



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PARÁMETROS DE DISEÑO  
HIDROLÓGICO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JOYCE VIRIDIANA BELLO MARÍN

TUTOR PRINCIPAL  
Dr. FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES  
FACULTAD DE INGENIERIA UNAM

MÉXICO, D. F. MARZO 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M.I Juan Francisco Gómez Martínez

Secretario: Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka

Vocal: Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares

1<sup>er.</sup> Suplente: M.I. Jaqueline Lafragua Contreras

2<sup>do.</sup> Suplente: Dr. Carlos Patiño Gómez

Jiutepec, Morelos

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares

---

**FIRMA**

### **A MIS PADRES**

Félix M. Bello y Ofelia Marín.

Por ser mi motor. Porque ustedes me motivan para cumplir cada meta y cada sueño. Gracias por ser mi apoyo, por su amor y entrega. Gracias por la confianza que siempre han depositado en mí. Los amo.

### **A MI HERMANA GABY**

Nada sería igual sin tí. Por mostrarme tu fortaleza y estar a mi lado. Te amo hermana.

### **A JUAN ANTONIO**

Por tu apoyo. Porque a pesar de mis debilidades te quedaste y no me dejaste declinar. Por cada sueño compartido. Porque siempre estuviste. Muchas gracias MC.

## **Agradecimientos**

*Al dador de vida. Porque sin ti nada soy. Gracias Jesús.*

*El camino para finalizar esta etapa estuvo marcado por muchas personas que me brindaron su apoyo, amistad, conocimientos y a las cuales agradezco infinitamente desde el fondo de mi corazón, gracias a Dios por haberlos puesto en mi camino.*

*Mi agradecimiento especial para mi Tutor el Dr. F. Javier Aparicio M. por su tiempo, por su paciencia, por compartir su conocimiento, por su profesionalismo y dedicación para concluir este trabajo. Muchas gracias.*

*A mis sinodales el Dr. Víctor Alcocer, Mtro. Juan Francisco Gómez, Dr. Carlos Patiño, Mtra. Jaqueline Lafragua gracias por colaborar para que este trabajo finalizara satisfactoriamente a través de cada una de sus recomendaciones, tiempo y aportaciones.*

*Mi gratitud a la coordinación de Hidrología por las facilidades otorgadas en todo tiempo para la realización de este trabajo así como para el personal de la DEPMI-UNAM por las atenciones recibidas siempre.*

*A mi familia por su amor incondicional. En especial gracias a mis abuelitos, Luisa y David por su apoyo incondicional. Y a ustedes abuelitos Rosa y Manuel que los sigo recordando y es imposible no extrañarlos en cada momento, me encantaría que pudieran estar aquí.*

*Por su paciencia a Mirce, Javier, Giovanni, Gilberto, Antonio, gracias por su amistad, porque de todos aprendí académica y personalmente. Me siento muy feliz de haber coincidido en esta etapa.*

*Héctor, Sisso, gracias porque de alguna forma hicieron un minihogar y me hicieron parte de él. Los días en Cuernavaca no hubiesen sido lo mismo sin ustedes.*

*Luis Medel gracias por llegar y quedarte, sé que es para siempre.*

*A mis amigos Fer, Uriel, Eder, Alejandro, René, Ulises, Omar, Aldo, Francisco, Sergio, Luis Córdoba porque en la distancia siempre estuvieron conmigo.*

*A mis amigos que me brindaron su tiempo, compañía, diversión y muchos momentos agradables, Mónica, Ernesto, Víctor y Esther, Angy, Silvia, Edith, Rox, Gerardo, Vladimir, definitivamente han dejado huella en mi vida. Muchas gracias.*

## **EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PARÁMETROS DE DISEÑO HIDROLÓGICO**

### **Contenido**

1. Introducción .....	5
2. Marco Teórico .....	11
2.1 Cambio Climático .....	11
2.1 Efecto invernadero.....	12
2.2 Escenarios de cambio climático. ....	18
2.3 Modelos.....	29
2.4 Proceso lluvia-escurrimiento.....	36
2.4.1 Método de envolventes .....	40
2.4.2 Fórmula racional.....	42
2.4.3 Hidrograma Unitario .....	44
3. Metodología .....	46
4. Aplicaciones.....	51
4.1 Alto Balsas .....	51
4.2 La Boquilla .....	80
5. Conclusiones.....	108
6. Referencias .....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación de los distintos escenarios, respecto a las principales fuerzas determinantes.....	21
Tabla 2.2 Características de los modelos de circulación general atmósfera-océano a) Resolución horizontal se expresa como grados de latitud por longitud o como triangular (T) truncamiento espectral con una traducción aproximada de grados de latitud y longitud. La resolución vertical (L) es el número de niveles verticales. b) La resolución horizontal está expresada en grados de latitud por longitud, mientras que la resolución vertical (L) es el número de niveles verticales. (IPCC, 2007). .....	31
Tabla 2.3 Velocidad media para diferentes pendientes del cauce principal (USBR, 1974) .....	43
Tabla 4.1 Características de las 25 principales presas del país. FUENTE: CONAGUA. Subdirección General Técnica.....	54
Tabla 4.2 Obtención del HU para la cuenca Alto Balsas.....	57
Tabla 4.3 Obtención de Hidrograma Unitario para la cuenca Alto Balsas .....	59
Tabla 4.3 Gastos picos registrados en la cuenca Alto Balsas .....	61
Tabla 4.5 Resultados IPA e Índice de Infiltración media .....	65
Tabla 4.6 Obtención de lluvia efectiva máxima para el año 1998 correspondiente a la cuenca Alto Balsas del modelo japonés.....	67
Tabla 4.7 Errores de ajuste para el periodo <i>actual</i> 1979-2003.....	76
Tabla 4.8 Errores de ajuste para el periodo <i>futuro cercano</i> 2015-2039 .....	76
Tabla 4.9 Errores de ajuste para el periodo <i> finales de siglo</i> 2075-2099 .....	77
Tabla 4.10 Gastos en m <sup>3</sup> /s del modelo japonés para la cuenca Alto Balsas .....	77
Tabla 4.11 Periodos de retorno para la estimación del gasto máximo de diseño en las obras hidráulicas. Conagua 1999 .....	79
Tabla 4.12 Periodos de retorno para presas de almacenamiento para abastecimiento a poblaciones, riego, energía. Conagua 1999 .....	79
Tabla 4.13 Obtención del Hidrograma Unitario tradicional para el año 1981 de la cuenca La Boquilla.....	85
Tabla 4.14 Ordenadas de los hidrogramas unitarios para los años 1974, 1981 y 1983 .....	87
Tabla 4.15 Gastos pico anuales registrados .....	89
Tabla 4.16 Resultados IPA e Índice de Infiltración media .....	92
Tabla 4.17 Obtención de lluvia efectiva máxima para el año 1979 correspondiente al modelo japonés. ....	94
Tabla 4.18 Errores de ajuste para el modelo Japonés 1979-2003 .....	103
Tabla 4.19 Errores de ajuste para el modelo Japonés 2015-2039 .....	104
Tabla 4.18 Errores de ajuste Japonés 2075-2099 .....	104
Tabla 4.21 Gastos para diferentes periodos de retorno para los tres periodos del modelo japonés utilizando la fdp de menor error de ajuste .....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Proyecciones multimodelo de las pautas de cambio de las precipitaciones (IPCC, 2007). .....	7
Figura 1.2 Anomalía de precipitación mayo-noviembre (mm), 2075-2099 (Martínez y otros, 2010).....	8
Figura 2.1 Barreno Glacial Vostok. a) Dióxido de carbono; b) Temperatura de la atmósfera; c) Metano; d) $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ ; e) Insolación a mediados de Junio (Petit y otros, 1999). .....	15
Figura 2.2 Causas del incremento de la concentración de gases de carbono en la atmósfera. ....	16
Figura 2.3 Forma esquemática los escenarios del IE-EE (IPCC, 2000).....	20
Figura 2.4 Emisiones mundiales de CO <sub>2</sub> asociadas a la energía y a la industria (a) y a los cambios de uso de las tierras (b) entre 1900 y 1990. SIE: Segundo Informe de Evaluación. (IPCC, 2000).....	23
Figura 2.5 Emisiones anuales totales de CO <sub>2</sub> entre 1990 y 2100 (en gigatoneladas de carbono (GtC/año) (IPCC, 2000). .....	24
Figura 2.6 Emisiones totales de CO <sub>2</sub> acumuladas mundiales (GtC) desde 1990 hasta 2100 .....	26
Figura 2.7 Emisiones normalizadas (con arreglo a los valores comunes para 1990 y 2000) anuales mundiales de metano para los escenarios IE-EE (en MtCH <sub>4</sub> /año) FUENTE: (IPCC, 2000). .....	26
Figura 2.8 Emisiones normalizadas (con arreglo a los valores comunes para 1990 y 2000) anuales mundiales de óxido nitroso para los escenarios IE-EE (en MtN/año) FUENTE: (IPCC, 2000).....	27
Figura 2.9 Tipos de escurrimiento (Aparicio, 2009).....	36
Figura 2.10 Factores que afectan el escurrimiento (Campos Aranda, 2007). .....	37
Figura 2.11 Clasificación de Modelos Hidrológicos (Ballinas González, 2011). .....	39
Figura 2.12 Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza del objetivo (Campos Aranda, 2007).....	40
Figura 2.13 Coeficientes de las envolventes para las 37 regiones hidrológicas. (Orozco y otros , 2005) .....	42
Figura 3.1 Distribución de los datos generados por el modelo japonés. ....	48
Figura 4.1 Cuenca Balsas .....	52
Figura 4.2 Hidrografía Alto Balsas .....	53
Figura 4.3 Ubicación Presa El Caracol y estación San Juan Tetelcingo .....	55
Figura 4.4 Separación del gasto base y gasto directo para la cuenca Alto Balsas .....	57
Figura 4.5 Hidrograma Unitario para el año 1976 de la cuenca Alto Balsas.....	58
Figura 4.6 Hidrogramas Unitarios para la cuenca Alto Balsas .....	59
Figura 4.7 Obtención del volumen de escurrimiento directo para la cuenca Alto Balsas .....	60
Figura 4.8 Hidrograma Unitario para la cuenca Alto Balsas .....	61
Figura 4.9 Polígonos de Thiessen para la cuenca Alto Balsas correspondientes al año 1977. ....	62
Figura 4.10 Hidrograma y precipitaciones medias diarias para la cuenca Alto Balsas, correspondientes a la avenida máxima del año 1987.....	63
Figura 4.11 Obtención del índice de infiltración media para el año 1987 de la cuenca Alto Balsas. ....	64
Figura 4.12 Curva $\phi$ vs IPA cuenca Alto Balsas.....	66
Figura 4.13 Lluvias máximas anuales para cada día de datos registrados y del modelo japonés para la cuenca Alto Balsas. ....	68
Figura 4.14 Comparación de gastos para diferentes periodos de retorno del modelo japonés y el registrado .....	69
Figura 4.15 Gastos para diferentes periodos de retorno de datos registrados para la cuenca Alto Balsas .....	69
Figura 4.16 Gastos para diferentes periodos de retorno de datos obtenidos por el modelo japonés para la cuenca Alto Balsas .....	70
Figura 4.17 Comparación de gastos registrados, del modelo japonés y del modelo japonés corregido para diferentes periodos de retorno para la cuenca Alto Balsas (1979-2003).....	71

Figura 4.18 Gastos corregidos para los periodos <i>actual</i> , <i>futuro cercano</i> y <i> finales de siglo</i> para la cuenca Alto Balsas.....	72
Figura 4.19 Gastos para diferentes periodos de retorno mediante diferentes FDP del periodo actual (1979-2003).....	73
Figura 4.20 Gastos para diferentes periodos de retorno mediante diferentes FDP del periodo <i>futuro cercano</i> (2015-2039).....	74
Figura 4.21 Gastos para diferentes periodos de retorno mediante diferentes FDP del periodo <i>finales de siglo</i> (2075-2099).....	75
Figura 4.22 Gastos mediante el modelo japonés para diferentes periodos de retorno con la FDP de menor error de ajuste para la cuenca Alto Balsas.....	78
Figura 4.23 Ubicación de la cuenca de la presa.....	81
Figura 4.24 Hidrografía de la cuenca en estudio.....	83
Figura 4.25 Separación del gasto base y el escurrimiento directo avenida de 1981 cuenca La Boquilla.....	84
Figura 4.26 Hidrograma Unitario para el año 1981 de la cuenca La Boquilla.....	86
Figura 4.27 Hidrogramas Unitarios.....	87
Figura 4.28 Obtención del hidrograma unitario La Boquilla.....	88
Figura 4.29 Hidrograma Unitario La Boquilla.....	89
Figura 4.30 Polígonos de Thiessen para la cuenca La Boquilla correspondiente al año 1977.....	90
Figura 4.31 Hidrograma y precipitaciones para la avenida máxima de 1981 para la cuenca La Boquilla.....	91
Figura 4.32 Curva IPA Vs $\phi$ .....	93
Figura 4.33 Precipitaciones máximas anuales cada 2 días del modelo japonés y registrados.....	95
Figura 4.34 Gastos para diferentes periodos de retorno del periodo registrado y japonés.....	96
Figura 4.35 Gastos para diferentes periodos de retorno a partir de datos registrados de la cuenca.....	97
Figura 4.36 Gastos para diferentes periodos de retorno a partir de datos del modelo japonés de la cuenca La Boquilla.....	97
Figura 4.37 Gastos para el modelo japonés corregido 1979-1999.....	99
Figura 4.38 Gatos para diferentes periodos de retorno, del modelo japonés corregido.....	100
Figura 4.39 Gastos para el modelo japonés del periodo 1979-2003.....	101
Figura 4.40 Gastos para el modelo japonés del periodo 2015-2039.....	102
Figura 4.41 Gastos para el modelo japonés del periodo japonés 2075-2099.....	103
Figura 4.42 Gastos para diferentes periodos de retorno para los tres periodos del modelo japonés.....	105
Figura 4.43 Gastos de diseño para diferentes periodos de retorno para la cuenca de la presa La Boquilla considerando cambio climático.....	106
Figura 4.44 Gastos obtenidos para diferentes periodos de retorno del modelo japonés para la cuenca La Boquilla.....	106

## 1. Introducción

Para mejorar y facilitar las condiciones de vida, el hombre ha dedicado su tiempo y esfuerzo en la creación de obras civiles, mismas que se han convertido en factores para el desarrollo económico, social y ambiental. Estas obras deben ser diseñadas bajo diferentes reglamentos, normas o parámetros que garanticen su óptimo aprovechamiento y seguridad mínima requerida bajo el menor costo de inversión.

Dentro de las obras civiles, se encuentran las obras hidráulicas tales como canales, vertedores, obras de toma, diques, bordos de protección, presas, sistemas de drenaje y alcantarillado, entre otras, las cuales están relacionadas con los eventos hidrológicos registrados, así como los futuros. Para estimar los eventos que podrían presentarse, los modelos matemáticos basados en las leyes de la mecánica o física, pueden resultar exageradamente grandes, complicados y difíciles de manejar (Aparicio, 2009). Es por esto que se emplean métodos estadísticos que son más sencillos en su manejo y dan resultados suficientemente precisos para fines prácticos.

Para el diseño, manejo y operación de obras hidráulicas se usan los registros de las variables del ciclo hidrológico, en particular el escurrimiento superficial máximo anual, aceptando la hipótesis de estacionariedad (Milly, y otros, 2008), según la cual propiedades estadísticas son constantes en el tiempo. Formalmente, la estacionalidad se define, según Kottegoda, 1980, de la siguiente manera: “Los componentes estocásticos están constituidos por oscilaciones irregulares y efectos aleatorios los cuales no pueden ser estrictamente representados físicamente y requieren conceptos probabilísticos para su descripción. Una característica importante de una serie de tiempo discreta, es decir,  $X_t$ ,  $t = 1, 2, 3 \dots N$ , es que puede poseer estacionariedad. Para definir las propiedades matemáticamente, se estiman conjuntos de funciones de distribución de probabilidad de las observaciones tomadas en los tiempos  $1, 2, 3, \dots, N$  y nuevamente para los tiempos  $t + 1, t + 2, t + 3 \dots, t + N$  denotados por  $f(x_1, x_2, x_3 \dots, x_N)$  y  $f(x_{1+t}, x_{2+t}, x_{3+t}, \dots, x_{N+t})$  respectivamente. Para un proceso estocástico estacionario, ambos conjuntos de funciones de distribución de

probabilidad de N-dimensiones, son estadísticamente idénticos para todos los valores de  $N$  y  $t$ ". Un proceso estacionario tiene entonces la propiedad de que la media, la variancia y la estructura de autocorrelación no cambian con el tiempo.

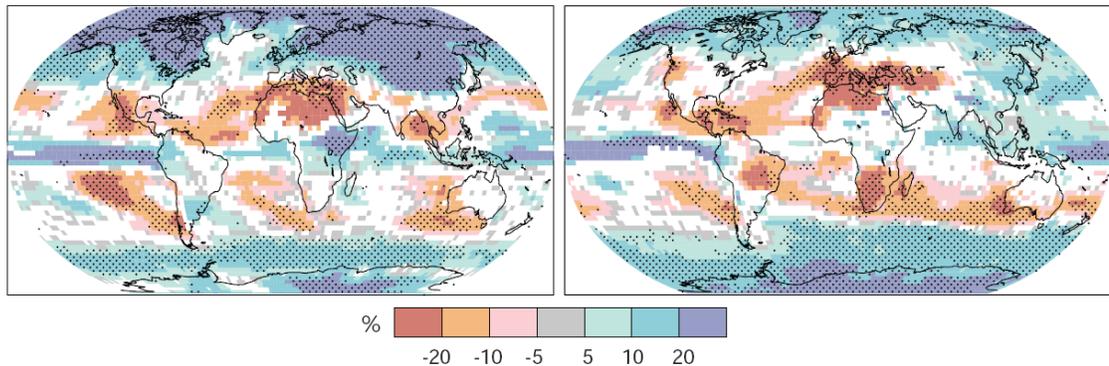
Al asumir la hipótesis de estacionareidad en el diseño de las obras, se acepta que las variables que forman parte del sistema climático como la precipitación mantienen sus propiedades estadísticas, debido a que el sistema climático no presenta variaciones salvo las cíclicas; sin embargo los aumentos recientes de temperatura registrados tanto en la atmósfera como en el océano concuerdan con los aumentos del nivel del mar y la disminución de cubierta de nieve en el hemisferio norte. Éstos son indicadores de que el planeta se está calentando, y son manifestaciones de un cambio climático (IPCC, 2007).

Para analizar de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente la información científica, técnica y socioeconómica relevante para atender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las fuerzas humanas, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Pánel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988.

De acuerdo al IPCC, es muy probable que aumente la frecuencia de los valores extremos, de las olas de calor y de las precipitaciones extremas. También es probable que en el futuro los ciclones tropicales (tifones y huracanes) sean más intensos, con máximos más acentuados de la velocidad del viento y mayor abundancia de precipitaciones intensas, todo ello vinculado al constante aumento de la temperatura superficial de los mares tropicales (IPCC, 2007).

Asimismo, se estima que habrá un aumento de promedios mundiales de vapor de agua, evaporación y precipitaciones. A escala regional se pueden observar tanto aumentos como disminuciones de precipitación, ver Figura 1.1, donde se muestran los cambios de la precipitación relativos (en valores porcentuales) para el periodo 2090-2099, respecto del periodo 1980-1999. Los valores son promedios multimodelo basados en el escenario A1B (ver subcap. 2.2) para los periodos diciembre-febrero (izquierda) y junio-agosto (derecha). Las

áreas en blanco representan los lugares en que más de un 66% de los modelos coinciden en el cambio de signo, y las áreas punteadas representan los lugares en que más de un 90% de los modelos concuerdan en el cambio de signo (IPCC, 2007).



**Figura 1.1** Proyecciones multimodelo de las pautas de cambio de las precipitaciones (IPCC, 2007).

Se proyecta que la frecuencia de las precipitaciones extremas se incrementará en casi todo el mundo. Es probable que la intensidad media y máxima de las precipitaciones causadas por los ciclones tropicales aumente visiblemente (IPCC, 2001).

Estos cambios transforman el ciclo hidrológico, modificando la premisa aceptada por años para el diseño y operación de los sistemas de manejo de agua, de que las variables climatológicas e hidrológicas son estacionarias.

Se estima que el cambio climático ocasionará modificaciones considerables a los regímenes de precipitación sobre el país, así como la intensidad y variabilidad con que se presentan los ciclones tropicales en los océanos que rodean a México (Martínez y otros, 2010).

La República Mexicana recibe una precipitación acumulada media anual de 770 mm; gran parte de ella ocurre de mayo a noviembre, asociada a sistemas meteorológicos como las ondas del este, ciclones tropicales, desprendimientos de la zona de convergencia intertropical, frentes fríos y el monzón de Norteamérica, además de sistemas convectivos de menor escala que se desarrollan localmente por forzamiento orográfico (Martínez y otros, 2010).

En el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático (Martínez, y otros, 2010) editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, mediante el modelo japonés de alta resolución, se obtuvieron anomalías de precipitación en México para el periodo 2015-2039, observándose anomalías mayormente positivas para las zonas costeras de Chiapas, Oaxaca y Guerrero, así como para el centro de Michoacán, el norte de la Sierra Madre Occidental y el Istmo de Tehuantepec. Las anomalías negativas más significativas se encuentran sobre Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y el sur de Puebla. La zona noreste de la república, la península de Yucatán, el norte de Chiapas y sur de Tabasco también presentan anomalías negativas. Para el periodo 2075-2099 los patrones son similares que para el anteriormente descrito, aunque la magnitud se incrementa considerablemente.

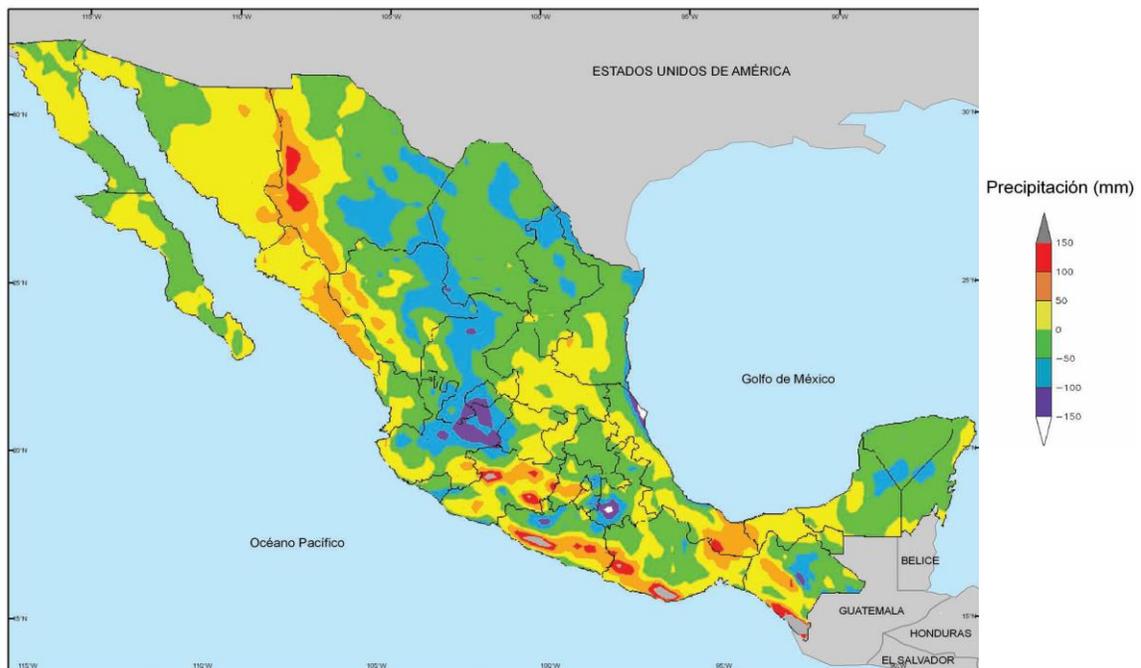


Figura 1.2 Anomalía de precipitación mayo-noviembre (mm), 2075-2099 (Martínez y otros, 2010)

En México existen en total 1,471 cuencas hidrográficas, agrupadas en 37 regiones hidrológicas, dentro de las cuales existe un gran número de obras hidráulicas (CONAGUA, 2011). Los criterios de diseño de todas estas obras y se basan en la consideración de que la información climática registrada sirve de

orientación confiable para el futuro, es decir las variables climáticas e hidrológicas obedecen a procesos que no se modifican en el tiempo (Martínez Austria, 2007). Sin embargo como se mencionó anteriormente, las variables climatológicas e hidrológicas varían en el tiempo es decir, no son estacionarias (Milly y otros, 2008).

Se cuenta con aproximadamente 4,462 presas y bordos de almacenamiento, 6.5 millones de hectáreas de riego, 2.9 millones de hectáreas de temporal tecnificado, 631 plantas potabilizadoras en operación, 2,029 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, 2,186 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación y más de 3,000 km de acueductos (CONAGUA, 2011).

De las más de 4,462 presas y bordos en México, 667 están clasificadas como grandes presas conforme a la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD). La capacidad total de almacenamiento del país es de 150 mil millones de metros cúbicos (CONAGUA, 2011). La presa de mayor capacidad en México es La Angostura cuya capacidad al NAME es 20,217 hm<sup>3</sup>, mientras que la de mayor altura es la de Chicoasén con 261m.

Las avenidas extremas originadas por fenómenos como ciclones y las tormentas tropicales ponen en riesgo a las presas, cuya eventual falla podría producir verdaderas catástrofe (Aldama y otros, 2006).

Para identificar las afectaciones en los parámetros de diseño hidrológico debido al cambio climático es necesario realizar un análisis de la variación que éste provoca en la relación precipitación-escorrentía. Esta afectación se ve reflejada en las obras hidráulicas, cuya revisión de seguridad se torna importante, principalmente en el caso de las presas donde una falla puede producir severos daños, pérdidas o afectaciones.

Como se mencionó anteriormente, en México existen presas de gran importancia que pueden llegar a verse en peligro debido al cambio climático en caso desfavorable. Por otra parte, en la planeación y el diseño de las nuevas presas y obras hidráulicas será de suma importancia considerar, en los parámetros de diseño, los efectos del cambio climático.

Este trabajo se presenta con la finalidad de analizar los efectos de cambio climático en dos cuencas de la República Mexicana, donde se tienen dos de las presas más importantes de nuestro país mediante una metodología que puede servir de guía en otros casos.

El capítulo 2 contiene el marco teórico, iniciando con *Cambio Climático*, qué es, su origen, consecuencias, bases científicas, los *Escenarios* en los que se representa así como los *Modelos* aprobados por el IPCC para determinar cuantitativamente de qué forma se presentarán las variables climatológicas afectadas por dicho cambio climático así como el utilizado en este trabajo. Finalmente, se hace una descripción de la relación *lluvia-escorrentía* y el método usado en este trabajo para transformar los escenarios de lluvia en gastos de entrada a las presas mencionadas.

En el capítulo 3 se presenta la *Metodología* empleada en este trabajo, la descripción de la obtención de los escurrimientos registrados así como las de los proyectados por el modelo utilizado.

En el capítulo 4 se presenta la aplicación de la metodología a las cuencas de los ríos Alto Balsas y Conchos.

Finalmente las *Conclusiones* se presentan en el capítulo 5.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Cambio Climático**

El término cambio climático denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana (IPCC, 2007). Esto es, el cambio climático obedece tanto a causas naturales como a las originadas en la actividad humana, llamadas antropogénicas.

El cambio climático es un hecho que puede ser evidenciado por el aumento de temperatura del aire y del océano; el aumento del nivel del mar por efecto de la dilatación térmica y el deshielo de los glaciares, casquetes de hielo y de los mantos de hielo polares; la disminución observada de las extensiones de nieve y de hielo; aumento de precipitación en partes orientales de América del Norte y del Sur y del norte de Europa, Asia septentrional y central; disminución de precipitación en Sahel, Mediterráneo, Sur de África y partes del Sur de Asia (IPCC, 2007).

Los aumentos de temperatura en el aire y en el océano concuerdan con los aumentos del nivel del mar y la disminución de cubierta de nieve en el Hemisferio Norte. Debido a que la temperatura forma parte importante del clima, sus variaciones también contribuyen a numerosos cambios en otros aspectos del mismo, como la precipitación y algunos fenómenos meteorológicos extremos. Estos cambios son indicadores que el planeta se está calentando.

Estas aseveraciones las ha proporcionado el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el cual fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) cuyo mandato es analizar la información científica necesaria para abordar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas, así como formular estrategias de respuesta realistas.

## **2.1 Efecto invernadero**

El clima tiene lugar en el océano, el continente, en la capa de la atmósfera más baja llamada troposfera, así como en la criosfera, que es la capa de hielo y nieve que cubre parcialmente océanos y continentes. La atmósfera y el océano interactúan térmica, hidrológica y dinámicamente, siendo el segundo el principal regulador del clima (Garduño, 1994).

El sistema climático es muy complejo, pues en él participa una gran cantidad de parámetros, variables e interacciones, tales como temperatura, precipitación, humedad, radiación, viento. Es decir, el clima es la combinación de muchos procesos acoplados, los cuales son principalmente físicos, pero también los hay químicos, biológicos, sociales, etc. (Garduño, 1994).

La temperatura es la variable fundamental del clima; es la que mayores cambios muestra y la que más lo caracteriza. Depende principalmente del balance de la radiación solar.

Todos los cuerpos emiten radiación, por el simple hecho de mantener una temperatura mayor al cero absoluto. Esta radiación está constituida por ondas electromagnéticas que no necesitan ningún medio material para propagarse, más bien la materia dificulta su avance (Garduño, 2004).

En la atmósfera y el clima la radiación actuante es la que emite el Sol (onda corta) y la emitida por la tierra (onda larga). El Sol es la fuente de energía más importante para que funcione este sistema climático (Conde, 2007).

De acuerdo a la distancia existente entre la Tierra y el Sol, así como el albedo (capacidad de reflejar la radiación que le llega) de la primera, la temperatura efectiva de ésta, resultaría de  $-19^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, la temperatura promedio anual y global es de  $+14^{\circ}\text{C}$ , debido al fenómeno conocido como efecto invernadero, que se da en cualquier planeta o satélite natural que tenga atmósfera (IPCC, 2007).

El fenómeno conocido como efecto invernadero recae en la atmósfera, la cual funciona como un filtro que deja pasar la radiación de onda corta, es decir la emitida por el Sol, y cuando ésta llega a la Tierra, una parte es absorbida por el continente, el mar y la criosfera, que al calentarse, vuelven a emitir la radiación

pero en forma de onda larga, así como la radiación propia, mientras que la otra parte es reflejada hacia el espacio exterior. La radiación de onda larga se retiene en su mayor parte por la atmósfera, calentándola, en consecuencia. Otra parte se fuga hacia el exterior. El efecto invernadero es el producido por la fracción absorbida de ambas radiaciones (Garduño, 2004).

La atmósfera es una mezcla de gases y de aerosoles (partículas sólidas y líquidas) suspendidos en ella. La atmósfera está constituida por 21% de oxígeno (O<sub>2</sub>), 78% de nitrógeno, sumando el 99%. Los gases efecto invernadero (GEI) están dentro del 1% restantes de la composición atmosférica. Entre los más importantes se encuentran el vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). También dentro de los GEI se encuentran los gases traza (GT), llamados así por su presencia ínfima en la atmósfera, como lo son el metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y clorofluorocarbonos (CFCs) (Garduño, 2004).

Los gases de efecto invernadero se encuentran de forma natural en la atmósfera, a excepción de los clorofluorocarbonos. Sin embargo, el hombre ha aumentado su cantidad en forma acelerada. Las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado desde la era preindustrial (1750), en un 70% entre 1970 y 2004 (IPCC, 2007).

El dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, es el GEI antropogénico más importante. Entre 1970 y 2004, las emisiones anuales de este gas han aumentado en un 80%, y en 2004 representaban un 77% de las emisiones de GEI antropogénicos (IPCC, 2007).

Los aumentos de concentración mundial de CO<sub>2</sub> se deben a la utilización de combustibles de origen fósil y los cambios de uso de la tierra.

En enero de 1998, la colaboración del proyecto de perforación de hielo entre Rusia, EUA y Francia, en la estación rusa Vostok en el este de la Antártida produjo el núcleo más profundo de hielo nunca antes alcanzado, cuya profundidad fue de 3623 m (Petit y otros, 1999).

En la Figura 2.1 se muestran los paleo-registros de dióxido de carbono (a), metano (c) así como la temperatura en la atmósfera (b), de los registros de la perforación del glaciar en la estación Vostok para un periodo mayor a los 400 mil

años. En la gráfica, pueden observarse las similitudes del comportamiento de las tres variables antes mencionadas: sus valores se incrementan y decrecientan sincrónicamente. No obstante, la situación actual rompe esta secuencia; en el pasado los tres registros han tenido cuatro oscilaciones, con periodo de unos cien mil años, y oscilan dentro de los mismos límites superior e inferior. Este comportamiento representa un sistema bio-geo-físico-químico complejo y autocontrolado, es el metabolismo natural de la biosfera terrestre, del cual el efecto invernadero es sólo un componente. El máximo de CO<sub>2</sub> alcanzado cinco veces en este periodo (desde hace 400 mil años) es de 280 ppmv; ahora hay 370 ppmv, un valor insólito que se sale del cuadro que contiene los registros; además se ha alcanzado con una rapidez también insólita, en cosa de un siglo, siendo que los cambios previos de ese tamaño necesitaron decenas de milenios para darse (Garduño, 2004).

La sincronía observada entre la temperatura y los principales gases invernadero es notoria en el intervalo geológico mostrado en la Figura 2.1; en periodos menores no es tan clara, pues otros fenómenos de plazos cortos perturban la temperatura; entre ellos destacan oscilaciones naturales internas del sistema climático como el Niño y la Niña: el primero eleva la temperatura a escala planetaria, y la segunda la reduce. Otro factor importante de la variabilidad interanual del clima son las erupciones volcánicas, que inyectan hasta la estratosfera aerosoles que quedan suspendidos por años y enfrían el clima planetario. El Niño tiene cierta periodicidad de recurrencia; en cambio, el vulcanismo es más bien azaroso en su manifestación, y la magnitud de ambos es muy variable. Hay un aerosol artificial, el sulfato, producido también por la industria, que aumenta sistemáticamente y atenúa el calentamiento debido al incremento del efecto invernadero. Por todos estos elementos adicionales al efecto invernadero, que afectan al clima, los registros históricos de CO<sub>2</sub> (aumentado antropogénicamente) y de la temperatura a partir de mediados del siglo XIX no van paralelos, aunque sí hay un incremento claro de ésta, como de 0.6°C (Garduño, 2004).

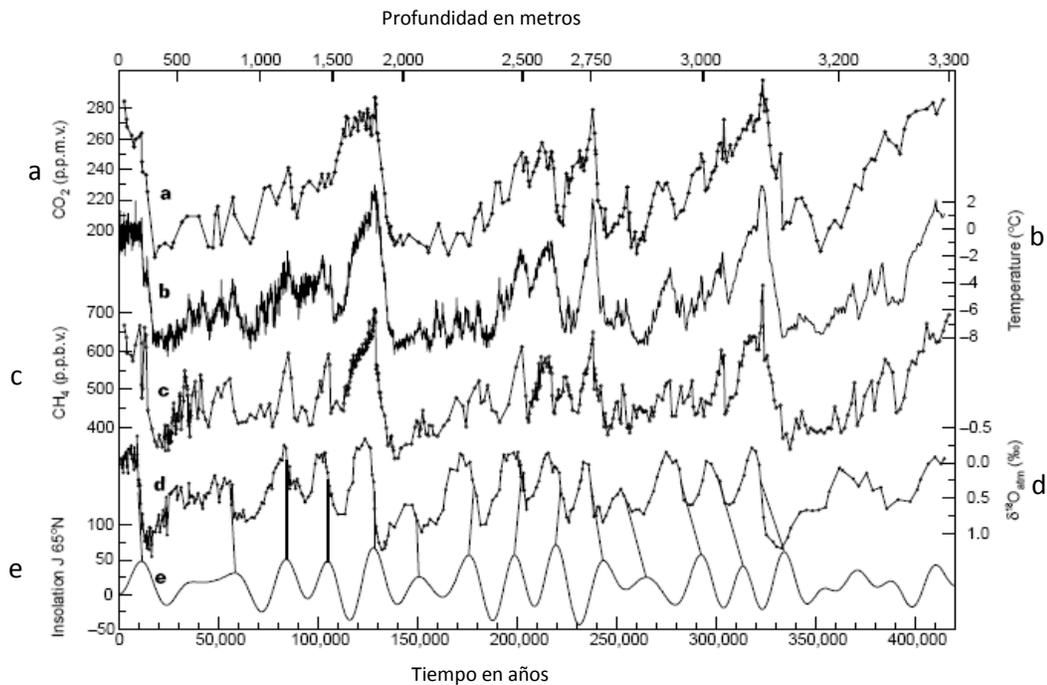


Figura 2.1 Barreno Glacial Vostok. a) Dióxido de carbono; b) Temperatura de la atmósfera; c) Metano; d)  $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ ; e) Insolación a mediados de Junio (**Petit y otros, 1999**).

Cuando se incrementa la temperatura, la atmósfera tiende a conservar la humedad relativa. El vapor de agua no es un gas de efecto invernadero antropogénico, aunque sí es un retroalimentador positivo del efecto climático inducido por el aumento antropogénico de los otros gases efecto invernadero, ya que amplifica el calentamiento debido a ellos (Garduño, 2004).

Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta (concentraciones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo) resultado de la actividad humana (Magaña Rueda, 2004).

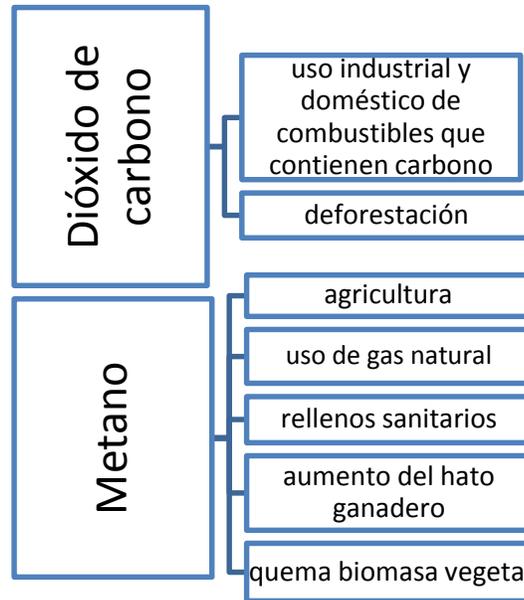


Figura 2.2 Causas del incremento de la concentración de gases de carbono en la atmósfera.

Las causas del incremento de la concentración de gases de carbono en la atmósfera están bien identificadas, como puede representarse en la Figura 2.2. En el caso del CO<sub>2</sub> son el uso industrial y doméstico de combustibles que contienen carbono (petróleo, carbón, gas natural y leña), la deforestación –que provoca la descomposición de la materia orgánica- y la quema de biomasa vegetal. En el caso del metano son la agricultura (por ejemplo cultivo de arroz), el uso de gas natural, los rellenos sanitarios, el aumento del hato ganadero y la quema de la biomasa vegetal (Jaramillo, 2004).

Los efectos combinados de la urbanización, la industrialización y el crecimiento poblacional alteran el paisaje natural y la respuesta hidrológica de las cuencas (Campos Aranda, 2010).

Los cambios de la cubierta terrestre y de uso de la tierra influyen en el albedo superficial, en la evapotranspiración, en las fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero, o en otras propiedades del sistema climático, por lo que pueden ejercer un forzamiento radiativo y tener otros impactos sobre el clima, a nivel local o mundial. El cambio de uso de suelo designa también los fines sociales y económicos que guían la gestión de la tierra (por ejemplo, el pastoreo, la extracción de madera o la conservación) (IPCC, 2007).

La Organización de las Naciones Unidas ha impulsado la llamada Convención Marco para el Cambio Climático, en donde los países establecen acuerdos, tratados o protocolos para modificar el posible cambio climático futuro. Dichos acuerdos tienen la finalidad que los países reduzcan sus emisiones de gases de efecto invernadero.

En 1997 se estableció el protocolo de Kyoto, donde los países firmantes, entre ellos México, se comprometieron a reducir sus emisiones de GEI a niveles a los que se tenían en 1990 (Conde, 2007).

La variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar alteran el equilibrio energético del sistema climático.

Los cambios en el incremento de la temperatura, debido al aumento de GEI antropogénicos, traen consigo modificaciones que repercuten en ámbitos sociales, económicos, políticos, sistemas físicos y biológicos. Dentro de los cambios en los sistemas físicos se encuentran la nieve, el hielo, el terreno congelado, el ciclo hidrológico y los procesos costeros. Las precipitaciones como parte del ciclo hidrológico se ven modificadas debido al ya mencionado cambio climático.

## **2.2 Escenarios de cambio climático.**

El aumento de la temperatura promedio del aire y del océano, la disminución de la cubierta de hielo y el aumento del nivel promedio del mar son pruebas palpables del calentamiento del sistema climático (IPCC, 2007). Dicho calentamiento es el resultado de la acumulación de gases efecto invernadero en la atmósfera, producto de actividades antrópicas marcadas principalmente por el inicio de la revolución industrial, en la segunda mitad del siglo XVIII y principios del XIX.

El aumento de emisiones de GEI en el planeta se encuentra relacionado con el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico. Un aumento de la población conlleva a una mayor demanda de alimentos, de servicios, recursos hídricos, todos estos traducidos en una mayor demanda de energía, mientras que el nivel de desarrollo socioeconómico repercute en gran manera en el cambio del uso de combustibles para el desarrollo de diferentes fuentes de energía, con la finalidad de abastecer cada una de las necesidades de la población.

Debido a las variaciones de emisión de gases efecto invernadero, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) desarrolló varios escenarios de emisiones en 1990 y 1992, denominados IS92, que sirvieron de base para los modelos de circulación mundial, los cuales analizaron un posible cambio climático, las repercusiones y opciones para mitigar dicho cambio, proporcionando estimaciones de gases efecto invernadero. Sin embargo, para 1995 se analizaron dichos escenarios, y se recomendó tomar en cuenta los cambios importantes que se habían tenido desde 1992 a la fecha, en la comprensión de las fuerzas que rigen las emisiones; dichas fuerzas corresponden a la combinación del crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico. En consecuencia, el IPCC desarrolló un nuevo conjunto de escenarios, los cuales se describen en su Informe Especial de Escenarios de Emisiones (IE-EE) (IPCC, 2000). Estos nuevos escenarios tuvieron valores de referencia mejorados con

respecto a las emisiones, y se examinaron diferentes tasas y tendencias del cambio tecnológico así como diversas hipótesis de desarrollo económico.

Los escenarios son proyecciones de las condiciones que podría presentar nuestro planeta, en particular de las variables de precipitación y temperatura, como producto de las emisiones futuras de Gases Efecto Invernadero. Es necesario recalcar que no son pronósticos, debido al grado de incertidumbre del comportamiento y combinación de las fuerzas determinantes las cuales producen un fuerte impacto sobre las tendencias de las emisiones. La utilidad de los diferentes escenarios es para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, la evaluación de los impactos e iniciativas de adaptación y de mitigación.

Para relacionar de forma coherente las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas o familias diferentes (Figura 2.3), las cuales representan un cambio o tendencia en aspectos que se valoran positiva o negativamente:

- Demográficos
- Sociales
- Medio ambientales
- Económicos
- Tecnológicos

Los escenarios abarcan un gran número de las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas determinantes de las emisiones de GEI, y son representativos de los trabajos publicados. Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una “familia de escenarios” (IPCC, 2000).

Para cada línea evolutiva, se han desarrollado diversos escenarios, basados en distintos modelos, capaces de representar las diversas combinaciones presentes de las fuerzas determinantes. En total, se generaron 40 escenarios, en seis modelos representativos, como se muestra en la Figura 2.3.

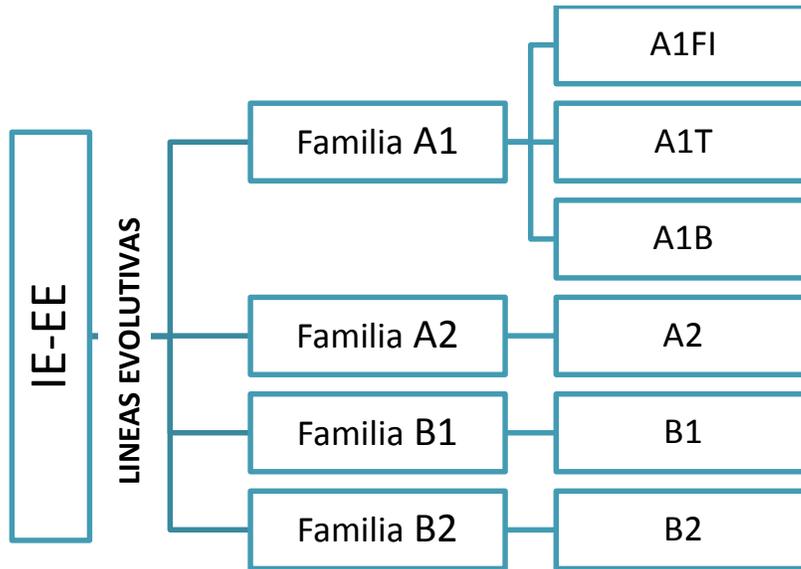


Figura 2.3 Forma esquemática los escenarios del IE-EE (IPCC, 2000)

El conjunto de escenarios se compone de seis grupos de escenarios tomados de las cuatro familias: un grupo de cada una de las familias A1, A2, B1 y B2, y tres grupos de la familia A1, que caracterizan el desarrollo alternativo de tecnologías de energía, de la siguiente manera:

A1FI: utilización intensiva de combustibles de origen fósil

A1B: equilibrado

A1T: predominantemente con combustibles no de origen fósil

En la Tabla 2.1 se puede observar una comparación de los distintos escenarios, respecto a las principales fuerzas determinantes, que abarcan las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinarán las emisiones futuras de GEI .

Tabla 2.1. Comparación de los distintos escenarios, respecto a las principales fuerzas determinantes

FAMILIA ESCENARIO	A1			A2	B1	B2
	A1FI	A1T	A1B	A2	B1	B2
<b>ECONOMÍA</b>	Rápido crecimiento económico			Desarrollo económico orientado a las regiones. Crecimiento económico por habitante más lento	Rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información	Predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica. Desarrollo económico intermedio.
<b>POBLACIÓN</b>	Alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente. Una característica importante es su convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales.			Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento.	Alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente. como en la línea evolutiva A1	Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2
<b>TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE</b>	Utilización intensiva de combustibles de origen fósil	Utilización de fuentes de energía no de origen fósil	Utilización equilibrada de todo tipo de fuentes	El cambio tecnológico está más fragmentado y es más lento que en otras líneas evolutivas.	Utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad medioambiental, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.	Cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

En el aspecto económico, se consideró para todos los escenarios un horizonte favorecedor, suponiendo que el producto mundial bruto superará los valores actuales de aquí al 2100.

En el aspecto poblacional, se utilizaron para los escenarios A1 y B1 proyecciones de 1996 del Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), cuyas estimaciones indican que la población mundial aumentará hasta 8700 millones de habitantes hasta mediados de siglo, y disminuirá a 7000 millones para 2100. Para el escenario A2 se presenta el de mayor incremento de la población, alcanzando para 2100 15,000 millones de habitantes. Finalmente para el escenario B2, se utilizó la proyección de población media de la ONU de 1998, alcanzando 10,400 millones de habitantes para 2100 (IPCC, 2000).

En la mayoría de los escenarios, la extensión forestal mundial sigue disminuyendo durante varios decenios, como consecuencia principalmente del aumento de la población y de los ingresos. Esta tendencia actual termina invirtiéndose en la mayoría de los escenarios, siendo las familias B1 y B2 las que arrojan el mayor aumento final de la extensión forestal de aquí a 2100, en comparación con 1990. Los cambios de utilización agrícola de la tierra están determinados principalmente por la variación de la demanda de alimentos que suscitarán los cambios demográficos y dietéticos (IPCC, 2000).

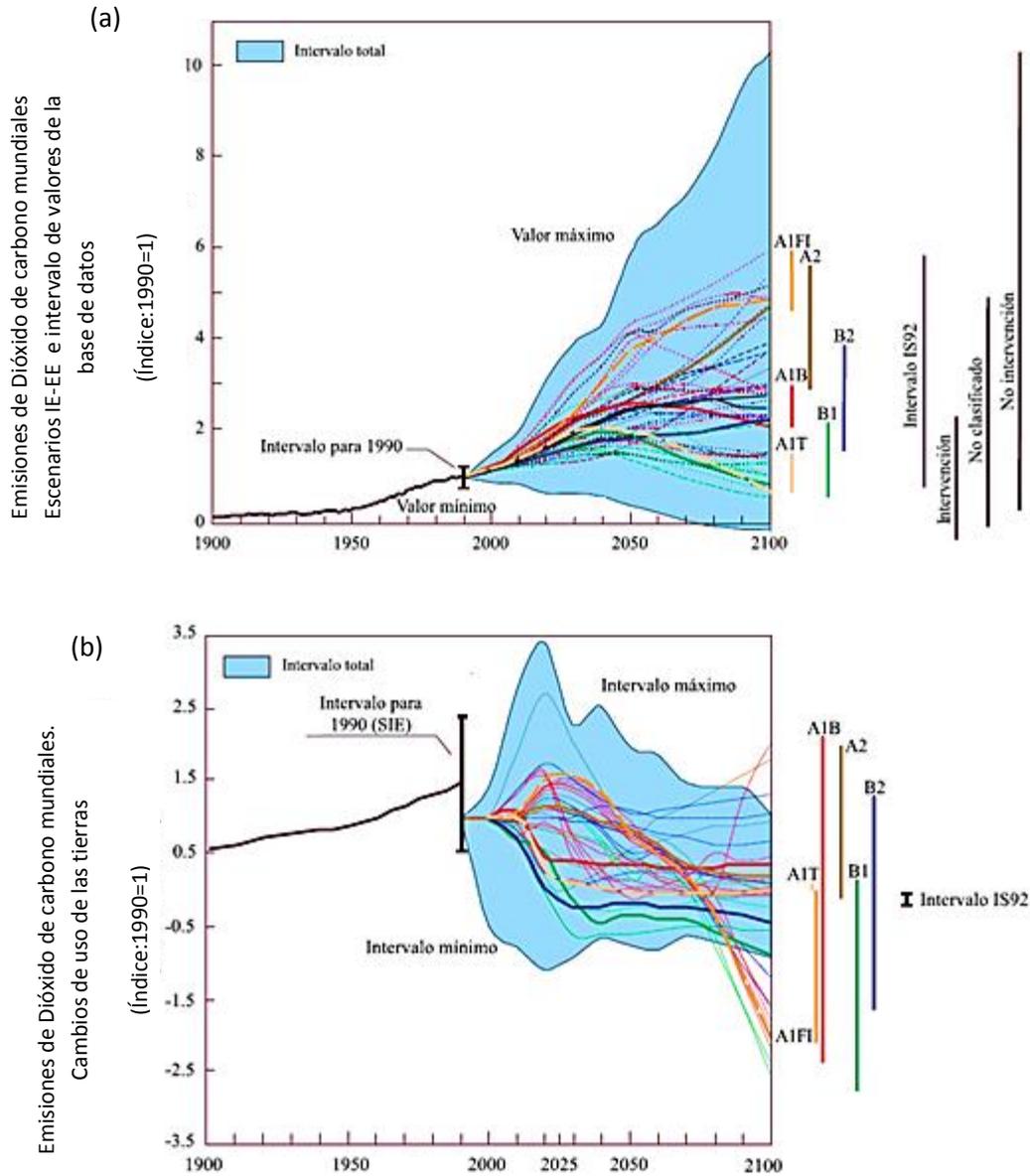


Figura 2.4 Emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> asociadas a la energía y a la industria (a) y a los cambios de uso de las tierras (b) entre 1900 y 1990. SIE: Segundo Informe de Evaluación. (IPCC, 2000)

En la Figura 2.4 se muestran las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>, en la figura (a) las asociadas a la energía y a la industria y en la (b) a los cambios de uso de las tierras para los 40 escenarios IE-EE entre 1900 y 2100, representadas en forma de índice (1900 = 1). Las trayectorias en líneas de trazos describen diferentes escenarios IE-EE, y el área sombreada azul denota la diversidad de escenarios aparecidos en las publicaciones, conforme se documenta en la base

de datos del IE-EE. Estos escenarios están clasificados en seis grupos tomados de las cuatro familias. Las líneas de color verticales indican el intervalo de valores de emisiones en 2100. Las cuatro líneas negras a la derecha de la figura (a) indican los intervalos de valores de emisión en 2100 para los escenarios IS92, más tres grupos de escenarios aparecidos en las publicaciones, y documentados en la base de datos del IE-EE. Estos tres grupos denotan los escenarios que contemplan algún tipo de iniciativa adicional en relación con el clima (escenarios de “intervención”), los que no contemplan tales iniciativas (escenarios de “no intervención”), y los que no pertenecen a ninguna de las dos categorías (escenarios “no clasificados”).

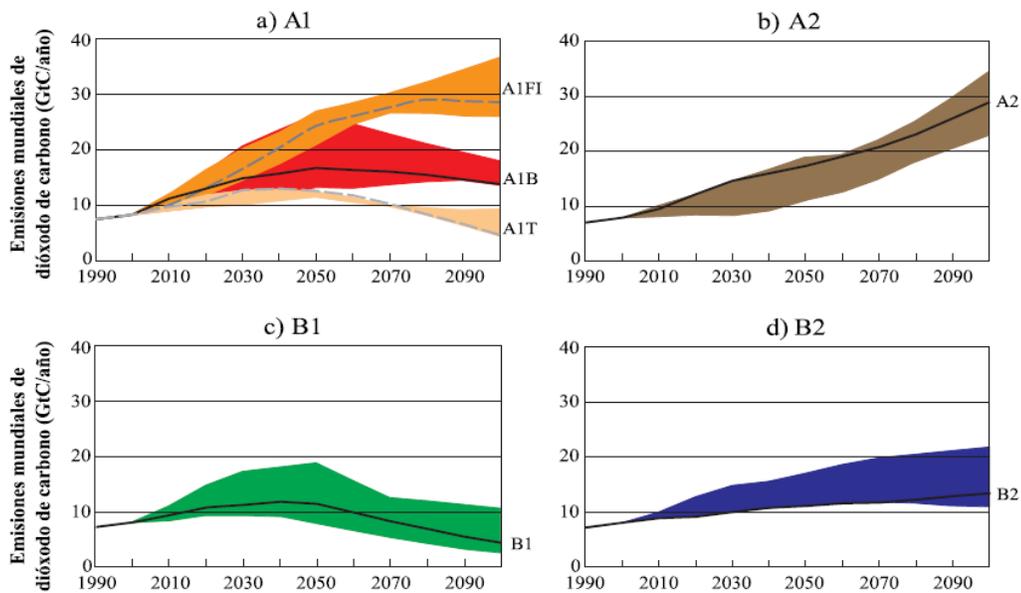


Figura 2.5 Emisiones anuales totales de CO<sub>2</sub> entre 1990 y 2100 (en gigatoneladas de carbono (GtC/año) (IPCC, 2000).

En algunos escenarios del IE-EE se aprecian inversiones de tendencias, puntos de inflexión (esto es, tramos en que las emisiones iniciales empiezan aumentando para disminuir posteriormente), y cruces (es decir, emisiones inicialmente mayores en un escenario y posteriormente mayores en otro escenario distinto). Las inversiones de tendencia de las emisiones (Figura 2.4 y Figura 2.5)

divergen respecto de los aumentos históricos de las emisiones. En la mayoría de estos casos, la tendencia al aumento de las emisiones por efecto del aumento de ingresos queda más que compensada por los aumentos de productividad, siempre que el aumento o la disminución de la población sean lentos (IPCC, 2000).

En la Figura 2.5 puede observarse que, como se mencionó con anterioridad, en la familia A1 se encuentran tres escenarios diferentes con respecto al tipo de fuentes de energía utilizadas; es por esto que para el escenario A1FI donde la utilización de combustibles de origen fósil es intensiva, las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentan, mientras que para el escenario A1B, donde la utilización de todo tipo de fuentes es equilibrada, las concentraciones de CO<sub>2</sub> aumentan y se mantienen equilibradas; para el escenario A1T donde se utilizan fuentes de energía no de origen fósil, las emisiones aumentan y disminuyen progresivamente. En el escenario A2, las concentraciones de CO<sub>2</sub> aumentan de forma rápida donde el cambio tecnológico está más fragmentado y es más lento que en otras líneas evolutivas. En el escenario B1 el uso de tecnologías limpias influye de tal manera que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentan y a mediados de siglo disminuyen significativamente. Finalmente para el escenario B2, donde se tiene un avance tecnológico medio y se toma importancia al medio ambiente, las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentan poco y se mantienen constantes para el año 2100.

Según el Segundo Informe de Evaluación (SIE) del IPCC, “toda posible concentración estabilizada se rige más por las emisiones de dióxido de carbono antropogénicas acumuladas desde ahora hasta el momento de la estabilización que por la manera en que cambian esas emisiones durante el período” (IPCC, 2000). En la Figura 2.6 pueden observarse las emisiones totales de CO<sub>2</sub> acumuladas mundiales, desde 1990 hasta 2100 de acuerdo con cada escenario.

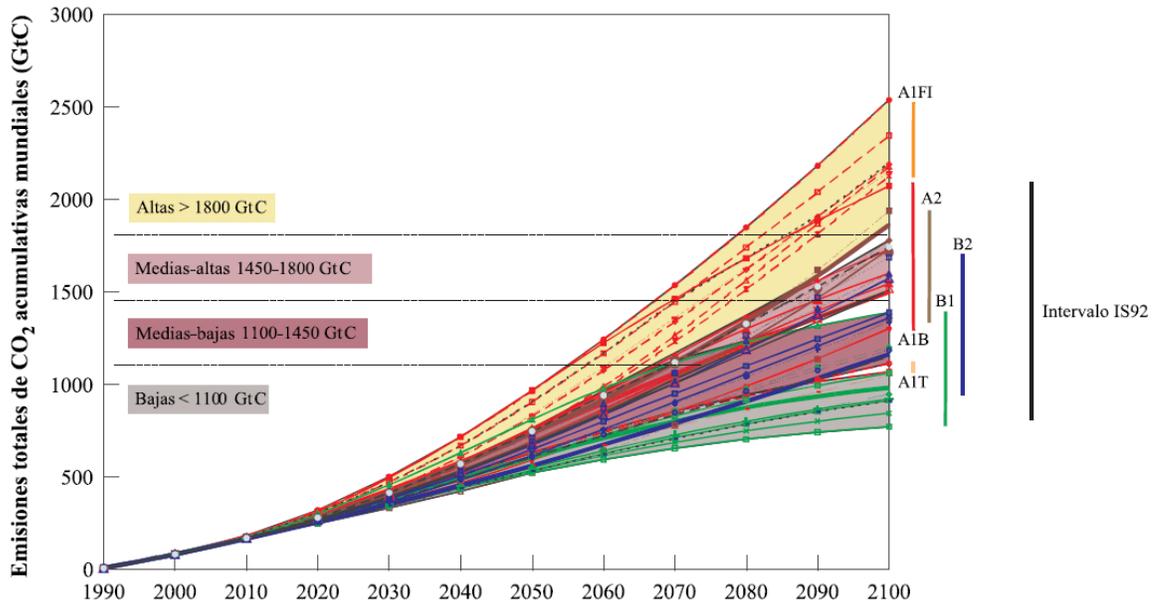


Figura 2.6 Emisiones totales de CO<sub>2</sub> acumuladas mundiales (GtC) desde 1990 hasta 2100

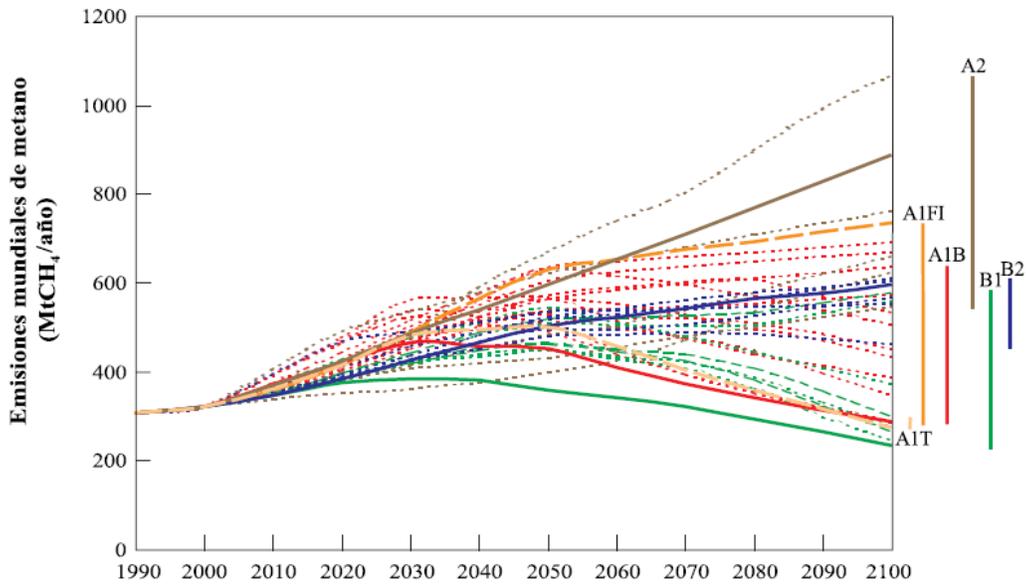


Figura 2.7 Emisiones normalizadas (con arreglo a los valores comunes para 1990 y 2000) anuales mundiales de metano para los escenarios IE-EE (en MtCH<sub>4</sub>/año) FUENTE: (IPCC, 2000).

Otros de los gases efecto invernadero de importancia son el metano y el óxido nitroso. En la Figura 2.7 y la Figura 2.8 puede observarse que para los escenarios A1 y B1 las emisiones de dichos gases provenientes del uso de las

tierras, están limitadas por un menor crecimiento de la población, seguido de una disminución y mayor productividad agraria. Para el escenario B2 las emisiones siguen aumentando, aunque muy lentamente. Mientras que en el escenario A2 el rápido crecimiento de la población, sumado a unos aumentos menos rápidos de la productividad agraria determinan un crecimiento rápido y continuo de este tipo de emisiones.

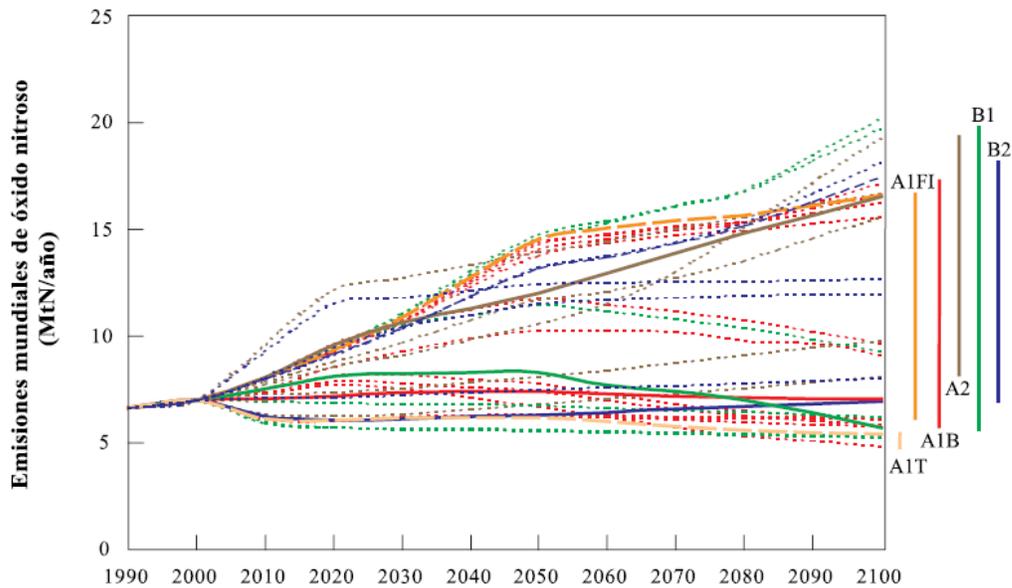


Figura 2.8 Emisiones normalizadas (con arreglo a los valores comunes para 1990 y 2000) anuales mundiales de óxido nítrico para los escenarios IE-EE (en MtN/año) FUENTE: (IPCC, 2000)

Las emisiones de cada familia de escenarios pueden concordar con las emisiones de otras familias de escenarios, lo que significa que con las combinaciones de las distintas fuerzas determinantes, pueden coincidir en el nivel de emisiones estando bajo diferentes condiciones.

Los escenarios se emplean, en la modelación del clima, en las diferentes opciones en términos de impacto, vulnerabilidad y adaptación, en mitigación y en el análisis de escala regional o nacional.

El escenario utilizado en el modelo japonés, mismo que se detallará en el siguiente subcapítulo, es el A1B, debido a que n resumen, este escenario muestra un panorama equilibrado en comparación con los otros escenarios, es decir no es

tan desfavorecedor como el escenario A2 pero tampoco tan positivo como el A1T. El escenario A1B muestra un rápido crecimiento económico; la población alcanza su máximo valor hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente; en cuanto al uso de tecnología es equilibrada de acuerdo al tipo de fuentes de energía renovable y no renovable.

## **2.3 Modelos**

Un modelo climático es una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroefecto, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas (IPCC, 2007).

Debido a que el sistema climático es muy complejo, un modelo del clima no incluye todos los parámetros, variables e interacciones del sistema climático. Se trata de una representación, resultado de un trabajo de abstracción, de algunos de los componentes y funciones del sistema. Consiste en un conjunto de leyes y relaciones físicas, expresadas por medio de ecuaciones matemáticas, las cuales configuran los mecanismos más relevantes del clima (Garduño, 1994).

El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos tales como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas (IPCC, 2007).

Muchos procesos físicos, como los que están relacionados con las nubes o la convección oceánica, ocurren en escalas espaciales mucho más pequeñas que la malla de los modelos y en consecuencia no pueden modelarse y resolverse en forma explícita. Sus efectos medios se incluyen en forma aproximada con un método simple, aprovechando sus relaciones basadas en la física con las variables a mayor escala. Esta técnica se conoce con el nombre de parametrización (Ballinas González, 2011).

Los modelos de circulación general acoplados atmósfera/océano/hielo marino (MCGAAO) proporcionan una de las más completas representaciones del sistema climático actualmente disponibles. Se está evolucionando hacia modelos

más complejos que incorporan química y biología. Los modelos climáticos se utilizan como herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operativos, en particular para hacer predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales (IPCC, 2007).

Las predicciones basadas en un modelo se pueden evaluar con la ayuda de los registros históricos; en el caso de predicciones del tiempo, el plazo a evaluar es muy corto, mientras que en predicciones climáticas se necesitan registros de décadas hasta siglos.

Una proyección climática es una proyección de la respuesta del sistema climático a diversos escenarios de emisiones o de concentraciones de gases y aerosoles de efecto invernadero o a escenarios de forzamiento radiativo, frecuentemente basada en simulaciones mediante modelos climáticos. La diferencia entre proyecciones climáticas y predicciones climáticas consiste en que las proyecciones climáticas dependen del escenario de emisiones/concentraciones/forzamiento radiativo utilizado, basado en supuestos relativos, por ejemplo, a un devenir socioeconómico y tecnológico que puede o no materializarse y que está sujeto, por consiguiente, a un grado de incertidumbre considerable. Una predicción climática es el resultado de un intento de obtener una estimación de la evolución real del clima en el futuro, por ejemplo a escalas de tiempo estacionales, interanuales o más prolongadas. Como la evolución futura del sistema climático puede ser muy sensible a las condiciones iniciales, estas predicciones suelen ser probabilísticas (IPCC, 2007).

El IPCC, como encargado oficial de evaluar los diferentes modelos climáticos, ha publicado un listado de los mismos, como puede verse en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características de los modelos de circulación general atmósfera-océano a) Resolución horizontal se expresa como grados de latitud por longitud o como triangular (T) truncamiento espectral con una traducción aproximada de grados de latitud y longitud. La resolución vertical (L) es el número de niveles verticales. b) La resolución horizontal está expresada en grados de latitud por longitud, mientras que la resolución vertical (L) es el número de niveles verticales. (IPCC, 2007).

	Modelo, Año	Autor, País	Resolución atmosférica <sup>a</sup>	Resolución oceánica <sup>b</sup>
1	BCC-CM1, 2005	Beijing Climate Center, China	1.9°x1.9°	1.9°x1.9°
2	BCCR-BCM2.0, 2005	Bjerknes Centre for Climate Research, Norway	1.9°x1.9°	0.5°-1.5°x0.5°-1.5°
3	CCSM3, 2005	National Center for Atmospheric Research, USA	1.4°x1.4°	0.3°-1°x1°
4	CGCM3.1(T47), 2005	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	~2.8°x2.8°	1.9°x1.9°
5	CGCM3.1(T63), 2005		~1.9°x1.9°	0.9°x1.4°
6	CNRM-CM3, 2004	Meteo-France/Centre National de Recherches Meteorologiques, France	~1.9°x1.9°	0.5°-2°x2°
7	CSIRO-MK3.0, 2001	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia	~1.9°x1.9°	0.8°x1.9°
8	ECHAM5/MPI-OM, 2005	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	~1.9°x1.9°	1.5°x1.5°
9	ECHO-G, 1999	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of the Korea Meteorological Administration (KMA), and Model and Data Group, Germany/Korea	~3.9°x3.9°	0.5°-2.8°x2.8°
10	FGOALS-g1.0, 2004	National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG) Institute of Atmospheric Physics, China	~2.8°x~2.8°	1°x1°
11	GFDL-CM2.0, 2005	U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	2.0°x2.5°	0.3°-1.0°x1.0°
12	GFDL-CM2.1, 2005		2.0°x2.5°	0.3°-1.0°x1.0°
13	GISS-AOM,2004	National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA	3.0°x4.0°	3°x4°
14	GISS-EH,2004		4.0°x5.0°	2°x2°
15	GISS-ER,2004	NASA/GISS, USA	4.0°x5.0°	4°x5°
16	INM-CM3.0,2004	Institute for Numerical Mathematics, Russia	4.0°x5.0°	2°x2.5°
17	IPSL-CM4,2005	Institute Pierre Simon Laplace, France	2.5°x3.75°	2°x2°
18	MIROC3.2(hires),2004	Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan	~1.1°x1.1°	0.2°x0.3°
19	MIROC3.2(medres),2004		~2.8°x2.8°	0.5°-1.4° x 1.4°
20	MRI-CGCM2.3.2,2003	Meteorological Research Institute, Japan	~2.8°x2.8°	0.5°-2.0° x 2.5°
21	PCM,1998	National Center for Atmospheric Research, USA	~2.8°x2.8°	0.5°-0.7° x 1.1°
22	UKMO-HadCM3, 1997	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/ Met Office, UK	2.5°x3.75°	1.25° x 1.25°
23	UKMO-HadGEM1, 2004		~1.3°x1.9°	0.3°-1.0° x 1.0°

El modelo número 18 mencionado en la Tabla 2.2 ha sido desarrollado por el Instituto de Investigaciones Meteorológicas de Japón, de la Agencia Meteorológica Japonesa. Este modelo de alta resolución es un prototipo de la siguiente generación de modelos globales atmosféricos (Mizuta, y otros, 2006), y se utilizará en el presente trabajo.

El modelo japonés de alta resolución fue creado por el Instituto de Investigaciones Meteorológicas de la Agencia Meteorológica Japonesa, tiene como más notable ventaja su resolución horizontal, equivalente a unos 20 km y calcula las variables meteorológicas en 60 niveles verticales. Dicho modelo se ejecuta en la computadora conocida como Simulador Terrestre, que es la computadora más rápida disponible en el presente para aplicaciones meteorológicas (Mizuta, y otros, 2006) y la cual se encuentra en el Instituto JAMSTEC (Japan Agency for Marine-earth Science and Technology), en Yokohama, y opera desde 2002.

El sistema dinámico se basa en las ecuaciones diseñadas originalmente por Kanamitsu 1983, el cual usa un método de transformación espectral de armónicos esféricos y una coordenada híbrida sigma-presión (tiene las coordenadas sigma en la atmósfera baja y las propiedades de la coordenada isobárica en los niveles altos) como coordenada vertical.

El modelo implementa el esquema de convección de cúmulos propuesto por Arakawa y Schubert (1974). El perfil vertical de masa ascendente era una función lineal de la altura propuesta por Moorthi y Suarez (1992).

El flujo másico en la base de la nube fue calculado para resolver la ecuación de pronóstico (Randall y Pan 1993). Para las nubes pronosticadas utilizaron un método similar al de Smith (1990) y para calcular la cantidad de nube y su contenido de agua utilizaron una aproximación estadística propuesta por

Sommeria y Deardorff. La parametrización de Sundqvist se usó para determinar la tasa de cambio, de contenido de agua a precipitación.

Un esquema cerrado de turbulencia de nivel 2 de Mellor y Yamada fue implementado para representar la difusión vertical de momento, calor y humedad. El arrastre por ondas de gravedad está particionado en ondas largas (longitudes de ondas mayor a 100 kilómetros) y ondas cortas (longitudes de ondas ~ 10 kilómetros). Las ondas largas se propagan hacia arriba y depositan momento en niveles medios de la atmósfera, mientras que las ondas cortas son atrapadas en la troposfera y arrastrada ahí.

Modificaciones al modelo descrito anteriormente fueron implementadas para construir el modelo de alta resolución de la siguiente manera:

Primero se desarrolló un nuevo esquema semi-lagrangiano cuasi-conservativo y se introdujo para integraciones de tiempo rápidas y estables, en reemplazo del esquema Euleriano. Las advecciones horizontales y verticales son calculadas por separado en este esquema. La advección horizontal fue calculada con esquema semi-lagrangiano estándar, pero la masa, el vapor de agua y el agua en la nube son conservadas usando una corrección similar al método de Priestley, Gravel y Staniforth. Las variables pronosticadas han sido cambiadas desde la vorticidad y divergencia a componentes zonales y meridionales del viento con la introducción del esquema semi-lagrangiano. Además, un esquema semi – lagrangiano de doble nivel ha sido introducido en vez de un esquema de tercer nivel, lo cual suministra una doble eficiencia en principio. Esas mejoras de eficiencias disponibles permiten ejecutar integraciones de alta resolución en el corto plazo.

Segundo, algunos esquemas de procesos físicos fueron mejorados. El esquema de parametrización de cúmulos incluye efectos de intercambio (enrainment/detrainment) de masa entre el tope y la base de la nube; esto reduce el remanente de enfriamiento en la baja troposfera tropical y reduce el enfriamiento por evaporación. El esquema de caída de hielo desde las nubes fue

basado sobre una solución analítica integrada por Rotstayn en vez de una simple parametrización en la cual el hielo cae hacia el siguiente estrato o al suelo. El esquema de pronóstico de nubes se modificó para reducir la dependencia de la lluvia sobre los pasos de integración. Con el fin de representar estratocúmulos marinos subtropicales fuera de las costas oeste de los continentes, una nueva parametrización de estratocúmulos fue introducida siguiendo el modelo propuesto por Singo. La nube es formada por el modelo cuando hay inversión al tope del estrato alto y la razón de mezcla se forma cerca de la superficie del mar.

Los esquemas de radiación y suelo desarrollados en el modelo JMA-GSM98 GCM fueron introducidos al modelo de alta resolución con modificaciones. En la construcción del modelo de alta resolución usaron estos esquemas detallados en vez de simplificarlos.

Un modelo aleatorio multiparámetro de Shibata y Aoki fue usado para radiación terrestre. Absorción debido a CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O fue tratada en esta versión además del H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. El modelo calcula la radiación solar formulada por Shibata y Uchiyama. Un tratamiento del efecto directo de aerosoles sulfatados es considerado en dicho esquema. El tratamiento del suelo ha sido mejorado del SiB (Modelo Simple de Biosfera), especialmente en esquemas de suelo y nieve. En el esquema de suelo, tres espesores para la ecuación de agua contenida en él, esta compartida con la ecuación de cantidad de calor donde los cambios de fase del agua son incluidos de manera que la energía y el agua puedan ser conservadas en los espesores del suelo. En el esquema de hielo, el número de espesores de hielo varía hasta en tres, dependiendo de la cantidad de hielo; además son calculados el contenido de calor y los flujos de agua. El albedo del hielo depende de la edad del mismo (Mizuta, y otros, 2006).

Los resultados del modelo concuerdan con las observaciones en la distribución global de precipitaciones media estacional; temperatura superficial del aire; altitud geopotencial; media del viento y temperatura media particularmente en el océano Pacífico, más podría no representar de manera completamente precisa la precipitación en la zona del Conchos por influencia del Monzón por lo que

podría ser necesario hacer correcciones a los resultados obtenidos por el modelo japonés. Mejora las representaciones de fenómenos a escala regional y el clima local por el incremento de la resolución horizontal debido a una mejor representación de efectos topográficos y procesos físicos (Mizuta, y otros, 2006).

La ventaja de trabajar con un modelo de alta resolución radica en su capacidad de reproducción de la dinámica de los ciclones tropicales como un conjunto de sistemas convectivos de escala media y como una perturbación de escala sinóptica. Los ciclones simulados por este modelo son el resultado de una formación espontánea (sin forzamientos artificiales) dentro del sistema climático. Dentro de un escenario climático más cálido, debido a los gases de efecto invernadero, el uso de una malla de 20 km provee información más confiable asociada a la formación, evolución y disipación de ciclones tropicales que modelos de escala más burda (Martínez, y otros, 2010). Por tales razones se seleccionó este modelo en el presente trabajo.

Los resultados del modelo japonés de alta resolución se han desarrollado en el escenario **A1B** para tres periodos (Mizuta, y otros, 2006):

*Control (1979-2003)*

*Futuro cercano (2015-2039)*

*Finales de siglo (2075-2099)*

Los datos a utilizar generados por el modelo son las precipitaciones diarias, mismas que se encuentran distribuidas puntualmente en la malla de 20 km aproximadamente, tanto latitudinal como longitudinalmente.

## 2.4 Proceso lluvia-escorrimento

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 2009).

El escurrimiento es generado por el gasto base y el gasto directo; el primero está relacionado con el escurrimiento subterráneo, mientras que el escurrimiento directo está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y constituye el escurrimiento base (Aparicio, 2009).

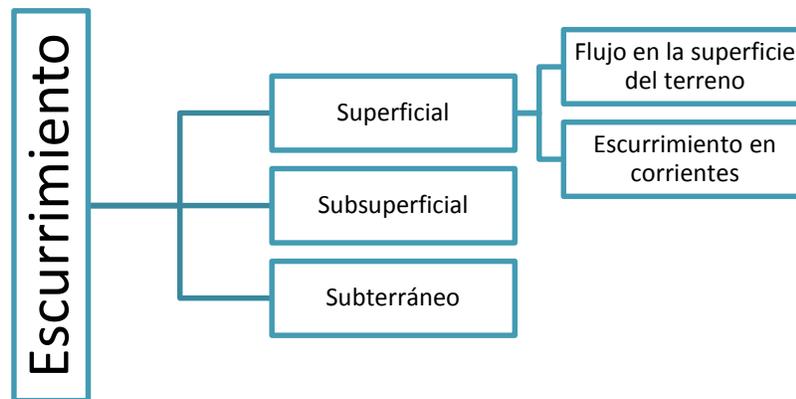


Figura 2.9 Tipos de escurrimiento (Aparicio, 2009)

El diseño, construcción y operación de obras hidráulicas están basados en el escurrimiento que pueda presentarse para una cierta probabilidad de excedencia o para un periodo de retorno en la zona de proyecto.

Los factores que afectan el escurrimiento se presentan en la Figura 2.10, mismos que pueden ser diferenciados por aquéllos que afectan su volumen a lo largo de un periodo de varios años, y los que influyen en su distribución temporal, por lo cual se refieren a días, horas o minutos, es decir a las respuestas de la cuenca a una tormenta. (Campos Aranda, 2007).

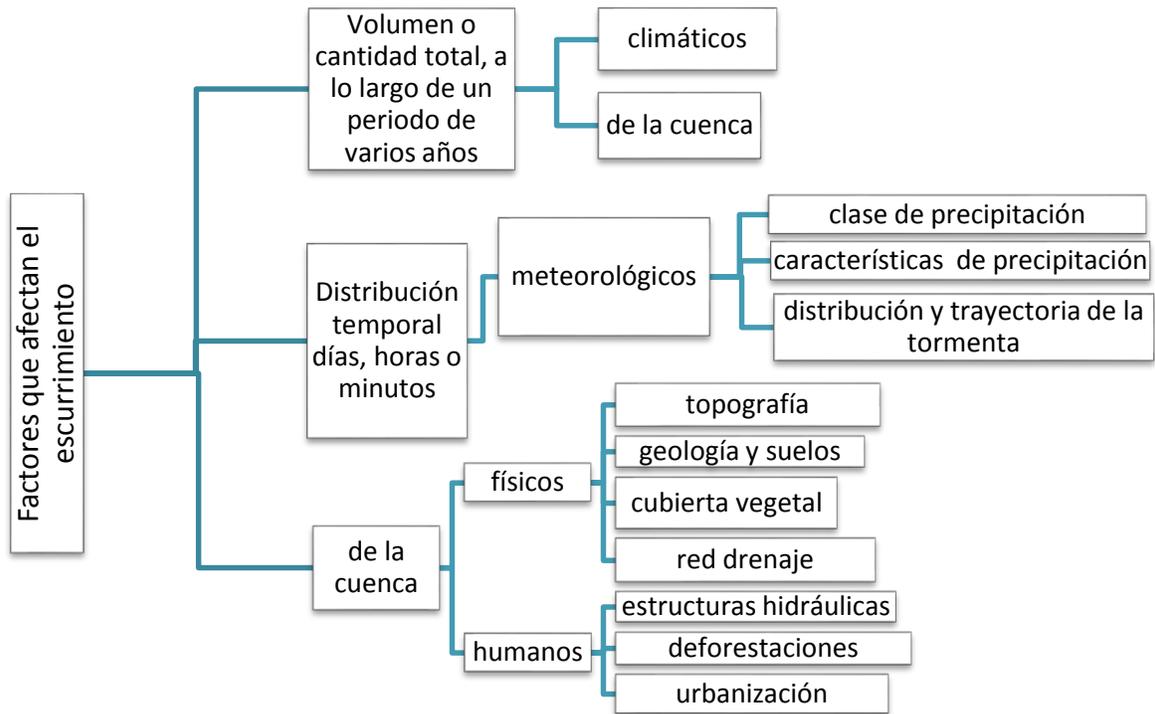


Figura 2.10 Factores que afectan el escurrimiento (**Campos Aranda, 2007**).

Los registros de lluvia e hidrométricos en México presentan en la mayoría deficiencias en cantidad y continuidad en sus datos, sin embargo de estos dos, los de precipitación presentan una ventaja sobre los segundos puesto que existe una mayor cantidad de las mismas. Es por esto que se han establecido métodos o modelos que permiten establecer el escurrimiento a partir de características de la cuenca y la precipitación en la misma (Aparicio, 2009).

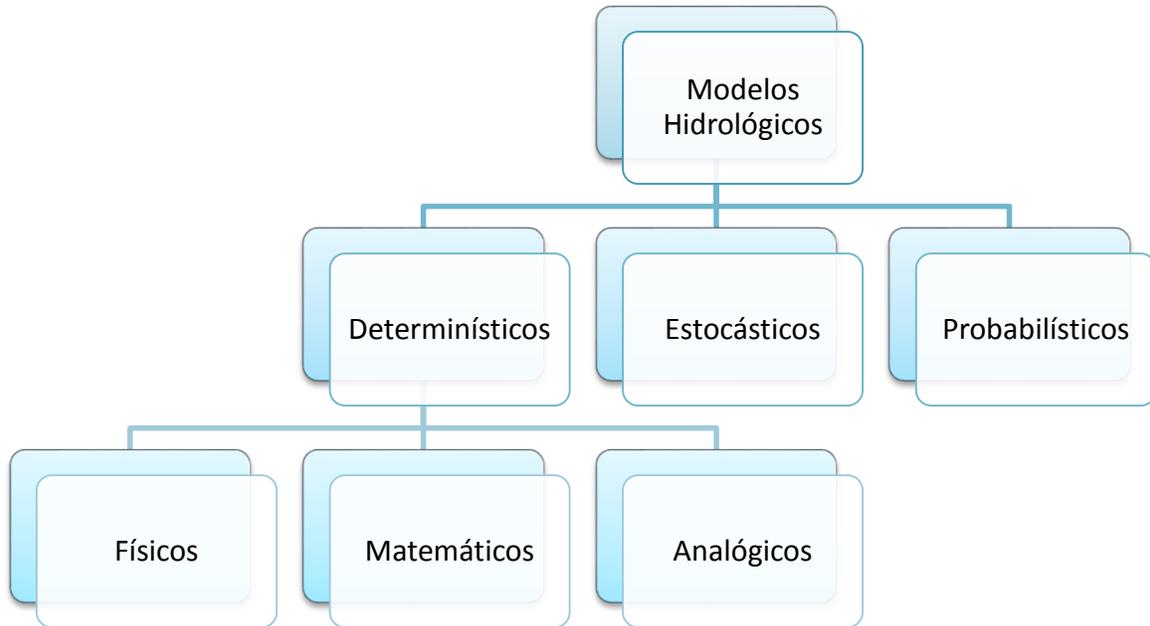
Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes (Aparicio, 2009):

1. Área de la cuenca
2. Altura total de precipitación
3. Características generales de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, humedad antecedente, etc.)
4. Distribución espacial y temporal de la lluvia.

Debido a que son muchos los elementos que afectan el escurrimiento, es necesario el uso de modelos, mismos que representan algunos o casi todas las variables que puede presentarse en la cuenca, para evaluar el comportamiento del sistema y así evaluar los efectos de cambios en la cuenca en la cantidad, ocurrencia y calidad del mismo.

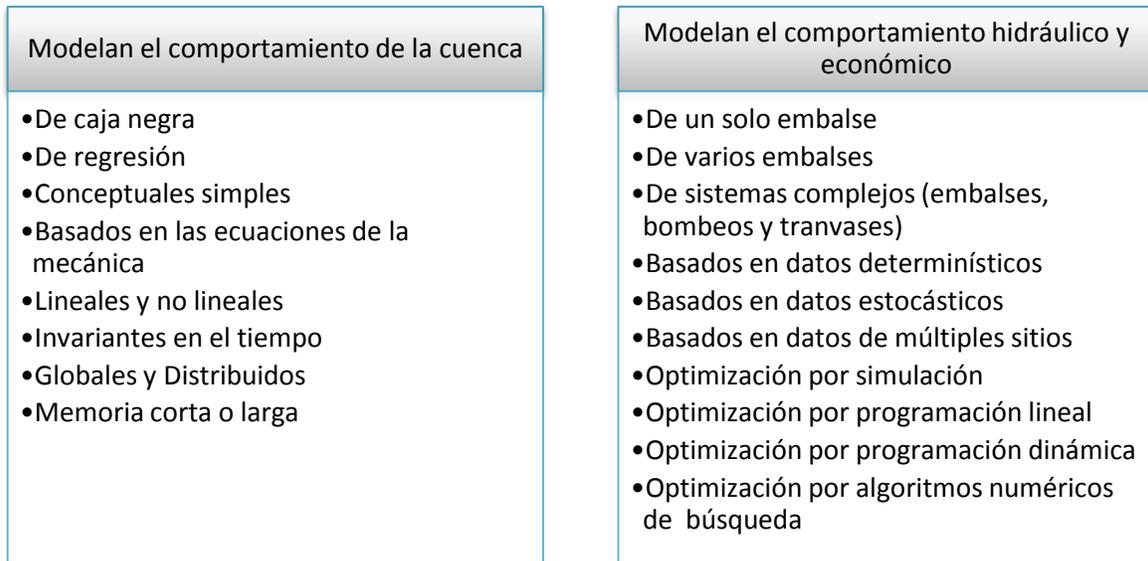
La modelación de un sistema hidrológico implica la selección o desarrollo de un modelo hidrológico apropiado, así como su prueba (calibración y validación). Cuando un modelo ha sido adoptado, éste puede ser utilizado para estudiar modificaciones posibles en los componentes estructurales de un sistema de recursos hidráulicos (Campos Aranda, 2007).

En la Figura 2.11 se muestra una clasificación de los modelos hidrológicos. Los modelos determinísticos no consideran la aleatoriedad de las variables hidrológicas, de manera que la entrada siempre produce la misma respuesta, lo cual permite hacer pronósticos. Los modelos estocásticos involucran variables en el espacio y en el tiempo, son parcialmente predecibles o deterministas y son parcialmente aleatorios; este tipo de modelos se aplica al diseño y operación de embalses y para la estimación de volúmenes de escurrimiento. Por último, los modelos probabilísticos tienen un proceso permanente aleatorio con propiedades estadísticas iguales en el tiempo; este tipo de modelos se aplican a eventos extremos y sequías.



**Figura 2.11 Clasificación de Modelos Hidrológicos** (Ballinas González, 2011).

De acuerdo con la naturaleza del objetivo a modelar, un modelo hidrológico puede clasificarse en dos grandes grupos, los que simulan el comportamiento de una cuenca, y los relativos al comportamiento hidráulico y económico de los sistemas de recursos hidráulicos complejos, como puede observarse en Figura 2.12 (Campos Aranda, 2007).



**Figura 2.12 Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza del objetivo**  
(Campos Aranda, 2007)

Los métodos utilizados en México, debido a las limitaciones en el sentido de la disposición de información que pueden presentarse en el área de estudio, no siempre involucran todas las variables, sino solo algunas características de la cuenca así como la precipitación en la misma. A continuación se describirán los más importantes.

#### 2.4.1 Método de envolventes

Este método toma en cuenta sólo el área de la cuenca; es de gran utilidad cuando se requieren estimaciones gruesas de los gastos máximos probables, o bien cuando se carece casi por completo de información. Relaciona el gasto máximo  $Q$  con el área de cuenca  $A_c$  de la siguiente forma (Aparicio, 2009):

$$Q = \alpha A_c^\beta \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde  $Q$  es el gasto máximo y  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros empíricos, que también pueden ser función de  $A_c$ . Para cuencas menores de 1500 km<sup>2</sup>,  $\beta=3/4$ ; mientras que para cuencas mayores,  $\beta=1/2$ .

Existen muchas fórmulas del tipo de la ecuación 1. Sin embargo, en México las más utilizadas son las de Creager y Lowry. (Aparicio, 2009). La fórmula de Creager es:

$$q = 1.303 C_c (0.386 A_c)^\alpha A_c^{-1} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde  $q$  es el gasto máximo por unidad de área,  $q = Q / A_c$

$$\alpha = \frac{0.936}{A_c^{0.048}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde  $C_c$  es un coeficiente empírico y  $A_c$  está en km<sup>2</sup>. La fórmula de Lowry es:

$$q = \frac{C_L}{(A_c + 259)^{0.85}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde  $C_L$  es un coeficiente también empírico (Aparicio, 2009).

Los valores de  $C_c$  y  $C_L$  se determinan por regiones, llevando a una gráfica logarítmica los gastos unitarios máximos  $q$  registrados contra sus respectivas áreas de cuenca y seleccionando el valor de  $C_c$  y  $C_L$  que envuelva a todos los puntos medidos. El valor de  $C_c=200$  es la envolvente para todos los puntos que analizó Creager, aunque  $C_c=100$  da valores mucho más razonables y se usa como envolvente mundial. Para la fórmula de Lowry se puede tomar un valor de  $C_L=3500$  como mundial (Aparicio, 2009). Para la República Mexicana, los valores de  $C_c$  y  $C_L$  para las 37 regiones hidrológicas pueden obtenerse de una actualización que se realizó de las mismas, la cual se muestra en la Figura 2.13.

Región hidrológica	Parámetros de las envolventes							
	Matthai $\alpha$	Matthai $\beta$	Creager $C_c$	Lowry $C_L$	$K_1$	Crippen $K_2$	$K_3$	Francou-Rodier $K$
1	22	-0.45	15	500	450	1.1	-1.85	3.86
2 a 7	Datos insuficientes							
8	4	-0.24	18	700	400	1.50	-2.60	3.86
9	16	-0.30	35	1,800	220	1.10	-1.43	4.50
10	85	-0.32	130	4,700	728.51	1.39	-1.89	5.93
11	85	-0.38	115	4,500	250	1.30	-1.58	5.82
12	17.5	-0.30	30	1,500	133	1.28	-1.72	4.18
13 a 15	70	-0.41	60	2,300	300	1.16	-1.50	5.52
16	50	-0.32	120	5,300	800	1.42	-2.10	5.76
17	Datos insuficientes							
18	35	-0.32	70	2,400	692.71	1.52	-2.40	5.07
19	140	-0.35	180	5,600	550	1.18	-1.39	6.21
20	45	-0.34	60	2,200	152.52	1.40	-1.77	5.27
21 a 23	50	-0.27	85	2,456	658.92	1.36	-1.98	5.41
24	19.33	-0.23	50	2,000	250	1.12	-1.45	4.86
25	60	-0.32	100	3,000	1,241.79	1.41	-2.22	5.45
26	52	-0.35	75	2,500	200	1.07	-1.10	5.19
27	60	-0.33	70	2,300	200	1.05	-1.10	5.95
28	57.52	-0.32	100	2,600	400	1.15	-1.45	5.38
29	62	-0.47	50	2,200	200	1.13	-1.45	4.73
30	145	-0.28	250	7,200	800	1.31	-1.65	5.59
31 a 35	Datos insuficientes							
36	1.369	-0.15	15	600	130	1.07	-1.45	3.65
37	Datos insuficientes							

Figura 2.13 Coeficientes de las envolventes para las 37 regiones hidrológicas. (Orozco y otros , 2005)

#### 2.4.2 Fórmula racional

Este modelo toma en cuenta, además del área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación. Suponiendo que en una cuenca impermeable se presenta uniformemente una lluvia de intensidad constante durante un largo tiempo, al principio, el gasto que sale de cuenca será creciente con el tiempo, pero llegará un momento en el que se alcance un punto de equilibrio, es decir, en el que el volumen que entra por unidad de tiempo por la lluvia sea el mismo que el gasto de salida de la cuenca (Aparicio, 2009).

El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. El tiempo de concentración  $t_c$  depende de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de la velocidad que adquiere, en promedio, dentro de la misma. Esta velocidad está en función de las pendientes del terreno y

los cauces, y de la rugosidad de la superficie de los mismos. El tiempo de concentración se puede expresar mediante la ecuación 2.5 (Aparicio, 2009):

$$t_c = \frac{L}{3600 v} \text{ Ecuación 2.5}$$

Donde  $t_c$  es el tiempo de concentración en horas,  $L$  es la longitud del cauce principal de la cuenca en metros y  $v$  es la velocidad media del agua en el cauce principal en m/s. La ecuación 2.5 no toma en cuenta el recorrido del agua de lluvia desde que llega a la superficie hasta los cauces. La velocidad media puede estimarse con la Tabla 2.3 (USBR, 1974)

Tabla 2.3 Velocidad media para diferentes pendientes del cauce principal (USBR, 1974)

Pendiente del cauce principal, %	Velocidad media, m/s	Velocidad media, m/s			
		Pendiente %	Bosques	Pastizales	Canal natural no bien definido
1-2	0.6	0-3	0.3	0.5	0.3
2-4	0.9	4-7	0.6	0.9	0.9
4-6	1.2	8-11	0.9	1.2	1.5
6-8	1.5	12-15	1.1	1.4	2.4

Otra manera de estimar el tiempo de concentración es mediante la fórmula de Kirpich (Aparicio, 2009):

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \text{ Ecuación 2.6}$$

Donde  $S$  es la pendiente del cauce principal,  $L$  se expresa en metros y  $t_c$  resulta en horas.

En una cuenca no impermeable, sólo una parte de la lluvia con intensidad  $i$  escurre directamente hasta la salida. Si se acepta que durante la lluvia, o al menos una vez que se ha establecido el gasto de equilibrio, no cambia la capacidad de infiltración de la cuenca, se puede escribir la llamada fórmula racional:

$$Q_p = CiA_c \text{ Ecuación 2.7}$$

Donde  $C$  es un coeficiente de escurrimiento, que representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa y  $Q_p$  es el gasto máximo posible que puede producirse con una lluvia de intensidad  $i$  en una cuenca de área  $A_c$  y coeficiente de escurrimiento  $C$  (Aparicio, 2009).

### 2.4.3 Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario de una cuenca se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de 1 mm de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva (Chow, y otros, 1999).

El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia. Las siguientes suposiciones básicas son inherentes en este modelo (Chow, y otros, 1999):

- I. El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva.
- II. El exceso de precipitación está uniformemente distribuido a través de toda el área de drenaje.
- III. El tiempo base de la duración de la escorrentía directa resultante de un exceso de lluvia de una duración dada es constante.
- IV. Las ordenadas de todos los hidrogramas de escorrentía directa de una base de tiempo común son directamente proporcionales a la cantidad total de escorrentía directa representada por cada hidrograma.
- V. Para una cuenca dada, el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de la cuenca.

La forma tradicional de determinar el hidrograma unitario es a partir de datos de precipitación y caudal. El primer paso es separar el flujo base del flujo directo, para calcular el volumen del escurrimiento directo. Posteriormente se calcula la altura de precipitación efectiva  $h_{pe}$ , en mm, dividiendo el volumen del escurrimiento directo entre el área de la cuenca. Después se obtienen las ordenadas del hidrograma unitario, dividiendo las ordenadas del hidrograma total entre la altura de precipitación efectiva. Finalmente se determina la duración efectiva, por ejemplo mediante el criterio de la capacidad de infiltración media.

El criterio de la capacidad de infiltración media (Aparicio, 2009) supone que la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta. A esta capacidad de infiltración se le llama índice de infiltración media  $\phi$  y se calcula, una vez que se tiene la altura de precipitación efectiva  $h_{pe}$ , trazando una línea horizontal en el hietograma de la tormenta, de tal manera que la suma de las alturas de precipitación que queden arriba de esa línea sea igual a  $h_{pe}$ . El índice de infiltración media  $\phi$  será entonces igual a la altura de precipitación correspondiente a la línea horizontal dividida entre el intervalo de tiempo  $\Delta t$  que dure cada barra del hietograma.

### **3. Metodología**

Para analizar el efecto que tiene el cambio climático en los parámetros de diseño hidrológico se seleccionaron dos cuencas de la República Mexicana, una de ellas al norte del país y la otra en la parte central del mismo, donde los escurrimientos de los registros y los modelados mediante cambio climático serán la base de las comparaciones para estos parámetros para cada una de las cuencas de estudio.

Inicialmente se delimitarán las cuencas de estudio, que para este trabajo serán la cuenca alta del río Balsas y la segunda corresponde a la presa la Boquilla, en el río Conchos, Una vez identificadas las cuencas, se seleccionarán las estaciones pluviométricas e hidrométricas para cada una de ellas de acuerdo a su distribución así como al número de años de registro que se tengan.

Los datos con los que se cuenta para las áreas de estudio en este trabajo son los registros hidrométricos, obtenidos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (IMTA, 2008), así como los registros de las precipitaciones del Extractor Rápido de Información Climatológica (Eric III) (IMTA, 2006).

Las estaciones pluviométricas repartidas en la cuenca tienen registros de lluvias diarias, por lo que dependiendo de su distribución se obtendrán las precipitaciones medias diarias de acuerdo a su área de influencia, es decir mediante polígonos de Thiessen para los años registrados coincidentes en las hidrométricas.

Los datos registrados por las estaciones hidrométricas son los gastos diarios a la salida de la misma, por lo que con dichos gastos se construirá un hidrograma anual. Los gastos picos que se utilizarán para la comparación de los registrados y los obtenidos con el modelo japonés serán los correspondientes a los generados por los escurrimientos directos.

Asimismo, de cada hidrograma anual se seleccionará una avenida máxima para construir un hidrograma unitario para cada año. El hidrograma unitario se realizará mediante la separación del gasto base del gasto de escurrimiento directo

mediante el método que correlaciona el tiempo de vaciado del escurrimiento directo con el área de la cuenca (Aparicio, 2009) mediante:

$$N = 0.827 A^{0.2} \text{ Ecuación 3.1}$$

Donde  $N$  es el tiempo de vaciado del escurrimiento directo en días, y  $A$  es el área de la cuenca en  $\text{km}^2$ . El final del escurrimiento directo del hidrograma se encuentra en un tiempo  $N$  de días después del pico.

De todos los años con registros de escurrimientos de la cuenca y representados en hidrogramas unitarios, se seleccionarán los hidrogramas más representativos de dicha cuenca en estudio para tratar de uniformizar el comportamiento de la cuenca en las avenidas máximas. Esto se llevará a cabo mediante el promedio de los hidrogramas seleccionados, trasponiéndolos todos en un mismo hidrograma e igualándolos en el punto que corresponde al gasto pico para así promediar cada ordenada y formar un solo hidrograma unitario para la cuenca. Este hidrograma unitario único servirá para las proyecciones del modelo japonés que se utilizará en pasos siguientes.

De los hidrogramas unitarios para cada año, se tiene el volumen del escurrimiento directo, el cual dividido por el área de la cuenca resultará la altura de precipitación que produjo dicho escurrimiento, es decir la altura de precipitación efectiva  $hp_e$  que servirá para obtener el índice de infiltración media.

Se seleccionarán las precipitaciones medias diarias de acuerdo con las fechas que se presentaron las avenidas máximas correspondientes a los hidrogramas unitarios anteriormente obtenidos para cada año. Esta relación lluvia-escurrimiento permitirá obtener la ecuación que relaciona la humedad del suelo antecedente con el escurrimiento, es decir la curva  $\phi$  vs IPA. Dicha ecuación se forma de los índices de infiltración media  $\phi$ , los cuales se obtienen con las precipitaciones medias diarias y la altura de lámina que produjo dicho escurrimiento en exceso. El criterio de la capacidad de infiltración media (Aparicio, 2009) supone que la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta. A esta capacidad de infiltración se le llama índice de infiltración media  $\phi$  y se calcula, una vez que se tiene la altura de precipitación efectiva  $hp_e$ , trazando una línea horizontal en el

hietograma de la tormenta, de tal manera que la suma de las alturas de precipitación que queden arriba de esa línea sea igual a  $h_{pe}$  obtenida anteriormente dividida entre el intervalo de tiempo  $\Delta t$  que dure cada barra del hietograma. El segundo término al que se refiere la ecuación es el IPA el cual utilizando las precipitaciones medias diarias para todos los años, se obtiene suponiendo un valor de IPA, en este caso 10mm y ese será el primer IPA, posteriormente el IPA del día anterior se multiplicará por el coeficiente 0.85 el cual se sumará a la altura de precipitación del día que se esté calculando lo que resultará el IPA del día y así sucesivamente para cada día. Al graficar los índices de infiltración media con los de precipitación antecedente se obtendrá una función mediante un análisis de regresión lineal.

La función IPA ( $\phi$ ) servirá para identificar a los índices de infiltración media para los periodos del modelo japonés.

El modelo japonés genera datos de precipitaciones diarias en forma de malla, con distancias aproximadas de 20 km en longitud y de 20km en latitud aproximadamente, como puede observarse en la Figura 3.1

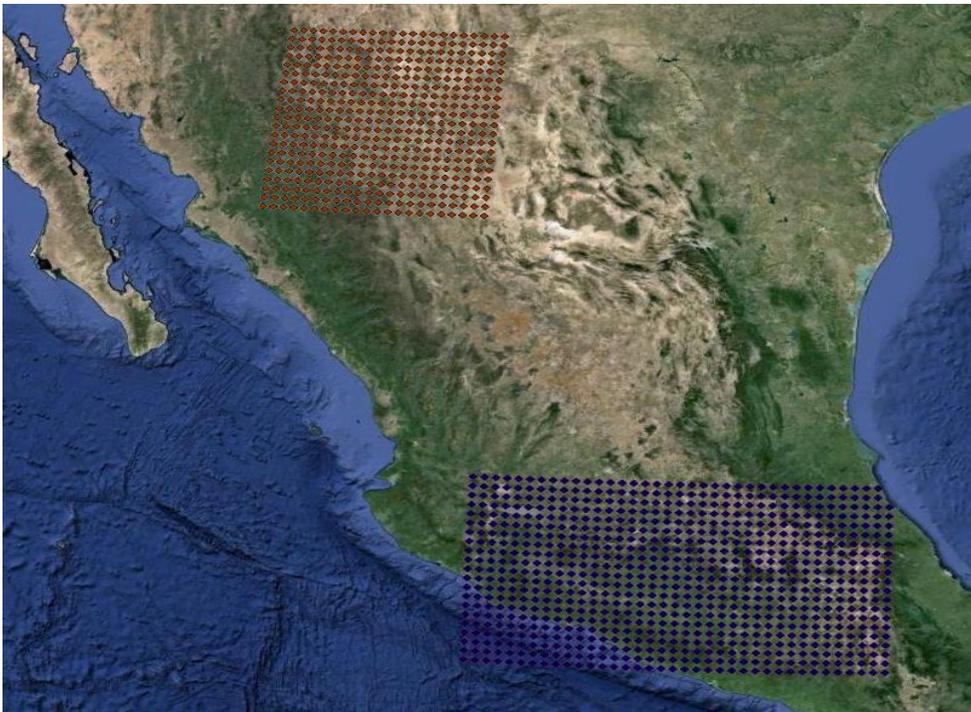


Figura 3.1 Distribución de los datos generados por el modelo japonés.  
Malla de 20km x20 km aprox.

Con los datos de las lluvias diarias del modelo japonés para los tres periodos (*control, futuro cercano y futuro lejano*), y su distribución, se generarán polígonos de Thiessen para obtener las precipitaciones medias diarias.

Con las precipitaciones medias diarias se obtendrán los índices de precipitación antecedente (IPA). Con la función IPA ( $\phi$ ) obtenida de los datos registrados anteriormente, se obtendrán los índices de infiltración media para el período *de control* del modelo japonés.

A las precipitaciones diarias del período *de control* se le restarán los índices de infiltración media obtenidos para así generar las alturas diarias de lluvia efectiva. De acuerdo a la duración efectiva del hidrograma unitario obtenido, se igualarán las lluvias efectivas, es decir, si la duración efectiva del hidrograma corresponde a 2 días, se sumarán las lluvias efectivas obtenidas del periodo actual cada dos días. Para cada año se seleccionará la lluvia máxima efectiva (de acuerdo a  $d_e$ ) que se aplicará al hidrograma unitario obtenido y así se tendrán los gastos máximos anuales para el periodo *actual* del modelo japonés.

Se compararán gráficamente los gastos obtenidos por el modelo japonés en el periodo *actual* así como los gastos registrados en que coincidan ambos. Para cada conjunto de gastos se ajustará una función, que para igualar las propiedades estadísticas de ambos se deberán igualar dichas funciones, lo que generará un factor de ajuste, el cual se multiplicará a los gastos obtenidos del modelo japonés para los tres periodos, *actual, futuro cercano y lejano*.

Con los nuevos gastos obtenidos para los tres periodos del modelo japonés, se ajustará una función de distribución de probabilidad (FDP) para cada uno de ellos, utilizando el software Análisis de Frecuencia (AFA) versión 1.1 (IMTA, 2010). El ajuste consiste básicamente en la estimación de los parámetros de la función de distribución de probabilidad correspondiente. Para la estimación de los parámetros de una FDP existen varios métodos, de los cuales en el software utilizado se utilizan tres de ellos: momentos, máxima verosimilitud y error cuadrático mínimo; ya que son los más utilizados para el análisis de frecuencias de las variables hidroclimatológicas (Gómez, y otros, 2010).

Para seleccionar una FDP, se empleará el método del error cuadrático mínimo, el cual consiste en calcular para cada FDP el error estándar de ajuste. (Gómez, y otros, 2010):

$$EE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n - n_p} \right]^{1/2} \text{ Ecuación 3.2}$$

Donde:

$x_i$  es el i-ésimo gasto registrado

$x_0$  es el i-ésimo gasto calculado con la función de distribución bajo análisis

$n_p$  es el número de parámetros de la FDP

La FDP que tenga menor error cuadrático será la más adecuada, de acuerdo con este método (Gómez, y otros, 2010).

Una vez seleccionada la FDP para cada periodo se compararán los gastos obtenidos en condiciones normales y con la influencia del cambio climático y se realizarán las conclusiones correspondientes.

## **4. Aplicaciones**

En este trabajo se han analizado los efectos del cambio climático en los parámetros de la función de distribución de probabilidad para dos cuencas de la República Mexicana, una de ellas en el centro de la República Mexicana, perteneciente a la cuenca alta del Río Balsas y la segunda en el norte del país, perteneciente a la cuenca del Río Conchos.

### **4.1 Alto Balsas**

El primer caso de estudio corresponde a la cuenca del Alto Balsas, que pertenece a la cuenca del río Balsas, en la región hidrológica número 18. El área de aportación de la cuenca del río Balsas es de 117,305 km<sup>2</sup>. La precipitación pluvial media anual histórica en la región es de 991mm, mientras que el escurrimiento natural medio superficial es de 17,057 hm<sup>3</sup> al año (BALSAS, 2010). La hidrografía de la cuenca puede observarse en la Figura 4.24.

La cuenca del Alto Balsas se encuentra integrada por siete subcuencas: Bajo y Alto Atoyac, Tlapaneco, Mixteco, Libres-Oriental, Nexapa y Amacuzac, (Figura 4.1) con un área de 50,464 km<sup>2</sup> (BALSAS, 2010).

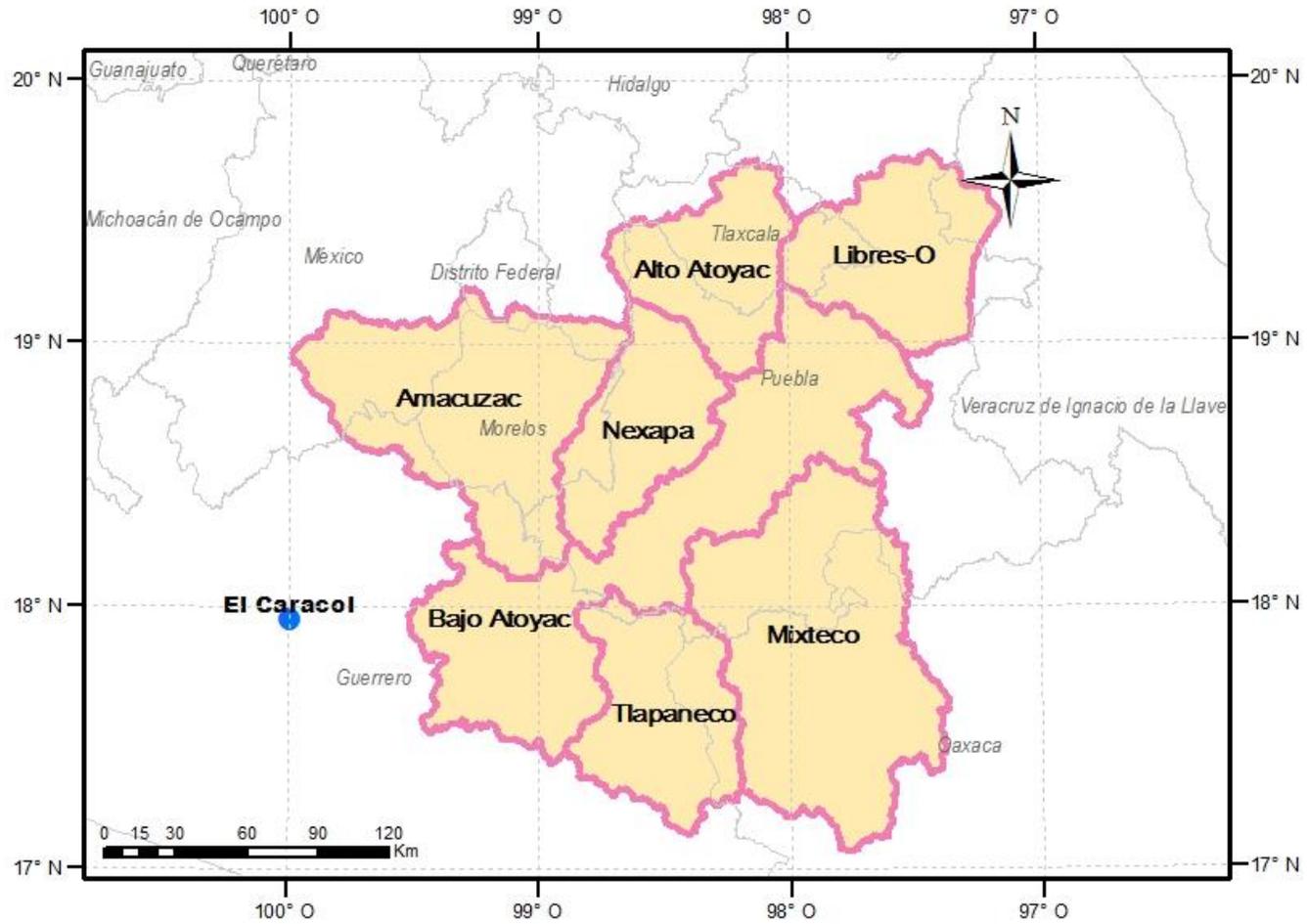


Figura 4.1 Cuenca Alto Balsas y presa El Caracol

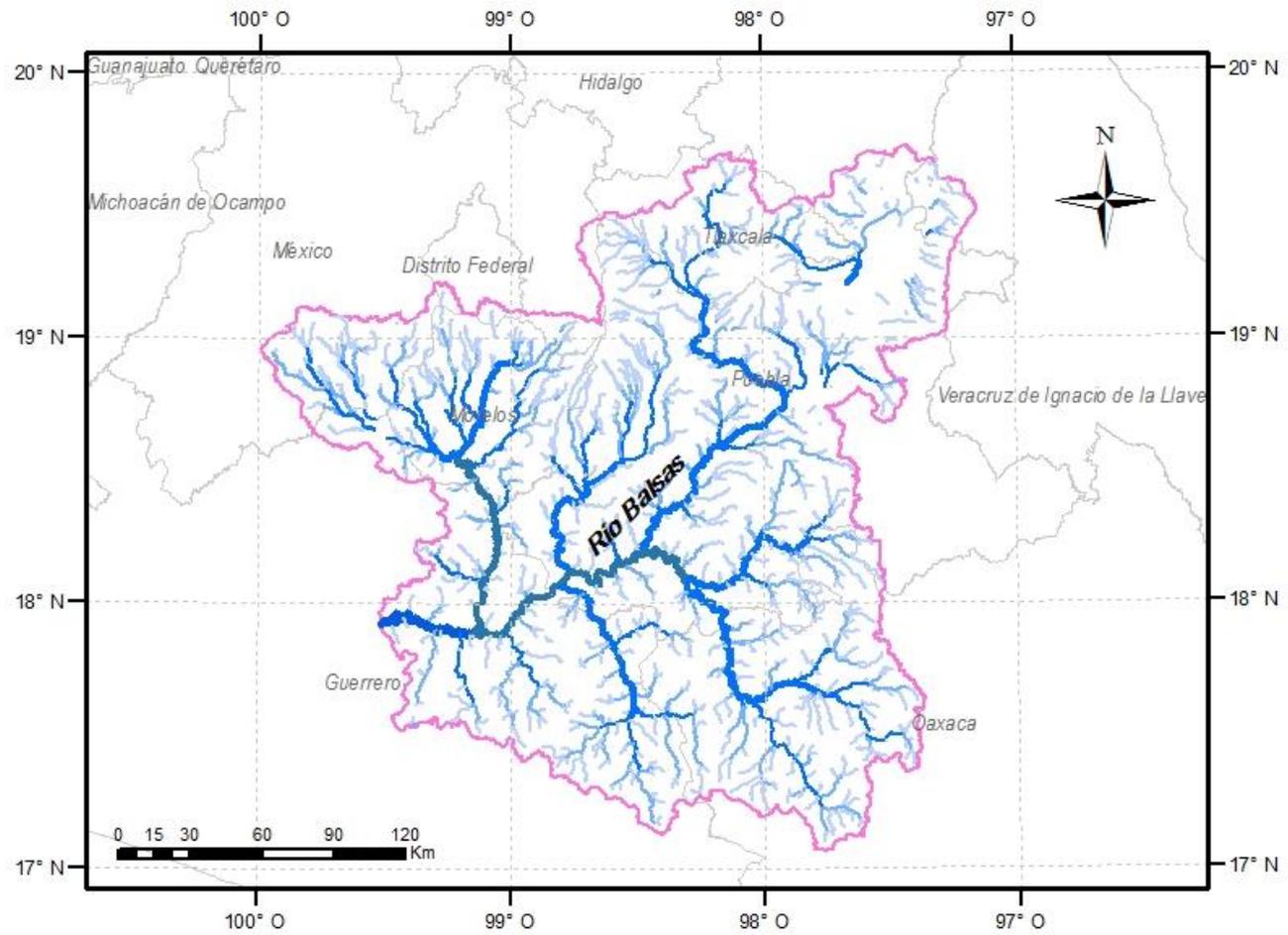


Figura 4.2 Hidrografía Alto Balsas

Tabla 4.1 Características de las 25 principales presas del país. NOTA: Abreviaturas= G: Generación de energía eléctrica, I: Irrigación, A: Uso abastecimiento público, C: Control de avenidas. FUENTE: CONAGUA. Subdirección General Técnica

	Nombre Oficial	Nombre Común	Latitud	Longitud	Capacidad al NAME (Hm <sup>3</sup> )	Capacidad al NAMO (Hm <sup>3</sup> )	Altura de la cortina (m)	Año de terminación	Entidades Federativas	Usos	Corriente
1	Dr. Belisario Domínguez	La Angostura	16.4030	-92.7790	20 217	12 762	147.00	1974	Chiapas	G	Río Grijalva
2	Infiernillo	Infiernillo	18.2750	-101.8930	15 195	12 500	151.50	1964	Guerrero -Michoacán	G, C	Río Balsas
3	Netzahualcóyotl	Malpaso o Raudales	17.1790	-93.5980	12 960	10 596	138.00	1964	Chiapas	G, C	Río Grijalva
4	Presidente Miguel Alemán	Temascal	18.2320	-96.4120	9 106	8 119	75.75	1955	Oaxaca	G, C	Río Tonto
5	Solidaridad	Aguamilpa	21.8396	-104.8036	6 950	5 540	187.00	1993	Nayarit	G, I	Río Santiago
6	Internacional La Amistad	La Amistad	29.4500	-101.0590	7 050	4 462	87.00	1968	Coahuila - Texas	G, I, A, C	Río Bravo
7	Internacional Falcón	Falcón	26.5592	-99.1668	4 908	3 912	50.00	1953	Tamaulipas - Texas	A, C, G	Río Bravo
8	General Vicente Guerrero Consumador de la Independencia Nacional	Las Adjuntas	23.9590	-98.6660	5 498	3 910	60.00	1971	Tamaulipas	I, A	Río Soto la Marina
9	Lázaro Cardenas	El Palmito	25.5947	-105.0154	3 336	3 336	104.70	1946	Durango	I, C	Río Nazas
10	Adolfo López Mateos	El Humaya o Varejonal	25.1005	-107.3880	3 983	3 072	105.50	1964	Sinaloa	G, I	Río Humaya
11	Álvaro Obregón	El Oviachic	27.8223	-109.8933	4 200	2 989	90.00	1952	Sonora	G, I	Río Yaqui
12	Plutarco Elías Calles	El Novillo	28.9752	-109.6422	3 628	2 963	133.80	1964	Sonora	G, I	Río Yaqui
13	Miguel Hidalgo y Costilla	El Mahone	26.5090	-108.5800	3 917	2 921	81.00	1956	Sinaloa	G, I	Río Fuerte
14	Luis Donaldo Colosio	Huites	26.8440	-108.3680	4 568	2 908	164.75	1995	Sinaloa	G, I	Río Fuerte
15	<b>La Boquilla</b>	<b>Lago Toronto</b>	<b>27.5450</b>	<b>-105.4140</b>	<b>3 645</b>	<b>2 894</b>	<b>80.00</b>	<b>1916</b>	<b>Chihuahua</b>	<b>I, G</b>	<b>Río Conchos</b>
16	José López Portillo	El Comedero	24.5711	-106.8080	3 400	2 800	136.00	1983	Sinaloa	G, I	Río San Lorenzo
17	Miguel de la Madrid	Cerro de Oro	17.9993	-96.2629	3 550	2 600	70.00	1988	Oaxaca	I	Río Santo Domingo
18	Ing. Alfredo Elías Ayub	La Yesca	21.1969	-104.1058	2 392	2 292	207.00	2012	Nayarit	G	Río Santiago
19	Leonardo Rodríguez Alcaine	El Cajón	21.4260	-104.4580	2 393	2 282	186.00	2006	Nayarit	G	Río Santiago
20	Gustavo Díaz Ordaz	Bacurato	25.8555	-107.9108	2 823	1 860	116.00	1981	Sinaloa	G, I	Río Sinaloa
21	Manuel Moreno Torres	Chicoasén	16.9430	-93.1010	1 690	1 632	261.00	1980	Chiapas	G	Río Grijalva
22	<b>Carlos Ramírez Ulloa</b>	<b>El Caracol</b>	<b>17.9478</b>	<b>-99.9958</b>	<b>1 860</b>	<b>1 521</b>	<b>126.00</b>	<b>1986</b>	<b>Guerrero</b>	<b>G</b>	<b>Río Balsas</b>
23	Adolfo Ruiz Cortines	Mocúzari	27.2256	-109.1070	1 825	1 114	88.50	1955	Sonora	G, I	Río Mayo
24	Angel Albino Corzo	Peñitas	17.4460	-93.4590	1 485	1 091	58.00	1986	Chiapas	G	Río Grijalva
25	Cuchillo-Solidaridad	El Cuchillo	25.7115	-99.2770	1 784	1 025	44.00	1994	Nuevo León	A, I	Río San Juan

Dentro de la cuenca en estudio se encuentra la presa Manuel Ávila Camacho conocida con el nombre de Valsequillo en el estado de Puebla cuya capacidad es de 331 Hm<sup>3</sup>.

La presa el Caracol es una de las 25 principales presas del país, como puede observarse en la Tabla 4.1. Se ubica en el estado de Guerrero, ver Figura 4.3 aguas abajo de la cuenca analizada.

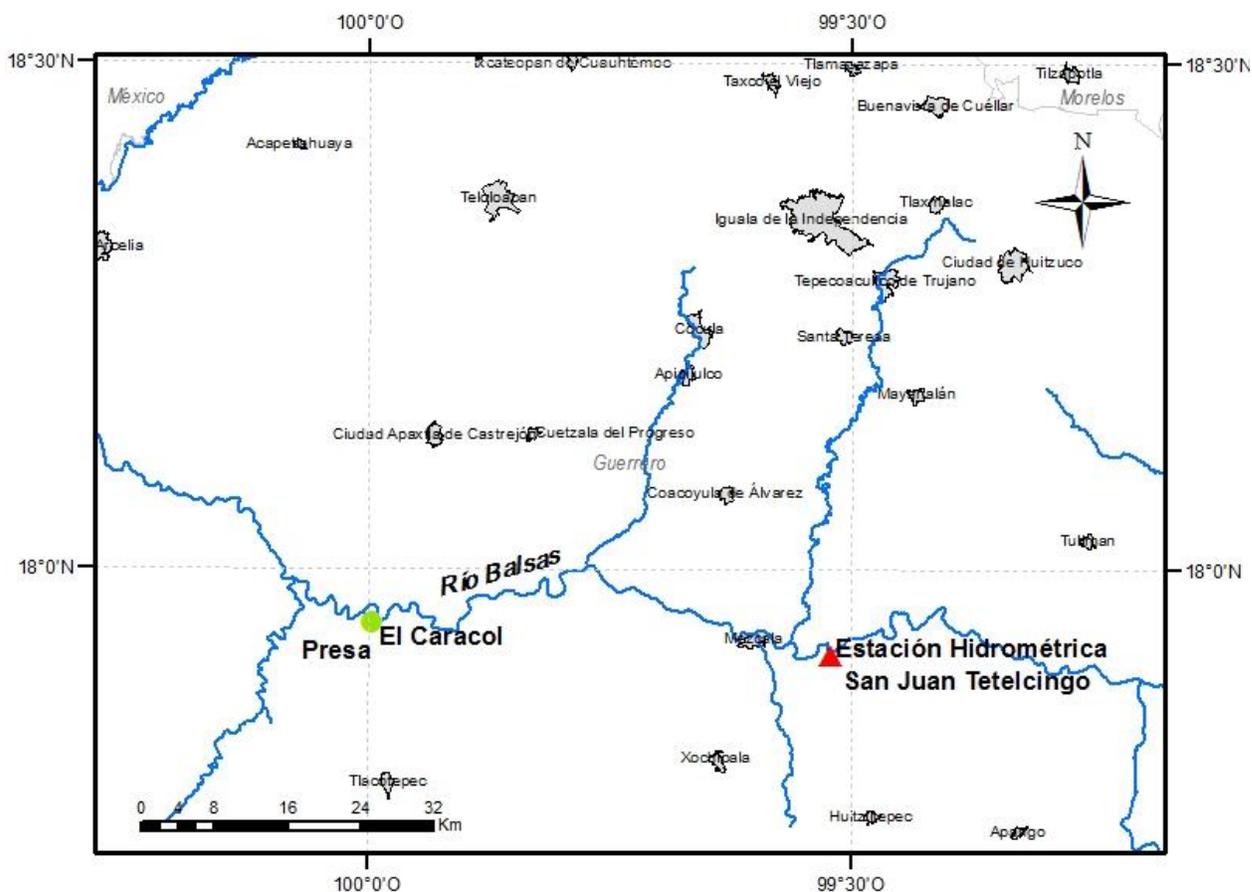


Figura 4.3 Ubicación Presa El Caracol y estación San Juan Tetelcingo

Para los datos de escurrimientos, se utilizó la estación hidrométrica San Juan Tetelcingo, con clave 18439, cuya ubicación puede observarse en la Figura 4.3 y corresponde a una longitud  $99^{\circ} 31' 15''$  y latitud  $17^{\circ} 55' 00''$  de acuerdo con el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (IMTA, 2008). Los datos extraídos de la estación San Juan Tetelcingo corresponden a los gastos medios diarios en metros cúbicos por segundo, para el periodo de 1951 a 2003.

Con la información del escurrimiento, se construyeron los hidrogramas anuales, de donde se seleccionaron como hidrogramas representativos los correspondientes a las avenidas máximas de los años 1976, 1982 y 1988.

Se construyeron los hidrogramas unitarios para las avenidas máximas de los años seleccionados.

En el caso de Alto Balsas, el área de la cuenca corresponde a  $50,464,094,410.75 \text{ m}^2$ , mismo que sustituyendo en la  $N = 0.827 A^{0.2}$  Ecuación 3.1 resulta:  $N = 0.827 (50464094410.75)^{0.2} = 7.2$  días. Aplicando este método para la separación del gasto base, se tiene como ejemplo en la Figura 4.4 la avenida máxima del año 1976; el punto de levantamiento del hidrograma el 7 de octubre, el día pico el 9 de octubre, y como  $N$  corresponde a 7 días, el final del escurrimiento directo se encuentra el día 16 del mismo mes.

En la Tabla 4.2 se muestra la máxima avenida para el año 1976 de la cuenca Alto Balsas así como la obtención del hidrograma unitario. En la columna (1) se encuentran los gastos medios diarios en  $\text{m}^3/\text{s}$ . Para la separación del gasto base en la columna (2), a cada ordenada del hidrograma se le resta donde termina dicho gasto como puede observarse en la Figura 4.4, cuyo resultado se observa en la columna (3). La suma de la columna (3) corresponde al gasto medio diario en  $\text{m}^3/\text{s}$ , por lo que al multiplicarse por 86,400 segundos, se obtiene el volumen del escurrimiento directo en  $\text{m}^3$ , que en este caso corresponde a  $411,004,800.00 \text{ m}^3$ . Dicho volumen se dividió entre el área total de la cuenca, esto es  $50,581,446,834.50 \text{ m}^2$ , dando como resultado la altura de precipitación de la lluvia efectiva de 8.13mm. En la columna (4) cada ordenada de la columna (3) se divide entre la altura de precipitación efectiva y se expresa en  $\text{m}^3/\text{s}$ . Dando como resultado las ordenadas del Hidrograma Unitario que puede observarse en la Figura 4.5. Se realizó el mismo procedimiento para los hidrogramas de los años 1982 y 1988.

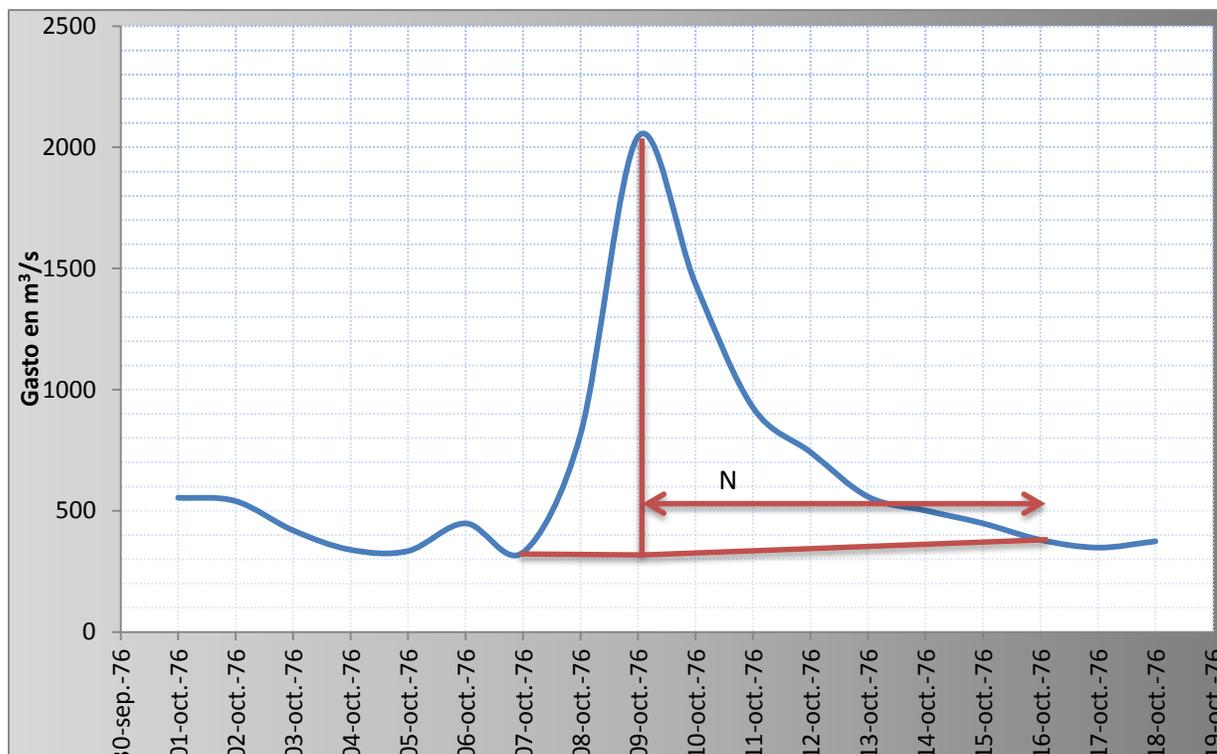


Figura 4.4 Separación del gasto base y gasto directo para la cuenca Alto Balsas

Tabla 4.2 Obtención del HU para la cuenca Alto Balsas

	(1) Q m <sup>3</sup> /s	(2)	(3) Ordenada m <sup>3</sup> /s	(4) Ordenada HU m <sup>3</sup> /s
<b>07-oct-76</b>	328	328-328	0	0.00
<b>08-oct-76</b>	816	816-328	488	60.06
<b>09-oct-76</b>	2044	2044-328	1716	211.18
<b>10-oct-76</b>	1436	1436-329	1107	136.24
<b>11-oct-76</b>	926	926-342	584	71.87
<b>12-oct-76</b>	742	742-343	399	49.10
<b>13-oct-76</b>	558	558-344	214	26.34
<b>14-oct-76</b>	501	501-349	152	18.71
<b>15-oct-76</b>	448	448-351	97	11.94
<b>16-oct-76</b>	380	380-380	0	0.00
		Suma	4757	m <sup>3</sup> /s
		Volumen	411,004,800.00	m <sup>3</sup>
		Área	50,581,446,834.50	m <sup>2</sup>
		Hp	8.13	mm

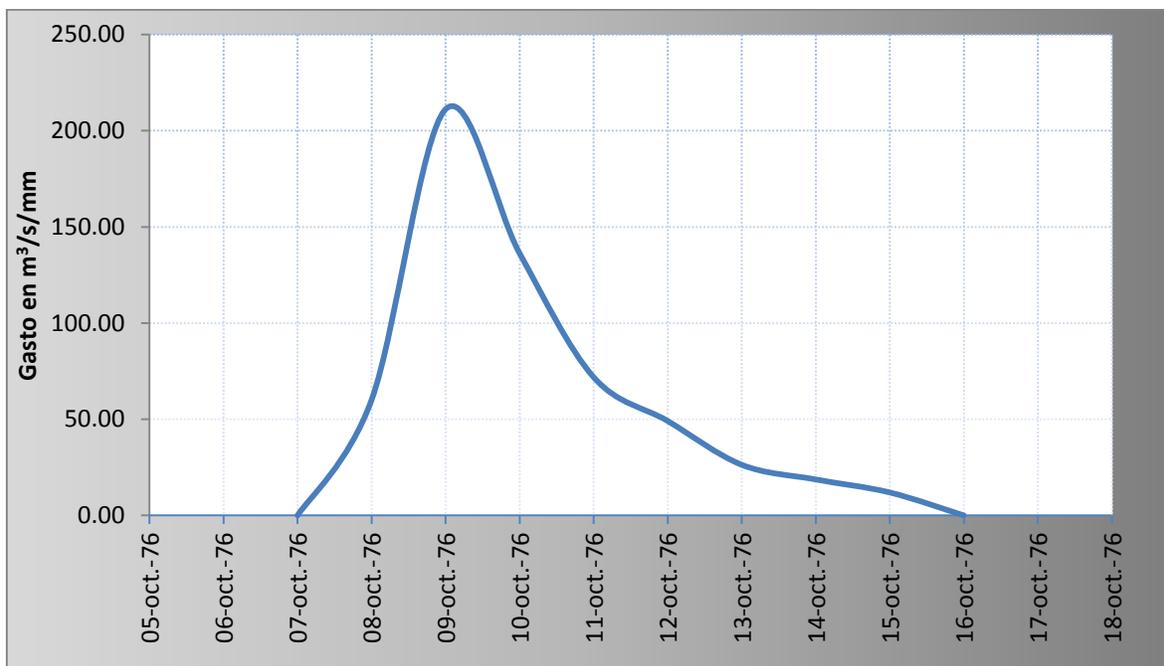


Figura 4.5 Hidrograma Unitario para el año 1976 de la cuenca Alto Balsas

Una vez obtenidos los hidrogramas unitarios de los años 1976, 1982 y 1988, dado que son ligeramente diferentes, se determinó un hidrograma unitario promedio. Para ello, y con el objetivo de evitar que los picos se atenúen al obtener el hidrograma unitario medio, se hicieron coincidir en el día pico, como puede observarse en la

Figura 4.6. Las ordenadas de los hidrogramas obtenidos se muestran en la Tabla 4.3, donde la columna (1) corresponde al día, la columna (2) al año 1976 y su gasto para cada día, lo mismo para las columnas (3) y (4) correspondientes a los años 1982 y 1988 respectivamente. En la columna (5) se realizó un promedio de los gastos diarios. Para obtener el volumen del escurrimiento directo  $v_{ed}$  se requieren las áreas de gastos multiplicadas por el intervalo de tiempo que se ejemplifican en la Figura 4.7, donde:

$$v_{ed} \approx \frac{Q_2 \Delta t}{2} + \frac{(Q_2 + Q_3) \Delta t}{2} + \frac{(Q_3 + Q_4) \Delta t}{2} + \dots + \frac{(Q_{n-1} + Q_n) \Delta t}{2}$$

Agrupando, se tiene:

$$v_{ed} \approx (2Q_2 + 2Q_3 + 2Q_4 + \dots + 2Q_n) \frac{\Delta t}{2}$$

Simplificando:

$$v_{ed} \approx (Q_2 + Q_3 + Q_4 + \dots Q_n)\Delta t \quad \text{Ecuación 4.1}$$

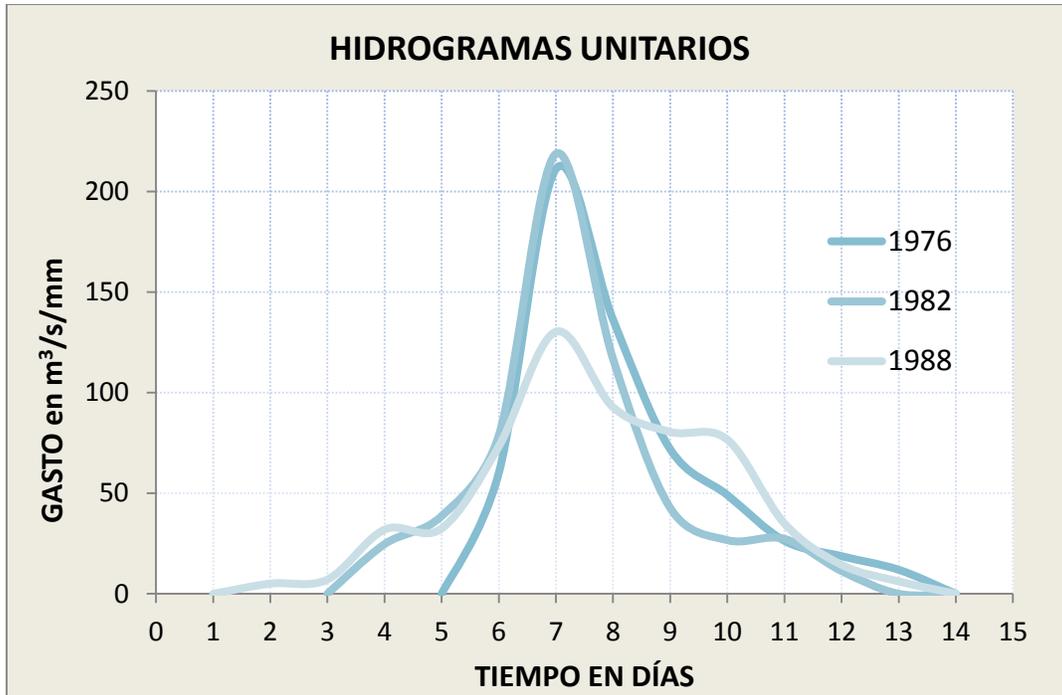


Figura 4.6 Hidrogramas Unitarios para la cuenca Alto Balsas

Tabla 4.3 Obtención de Hidrograma Unitario para la cuenca Alto Balsas

(1) Día	Gasto m³/s					(6) Factor HU
	(2) 1976	(3) 1982	(4) 1988	(5) Promedio		
1			0.00	0.00	0.00	
2			5.06	5.06	4.94	
3		0.00	7.08	3.54	3.46	
4		24.67	31.92	28.29	27.63	
5	0.00	38.67	32.48	23.72	23.16	
6	60.04	78.68	73.28	70.67	69.02	
7	211.14	218.70	130.26	186.70	182.35	
8	137.56	116.69	92.72	115.66	112.96	
9	71.24	42.67	80.47	64.80	63.28	
10	48.97	26.67	76.65	50.76	49.58	
11	26.21	27.34	34.95	29.50	28.81	
12	18.58	11.34	14.39	14.77	14.42	
13	11.69	0.00	6.18	5.96	5.82	
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
<b>Suma</b>	585.43	585.43	585.43	599.42	585.43	
			factor=	1.023		

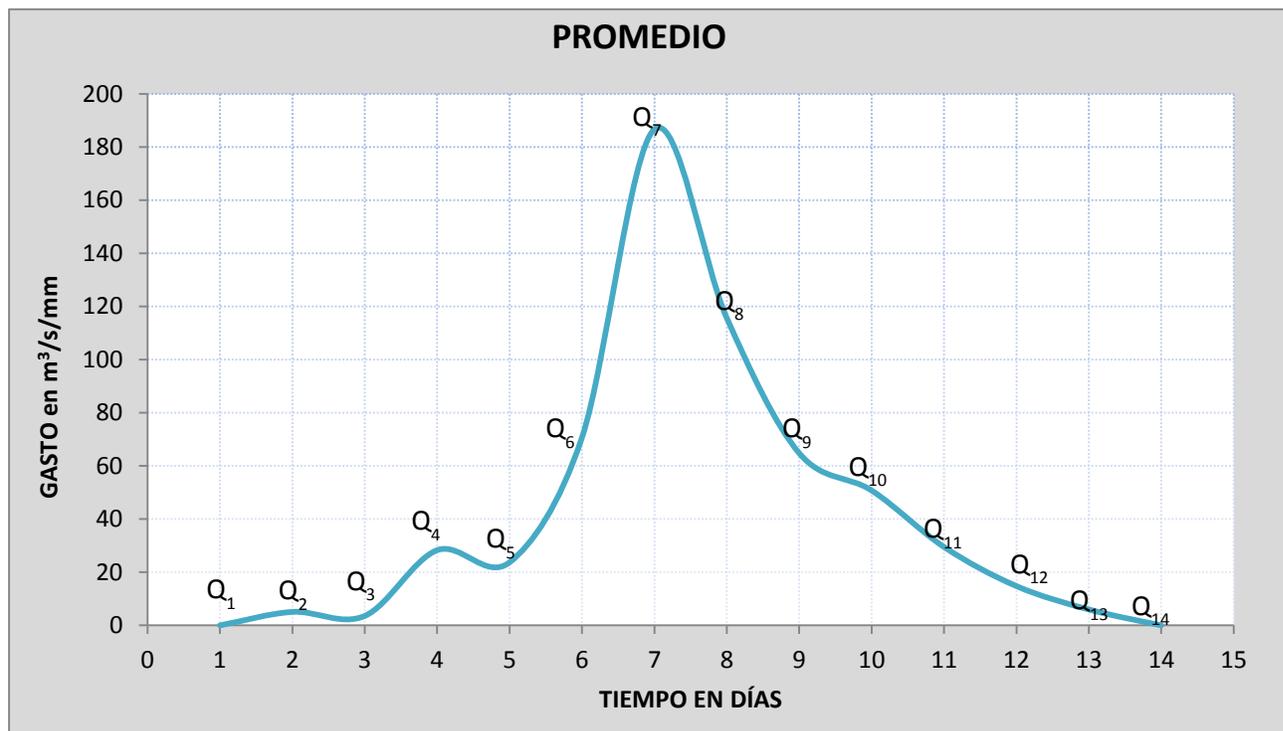


Figura 4.7 Obtención del volumen de escurrimiento directo para la cuenca Alto Balsas

Empleando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se tiene que el  $v_{ed}$  para los años 1976, 1982 y 1988 es:  $v_{ed} = (585.43m^3/s)86400seg = 50,581,152m^3$ . Y para el hidrograma promedio corresponde a  $v_{ed} = (599.42m^3/s)86400seg = 51,789,888m^3$ . Por lo tanto para ajustar dichos gastos, se utiliza un factor de ajuste que resulta de dividir el  $v_{ed}$  del hidrograma promedio por el  $v_{ed}$  del hidrograma real, dando como resultado 1.023. Por lo tanto en la columna (6) de la Tabla 4.3, se tiene cada ordenada del hidrograma promedio, dividida por el factor de ajuste.

El resultado del hidrograma unitario para la cuenca Alto Balsas, y que posteriormente se empleará para los periodos proyectados del modelo japonés, *actual* (1979 – 2003), *futuro cercano* (2015-2039) y  *finales de siglo* (2075 a 2099), puede observarse en la Figura 4.8 . El periodo *actual* es el que servirá de control, debido a que los gastos de este periodo son los que pueden compararse con los registrados.

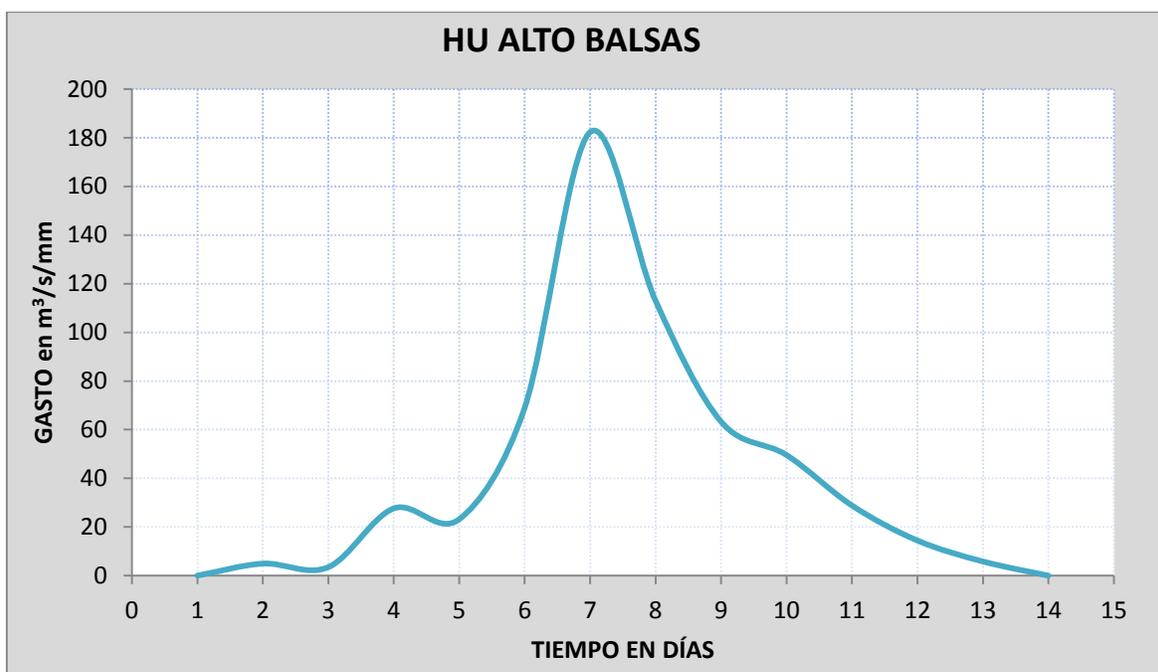


Figura 4.8 Hidrograma Unitario para la cuenca Alto Balsas

De los años registrados se obtuvieron los hidrogramas anuales, identificando las avenidas máximas para cada año. Para dichas avenidas se obtuvieron los hidrogramas separando el gasto base del mismo, donde se obtuvieron los gastos picos mostrados en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Gastos picos registrados en la cuenca Alto Balsas

AÑO	Gasto máx m <sup>3</sup> /s registrado	AÑO	Gasto máx m <sup>3</sup> /s registrado
1979	844.0	1992	675.0
1980	899.0	1993	796.4
1981	1081.0	1994	513.5
1982	328.0	1995	848.0
1983	687.8	1996	851.0
1984	1465.0	1997	646.0
1985	786.1	1998	1994.0
1986	247.0	1999	1068.0
1987	929.0	2000	447.0
1988	1159.0	2001	750.0
1989	1317.0	2002	957.7
1990	595.0	2003	989.0
1991	1198.21		

Para dichas avenidas se obtuvieron las alturas de las láminas de lluvia en exceso con el procedimiento anteriormente mencionado.

El registro de las precipitaciones para esta cuenca se obtuvo de las estaciones climatológicas para el periodo de 1959 a 2003. Dicha información se obtuvo del Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC III v2.0 (IMTA, 2006).

Con las precipitaciones registradas en las estaciones climatológicas de los años 1959 a 2003, se obtuvieron, mediante Polígonos de Thiessen (Figura 4.9), las precipitaciones medias diarias para la cuenca Alto Balsas.

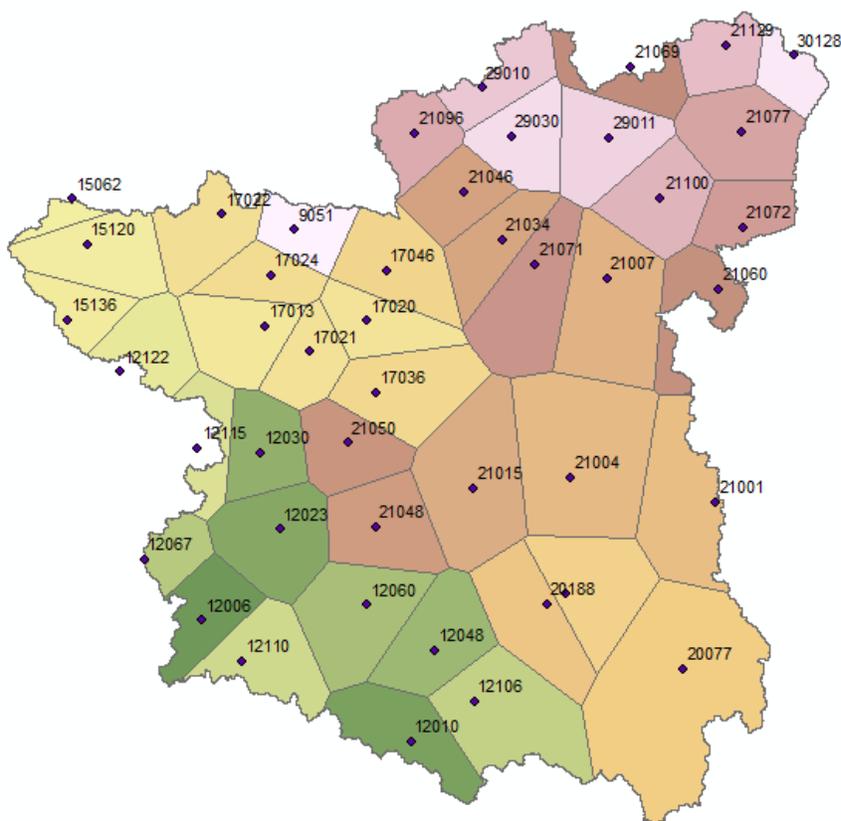


Figura 4.9 Polígonos de Thiessen para la cuenca Alto Balsas correspondientes al año 1977.

Con las precipitaciones medias diarias y las alturas de lámina de lluvia excedente, se obtuvo el índice de infiltración media. Por ejemplo, para el año 1987, mediante el hidrograma se determinó una lámina de lluvia en exceso de

6.63 mm del 3 al 14 de julio, mientras que las precipitaciones que produjeron dicho escurrimiento, comenzaron el 2 de julio y finalizaron el 10 del mismo, como puede observarse en la Figura 4.10.

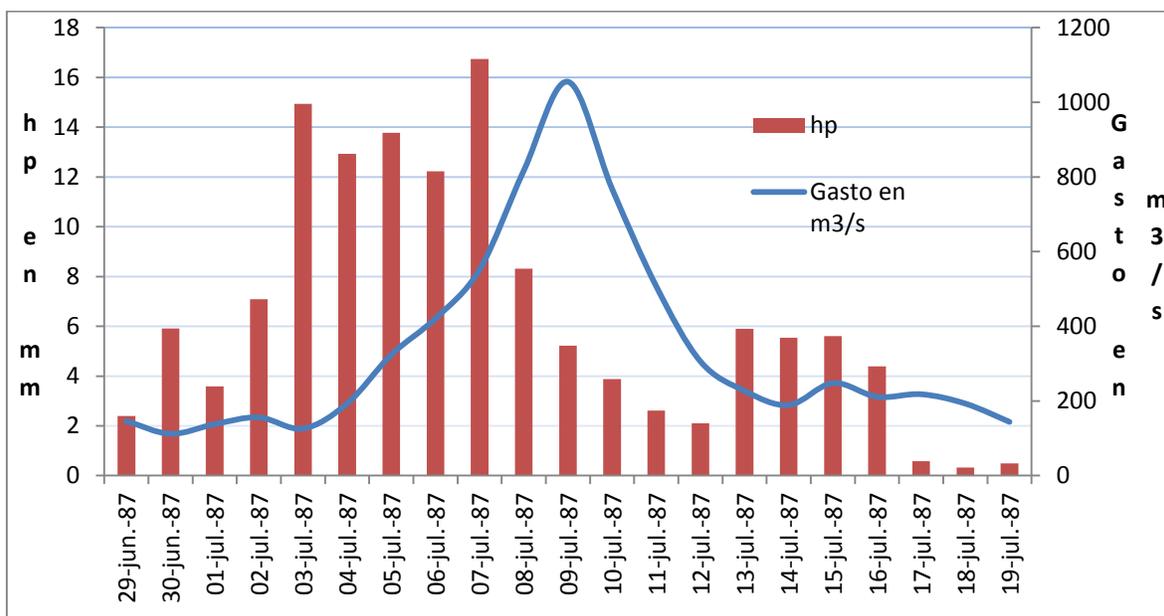


Figura 4.10 Hidrograma y precipitaciones medias diarias para la cuenca Alto Balsas, correspondientes a la avenida máxima del año 1987.

Mediante el criterio de la capacidad de infiltración media (Aparicio, 2009), se obtuvo el índice de infiltración media  $\phi$ , que corresponde a 12.94 mm, como puede observarse en la Figura 4.11.

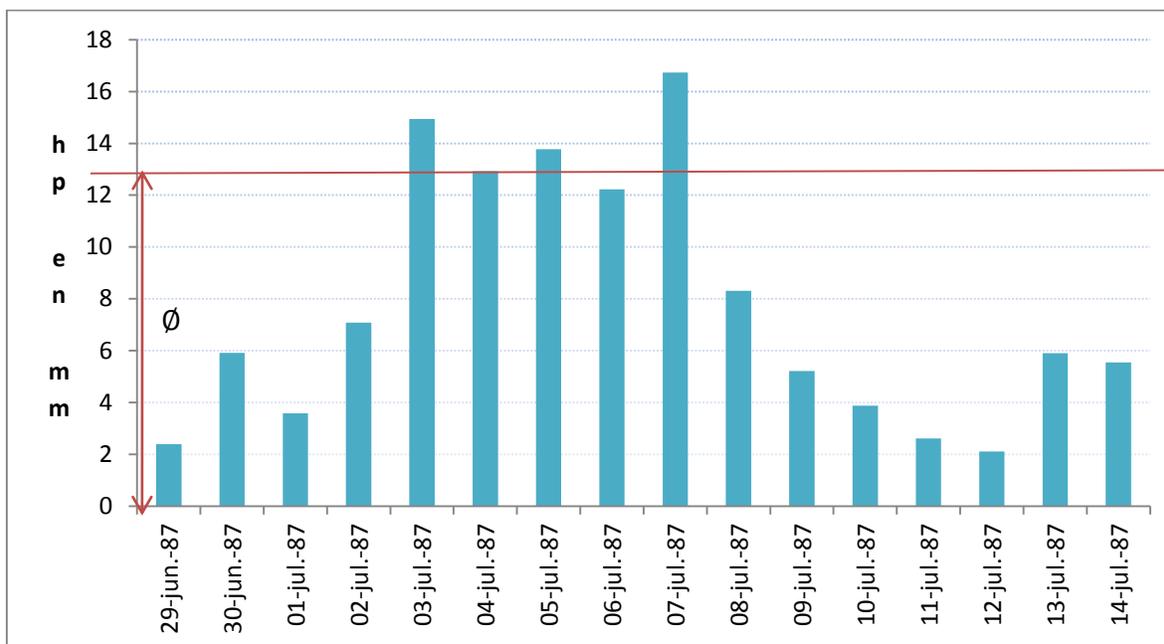


Figura 4.11 Obtención del índice de infiltración media para el año 1987 de la cuenca Alta Balsas.

Con las precipitaciones medias diarias, mediante el criterio del Índice de Precipitación Antecedente (Aparicio, 2009), se obtuvieron los IPA desde el primer año de precipitaciones registradas (1959) hasta el año 2003. Mediante este procedimiento se da seguimiento a la humedad del suelo.

Así para el año 1987, se tienen los IPA para los días donde se presentó la tormenta, y se ha seleccionado el IPA perteneciente al día que se presentó el escurrimiento pico, en este caso es de 65.63 mm. Lo mismo se hizo para las demás tormentas máximas de todos los años. Se seleccionaron algunas tormentas, principalmente considerando que se podían aislar por ser resultado de una lluvia determinada, y se obtuvieron los valores de IPA e índice de infiltración media que se presenta en la Tabla 4.5

Tabla 4.5 Resultados IPA e Índice de Infiltración media

Día	IPA (mm)	$\phi$ (mm)	de
21-jul-58	45.08	17.89	2 días
18-oct-59	66.12	13.41	3 días
02-sep-60	35.35	16.05	3 días
29-ago-62	55.17	15.05	4 días
30-jul-63	61.11	11.02	2 días
14-ago-65	74.79	13.09	4 días
22-sep-67	37.44	20.07	3 días
09-jun-72	53.87	15.46	4 días
11-sep-73	72.69	13.79	3 días
27-sep-76	30.30	23.83	1 día
24-jun-77	65.21	13.53	4 días
10-sep-78	46.35	12.6	1 día
25-sep-80	29.35	17.01	2 días
01-jul-82	52.63	14.01	1 día
09-jul-87	65.63	12.94	3 días
30-ago-88	26.74	24.38	1 día
20-sep-90	55.08	13.03	1 día
18-jun-91	46.95	17.99	2 días
30-sep-98	83.19	11.13	5 días

Los valores de la Tabla 4.5, se graficaron ajustando una curva logarítmica, que puede apreciarse en la Figura 4.12. La función IPA ( $\phi$ ) resultante es la correspondiente a la  $\phi = 141.89( IPA)^{-0.57}$  Ecuación 4.2, misma que posteriormente se utilizó para los valores proyectados por el modelo japonés.

$$\phi = 141.89( IPA)^{-0.57} \text{ Ecuación 4.2}$$

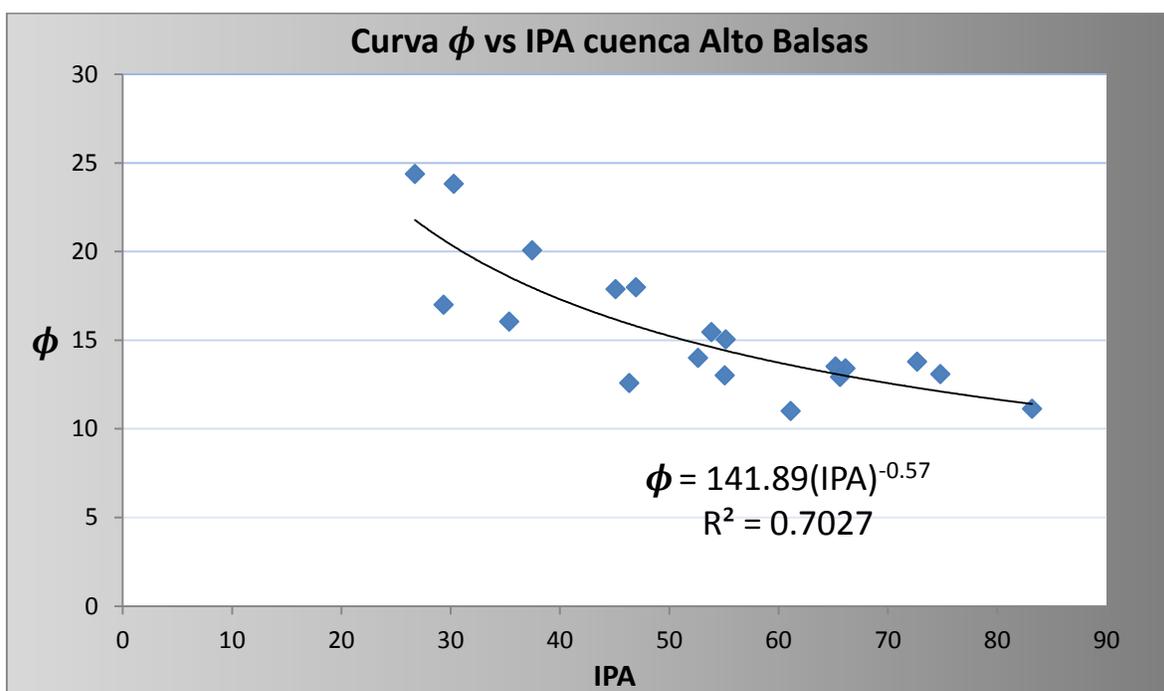


Figura 4.12 Curva  $\phi$  vs IPA cuenca Alto Balsas

Como se mencionó anteriormente, el modelo japonés ha generado precipitaciones diarias para los tres periodos, *actual*, *futuro cercano* y  *finales del siglo*. Para los tres casos, mediante polígonos de Thiessen, se han generado precipitaciones medias diarias para la cuenca Alto Balsas. Una vez calculadas las precipitaciones medias diarias, se obtuvieron los IPA para cada día.

Con la función de la curva  $\phi$  vs IPA ( $\phi = 141.89(IPA)^{-0.57}$  Ecuación 4.2) se han obtenido los índices de infiltración media  $\phi$  para el primer periodo del modelo japonés. Estos índices se restan a la precipitación diaria, obteniendo así la precipitación efectiva. Debido a que los hidrogramas de los años 1976, 1982 y 1988 que fueron seleccionados para la creación del hidrograma unitario cuya duración efectiva corresponde a 1 día, se ha considerado la misma duración para obtener la lluvia efectiva del modelo japonés. Seleccionando la mayor lluvia efectiva anual fue aplicada al hidrograma unitario de la cuenca Alto Balsas (ver Figura 4.8), obteniendo así los gastos máximos anuales para el periodo actual

1979 a 2003. Como ejemplo, puede observarse la Tabla 4.6 que contiene en la columna (1) las precipitaciones medias diarias para el año 1998 del modelo japonés, en la columna (2) se obtuvieron los IPA para cada día del año, en la columna (3) mediante la  $\phi = 141.89( IPA)^{-0.57}$  Ecuación 4.2, se obtuvieron los  $\phi$ , en la columna (4) se restó a la altura de precipitación (1), el índice de infiltración media correspondiente a la columna (3), lo que corresponde a la lluvia efectiva. Para este caso (1998), la máxima lluvia efectiva corresponde a 10.42 mm el cual fue aplicado al Hidrograma Unitario de la cuenca Alto Balsas de igual forma para los años comprendidos de 1979 a 2003 del modelo japonés.

Tabla 4.6 Obtención de lluvia efectiva máxima para el año 1998 correspondiente a la cuenca Alto Balsas del modelo japonés

	(1) Hp	(2) IPA	(3) $\phi$	(4) hp- $\phi$
<b>11-jun-98</b>	5.71	43.22	16.58	0.00
<b>12-jun-98</b>	4.57	42.45	16.75	0.00
<b>13-jun-98</b>	10.21	40.65	17.17	0.00
<b>14-jun-98</b>	24.81	44.76	16.25	8.55
<b>15-jun-98</b>	23.82	62.86	13.39	10.42
<b>16-jun-98</b>	17.18	77.25	11.91	5.27
<b>17-jun-98</b>	12.57	82.84	11.44	1.13
<b>18-jun-98</b>	5.76	82.99	11.43	0.00
<b>19-jun-98</b>	6.53	76.30	11.99	0.00

Con las precipitaciones máximas anuales diarias, se realizó una comparación grafica que puede observarse en la Figura 4.13. Se realizó diaria, debido a que la duración efectiva del hidrograma unitario es de 1 día.

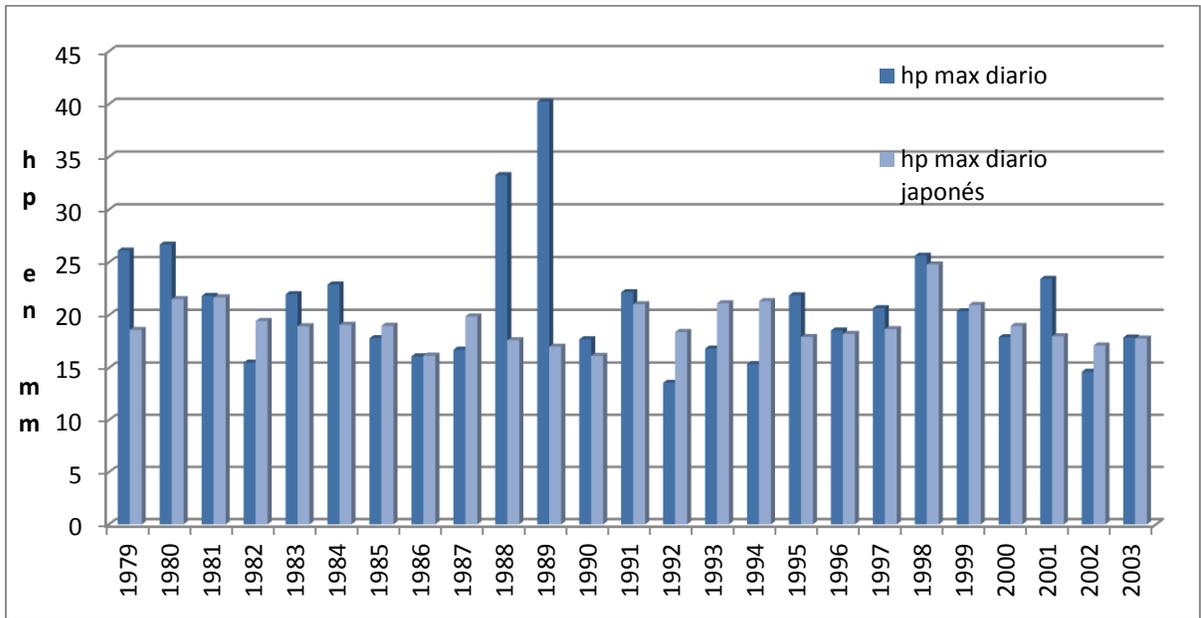


Figura 4.13 Lluvias máximas anuales para cada día de datos registrados y del modelo japonés para la cuenca Alto Balsas.

Para comparar los gastos obtenidos por el modelo japonés y los registrados, se obtuvieron los gastos para diferentes periodos de retorno, para el periodo comprendido de 1979 a 2003, el cual puede observarse en la Figura 4.14.

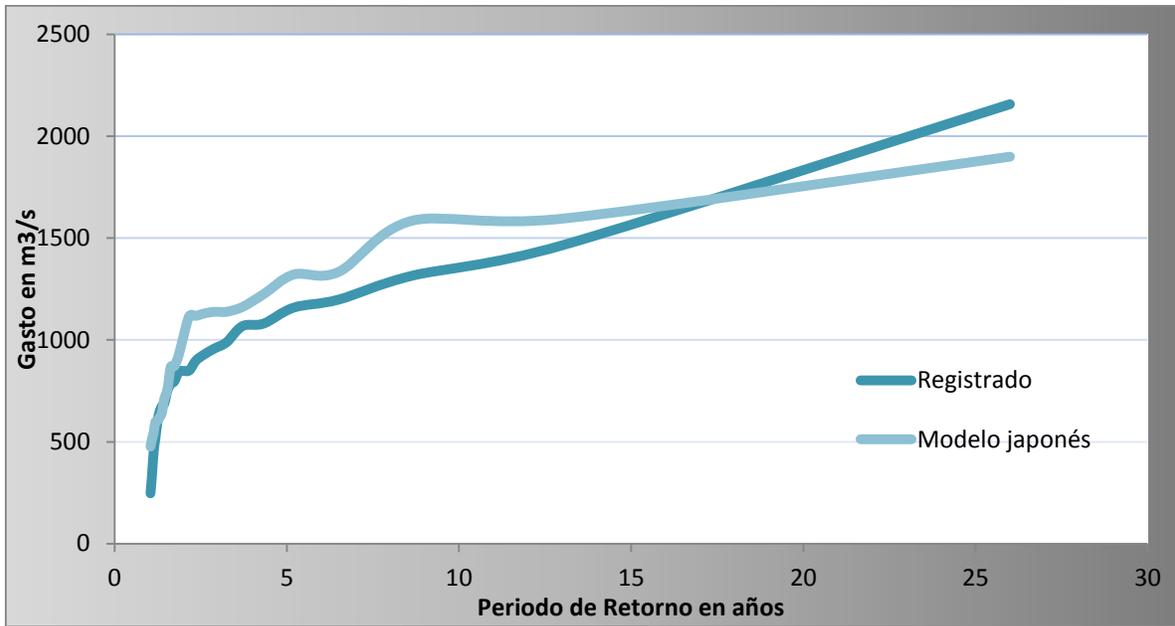


Figura 4.14 Comparación de gastos para diferentes periodos de retorno del modelo japonés y el registrado

Se ajustó una ecuación lineal para los valores registrados, como puede observarse en Figura 4.15, así como para los valores del modelo japonés que puede apreciarse en la Figura 4.16.

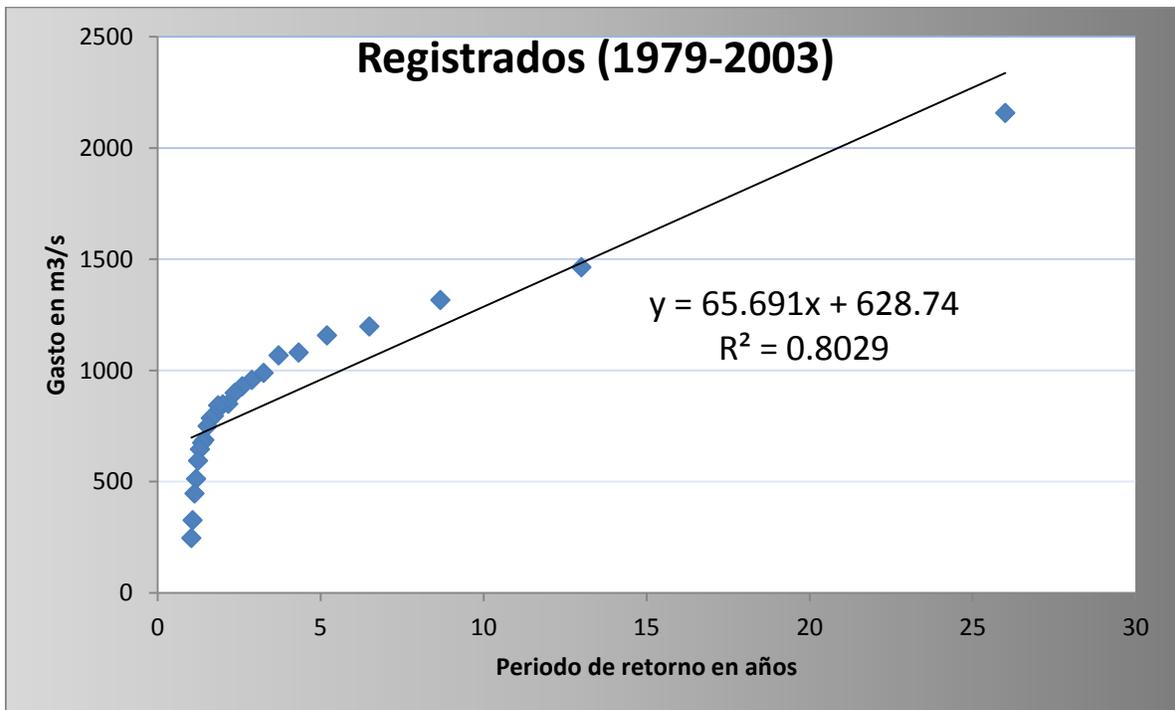


Figura 4.15 Gastos para diferentes periodos de retorno de datos registrados para la cuenca Alto Balsas

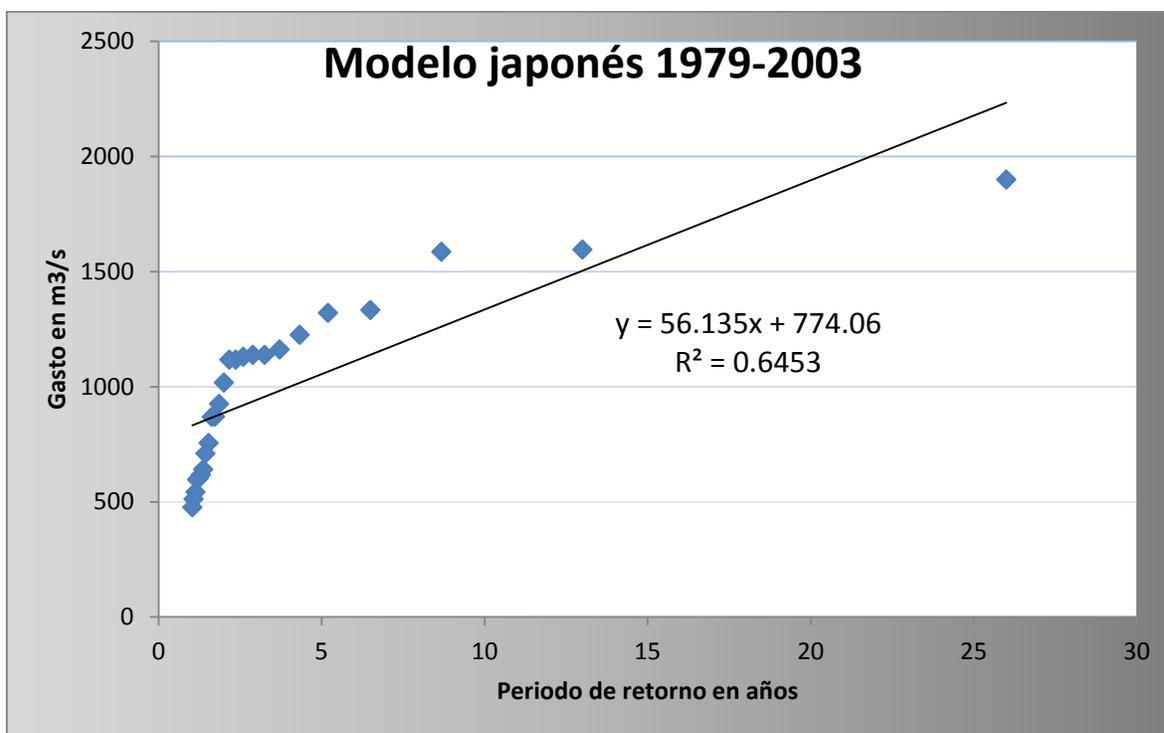


Figura 4.16 Gastos para diferentes periodos de retorno de datos obtenidos por el modelo japonés para la cuenca Alto Balsas

Las ecuaciones resultantes son:

$$y = 65.691x + 628.74 \text{ Ecuación 4.3}$$

$$y = 56.135x + 774.06 \text{ Ecuación 4.4}$$

Donde:

$y$  =gasto en m<sup>3</sup>/s

$x$  =periodo de retorno en años

La  $y = 65.691x + 628.74$  Ecuación 4.3 corresponde al periodo registrado, y la  $y = 56.135x + 774.06$  Ecuación 4.4 corresponde al periodo análogo del modelo japonés. Para uniformar ambos sistemas, se utilizó el siguiente factor de ajuste:

$$y_{1j} = y_{2j} \frac{b_2 + m_2 x_j}{b_3 + m_3 x_j} \text{ Ecuación 4.5}$$

Donde:

$y_{1j}$ =gasto modelo japonés corregido para un periodo de retorno  $j$

$y_{2j}$ =gasto modelo japonés para un periodo de retorno  $j$

$b_2$ = ordenada al origen de la ecuación 4.3

$b_3$ = ordenada al origen de la ecuación 4.4

$m_2$ = pendiente de la recta de la ecuación 4.3

$m_3$ = pendiente de la recta de la ecuación 4.4

$x_j$  =periodo de retorno  $j$ , en años

Sustituyendo los valores en la  $y_{1j} = y_{2j} \frac{b_2+m_2x_j}{b_3+m_3x_j}$  Ecuación 4.5, resulta:

$$y_{1j} = y_{2j} \frac{628.74 + 65.691x_j}{774.06 + 56.135x_j}$$

Cada valor del periodo japonés, se multiplicó por el factor obtenido, para un periodo de retorno  $j$ . En la Figura 4.17 se muestran los gastos obtenidos mediante la corrección realizada para el modelo japonés, así como los registrados y el modelo japonés sin corregir.

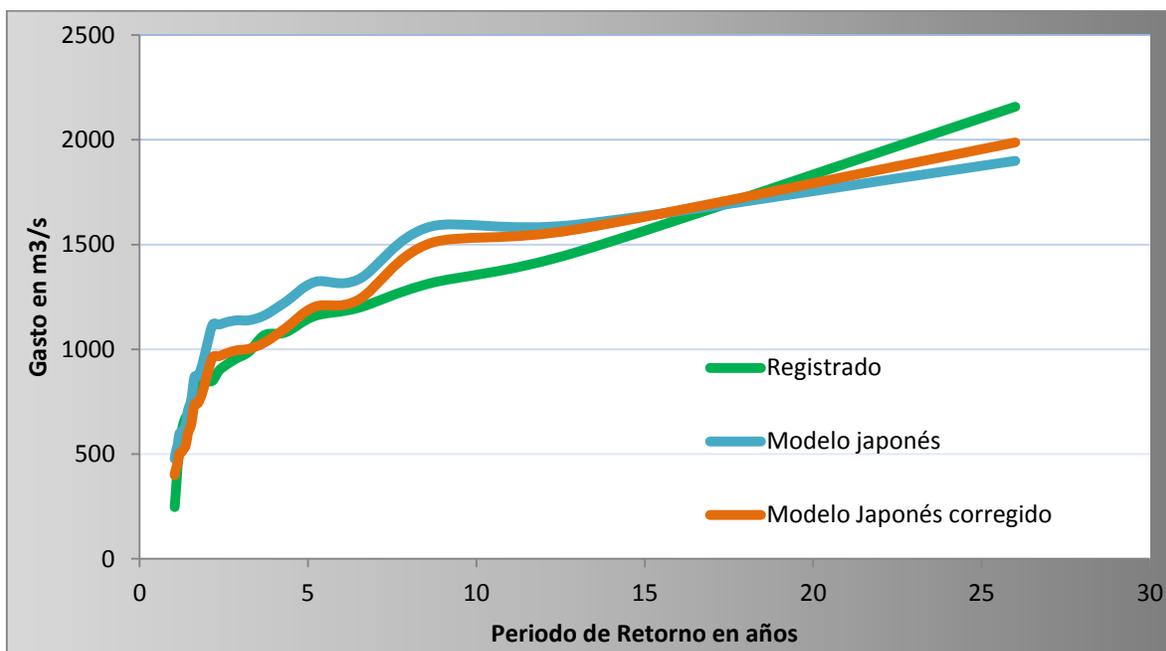


Figura 4.17 Comparación de gastos registrados, del modelo japonés y del modelo japonés corregido para diferentes periodos de retorno para la cuenca Alto Balsas (1979-2003)

Del mismo modo, se hicieron las correcciones para los periodos *futuro cercano* y  *finales del siglo*, obteniendo los gastos que se muestran en la Figura 4.18.

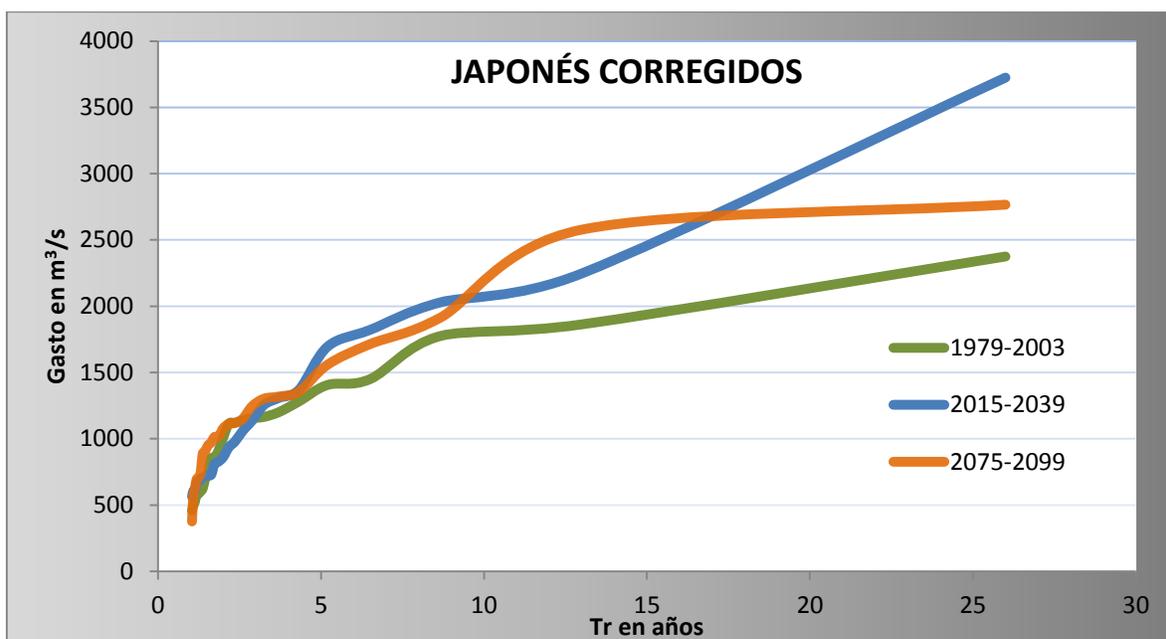


Figura 4.18 Gastos corregidos para los periodos *actual*, *futuro cercano* y  *finales de siglo* para la cuenca Alto Balsas

Con los nuevos gastos obtenidos para los tres periodos del modelo japonés, se ajustó una función de distribución de probabilidad para cada uno de ellos, utilizando el programa AFA (IMTA, 2010). En la Figura 4.19 se muestran los gastos para diferentes periodos de retorno, obtenidos del periodo 1979-2003 mediante diferentes funciones de distribución de probabilidad.

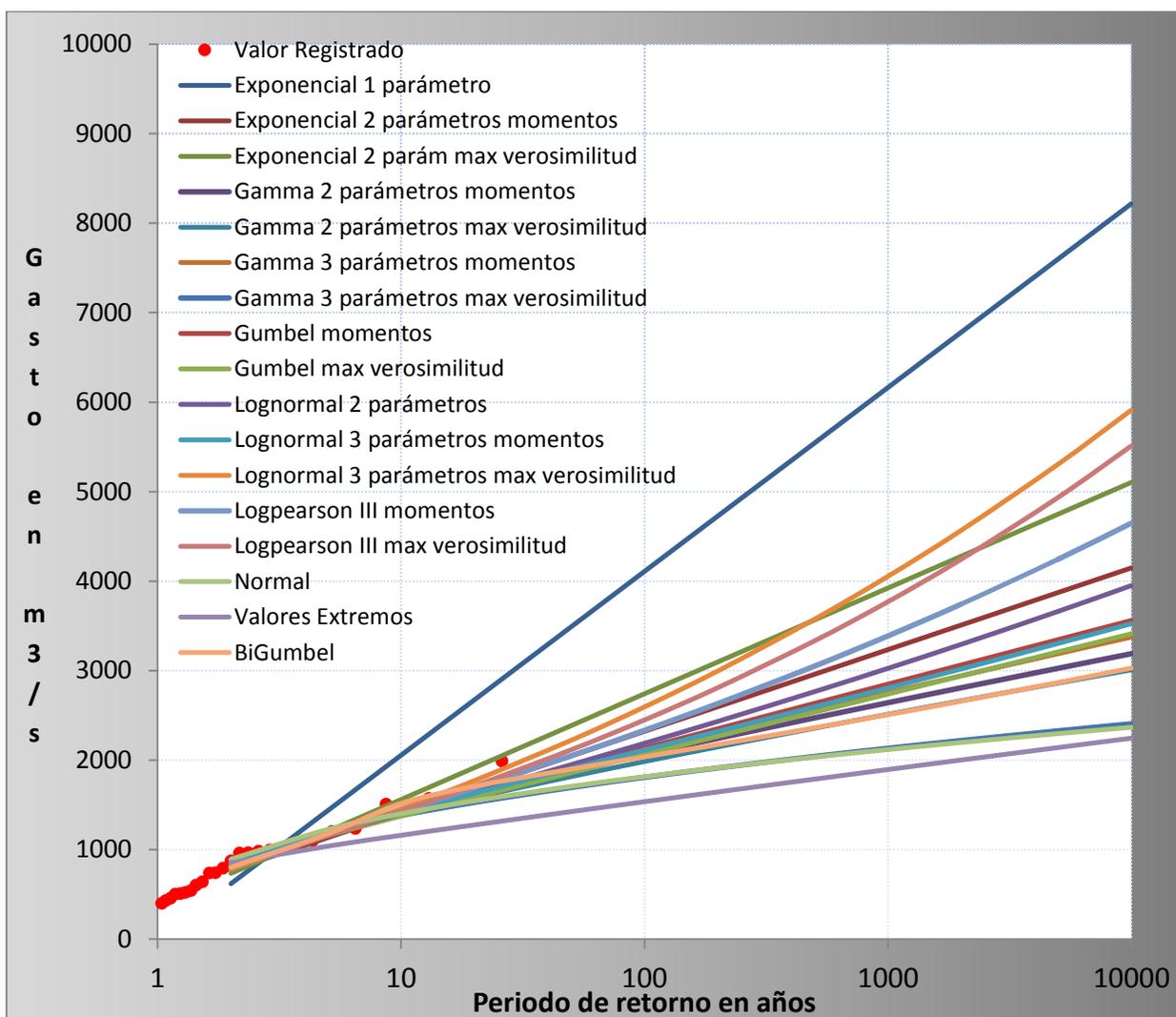


Figura 4.19 Gastos para diferentes periodos de retorno mediante diferentes FDP del periodo actual (1979-2003)

De igual forma en la Figura 4.20 y en la Figura 4.21 se muestran los gastos para diferentes periodos de retorno, obtenidos de los periodos *futuro cercano* y  *finales de siglo*, 2015-2039 y 2075-2099 respectivamente, mediante diferentes funciones de distribución de probabilidad.

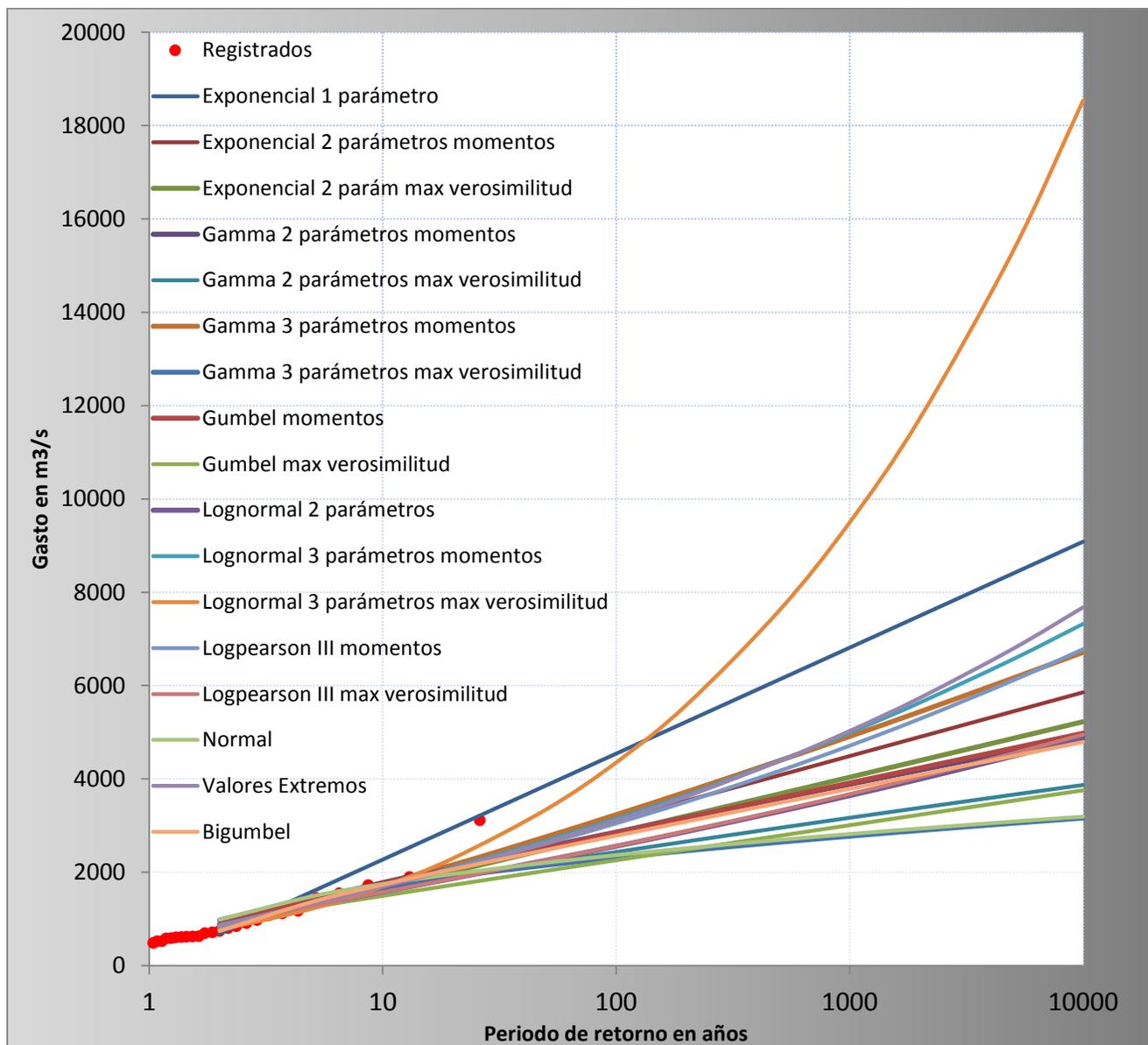


Figura 4.20 Gastos para diferentes periodos de retorno mediante diferentes FDP del periodo *futuro cercano* (2015-2039)

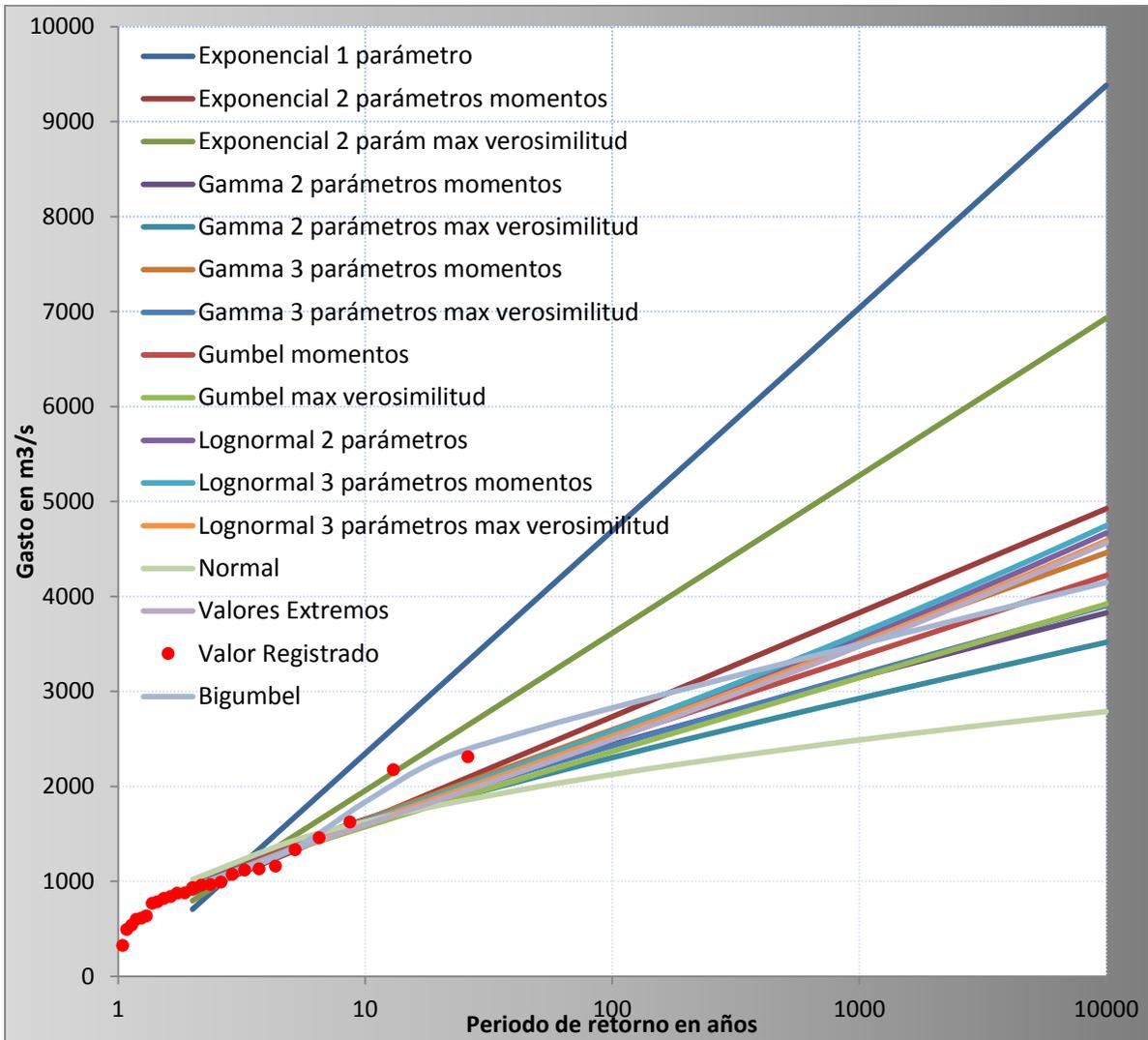


Figura 4.21 Gastos para diferentes periodos de retorno mediante diferentes FDP del periodo  *finales de siglo (2075-2099)*

En la Tabla 4.7 se muestran los errores de ajuste para las funciones de distribución utilizadas para el periodo actual 1979-2003.

Tabla 4.7 Errores de ajuste para el periodo *actual* 1979-2003

Exponencial 1 parámetro Momentos y Máx verosimilitud	363.5
Exponencial 2 parámetros momentos	94.099
Exponencial 2 parámetro máx verosimilitud	83.5
Gamma 2 parámetros momentos	81.32
Gamma 2 parámetros máx verosimilitud	93.8
Gamma 3 parámetros momentos	79.659
Gamma 3 parámetros max verosimilitud	119.5
Gumbel momentos	81.099
Gumbel max verosimilitud	94.7
Lognormal 2 parámetros momentos y máx verosimilitud	81.2
Lognormal 3 parámetros momentos	82.878
Lognormal 3 parámetros máx verosimilitud	66.8
Logpearson III momentos	71.908
Logpearson III max verosimilitud	71.9
Normal	119.1
Valores Extremos	228
Gumbel doble	77.4

En la Tabla 4.8 se muestran los errores de ajuste para las funciones de distribución utilizadas para el periodo *futuro cercano* 2015-2039 y en la Tabla 4.9 para *finales de siglo*.

Tabla 4.8 Errores de ajuste para el periodo *futuro cercano* 2015-2039

Exponencial 1 parámetro Momentos y Máx verosimilitud	294.60
Exponencial 2 parámetros momentos	174.428
Exponencial 2 parámetro máx verosimilitud	212.3
Gamma 2 parámetros momentos	221.018
Gamma 2 parámetros máx verosimilitud	266.8
Gamma 3 parámetros momentos	175.87
Gamma 3 parámetros max verosimilitud	315.4
Gumbel momentos	231.03
Gumbel max verosimilitud	302
Lognormal 2 parámetros momentos y máx verosimilitud	260.6
Lognormal 3 parámetros momentos	197.792
Lognormal 3 parámetros máx verosimilitud	138
Logpearson III momentos	207.538
Logpearson III max verosimilitud	266.9
Normal	318.5
Valores Extremos	209.5
Gumbel doble	212.1

Tabla 4.9 Errores de ajuste para el periodo  *finales de siglo 2075-2099*

Exponencial 1 parámetro Momentos y Máx verosimilitud	398.6
Exponencial 2 parámetros momentos	120.8
Exponencial 2 parámetro máx verosimilitud	171.8
Gamma 2 parámetros momentos	126.96
Gamma 2 parámetros máx verosimilitud	143.7
Gamma 3 parámetros momentos	118.54
Gamma 3 parámetros max verosimilitud	133.1
Gumbel momentos	122.905
Gumbel max verosimilitud	144.3
Lognormal 2 parámetros momentos y máx verosimilitud	124.5
Lognormal 3 parámetros momentos	122.05
Lognormal 3 parámetros máx verosimilitud	128.9
Normal	174.40
Valores Extremos	137
Gumbel doble	56.5

De acuerdo al criterio de selección del que presenta un mejor ajuste, cuyo error es el menor, para el periodo actual se seleccionó la FDP LogPearson III mediante máxima verosimilitud; para el futuro cercano la FDP de mejor ajuste es Lognormal 3 parámetros mediante máxima verosimilitud mientras que para finales de siglo, la FDP de mejor ajuste es Gumbel Doble. En la Tabla 4.10 y en la Figura 4.22 se muestran los diferentes gastos para periodos de retorno de 20, 100, 1,000 y 10,000 años para los tres periodos proyectados del modelo japonés.

Tabla 4.10 Gastos en m<sup>3</sup>/s del modelo japonés para la cuenca Alto Balsas

<b>Gastos del modelo Japonés</b>			
<b>FDP:</b>	LogPearson III máx	Lognormal 3 parámetros	Doblegumbel
	verosimilitud	máx verosimilitud	
<b>T</b>	<b>1979-2003</b>	<b>2015-2039</b>	<b>2075-2099</b>
<b>20</b>	1711.28	2297.86	2282.98
<b>100</b>	2448.39	4352.14	2826.11
<b>1,000</b>	3769.28	9494.53	3493.97
<b>10,000</b>	5510.45	18535.73	4148.42

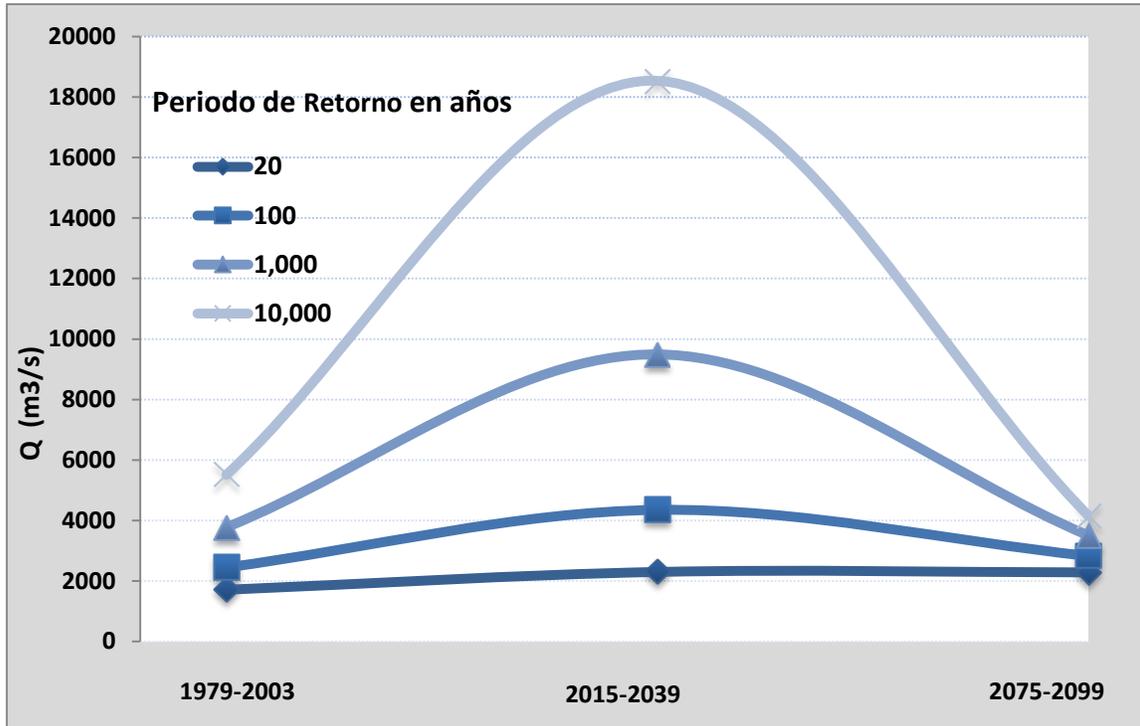


Figura 4.22 Gastos mediante el modelo japonés para diferentes periodos de retorno con la FDP de menor error de ajuste para la cuenca Alto Balsas

La capacidad de almacenamiento al NAMO de la presa El Caracol es de  $1521 \text{ hm}^3$ , y su altura de 126m, por lo que de acuerdo a la clasificación de presas mostrada en la Tabla 4.12, se considera una presa mayor, por lo que los periodos de diseño se consideran mayores o iguales a 10,000 años. En este caso, si el periodo de retorno se considera bajo condiciones sin cambio climático, el gasto de diseño correspondería a  $5510.45 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que considerando cambios en las variables climatológicas, correspondería a un gasto de diseño de hasta  $18,535.73 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir un incremento de más del 300%. Como puede apreciarse, en la Figura 4.22, los gastos para un periodo de retorno de 1,000, 100 y 20 años obtenidos del periodo futuro cercano, son mayores que los de finales de siglo así como sin considerar un cambio climático incrementando en el caso de un Tr de 20 años hasta un 34%; para el Tr de 100 años un incremento de hasta 77%, mientras que para un Tr de más del 250%.

Tabla 4.11 Periodos de retorno para la estimación del gasto máximo de diseño en las obras hidráulicas. Conagua 1999

<b>Recomendación de períodos de retorno para la estimación del gasto máximo de diseño en las obras hidráulicas</b>	
<b>Tipo de Obra Hidráulica</b>	<b>Tr (años)</b>
<b>Presa Derivadora</b>	
a) Zona de riego pequeña (menor de 1000 Ha)	50-100
b) Zona de riego mediana ( 1000 a 10,000 Ha )	100-500
c) Zona de riego grande (más de 10,000 Ha)	500-1000
<b>Obras de Desvío Temporal</b>	
Presas pequeñas	10-25
Presas medianas	25-50
Presas grandes	50-100
Cauce de alivio en corriente	25-50 (o mayor según importancia)
<b>Presas de almacenamiento</b>	
De jales (lodo del procesamiento de minerales en minas)	500-1000
Azolve del acarreo del suelo en cuencas	500-1000
De agua para abastecimiento a poblaciones, riego, energía	Se muestra en la Tabla <b>4.12</b>

Tabla 4.12 Periodos de retorno para presas de almacenamiento para abastecimiento a poblaciones, riego, energía. Conagua 1999

<b>Categoría</b>	<b>Almacenamiento (Mm3)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Pérdidas de vidas</b>	<b>Daños materiales</b>	<b>Crecientes de diseño</b>
Pequeña	Menor de 1.5	Menor de 15	Ninguna	Menor que el costo de la presa	Basada en estudios de probabilidad Tr=500 años
			Moderada	Del orden del costo de la presa	Basada en estudios de probabilidad Tr=1000 años
			Considerable	Mayor que el costo de la presa	Basada en estudios de probabilidad Tr=10,00 años
Mediana	Entre 1.5 y 60	Entre 12 y 30	Ninguna	Dentro de la capacidad financiera	Estudio de probabilidad Tr= 1000 a 10,000 años
			Moderada	Ligeramente mayor que la capacidad financiera	Estudio de probabilidad Tr= 10,000 años
			Considerable	Mayor que la capacidad financiera	Tormentas severas. Tormentas maximizadas. Transposición de tormentas: Tr>= 10,000 años
Mayor: No se toleran fallas	Mayor de 60	Mayor de 18	Considerable	Excesivos o como norma política establecida	Máxima posible con base en análisis hidrometeorológicos. Análisis de maximización de tormentas locales y transposición de tormentas con Tr>=10,000 años

## 4.2 La Boquilla

La segunda cuenca analizada corresponde a la cuenca de aportación a la presa La Boquilla, localizada en el norte de la República Mexicana, que pertenece a la cuenca del Río Conchos, que a su vez es afluente del Río Bravo. La región hidrológica a la que pertenece es la número 24 Bravo-Conchos (CONAGUA, 2011).

A continuación se presentan algunas características de la región hidrológica Bravo- Conchos:

- Extensión territorial continental: 229, 740 km<sup>2</sup>
- Precipitación normal anual 1971-2000: 453 mm
- Escurrimiento natural medio superficial interno: 5, 588 hm<sup>3</sup>/año
- Exportaciones : 432 hm<sup>3</sup>/año
- Escurrimiento natural medio superficial total: 5,156 hm<sup>3</sup>/año
- Cuencas hidrológicas: 37

La presa La Boquilla se encuentra dentro de las principales 25 presas del país, como puede observarse en la Tabla 4.1. Se localiza en el estado de Chihuahua, en la latitud 27° 32' Norte, y longitud 105° 24' Oeste, sobre el río Conchos, afluente del río Bravo, como puede observarse en la Figura 4.23. Esta presa se construyó durante el periodo de 1909 a 1916 con el objeto de aprovechar el agua para irrigación y controlar las avenidas que se presentan en este río, así como la generación de energía eléctrica. El área de aportación a la presa La Boquilla es de 21,277.704 km<sup>2</sup>.

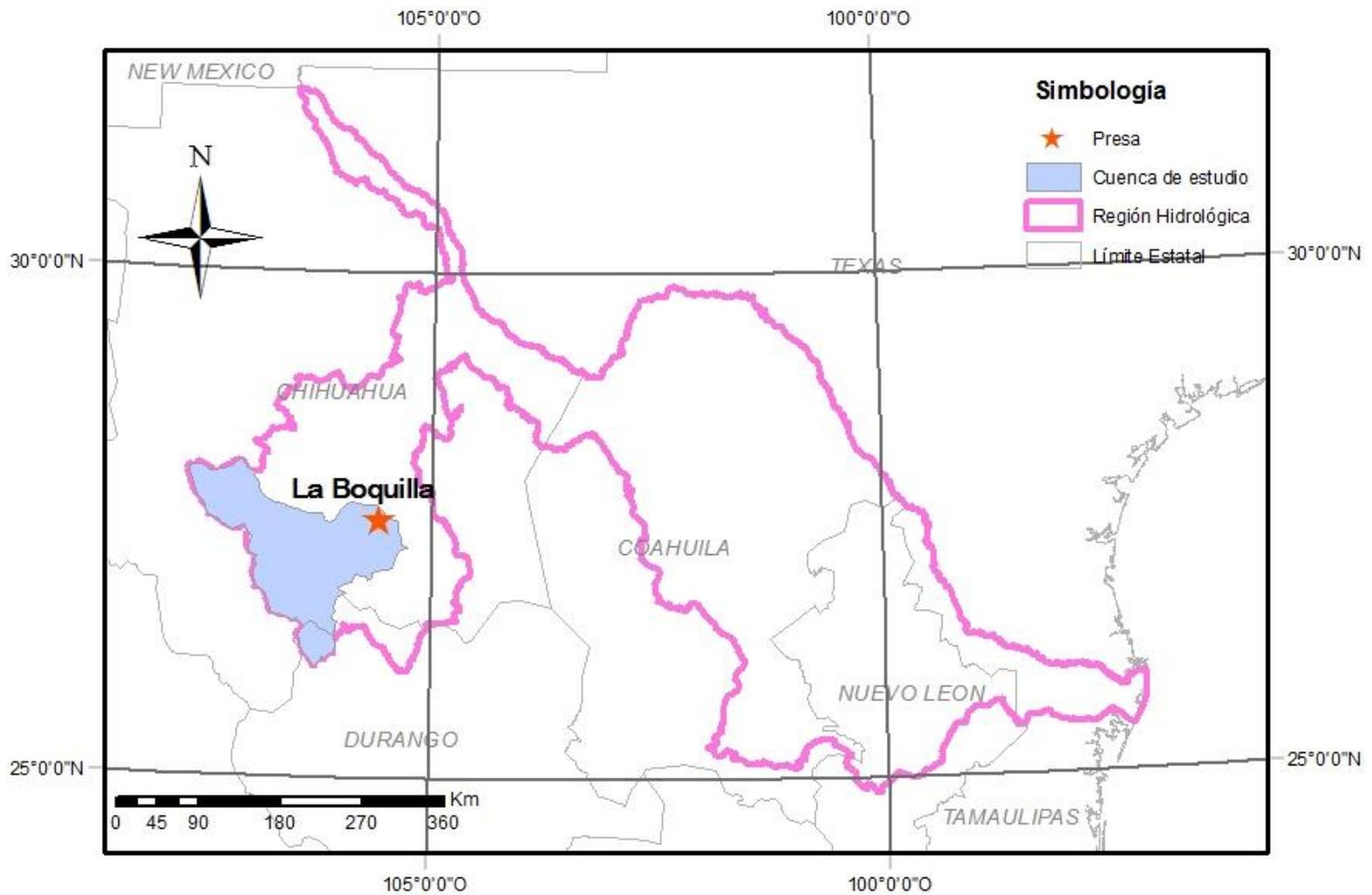


Figura 4.23 Ubicación de la cuenca de la presa La Boquilla

La presa está ubicada en una boquilla de forma ligeramente asimétrica, con la ladera derecha algo más tendida que la izquierda, tiene un ancho de unos 80 m en el lecho del río y se amplía a la altura de la corona a unos 220m. Consiste esencialmente en una estructura del tipo gravedad, curva en planta, de 80 m de altura máxima y 259 m de longitud de corona y además cuenta con un dique de 900 m de longitud para completar el cierre del vaso. La obra de excedencias es un vertedor libre con capacidad para un gasto de 3,850 m<sup>3</sup>/s. En 1983 se sobre elevaron el dique y el vertedor para mejorar el control de escurrimientos (Aldama, y otros, 2006).

El Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (IMTA, 2008) contiene información del vaso de la presa La Boquilla con clave 225BOQ. En este trabajo se utilizaron dichos datos, aunque no son aforos directos sino inferencias a partir del antifuncionamiento del vaso. Dentro de la cuenca de la presa la Boquilla no existen otras presas importantes de almacenamiento ni estaciones hidrométricas. Los datos extraídos de la única estación hidrométrica corresponden a las entradas diarias totales por ríos al vaso para el periodo de 1935 a 1999. No se cuenta con registros de mayor resolución temporal que un día, por lo que fueron éstos los utilizados en este trabajo. En una cuenca de esta magnitud, los gastos medios diarios son muy similares a los instantáneos (Campos, 1998).

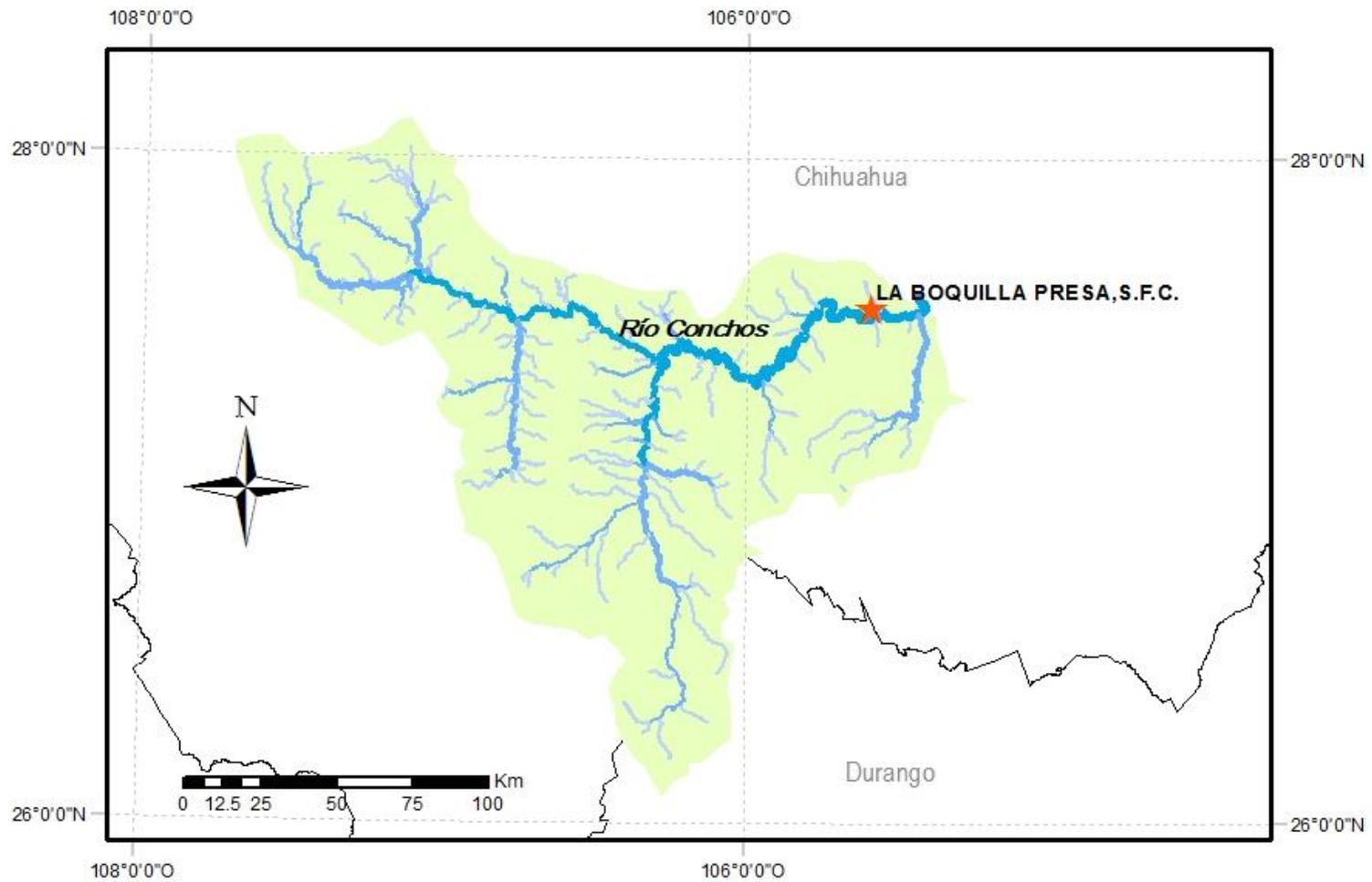


Figura 4.24 Hidrografía de la cuenca en estudio

Con la información de las entradas diarias totales, se construyeron los hidrogramas anuales, de donde se seleccionaron los hidrogramas de los años 1974, 1981 y 1983 como representativos de las avenidas máximas anuales en la cuenca.

Se construyeron los hidrogramas unitarios para las avenidas máximas de los años seleccionados de la forma como se mencionó en el capítulo anterior.

En el caso de La Boquilla, el área de la cuenca corresponde a 21,277.704km<sup>2</sup>, mismo que sustituyendo en la  $N = 0.827 A^{0.2}$  Ecuación 3.1 resulta:  $N = 0.827 (21277.704)^{0.2} = 6.06$  días. Aplicando este método para la separación del gasto base, se tiene como ejemplo en la Figura 4.25 la avenida máxima del año 1981; el punto de levantamiento del hidrograma el 2 de octubre, el día pico el 9 de octubre, y como  $N$  corresponde a 6 días, el final del escurrimiento directo se encuentra el día 15 del mismo mes.

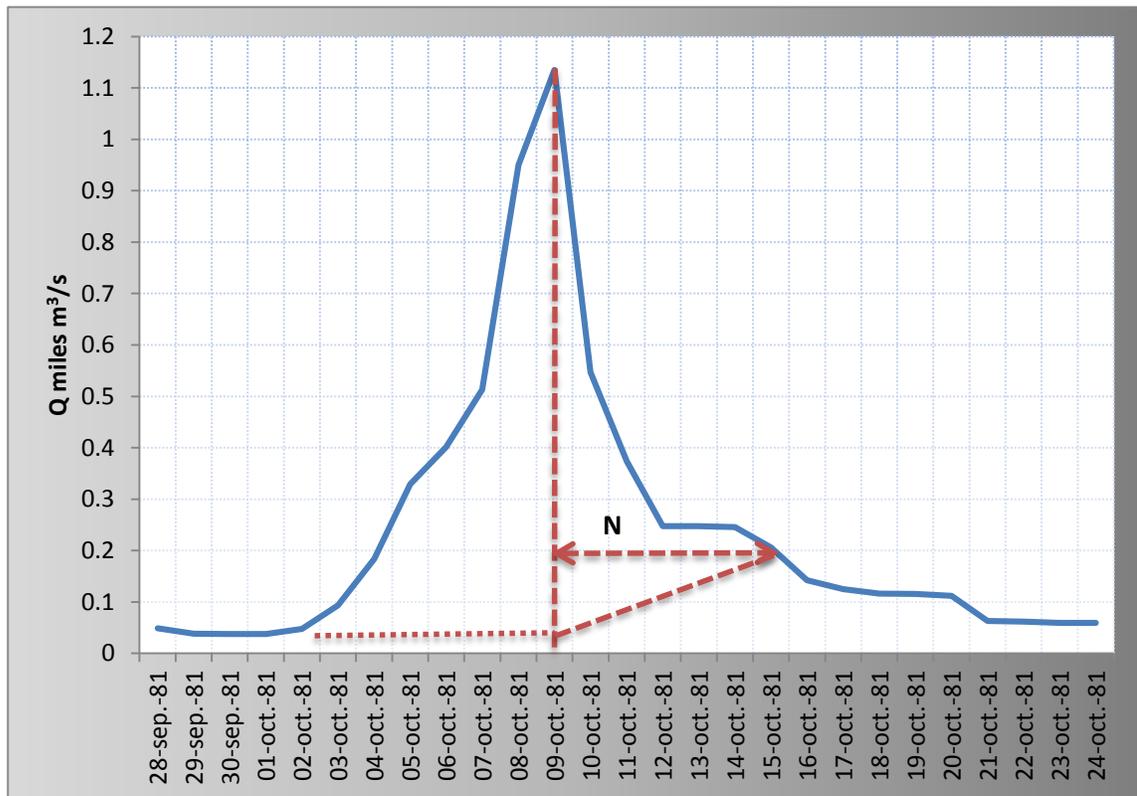


Figura 4.25 Separación del gasto base y el escurrimiento directo avenida de 1981 cuenca La Boquilla

En la Tabla 4.13 se muestra la máxima avenida para el año 1981 de la cuenca La Boquilla así como la obtención de las ordenadas del hidrograma unitario. En la columna (1) se encuentran los gastos diarios en miles de  $m^3/s$ . Para la separación del gasto base en la columna (2), a cada ordenada del hidrograma se le resta donde termina dicho gasto como puede observarse en la Figura 4.25, cuyo resultado se observa en la columna (3). La suma de la columna (3) corresponde al gasto medio diario en  $m^3/s$ , por lo que al multiplicarse por 86400 segundos, se obtiene el volumen del escurrimiento directo en  $m^3$ , que en este caso corresponde a 371199730  $m^3$ . Dicho volumen se dividió por el área total de la cuenca, esto es 21277704669.95  $m^2$ , dando como resultado la altura de precipitación de la lluvia efectiva ( $H_{pe}$ ) de 0.01745 m lo que equivale a 17.45 mm. En la columna (4) cada ordenada de la columna (3) se divide entre la altura de precipitación efectiva y se expresa en  $m^3/s$ . Dando como resultado las ordenadas del Hidrograma Unitario que puede observarse en la Figura 4.26. Se realizó el mismo procedimiento para los hidrogramas de los años 1974 y 1983.

Tabla 4.13 Obtención del Hidrograma Unitario tradicional para el año 1981 de la cuenca La Boquilla

	(1) Q en miles $m^3/s$	(2)	(3) Ordenada escurrimiento directo $m^3/s$	(4) Ordenada HU $m^3/s/mm$
<b>02-oct-81</b>	0.047	0.047-0.047	0	0.00
<b>03-oct-81</b>	0.094	0.094-0.047	46	2.65
<b>04-oct-81</b>	0.184	0.184-0.047	136	7.81
<b>05-oct-81</b>	0.329	0.329-0.047	282	16.15
<b>06-oct-81</b>	0.402	0.402-0.047	354	20.31
<b>07-oct-81</b>	0.513	0.513-0.047	466	26.69
<b>08-oct-81</b>	0.950	0.950-0.047	903	51.76
<b>09-oct-81</b>	1.135	1.135-0.047	1088	62.36
<b>10-oct-81</b>	0.547	0.547-0.08	467	26.76
<b>11-oct-81</b>	0.374	0.374-0.10	274	15.69
<b>12-oct-81</b>	0.247	0.247-0.13	117	6.73
<b>13-oct-81</b>	0.247	0.247-0.15	97	5.58
<b>14-oct-81</b>	0.246	0.246-0.18	66	3.77
<b>15-oct-81</b>	0.206	0.206-0.206	0	0.00
		Suma	4296	$m^3/s$

Volumen	371199730	m <sup>3</sup>
Área	21277704669.95	m <sup>2</sup>
Hpe	0.01745	m
Hpe	17.45	mm

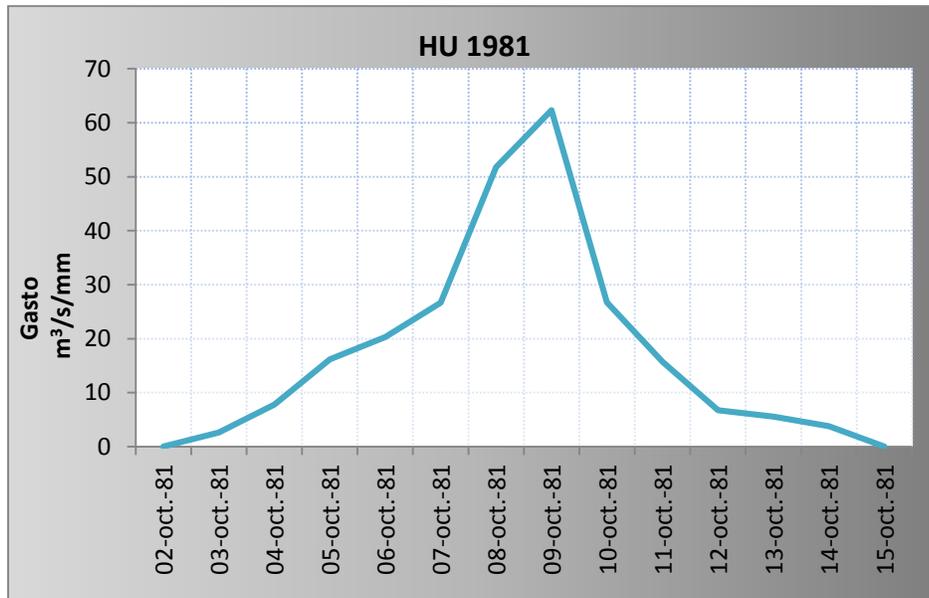


Figura 4.26 Hidrograma Unitario para el año 1981 de la cuenca La Boquilla

Una vez obtenidos los hidrogramas unitarios de los años 1974, 1981 y 1983, dado que son ligeramente diferentes, se determinó un hidrograma unitario promedio. Para ello, y con el objetivo de evitar que los picos se atenúen al obtener el hidrograma unitario medio, se hicieron coincidir en el día pico, como puede observarse en la Figura 4.27. Las ordenadas de los hidrogramas obtenidos se muestran en la

Tabla 4.14, donde la columna (1) corresponde al día, la columna (2) al año 1974 y su gasto para cada día, lo mismo para las columnas (3) y (4) correspondientes a los años 1981 y 1983 respectivamente. En la columna (5) se realizó un promedio de los gastos diarios. Para obtener el volumen del

escurrimiento directo  $v_{ed}$  se requieren las áreas de gastos multiplicadas por el intervalo de tiempo que se ejemplifican en la Figura 4.28.

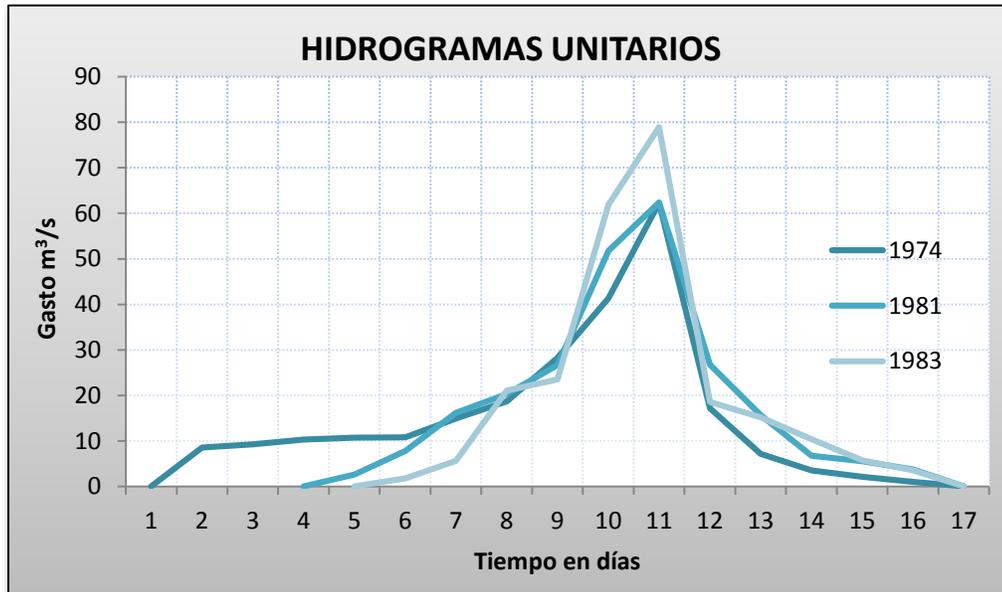


Figura 4.27 Hidrogramas Unitarios

Tabla 4.14 Ordenadas de los hidrogramas unitarios para los años 1974, 1981 y 1983

Gasto m <sup>3</sup> /s/mm					
(1) Día	(2) 1974	(3) 1981	(4) 1983	(5) PROMEDIO	(6) FACTOR DE AJUSTE
1	0.00			0.00	0.00
2	8.54			8.54	8.09
3	9.28			9.28	8.80
4	10.33	0.00		5.17	4.90
5	10.74	2.65	0.00	4.46	4.23
6	10.83	7.81	1.79	6.81	6.45
7	14.91	16.15	5.62	12.23	11.59
8	18.70	20.31	21.04	20.02	18.97
9	28.25	26.69	23.48	26.14	24.77
10	41.35	51.76	61.90	51.67	48.97
11	62.32	62.36	78.92	67.87	64.31
12	17.19	26.76	18.56	20.83	19.74
13	7.19	15.69	15.18	12.69	12.02
14	3.54	6.73	10.41	6.89	6.53
15	2.10	5.58	5.80	4.49	4.26
16	1.00	3.77	3.55	2.77	2.63
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>suma =</b>	<b>246.26</b>	<b>246.26</b>	<b>246.26</b>	<b>259.87</b>	
			<b>factor=</b>	<b>1.055</b>	

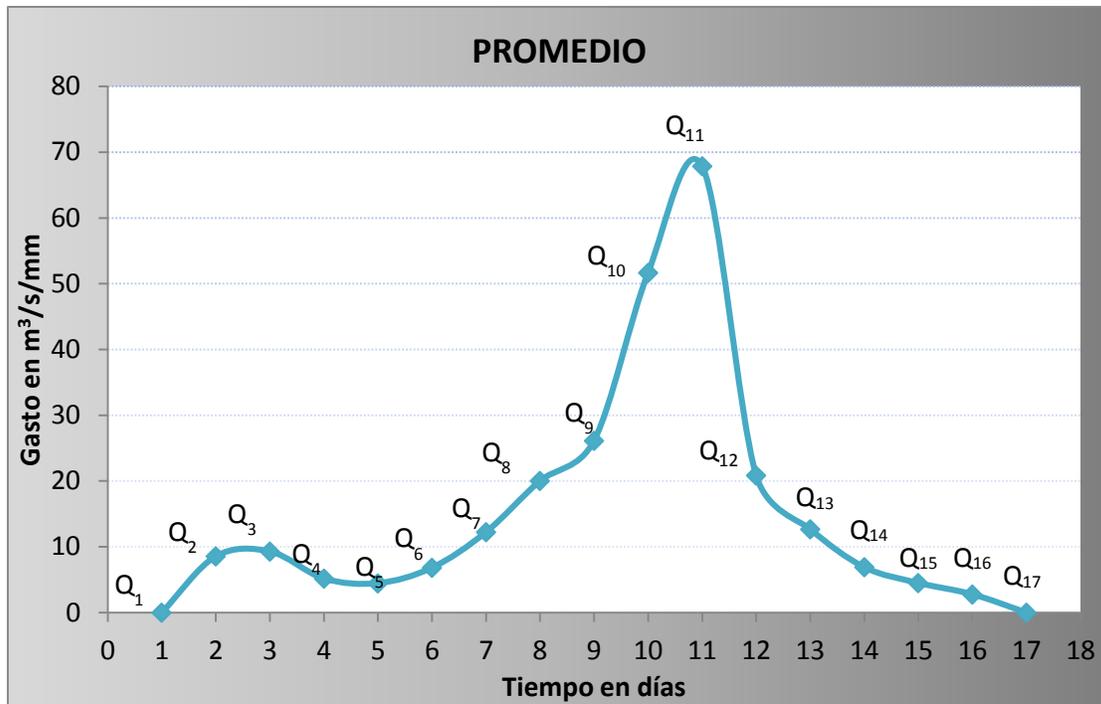


Figura 4.28 Obtención del hidrograma unitario La Boquilla

Empleando la  $v_{ed} \approx (Q_2 + Q_3 + Q_4 + \dots + Q_n)\Delta t$  Ecuación 4.1, se tiene que el  $v_{ed}$  para los años 1974, 1981 y 1983 es:  $v_{ed} = (246.26 \text{ m}^3/\text{s})86400 \text{ seg} = 21,276,000 \text{ m}^3$ . Y para el hidrograma promedio corresponde a  $v_{ed} = (259.87 \text{ m}^3/\text{s})86400 \text{ seg} = 22,452,768 \text{ m}^3$ . Por lo tanto para ajustar dichos gastos, se utiliza un factor de ajuste que resulta de dividir el  $v_{ed}$  del hidrograma promedio por el  $v_{ed}$  del hidrograma real. Dando como resultado 1.055. Por lo tanto en la columna (6) de la

Tabla 4.14, se tiene cada ordenada del hidrograma promedio, dividida por el factor de ajuste.

El resultado del hidrograma unitario para la cuenca La Boquilla, y que posteriormente se empleará para los periodos proyectados del modelo japonés, *control* (1979 – 2003), *futuro cercano* (2015-2039) y  *finales de siglo* (2075 a 2099), puede observarse en la Figura 4.29. El periodo *actual* es el que servirá de

control, debido a que contiene los datos que pueden compararse con los registrados.

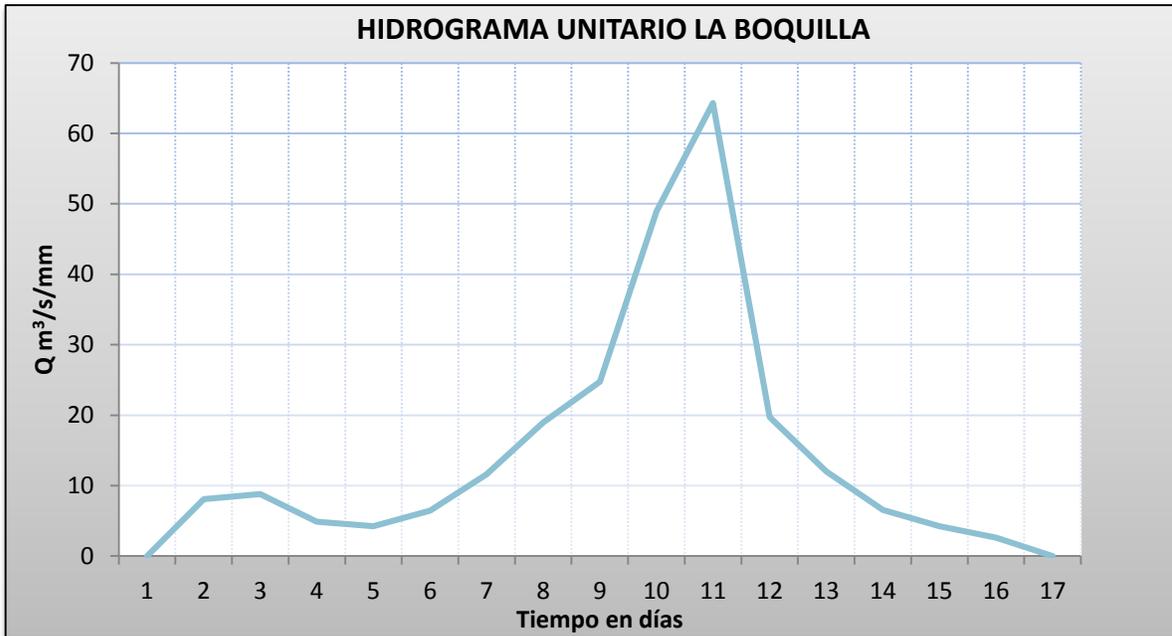


Figura 4.29 Hidrograma Unitario La Boquilla

De los años registrados de entradas (1935-1999) se obtuvieron los hidrogramas anuales, identificando las avenidas máximas para cada año de donde se obtuvieron los gastos pico de escurrimiento directo mostrados en la Tabla 4.15. Para dichas avenidas se obtuvieron las alturas de las láminas de lluvia en exceso. Para posteriormente relacionarlos con los índices de infiltración y los IPA.

Tabla 4.15 Gastos pico anuales registrados

AÑO	Gasto pico escurrimiento directo m³/s	AÑO	Gasto pico escurrimiento directo m³/s
1979	313.18	1990	1974.95
1980	771.67	1991	1890.55
1981	1087.94	1992	294.97
1982	74.30	1993	2202.87
1983	886.86	1994	114.23
1984	1495.30	1995	219.11
1985	734.40	1996	2888.43
1986	472.67	1997	395.89

1987	266.64	1998	177.67
1988	862.37	1999	624.887
1989	1590.98		

Para la cuenca en estudio se tiene el registro de precipitaciones diarias en las estaciones climatológicas para el periodo de 1959 a 1999. Dicha información se obtuvo del Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC III v2.0 (IMTA, 2006), el cual contiene información del banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Con las precipitaciones diarias registradas en las estaciones climatológicas de los años 1959 a 1999, se han obtenido mediante polígonos de Thiessen, las precipitaciones medias diarias para la cuenca La Boquilla, como se muestra por ejemplo en la Figura 4.30, para el año 1977.

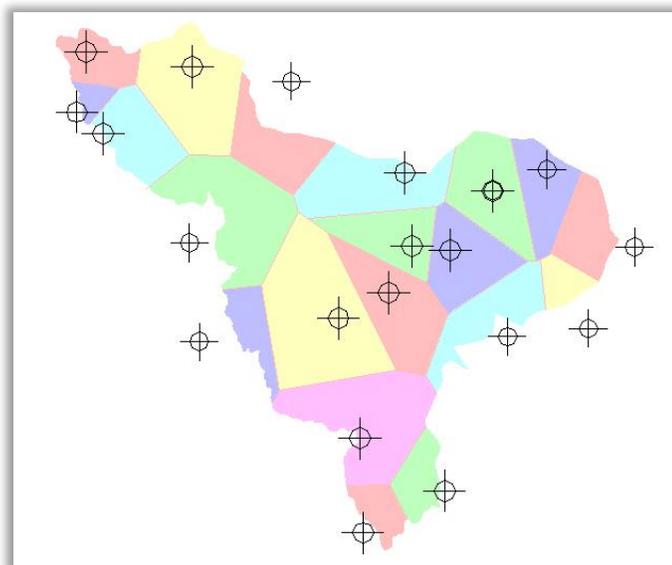


Figura 4.30 Polígonos de Thiessen para la cuenca La Boquilla correspondiente al año 1977.

Con las precipitaciones medias diarias y las alturas de lámina de lluvia excedente, se obtuvo el índice de infiltración media (Aparicio, 2009). Por ejemplo,

para el año 1981, mediante el hidrograma de la avenida máxima anual se obtuvo una lámina de lluvia en exceso de 17.44 mm, del 2 al 15 de octubre. La precipitación y el hidrograma correspondiente se muestran en la Figura 4.31.

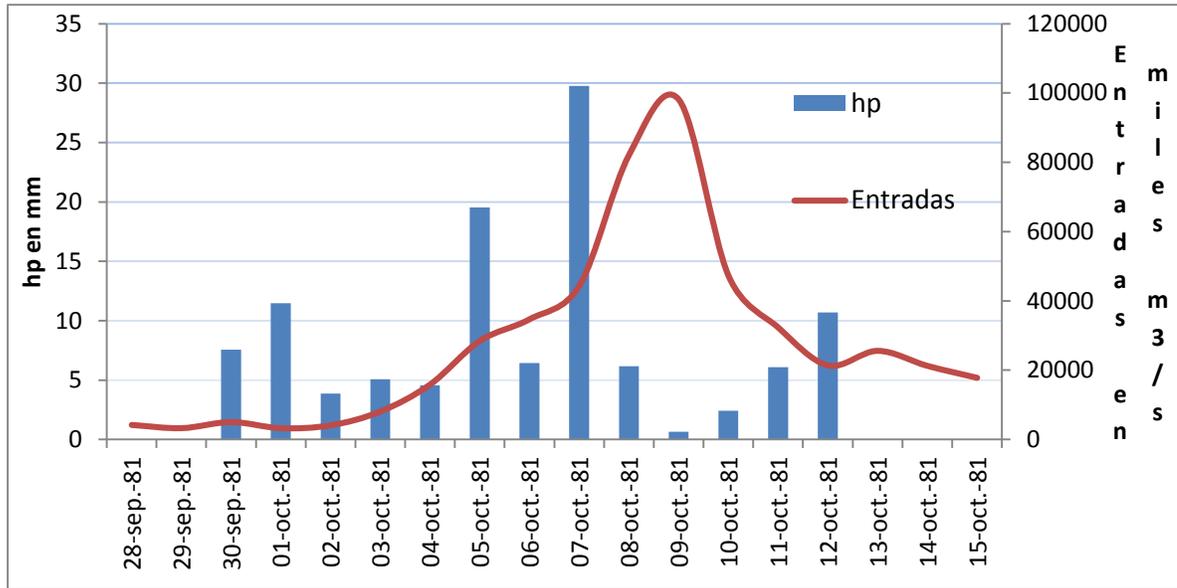


Figura 4.31 Hidrograma y precipitaciones para la avenida máxima de 1981 para la cuenca La Boquilla

Mediante el criterio de la capacidad de infiltración media (Aparicio, 2009), se obtuvo el índice de infiltración media  $\phi$ , que corresponde a 15.94 mm/día.

Por otro lado, con las precipitaciones medias diarias, mediante el criterio del Índice de Precipitación Antecedente (Aparicio, 2009), se obtuvieron los *IPA* desde el primer año de precipitaciones registradas (1959) hasta el año de 1999. Mediante este procedimiento se da seguimiento a la humedad del suelo.

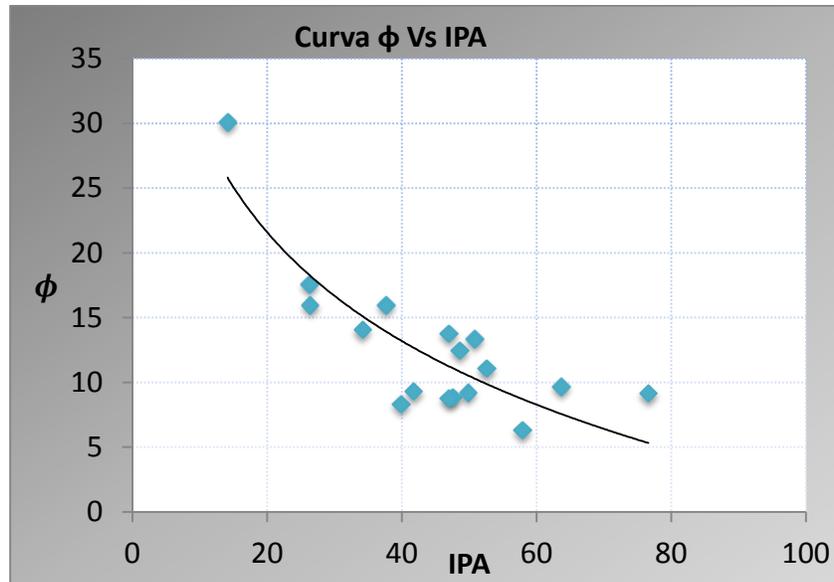
Así, para el año 1981, se tienen los *IPA* para los días donde se presentó la tormenta, y se ha seleccionado el *IPA* en este caso de 26.40mm. Lo mismo se hizo para las demás tormentas máximas de todos los años. Seleccionando algunas tormentas, con base en la facilidad de identificación de la lluvia que las produjo, se obtuvieron los valores de *IPA* e índice de infiltración media que se presentan en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Resultados IPA e Índice de Infiltración media

	<b>Día</b>	<b>IPA (mm)</b>	<b><math>\phi</math> (mm/día)</b>	<b>de</b>
1	20-sep-95	14.14	30.08	1 día
2	18-ago-83	26.32	17.60	2 días
3	09-oct-81	26.40	15.94	2 días
4	14-sep-93	37.72	15.94	1 día
5	18-jul-69	34.19	14.07	1 día
6	10-jul-88	46.99	13.79	5 días
7	24-sep-74	50.86	13.33	2 días
8	02-sep-65	48.61	12.47	4 días
9	04-sep-63	52.59	11.07	7 días
10	03-ago-73	63.66	9.67	6 días
11	28-sep-70	41.79	9.30	4 días
12	20-ago-71	49.88	9.22	3 días
13	26-ago-66	76.60	9.17	11 días
14	26-jul-62	47.60	8.87	6 días
15	16-ago-79	47.02	8.76	3 días
16	13-sep-68	39.91	8.33	7 días
20	31-ago-96	57.89	6.31	7 días

Dichos valores se graficaron, ajustando una curva logarítmica, que puede apreciarse en la Figura 4.32. La función  $IPA(\phi)$  resultante es la correspondiente a la  $\phi = -12.13 \ln(IPA) + 57.929$  Ecuación 4.6, misma que posteriormente se utilizó para los valores proyectados por el modelo japonés.

$$\phi = -12.13 \ln(IPA) + 57.929 \text{ Ecuación 4.6}$$

Figura 4.32 Curva IPA Vs  $\phi$ 

Para los tres periodos del modelo japonés, mediante polígonos de Thiessen, se han generado precipitaciones medias diarias para la cuenca en estudio. Una vez calculadas las precipitaciones medias diarias, se obtuvieron los *IPA* para cada día.

Con la función de la curva  $\phi$  Vs *IPA* ( $\phi = -12.13 \ln(IPA) + 57.929$  Ecuación 4.6), se han obtenido los índices de infiltración media  $\phi$  para el primer periodo del modelo japonés (*actual* 1979-2003). Estos índices se restan a la precipitación diaria, obteniendo así la precipitación efectiva. Debido a que los hidrogramas de los años 1974, 1981 y 1983 que se tomaron para la creación del hidrograma unitario corresponden a lluvias con duración efectiva de 2 días, se ha considerado la misma duración para obtener la lluvia efectiva del modelo japonés. Por lo tanto se han sumado cada dos días las lluvias efectivas, y se ha seleccionado la mayor de ellas para cada año. Como ejemplo, puede observarse la Tabla 4.17 que representa en la columna (1) las precipitaciones medias diarias (*hpm*) para el año de 1979 del modelo japonés; en la columna (2) se obtuvieron los *IPA* para cada día del año; en la columna (3) mediante la  $\phi = -12.13 \ln(IPA) + 57.929$  Ecuación 4.6, se obtuvieron los  $\phi$ ; en la columna (4), se

restó a la altura de precipitación (1), el índice de infiltración media correspondiente a la columna (3); en la columna (5) se presenta la lluvia efectiva  $hp_e$ ; finalmente en la columna (6) se tiene la lluvia efectiva acumulada de dos días.

Tabla 4.17 Obtención de lluvia efectiva máxima para el año 1979 correspondiente al modelo japonés.

	(1) $hpm$	(2) IPA	(3) $\phi$	(4) $hpm - \phi$	(5) $hp_e$	(6) $hp_e$ c/2 días
<b>23-ago-79</b>	20.37	59.55	8.36	12.02	12.02	
<b>24-ago-79</b>	13.50	71.00	6.22	7.28	7.28	19.30
<b>25-ago-79</b>	11.70	73.85	5.75	5.96	5.96	13.24
<b>26-ago-79</b>	10.90	74.48	5.64	5.26	5.26	11.22
<b>27-ago-79</b>	9.86	74.21	5.69	4.18	4.18	9.44
<b>28-ago-79</b>	13.72	72.94	5.90	7.82	7.82	12.00
<b>29-ago-79</b>	18.94	75.72	5.44	13.50	13.50	<b>21.32</b>
<b>30-ago-79</b>	4.28	83.30	4.28	0.00	0.00	13.50
<b>31-ago-79</b>	0.54	75.09	5.54	-4.99	0.00	0.00

Para el ejemplo mostrado, del año 1979 en la Tabla 4.17, la lluvia efectiva máxima corresponde el valor de 21.32 mm. Dicho valor de la lámina de precipitación efectiva, fue aplicado al hidrograma unitario de La Boquilla obtenido anteriormente y que se muestra en la Figura 4.29, obteniendo los gastos máximos anuales para el periodo 1979 a 2003.

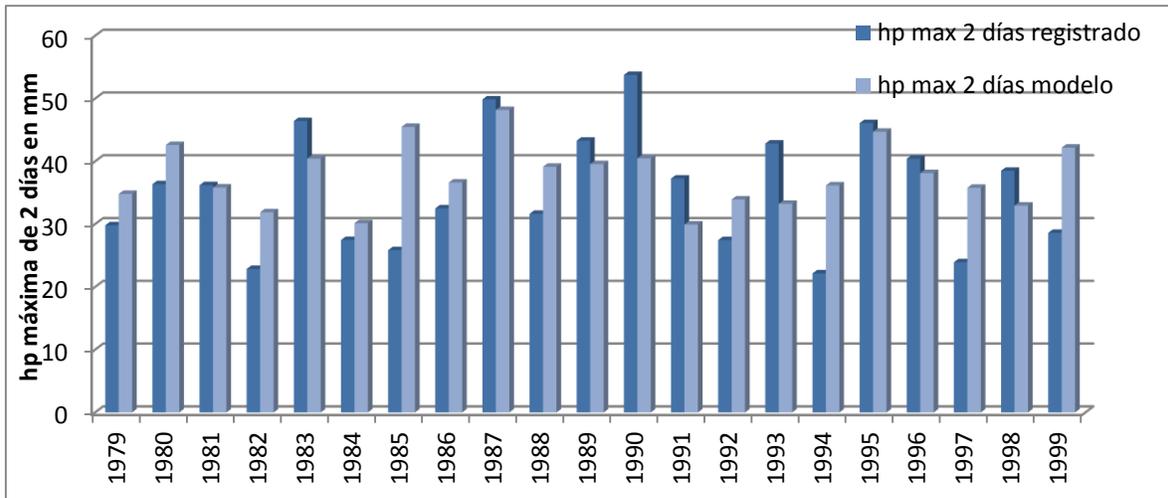


Figura 4.33 Precipitaciones máximas anuales cada 2 días del modelo japonés y registrados.

En la Figura 4.34, se pueden observar los gastos para diferentes periodos de retorno, obtenidos con los gastos registrados y los gastos del modelo japonés para los años 1979 a 1999 que será el periodo de comparación. Éste es el único periodo común entre los resultados del modelo japonés y los registros, por lo que sólo se puede hacer la comparación en dicho periodo, que será usado como periodo de control. Como es de esperarse en cualquier ejercicio de pronóstico de largo plazo se observa una diferencia en los gastos. Aun cuando la diferencia puede considerarse relativamente alta, en este trabajo se decidió mantener el uso de este modelo a falta de uno mejor. Por lo tanto es necesario ajustar estadísticamente el modelo para que responda en forma más cercana a los datos medidos. De otra manera, se obtendría una tendencia diferente de las mediciones en los siguientes periodos de análisis. Para tal efecto, las propiedades estadísticas del modelo japonés se ajustaron mediante una función de corrección de la siguiente manera:

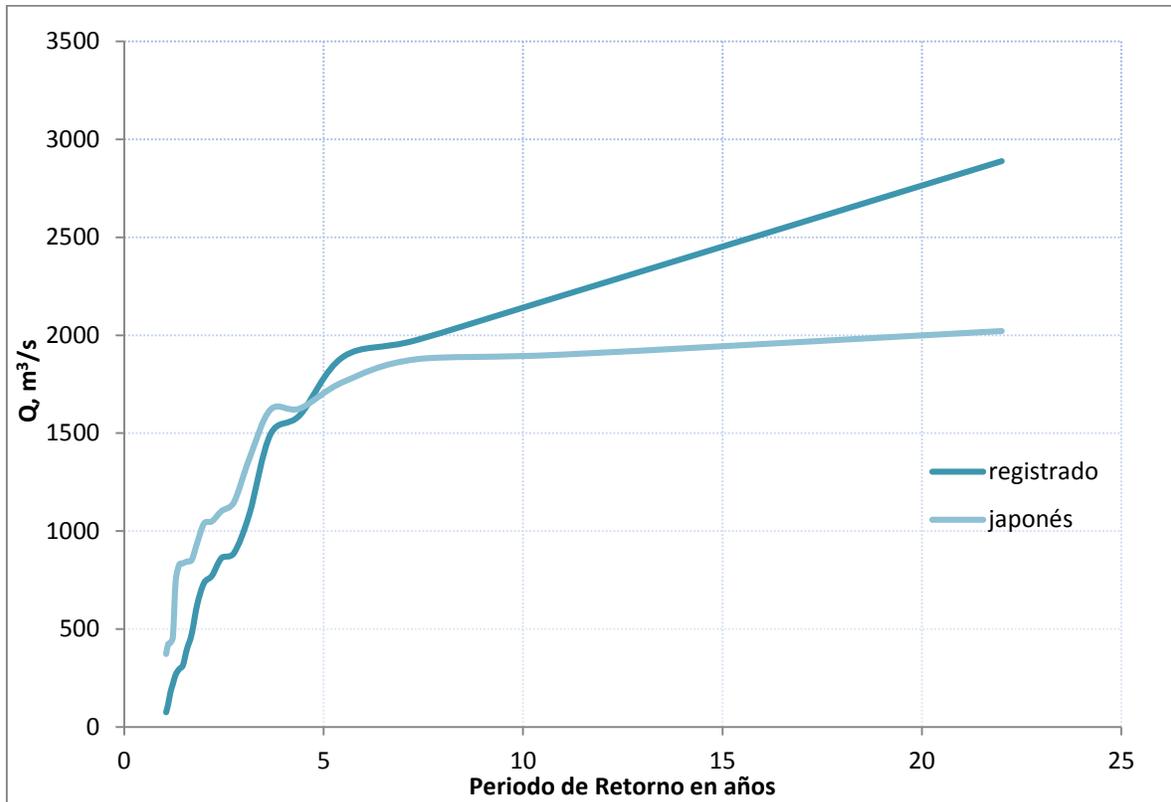


Figura 4.34 Gastos para diferentes periodos de retorno del periodo registrado y japonés (1979-1999)

Se estableció una función lineal para el periodo registrado como puede verse en la Figura 4.35 de la forma:

$$y = 143.07x + 374.61 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde:

$y$  = gasto en  $m^3/s$

$x$  = periodo de retorno en años

Del mismo modo, la función lineal para los datos obtenidos del modelo japonés que puede observarse en la Figura 4.36, es:

$$y = 80.099x + 801.09 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

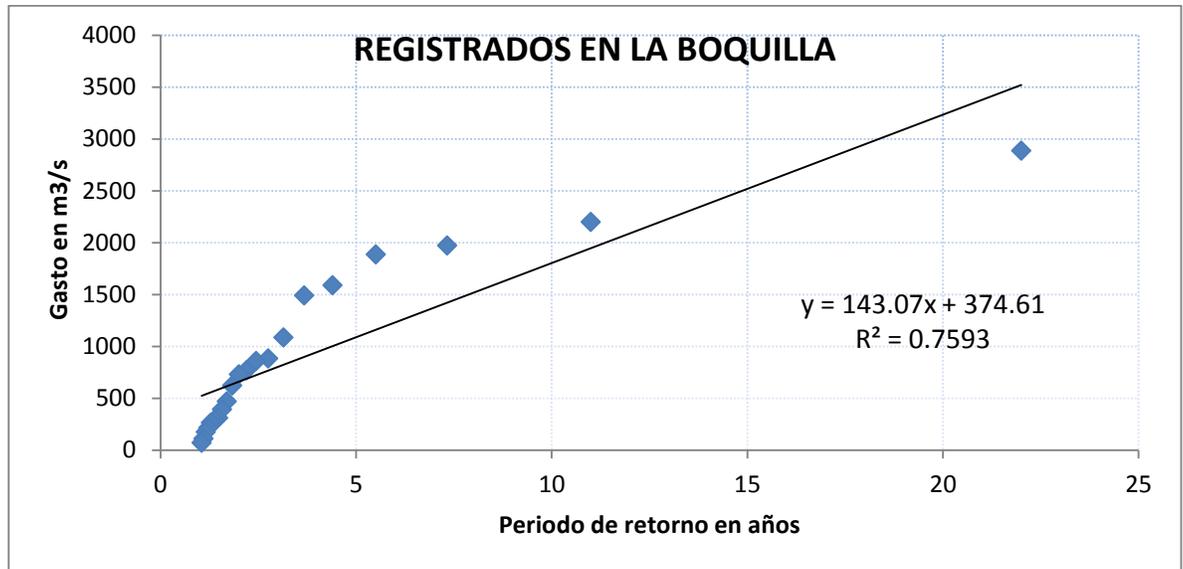


Figura 4.35 Gastos para diferentes periodos de retorno a partir de datos registrados de la cuenca La Boquilla

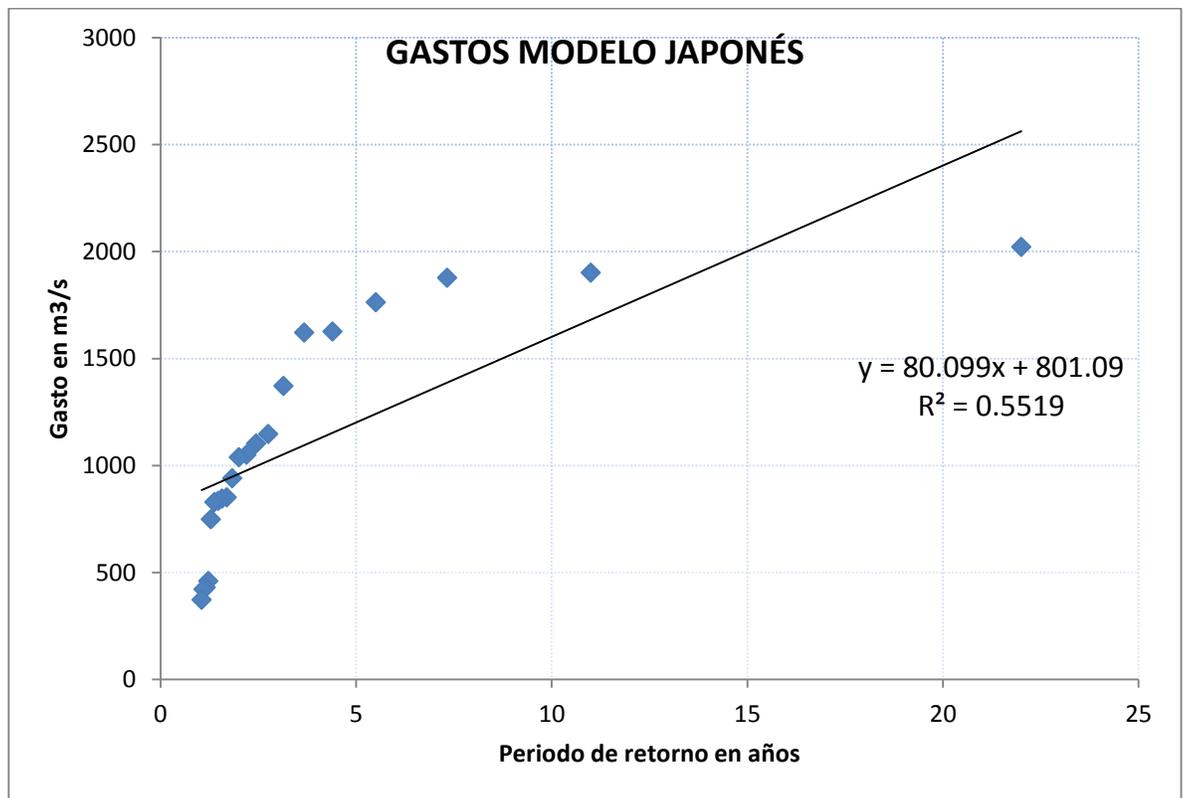


Figura 4.36 Gastos para diferentes periodos de retorno a partir de datos del modelo japonés de la cuenca La Boquilla

Debido a la diferencia entre ambas ecuaciones, para uniformar ambos sistemas, se utilizó el siguiente factor de ajuste:

$$y_{1j} = y_{2j} \frac{b_2 + m_2 x_j}{b_3 + m_3 x_j} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde:

$y_{1j}$  = gasto modelo japonés corregido para un periodo de retorno  $j$

$y_{2j}$  = gasto modelo japonés para un periodo de retorno  $j$

$b_2$  = ordenada al origen de la ecuación 4.7

$b_3$  = ordenada al origen de la ecuación 4.8

$m_2$  = pendiente de la recta de la ecuación 4.7

$m_3$  = pendiente de la recta de la ecuación 4.8

$x_j$  = periodo de retorno  $j$ , en años

Sustituyendo los valores en la  $y_{1j} = y_{2j} \frac{b_2 + m_2 x_j}{b_3 + m_3 x_j}$  Ecuación 4.9, resulta:

$$y_{1j} = y_{2j} \frac{374.61 + 143.07 x_j}{801.09 + 80.099 x_j} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Cada valor del periodo japonés, se multiplicó por el factor obtenido, para un periodo de retorno  $j$ . En la Figura 4.37 se muestran los resultados del modelo japonés corregido y se puede observar la comparación entre los obtenidos por el modelo japonés sin corregir y los registrados. Como se puede observar, a pesar de la simplicidad del procedimiento lineal de corrección, ésta resulta satisfactoria para fines prácticos.

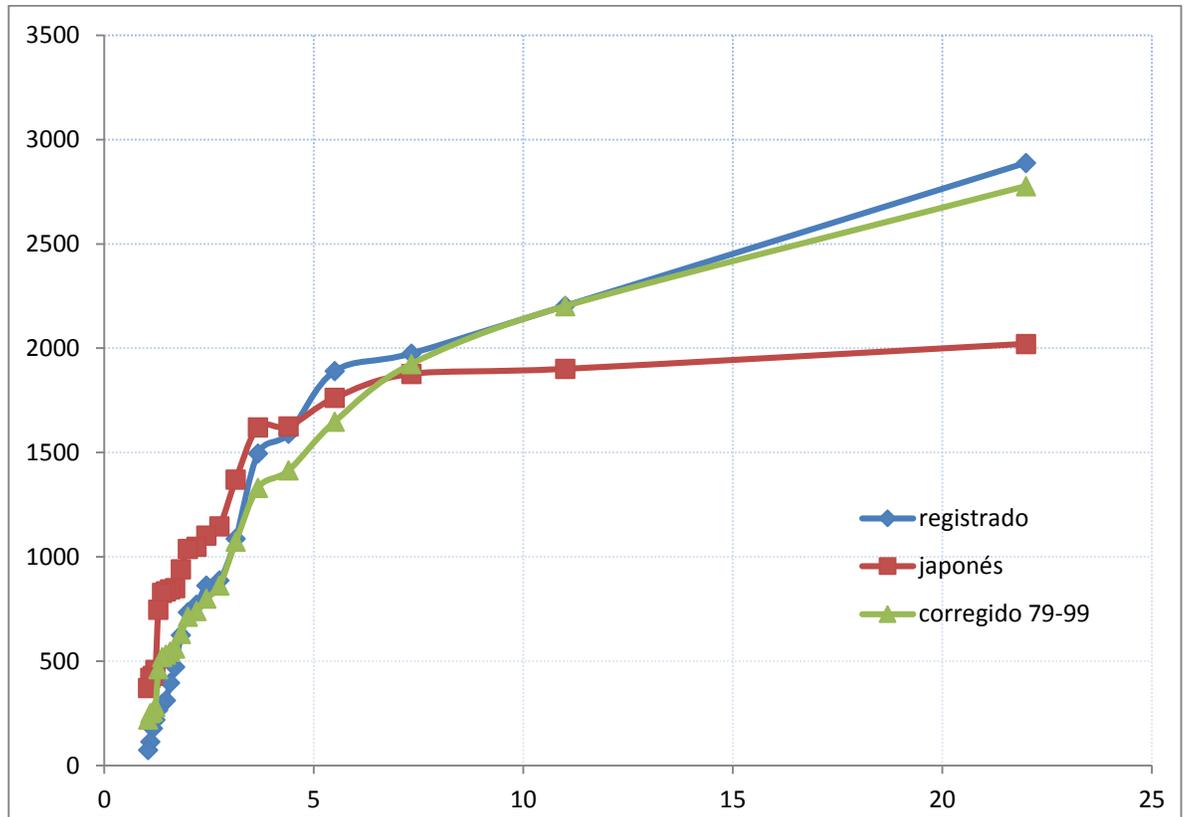


Figura 4.37 Gastos para el modelo japonés corregido 1979-1999

Utilizando el factor de ajuste de la  $y_{1j} = y_{2j} \frac{374.61+143.07x_j}{801.09+80.099x_j}$  Ecuación 4.10 se obtuvieron los nuevos valores para los tres periodos del modelo japonés, que se muestran en la Figura 4.38.

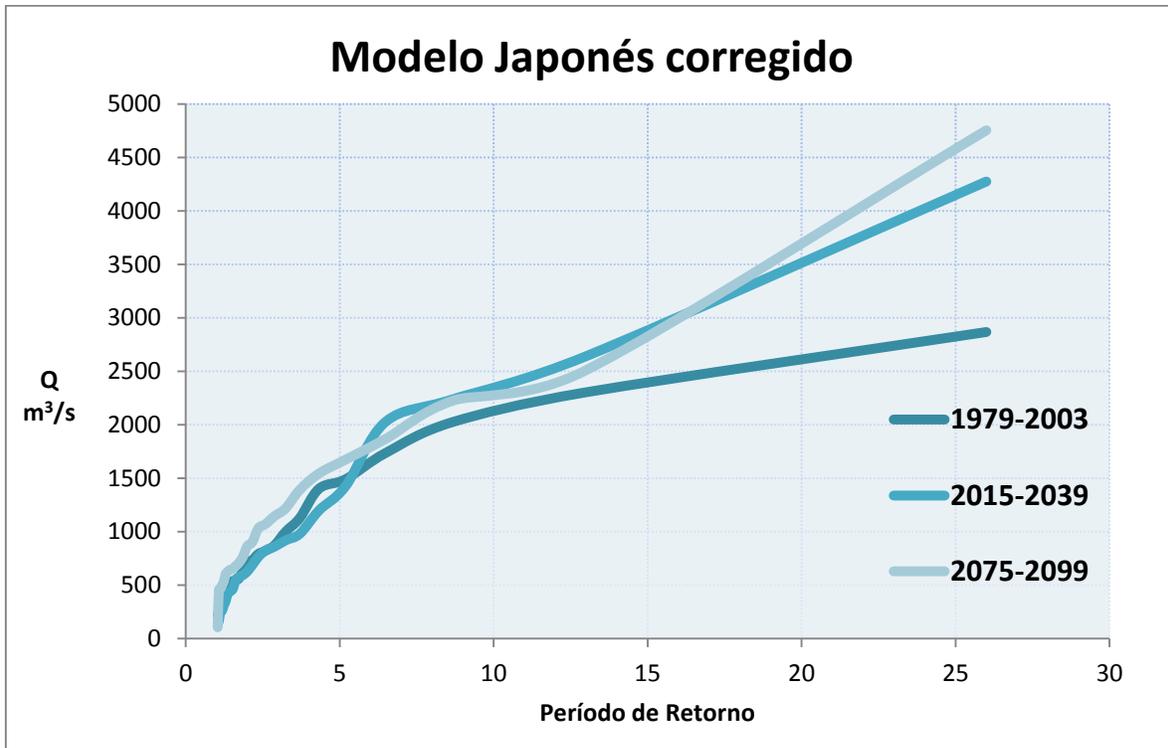


Figura 4.38 Gatos para diferentes periodos de retorno, del modelo japonés corregido

Con los nuevos gastos obtenidos para los tres periodos del modelo japonés, se ajustó una función de distribución de probabilidad FDP para cada uno de ellos, utilizando el software Análisis de Frecuencia (AFA) versión 1.1 (IMTA, 2010).

En la Figura 4.39 se muestran los gastos para diferentes periodos de retorno, obtenidos del periodo actual 1979-2003 mediante diferentes funciones de probabilidad.

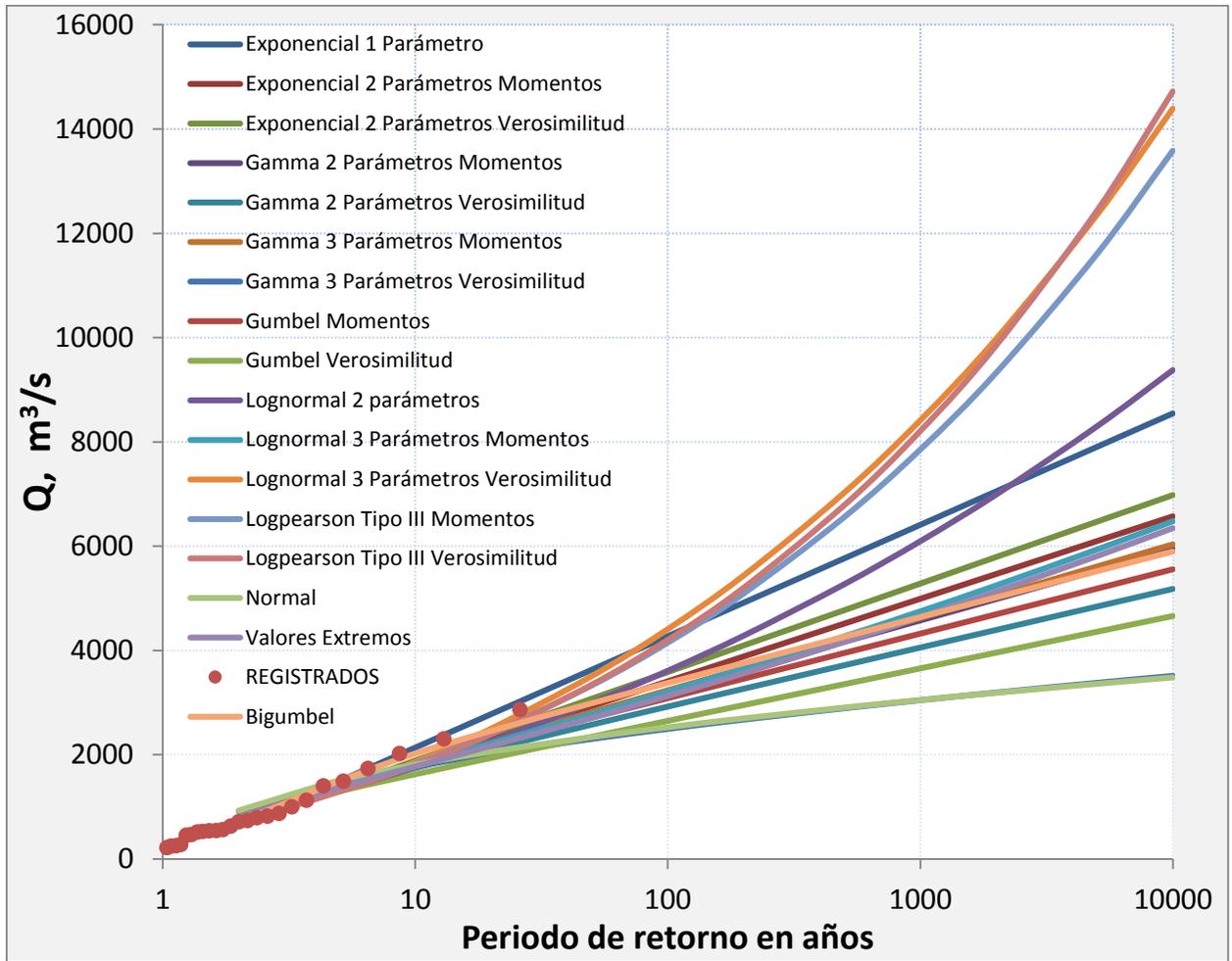


Figura 4.39 Gastos para el modelo japonés del periodo 1979-2003

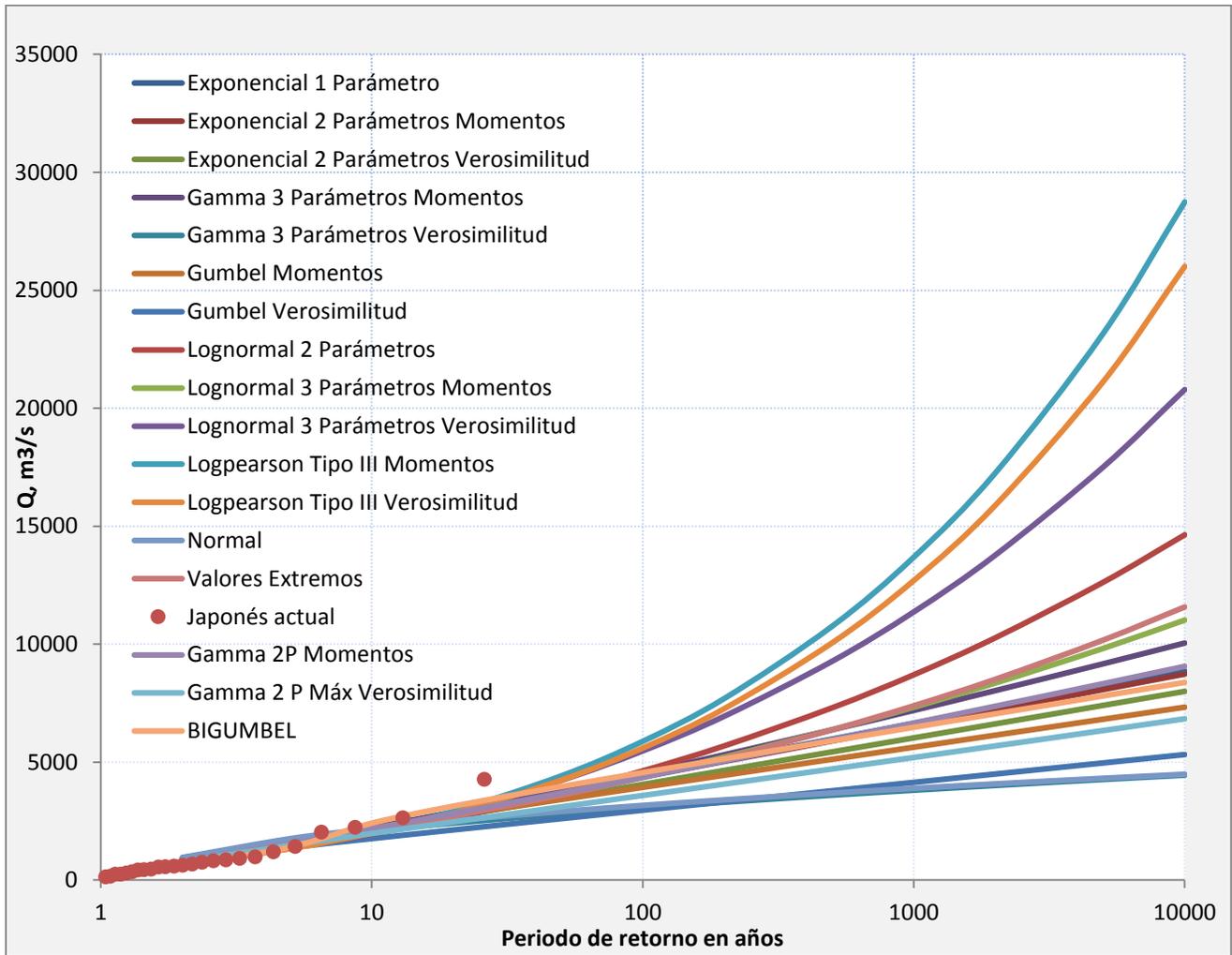


Figura 4.40 Gastos para el modelo japonés del periodo 2015-2039

De igual forma en la Figura 4.40 y en la Figura 4.41 se muestran los gastos para diferentes periodos de retorno, obtenidos de los periodos *futuro cercano* y *finales de siglo* de 2015-2039 y 2075-2099 respectivamente, mediante diferentes funciones de probabilidad.

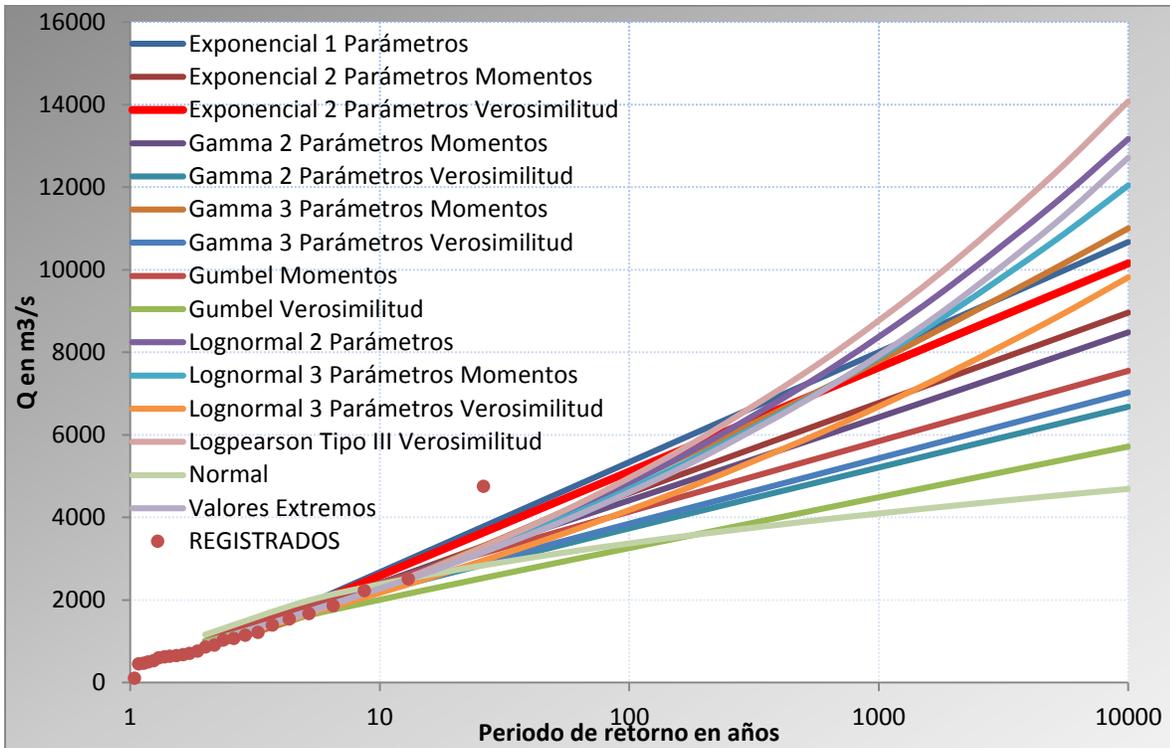


Figura 4.41 Gastos para el modelo japonés del periodo japonés 2075-2099

En la Tabla 4.18 se muestran los errores de ajuste para las funciones de distribución utilizadas para el periodo actual 1979-2003.

Tabla 4.18 Errores de ajuste para el modelo Japonés 1979-2003

Exponencial 1 parámetro Momentos y Máx verosimilitud	131.7
Exponencial 2 parámetros momentos	143
Exponencial 2 parámetros máx verosimilitud	114.7
Gamma 2 parámetros momentos	155.89
Gamma 2 parámetros máx verosimilitud	200.9
Gamma 3 parámetros momentos	157.36
Gamma 3 parámetros max verosimilitud	279.5
Gumbel momentos	185.197
Gumbel max verosimilitud	257.1
Lognormal 2 parámetros momentos y máx verosimilitud	162
Lognormal 3 parámetros momentos	174.22
Lognormal 3 parámetros máx verosimilitud	115.9
Logpearson III momentos	130.97
Logpearson III max verosimilitud	138.7
Normal	281.8
Valores Extremos	193.2
Bigumbel	83.8

En la Tabla 4.19 se muestran los errores de ajuste de las funciones de distribución para el periodo futuro cercano 2015-2039.

Tabla 4.19 Errores de ajuste para el modelo Japonés 2015-2039

Exponencial 1 parámetro Momentos y Máx verosimilitud	270.8
Exponencial 2 parámetros momentos	282.2
Exponencial 2 parámetros máx verosimilitud	323.4
Gamma 2 parámetros momentos	289.9
Gamma 2 parámetros máx verosimilitud	388.1
Gamma 3 parámetros momentos	282.88
Gamma 3 parámetros max verosimilitud	500.7
Gumbel momentos	371.87
Gumbel max verosimilitud	489.3
Lognormal 2 parámetros momentos y máx verosimilitud	329.6
Lognormal 3 parámetros momentos	317.67
Lognormal 3 parámetros máx verosimilitud	265.2
Normal	511.2
Valores Extremos	336.2
LogPearsonIII momentos	252.05
LogPearson III máx verosimilitud	278.4
DobleGumbel	210.5

En la Tabla 4.20 se muestran los errores de ajuste para las funciones de distribución para el periodo finales de siglo 2075-2099

Tabla 4.20 Errores de ajuste Japonés 2075-2099

Exponencial 1 parámetro Momentos y Máx verosimilitud	298.8
Exponencial 2 parámetros momentos	318.05
Exponencial 2 parámetros máx verosimilitud	298.6
Gamma 2 parámetros momentos	342.87
Gamma 2 parámetros máx verosimilitud	412.5
Gamma 3 parámetros momentos	321.81
Gamma 3 parámetros máx verosimilitud	408.1
Gumbel momentos	391.48
Gumbel max verosimilitud	485.3
Lognormal 2 parámetros momentos y máx verosimilitud	324.6
Lognormal 3 parámetros momentos	340.94
Lognormal 3 parámetros máx verosimilitud	394.3

Normal	519.8
Valores Extremos	355.9
LogPearson III máx verosimilitud	321.9
BiGumbel	323

Seleccionando la función de distribución de probabilidad con el menor error de ajuste, para el periodo 1979-2003 y 2015-2039 corresponde a la FDP BiGumbel; para el periodo 2075-2099 la FDP con menor error de ajuste corresponde a Exponencial 2P máxima verosimilitud. En la Tabla 4.21 se muestran los gastos obtenidos con la FDP de mejor ajuste para diferentes periodos de retorno.

Tabla 4.21 Gastos para diferentes periodos de retorno para los tres periodos del modelo japonés utilizando la fdp de menor error de ajuste

<b>Gastos del modelo japonés corregido en m<sup>3</sup>/s</b>			
<b>FDP:</b>	BiGumbel	BiGumbel	LogPearson III
<b>T</b>	<b>1979-2003</b>	<b>2015-2039</b>	<b>Momentos</b>
	<b>2075-2099</b>		
<b>20</b>	2457.031	3126.941	3345.307
<b>100</b>	3375.574	4550.196	5109.96
<b>1,000</b>	4640.408	6470.346	7634.608
<b>10,000</b>	5897.474	8373.159	10159.26

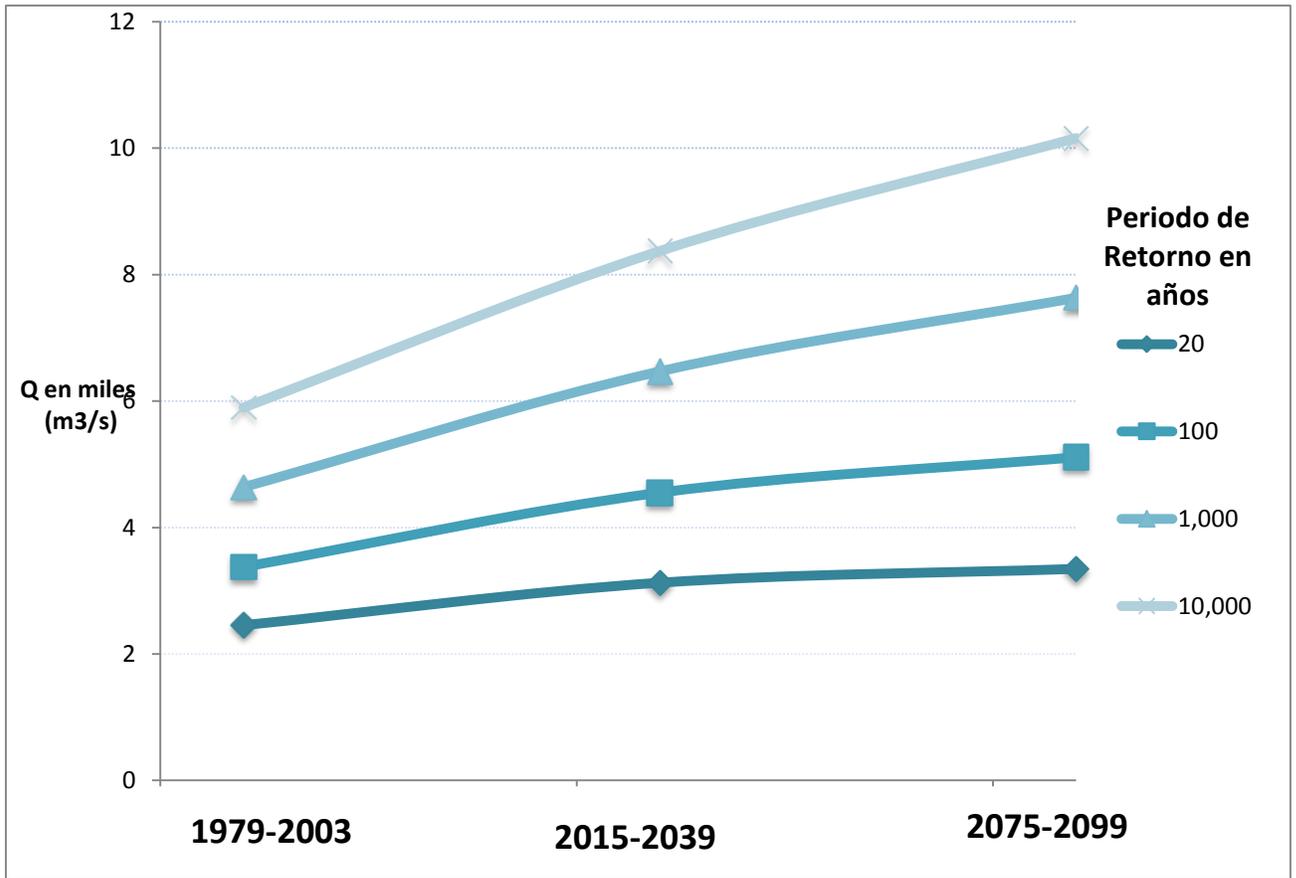


Figura 4.43 Gastos de diseño para diferentes periodos de retorno para la cuenca de la presa La Boquilla considerando cambio climático

La capacidad de almacenamiento al NAMO de la presa La Boquilla es de 2894 hm<sup>3</sup>, y su altura de 80 m, por lo que de acuerdo con la clasificación de presas mostrada en la Tabla 4.12, se considera una presa mayor, por lo que los periodos de diseño recomendables son mayores o iguales a 10,000 años. En este caso, si el periodo de retorno se considera con condiciones sin cambio climático, el gasto de diseño correspondería a 5,897.47 m<sup>3</sup>/s, mientras que considerando cambios en las variables climatológicas, correspondería a un gasto de diseño de 10,159.26m<sup>3</sup>/s, es decir 72% más.

Para periodos de retorno de 20, 100, y 1,000 años los gastos estimados mediante el modelo japonés para *futuro cercano* son mayores que los

considerados sin algún cambio climático, sin embargo los de futuro lejano presentan un aumento más crítico que sin la presencia de cambio climático. Para los gastos obtenidos con cambio climático para periodos de retorno pequeños como 20 años, aparece un incremento hasta de un 36% que en condiciones sin cambio climático. Para periodos de retorno de 100 años se incrementa hasta en un 51%. Para gastos obtenidos con cambio climático para obras grandes que se calculan con periodos de retorno de 1,000 años como presas, el incremento es de hasta 64% que en condiciones sin cambio climático.

## **5 Conclusiones**

Las diferentes evidencias de la existencia del cambio climático, tales como los aumentos de temperatura registrados tanto en la atmósfera como en el océano, concuerdan con los aumentos del nivel del mar y la disminución de cubierta de nieve en el Hemisferio Norte, lo que indica que el planeta al calentarse sufre modificaciones en los diferentes componentes del sistema climático, siendo las emisiones de gases efecto invernadero los principales causantes del cambio climático.

Las obras hidráulicas están diseñadas bajo la premisa que las variables climatológicas e hidrológicas son estacionarias, es decir que sus propiedades estadísticas son constantes en el tiempo; sin embargo, por las evidencias registradas por el IPCC, esta premisa deberá ser reconsiderada para el desarrollo y planeación de futuras obras.

La importancia de considerar para el diseño, construcción y operación de futuras obras un modelo de cambio climático se debe al riesgo que puede llegar a presentarse si no se considerara al ciclo hidrológico como cambiante.

Los impactos que produce el cambio climático en el planeta, tanto en el clima como en el proceso del ciclo hidrológico, han sido estudiados por el IPCC y modelados, de acuerdo con los diferentes escenarios, mismos que están basados en las diferentes fuerzas determinantes de emisiones de gases efecto invernadero que pueden llegar a presentarse en el futuro.

Las diferentes modelaciones colocan a México en condiciones de aumento de temperatura y de disminución de precipitación, en gran parte de su territorio. Sin embargo, debido a fenómenos extremos, la intensidad, y duración de la precipitación, lo coloca en una zona vulnerable ante el cambio climático.

De acuerdo con la metodología de relación lluvia-escorrentía para las cuencas en estudio aplicadas en este trabajo al modelo japonés de alta resolución, la presa de la cuenca de La Boquilla al norte del país en el estado de Chihuahua, así como la presa El Caracol, que se encuentra aguas abajo de la cuenca Alto

Balsas en el centro del país presentan un aumento de gastos medios diarios, para diferentes periodos de retorno para el escenario A1B. Este aumento significaría que ambas presas deberán ser consideradas vulnerables al cambio climático, debiendo tomar medidas de seguridad necesaria.

Para estas cuencas en particular, los gastos de diseño aumentaron; sin embargo esto no significa necesariamente que ocurra lo mismo para toda la República, por lo que, si se considera para el diseño de obras el cambio climático, puede llegar a presentarse que los gastos de diseño como en estos casos sean mayores o menores, en el primero de los casos representando un peligro en la seguridad hidrológica de las estructuras, mientras que en el segundo caso traería consigo un ahorro económico en la construcción de las mismas. Por lo que es necesario realizar un análisis para todas las obras hidráulicas de gran importancia para el país.

El modelo utilizado en este trabajo, como se mencionó anteriormente es el de mejor resolución lo que caracteriza con mayor precisión los fenómenos tropicales que México está expuesto en gran manera. Debido a que los registros del modelo japonés se encuentran en periodos de 25 años, y el periodo 1979-2003 es el único común, es éste el único que puede utilizarse como periodo de control. En la práctica se suele utilizar un número de años de registro de este orden para diseñar las obras para periodos de retorno mucho mayores. Visiblemente, se tiene una mayor incertidumbre conforme mayor sea la diferencia entre el número de años de registro y el periodo de retorno de diseño. Para compensar este problema es común agregar factores de seguridad. En este trabajo no se consideró necesario hacer esto debido a que se están haciendo comparaciones entre valores con el mismo nivel de incertidumbre. Es por esto que la metodología utilizada en este trabajo puede servir como base para el diseño de obras futuras considerando el cambio climático, sus resultados pueden mejorarse con mejores modelos climáticos que seguramente surgirán en el futuro y con mejores registros.

## 6 Referencias

- Actualización de las envolventes regionales de gastos máximos para la República Mexicana.*  
**Orozco, Aldo I. Ramírez y Martínez, Juan F. Gómez. 2005.** 1, México : Ingeniería Hidráulica en México, 2005, Vol. XX.
- Aldama, Alvaro A., y otros. 2006.** *Seguridad Hidrológica de las Presas en México.* México : IMTA, 2006.
- Aparicio, Javier. 2009.** *Fundamentos de Hidrología de Superficie.* México : Limusa, 2009.
- BALSAS, ORGANISMO CUENCA. 2010.** *ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO BALSAS, 2010.* s.l. : CONAGUA, 2010.
- Ballinas González, Héctor Alonso. 2011.** *Efectos del cambio climático en el escurrimiento natural superficial de la cuenca del sistema Hidroeléctrico del Río Grijalva.* México : UNAM, 2011.
- Campos Aranda, Daniel F. 2007.** *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento.* San Luis Potosí, S.L.P : s.n., 2007.
- Campos Aranda, Daniel Francisco. 2010.** *Introducción a la Hidrología Urbana.* 2010.
- CONAGUA. 2011.** *Atlas del Agua en México 2011.* México : Comisión Nacional del Agua, 2011.
- . **2011.** *Estadísticas del agua en México.* 2011.
- Conde, Cecilia. 2007.** *México y el Cambio climático global.* México : DGDC UNAM, 2007.
- Chow, Ven Te, Maidment, David R. y Mays, Larry W. 1999.** *Hidrología Aplicada.* Colombia : Mc Graw Hill, 1999.
- Garduño, René. 2004.** ¿Qué es el efecto invernadero? [aut. libro] Julia Martínez y Adrián Fernández Bremauntz. *Cambio climático: Una visión desde México.* México : SEMARNAT, 2004.
- . **1994.** *El veleidoso clima.* México, D.F : Fondo de Cultura Económica, 1994.
- Gómez, Juan Francisco, Aparicio, Javier y Patiño, Carlos. 2010.** *Manual de Análisis de Frecuencias en Hidrología.* s.l. : IMTA, 2010.
- IMTA. 2010.** Análisis de Frecuencia (AFA) versión 1.1. 2010.
- . **2008.** *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).* 2008.
- . **2006.** *Extractor Rápido de Información Climatológica Eric III.* 2006.

- IPCC. 2007.** *Cambio climático 2007. Informe de Síntesis.* Ginebra, Suiza : IPCC, 2007.
- . **2000.** *Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones.* 2000.
- . **2007.** *Modelos Climáticos y su evaluación.* 2007.
- . **2001.** *Tercer Informe de Evaluación Cambio Climático 2001 La base científica.* 2001.
- Jaramillo, Víctor J. 2004.** El ciclo global del carbono. [aut. libro] Adrián Fernández Bremauntz Julia Martínez. *Cambio climático: una visión desde México.* México : SEMARNAT, 2004.
- Kottegoda, N.T. 1980.** *Stochastic Water Resources Technology.* 1980.
- Magaña Rueda, Víctor O. 2004.** El Cambio climático global: comprender el problema. [aut. libro] Adrián Fernández Bremauntz Julia Martínez. *Cambio Climático: una visión desde México.* México : SEMARNAT, 2004.
- Martínez Austria, Polioptro F. 2007.** *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México.* México : SEMARNAT-IMTA, 2007.
- Martínez, Polioptro F. y Patiño, Carlos. 2010.** *Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático.* México : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2010.
- Milly, P. C. D., y otros. 2008.** *Stationarity Is Dead: Whither Water Management?* 2008.
- Mizuta, R., y otros. 2006.** *20- km-Mesh Global Climate Simulations Using JMA-GSM Model.* 2006. págs. 165-185.
- Petit, R. J., y otros. 1999.** *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica.* 1999. págs. 429-436.
- Prieto, Ricardo, y otros. 2010.** Capítulo 3. Impacto del cambio climático en la temporada de lluvias y ciclones tropicales en México. [aut. libro] Carlos Patiño Gómez Polioptro F. Martínez Austria. *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.* 2010.