la cuenca resulta del producto del coeficiente de infiltración por el área de la cuenca.

$$V_i = \phi * A_c$$

También es importante calcular el volumen demandado para uso doméstico, para esto se requiere del consumo per cápita y la población del municipio.

$$V_{dom} = (demanda * población)$$

Una vez obtenidos los valores anteriores se puede calcular el volumen de extracción D_i de la siguiente manera:

a) *Método de Thomtwaite*

Calcula el uso consuntivo en función de las temperaturas máximas o medias mensuales mediante la expresión:

$$U_j = 1.6ka \left(\frac{10T_j}{I} \right)$$

U_j es el uso consuntivo en el mes j , en cm.

T_j es la temperatura media o máxima en el mes j , en °C

a, I son constantes

Ka es la constante que depende de la latitud y el mes en el año (Anexo)

La constante I representa el índice de eficiencia de temperatura y a se calcula de la siguiente manera:

$$ij = \left(\frac{Tj}{5} \right)^{1.514}$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} ij$$

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.492$$

Con los valores de las constantes a e I se obtiene el uso consuntivo con la primera expresión. El volumen bruto de evapotranspiración se calcula con el producto del uso consuntivo mensual por el área de riego para cada cultivo. Posteriormente se calcula el volumen neto con la diferencia del volumen bruto menos el de precipitación más el de evaporación en la conducción que se obtuvo con el producto de la altura de evaporación o precipitación por el área de riego. Los volúmenes mensuales de extracción resultan de la suma del volumen neto más los desperdicios por infiltración.

b) Método de Blaney-Criddle

Este método toma en cuenta las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración del ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona. En primer lugar se obtienen las horas de sol diarias que dependen de la latitud de la zona y el mes (Anexo), luego se calcula el factor de corrección Kti por ser una zona árida que se va a multiplicar al factor de temperatura y luminosidad f_i .

$$f_i = P_i \left(\frac{T_i + 17.8}{21.8} \right)$$

$$k_{ti} = 0.03114T_i + 0.2396$$

P_i porcentaje de horas de sol del mes i con respecto al año

T_i temperatura media o máxima del mes i

Posteriormente de tablas (Anexo) se obtienen los coeficientes de desarrollo mensual. Las evapotranspiraciones mensuales se calculan con la siguiente expresión:

$$E_{ti} = k_{cifi}$$

k_{ci} es el coeficiente de desarrollo parcial, Anexo.

Finalmente, las extracciones mensuales se calculan con la expresión siguiente:

$$D_i = E_{ti}A_r - h_{pi}A_r + h_{ev}A_{co} + W_i$$

A_r es el área de riego

A_{co} es el área de la corriente superficial

h_{pi} es la altura de precipitación media o máxima mensual

h_{ev} es la altura de evaporación

W_i es la pérdida en la conducción por infiltración

5 Aplicación

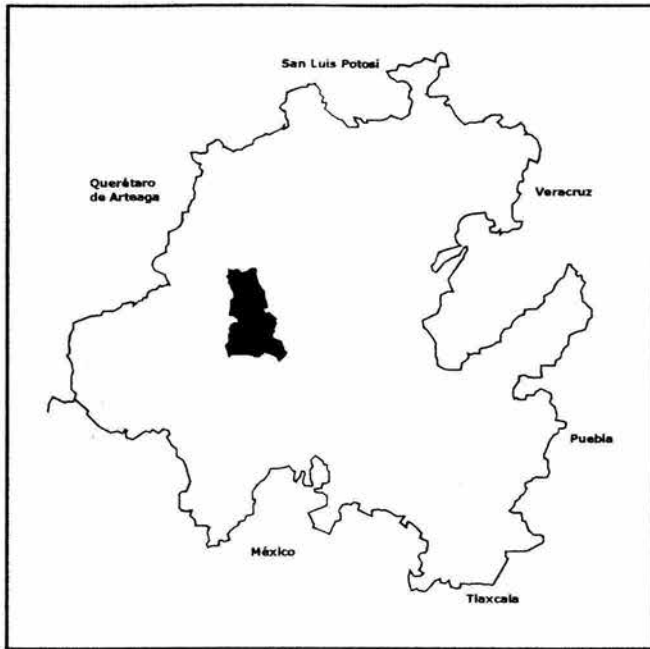
El municipio elegido para la caracterización de la sequía es el de Ixmiquilpan en el estado de Hidalgo, esta decisión se basa en la disponibilidad de información meteorológica en particular altura de precipitación, e información hidrométrica, es decir, gastos de la corriente principal; por la alta incidencia de sequías reportadas por los sectores productivos; por la ausencia de un plan preventivo, por su localización y cercanía que me permite hacer visitas al lugar para recabar información.

5.1. Ubicación y datos geográficos

El municipio de Ixmiquilpan se localiza en la región centro oeste del estado de Hidalgo, se ubica geográficamente al norte $20^{\circ} 43'$, al sur $20^{\circ} 23'$ de latitud norte y al este $99^{\circ} 05'$, $99^{\circ} 18'$ de longitud oeste, a una altitud de 1,700 msnm. Cuenta con una extensión territorial de 559.87 km² que representan el 2.69% estatal (20, 870 km²). Colinda al norte con los municipios de Nicolas Flores; al sur con Chilcuautla y San Salvador; al este con Cardonal y Santiago Anaya; y al oeste con Tasquillo, Zimapan y Alfajayucan. Ver las figuras de la página siguiente.

5.2. Situación socio-demográfica

En la actualidad el Municipio de Ixmiquilpan es el principal de la región que está compuesta por Alfajayucan, Chilcuautla y Cardonal. Ixmiquilpan es la cabecera municipal de 110 localidades o barrios, cada uno con un delegado que es el representante del presidente municipal, entre los barrios más importantes se encuentran Panales, El Tephe, Maguey Blanco, San Pablo Oxtotipan, San Francisco Sacachichilco y Orizabita. La población total del municipio según el censo del año 2000 es de 73,838 habitantes de los cuales 35,948 son hombres y



37,810 mujeres; la cabecera municipal cuenta con una población de 29,097 habitantes (40% del total). El 50% de las localidades tienen una población que fluctúa entre 100 y 500 habitantes. La población de Ixmiquilpan representa el 3.4% de la población total de Hidalgo (2,235,591), es el quinto municipio más poblado de Hidalgo solamente debajo de Pachuca, Tulancingo, Actopan y Tula. La tasa anual de crecimiento de población es de 1.71%. Su población fluctúa entre las edades de 16 y 35 años con un promedio de 19 años. Más del 90% de la población total nació dentro del estado de Hidalgo, además el 60% de la población es rural y el 40% vive en zonas urbanas, es decir dentro de la cabecera municipal.

5.3. Situación económica

La población económicamente activa (PEA) agrupa a 42,007 habitantes (34% de la población total), pero solamente se encuentran ocupados 25,237 de los cuales 9,350 laboran dentro de la cabecera municipal. Correspondiendo el 40% al sector primario, el 22% al sector secundario y el 38% al sector terciario. Sin embargo, la población urbana que habita en su totalidad en la cabecera municipal trabaja el 21% en el sector primario, el 21% al sector secundario y el restante 58% al sector terciario. El 65% de la población percibe menos de 2 salarios mínimos. Las principales actividades económicas son:

Sector Primario. 10, 100 personas en la agricultura y ganadería.

Sector Secundario. 5, 572 personas.

Sector Terciario. 9, 590.

En el sector primario, la agricultura es la actividad mas importante ya que genera la mayoría de empleos y los demás sectores pueden desarrollarse ya que proporcionan insumos como fertilizantes, alimentos, maquinaria, combustible, refacciones, instrumentos de labor, transporte, comercio y venta de las cosechas, etc. Los dos principales cultivos son el maíz y la alfalfa.

5.4. Características climáticas y fisiográficas

Dentro del municipio de Ixmiquilpan se encuentra una parte de la cadena montañosa de la sierra de Hidalgo que nace en Real del Monte y se dirige hacia al noroeste hacia Actopan para llegar a Ixmiquilpan. Se encuentran algunos relieves como la formación rocosa llamada Los Frailes.

Su clima es seco templado de llanura en el 23.67% del territorio y semiseco templado en el 51.33% del territorio. La estación meteorológica con clave 13-013 localizada a 20° 28'55" latitud norte, 99° 13' 15" longitud oeste y a 1,700 msnm, cuenta con un registro del año de 1951 a la fecha e indica que la temperatura media anual es de 17.7° C, registrándose el año más frío 16.2° C y el más caluroso con 27.0° C. La precipitación total anual registrada en la misma estación es de 386.03 mm, el año más seco registró 182.7 mm y el más lluvioso 704 mm.

El río Tula atraviesa el municipio de sur a noroeste para unirse a la corriente del río Moctezuma en los límites con el estado de Querétaro. El río Tula pertenece a la cuenca del río Pánuco RH26 que ocupa el 95.5% del territorio estatal, así mismo pertenece a la región del alto Pánuco a la subcuenca del río Moctezuma RH26D; a su vez esta se subdivide en otras subcuencas, la principal es la subcuenca del río Tula RH26Dj que ocupa el 55% del territorio del municipio, la subcuenca del río Actopan RH26Dr que ocupa el 29.4% del territorio. El municipio también cuenta con aguas termales como son las de Dios Padre, El Tephe y Humedades.

5.5. Análisis de sequía en el municipio de Ixmiquilpan

La problemática del déficit de agua en el municipio de Ixmiquilpan históricamente ha repercutido en la economía local ya que los pequeños productores agrícolas, que son la mayoría, han disminuido su producción dramáticamente. En los últimos años el uso de sistemas de riego se ha incrementado y las sociedades entre campesinos e inversionistas ha permitido mejorar la tecnología, como en el

caso de la siembra de la alfalfa. El volumen de agua disponible ya no es suficiente lo que ha llevado a la explotación sin medida de los mantos acuíferos con perforación de pozos de donde se abastece tanto a la población urbana como a los campesinos.

Este análisis se enfoca en la subcuenca del río Tula que abarca una superficie de 309.32 km², es decir, el 55.25% del territorio municipal, además es el sitio donde se extrae la mayoría del gasto demandado y donde escurre el volumen máximo de agua usado en el municipio. La importancia de esta subcuenca también radica en que la cabecera municipal esta asentada dentro de su área.

5.5.1. Análisis meteorológico

Para este propósito se hace uso de la información de lluvia disponible en la estación meteorológica Ixmiquilpan con clave 13-013 extraída de la base de datos ERIC producida por el IMTA. El registro anual de lámina de lluvia va de los años 1940 a 1982, es decir, 43 años, suficientes para el análisis.

Orden	Año	hp (mm)	Orden	Año	hp (mm)
1	1940	336.3	23	1962	336.6
2	1941	777.9	24	1963	310.9
3	1942	545.8	25	1964	317.2
4	1943	401.6	26	1965	291.9
5	1944	679.2	27	1966	403.1
6	1945	280.1	28	1967	376
7	1946	422.8	29	1968	519.1
8	1947	417.6	30	1969	336.6
9	1948	371.9	31	1970	273.5
10	1949	330.7	32	1971	284.2
11	1950	335.6	33	1972	276.4
12	1951	309.2	34	1973	482.1
13	1952	427.5	35	1974	293
14	1953	275.1	36	1975	461.3
15	1954	396.3	37	1976	482.5
16	1955	592.7	38	1977	202.8
17	1956	324.9	39	1978	316.8
18	1957	217.3	40	1979	334.4
19	1958	645.7	41	1980	306.1
20	1959	550.7	42	1981	567.2
21	1960	293.9	43	1982	182
22	1961	312.6			

Media (hp_{m1})	386 mm
Desviación estándar	131.16
Coefficiente de variación	0.34

El umbral representa un 5% mayor al valor medio de la altura de precipitación y es debido a que en ocasiones al finalizar un periodo con déficit, se tiene una lámina de lluvia que es igual a la media o mayor, pero no significa que realmente el periodo de sequía haya concluido, sino solamente una interrupción temporal

Umbral (hp_{m2})	405 mm
--------------------------------------	---------------

Según las consideraciones geográficas y estadísticas, el municipio de Ixmiquilpan se considera semiárido ya que la altura de precipitación media se encuentra dentro del siguiente rango:

$$401 < hp \text{ (mm)} < 600$$

así mismo, el coeficiente de variación tiene un valor alto lo que confirma que el municipio de Ixmiquilpan es semiárido con una alta incidencia de sequías.

A continuación se presentan los periodos de déficit y superávit de la serie analizada.

En la tabla se observa que el periodo mas largo de déficit ocurrió del año de 1960 a 1967, es decir, 8 años de duración y una magnitud de 600 mm, que representan una intensidad de 75 mm/año. Otros periodos importantes son de los años de 1969-1972 y de 1977-1980.

Orden	Año	hp (mm)	hpi-hp _m	D o S	Duración (años)	Periodicidad (años)	Magnitud (mm)
1	1940	336.3	-69.03	D	1		-69.03
2	1941	777.9	372.57	S			
3	1942	545.8	140.47	S			
4	1943	401.6	-3.73	D	1	3	-3.73
5	1944	679.2	273.87	S			
6	1945	280.1	-125.23	D	1	2	-125.23
7	1946	422.8	17.47	S			
8	1947	417.6	12.27	S			
9	1948	371.9	-33.43	D	4	3	-273.91
10	1949	330.7	-74.63	D			
11	1950	335.6	-69.73	D			
12	1951	309.2	-96.13	D			
13	1952	427.5	22.17	S			
14	1953	275.1	-130.23	D	2	5	-139.25
15	1954	396.3	-9.03	D			
16	1955	592.7	187.37	S			
17	1956	324.9	-80.43	D	2	3	-268.45
18	1957	217.3	-188.03	D			
19	1958	645.7	240.37	S			
20	1959	550.7	145.37	S			
21	1960	293.9	-111.43	D	8	4	-600.41
22	1961	312.6	-92.73	D			
23	1962	336.6	-68.73	D			
24	1963	310.9	-94.43	D			
25	1964	317.2	-88.13	D			
26	1965	291.9	-113.43	D			
27	1966	403.1	-2.23	D			
28	1967	376	-29.33	D			
29	1968	519.1	113.77	S			
30	1969	336.6	-68.73	D	4	9	-450.61
31	1970	273.5	-131.83	D			
32	1971	284.2	-121.13	D			
33	1972	276.4	-128.93	D			
34	1973	482.1	76.77	S			
35	1974	293	-112.33	D	1	5	-112.33
36	1975	461.3	55.97	S			
37	1976	482.5	77.17	S			

38	1977	202.8	-202.53	D	4	3	-461.21
39	1978	316.8	-88.53	D			
40	1979	334.4	-70.93	D			
41	1980	306.1	-99.23	D			
42	1981	567.2	161.87	S			
43	1982	182	-223.33	D	1	5	-223.33

En promedio las sequías meteorológicas en el municipio de Ixmiquilpan tienen una duración de 2 a 3 años con una periodicidad de cada 4 años y una intensidad de 101 mm/año.

Periodo de sequía	DURACIÓN (años)	PERIODICIDAD (años)	MAGNITUD (mm)	INTENSIDAD (mm/año)
1	1		-69.0	-69.0
2	1	3	-3.7	-3.7
3	1	2	-125.2	-125.2
4	4	3	-273.9	-68.5
5	2	5	-139.3	-69.6
6	2	3	-268.5	-134.2
7	8	4	-600.4	-75.1
8	4	9	-450.6	-112.7
9	1	5	-112.3	-112.3
10	4	3	-461.2	-115.3
11	1	5	-223.3	-223.3
Media	2.6	4.2	-248.0	-100.8

VALOR	DURACIÓN (años)	PERIODICIDAD (años)	MAGNITUD (mm)	INTENSIDAD (mm/año)
MEDIA	2.6	4.2	248	101
MÁXIMO	8		600	223

La lámina disponible en déficit calculada representa un 26% bajo la normal:

$$lám = 386 - 101 = 285mm$$

Con este valor se puede calcular el volumen con el que se dispone para riego y se decide sembrar sobre la misma superficie o disminuir el área. Lo anterior también depende de la demanda de agua para riego para cada cultivo y del mes en el año. El volumen de agua es el resultado del producto de la lámina disponible ya sea en déficit o normal por la superficie sembrada en hectáreas.

A continuación se calculan los deciles de lluvia; para esto es necesario ordenar la serie de datos de precipitación, calcular el periodo de retorno y la probabilidad de ocurrencia.

<i>Orden</i>	<i>hp (mm)</i>	<i>Tr</i>	<i>P</i>	<i>Orden</i>	<i>hp (mm)</i>	<i>Tr</i>	<i>P</i>
	ordenado				ordenado		
1	182	44.0	0.023	23	336.6	1.9	0.523
2	202.8	22.0	0.045	24	336.6	1.8	0.545
3	217.3	14.7	0.068	25	371.9	1.8	0.568
4	273.5	11.0	0.091	26	376	1.7	0.591
5	275.1	8.8	0.114	27	396.3	1.6	0.614
6	276.4	7.3	0.136	28	401.6	1.6	0.636
7	280.1	6.3	0.159	29	403.1	1.5	0.659
8	284.2	5.5	0.182	30	417.6	1.5	0.682
9	291.9	4.9	0.205	31	422.8	1.4	0.705
10	293	4.4	0.227	32	427.5	1.4	0.727
11	293.9	4.0	0.250	33	461.3	1.3	0.750
12	306.1	3.7	0.273	34	482.1	1.3	0.773
13	309.2	3.4	0.295	35	482.5	1.3	0.795
14	310.9	3.1	0.318	36	519.1	1.2	0.818
15	312.6	2.9	0.341	37	545.8	1.2	0.841
16	316.8	2.8	0.364	38	550.7	1.2	0.864
17	317.2	2.6	0.386	39	567.2	1.1	0.886
18	324.9	2.4	0.409	40	592.7	1.1	0.909
19	330.7	2.3	0.432	41	645.7	1.1	0.932
20	334.4	2.2	0.455	42	679.2	1.0	0.955
21	335.6	2.1	0.477	43	777.9	1.0	0.977
22	336.3	2.0	0.500	media	386.0		

Como ejemplo de cálculo se toma el tercer valor, el periodo de retorno y su probabilidad es:

$$Tr = \frac{n+1}{m} = \frac{43+1}{3} = 14.7$$

$$P = \frac{1}{Tr} = \frac{1}{14.7} = 0.068$$

Número	Decil (mm)
1	241.59
2	301.18
3	360.77
4	420.36
5	479.95
6	539.54
7	599.13
8	658.72
9	718.31
10	777.9

De las expresiones para el cálculo de deciles se tiene que:

$$hp(n) = 679.2$$

$$hp(1) = 182.0$$

$$constante = \frac{777.9 - 182.0}{10} = 59.59$$

$$decil(1) = 182 + 59.59 = 241.59$$

$$decil(2) = 241.59 + 59.59 = 301.18$$

Del registro total solamente 3 años (1957, 1977 y 1982) se encuentran por debajo del primer decil y que tienen las siguientes alturas de precipitación y periodos de retorno:

Año	Altura de precipitación (mm)	Periodo de retorno
1982	182	44
1977	202.8	22
1957	217.3	15

En esos años, la sequía fue muy severa pues la precipitación se encontró muy por debajo de la media. Los periodos de retorno son muy altos, lo que indica que es poco probable que se presenten y sobre todo para una planificación a corto plazo.

En seguida, a la muestra de datos de altura de precipitación se aplican las pruebas de homogeneidad e independencia, para ello es necesario hacer la diferencia entre la media y cada valor.

orden	año	hp (mm)	hp-hpm1	orden	año	hp (mm)	hp-hpm1
1	1940	336.3	-49.73	23	1962	336.6	-49.43
2	1941	777.9	391.87	24	1963	310.9	-75.13
3	1942	545.8	159.77	25	1964	317.2	-68.83
4	1943	401.6	15.57	26	1965	291.9	-94.13
5	1944	679.2	293.17	27	1966	403.1	17.07
6	1945	280.1	-105.93	28	1967	376	-10.03
7	1946	422.8	36.77	29	1968	519.1	133.07
8	1947	417.6	31.57	30	1969	336.6	-49.43
9	1948	371.9	-14.13	31	1970	273.5	-112.53
10	1949	330.7	-55.33	32	1971	284.2	-101.83
11	1950	335.6	-50.43	33	1972	276.4	-109.63
12	1951	309.2	-76.83	34	1973	482.1	96.07
13	1952	427.5	41.47	35	1974	293	-93.03
14	1953	275.1	-110.93	36	1975	461.3	75.27
15	1954	396.3	10.27	37	1976	482.5	96.47
16	1955	592.7	206.67	38	1977	202.8	-183.23
17	1956	324.9	-61.13	39	1978	316.8	-69.23
18	1957	217.3	-168.73	40	1979	334.4	-51.63
19	1958	645.7	259.67	41	1980	306.1	-79.93
20	1959	550.7	164.67	42	1981	567.2	181.17
21	1960	293.9	-92.13	43	1982	182	-204.03
22	1961	312.6	-73.43				

A. Pruebas de homogeneidad

Prueba estadística de Helmer	
tamaño de la muestra	43
media de la muestra	386.0
número de secuencias S	22
número de cambios C	20
tolerancia	6.481
S - C	2

Prueba estadística t de Student	
tamaño de la muestra	43
media de la muestra	386.0
$n / 2$	21.5
tamaño de la submuestra 1	22
media de la submuestra 1	420.25
varianza	22130.90
tamaño de la submuestra 2	21
media de la submuestra 2	350.18
varianza	10250.59
estadístico t	1.755
grados de libertad	41
alfa	0.05
estadístico t tablas	2.14

En la primera prueba como $abs t < t tablas$ y en la segunda prueba $abs (S - C) < tolerancia$, entonces la serie es *homogénea*.

B. Prueba de independencia de Anderson

correlograma de la serie de alturas de precipitación			
k	limite inferior	r_k	limite superior
1	-0.32262	-0.036	0.2750029
2	-0.32673	-0.072	0.2779544
3	-0.33100	0.234	0.2810049
4	-0.33544	-0.109	0.2841603
5	-0.34006	0.019	0.2874267

El 10% de los valores r_k^j no sobrepasan los límites de confianza, por lo tanto, la serie de alturas de precipitación hp es independiente y sigue las leyes de la probabilidad. Estos resultados se obtuvieron al realizar las operaciones mostradas en la siguiente tabla:

orden	hp (mm)	hp-hpm	(hp1-hpm) * (hp2-hpm)	(hp1-hpm) * (hp3-hpm)	(hp1-hpm) * (hp4-hpm)	(hp1-hpm) * (hp5-hpm)	(hp1-hpm) * (hp6-hpm)	(hp-hpm) ²
1	336.3	-49.7	-19486.2	-7944.9	-774.4	-14578.3	5267.2	2472.6
2	777.9	391.9	62611.5	6103.2	114887.6	-41509.5	14411.0	153565.6
3	545.8	159.8	2488.4	46841.8	-16924.2	5875.6	5044.8	25527.9
4	401.6	15.6	4568.0	-1649.7	572.7	491.8	-220.0	242.6
5	679.2	293.2	-31054.7	10781.3	9256.8	-4141.3	-16220.0	85951.2
6	280.1	-105.9	-3895.4	-3344.5	1496.3	5860.4	5341.4	11220.2
7	422.8	36.8	1161.1	-519.5	-2034.6	-1854.4	-2825.2	1352.4
8	417.6	31.6	-446.0	-1746.9	-1582.2	-2425.7	1309.5	996.9
9	371.9	-14.1	781.5	712.3	1085.2	-585.9	1566.9	199.5
10	330.7	-55.3	2789.8	4250.4	-2294.6	6137.0	-568.4	3060.9
11	335.6	-50.4	3874.0	-2091.4	5583.5	-518.1	-10421.7	2542.7
12	309.2	-76.8	-3186.3	8521.9	-789.3	-15877.9	-4696.0	5902.2
13	427.5	41.5	-4600.6	426.1	8571.7	-2535.1	-8997.8	1720.1
14	275.1	-110.9	-1139.7	-22925.5	6780.4	18716.0	-28804.5	12304.5
15	396.3	10.3	2123.5	-628.0	-1733.6	2668.0	1691.9	105.6
16	592.7	206.7	-12633.1	-34871.3	53668.1	34034.0	-19040.0	42714.3
17	324.9	-61.1	10313.4	-15872.7	-10065.8	5631.2	4488.2	3736.3
18	217.3	-168.7	-43813.7	-27784.8	15543.9	12388.8	8339.4	28468.3
19	645.7	259.7	42761.7	-23922.7	-19066.7	-12834.6	-19508.2	67430.8
20	550.7	164.7	-15170.7	-12091.3	-8139.1	-12371.3	-11333.8	27117.7
21	293.9	-92.1	6764.4	4553.4	6921.0	6340.6	8671.4	8487.1
22	312.6	-73.4	3629.1	5516.1	5053.6	6911.2	-1253.7	5391.3
23	336.6	-49.4	3713.1	3401.7	4652.2	-843.9	495.5	2442.9
24	310.9	-75.1	5170.6	7071.2	-1282.7	753.2	-9997.3	5643.9
25	317.2	-68.8	6478.2	-1175.2	690.0	-9158.9	3401.7	4737.0
26	291.9	-94.1	-1607.1	943.7	-12525.7	4652.2	10591.5	8859.6
27	403.1	17.1	-171.2	2272.2	-843.9	-1921.3	-1738.6	291.5
28	376	-10.0	-1334.1	495.5	1128.1	1020.9	1099.1	100.5
29	519.1	133.1	-6577.3	-14974.3	-13550.4	-14588.4	12785.0	17708.8
30	336.6	-49.4	5561.6	5032.8	5418.3	-4748.5	4597.8	2442.9
31	273.5	-112.5	11458.0	12335.7	-10810.8	10467.8	-8470.3	12662.0
32	284.2	-101.8	11162.7	-9782.8	9472.4	-7664.9	-8623.6	10368.4
33	278.4	-109.6	-10532.2	10198.0	-8252.0	-10576.1	20086.2	12017.8
34	482.1	96.1	-8937.4	7231.9	9268.7	-17603.3	-6650.8	9230.3
35	293	-93.0	-7002.4	-8974.6	17044.7	6439.7	4802.5	8653.8
36	461.3	75.3	7262.1	-13792.2	-5210.9	-3886.1	-6016.4	5666.2
37	482.5	96.5	-17676.6	-6678.5	-4980.5	-7710.8	17478.7	9307.3
38	202.8	-183.2	12683.9	9459.1	14644.4	-33195.8	37382.7	33571.6
39	316.8	-69.2	3573.8	5532.9	-12541.9	14123.8	0.0	4792.2
40	334.4	-51.6	4126.2	-9353.2	10532.9	0.0	0.0	2665.2
41	306.1	-79.9	-14480.5	16306.9	0.0	0.0	0.0	6388.1
42	567.2	181.2	-36964.2	0.0	0.0	0.0	0.0	32624.2
43	182	-204.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41626.4
suma		1.7053E-12	-2.565E+04	-5.2136E+04	1.6887E+05	-7.8618E+04	1.3658E+04	7.2251E+05

Se procede a ajustar la muestra a las diferentes funciones de probabilidad para mínimos. Para lo cual se utilizó el programa de computadora Ax para ajuste de muestras y se muestra el resultado final:

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	41.296		41.296	
Lognormal	24.332	24.003	27.71	29.47
Gumbel	21.733		22.824	
Exponencial	24.475		213.353	
Gamma	28.586	22.897	31.654	24.455
Doble Gumbel	23.326			
Mínimo error estándar:		21.733		
Calculado por la función:		Gumbel por momentos		

La función de probabilidad que proporcionó el mínimo error fue la Gumbel por momentos. Con esta función se obtienen las nuevas láminas de lluvia y los periodos de retorno que tendrían estas láminas de lluvia. Para ejemplificar, a continuación se calcula la altura de precipitación correspondiente al primer valor:

$$hp(1) = 182\text{mm}$$

$$p = 0.023$$

$$v = 386 - 0.45(131.16) = 327.0$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi}(131.16) = 102.3$$

$$\bar{X}_T = 327 - 102.3 \ln[-\ln(0.023)] = 191$$

Para calcular los eventos de diseño correspondientes a cada periodo de retorno se sigue un procedimiento similar al anterior:

$$Tr = 2\text{años}; p = 0.5$$

$$\bar{X}_T = 327 - 102.3 \ln[-\ln(0.5)] = 364.5$$

Los demás valores siguen el mismo procedimiento:

Orden	hp (mm)	Tr	P	hp (mm) calculado	Orden	hp (mm)	Tr	P	hp (mm) calculado
1	182	44.0	0.023	190.9	24	336.6	1.8	0.545	378.2
2	202.8	22.0	0.045	211.6	25	371.9	1.8	0.568	385.4
3	217.3	14.7	0.068	225.9	26	376	1.7	0.591	392.7
4	273.5	11.0	0.091	237.5	27	396.3	1.6	0.614	400.3
5	275.1	8.8	0.114	247.5	28	401.6	1.6	0.636	408.2
6	276.4	7.3	0.136	256.5	29	403.1	1.5	0.659	416.5
7	280.1	6.3	0.159	264.7	30	417.6	1.5	0.682	425.2
8	284.2	5.5	0.182	272.4	31	422.8	1.4	0.705	434.3
9	291.9	4.9	0.205	279.8	32	427.5	1.4	0.727	444.1
10	293	4.4	0.227	286.8	33	461.3	1.3	0.750	454.5
11	293.9	4.0	0.250	293.6	34	482.1	1.3	0.773	465.7
12	306.1	3.7	0.273	300.2	35	482.5	1.3	0.795	477.9
13	309.2	3.4	0.295	306.7	36	519.1	1.2	0.818	491.3
14	310.9	3.1	0.318	313.1	37	545.8	1.2	0.841	506.3
15	312.6	2.9	0.341	319.5	38	550.7	1.2	0.864	523.4
16	316.8	2.8	0.364	325.8	39	567.2	1.1	0.886	543.4
17	317.2	2.6	0.386	332.1	40	592.7	1.1	0.909	567.5
18	324.9	2.4	0.409	338.5	41	645.7	1.1	0.932	598.2
19	330.7	2.3	0.432	344.9	42	679.2	1.0	0.955	640.9
20	334.4	2.2	0.455	351.3	43	777.9	1.0	0.977	713.0
21	335.6	2.1	0.477	357.9					
22	336.3	2.0	0.500	364.5	Xm	386.026			382.8
23	336.6	1.9	0.523	371.3	S	131.16			118.83

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de ocurrencia	Altura de precipitación (mm)
2	0.5	364.5
5	0.2	278.3
10	0.1	241.6
20	0.05	214.8
50	0.02	187.5
100	0.01	170.8

Se puede notar que la altura de precipitación calculada para un periodo de retorno de 10 años, coincide con la altura de precipitación del primer decil, que

es cuando se considera que el déficit es suficiente como para determinar una sequía meteorológica severa.

El periodo de retorno para la lámina más adversa es de 44 años, entonces del modelo se calcula que la altura de precipitación para un periodo de retorno mas adverso corresponde a 187.5 mm con un periodo de retorno de 50 años, que se debe considerarse en la planificación a mediano y largo plazo para el municipio.

Para la planificación a corto plazo, es decir, de 2 a 5 años se toma en cuenta las láminas correspondientes de 364.5 mm y 278.3 mm respectivamente. Con estas alturas de precipitación es como se puede obtener el volumen potencial con el que dispondrían los productores agrícolas en caso de una sequía.

Finalmente se hizo uso de técnicas estocásticas para obtener un registro sintético mayor y así contar con datos para pronosticar eventos a futuro. Para esto se utilizó el modelo $AR(2)$ que generó 10,000 muestras sintéticas a partir de las cuales se determinó la duración de la sequía, su probabilidad y su intensidad esperada.

Para ejemplificar el cálculo, se toman los tres primeros valores de la serie original, pero los estadísticos muestrales consideran el total de la serie de 43 valores:

	1	2	3	4	5
A	Año	$x = hp$ (mm)	$x_i - E2$	$y_i = \ln x_i$	$z_i = (y_i - E4)/F4$
B	1940	336.3	-49.7	5.8	-0.3
C	1941	777.9	391.9	6.7	2.4
D	1942	545.8	159.8	6.3	1.2
E	Media	386.0		5.905	0.0
F	Desviación estándar	131.16		0.322	1.0

En seguida se calcula el correlograma de la serie de todos los datos alturas de precipitación:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	z1	z0-zm	z1-zm	z2-zm	z3-zm	z4-zm	z5-zm	z6-zm	C*D	C*E	C*F	C*G	C*H	C*I	C+C
1	-0.27	-0.27	2.35	1.24	0.28	1.93	-0.84	0.45	-0.64	-0.34	-0.08	-0.52	0.23	-0.12	0.07
2	2.35	2.35	1.24	0.28	1.93	-0.84	0.45	0.41	2.93	0.67	4.54	-1.98	1.05	0.96	5.53
3	1.24	1.24	0.28	1.93	-0.84	0.45	0.41	0.04	0.35	2.40	-1.05	0.55	0.51	0.05	1.55
4	0.28	0.28	1.93	-0.84	0.45	0.41	0.04	-0.32	0.55	-0.24	0.13	0.12	0.01	-0.09	0.08
5	1.93	1.93	-0.84	0.45	0.41	0.04	-0.32	-0.28	-1.62	0.86	0.78	0.08	-0.62	-0.53	3.72
6	-0.84	-0.84	0.45	0.41	0.04	-0.32	-0.28	-0.53	-0.38	-0.34	-0.04	0.27	0.23	0.45	0.71
7	0.45	0.45	0.41	0.04	-0.32	-0.28	-0.53	0.48	0.18	0.02	-0.14	-0.12	-0.24	0.21	0.20
8	0.41	0.41	0.04	-0.32	-0.28	-0.53	0.48	-0.90	0.02	-0.13	-0.11	-0.22	0.20	-0.37	0.17
9	0.04	0.04	-0.32	-0.28	-0.53	0.48	-0.90	0.24	-0.01	-0.01	-0.02	0.02	-0.04	0.01	0.00
10	-0.32	-0.32	-0.28	-0.53	0.48	-0.90	0.24	1.50	0.09	0.17	-0.16	0.29	-0.08	-0.49	0.10
11	-0.28	-0.28	-0.53	0.48	-0.90	0.24	1.50	-0.38	0.15	-0.13	0.25	-0.07	-0.42	0.10	0.08
12	-0.53	-0.53	0.48	-0.90	0.24	1.50	-0.38	-1.64	-0.26	0.48	-0.13	-0.80	0.20	0.87	0.28
13	0.48	0.48	-0.90	0.24	1.50	-0.38	-1.64	1.77	-0.43	0.12	0.72	-0.16	-0.79	0.85	0.23
14	-0.90	-0.90	0.24	1.50	-0.38	-1.64	1.77	1.27	-0.22	-1.35	0.34	1.47	-1.59	-1.14	0.81
15	0.24	0.24	1.50	-0.38	-1.64	1.77	1.27	-0.69	0.36	-0.09	-0.40	0.43	0.31	-0.17	0.06
16	1.50	1.50	-0.38	-1.64	1.77	1.27	-0.69	-0.50	-0.57	-2.46	2.66	1.91	-1.04	-0.75	2.26
17	-0.38	-0.38	-1.64	1.77	1.27	-0.69	-0.50	-0.27	0.62	-0.67	-0.48	0.26	0.19	0.10	0.14
18	-1.64	-1.64	1.77	1.27	-0.69	-0.50	-0.27	-0.52	-2.90	-2.08	1.13	0.82	0.44	0.85	2.68
19	1.77	1.77	1.27	-0.69	-0.50	-0.27	-0.52	-0.45	2.25	-1.23	-0.88	-0.47	-0.91	-0.80	3.13
20	1.27	1.27	-0.69	-0.50	-0.27	-0.52	-0.45	-0.71	-0.88	-0.64	-0.34	-0.66	-0.58	-0.91	1.62
21	-0.69	-0.69	-0.50	-0.27	-0.52	-0.45	-0.71	0.30	0.35	0.19	0.36	0.31	0.49	-0.20	0.48
22	-0.50	-0.50	-0.27	-0.52	-0.45	-0.71	0.30	0.08	0.13	0.26	0.23	0.36	-0.15	-0.04	0.25
23	-0.27	-0.27	-0.52	-0.45	-0.71	0.30	0.08	1.09	0.14	0.12	0.19	-0.08	-0.02	-0.29	0.07
24	-0.52	-0.52	-0.45	-0.71	0.30	0.08	1.09	-0.27	0.23	0.37	-0.15	-0.04	-0.56	0.14	0.27
25	-0.45	-0.45	-0.71	0.30	0.08	1.09	-0.27	-0.92	0.32	-0.13	-0.04	-0.49	0.12	0.42	0.21
26	-0.71	-0.71	0.30	0.08	1.09	-0.27	-0.92	-0.80	-0.21	-0.06	-0.78	0.19	0.65	0.57	0.51
27	0.30	0.30	0.08	1.09	-0.27	-0.92	-0.80	-0.88	0.02	0.32	-0.08	-0.27	-0.24	-0.26	0.09
28	0.08	0.08	1.09	-0.27	-0.92	-0.80	-0.88	0.86	0.09	-0.02	-0.07	-0.06	-0.07	0.07	0.01
29	1.09	1.09	-0.27	-0.92	-0.80	-0.88	0.86	-0.70	-0.29	-1.00	-0.87	-0.96	0.93	-0.76	1.18
30	-0.27	-0.27	-0.92	-0.80	-0.88	0.86	-0.70	0.72	0.25	0.21	0.24	-0.23	0.19	-0.19	0.07
31	-0.92	-0.92	-0.80	-0.88	0.86	-0.70	0.72	0.86	0.73	0.81	-0.79	0.64	-0.66	-0.79	0.84
32	-0.80	-0.80	-0.88	0.86	-0.70	0.72	0.86	-1.85	0.71	-0.68	0.56	-0.57	-0.68	1.48	0.64
33	-0.88	-0.88	0.86	-0.70	0.72	0.86	-1.85	-0.46	-0.76	0.62	-0.63	-0.76	1.64	0.40	0.78
34	0.86	0.86	-0.70	0.72	0.86	-1.85	-0.46	-0.29	-0.60	0.61	0.73	-1.59	-0.39	-0.25	0.73
35	-0.70	-0.70	0.72	0.86	-1.85	-0.46	-0.29	-0.57	-0.50	-0.60	1.30	0.32	0.20	0.40	0.49
36	0.72	0.72	0.86	-1.85	-0.46	-0.29	-0.57	1.36	0.62	-1.33	-0.33	-0.21	-0.41	0.98	0.52
37	0.86	0.86	-1.85	-0.46	-0.29	-0.57	1.36	-2.19	-1.59	-0.39	-0.25	-0.49	1.17	-1.88	0.74
38	-1.85	-1.85	-0.46	-0.29	-0.57	1.36	-2.19	0.00	0.85	0.53	1.05	-2.53	4.06	0.00	3.43
39	-0.46	-0.46	-0.29	-0.57	1.36	-2.19	0.00	0.00	0.13	0.26	-0.62	1.00	0.00	0.00	0.21
40	-0.29	-0.29	-0.57	1.36	-2.19	0.00	0.00	0.00	0.16	-0.39	0.63	0.00	0.00	0.00	0.08
41	-0.57	-0.57	1.36	-2.19	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.77	1.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
42	1.36	1.36	-2.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.86
43	-2.19	-2.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.80
SUMA	3E-15	0	0.271	-2.08	-3.33	-3.61	-5.54	-4.7	-3.4	-4.06	7.4	-4.24	3.344	-1.13	42
									C1	C2	C3	C4	C5	C6	C0

Los coeficientes de autocorrelación serial r_1, r_2 se calculan como sigue:

$$r_1 = \frac{C1}{C0} = \frac{-3.4}{42} = -0.0808$$

$$r_2 = \frac{C2}{C0} = \frac{-4.1}{42} = -0.0976$$

Para el modelo AR(1), el parámetro $\phi_1 = r_1 = -0.0808$ y el estimador para la varianza de los residuales es:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{n}{(n-1)} \sigma_y^2 (1 - \overline{\phi_1^2}) = \frac{43}{42} (0.322^2) [1 - (-0.0808)^2] = 0.104$$

Para el modelo AR(2), los parámetros siguientes:

$$\phi_1 = \frac{r_1(1-r_2)}{1-r_1^2} = \frac{-0.0808 - [1 - (-0.0976)]}{1 - (-0.0808)^2} = -0.090$$

$$\phi_2 = \frac{r_2 - r_1^2}{1-r_1^2} = \frac{-0.0976 - (-0.0808)^2}{1 - (-0.0808)^2} = -0.10$$

Con el criterio de información de Akaike para los modelos AR(1) y AR(2) se tiene:

$$CIA(1) = 43 \ln(\sigma_\varepsilon^2) + 2p = -95.3$$

$$CIA(2) = 43 \ln(\sigma_\varepsilon^2) + 2p = -97.8$$

como $CIA(2) < CIA(1)$ el modelo elegido es **AR(2)**

Entonces el proceso de generación de la muestra sintética se lleva a cabo con la expresión:

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_t = \sigma_\varepsilon \xi_t$$

para el cálculo de los números aleatorios se tiene que los dos primeros números generados con distribución son: $U_1 = 0.63$, $U_2 = 1.3$

$$\xi_1 = \left[2 \ln \left(\frac{1}{U_1} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi U_2) = \left[2 \ln \left(\frac{1}{0.63} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi * 1.3) = -1.9$$

$$\xi_2 = \left[2 \ln \left(\frac{1}{U_1} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \text{sen}(2\pi U_2) = \left[2 \ln \left(\frac{1}{0.63} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \text{sen}(2\pi * 1.3) = -0.8$$

como la muestra tiene 43 valores, el procedimiento anterior se repite otras 21 veces mas.

Los nuevos valores de la serie estandarizada son:

$$z_1 = (0.090 * 0) + (-0.10 * 0) + [0.322 * (-1.9)] = -0.6$$

$$z_2 = (0.090 * -0.6) + (-0.10 * 0) + [0.322 * (-0.80)] = -0.2$$

Ahora se *desestandariza* los valores anteriores de la forma $y_t = (z_t * \sigma_y) + \bar{y}$, con el valor de $\bar{y} = 5.9$, $\sigma_y = 0.3$

$$y_1 = -0.6(0.3) + 5.9 = 5.70$$

$$y_2 = -0.2(0.3) + 5.9 = 5.80$$

Finalmente, la serie sintética x_t se obtiene al *desnormalizar* la serie generada y_t .

$$x_t = \exp y_t$$

$$x_1 = \exp(5.70) = 313.8$$

$$x_2 = \exp(5.80) = 344.4$$

Se muestra la tabla con la primera serie sintética generada:

	Año	hp (mm)	x-xm	y	z	e	aleatorio	zg	yg	xg
1	1940	336.3	-49.7	5.8	-0.3	0.0	-1.4	-0.4	5.8	318.6
2	1941	777.9	391.9	6.7	2.4	2.3	0.3	0.1	5.9	379.2
3	1942	545.8	159.8	6.3	1.2	1.4	0.8	0.1	5.9	376.5
4	1943	401.6	15.6	6.0	0.3	0.4	-0.1	-0.1	5.9	351.4
5	1944	679.2	293.2	6.5	1.9	2.0	-0.6	-0.2	5.8	341.4
6	1945	280.1	-105.9	5.6	-0.8	-0.7	-0.1	-0.2	5.8	345.9
7	1946	422.8	36.8	6.0	0.4	0.4	0.3	0.2	6.0	385.6
8	1947	417.6	31.6	6.0	0.4	0.4	1.1	0.3	6.0	405.9
9	1948	371.9	-14.1	5.9	0.0	0.1	-0.7	-0.3	5.8	337.2
10	1949	330.7	-55.3	5.8	-0.3	-0.3	0.2	0.1	5.9	373.0
11	1950	335.6	-50.4	5.8	-0.3	-0.3	-0.5	-0.1	5.9	350.9
12	1951	309.2	-76.8	5.7	-0.5	-0.6	0.1	0.0	5.9	372.4
13	1952	427.5	41.5	6.1	0.5	0.4	-0.9	-0.3	5.8	337.8
14	1953	275.1	-110.9	5.6	-0.9	-0.9	0.8	0.2	6.0	392.7
15	1954	396.3	10.3	6.0	0.2	0.2	-0.7	-0.1	5.9	349.8
16	1955	592.7	206.7	6.4	1.5	1.5	-1.1	-0.4	5.8	325.6
17	1956	324.9	-61.1	5.8	-0.4	-0.3	1.0	0.2	6.0	392.9
18	1957	217.3	-168.7	5.4	-1.6	-1.7	0.6	0.2	6.0	395.3
19	1958	645.7	259.7	6.5	1.8	1.6	-0.2	0.1	5.9	374.8
20	1959	550.7	164.7	6.3	1.3	1.4	-1.0	-0.5	5.8	317.3
21	1960	293.9	-92.1	5.7	-0.7	-0.6	1.0	0.2	6.0	392.7
22	1961	312.6	-73.4	5.7	-0.5	-0.6	-0.2	0.0	5.9	367.5
23	1962	336.6	-49.4	5.8	-0.3	-0.3	-1.3	-0.4	5.8	324.8
24	1963	310.9	-75.1	5.7	-0.5	-0.5	0.3	0.1	5.9	381.9
25	1964	317.2	-68.8	5.8	-0.5	-0.5	0.8	0.3	6.0	405.2
26	1965	291.9	-94.1	5.7	-0.7	-0.8	0.2	0.1	5.9	380.4
27	1966	403.1	17.1	6.0	0.3	0.2	0.4	0.2	6.0	388.1
28	1967	376	-10.0	5.9	0.1	0.1	-1.3	-0.5	5.8	316.8
29	1968	519.1	133.1	6.3	1.1	1.1	1.7	0.5	6.1	436.6
30	1969	336.6	-49.4	5.8	-0.3	-0.2	1.1	0.3	6.0	397.9
31	1970	273.5	-112.5	5.6	-0.9	-0.9	-0.8	-0.2	5.8	341.4
32	1971	284.2	-101.8	5.6	-0.8	-0.9	0.4	0.2	6.0	389.6
33	1972	276.4	-109.6	5.6	-0.9	-0.9	-0.3	0.0	5.9	363.0
34	1973	482.1	96.1	6.2	0.9	0.8	-0.7	-0.2	5.9	348.1
35	1974	293	-93.0	5.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.2	5.8	341.7
36	1975	461.3	75.3	6.1	0.7	0.7	-0.9	-0.2	5.8	341.1
37	1976	482.5	96.5	6.2	0.9	0.9	1.4	0.4	6.0	415.1
38	1977	202.8	-183.2	5.3	-1.9	-1.8	0.5	0.1	5.9	377.7
39	1978	316.8	-69.2	5.8	-0.5	-0.6	-2.5	-0.7	5.7	297.0
40	1979	334.4	-51.6	5.8	-0.3	-0.3	-1.0	-0.3	5.8	335.3
41	1980	306.1	-79.9	5.7	-0.6	-0.6	0.1	0.0	5.9	372.2
42	1981	567.2	181.2	6.3	1.4	1.3	-0.3	0.0	5.9	361.5
43	1982	182	-204.0	5.2	-2.2	-2.1	-1.2	-0.5	5.8	314.3

media	386.0	0.0	5.9	0.0	0.0	-0.1	0.0	5.9	363.1
varianza	17202,7	17202.7	0.1	1.0	1.0	0.8	0.1	0.0	975.3
coef-asim	1.1	1.1	0.3	0.3	0.3	-0.2	-0.2	-0.2	0.0
curtosis	1.0	1.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.5	-0.5	-0.5
desv-est	131.2	131.2	0.3	1.0	1.0	0.9	0.3	0.1	31.2
coef-var	0.3	3.3E+15	0.1	3.5E+14	95.6	-7.5	-6.4	0.0	0.1

De la misma forma que se hizo la caracterización inicial, se realiza una nueva para los datos de la serie sintética y los resultados son los siguientes:

Años de déficit	Cantidad	Probabilidad	Suma del déficit	Intensidad	Porcentaje respecto a la media
1	36000	38.7	-3530253.9	-98.1	25.4
2	15000	16.1	-1606705.6	-107.1	27.7
3	18000	19.4	-1950437.3	-108.4	28.1
4	3000	3.2	-132386.1	-44.1	11.4
5	9000	9.7	-527094.2	-58.6	15.2
6	12000	12.9	-553984.5	-46.2	12.0
<i>Media</i>		16.7	-1383476.9	-77.1	20.0

La tabla anterior representa el resumen de todos los años generados y se puede observar la cantidad de años consecutivos que forman cada periodo de sequía, así como la probabilidad, magnitud, intensidad y porcentaje de desviación respecto a la media original.

Así mismo, las características promedio y máximas de la sequía generada son las siguientes:

VALOR	DURACIÓN (años)	PERIODICIDAD (años)	MAGNITUD (mm)	INTENSIDAD (mm/año)
MEDIA	2.7	4.2	205.2	77.1
MÁXIMA	6		1176.8	108.4

Estos resultados promedio generados sintéticamente son similares en cuanto a la duración y la periodicidad con respecto a la original; también la magnitud y la intensidad esperadas son similares a los de la muestra original. Siguiendo el análisis de resultados, la probabilidad de que ocurra una sequía de 3 años es menor a la de 1 y mayor a 2 años, sin embargo la intensidad esperada de 2 años es similar con la de 3 años, y con esto, las láminas de lluvia disponibles en déficit se calculan de la misma manera que las originales.

Duración de la sequía (años)	Intensidad (mm/año)	Lámina disponible en déficit (mm)
1	98.1	287.9
2	107.1	278.9
3	108.4	277.6

En primera instancia se puede tomar la decisión de hacer una planeación con la lámina disponible en déficit más adversa que es la de duración de un año, además, la intensidad anual de la sequía es también parecida, lo que conviene planificar con esa lámina disponible en déficit para una duración de 1, 2 y 3 años. Estas láminas se encuentran entre los deciles 1 y 2 calculados con anterioridad y representan un 27.7% por abajo del valor medio que es de 386 mm anuales.

Ahora se hace un análisis de la probabilidad condicional de que después de un periodo húmedo ocurra un periodo seco, el cálculo de cada uno se hizo, en primer lugar cuantificando el número total de periodos de sequía y de los periodos húmedos del total de la muestra sintética y los resultados se muestran a continuación:

Periodo húmedo				
Periodo seco	1	2	3	4
1	19	13	3	3
2	13	<1	3	<1
3	10	10	<1	<1
4	3	<1	<1	<1
5	10	3	<1	<1
6	6	3	<1	<1

Lo anterior indica que es muy probable que después de un año húmedo se presenten años secos, con mas probabilidad de un solo año seco, posteriormente 2 años secos consecutivos y por último 3 años secos; aunque también es muy probable que continúe la sequía hasta 4, 5 y 6 años. En contraste, cuando ocurren 2 años húmedos consecutivos, es muy probable que continúe un año seco y 3 años secos consecutivos pero no 2 años secos.

Ahora bien, se hace una aproximación de las láminas mensuales disponibles en déficit por medio del por ciento que le corresponde a cada mes de lámina de lluvia con respecto a la media anual. Del registro mensual del INEGI de varios años se calculó el porcentaje de lluvia promedio que le corresponde a cada mes, posteriormente se hizo el producto mes a mes con la lámina mensual en déficit. El cálculo de este valor es muy importante para hacer la correcta planificación en los periodos primavera-verano y otoño-invierno de siembra y la disponibilidad de agua.

Mes	Lámina mensual promedio (mm)	Lamina mensual en déficit (mm)	Porcentaje
Enero	14.5	10.5	3.76
Febrero	17.5	12.6	4.53
Marzo	22.1	15.9	5.73
Abril	27.1	19.4	7.02
Mayo	38.1	27.5	9.87
Junio	63.7	45.8	16.50
Julio	47.1	33.9	12.20
Agosto	23.7	17.05	6.14
Septiembre	56.9	40.9	14.74
Octubre	43.0	30.9	11.14
Noviembre	17.6	12.7	4.56
Diciembre	14.7	10.8	3.81
ANUAL	386.0	277.6	100

En todo el análisis meteorológico se utilizaron datos de lluvia de una sola estación, entonces se consideró que lo que ocurra en ese punto, afecta todo el resto de la superficie analizada que representa el 55.25% del territorio municipal. Según la clasificación expuesta en el tercer capítulo se trata de una sequía local pero por su extensión dentro del municipio se trata de una sequía catastrófica con una duración larga.

Se dice que es catastrófica ya que al abarcar más de la mitad del territorio municipal, afecta la mayoría de los sectores productivos, sobre todo el agrícola ya que no se contará con agua de lluvia en toda esa superficie a sembrar y esto produce pérdidas considerables a los campesinos que es a través de su labor que se desarrolla la mayor parte de la economía local. Mas adelante en el análisis económico se observará el impacto y las pérdidas en números.

5.5.2. Análisis hidrológico

En este caso se extrajeron datos de la estación hidrométrica denominada Ixmiquilpan II con clave 26406 de la corriente del Río Tula perteneciente a la cuenca del Río Moctezuma que corresponden a gastos medios diarios de los años de 1980 a 1999, con los cuales se puede llevar a cabo el procedimiento analítico como en el caso anterior.

En primer lugar se obtiene el gasto medio diario de cada año y el umbral o porcentaje de ese gasto que corresponde a un nivel del 85%, con el cual se determinará los periodos de déficit y superavit diario de cada año en la estación Ixmiquilpan. El volumen se obtiene de la siguiente manera:

$$V = \frac{Q_i * (365 * 24 * 60 * 60)}{1 \times 10^6}$$

GASTO MEDIO MENSUAL (m³/s)

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual	Medio diario
1971	313.7	187.2	200.1	182.2	226.1	708.0	699.3	582.6	1361.0	2597.1	416.6	415.6	7889.4	21.7
1972	222.7	329.2	201.8	224.8	244.3	796.6	682.8	605.1	400.5	384.9	364.7	415.1	4872.3	13.4
1973	343.4	211.6	229.7	211.8	297.1	454.0	2144.3	2959.6	1758.1	1065.2	681.8	325.3	10681.8	29.3
1974	418.5	334.7	266.2	246.7	263.4	518.4	2592.7	334.0	1774.9	857.5	530.3	443.9	8581.1	23.6
1975	633.3	334.3	285.1	282.6	623.1	1189.6	1421.5	1122.8	2337.1	617.9	505.4	438.2	9770.6	26.8
1976	543.8	420.2	480.1	482.8	449.2	322.7	1142.9	1375.0	2212.0	4281.6	1049.8	846.8	13587.0	37.3
1977	537.2	363.6	332.4	356.4	490.2	346.1	337.3	357.7	429.0	451.7	473.2	342.3	4817.1	13.2
1978	470.1	415.8	437.8	330.9	308.7	461.2	337.9	424.1	467.6	2404.2	659.2	482.6	7200.2	19.8
1979	386.2	386.8	248.2	361.8	342.0	398.7	340.5	311.3	1409.1	248.1	462.6	475.2	5370.4	14.8
1980	478.8	324.7	313.1	314.0	474.0	223.5	209.1	215.5	163.9	239.0	301.6	257.0	3514.1	9.7
1981	464.4	310.8	210.8	212.1	354.0	925.3	1720.0	323.4	861.1	828.5	723.3	370.8	7304.5	20.1
1982	301.4	320.0	212.4	196.9	300.2	50.5	113.2	54.8	72.4	257.7	126.9	178.4	2184.8	6.0
1983	386.2	386.8	265.1	282.6	354.0	925.3	699.3	582.6	1774.9	857.5	307.2	378.7	7199.9	19.8
1984	276.9	217.7	133.6	71.4	136.2	165.2	380.2	136.9	3541.0	425.2	353.5	301.7	6139.5	16.9
1985	394.0	300.2	188.3	464.7	306.4	448.8	1140.5	634.1	316.1	281.2	236.2	318.5	5028.8	13.8
1986	286.2	287.4	187.7	254.2	247.8	891.8	356.5	222.4	319.2	552.6	465.4	310.6	4381.7	12.0
1987	345.0	340.7	227.6	157.5	120.0	214.5	158.2	132.7	167.2	252.9	304.3	303.5	2724.0	7.5
1988	348.4	302.4	280.3	213.5	165.9	71.0	231.6	278.8	789.8	240.0	307.2	378.7	3607.6	9.9
1989	327.6	369.5	256.3	209.7	195.4	217.0	185.7	359.6	310.3	205.5	222.1	380.4	3239.3	8.9
1990	277.6	286.5	195.7	142.8	223.1	325.4	372.0	298.7	1880.6	1038.1	293.8	235.7	5570.0	15.3
1991	276.0	283.2	168.3	137.5	161.2	328.8	4040.3	444.7	800.7	1796.8	800.7	379.7	9290.0	25.5
1992	469.6	1089.2	371.4	325.5	380.9	1057.6	246.1	644.4	842.1	3834.1	2167.9	475.2	11883.9	32.6
1993	419.8	455.5	191.3	300.7	231.0	186.8	567.4	181.7	1066.8	828.2	531.7	413.2	5374.1	14.8
1994	384.3	320.4	445.0	251.0	244.4	418.3	288.4	716.8	2056.0	1341.6	502.3	259.8	7238.3	19.9
1995	516.2	419.8	416.0	280.9	232.7	177.3	313.1	1742.3	1073.4	484.5	769.6	369.9	6795.6	18.7
1996	620.0	593.0	299.5	283.9	230.9	270.9	282.6	318.8	1348.9	1201.7	427.3	472.3	6340.7	17.4
1997	422.3	421.8	435.5	533.9	283.5	328.0	530.1	287.8	382.4	787.7	411.8	591.1	5395.8	14.8
1998	368.6	374.6	251.5	152.8	226.1	92.1	149.1	278.9	2397.7	4091.3	880.8	408.1	9671.5	26.6
1999	354.4	331.3	250.5	255.8	195.4	117.5	376.2	285.6	1413.6	1344.2	751.9	389.7	6046.3	16.6
Media	399.5	369.6	274.5	266.6	285.1	435.5	751.3	559.1	1151.4	1184.7	652.7	391.0	6610.0	18.2

VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO MENSUAL (Mm³)

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1971	27.1	16.2	17.3	15.7	19.5	61.2	60.4	50.3	117.6	224.4	36.0	35.9	681.6
1972	19.2	28.4	17.4	19.4	21.1	68.8	59.0	52.3	34.6	33.3	31.5	35.9	421.0
1973	29.7	18.3	19.8	18.3	25.7	39.2	185.3	255.7	151.9	92.0	58.9	28.1	922.9
1974	36.2	28.9	23.0	21.3	22.8	44.8	224.0	28.9	153.3	74.1	45.8	38.4	741.4
1975	54.7	28.9	22.9	24.4	53.8	102.8	122.8	97.0	201.9	53.4	43.7	37.9	844.2
1976	47.0	36.3	41.5	41.7	38.8	27.9	96.7	118.8	191.1	368.2	90.7	73.2	1173.9
1977	46.4	31.4	28.7	30.8	42.3	29.9	29.1	30.9	37.1	39.0	40.9	29.6	416.2
1978	40.6	35.9	37.8	28.6	26.7	39.8	29.2	36.6	40.4	207.7	57.0	41.7	622.1
1979	33.4	33.4	21.4	31.3	29.5	34.4	29.4	26.9	121.7	21.4	40.0	41.1	464.0
1980	41.4	28.0	27.0	27.1	41.0	19.3	18.1	18.6	14.2	20.6	26.1	22.2	303.6
1981	40.1	26.9	18.2	18.3	30.6	79.9	148.6	27.9	74.4	71.6	62.5	32.0	631.1
1982	26.0	27.6	18.3	17.0	25.9	4.4	9.8	4.7	6.3	22.3	11.0	15.4	188.8
1983	33.4	33.4	22.9	24.4	30.6	79.9	60.4	50.3	153.3	74.1	26.5	32.7	622.1
1984	23.9	18.8	11.5	6.2	11.8	14.3	32.8	11.8	305.9	36.7	30.5	26.1	530.4
1985	34.0	25.9	16.3	40.2	26.5	38.8	98.5	54.8	27.3	24.3	20.4	27.5	434.5
1986	24.7	24.8	16.2	22.0	21.4	77.0	30.8	19.2	27.6	47.7	40.2	26.8	378.6
1987	29.8	29.4	19.7	13.6	10.4	18.5	13.7	11.5	14.4	21.9	26.3	26.2	235.4
1988	30.1	26.1	24.2	18.4	14.3	6.1	20.0	24.1	68.2	20.7	26.5	32.7	311.7
1989	28.3	31.9	22.1	18.1	16.9	18.7	16.0	31.1	26.8	17.8	19.2	32.9	275.9
1990	24.0	24.8	16.9	12.3	19.3	28.1	32.1	25.8	162.5	89.7	25.4	20.4	481.2
1991	23.8	24.5	14.5	11.9	13.9	28.4	349.1	38.4	40.0	155.2	69.2	32.8	801.8
1992	40.6	94.1	32.1	28.1	31.2	91.4	21.3	55.7	72.8	331.3	187.3	41.1	1026.8
1993	36.3	39.4	16.5	26.0	20.0	16.1	48.0	15.7	92.2	71.6	45.9	35.7	464.3
1994	33.2	27.7	38.4	21.7	21.1	36.1	25.8	61.9	177.6	115.9	43.4	22.4	625.4
1995	44.6	36.3	35.9	24.3	20.1	15.3	27.0	150.5	92.7	41.9	66.5	32.0	587.1
1996	53.6	51.2	25.9	22.8	19.9	23.4	25.3	27.5	116.6	103.8	36.9	40.8	547.8
1997	36.5	36.4	37.6	46.1	22.8	28.3	45.8	24.9	33.0	68.1	35.6	51.1	466.2
1998	31.9	32.4	21.7	13.2	19.5	8.0	12.9	24.1	207.2	353.5	76.1	35.3	825.6
1999	30.6	28.6	21.6	22.1	16.9	10.2	32.5	24.7	122.1	116.1	65.0	31.9	522.4
Media	34.5	31.9	23.7	22.9	24.6	37.6	65.8	48.3	99.5	100.6	47.8	33.8	571.1

Este cálculo se repite para cada día de cada año del registro. Posteriormente se a cada valor de gasto y volumen se le resta el valor medio para obtener el déficit o superávit, posteriormente se sigue el procedimiento descrito en el capítulo anterior para la obtención de la caracterización de la sequía hidrológica y los resultados son:

Año	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Qmax déficit (m ³ /s)	-135.9	-531.0	-28.2	-292.0	-11.6	-26.7	-231.0	-218.6	-149.6	-43.7
Vmax déficit (Mm ³)	-11.7	-45.9	-2.4	-25.2	-1.0	-2.3	-20.0	-18.9	-12.9	-3.8
Duración máx	62	205	24	129	24	42	129	91	80	47
Celda día inicio	438	441	505	431	447	449	455	455	405	445
Día inicio	85	88	132	58	74	76	82	82	32	72
Día final	126	272	155	186	97	117	210	172	111	118
k eventos	5	9	4	5	2	4	7	5	7	5
Tiempo de ocurrencia	96	170	144	122	86	97	146	127	72	95
Volumen déficit (Mm ³)	8.13	107.77	0.59	37.03	0.21	0.98	29.23	19.43	11.60	1.88

Año	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Qmax déficit (m ³ /s)	-100.5	-10.0	-56.5	-34.9	-39.9	-2.9	-1.3	-194.8	-73.1
Vmax déficit (Mm ³)	-8.7	-0.9	-4.9	-3.0	-3.5	-0.2	-0.1	-16.8	-6.3
Duración max	78	13	76	28	31	13	2	95	55
Celda día inicio	424	548	428	419	509	519	612	466	496
Día inicio	51	175	55	46	136	146	239	93	123
Día final	128	187	130	73	166	158	240	187	177
k eventos	4	2	4	4	3	3	1	6	3
Tiempo de ocurrencia	90	181	93	60	151	152	240	140	150
Volumen déficit D (Mm ³)	7.53	0.09	4.03	0.87	1.12	0.00	0.00	18.06	3.80

Del año de 1971 a 1980 no se observaron periodos de sequía importantes, es por esto que no se consideran para el cálculo. Los periodos mas significativos con gran escasez son del año de 1981 a 1984, 1987-1989, 1991-1993 y 1998.

$$Volumen = D(v) = -100.5[128 - 51] - \int_{51}^{128} 2.7t = 7531.5$$

$$Duración = T(v) = 128 - 51 = 78$$

$$Tiempodeocurrencia = \tau(v) = \frac{1}{2}[128 + 51] = 90$$

Al hacer el análisis de cada año, resulta la siguiente tabla:

AÑO	Eventos en el año	Volúmen déficit D(v) (Mm ³)	Día de inicio $\tau_{\beta}(v)$ (día en el año)	Día de término $\tau_{\rho}(v)$ (día en el año)	Duración T(v) (días)	Tiempo de ocurrencia $\tau(v)$ (día en el año)
1980	7	4.406	164	229	66	197
1981	5	8.127	65	126	62	96
1982	9	107.773	68	272	205	170
1983	4	0.587	132	155	24	144
1984	5	37.032	58	186	129	122
1985	2	0.205	74	97	24	86
1986	4	0.983	76	117	42	97
1987	7	29.226	82	210	129	146
1988	5	19.433	82	172	91	127
1989	7	11.601	32	111	80	72
1990	5	1.885	72	118	47	95
1991	4	7.532	51	128	78	90
1992	2	0.087	175	187	13	181
1993	4	4.031	55	130	76	93
1994	4	0.868	46	73	28	60
1995	3	1.117	136	166	31	151
1996	3	0.002	146	158	13	152
1997	1	0.001	239	240	2	240
1998	6	18.060	93	187	95	140
1999	3	3.801	123	177	55	150
MEDIA	4.4	13.3	95	158	64	127

De estos resultados se puede observar que al año se presentan entre 4 y 5 eventos con un volumen promedio de déficit acumulado de 13.3 Mm³, además el día de inicio corresponde a los primeros días abril con una duración aproximada de 2 meses, es decir, que culmina en los primeros días de junio. Con estos resultados se puede decir que las sequías son mensuales y se tiene una recuperación al inicio de la temporada de lluvias, sin embargo en el municipio de Ixmiquilpan se tiene un grave problema de contaminación de las corrientes superficiales, además de que este volumen es solamente una estimación del potencial que se puede extraer de la corriente, así que generalmente las sequías en el lugar se prolongan hasta el siguiente año lo que hace que su duración sea de 2 años.

A continuación se modela la muestra de máximo déficit, duración y tiempo de ocurrencia, el primer paso consiste en realizar las pruebas de homogeneidad e independencia con la muestra de los volúmenes medios anuales:

orden	año	V (Mm ²)	V - Vm
1	1980	4.41	-8.88
2	1981	8.13	-5.15
3	1982	107.77	94.49
4	1983	0.59	-12.69
5	1984	37.03	23.75
6	1985	0.21	-13.08
7	1986	0.98	-12.30
8	1987	29.23	15.94
9	1988	19.43	6.15
10	1989	11.60	-1.68
11	1990	1.88	-11.40
12	1991	7.53	-5.75
13	1992	0.09	-13.19
14	1993	4.03	-9.25
15	1994	0.87	-12.41
16	1995	1.12	-12.16
17	1996	0.00	-13.28
18	1997	0.00	-13.28
19	1998	18.06	4.78
20	1999	3.80	-9.48

A. Pruebas de homogeneidad

Prueba estadística de Helmer	
tamaño de la muestra	20
media de la muestra	12837.8
número de secuencias	
S	11
número de cambios	
C	8
tolerancia	4.4
S - C	3

Prueba estadística t de Student

tamaño de la muestra	20	tamaño de la submuestra	10
media de la muestra	12838	media de la submuestra	3738
n / 2	10	varianza	3.E+07
tamaño de la submuestra	10	estadístico t	2
media de la submuestra 1	21937	grados de libertad	18
varianza	1.E+09	alfa	0
		estadístico t tablas	2

En la primera prueba como $abs\ t < t\ tablas$ y en la segunda prueba $abs\ (S - C) < tolerancia$, entonces la serie es *homogénea*.

B. Prueba de independencia

Prueba de independencia de Anderson

orden	V (Mm ²)	V-Vm	(V1-Vm) * (V2-Vm)	(V1-Vm) * (V3-Vm)	(V1-Vm) * (V4-Vm)	(V1-Vm) * (V5-Vm)	(V1-Vm) * (V6-Vm)	(V-Vm) ²
1	4.41	-8.88	39721396	-800521815	103300218	-204008982	106521607	71103546
2	8.13	-5.15	-447204760	57707796	-113967897	59507397	55842966	22190023
3	107.77	94.49	-1163009205	2296842424	-1199277322	-1125426519	1555830953	9012703495
4	0.59	-12.69	-296387081	154756069	145226280	-200766143	-80791446	150075991
5	37.03	23.75	-305629829	-286809322	396495739	159556107	-29921867	585338808
6	0.21	-13.08	149755121	-207028979	-83310905	15623456	138362810	159582094
7	0.98	-12.30	-194278378	-78180668	14661373	129842508	62904852	140533287
8	29.23	15.94	108079826	-20268420	-179499052	-86961977	-208957999	268577564
9	19.43	6.15	-8156330	-72233235	-34994864	-84087978	-58081549	43493018
10	11.60	-1.68	13546039	6562655	15769182	10892146	14804120	1529572
11	1.88	-11.40	58119495	139653373	96461878	131106695	128377878	119965008
12	7.53	-5.75	67657925	46732925	63517313	62195282	68110661	28157175
13	0.09	-13.19	112292967	152623606	149446943	163660809	163668697	162572944
14	4.03	-9.25	105420724	103226528	113044381	113049829	-45988840	77563400
15	0.87	-12.41	140300906	153644895	153652300	-62505987	108172868	143283160
16	1.12	-12.16	150446974	150454226	-61205005	105921389	0	137380724
17	0.00	-13.28	164763894	-67026200	115995550	0	0	164755953
18	0.00	-13.28	-67029430	116001141	0	0	0	164771836
19	18.06	4.78	-47189438	0	0	0	0	27267673
20	3.80	-9.48	0	0	0	0	0	81666048
media	13.28							
suma		0.00E+00	-1.42E+09	1.85E+09	-3.05E+08	-8.12E+08	1.98E+09	1.16E+10

correlograma de la serie de alturas de precipitación			
k	limite inferior	r _k	limite superior
1	-0.490293	-0.122705	0.385030
2	-0.504516	0.159666	0.393405
3	-0.520000	-0.026351	0.402353
4	-0.536940	-0.070262	0.411940
5	-0.555577	0.171144	0.422243

El 10% de los valores r_k' no sobrepasan los límites de confianza, por lo tanto, la serie de volúmenes es independiente y sigue las leyes de la probabilidad.

A continuación, se procede a ajustar la muestra a las diferentes funciones de probabilidad para máximos y los resultados finales son:

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	18132.8		18132.8	
Lognormal	15036.9	12723.1	29909.0	16960.3
Gumbel	14841.3		28730.4	
Exponencial	12391.8	12252.1	16769.3	
Gamma	12854.2		13467.9	11111.0
Doble Gumbel	7969.7			
VOLUMEN				
Mínimo error estándar:			7969.7	
Calculado por la función:			<i>Doble Gumbel</i>	

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	16.795		16.795	
Lognormal	14.978	12.386	16.322	16.957
Gumbel	12.163		14.832	
Exponencial	12.739		10.578	
Gamma	12.093	49.990	10.770	11111.0
Doble Gumbel	12.137			
DURACIÓN				
Mínimo error estándar:			10.578	
Calculado por la función:			<i>Exponencial (max. ver.)</i>	

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	11.028		11.028	
Lognormal	10.132	9.722	9.503	9.369
Gumbel	10.026		9.090	
Exponencial	13.983	9.618	65.353	
Gamma	9.547		10.067	9.449
Doble Gumbel	12.463			
TIEMPO DE OCURRENCIA				
Mínimo error estándar:			9.090	
Calculado por la función:			<i>Gumbel (max. ver.)</i>	

Como en el caso del análisis meteorológico, se calculan los eventos de diseño según las correspondientes funciones de probabilidad elegidas.

Orden	Voumen (m³)	Duración (días)	Tiempo de ocurrencia (días)	Tr	P	Voumen (m³)	Duración (días)	Tiempo de ocurrencia (días)
	<i>ordenado</i>	<i>ordenado</i>	<i>ordenado</i>			<i>calculado</i>	<i>calculado</i>	<i>calculado</i>
1	107773.05	205	240	21.0	0.95	82474.41	196.37	220.63
2	37031.56	129	197	10.5	0.90	53257.95	151.66	194.12
3	29226.12	129	181	7.0	0.86	31748.87	125.51	178.19
4	19432.71	95	170	5.3	0.81	18962.44	106.96	166.55
5	18059.63	91	152	4.2	0.76	14126.28	92.56	157.24
6	11601.03	80	151	3.5	0.71	11452.81	80.8	149.39
7	8127.16	78	150	3.0	0.67	9597.34	70.86	142.5
8	7531.45	76	146	2.6	0.62	8156.26	62.25	136.31
9	4405.50	66	144	2.3	0.57	6960.09	54.65	130.62
10	4030.78	62	140	2.1	0.52	5921.76	47.85	125.28
11	3800.86	55	127	1.9	0.48	4989.79	41.71	120.21
12	1884.93	47	122	1.8	0.43	4130.54	36.1	115.31
13	1116.83	42	97	1.6	0.38	3319.62	30.93	110.51
14	983.11	31	96	1.5	0.33	2537.34	26.15	105.73
15	867.69	28	95	1.4	0.29	1765.56	21.7	100.88
16	587.24	24	93	1.3	0.24	984.82	17.54	95.87
17	205.21	24	90	1.2	0.19	170.09	13.63	90.54
18	87.38	13	86	1.2	0.14	56.13	9.94	84.64
19	2.06	13	72	1.1	0.10	1.04	6.46	77.65
20	1.44	2	60	1.1	0.05	0.35	3.15	68.12
Xm	12838	57	124			13031	60	129
S	25154	38	39			21171	52	39

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de ocurrencia	Déficit máximo (Mm³)	Duración máxima (días al año)	Tiempo de ocurrencia (día en el año)
2	0.5	5.44	44.71	122.72
5	0.2	17.66	103.81	164.54
10	0.1	50.92	148.52	192.23
20	0.05	80.57	193.22	218.79
50	0.02	114.47	252.33	253.16
100	0.01	138.75	297.03	278.93

De los resultados anteriores se observa que el periodo de retorno de 20 años con sus correspondientes valores de déficit, duración y tiempo de retorno es el que más se aproxima al mas probable del registro original ordenado que tiene un periodo de retorno de 21 años con una probabilidad ocurrencia del 5%, así que el siguiente evento mas severo y que se puede presentar en el municipio a mediano plazo corresponde a un periodo de retorno 50 años con los valores que se muestran en la tabla anterior. Sin embargo, según la periodicidad promedio calculada, indica que cada 4 años se presenta una sequía, entonces el interés se centra para el valor con un periodo de retorno de 5 años que es de 17.66 Mm³ de déficit anual.

El siguiente cálculo corresponde a la caracterización mensual de la sequía por el método de Mohan. Para este método se requieren de datos medios mensuales del volumen de escurrimiento que se obtuvieron a partir de la suma de los medios diarios:

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1971	27.1	16.2	17.3	15.7	19.5	61.2	60.4	50.3	117.6	224.4	36.0	35.9
1972	19.2	28.4	17.4	19.4	21.1	68.8	59.0	52.3	34.6	33.3	31.5	35.9
1973	29.7	18.3	19.8	18.3	25.7	39.2	185.3	255.7	151.9	92.0	58.9	28.1
1974	36.2	28.9	23.0	21.3	22.8	44.8	224.0	28.9	153.3	74.1	45.8	38.4
1975	54.7	28.9	22.9	24.4	53.8	102.8	122.8	97.0	201.9	53.4	43.7	37.9
1976	47.0	36.3	41.5	41.7	38.8	27.9	96.7	118.8	191.1	368.2	90.7	73.2
1977	46.4	31.4	28.7	30.8	42.3	29.9	29.1	30.9	37.1	39.0	40.9	29.6
1978	40.6	35.9	37.8	28.6	26.7	39.8	29.2	36.6	40.4	207.7	57.0	41.7
1979	33.4	33.4	21.4	31.3	29.5	34.4	29.4	26.9	121.7	21.4	40.0	41.1
1980	41.4	28.0	27.0	27.1	41.0	19.3	18.1	18.6	14.2	20.6	26.1	22.2
1981	40.1	26.9	18.2	18.3	30.6	79.9	148.6	27.9	74.4	71.6	62.5	32.0
1982	26.0	27.6	18.3	17.0	25.9	4.4	9.8	4.7	6.3	22.3	11.0	15.4
1983	33.4	33.4	22.9	24.4	30.6	79.9	60.4	50.3	153.3	74.1	26.5	32.7
1984	23.9	18.8	11.5	6.2	11.8	14.3	32.8	11.8	305.9	38.7	30.5	26.1
1985	34.0	25.9	16.3	40.2	26.5	38.8	98.5	54.8	27.3	24.3	20.4	27.5
1986	24.7	24.8	16.2	22.0	21.4	77.0	30.8	19.2	27.6	47.7	40.2	26.8
1987	29.8	29.4	19.7	13.6	10.4	18.5	13.7	11.5	14.4	21.9	26.3	26.2
1988	30.1	26.1	24.2	18.4	14.3	6.1	20.0	24.1	68.2	20.7	26.5	32.7
1989	28.3	31.9	22.1	18.1	16.9	18.7	16.0	31.1	26.8	17.8	19.2	32.9
1990	24.0	24.6	16.9	12.3	19.3	28.1	32.1	25.8	162.5	89.7	25.4	20.4
1991	23.8	24.5	14.5	11.9	13.9	28.4	349.1	38.4	40.0	155.2	89.2	32.8
1992	40.6	94.1	32.1	28.1	31.2	91.4	21.3	55.7	72.8	331.3	187.3	41.1
1993	36.3	39.4	16.5	26.0	20.0	16.1	49.0	15.7	92.2	71.6	45.9	35.7
1994	33.2	27.7	38.4	21.7	21.1	36.1	25.8	61.9	177.6	115.9	43.4	22.4
1995	44.6	36.3	35.9	24.3	20.1	15.3	27.0	150.5	92.7	41.9	66.5	32.0
1996	53.6	51.2	25.9	22.8	19.9	23.4	25.3	27.5	116.6	103.8	36.9	40.8
1997	36.5	36.4	37.6	46.1	22.8	28.3	45.8	24.9	33.0	68.1	35.6	51.1
1998	31.9	32.4	21.7	13.2	19.5	8.0	12.9	24.1	207.2	353.5	76.1	35.3
1999	30.6	28.6	21.6	22.1	16.9	10.2	32.5	24.7	122.1	116.1	65.0	31.9

En primer lugar es necesario calcular los siguientes factores:

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media
Media	34.5	31.9	23.7	22.9	24.6	37.6	65.8	48.3	99.5	100.6	47.8	33.8	
Varianza	80.5	190.4	64.9	82.1	95.7	742.3	5835.7	2635.5	5607.1	10297.3	1074.1	113.1	
CV	0.26	0.43	0.34	0.39	0.40	0.72	1.16	1.06	0.75	1.01	0.69	0.31	
T	32.19	25.97	20.98	19.37	20.75	17.90	-22.94	-6.26	44.12	-1.70	25.26	30.43	17.2
W	0.19	0.16	0.13	0.12	0.13	0.11	-0.13	-0.03	0.26	0.00	0.15	0.16	

Se ejemplifica con el cálculo para el mes de enero:

$$T(\tau) = \bar{V}(\tau) - \frac{\sigma_{\tau}^2}{\bar{V}(\tau)} = 34.5 - \frac{80.5}{34.5} = 32.19$$

$$W(\tau) = 0.1 \left[\frac{1 + T(\tau)}{\sum_{t=1}^{12} T(\tau)/12} \right] = 0.1 \left[\frac{1 + 32.19}{17.2} \right] = 0.19$$

La serie efectiva se obtiene con las siguientes expresiones.

$$E_{\mu,\tau} = V_{\mu,\tau} + S_{\mu,\tau} W(\tau)$$

$$S_{\mu,\tau} = E_{\mu,\tau-1} - T(\tau-1)$$

$$E_{\mu,\tau} = V_{\mu,\tau} + [E_{\mu,\tau-1} - T(\tau-1)] * W(\tau) = 16.2 + [27.1 - 32.19] * 0.16 = 15.4$$

El ejemplo se realizó para el año de 1971 y el mes de febrero; pero para el mes de enero del mismo año, el valor inicial de V es igual al efectivo E ya que S es igual a cero. Con el procedimiento anterior se calcula toda la serie:

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1971	27.1	15.4	15.9	15.1	19.0	61.0	54.9	48.0	131.8	224.0	70.5	44.2
1972	19.2	26.4	17.5	19.0	21.1	68.9	52.5	50.0	49.4	33.2	36.8	38.0
1973	29.7	17.9	18.8	18.0	25.5	39.7	182.5	249.4	219.1	91.3	73.1	36.9
1974	36.2	29.5	23.5	21.6	23.0	45.0	220.5	21.4	160.6	73.6	57.3	44.2
1975	54.7	32.4	23.7	24.7	54.5	106.5	111.5	92.9	228.0	52.6	52.0	42.8
1976	47.0	38.6	43.1	44.3	42.0	30.2	97.2	115.1	223.0	367.5	147.2	95.5
1977	46.4	33.6	29.7	31.8	43.9	32.5	27.3	29.4	46.4	39.0	47.1	33.6
1978	40.6	37.3	39.3	30.8	28.1	40.7	26.3	35.1	51.3	207.7	89.0	53.4
1979	33.4	33.6	22.4	31.4	31.1	35.6	27.2	25.4	130.1	21.1	43.5	44.4
1980	41.4	29.5	27.5	27.9	42.0	21.7	17.6	17.4	20.4	20.7	29.5	23.0
1981	40.1	28.1	18.5	18.0	30.4	81.0	140.6	22.9	82.1	71.4	73.7	40.9
1982	26.0	26.7	18.4	16.7	25.6	4.9	11.4	3.7	8.9	22.4	14.7	13.5
1983	33.4	33.6	23.9	24.8	31.3	81.1	52.3	48.0	167.6	73.6	38.1	35.1
1984	23.9	17.5	10.5	4.9	9.9	13.1	33.5	10.1	310.2	35.7	36.3	28.1
1985	34.0	26.2	16.3	39.6	29.0	39.7	95.8	51.1	42.4	24.3	24.4	27.4
1986	24.7	23.7	15.9	21.4	21.7	77.1	23.2	17.8	33.9	47.8	47.8	31.0
1987	29.8	29.1	20.1	13.5	9.6	17.3	13.7	10.3	18.8	22.0	29.9	27.1
1988	30.1	25.8	24.2	18.8	14.3	5.4	21.6	22.7	75.9	20.6	29.9	33.6
1989	28.3	31.3	22.8	18.3	16.8	18.3	16.0	29.9	36.3	17.8	22.2	32.3
1990	24.0	23.5	16.6	11.8	18.3	27.8	30.9	24.2	170.5	89.2	39.3	22.9
1991	23.8	23.2	14.2	11.1	12.9	27.5	347.9	27.1	48.7	155.2	93.2	45.2
1992	40.6	95.4	41.0	30.5	32.6	92.7	11.7	54.6	88.8	331.1	238.2	80.0
1993	36.3	40.0	18.3	25.7	20.8	16.1	49.3	13.5	97.4	71.3	57.1	41.5
1994	33.2	27.8	38.7	23.8	21.7	36.2	23.4	60.5	195.2	115.3	61.3	29.0
1995	44.6	38.2	37.5	26.2	21.0	15.3	27.4	149.0	133.5	41.5	73.1	40.7
1996	53.6	54.6	29.5	23.8	20.5	23.4	24.6	26.1	125.1	103.5	53.0	45.9
1997	36.5	37.1	39.1	48.3	26.4	29.0	44.4	22.8	40.7	68.1	46.2	54.9
1998	31.9	32.3	22.5	13.4	18.8	7.7	14.2	23.0	214.8	352.8	130.3	54.5
1999	30.6	28.4	22.0	22.2	17.2	9.8	33.5	22.9	129.8	115.8	82.9	42.5

El siguiente paso es calcular la serie periódica mensual de déficits y superávits con la expresión:

$$D_{\mu,\tau} = E_{\mu,\tau} - T(\tau) = 27.1 - 32.19 = -5.08$$

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1971	-5.08	-10.60	-5.05	-4.22	-1.75	43.07	77.86	54.21	87.72	225.73	46.25	13.76
1972	-12.95	0.44	-3.50	-0.36	0.32	50.96	75.42	56.23	5.26	34.93	11.59	7.55
1973	-2.52	-8.09	-2.17	-1.32	4.76	21.85	205.41	255.68	174.96	93.02	47.87	6.44
1974	3.97	3.57	2.48	2.24	2.30	27.14	243.48	27.66	116.49	75.31	32.08	13.80
1975	22.53	6.45	2.74	5.37	33.77	88.80	134.44	99.15	183.85	54.33	26.71	12.32
1976	14.80	12.66	22.12	24.97	21.23	12.31	120.11	121.38	178.88	369.17	121.90	65.04
1977	14.23	7.68	8.72	12.46	23.18	14.55	50.22	35.63	2.30	40.72	21.85	3.15
1978	8.43	11.28	18.29	11.39	7.37	22.75	49.22	41.39	7.16	209.39	63.71	22.93
1979	1.18	7.63	1.44	12.06	10.33	17.68	50.09	31.62	85.94	22.79	18.19	13.95
1980	9.18	3.52	6.52	8.54	21.29	3.75	40.52	23.63	-23.75	22.44	4.23	-7.45
1981	7.94	2.13	-2.50	-1.33	9.67	63.11	163.49	29.19	37.95	73.13	48.41	10.47
1982	-6.15	0.71	-2.54	-2.66	4.85	-13.00	34.37	9.94	-35.25	24.10	-10.61	-16.95
1983	1.18	7.63	2.89	5.39	10.52	63.20	75.28	54.29	123.49	75.28	12.79	4.63
1984	-8.26	-8.46	-10.52	-14.44	-10.81	-4.82	56.40	16.36	266.12	37.35	10.99	-2.35
1985	1.86	0.25	-4.68	20.23	8.29	21.78	118.69	57.41	-1.73	26.00	-0.88	-3.07
1986	-7.46	-2.31	-5.07	2.00	0.92	59.25	46.17	24.06	-10.22	49.48	22.52	0.52
1987	-2.38	3.09	-0.93	-5.87	-11.12	-0.60	36.68	16.60	-25.31	23.66	4.64	-3.36
1988	-2.08	-0.17	3.22	-0.54	-6.48	-12.48	44.54	28.98	31.73	22.30	4.69	3.14
1989	-3.89	5.35	1.85	-1.03	-3.99	0.40	38.93	36.14	-7.81	19.49	-3.09	1.87
1990	-8.20	-2.51	-4.40	-7.55	-2.42	9.94	53.81	30.42	126.36	90.87	14.02	-7.50
1991	-8.34	-2.81	-6.80	-8.29	-7.87	9.64	370.79	33.33	4.61	156.92	67.92	14.81
1992	8.38	69.46	19.99	11.12	11.84	74.78	34.65	60.88	44.63	332.78	212.93	49.60
1993	4.08	14.03	-2.66	6.30	0.01	-1.78	72.19	19.75	53.24	73.04	31.84	11.10
1994	1.01	1.87	17.70	4.42	0.93	18.33	46.38	66.77	151.06	117.00	36.03	-1.39
1995	12.42	12.25	16.53	6.86	0.23	-2.56	50.31	155.25	89.41	43.19	47.84	10.29
1996	21.38	28.62	8.56	4.45	-0.23	5.47	47.52	32.35	81.01	105.20	27.74	15.45
1997	4.30	11.15	18.07	28.91	5.68	11.06	67.32	29.06	-3.45	69.77	20.99	24.48
1998	-0.34	6.34	1.56	-5.96	-1.97	-10.17	37.12	29.22	170.71	354.49	105.05	24.05
1999	-1.56	2.41	0.97	2.85	-3.50	-8.13	56.48	29.21	85.69	117.49	57.67	12.07
SUMA DÉFICITS	69.20	34.95	50.81	53.61	50.14	53.55	0.00	0.00	107.52	0.00	14.58	42.08
T	32.19	58.16	79.14	98.51	119.25	137.16	114.22	107.96	152.08	150.39	175.65	206.08

Ahora, el siguiente cálculo es el déficit medio mensual y anual, y la escala para la estimación de la sequía:

$$DMM = \frac{\sum_{r=1}^{12} D_{\mu,r}}{NA} = \frac{69.20}{29} = 2.39$$

$$MMM = \max T = 44.12$$

$$x = \frac{DMA - MMM}{11} = \frac{16.43 - 44.12}{11} = -2.517$$

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Juño	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
DMM	2.39	1.21	1.75	1.85	1.73	1.85	0.00	0.00	3.71	0.00	0.50	1.45
DMA	16.43											
MMM	44.12			X = -2.517								

El primer valor de la escala es *MMM* y los siguientes se calculan como *MMM+nx*, para *n=1* hasta 11.

Escala para estimación de la sequía hidrológica

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
44.12	41.60	39.09	36.57	34.05	31.53	29.02	26.50	23.98	21.46	18.95	16.43

Se calculan los volúmenes acumulados al sumar mes a mes únicamente los déficits:

Año	1	2	3	4	5	6	7
1971	5.08	15.68	20.74	24.96	26.71		
1972	12.95	16.44	16.80				
1973	2.52	10.60	12.77	14.10			
1980	23.75	31.20					
1981	2.50	3.83					
1982	6.15	8.69	11.35	24.35	59.60	70.21	87.16
1984	8.26	16.72	27.24	41.68	52.50	57.32	59.67
1985	4.68	6.41	7.29	10.36			
1986	7.46	9.77	14.84	25.06			
1987	2.38	3.31	9.17	20.29	20.89	46.20	49.56
1988	2.08	2.25	2.79	9.27	21.75		
1989	3.89	4.91	8.90	16.72	19.81		
1990	8.20	10.71	15.11	22.66	25.08	32.59	
1991	8.34	11.15	17.95	26.25	34.11		
1993	2.66	4.43					
1994	1.39						
1995	2.56						
1996	0.23						
1997	3.45						
1998	0.34	6.32	8.29	18.46			
1999	1.56	5.06	13.20				

Para realizar la caracterización se hace la prueba secuencial que cumpla con los requisitos que se mencionaron en el apartado 4.5.

Año	Inicio (mes)	Final (mes)	Duración (meses)	Magnitud potencial (Mm ²)	Magnitud real (Mm ²)	Intensidad	Severidad
1980	septiembre	diciembre	4	31.2	4.53	0.8	3.2
1981	enero	julio	7	3.83	3.83	0.34	2.38
1982	enero	diciembre	12	87.16	13.19	1.24	14.88
1983	enero	abril	4	0.84	1.49	0.21	0.84
1984	enero	julio	7	59.67	57.32	4.85	33.95
1985							0
1986	enero	junio	6	25.06	11.92	1	8
1987	enero	junio	6	49.56	20.89	1.76	10.56
1988	enero	agosto	8	21.75	18.53	1.56	12.48
1989							0
1990	enero	julio	7	32.59	15.14	1.28	8.98
1991	enero	agosto	8	34.11	24.47	2.07	16.56
1998	enero	septiembre	9	18.46	10.56	0.68	6.12
Media			6.9	34.577	17.131	1.511	10.981

Se observa que existieron un total de 11 periodos de sequías de un total de 19 años. El valor máximo se presenta en el año de 1982.

La magnitud potencial representa únicamente la suma de todos los déficits a lo largo del año y la magnitud real incluye las recuperaciones entre la duración del total de periodo. Por ejemplo, en el año de 1982 el periodo de sequía tuvo una duración de 12 meses pero solamente 7 meses presentaron déficit, el acumulado representa la magnitud potencial y la real entonces considera los 5 meses en los que existió superávit.

En general se observa que las sequías en el municipio de Ixmiquilpan comienzan al final del año o en el primer mes de cada año, es decir, después de finalizar la temporada de lluvias y concluyen en los meses de julio y agosto o al inicio de la temporada de lluvias, tienen una duración promedio de 7 meses, sin embargo, esto no quiere decir que en el verano siempre se cuente con el volumen suficiente de agua para abastecer las necesidades del municipio, sobre todo en la demanda agrícola, ya que en estos meses es cuando se incrementa la demanda de agua para uso doméstico lo que reduce el volumen disponible para uso agrícola. Así que se obtiene agua para abastecer el campo de los pozos lo que agudiza el problema de la sobreexplotación de los mantos acuíferos. Además aunque aparentemente se cuenta con suficiente agua para las diferentes demandas, como se trata de agua que se extrae de las corrientes superficiales, esta se encuentra muy contaminada y no es apta para el uso al cual se le quisiera destinar, este es otro motivo por el cual se emplean los pozos.

Al comparar los resultados obtenidos del análisis anual y mensual se observa que en el caso del análisis anual se detecta el inicio de la sequía hasta que el déficit de agua sea muy severo y esto es en el mes de abril, en cambio con un análisis mensual, que es mas detallado, se puede observar que en realidad el déficit comienza desde el mes de enero, en ambos casos se detecta la finalización del periodo de sequía entre los meses de junio y julio. Así mismo con el análisis mensual, el volumen en déficit es mayor y este es el que se toma para fines de planeación ya que es el más severo. Sin embargo en el análisis de valores máximos, se nota que el volumen en déficit se incrementa considerablemente así como la duración que se extiende hasta el segundo año, como, esto es en ambos análisis. Con lo anterior se debe de tomar en cuenta tanto los valores medio como los valores máximos de cada análisis para planificar correctamente en el municipio.

Análisis	Valor	Inicio (mes)	Final (mes)	Duración (meses)	Magnitud real (Mm ³)
Anual	Media	abril	junio	2	13.28
	Máximo	marzo	octubre	12	107.77
Mensual	Media	enero	julio	7	17.13
	Máximo	enero	diciembre	12	57.32

Finalmente como en el caso del análisis meteorológico, se hizo uso de técnicas estocásticas para obtener un registro sintético mayor y así contar con datos para pronosticar eventos a futuro. Para esto se utilizó el modelo PAR(2) con los datos del registro de volumen de escurrimiento medio mensual que generó 10,000 muestras sintéticas a partir de las cuales se hace la caracterización de la sequía mensual por medio del método de Mohan. Los resultados se muestran en el anexo.

A. Factores para el método de Mohan

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Media	34.2	31.5	23.7	22.9	24.7	38.5	66.6	47.2	121.8	106.7	48.4	35.1
Varianza	63.6	110.7	76.4	96.7	102.4	1272.5	8294.2	1585.7	25684.8	15361.0	850.4	129.1
CV	0.23	0.33	0.37	0.43	0.41	0.93	1.37	0.84	1.32	1.16	0.60	0.32
T	32.32	28.00	20.45	18.73	20.51	5.39	-58.00	13.67	-89.21	-37.21	30.80	31.47
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00

B. Déficit medio mensual y anual

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
DMM	22.61	23.60	17.50	17.68	17.37	0.25	0.00	4.32	0.00	0.00	26.13	24.73
DMA	154.19											
MMM =	32.32		X =		11.079							

C. Escala para estimación de la sequía hidrológica

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
32.32	57.76	76.95	102.39	127.83	153.26	178.70	204.14	229.58	255.02	280.46	305.90

El análisis de los resultados indica que la probabilidad de que se presente una sequía en el municipio de Ixmiquilpan es del 67.5 % con una duración promedio de 7.3 meses, es decir, de 7 meses y 1 semana. Así mismo los meses de inicio y finalización del periodo de sequía se presentan a continuación:

La probabilidad de que la sequía inicie en un determinado mes:

Mes	%	Mes	%
Enero	23.5	Julio	3.3
Febrero	13.1	Agosto	4.2
Marzo	7.2	Septiembre	5.1
Abril	6.4	Octubre	6.1
Mayo	2.6	Noviembre	9.8
Junio	1.4	Diciembre	17.3

La probabilidad de que la sequía inicie y termine en un determinado periodo:

Inicio	Término	Probabilidad
Noviembre	Mayo	38%
Diciembre	Junio	52%
Enero	Julio	65%

Por último se cuantificó la magnitud de la sequía y los resultados indican lo siguiente:

Potencial (Mm³)	54.2
Real (Mm³)	22.5

Al analizar estos últimos resultados que se generaron a partir de las muestras sintéticas y se comparan con los obtenidos del registro real, se observa que duración y magnitud son mayores en el primer caso lo que indica que es mas adversa la sequía y para fines de planeación se debe tomar la decisión de usar los valores máximos o los reales y depende del grado de seguridad y de los aspectos económicos que se involucran al no disponer hipotéticamente con un déficit de esa magnitud sobre todo en el ámbito agropecuario. En este caso, para el municipio de Ixmiquilpan que es uno de los municipios mas importantes del estado de Hidalgo se usan los valores calculados a partir de la muestra histórica puesto que esto implica un gasto menor para el municipio y esto es debido a que la situación económica del país no considera de gran importancia al destinar recursos al ámbito de protección civil sobre todo en la prevención, sin embargo, se tiene registrado cual es el valor máximo que se puede presentar en el sitio y se tomarán las medidas operativas y reactivas en el momento que ocurra este evento.

5.5.3. Análisis económico

El municipio de Ixmiquilpan es afectado por la ocurrencia de sequías que pone en riesgo todas las actividades productivas sobre todo el sector agrícola, así que la economía del municipio se encuentra en riesgo ya que de la agricultura se generan la mayoría de los empleos directos e indirectos.

En el sector agrícola los principales cultivos son el maíz y la alfalfa, ambos dependen tanto del riego controlado como el de temporal. Cerca del 50% de los terrenos cultivables no es sembrada por ningún cultivo, ya que esta en reposo,

se encuentra en disputa o simplemente no esta en uso; de la superficie restante, se usan cerca de 4,750 hectáreas para el cultivo del maíz, donde el 75% es de riego y 5,600 hectáreas se destinan para el cultivo de la alfalfa. A continuación se presentan los datos registrados en el año 2000 para los principales cultivos del municipio:

Característica		Superficie sembrada (ha)			Superficie cosechada (ha)			Índice
Tipo	Cultivo	Total	Riego	Temporal	Total	Riego	Temporal	
Cíclico	Maíz	4,748	3,510	1,238	4,677	3,510	1,167	0.98
	Frijol	919	110	809	876	110	766	0.95
	Chile verde	140	140	0	140	140	0	1.00
	Tomate	295	295	0	295	295	0	1.00
Perenne	Alfalfa	5,366	5,366	0	5,366	5,366	0	1.00
	Magüey pulquero	88	0	88	50	0	50	0.57
	Manzana	40	0	40	40	0	40	1.00

Característica		Volumen cosechado (ton)			Valor (miles \$)		
Tipo	Cultivo	Total	Riego	Temporal	Total	Riego	Temporal
Cíclico	Maíz	28,897	28,080	817	43,395	42,120	1,225
	Frijol	472	166	306	5,664	1,998	3672
	Chile verde	840	840	0	5880	5880	0
	Tomate	2,360	2,360	0	8,732	8,732	0
Perenne	Alfalfa	593,262	593,262	0	70,004	70,004	0
	Magüey pulquero	7,500	0	7,500	18,750	0	18,750
	Manzana	560	0	560	3,360	0	3,360

En seguida, se presentan los valores históricos de producción de alfalfa verde y de maíz en grano comparado con el volumen de escurrimiento y la precipitación.

Se observa que los años marcados en negrita son los que presentan los índices y rendimientos mínimos, esto lleva a un precio en el mercado también bajo. En los años de 1977, 1984 y 1993 es cuando las precipitaciones y volúmenes de escurrimientos fueron muy bajos y representaron periodos de sequía, estos coinciden con baja productividad e importantes pérdidas económicas. Algo muy significativo es que a pesar de que se presentaban periodos de sequía, los cultivos de riego no presentaron bajos rendimientos, ya que el agua demandada es bombeada desde pozos. Sin embargo, la baja humedad en el medio ambiente, no permite el buen desarrollo de estos cultivos y por eso es que la superficie cosechada es menor.

CULTIVO: MAÍZ GRANO DE RIEGO

Año	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Índice	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Precio (\$/ton)	Valor producción (miles \$)	Precipitación (mm)	Volúmen (Mm³)
1977	1479	828	0.56	5324.5	6.43	2.7	14.36	202.8	416.2
1978	1911	1548	0.81	12623.3	8.15	2.7	34.04	316.8	622.1
1979	1933	1353	0.70	9699.6	7.17	3.6	34.87	334.4	464.0
1980	1498	1298	0.87	9933.2	7.65	5.4	53.57	306.1	303.6
1981	1773	1560	0.88	11679.5	7.49	7.2	83.98	567.2	631.1
1984	1882	960	0.51	6908.9	7.20	27.9	192.49	182	530.4
1985	2087	1810	0.87	14442.7	7.98	45.8	662.01		434.5
1989	1960	1653	0.84	12101.7	7.32	470.0	5687.80		279.9
1990	4122	4040	0.98	32922.4	8.15	483.0	15901.53		481.2
1991	2248	1956	0.87	14173.7	7.25	540.0	7653.81		801.8
1992	2493	2185	0.88	13544.7	6.20	670.0	9074.94		1026.8
1993	3201	1472	0.46	9659.3	6.66	670.0	6471.76		464.3
1994	2161	1851	0.86	14647.9	7.91	615.0	9008.46		625.4
1995	2043	1766	0.86	13624.3	7.72	850.0	11580.63		587.1
1996	2225	1927	0.87	14302.7	7.42	1230.0	17592.35		547.8
1997	2000	1710	0.86	12366.4	7.23	1090.0	13479.37		466.2
1998	2038	1721	0.84	12817.9	7.45	1367.0	17522.47		835.6
1999	2038	1668	0.82	13357.5	8.01	1340.0	17899.01		522.4
2000	3510	3084	0.88	23441.1	7.60	1410.0	33051.91		
2001	3510	3510	1.00	28080.0	8.00	1500.0	42120.00		
2002	3394	2783	0.82	27357.7	9.83	1550.0	42404.40		
MEDIA	2357	1937	0.81	14905.2	7.56	660.97	11929.70	318.22	557.81

CULTIVO: MAÍZ GRANO DE TEMPORAL

Año	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Índice	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Precio (\$/ton)	Valor producción (miles \$)	Precipitación (mm)	Volúmen (Mm³)
1977	1516	0	0.00	0.0	0.23	2.2	0.00	202.8	416.2
1978	1925	674	0.35	184.0	0.27	2.2	0.41	316.8	622.1
1979	1246	536	0.43	233.0	0.43	2.2	0.52	334.4	464.0
1980	292	99	0.34	52.6	0.53	4.5	0.23	306.1	303.6
1981	450	405	0.90	212.8	0.53	5.9	1.26	567.2	631.1
1984	345	35	0.10	16.3	0.47	25.3	0.41	182	530.4
1985	274	63	0.23	31.0	0.49	46.8	1.45		434.5
1989	254	56	0.22	13.4	0.24	392.1	5.26		279.9
1990	209	209	1.00	135.8	0.65	454.5	61.72		481.2
1991	215	67	0.31	31.9	0.48	537.0	17.13		801.8
1992	202	51	0.25	17.7	0.35	603.0	10.66		1026.8
1993	217	0	0.00	0.0	0.22	603.0	0.00		464.3
1994	401	180	0.45	104.6	0.58	550.0	57.54		625.4
1995	457	151	0.33	98.4	0.65	720.0	70.88		587.1
1996	560	286	0.51	175.0	0.61	1330.0	232.78		547.8
1997	850	366	0.43	220.4	0.60	1150.0	253.41		466.2
1998	987	563	0.57	310.2	0.55	1285.0	398.65		835.6
1999	1110	466	0.42	336.4	0.72	1380.0	464.23		522.4
2000	1238	1164	0.94	851.8	0.73	1500.0	1277.69		
2001	1238	1164	0.94	814.6	0.70	1500.0	1221.91		
2002	1304	287	0.22	200.8	0.70	1550.0	311.26		
MEDIA	728	325	0.43	192.4	0.51	649.7	208.92	318.22	557.81

CULTIVO: ALFALFA VERDE DE RIEGO

Año	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Índice	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Precio (\$/ton)	Valor producción (miles \$)	Precipitación (mm)	Volúmen (Mm ³)
1969	1775	1740	0.98	109792.8	63.1	0.1	11.8	336.6	
1970	2092	1841	0.88	133116.4	72.3	0.1	15.6	273.5	
1971	2370	2133	0.90	143136.1	67.1	0.2	22.4	284.2	681.6
1972	2514	2212	0.88	99990.6	45.2	0.1	8.8	276.4	421.0
1973	2514	2514	1.00	111111.9	44.2	0.1	9.8	482.1	922.9
1974	2772	2634	0.95	112199.4	42.6	0.1	14.2	293	741.4
1975	2629	2629	1.00	147999.3	56.3	0.1	18.8	461.3	844.2
1976	2442	2442	1.00	188035.5	77.0	0.1	23.9	482.5	1173.9
1977	2586	1810	0.70	157467.1	87.0	0.2	32.3	202.8	416.2
1978	2828	2602	0.92	247205.0	95.0	0.6	159.3	316.8	622.1
1979	2746	2609	0.95	229565.6	88.0	0.2	44.8	334.4	464.0
1980	3014	2743	0.91	249589.3	91.0	0.3	73.1	306.1	303.6
1981	3245	3245	1.00	301785.0	93.0	0.6	176.8	567.2	631.1
1984	3367	2189	0.65	164797.8	75.3	1.0	160.9	182	530.4
1985	3481	2541	0.73	196429.3	77.3	3.0	589.3		434.5
1989	3972	3892	0.98	381431.0	98.0	22.0	8391.5		279.9
1990	3824	3824	1.00	386988.8	101.2	34.0	13157.6		481.2
1991	4021	4021	1.00	390453.1	97.1	44.0	17179.9		801.8
1992	4222	4222	1.00	388816.4	92.1	61.0	23717.8		1026.8
1993	3479	2992	0.86	249527.8	83.4	85.0	21198.6		464.3
1994	3567	2675	0.75	256021.4	95.7	124.0	31750.4		625.4
1995	4126	3796	0.92	373518.5	98.4	77.0	28760.9		587.1
1996	4366	4366	1.00	427886.3	98.0	56.0	23961.6		547.8
1997	4538	4538	1.00	507395.5	111.8	185.0	93868.2		466.2
1998	5105	5105	1.00	515616.4	101.0	140.0	72186.3		835.6
1999	5062	5062	1.00	492000.3	97.2	110.0	54120.0		522.4
2000	5366	5366	1.00	547332.0	102.0	128.0	70058.5		
2001	5366	5366	1.00	593265.0	110.6	118.0	70005.3		
2002	5676	5676	1.00	619251.6	109.1	132.0	81741.2		
MEDIA	3554	3337	0.9	300749.2	85.2	45.6	21084.8	342.8	617.7

En cambio, el maíz de temporal en periodos de sequía presenta tanto índices como rendimientos muy bajos que llegan hasta la pérdida total de la cosecha.

A partir del año de 1977 se comenzaron a utilizar sistemas de riego y el cultivo de la alfalfa comenzó a tener gran importancia, en los años en que se dependía de las lluvias de temporal, las pérdidas eran grandes al presentarse periodos de sequía.

Se presentan los valores medios y máximos los cuales sirven para calcular los índices, productividad del cultivo dependiendo de la precipitación y pérdidas económicas que representan.

VALOR	CULTIVO	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Índice	Producción (ton)
MEDIA	ALFALFA	3554	3337	0.9	300749
	MAIZ RIEGO	2357	1937	0.8	14905
	MAIZ TEMPORAL	728	325	0.4	192
MAXIMO	ALFALFA	5676	5676	1.00	619252
	MAIZ RIEGO	3510	3510	1.00	28080
	MAIZ TEMPORAL	1238	1164	0.94	852

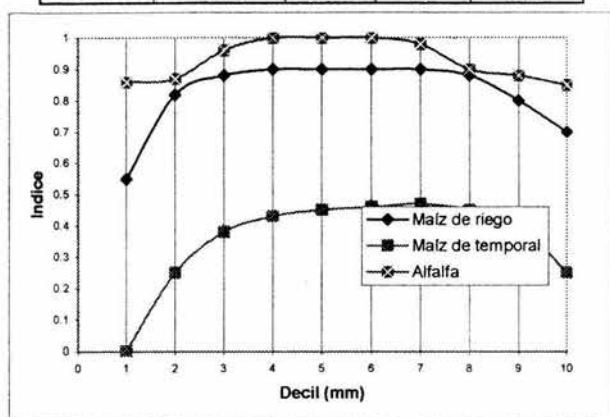
VALOR	CULTIVO	Rendimiento (ton/ha)	Precio (\$/ton)	Valor producción (miles \$)
MEDIA	ALFALFA	85.17	49	22951
	MAIZ RIEGO	7.56	661	11930
	MAIZ TEMPORAL	0.51	650	209
MAXIMO	ALFALFA	109.1	132	81741
	MAIZ RIEGO	8.00	1500	42120
	MAIZ TEMPORAL	0.73	1500	1278

En el siguiente gráfico se muestra el valor de los índices de productividad con respecto a la lluvia. Estos valores se obtuvieron al comparar años tras año la precipitación presentada con los índices.

Posteriormente se calculan los valores de productividad máximos y las ganancias potenciales que en el municipio se pueden obtener, a partir de los valores medios y máximos que se han registrado:

Cultivo	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Índice	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Precio (\$/ton)	Valor producción (miles \$)
Maiz temporal	1300	780	0.6	546.0	0.7	1500	819
Maiz negro	3400	3060	0.9	30000.0	9.8	1550	46500
Alfalfa	5676	5676	1.0	619251.6	109.1	132	81741

DECIL	Precipitación (mm)	INDICE		
		Alfalfa	Maíz riego	Maíz temporal
1	241.59	0.86	0.55	0
2	301.18	0.87	0.82	0.25
3	360.77	0.96	0.88	0.38
4	420.36	1	0.9	0.43
5	479.95	1	0.9	0.45
6	539.54	1	0.9	0.46
7	599.13	0.98	0.9	0.47
8	658.72	0.9	0.88	0.45
9	718.31	0.88	0.8	0.4
10	777.9	0.85	0.7	0.25



Con estos resultados y con los índices calculados dependiendo de la lluvia presente se obtiene la productividad de cada cultivo con los impactos provocados, es decir, superficie siniestrada y pérdidas económicas.

CULTIVO: MAÍZ GRANO DE RIEGO

Tipo	Precipitación (mm)	Índice	Superficie cosechada (ha)	Producción (ton)	Valor producción (miles \$)	Superficie siniestrada (ha)	PÉRDIDAS ECONÓMICAS (miles \$)
tr = 50 años	187.5	0.55	1870	18382.1	28492	1530	18008
tr = 20 años	214.8	0.6	2040	20053.2	31082	1360	15418
decil 1	241.6	0.68	2312	22727.0	35227	1088	11273
tr = 5 años	278.3	0.8	2720	26737.6	41443	680	5057
tr = 2 años	364.5	0.88	2992	29411.4	45588	408	912
MEDIA	386	0.9	3060	30000.0	46500	340	0

CULTIVO: MAÍZ GRANO DE TEMPORAL

Tipo	Precipitación (mm)	Índice	Superficie cosechada (ha)	Producción (ton)	Valor producción (miles \$)	Superficie siniestrada (ha)	PÉRDIDAS ECONÓMICAS (miles \$)
tr = 50 años	187.5	0	0	0	0	1300	819
tr = 20años	214.8	0	0	0	0	1300	819
decil 1	241.6	0	0	0	0	1300	819
tr = 5 años	278.3	0	0	0	0	1300	819
tr = 2 años	364.5	0.4	520	380.6	571	780	248
MEDIA	386	0.43	559	409.2	614	741	205

CULTIVO: ALFALFA VERDE DE RIEGO

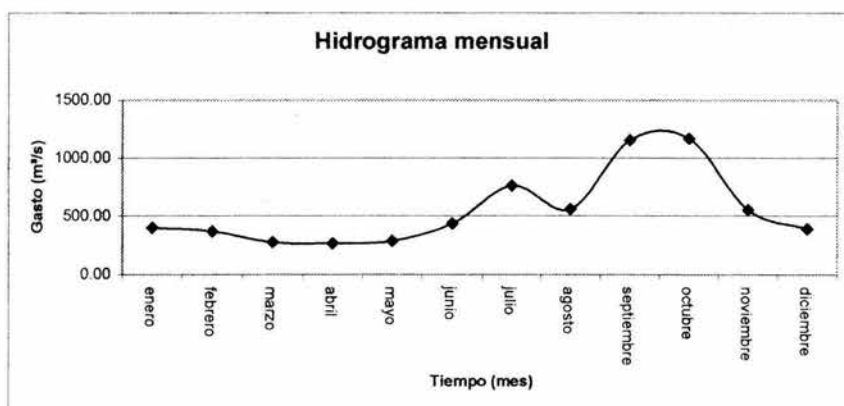
Tipo	Precipitación (mm)	Índice	Superficie cosechada (ha)	Producción (ton)	Valor producción (miles \$)	Superficie siniestrada (ha)	PÉRDIDAS ECONÓMICAS (miles \$)
tr = 50 años	187.5	0.65	3689	402513.5	53132	1987	28609
tr = 20años	214.8	0.75	4257	464438.7	61306	1419	20435
decil 1	241.6	0.86	4881	532556.4	70297	795	11444
tr = 5 años	278.3	0.88	4995	544941.4	71932	681	9809
tr = 2 años	364.5	0.96	5449	594481.5	78472	227	3270
MEDIA	386	1	5676	619251.6	81741	0	0

La probabilidad de que ocurra una lluvia del primer decil es del 10% y aunque es pequeña al igual que las de los periodos de retorno de 20 y 50 años, pueden ocurrir y las pérdidas económicas son muy severas, además no hay que olvidar que aunque la lluvia es muy pequeña, al tratarse de cultivos de riego, se hace todo lo posible por satisfacer la demanda y entonces se extrae agua de los mantos acuíferos.

Finalmente se realiza el cálculo del volumen de extracción mensual que se podría obtener de la corriente principal. Para lo anterior es necesario calcular los volúmenes de lluvia, de escurrimiento directo-base, uso doméstico y de infiltración.

El área de la cuenca que se estudia es de 309.3 km², los datos de lluvia, gasto y volumen de escurrimiento se muestran a continuación:

Mes	Precipitación (mm)	Gasto (m ³ /s)	Volumen (Mm ³)
enero	14.5	13.31	34.5
febrero	17.5	12.31	31.9
marzo	22.1	9.14	23.7
abril	27.1	8.83	22.9
mayo	38.1	9.49	24.6
junio	63.7	14.51	37.6
julio	47.1	25.39	65.8
agosto	23.7	18.63	48.3
septiembre	56.9	38.39	99.5
octubre	43	38.81	100.6
noviembre	17.6	18.44	47.8
diciembre	14.7	13.04	33.8
ANUAL	386	220.3	571.0



Al observar el hidrograma anterior se determina que el gasto directo se obtiene a partir de las lluvias de junio hasta septiembre. Así que el volumen de escurrimiento directo no considera el gasto promedio entre los meses de enero a mayo y de octubre a diciembre:

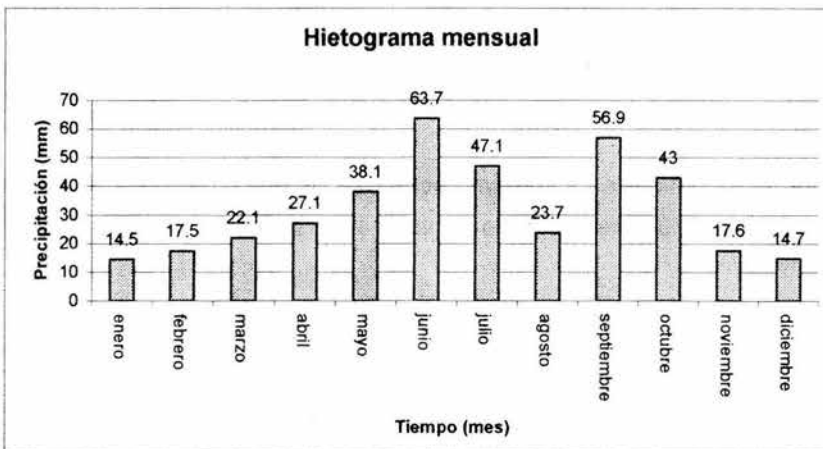
$$V_{ed} = 77.1 Mm^3$$

$$V_{base} = 493.9 Mm^3$$

Entonces la lluvia efectiva es:

$$hpe = \frac{Ved}{Ac} = \frac{77.1}{309.3} = 249.21mm$$

Precipitación (mm)	Coeficiente de infiltración ϕ		
	10	11	11.4
14.5	4.5	3.5	3.1
17.5	7.5	6.5	6.1
22.1	12.1	11.1	10.7
27.1	17.1	16.1	15.7
38.1	28.1	27.1	26.7
63.7	53.7	52.7	52.3
47.1	37.1	36.1	35.7
23.7	13.7	12.7	12.3
56.9	46.9	45.9	45.5
43	33	32	31.6
17.6	7.6	6.6	6.2
14.7	4.7	3.7	3.3
Suma	266	254	249.2



Por lo tanto el valor del coeficiente de infiltración es:

$$\phi = 11.4mm / mes$$

El volumen de infiltración potencial resulta del producto del coeficiente de infiltración anual por el área de la cuenca:

$$Vi = \phi * Ac = (11.4mm / mes * 12) * 309.3km^2 = 42.31Mm^3$$

Este valor es solamente una aproximación de volumen de recarga de los mantos acuíferos. La velocidad de extracción es mucho mayor que la de recarga, ya que las propiedades del suelo como la permeabilidad, compactación, porosidad y otros factores intervienen en el proceso de infiltración.

El siguiente cálculo es el volumen llovido que es el con el que se puede disponer sin considerar el volumen que escurre en la corriente principal:

$$VII = 386mm * 309.3km^2 = 119.4Mm^3$$

entonces, el coeficiente de escurrimiento tiene el siguiente valor:

$$Ce = \frac{Ved}{VII} = \frac{77.1}{119.4} = 0.65$$

Ahora, si se considera un consumo per cápita de 400 lt/hab/día y existe una población de 73, 000 habitantes, la demanda anual para uso doméstico es de:

$$Vdom = (0.4 * 73,000 * 365) = 11.0Mm^3$$

Por último, el ejemplo de extracción de agua de la corriente principal considera que el área a regar son 5,300 hectáreas de alfalfa y 4,750 hectáreas de maíz. El municipio de Ixmiquilpan se localiza en la latitud norte 20° 29' en una zona árida. La fecha de siembra del maíz es el 1° de octubre con 3 meses de desarrollo hasta la cosecha y el 1° de junio para la alfalfa con 4 meses.

El área de la corriente superficial es de 15,000 m² porque se considera una longitud del cauce de 3,000 m a partir de la estación hidrométrica hasta la estación de bombeo supuesta y 5 m de ancho del cauce principal. Según el valor del coeficiente de infiltración media, el agua que se pierde por esta causa durante los 7 meses y en el área superficial de la fuente de extracción tiene un volumen de:

$$V_i = 11.4 * 7 * 15,000 = 1,197m^3$$

Las temperaturas son considerando un año caluroso, estos valores y las alturas de evaporación fueron extraídas de la base de datos ERIC para la estación Ixmiquilpan, la altura de precipitación esta considerada como la lámina disponible en déficit.

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)
enero	24.0	10.5	24.50
febrero	25.4	12.6	34.4
marzo	29.5	15.9	46.6
abril	30.5	19.4	50.3
mayo	30.4	27.5	49.4
junio	28.1	45.8	47
julio	27.3	33.9	44.7
agosto	27.5	17.05	44.1
septiembre	26.8	40.9	36.3
octubre	25.9	30.9	29.9
noviembre	24.7	12.7	23.4
diciembre	23.6	10.6	20.5
ANUAL	27	278	451

a) Método de Thornthwaite

El primer valor a calcular son las constantes i_j , l , a , y U_j con las expresiones mostradas en el apartado 4.6. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

mes j	i_j	k_a	U_j	Vet maíz (Mm ³)	Vet alfalfa (Mm ³)	Vet total (Mm ³)	Vet neto (Mm ³)	D (Mm ³)
6	13.6	1.1	18.4		9.7	9.7	9.7	14.9
7	13.1	1.1	16.9		8.9	8.9	8.9	14.1
8	13.2	1.1	16.9		9.0	9.0	9.0	14.2
9	12.7	1.0	14.0		7.4	7.4	7.4	12.6
10	12.1	1.0	12.0	5.7		5.7	5.7	10.9
11	11.2	0.9	9.3	4.4		4.4	4.4	9.6
12	10.5	0.9	7.6	3.6		3.6	3.6	8.8
Suma	154.4			13.8	35.1	48.8	48.8	85.2

La constante K_a depende de la latitud y el mes del año (Anexo). El valor de Vet representa el volumen de extracción bruto y es el uso consuntivo de cada cultivo por la superficie sembrada, el Vet neto considera las pérdidas por evaporación y las ganancias por precipitación y D es el volumen de extracción que considera las pérdidas por infiltración.

b) Método de Blaney-Criddle

El primer valor calculado son los porcentajes de horas de sol mensuales con respecto al año P_i , posteriormente los factores de corrección k_{ti} por ser una zona árida, posteriormente los factores de luminosidad y temperatura mensuales y los factores de desarrollo por tipo de cultivo k_{ci} . El valor E_{ti} representa las evapotranspiraciones mensuales y finalmente el valor D_i representa el volumen de extracción necesaria en la corriente superficial. En este método se usan varias constantes las cuales se muestran en el anexo.

Cultivo	mes	i	P_i	K_{ti}	f_i	k_{ci}	E_{ti}	D_i (Mm ³)
Alfalfa	junio	1	9.0	1.1	19.0	1.2	21.9	13.4
	julio	2	9.3	1.1	19.2	1.1	21.1	13.6
	agosto	3	9.0	1.1	18.6	1.1	19.6	13.7
	septiembre	4	8.3	1.1	17.0	1.0	17.0	11.3
Maíz	octubre	5	8.2	1.0	16.4	0.9	14.7	10.7
	noviembre	6	7.6	1.0	14.7	0.8	11.8	10.2
	diciembre	7	7.6	1.0	14.5	0.7	10.2	9.5
	Suma							82.5

Los resultados de ambos métodos son similares, pero se recomienda usar los valores obtenidos por el método de Blaney-Criddle ya que este toma en cuenta el desarrollo de cada cultivo.

Este supuesto volumen de extracción solamente toma en cuenta la demanda del maíz y de la alfalfa, si se compara con el volumen de escurrimiento medio mensual representa un porcentaje importante sobre todo en los meses de mayor demanda como son los de junio hasta agosto, sin embargo, se debe considerar la calidad de agua y los periodos de sequía. Al tomar agua de la corriente no se sobreexplotan los pozos para la demanda agrícola y además se permite la recarga de los mantos acuíferos.

Mes	Volumen (Mm ³)	Volumen de extracción (Mm ³)	Porcentaje del total
junio	37.6	13.4	36%
julio	65.8	13.6	21%
agosto	48.3	13.7	28%
septiembre	99.5	11.3	11%
octubre	100.6	10.7	11%
noviembre	47.8	10.2	21%
diciembre	33.8	9.5	28%
SUMA	433.4	82.5	22%

Se calcula el volumen de evaporación total en la cuenca con la siguiente expresión:

$$V_{ev} = hev * Ac = 451mm * 303.3km^2 = 136.8Mm^3$$

Este resultado muestra la cantidad de agua que se considera pérdida y no es aprovechada para ningún propósito.

5.5.4. Evaluación de resultados

En resumen, los valores de volumen de agua que se presentan dentro de la cuenca estudiada del municipio de Ixmiquilpan son los siguientes:

Tipo		Volumen anual (Mm ³)
Llovido		119.4
Escorrimento	Base	493.9
	Directo	77.1
	Total	571.0
Evaporación		136.8
Infiltración		42.31
Extracción		82.5
Uso doméstico		11.0
TOTAL APROVECHABLE		571.0
TOTAL DEMANDAS Y PÉRDIDAS		272.6

La lluvia contribuye al escurrimiento directo y al volumen de pérdidas. El agua aprovechable es el total de escurrimiento en la corriente superficial, el cual es suficiente para satisfacer las demandas tanto domésticas como de riego para la alfalfa y el maíz del municipio. Se observa que las pérdidas no afectan el abasto de agua y además es muy importante el volumen de infiltración para recuperar los mantos acuíferos.

En general en el municipio de Ixmiquilpan se presentan las siguientes problemáticas en cuanto al aprovechamiento del agua, las cuales se agravan al ocurrir un periodo de sequía. En primer lugar, al disminuir las lluvias, no se puede satisfacer la demanda de agua para riego por temporal; la demanda para uso doméstico, servicios públicos y riego a parcelas se realiza por medio de extracción de pozos que explotan los mantos acuíferos porque no permite la recarga ya que la velocidad de infiltración es baja. Este déficit de humedad lleva a la baja productividad en el sector primario con pérdidas económicas muy fuertes que afectan a la mayor parte de la población del municipio de Ixmiquilpan.

La agricultura tiene un sistema combinado que reúne dos grupos de productores, el primer de ellos hace uso de las técnicas tradicionales y obsoletas, en todo el proceso de siembra hasta cosecha, fertilización, rotación y dependen del riego por temporal; estos son productores en su mayoría que cosechan para autoconsumo y sus ganancias se derivan también en la venta del resto de su producto, este grupo que reúne gran parte de los campesinos del municipio es muy vulnerable a factores climatológicos tales como las inundaciones, granizadas y sobre todo la sequía, aunado a esto la falta de organización entre productores, escasa mecanización y asistencia técnica, ausencia de programas de crédito al campo y financiamiento, deficientes sistemas de acopio, almacenamiento y comercialización de los productos. En contraste existe un pequeño grupo de productores organizados que absorbe más de la mitad de la superficie usada, cuenta con buena asistencia técnica, mecanización y sistemas de riego, fertilización y cuentan con créditos al campo, además de que su producto es comercializado dentro y fuera del municipio, inclusive del estado. Sin embargo, estos productores que acaparan las ganancias, además de utilizar la mayor parte de los terrenos cultivables, explotan los mantos acuíferos para garantizar su cosecha y es por esto que obtienen rendimientos tan altos.

Otra problemática es sin duda la contaminación del suelo y la sobreexplotación del mismo, es decir, en década pasadas no se permitió el descanso de la tierra lo que llevó a la pérdida de nutrientes, erosión y se buscaron más terrenos que labrar, lo que llevó a la deforestación y explotación de los pocos terrenos naturales que además sirven para recarga de los acuíferos. En la actualidad a pesar de los esfuerzos por controlar el uso del suelo, el daño ya se hizo y solo resta conservar con lo que se cuenta.

En cuanto a la contaminación del agua, se observa que las principales corrientes sirven de descarga de aguas residuales domésticas e industriales lo que ha provocado que la calidad del agua sea muy pobre y no sirva para uso tanto doméstico, potable ni de riego.

Según los resultados obtenidos tanto de la caracterización de la sequía en el análisis meteorológico e hidrológico y del análisis económico se puede

establecer una planificación específica para el municipio de Ixmiquilpan como medidas preventivas y de reacción en caso de la presencia de una sequía.

La realidad del municipio de Ixmiquilpan no permite contar con recursos económicos suficientes para la prevención ni aún con la presencia de sequía. Los campesinos se ven a la necesidad de subsistir con la venta de maíz en grano almacenado y los productores organizados de alfalfa cuentan con financiamientos y agua de pozos para garantizar sus cosechas.

Conclusiones y comentarios

Es necesario priorizar el desarrollo de estudios de sequías y de los fenómenos naturales que afecten a la población del municipio de Ixmiquilpan. En el sistema educativo se debe incluir el tema de protección civil dirigido tanto a alumnos como a padres de familia. Se debe implementar campañas de educación en esta materia para los campesinos y sus familias.

Mejorar la organización del sistema de protección civil municipal para integrar una comisión para la sequía. Esta dependencia debe supervisar y coordinar todas las acciones de prevención y respuesta.

El registro de datos meteorológicos e hidrológicos, como es el aforo de corrientes debe ser continuo. Hay que garantizar el buen funcionamiento de los instrumentos de las estaciones climatológicas e hidrológicas; además de que se deben de ampliar y actualizar los archivos históricos.

Debido a la situación económica actual del país y los pocos recursos que se destinan a la prevención de desastres naturales a los municipios, es difícil instalar nuevas estaciones de medición e implantar sistemas de alerta temprana ya que se requiere de tecnología para vigilar las condiciones instantáneas del tiempo atmosférico, imágenes de satélite y de radares meteorológicos. Es necesario destinar recursos para poner en marcha proyectos para diseñar y construir obras de protección y captación de agua.

Una opción benéfica, necesaria y que no requiere de muchos recursos económicos es el rescate y mejoramiento de cuencas, reordenamiento y aplicar las leyes ya existentes en materia ambiental.

En el municipio de Ixmiquilpan, la principal problemática medio ambiental dentro de la cuenca es la deforestación, es decir, la tala inmoderada para el

aprovechamiento de suelo para cultivo y pastoreo, terrenos para asentamientos humanos y el uso de madera para materiales de construcción; otra problemática es la falta de un programa de disposición de desechos como es la basura doméstica, residuos de labores agropecuarias y desechos industriales que se depositan en tiraderos a cielo abierto y en el cauce del río, así también de las descargas de aguas residuales a las corrientes de ríos.

La legislación existente en Ixmiquilpan, estipula la ordenación de los ejidos, delimitación de terrenos, manejo y resolución de disputas por posesión y uso de suelo; sin embargo, no se acatan las leyes y reglamentos porque no existe un organismo o grupo de autoridades que realmente verifique el cumplimiento de estos.

La depredación sin control de los recursos de la cuenca ha llevado a un estado crítico en el balance hídrico, puesto que el tiempo de respuesta es menor, es decir, los escurrimientos superficiales provenientes del parteaguas erosionan el suelo y arrastran mas sedimentos que lo pueden conducir las corrientes, lo que lleva a la erosión de suelos, aumenta el riesgo de deslizamiento de laderas. También no permiten la retención del agua por ausencia de capa vegetal, esto no permite la infiltración y recarga de acuíferos porque la mayor parte del agua escurre superficialmente.

El uso irracional de agua es el principal problema que se debe atacar y que justifica la realización de este trabajo. Según los resultados obtenidos, las pérdidas económicas existentes cuando la sequía esta presente para los campesinos productores de maíz y otros cultivos son desastrosas y ponen en riesgo la subsistencia de ellos y su familia.

El grupo en riesgo es el de los campesinos independientes y sus familias para los cuales se recomienda:

- Sembrar solamente en la superficie indicada por la lámina disponible en déficit cuando se estime la presencia de una sequía.
- Cultivo de especies alternativas al maíz.

- Uso de semillas mejoradas y especies resistentes al déficit de agua.
- Rotación y descanso de parcelas.
- Mejorar la técnica de siembra-cosecha (eliminar la roza-tumba-quema).

El gobierno municipal debe dar alternativas a este grupo como:

- Programa de empleo temporal en caso de sequía severa.
- Venta y transporte de los productos de campesinos independientes.

En el caso de los productores de alfalfa se recomienda:

- Abastecimiento de la demanda agua de la corriente superficial.
- Disminuir el consumo de agua de pozos.

Al evaluar los resultados se observó que el agua existente en la corriente del río es suficiente para abastecer la demanda de agua doméstica y agrícola. Sin embargo en la actualidad no se puede disponer de ella por su grado de contaminación, así que para disponer de este volumen potencial es necesario:

- Tratamiento del agua residual del río principal.
- Mejorar el sistema de disposición de basura (rellenos sanitarios).

El análisis de sequías y su caracterización es una parte importante del estudio de disponibilidad de agua; se obtienen resultados como calidad del agua, fuentes de extracción, uso potencial y disponibilidad del vital líquido. No se deben sobreexplotar los mantos acuíferos para satisfacer las demandas, es necesario usar solo el agua disponible en déficit y no perforar más pozos. La cuenca se debe proteger con programas de reforestación, limpieza, obras de protección y almacenamiento, reordenación y respeto del uso del suelo. El gobierno municipal debe tener contacto permanente con las autoridades estatales que emiten alertas de fenómenos extraordinarios.

Anexo

I. Estadísticos muestrales

Media:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Varianza insesgada

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Coficiente de asimetría insesgado

$$g = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)} \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{3/2}} \right]$$

Coficiente de curtosis

$$k = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} \right]$$

Coefficiente de variación

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}}$$

Variables para estimadores acumulados

$$U_T \approx V - \frac{b_0 + b_1V + b_2V^2}{1 + b_3V + b_4V^2 + b_5V^3}$$

donde

$$b_0 = 2.515517$$

$$b_1 = 0.802853$$

$$b_2 = 0.010328$$

$$b_3 = 1.432788$$

$$b_4 = 0.189269$$

$$b_5 = 0.001308$$

$$V = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1-1/T)^2} \right]}$$

II. Funciones de probabilidad

1. Distribución Normal

σ parámetro de escala

μ parámetro de ubicación

estimadores por momentos y máxima verosimilitud

$$\mu = \bar{x}$$

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

estimadores por momentos-L

$$\mu = \lambda_1$$

$$\sigma = 1.772\lambda_2$$

estimación de eventos de diseño para mínimos:

$$\bar{X}_T = \mu + \sigma U_T$$

estimación de eventos de diseño para máximos:

$$\bar{X}_T = \mu - \sigma U_T$$

2. Distribución Log Normal de dos parámetros

estimadores por momentos y máxima verosimilitud

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu_y)^2}{n}$$

estimación de eventos de diseño para mínimos:

$$X_T = \exp(\mu_y + U_T \sigma_y)$$

estimación de eventos de diseño para máximos:

$$X_T = -\exp(\mu_y + U_T \sigma_y)$$

3. Distribución Log Normal de tres parámetros

estimadores por momentos

$$\bar{x}_0 = \bar{x} \left(1 - \frac{\eta_x}{\eta_z} \right)$$

$$\bar{\mu}_y = \ln \left(\frac{S}{\eta_z} \right) - \frac{1}{2} \ln(\eta_z^2 + 1)$$

$$\bar{\sigma}_y = \left[\ln(\eta_z^2 + 1) \right]^{1/2}$$

donde

$$\eta_x = \frac{S}{\bar{x}}$$

$$\eta_z = \frac{1 - w^{2/3}}{w^{1/3}}$$

$$w = \frac{(g^2 + 4)^{1/2} - g}{2}$$

estimadores por máxima verosimilitud

$$\mu_y = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i - \bar{x}_0)}{n}$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n [\ln(x_i - \bar{x}_0) - \mu_y]^2 / n$$

y el estimador \bar{x}_0 se obtiene al resolver

$$F(\bar{x}_0) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(x_i - \bar{x}_0)} (\mu_y - \sigma_y^2) - \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{1}{(x_i - \bar{x}_0)} \right] \ln(x_i - \bar{x}_0) \right\} = 0$$

estimación de eventos de diseño para mínimos:

$$X_T = \bar{x}_0 + \exp(\mu_y + U_T \sigma_y)$$

estimación de eventos de diseño para máximos:

$$X_T = \exp(\mu_y + U_T \sigma_y)$$

4. Distribución Gamma con tres parámetros

estimadores por momentos

$$\bar{x}_0 = \bar{x} - S\sqrt{\beta}$$

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}}$$

$$\beta = \frac{4}{g^2}$$

estimadores por máxima verosimilitud

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_0) - \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(x_i - \bar{x}_0)} \right]}$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_0) \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(x_i - \bar{x}_0)} \right]}}$$

el estimador \bar{x}_0 se obtiene al resolver

$$F(\bar{x}_0) = \sum_{i=1}^n \ln(x_i - \bar{x}_0) - n \ln(\alpha) - n \psi(\beta) = 0$$

$$\psi(\beta) = \ln(\beta + 2) - \frac{1}{2(\beta + 2)} - \frac{1}{12(\beta + 2)^2} - \frac{1}{120(\beta + 2)^4} - \frac{1}{252(\beta + 2)^6} - \frac{1}{(\beta + 1)} - \frac{1}{\beta}$$

estimador de eventos de diseño para mínimos:

$$X_T = \bar{x}_0 + \alpha \beta \left[1 - \frac{1}{9\beta} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3$$

estimador de eventos de diseño para maximos:

$$X_T = \alpha \beta \left[1 - \frac{1}{9\beta} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3$$

5. Distribución de valores extremos tipo Gumbel

estimadores por momentos

$$v = \bar{x} - 0.45S$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S$$

estimadores por máxima verosimilitud

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i}$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i}$$

el criterio de convergencia es

$$\frac{P}{\alpha} \approx 0$$

$$\frac{-R}{\alpha} \approx 0$$

incrementos

$$\delta_{y_j} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_j}{n}$$

$$\delta_{\alpha_j} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_j}{n}$$

nuevos valores

$$v_{j+1} = v_j + \delta_{vj}$$

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \delta_{\alpha j}$$

estimador de eventos de diseño para mínimos:

$$\bar{X}_T = v + \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

estimador de eventos de diseño para máximos:

$$\bar{X}_T = v - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

III. Constantes para el cálculo de uso consuntivo y volumen de extracción

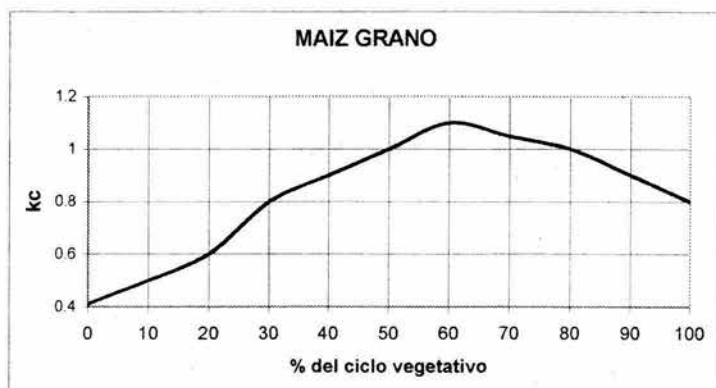
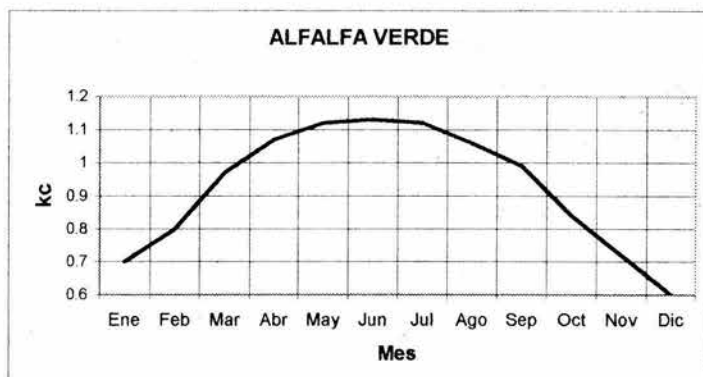
Valores de Ka

Latitud (°N)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
20	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01

Porcentaje de horas de sol mensual

Latitud (°N)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
21	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62

Coefficientes de desarrollo parcial



Ciclo vegetativo por cultivo y coeficiente global

Cultivo	Ciclo Vegetativo	Coefficiente global kg
ALFALFA VERDE	3 meses	0.80 – 0.85
MAÍZ GRANO	4 a 7 meses	0.60 – 0.70

Registro de volúmenes de escorrentía mensual (Mm³)

n	Año	Serie normalizada mensual																							
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic												
1	1971	27.10	16.17	17.29	15.74	19.53	61.17	60.42	50.33	117.59	224.39	35.99	35.91	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2	1972	19.24	28.44	17.43	19.42	21.11	68.63	58.99	52.28	34.60	33.25	31.51	35.66	3.30	2.78	2.85	2.76	2.97	4.11	4.10	3.92	4.77	5.41	3.58	3.98
3	1973	29.67	18.28	19.85	18.30	25.67	39.23	195.27	265.71	151.90	92.03	46.91	28.10	3.39	2.91	2.99	2.91	3.25	3.67	5.22	5.34	5.02	4.52	4.08	3.34
4	1974	36.16	28.91	23.00	21.31	22.76	14.79	224.01	28.66	153.35	74.08	58.92	45.82	3.59	3.36	3.14	3.06	3.12	3.80	5.41	3.36	5.03	4.31	3.82	3.65
5	1975	54.71	28.88	22.90	24.41	53.83	102.78	122.82	97.01	201.92	53.38	43.66	37.86	4.00	3.98	3.13	3.20	3.99	4.63	4.81	4.57	5.31	3.91	3.78	3.63
6	1976	46.99	36.31	41.48	41.72	38.81	27.88	98.75	118.80	191.11	368.20	90.70	73.17	3.65	3.59	3.73	3.73	3.66	3.33	4.89	4.78	5.25	5.91	4.51	4.29
7	1977	46.42	31.41	28.72	30.79	42.35	29.90	29.14	30.91	37.06	39.03	40.88	29.58	3.84	3.45	3.36	3.43	3.75	3.40	3.37	3.43	3.61	3.66	3.51	3.49
8	1978	40.62	35.93	37.83	28.59	26.67	39.85	29.19	36.64	40.40	20.77	40.86	41.70	3.70	3.68	3.63	3.35	3.28	3.69	3.37	3.60	3.70	5.34	4.04	3.73
9	1979	33.37	33.42	21.45	31.26	29.55	34.44	29.41	26.89	121.75	21.44	39.97	41.05	3.51	3.51	3.07	3.44	3.39	3.54	3.38	3.29	4.80	3.07	3.69	3.71
10	1980	41.37	28.05	27.05	27.13	40.95	19.31	18.07	18.61	14.16	20.65	26.06	22.20	3.72	3.33	3.30	3.30	3.71	2.96	2.89	2.92	2.65	3.03	3.26	3.10
11	1981	40.12	26.85	18.21	18.33	30.58	79.95	148.61	27.94	74.40	71.58	62.49	32.04	3.69	3.29	2.90	2.91	3.42	4.38	5.00	3.33	4.31	4.27	4.13	3.47
12	1982	26.04	27.65	18.35	17.01	25.94	4.37	9.78	4.74	6.26	22.26	10.77	15.42	3.26	3.32	2.91	2.83	3.26	1.47	2.28	1.56	1.83	3.10	2.39	2.74
13	1983	33.37	33.42	22.90	24.41	30.59	79.95	60.42	50.33	153.35	74.08	58.92	45.82	3.51	3.51	3.13	3.20	3.42	4.38	4.10	3.92	5.03	4.31	3.28	3.49
14	1984	23.93	18.81	11.54	6.17	11.76	14.27	32.85	11.83	306.94	36.73	30.54	26.07	3.17	2.93	2.45	1.82	2.46	2.68	3.49	2.47	5.72	3.60	3.42	3.26
15	1985	34.04	25.93	16.27	40.15	26.47	38.78	30.80	54.78	27.56	24.29	20.41	27.52	3.53	3.26	2.79	3.69	3.28	3.66	4.59	4.00	3.31	3.19	3.02	3.31
16	1986	24.73	24.83	16.21	21.97	21.41	77.05	19.21	19.21	27.56	47.74	40.21	26.83	3.21	3.21	2.79	3.09	3.06	4.34	3.43	2.96	3.32	3.87	3.69	3.29
17	1987	29.80	29.44	19.66	13.61	10.37	18.53	13.67	11.46	14.45	17.76	26.29	26.22	3.39	3.39	2.98	2.61	2.34	2.92	2.62	2.44	2.67	3.08	3.27	3.27
18	1988	30.11	26.13	24.22	18.45	14.33	6.14	20.01	24.09	68.24	20.73	26.54	32.72	3.40	3.26	3.19	2.91	2.66	1.81	3.00	3.18	4.22	3.03	3.28	3.49
19	1989	28.30	31.93	22.15	18.12	16.88	18.75	16.05	31.07	26.81	17.76	19.19	32.87	3.34	3.46	3.10	2.90	2.83	2.93	2.78	3.44	3.29	2.88	2.95	3.49
20	1990	23.98	24.75	16.91	12.33	19.28	28.12	32.14	25.81	162.49	89.69	25.39	20.36	3.18	3.21	2.83	2.51	2.96	3.34	3.47	3.25	5.09	4.50	3.23	3.01
21	1991	23.85	24.47	14.54	11.88	13.93	28.41	349.09	38.42	39.98	155.24	69.18	32.81	3.17	3.20	2.69	2.47	2.63	3.35	5.96	3.65	3.69	5.04	4.24	3.49
22	1992	40.57	94.11	32.09	28.12	31.18	91.36	21.27	55.68	72.76	331.27	187.30	41.05	3.70	4.54	3.47	3.34	3.44	4.52	3.06	4.02	4.29	5.80	5.23	3.71
23	1993	36.27	39.36	16.53	25.98	19.96	16.12	49.02	15.70	92.17	71.55	45.94	36.70	3.59	3.67	2.81	3.26	2.99	2.78	3.89	2.75	4.52	4.27	3.83	3.58
24	1994	33.20	27.68	38.45	21.69	21.10	36.14	25.78	61.93	177.64	115.92	43.40	22.44	3.50	3.32	3.65	3.08	3.05	3.95	3.25	4.15	5.18	4.73	3.77	3.11
25	1995	44.60	36.27	35.94	24.27	20.10	15.32	27.05	150.53	92.74	41.86	66.49	31.96	3.80	3.59	3.58	3.19	3.00	2.73	3.30	5.01	4.53	3.73	4.20	3.46
26	1996	53.57	51.23	25.88	22.80	19.95	23.40	25.28	27.55	116.63	103.83	36.92	40.81	3.98	3.94	3.25	3.13	2.99	3.15	3.23	3.32	4.76	4.64	3.61	3.71
27	1997	36.48	36.44	37.63	46.13	22.77	28.34	45.80	33.04	68.06	38.06	35.58	51.07	3.60	3.60	3.63	3.63	3.13	3.34	3.82	3.21	3.50	4.22	3.57	3.33
28	1998	31.95	32.36	21.73	13.20	19.53	7.94	12.88	24.10	207.16	363.49	76.10	36.26	3.46	3.48	3.08	2.88	2.97	2.07	2.56	3.18	5.33	5.87	4.33	3.96
29	1999	30.62	28.63	21.65	22.10	16.88	10.16	32.50	24.68	122.13	116.14	64.96	31.94	3.42	3.35	3.07	3.10	2.83	2.32	3.48	3.21	4.81	4.75	4.17	3.46

Media

Var

C. Asim

C. Curt

C. Var

r1

r2

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Abr

May

Jun

Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Ene

Feb

Mar

Serie estandarizada mensual

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1971	-0.81	-1.94	-0.82	-0.71	-0.43	0.94	0.40	0.48	0.54	1.33	-0.23	0.35
1972	-2.14	-0.18	-0.79	-0.21	-0.22	1.09	0.37	0.52	-0.73	-0.75	-0.47	0.38
1973	-0.46	-1.56	-0.38	-0.35	-0.20	0.40	0.58	2.48	0.81	0.36	0.67	-0.48
1974	0.30	-0.13	0.07	0.01	-0.02	0.56	1.85	-0.21	0.82	0.12	0.21	0.58
1975	1.91	0.13	0.05	0.34	2.25	1.58	1.18	1.29	1.11	-0.24	0.12	0.53
1976	1.32	0.58	1.88	1.82	1.39	-0.03	0.94	1.54	1.05	1.87	1.45	2.77
1977	1.27	0.13	0.75	0.89	1.62	0.06	0.41	-0.12	0.66	-0.59	0.00	-0.31
1978	0.76	0.55	1.60	0.71	0.40	0.42	-0.40	0.09	-0.57	1.25	0.61	0.66
1979	-0.01	0.32	-0.15	0.93	0.67	0.24	-0.40	-0.29	0.59	-1.23	-0.04	0.81
1980	0.83	-0.22	0.57	0.89	1.53	-0.48	-0.93	-0.75	-1.68	-1.27	-0.81	-1.28
1981	0.71	-0.36	-0.65	-0.35	0.76	1.27	1.40	-0.25	0.07	0.98	0.77	-0.04
1982	-0.87	-0.27	-0.63	-0.53	0.32	-2.31	-1.61	-2.43	-2.51	-1.19	-2.38	-2.52
1983	-0.01	0.32	0.05	0.34	0.76	1.27	0.27	-1.31	1.54	-0.64	-0.52	-0.74
1984	-1.30	-1.47	-2.08	-2.95	-1.77	-0.85	-0.27	-1.31	1.54	-0.64	-0.52	-0.74
1985	0.07	-0.47	-1.00	1.52	0.38	0.38	0.94	0.58	0.98	-1.10	-1.26	-0.55
1986	-1.17	-0.60	-1.01	0.08	-0.19	1.23	-0.34	-0.71	-0.97	-0.36	-0.03	-0.64
1987	-0.45	-0.07	-0.42	-1.06	-2.10	-0.53	-1.24	-1.36	-1.64	-1.21	-0.80	-0.72
1988	-0.41	-0.44	0.22	-0.33	-1.25	-1.89	-0.82	-0.43	-0.02	-1.27	-0.78	0.04
1989	-0.65	0.18	-0.05	-0.38	0.81	-0.51	-1.07	-0.12	-1.00	-1.44	-1.37	0.05
1990	-1.29	-0.61	-0.88	-1.30	-0.46	-0.02	-0.30	-0.35	0.88	0.33	0.86	-1.58
1991	-1.31	-0.65	-1.35	-1.39	-1.32	0.00	2.34	0.14	-0.58	0.93	0.93	0.05
1992	0.75	3.55	1.09	0.57	0.81	1.44	-0.75	0.60	0.04	1.75	2.77	0.81
1993	0.32	0.83	-0.95	0.48	-0.37	-0.70	0.17	-0.96	0.28	0.08	0.22	0.33
1994	-0.03	-0.26	1.65	0.05	-0.22	0.29	-0.54	0.73	0.97	0.61	0.11	-1.25
1995	1.12	0.58	1.44	0.32	-0.35	-0.76	-0.49	1.83	0.30	-0.50	0.89	1.04
1996	1.63	1.65	0.43	0.17	-0.37	-0.24	-0.56	-0.27	0.54	0.48	-0.18	0.79
1997	0.34	0.59	1.58	1.86	-0.02	-0.01	0.09	-0.39	-0.78	0.03	-0.25	1.55
1998	-0.19	0.22	-0.11	-1.13	-0.43	-1.57	-1.31	-0.43	1.13	1.83	1.13	0.29
1999	-0.34	-0.16	-0.12	0.10	-0.81	-1.27	-0.28	-0.40	0.58	0.61	0.64	-0.05
PAR(2)												
11	0.36	0.34	0.24	0.54	0.59	0.44	0.52	0.34	0.37	0.40	0.68	0.50
12	0.15	0.28	0.49	0.16	0.03	0.02	-0.04	0.28	0.13	0.16	0.15	0.58
42	0.79	0.71	0.59	0.60	0.63	0.60	0.75	0.70	0.80	0.76	0.45	0.69
CI4(2)	-2.98	-5.75	-11.32	-10.62	-9.55	-2.53	-4.54	-6.24	-2.50	-4.00	-19.17	-6.78

Serie de residuales del modelo PAR(2)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
-0.91	-2.04	-0.82	-0.23	0.81	1.33	0.49	0.27	-0.05	0.92	-0.48	0.36
-2.20	-0.28	-0.79	0.97	0.00	1.44	-0.16	0.24	-1.26	-0.92	-0.61	0.96
-0.39	-1.42	-0.39	-0.15	1.15	0.59	1.70	2.13	0.44	-0.42	-0.99	-0.80
0.06	-0.29	0.07	-0.02	0.15	0.54	1.86	-0.25	0.60	-0.71	0.10	0.37
1.70	-0.28	0.05	-0.57	2.38	1.57	1.49	0.64	0.22	-1.08	-0.52	0.37
0.10	-0.22	1.88	1.58	1.51	-0.85	0.20	0.57	1.17	1.92	1.04	2.11
1.38	0.22	0.75	0.15	1.45	-0.27	-0.46	0.66	-0.75	-0.35	0.51	0.11
0.30	0.30	1.60	0.52	0.21	-0.29	-0.62	-0.14	-0.48	1.54	0.79	1.11
-0.30	0.09	-0.15	1.08	0.62	0.30	-0.96	-0.82	0.39	-0.89	0.65	0.68
1.41	0.15	0.57	-0.17	1.40	-0.73	-0.83	-1.18	-1.57	-0.83	0.09	-0.41
0.61	-0.35	-0.65	-0.67	0.95	1.57	1.72	-0.38	-0.64	-0.86	0.76	0.31
0.30	0.46	-0.63	-0.69	0.04	-2.04	-1.28	-2.25	-1.76	-0.36	-0.71	-1.47
-0.95	-1.26	-2.06	-2.44	-1.00	0.07	0.92	-0.28	1.64	-1.03	-0.49	-1.53
0.10	0.31	0.05	0.28	0.57	1.25	0.25	0.20	0.28	-0.18	-0.95	-0.12
0.46	-0.31	-1.00	1.28	0.55	0.83	0.24	0.03	-1.35	-1.32	-1.31	0.12
-0.93	-0.42	-1.01	0.58	0.09	1.68	-0.68	-0.91	-1.60	-0.35	0.67	0.23
-0.07	0.13	-0.42	-1.02	-2.18	-0.35	-0.72	-0.31	-1.23	-0.87	-0.48	-0.08
-0.30	-0.45	0.22	-0.17	-0.97	-1.98	-0.72	-0.05	0.84	-0.67	-0.64	-0.38
-0.46	0.17	-0.05	-0.13	-0.90	-0.49	-1.00	0.23	-0.70	-0.95	-1.37	0.38
-0.59	-0.16	-0.88	-0.98	-0.35	0.38	0.18	0.06	0.79	0.20	-0.93	-1.97
-1.47	-0.66	-1.35	-0.60	-0.89	0.60	2.60	0.62	-0.69	-0.21	0.16	0.34
0.04	3.32	1.09	0.65	-1.16	0.91	-1.05	0.81	-0.14	2.03	2.39	0.81
0.18	0.74	-0.95	0.40	-0.81	-0.29	0.07	-0.90	0.50	0.16	0.75	0.14
0.41	0.09	1.65	-0.17	-0.29	-0.43	-0.40	0.88	1.17	0.84	-0.41	-1.84
1.00	0.59	1.44	-0.21	-0.73	-1.41	-0.32	2.14	0.91	-0.15	-0.47	-0.67
1.57	1.43	0.43	-0.67	-1.26	-0.45	-0.20	0.36	0.87	0.64	-0.39	0.33
-0.49	0.15	1.58	1.95	-0.11	-0.70	-0.87	-0.92	-0.50	0.49	0.49	1.87
-0.16	0.14	-0.11	-0.89	-0.50	-1.53	0.85	0.00	1.76	2.41	1.26	-0.59
-0.45	-0.15	-0.12	0.34	-0.71	-1.22	-0.47	-0.26	1.13	0.99	1.08	-0.59

Números aleatorios generados

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1971	0.90	-2.62	-1.44	-0.89	0.03	0.61	0.92	0.69	0.73	-1.57	-1.22	1.01
1972	-1.61	1.31	-0.46	-1.59	0.36	-0.64	1.07	-0.35	0.97	-1.10	-1.05	0.02
1973	0.86	1.72	-0.23	-1.24	0.57	-1.86	1.15	0.82	-1.17	-0.61	0.54	1.65
1974	-0.94	-2.18	-0.20	-1.48	0.60	-0.57	-0.37	2.03	0.48	-0.30	1.56	-0.26
1975	-0.60	0.19	0.16	-0.11	-0.06	0.04	-1.37	0.96	-0.89	-0.89	0.32	-0.61
1976	-0.70	-0.64	0.75	-0.54	-0.31	0.45	1.80	1.19	1.03	0.85	-0.19	-0.25
1977	1.62	1.75	-1.04	1.28	1.10	-0.15	-0.48	0.14	0.83	0.90	0.40	1.77
1978	0.34	-0.27	-1.00	-1.18	-1.12	0.26	-0.62	1.62	0.61	0.28	1.28	2.59
1979	-0.18	1.84	-1.87	0.32	-0.50	1.19	0.94	1.06	0.27	-1.72	-0.58	-0.37
1980	1.07	-1.07	-0.58	1.95	0.34	0.71	-0.15	0.42	-0.56	-1.25	-0.19	-0.33
1981	0.88	0.94	-1.32	-1.95	0.18	1.51	0.38	-0.11	0.61	-0.58	-0.01	0.13
1982	-0.70	0.61	0.51	1.40	-1.22	-0.93	-1.30	-0.66	0.53	0.02	0.87	-1.12
1983	0.01	2.03	0.33	-1.08	-0.03	-0.15	0.61	0.57	-0.71	-1.69	0.78	-0.11
1984	0.44	1.26	-1.03	-0.53	1.23	0.96	0.42	0.85	1.03	-0.30	1.16	-0.78
1985	1.28	1.84	0.26	-0.81	0.45	0.33	0.45	-0.52	-1.89	-0.98	0.64	0.10
1986	-0.23	-0.05	0.24	-1.46	0.01	2.48	0.81	0.63	1.27	-0.69	1.00	1.28
1987	2.04	1.96	-0.37	2.45	-0.26	0.16	-1.03	1.26	-2.17	-0.27	0.49	-0.28
1988	-0.43	0.72	-0.57	-0.03	0.42	0.57	0.22	1.41	-1.13	-0.55	2.22	0.65
1989	0.82	0.90	0.65	-0.12	-0.54	0.42	0.47	0.07	0.60	-0.63	0.24	0.72
1990	-0.54	1.83	-1.83	0.10	-0.36	1.42	1.93	-0.59	-1.07	-0.53	-1.22	-0.45
1991	0.30	0.68	0.08	-0.53	0.80	2.34	-0.85	0.25	0.17	-1.38	-0.47	0.39
1992	-0.73	0.77	0.59	-0.79	0.46	-2.53	0.81	-1.76	0.06	-0.34	-0.16	0.68
1993	0.08	0.70	1.64	-1.84	-1.20	-1.61	0.91	0.79	-0.22	-1.58	-0.17	-0.05
1994	-0.52	-0.37	-1.04	0.76	-1.02	0.25	-1.34	1.09	0.03	-0.54	0.50	0.40
1995	-0.08	0.98	-1.17	1.09	-0.36	1.86	1.06	0.74	0.37	1.05	-0.03	-1.02
1996	0.43	-0.08	-1.37	-1.78	0.22	1.28	-0.89	-0.90	0.39	0.64	0.45	0.08
1997	0.89	-0.36	-0.65	1.07	0.24	-0.02	0.23	0.23	2.09	1.12	-0.77	0.81
1998	-1.33	1.18	-0.74	1.64	0.27	0.22	0.84	1.91	0.84	-0.53	-1.80	0.87
1999	0.33	-0.02	0.34	0.05	-0.21	0.19	0.84	0.62	0.36	-0.88	0.79	-0.25

Serie sintética Z generada por el modelo PAR(2)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1971	0.80	-1.94	-1.34	-1.74	-1.05	0.06	0.86	0.91	1.11	-0.80	-1.20	0.18
1972	-1.43	0.77	-0.92	-1.62	-0.70	-0.91	0.48	-0.41	0.79	-0.72	-1.08	-0.57
1973	0.76	1.65	0.57	-0.41	0.23	-1.41	0.26	-1.04	1.80	-0.88	0.83	0.58
1974	-0.83	-2.05	-1.08	-2.08	-0.79	-0.89	-0.76	1.26	0.80	0.26	-0.78	-0.59
1975	-0.53	0.14	-0.09	-0.12	-0.12	-0.02	-1.19	-1.25	-1.41	-1.55	-1.01	-1.14
1976	-0.62	0.02	0.36	-0.23	-0.37	0.23	1.69	1.68	1.77	1.73	1.28	0.56
1977	1.43	1.94	0.25	1.47	1.75	0.66	-0.13	0.27	0.83	1.17	1.17	2.15
1978	0.30	0.11	-0.70	-1.29	-1.67	-0.53	1.01	0.83	0.72	1.48	2.85	0.78
1979	-0.16	1.80	-1.30	-0.15	-0.52	0.83	1.27	1.58	1.00	-0.87	-0.82	-0.78
1980	0.95	-0.99	-0.28	1.23	0.99	1.09	0.40	0.82	-0.15	-1.03	-0.84	-0.77
1981	0.78	1.09	-0.52	-1.64	-0.85	0.95	0.85	0.47	0.83	-0.10	0.05	0.13
1982	-0.62	-0.40	0.05	1.07	-0.33	0.96	-1.61	-1.40	-0.25	-0.31	0.36	-0.78
1983	0.01	1.80	0.72	-0.17	-0.10	-0.18	0.43	0.59	-0.36	-1.54	-0.54	-0.48
1984	0.39	1.02	-0.48	-0.51	0.66	1.14	0.21	1.14	1.38	0.47	1.31	0.03
1985	1.14	1.85	1.23	0.32	0.58	0.55	0.65	-0.07	-1.64	-1.52	-0.81	-0.44
1986	-0.20	-0.29	0.04	-1.18	-0.70	1.89	1.71	1.68	1.99	0.45	1.28	1.74
1987	1.81	2.14	1.07	2.86	1.52	0.86	-0.50	1.18	-1.59	-0.89	-0.36	-0.47
1988	-0.38	0.52	-0.57	-0.25	0.17	0.59	0.49	1.57	-0.38	-0.38	1.20	1.11
1989	0.72	1.06	1.18	0.71	0.02	0.40	0.61	0.38	0.76	-0.19	0.15	0.66
1990	-0.48	1.00	-1.70	-0.67	-0.73	0.94	2.18	0.50	-0.50	-0.59	-1.30	-1.07
1991	0.26	0.71	0.37	-0.11	0.58	2.34	0.46	1.05	0.61	-0.81	-0.76	-0.11
1992	-0.64	0.69	0.37	-0.31	0.19	-2.18	-1.84	-2.79	-1.22	-1.23	-1.10	-0.08
1993	0.07	0.74	1.67	-0.44	-1.16	-1.96	-0.19	0.06	-0.20	-1.47	-1.11	-0.71
1994	-0.46	-0.84	-1.35	-0.26	-0.99	-0.21	-1.23	0.47	0.04	-0.38	0.09	0.35
1995	-0.07	0.83	-0.87	0.53	-0.01	1.69	1.80	1.74	1.21	1.69	1.27	-0.09
1996	0.38	0.29	-0.95	-1.87	-0.96	0.69	-0.38	-0.63	0.07	0.49	0.65	0.43
1997	0.78	0.39	-0.09	0.66	0.60	0.30	-0.11	0.25	-0.74	1.58	1.70	0.33
1998	-1.18	0.73	-1.06	0.86	0.69	0.51	0.87	2.15	1.68	0.54	-0.62	0.41
1999	0.29	0.07	0.46	0.30	0.03	0.19	0.82	0.89	0.76	-0.16	0.16	0.05

Primera serie sintética X generada por el modelo PAR(2)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1971	41.08	16.15	14.57	10.22	15.44	29.86	91.75	71.79	201.80	31.83	21.10	34.16
1972	23.15	38.61	16.73	10.78	17.62	13.66	64.67	24.56	148.43	34.29	22.53	27.37
1973	40.70	51.08	27.08	17.90	26.04	9.11	53.00	14.74	18.10	20.85	28.10	42.60
1974	26.96	16.62	16.86	8.87	17.03	13.83	21.18	96.04	160.79	83.76	26.56	27.28
1975	29.13	31.51	21.85	20.20	21.94	27.94	14.30	12.38	17.89	16.04	23.34	23.18
1976	28.49	30.30	25.34	19.28	19.94	34.42	193.86	134.13	382.42	324.46	82.40	38.19
1977	48.39	56.18	24.43	39.29	44.56	48.48	37.29	42.46	154.97	193.58	77.76	60.82
1978	36.14	31.21	17.92	12.36	12.21	18.58	21.35	77.66	154.23	128.84	92.13	76.95
1979	32.05	63.66	14.77	19.91	18.84	55.78	132.17	123.66	181.86	30.00	25.94	25.72
1980	42.69	21.93	20.57	36.50	33.38	68.62	60.40	66.36	60.57	25.74	25.73	25.81
1981	40.89	42.68	18.99	10.67	16.65	61.38	90.81	48.95	155.09	80.42	41.92	33.59
1982	28.47	26.52	22.87	33.15	20.28	13.04	9.81	10.97	54.74	50.09	49.85	25.74
1983	33.53	63.76	28.47	19.77	22.08	24.59	62.27	55.26	49.36	16.14	30.33	28.08
1984	37.00	41.85	19.30	17.17	29.47	71.76	50.91	86.52	262.56	101.72	83.76	32.89
1985	44.82	54.62	33.50	24.21	28.58	44.48	76.05	32.27	14.39	16.53	26.14	28.48
1986	31.73	27.42	22.83	12.93	17.65	132.09	198.11	133.56	469.95	100.18	82.57	53.94
1987	53.27	59.81	31.89	70.30	40.86	56.94	26.67	88.98	15.22	35.14	33.47	28.23
1988	30.30	36.57	18.70	19.13	24.53	46.74	66.44	121.74	48.61	46.49	79.21	44.94
1989	40.29	42.32	33.03	28.55	23.17	39.27	73.04	46.56	144.26	55.70	44.35	39.26
1990	29.52	41.48	12.97	16.04	17.45	60.84	303.03	51.21	43.12	36.65	19.93	23.66
1991	35.76	37.78	25.38	20.29	28.58	189.69	63.78	80.35	124.92	31.66	26.80	31.30
1992	28.31	37.59	25.39	18.62	24.66	4.85	7.98	3.55	21.64	21.49	22.23	31.63
1993	34.07	38.24	38.65	17.66	14.80	5.83	36.39	36.01	57.55	17.31	22.12	26.29
1994	29.70	23.01	14.56	19.04	15.77	23.91	13.77	50.17	72.40	46.61	42.88	35.89
1995	32.79	39.27	16.97	26.52	22.91	111.59	213.44	140.58	222.39	310.90	82.24	31.56
1996	36.85	33.02	16.53	9.70	15.98	49.94	29.95	20.54	74.78	104.24	58.23	36.70
1997	40.93	34.17	21.63	30.41	29.88	36.40	37.98	41.99	34.20	283.60	104.27	35.69
1998	24.68	38.02	15.97	30.29	29.85	43.11	101.04	195.86	349.80	109.02	28.97	36.49
1999	36.05	30.79	26.16	24.06	23.19	33.15	88.67	69.58	144.10	57.49	55.16	32.84

Media	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media	36.09	37.38	22.18	22.17	23.18	47.20	77.18	68.22	132.07	82.81	46.89	35.14
Var	51.04	134.13	42.92	149.56	58.61	1598.41	4907.76	2167.91	13560.23	7697.25	705.52	136.52
C. Asim	0.59	0.12	0.74	2.31	1.13	2.05	1.74	0.86	1.36	1.89	0.76	2.11
C. Curt	0.12	-0.39	-0.02	7.81	1.29	5.24	3.03	0.49	1.66	2.70	-0.92	5.21
C. Var	0.20	0.31	0.30	0.55	0.33	0.85	0.91	0.68	0.88	1.06	0.57	0.33

Bibliografía

García J. Fermín, Fuentes M. Óscar A.; *Análisis de sequías en México*; CENAPRED; México, 1999.

Ríos Padilla; *Las sequías en la época moderna*; México, 1996.

Florescano Enrique, Swan Susan; *Breve historia de la sequía en México*; Universidad Veracruzana, México, 1995.

García A. Virginia; *Las sequías históricas de México*; CIESAS, México, 1998.

Reyes Chávez Lilia; *Análisis regional de sequías*; Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería; UNAM, México, 2001.

Yevjevich V, de Cunha Luis; *Drought, environment and society*; Water Resources Publications; 1983.

Don Wilhite; *Bases para la planeación ante una sequía*; NOAA; Estados Unidos, 1996.

Ravelo A. C; *Proyecto de alerta temprana para la sequía y mitigación de sus efectos*; Argentina, 1999.

Aparicio M. Francisco; *Fundamentos de hidrología de superficie*; Limusa; México, 1997.

Escalante S. Carlos, Reyes Chávez Lilia; *Técnicas estadísticas en hidrología*; Facultad de Ingeniería, UNAM; México, 2002.

D. K. Smith; *Prevención de desastres naturales: El aporte de los servicios meteorológicos e hidrológicos*; Organización Meteorológica Mundial; Suiza, 1989.

Reducción de la vulnerabilidad a los fenómenos meteorológicos y clima extremo; Organización Meteorológica Mundial; Suiza, 2002.

Méndez P. Juan; *Un estudio de eventos hidrometeorológicos extremos en la República Mexicana*; Tesis de maestría en ciencias; Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM; México, 2003.

Magaña R. Víctor; *Los impactos del Niño en México*; Dirección General de Protección Civil; México, 1999.

Barradas Víctor, Patiño-Alvarado Ma. Cristina; *La vegetación y el cambio climático global en México*; Universidad Veracruzana; México, 1996.

H. Flohn; *Posibles cambios climáticos provocados por el hombre*; Centro de Investigación en Química Aplicada; Coahuila, México, 1993.

Galindo Ignacio; *La Oscilación del sur, El Niño, El caso de México*; Centro de Investigación en Ciencias de la Tierra, Universidad de Colima; México, 1996.

S. Fattorelli; *Integración de técnicas de radar y sensores remotos para la estimación de lluvias en aplicaciones hidrológicas y mitigación de riesgos de inundación*; Asociación Italiana de Hidronomía; Italia, 1999.

SAGARPA; *Anuario estadístico de la producción agrícola de México*; México, 1979-2000.

SEGOB; *Los municipios de Hidalgo*; México, 1996.

INEGI; *Perfil sociodemográfico de Hidalgo*; México, 2000.

INEGI; *Censos económicos de Hidalgo*; México, 1990, 1993, 1996.

INEGI; *Anuario estadístico de Hidalgo*; México, 2001.

INEGI; *Cuadernito estadístico municipal: Ixmiquilpan, Hidalgo*; México, 1994.