

Figura 1. Estructura del NWSRFS

Para efectos de la simulación de eventos históricos el sistema se configuró utilizando el concepto de “tabla de operaciones” que consiste en una lista secuencial y ordenada de los cálculos hidrológicos en un segmento (cuenca o subcuenca). Así, un determinado segmento dentro del sistema constará de varias funciones o modelos hidrológicos/hidráulicos para simular las condiciones dentro de la cuenca respectiva. Este concepto es similar al de la caja negra, en el cual existen variables de entrada-procesos-variables de salida y donde pueden seleccionar o definir los diferentes modelos dentro de los procesos.

En este caso, los procesos son los modelos y operaciones empleadas para representar la realidad del denominado *Proceso Hidrológico*: Cuando el vapor de agua se precipita en forma de lluvia y llega a la superficie terrestre, el agua sigue dos trayectorias en cantidades determinadas por la intensidad de la lluvia, así como por la porosidad, permeabilidad, grosor y humedad previa del suelo, una parte del agua se vierte directamente en los ríos, riachuelos y arroyos, de donde pasa a los océanos y a las masas de agua continentales; el resto se infiltra en el suelo. Una parte del agua infiltrada constituye la humedad del suelo y puede evaporarse directamente o penetrar en las raíces de las plantas para ser transpirada por las hojas. La porción de agua que supera las fuerzas de cohesión y adhesión del suelo, se filtra hacia abajo y se acumula en la llamada zona de saturación para formar un depósito de agua subterránea, cuya superficie se conoce como nivel freático. El agua que se vierte en los ríos, transita a través de ellos sufriendo una atenuación producto de la fricción con el canal del río, generando una disminución de los caudales pico; cuando el agua llega a un lago o embalse, una parte de esta es retenida y el resto sigue su curso hasta llegar al océano.

Los modelos y operaciones empleadas en la simulación para representar el proceso hidrológico son los siguientes:

- 1) Modelo SACRAMENTO de lluvia-escurrimiento (SAC-SMA). Este modelo determina la cantidad de agua que se infiltra y la cantidad de agua que se escurre.
- 2) Distribución temporal del escurrimiento Hidrograma Unitario (HU). Por medio del hidrograma unitario la cantidad de agua que efectivamente se escurre es distribuida temporalmente de acuerdo con la duración de la tormenta.
- 3) Modelo LAG/K de Tránsito – atenuación. Este modelo simula el tránsito de la onda en un canal (río), considerando el tiempo de viaje y la disminución de los caudales máximos.
- 4) Modelo de Embalse RESERVOIR JOINT (RES-J). Este modelo calcula en base a los caudales transitados desde aguas arriba niveles en el embalse y caudales descargados.
- 5) Función Graficadora (PLOT-TS)

Como datos de entrada, el sistema utiliza los datos de Lluvia Media Areal (MAP), que es la distribución espacial y temporal de la lluvia dentro de los segmentos respectivos. Los resultados obtenidos del modelo son hidrogramas a la salida de cada uno de los segmentos, el cual pasa a formar datos de entrada al siguiente segmento aguas abajo, en caso exista.

La lógica de distribución de los diferentes modelos y funciones depende del segmento en consideración, una distribución típica dentro de un segmento se ejemplifica en la Figura 2.

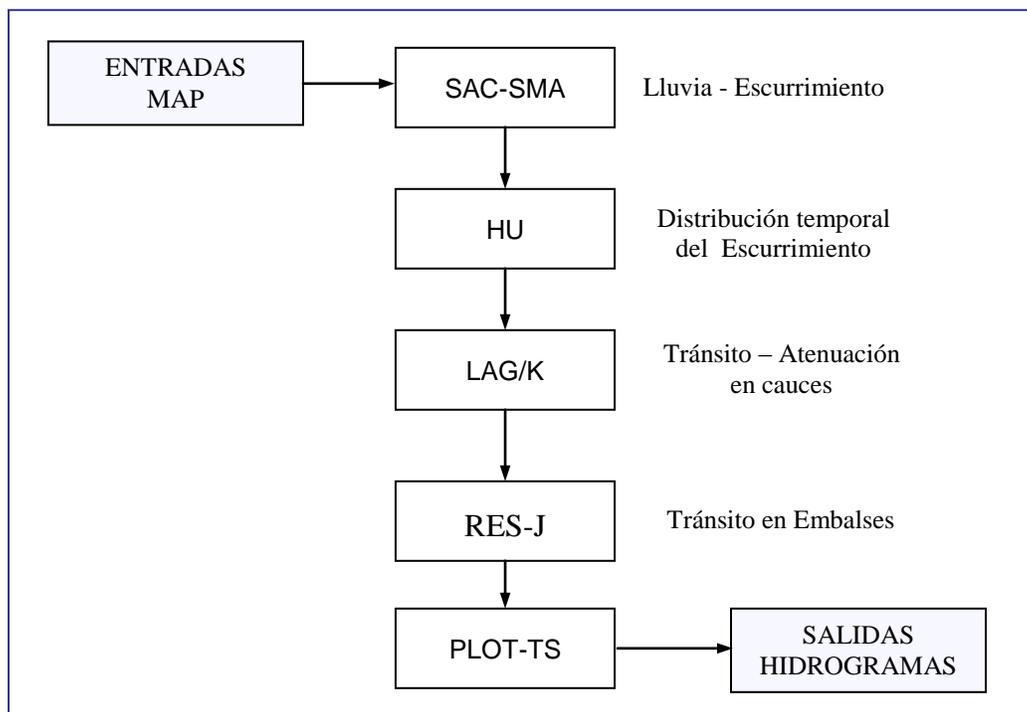


Figura 2. Tabla de Operaciones para simulación de eventos Hidrológicos

3. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Cada uno de los modelos u operaciones contenidas en el sistema fue previamente calibrado en cada segmento de la cuenca del río Lempa, para ser utilizado en los pronósticos hidrológicos que emite el Centro de Pronóstico Hidrológico y solamente fueron dispuestos en tablas de operación para simular las condiciones propuestas.

En el proceso de calibración se utilizó toda la información histórica disponible de caudales y lluvia en las diferentes estaciones de medición de la cuenca del río Lempa, obteniéndose los parámetros respectivos de los diferentes modelos y operaciones para cada subcuenca.

4. DISPOSICIÓN DEL SISTEMA EN LA CUENCA DEL RIO LEMPA

Para la modelación hidrológica, la cuenca del río Lempa se dividió en 15 segmentos o subcuencas, tal como se muestra en el Anexo No. I y se detalla en la siguiente Tabla.

Tabla 1. División en Segmentos
Cuenca del río Lempa

No.	SEGMENTO	AREA DE DRENAJE km ²
1	LECHUZAS	863.50
2	LAS CRUCES	579.80
3	GUAJOYO	981.10
4	CITALA	834.20
5	ZAPOTILLO	837.90
6	TAMARINDO	338.50
7	CERRÓN GRANDE	3870.50
8	LAS FLORES	880.70
9	5 DE NOVIEMBRE	299.00
10	MOCAL	1199.70
11	GUARAJAMBALA	2154.80
12	SAN GREGORIO	969.90
13	OSICALA	818.40
14	15 DE SEPTIEMBRE	2274.90
15	SAN MARCOS	644.50

Para el análisis, se realizó la distribución de los segmentos desde las cabeceras de cuenca hasta llegar a la estación San Marcos aguas abajo. En la siguiente figura se muestran los segmentos en los que se subdividió la cuenca del Lempa, indicando las contribuciones que tienen desde aguas arriba.

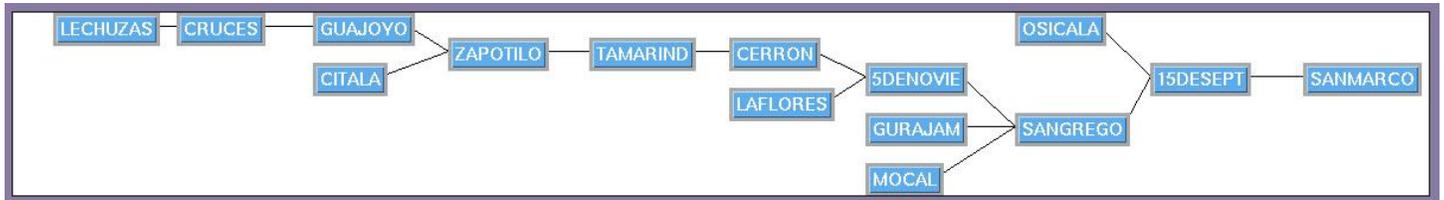


Figura 3. Distribución de segmentos
Cuenca del río Lempa

5. SIMULACIÓN DEL HURACÁN MITCH EN LA CUENCA DEL RIO LEMPA

A su paso por territorio Centroamericano, el Huracán Mitch, entonces Tormenta Tropical generó grandes cantidades de precipitación y por consiguiente, el incremento de los caudales en los diferentes cauces de El Salvador. En el año de ocurrencia del Mitch (1998), muy pocas estaciones de hidrométricas estaban operando, las cuales fueron destruidas en su mayoría por las crecidas de los ríos, perdiéndose la información. Si embargo, con la finalidad de evaluar el comportamiento del río Lempa durante el huracán Mitch, se han simulado las condiciones hidrológicas en los modelos mencionados para construir los hidrogramas correspondientes.

La reconstrucción de hidrogramas en los ríos se realizó para el período del 01 de mayo al 31 de diciembre de 1998, para abarcar las condiciones anteriores y posteriores al Mitch.

Los datos utilizados en la simulación hidrológica son los siguientes:

a) Datos de Caudales¹

Se contó con datos de caudales descargados en el período del 25 de octubre al 15 de noviembre de 1998, para cada una de las cuatro centrales hidroeléctricas del río Lempa, a saber:

- C.H. Guajoyo
- C.H. Cerrón Grande
- C.H. 5 de Noviembre
- C.H. 15 de Septiembre

Estos datos fueron considerados en el sistema de simulación como datos de entrada hacia el segmento aguas abajo.

¹ Proporcionados por CEL de acuerdo con solicitud previa por parte del SNET



b) Datos de Precipitación

Para efecto de los diferentes análisis realizados se consideraron en total 38 estaciones entre pluviométricas, pluviográficas y meteorológicas, contando con datos de lluvia diaria y horaria. En la siguiente tabla se detallan las estaciones utilizadas.

Tabla 2. Estaciones con datos de lluvia
Cuenca del río Lempa

CODIGO	ESTACION	PAIS	LLUVIA 31 OCT – 01 NOV
A 03	METAPÁN	El Salvador	120.0
A 04	TEXIS JUNCTION	El Salvador	104.0
A 06	SANTA ANA, SANTA LUCIA	El Salvador	30.2*
A 12	SANTA ANA EL PALMAR	El Salvador	122.9
A 15	GUIJA	El Salvador	178.0
A 27	CANDELARIA DE LA FRONTERA	El Salvador	107.3
A 31	PLANES DE MONTE CRISTO	El Salvador	256.7
A 34	CANTON MONTENEGRO	El Salvador	199.4
B 01	CHORRERA DEL GUAYABO	El Salvador	96.6
B 03	VILLA DOLORES	El Salvador	139.0
B 06	SENSUNTEPEQUE	El Salvador	166.6
B 10	CERRON GRANDE	El Salvador	39.9*
C 03	SUCHITOTO	El Salvador	93.5
C 08	INGENIO SAN FRANCISCO AGUILARES	El Salvador	94.4
G 03	NUEVA CONCEPCIÓN	El Salvador	128.9
G 04	LA PALMA	El Salvador	206.0
G 05	EL PARAÍSO	El Salvador	90.0
G 13	LAS PILAS	El Salvador	101.0
L04	SAN ANDRES	El Salvador	142.1
L08	SANTA TECLA	El Salvador	291.9
L17	JAYAQUE EL PARAÍSO	El Salvador	226.1
M 05	CIUDAD BARRIOS	El Salvador	311.6
S 01	TOMA DE AGUILARES	El Salvador	125.0
S10	ILOPANGO	El Salvador	103.7
S17	APOPA INSINCA	El Salvador	109.1
U 06	SANTIAGO DE MARIA	El Salvador	437.1
U 09	FINCA SANTA TRINIDAD	El Salvador	534.2
U 23	HACIENDA NORMANDIA	El Salvador	300.9
V 04	FINCA EL CARMEN	El Salvador	202.3
V 09	PUENTE CUSCATLAN	El Salvador	169.4
V 10	SANTA CLARA	El Salvador	78.7
Z 02	SAN FRANCISCO GOTERA	El Salvador	204.4
Z 03	PERQUIN	El Salvador	334.4
Z 05	CORINTO	El Salvador	265.1
	LEMPA ACAHUAPA	El Salvador	216.0
	ESPERANZA	Honduras	107.1
	ESQUIPULAS	Guatemala	113.6
	ASUNCIÓN MITA	Guatemala	79.2

* Solamente Incluye datos del 31 de octubre

5.1 Resultados de la Modelación Hidrológica de Mitch

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la modelación hidrológica en los 15 segmentos en la cuenca del río Lempa.

Para efectos de análisis, es importante destacar los caudales máximos (caudales pico) alcanzados en la salida de cada uno de los segmentos, así como también los influjos máximos y descargas de los embalses de las centrales hidroeléctricas. En la tabla siguiente se detallan los caudales máximos calculados a partir de la modelación hidrológica.

El proceso de ejecución del modelo hidrológico para la reconstrucción de crecidas se realiza en la dirección del flujo del río, es decir, comenzando en el punto más alejado de la cuenca, que en este caso es el segmento de Lechuzas, recorriendo todos los segmentos hasta llegar al punto de desembocadura del río o antes en algún punto de interés, tal como en San Marcos Lempa. Sin embargo, es importante aclarar que el recorrido de Mitch a su paso por Centroamérica sucedió en dirección este – oeste, es decir en una dirección que en términos generales es contraria al flujo del río Lempa, por tanto, los caudales máximos ocurrieron primero en las subcuencas localizadas en la zona este, es decir, en las subcuencas de los ríos Torola, Guarajambala y Mocal (ver figura en *Anexo I*), y posteriormente en las subcuencas de la zona oeste.

Lo expresado anteriormente muestra el hecho de que los caudales máximos en la figura 4 se presentaron a diferentes horas, por tanto, los datos en cada uno de los segmentos no representan la suma de los caudales máximos de los segmentos localizados aguas arriba, abonando a esto que los tiempos de viaje de la crecida desde cada segmento es diferente.

Tabla 3. Caudales Máximos Durante Huracán Mitch
Cuenca del río Lempa

No.	SEGMENTO	CAUDAL MÁXIMO m ³ /s	FECHA
1	LECHUZAS	425.60	01-NOV-1998
2	LAS CRUCES	594.85	02-NOV-1998
3	GUAJOYO	INFLUJOS	711.50
		DESCARGAS	396.85
4	CITALA	1,367.77	01-NOV-1998
5	ZAPOTILLO	1,885.59	01-NOV-1998
6	TAMARINDO	1,837.26	01-NOV-1998
7	CERRON GRANDE	INFLUJOS	3,322.88
		DESCARGAS	2,823.00
8	LAS FLORES	1,589.50	31-OCT-1998
9	5 DE NOVIEMBRE	INFLUJOS	3,683.71
		DESCARGAS	3,776.74



10	MOCAL		3,339.46	31-OCT-1998
11	GUARAJAMBALA		4,320.59	31-OCT-1998
12	SAN GREGORIO		10,110.57	31-OCT-1998
13	OSICALA		3,098.91	31-OCT-1998
14	15 DE SEPTIEMBRE	INFLUJOS	13,113.13	01-NOV-1998
		DESCARGAS	11,738.70	01-NOV-1998
15	SAN MARCOS		13,232.62	01-NOV-1998

De igual manera, en la siguiente figura se muestran los segmentos con los resultados máximos para los diferentes segmentos, incluyendo las entradas y salidas de los embalses de las Centrales Hidroeléctricas.

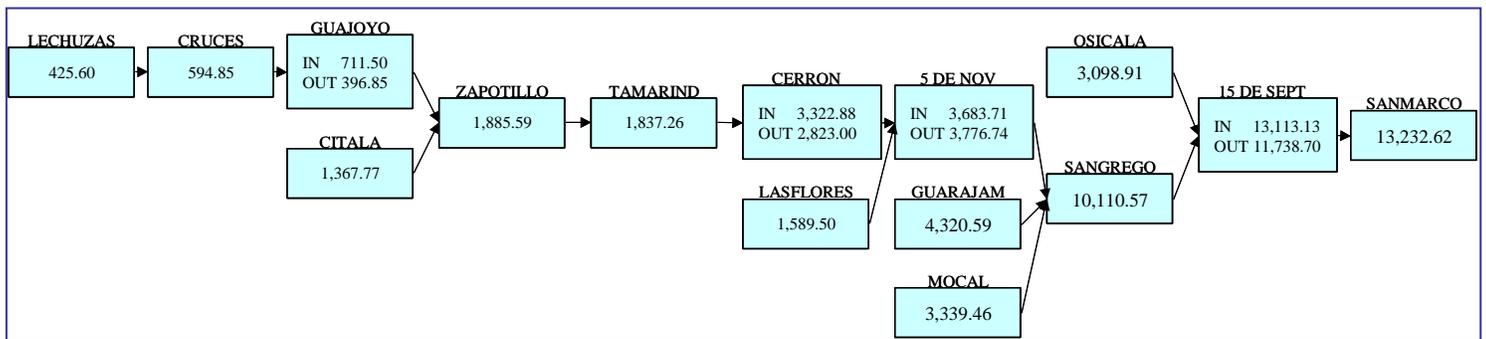


Figura 4. Caudales Máximos
Cuenca del río Lempa

Los tiempos de tránsito calculados en el modelo de tránsito en cauces (LAG/K) entre cada uno de los segmentos y para los caudales máximos se detallan en la tabla 4. Es importante mencionar que los tiempos de tránsito dependen de la magnitud del caudal, en general, se cumple que a mayor caudal el tiempo de tránsito entre un punto y otro del río es menor.

Tabla 4. Tiempos de Tránsito entre segmentos para Caudales Máximos
Obtenidos para Mitch en la Cuenca del río Lempa

SEGMENTO1	SEGMENTO2	TIEMPO DE TRANSITO Hrs
LECHUZAS	LAS CRUCES	3
LAS CRUCES	GUAJOYO	2
GUAJOYO	ZAPOTILLO	2
CITALA	ZAPOTILLO	7
ZAPOTILLO	TAMARINDO	6
TAMARINDO	CERRON GRANDE	8
CERRON GRANDE	5 DE NOVIEMBRE	2
LAS FLORES	5 DE NOVIEMBRE	2
5 DE NOVIEMBRE	SAN GREGORIO	5
MOCAL	SAN GREGORIO	4
GUARAJAMBALA	SAN GREGORIO	2
SAN GREGORIO	15 DE SEPTIEMBRE	3

OSICALA	15 DE SEPTIEMBRE	8
15 DE SEPTIEMBRE	SAN MARCOS	3

5.2 Análisis de Resultados y Conclusiones

En el *Anexo II* se presentan los hidrogramas de crecida calculados en cada uno de los segmentos en los que se subdividió la cuenca del río Lempa, así como también los hidrogramas de entrada y salida en las Centrales Hidroeléctricas.

- El *Anexo III* contiene los archivos de configuración resultantes del sistema que incluyen información relevante en cuanto a la configuración de los diferentes componentes o programas del Sistema de modelación hidrológica, tal como los parámetros del modelo Sacramento para cada uno de los segmentos.

De los resultados obtenidos en la modelación hidrológica se destacan los siguientes puntos principales como base del análisis:

- a. En la figura 4 se observa que los caudales entrantes al embalse de Guajoyo fueron amortiguados por éste, ya que solamente un 56% del caudal máximo entrante fue descargado por la presa.
- b. Al comparar los caudales máximos en la estación Zapotillo con la de Tamarindo, se observa que son mayores en la estación localizada aguas arriba (Zapotillo). Esta disminución en los picos se debe a la atenuación que existe en el tramo de río entre ambas estaciones, lo cual se ha corroborado con las crecidas máximas históricas registradas en dicho tramo.
- c. En el caso del embalse Cerrón Grande, debido a su gran capacidad de almacenamiento, se logró amortiguar un 15% del flujo máximo en la presa, lo que representa una disminución del caudal entrante a la presa de 500 m³/s, con respecto al caudal saliente.
- d. En el caso de la Central Hidroeléctrica 5 de Noviembre, no se logró amortiguar la crecida máxima, ya que los influjos fueron similares a las descargas. Esto es debido a la poca capacidad de almacenamiento del embalse, el cual no es capaz de amortiguar grandes crecidas; sin embargo, si se generó un retraso del pico del hidrograma, contribuyendo a reducir el máximo que se presentó en la 15 de Septiembre, ya que en caudal proveniente de la 5 de Noviembre llegó con cierto atraso.
- e. Los caudales máximos en la cuenca del río Lempa se generaron en las subcuencas que drenan desde territorio hondureño, específicamente, las cuencas de los ríos Mocal, Guarajambala y Torola, aportando aproximadamente el 72% del total de ingresos a la

15 de Septiembre, mientras que la contribución de las otras cuencas fue mucho menor (28%), siendo amortiguadas en gran parte por los embalses Guajoyo y Cerrón Grande.

- f. El caudal máximo entrante al embalse de la presa 15 de Septiembre se ha estimado en $13,113.13 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que la descarga máxima fue de $11,738.70 \text{ m}^3/\text{s}$, esto es, una disminución de $1,374.43 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa una disminución del 10.5% de la atenuación del caudal pico.
- g. En el tramo comprendido entre la presa 15 de Septiembre y la estación San Marcos, entre el 31 de octubre y el 1 de noviembre de 1998, se registraron 331.52 milímetros de lluvia, considerando el promedio de las estaciones Puente Cuscatlán, Santiago de María, Hacienda Normandía, Finca Santa Trinidad y la estación Lempa-Acahuapa. Esta cantidad de precipitación registrada produjo un caudal incremental de $1,493.92 \text{ m}^3/\text{s}$ en el área entre la presa y la estación, resultando en un caudal total de $13,232.62 \text{ m}^3/\text{s}$ en el sitio de la estación San Marcos del bajo Lempa.
- h. El tramo comprendido entre el puente San Marcos Lempa y el Océano Pacífico se caracteriza por tener una pendiente baja (aproximadamente 0.012%), además de ser una zona de deposición de sedimentos acarreados desde aguas arriba, lo que disminuye la capacidad de drenaje del río produciendo frecuentes inundaciones. Este tramo del río también se ve afectado por el oleaje y las mareas que produce un efecto de remanso en el río.



Ministerio de Medio Ambiente e
y Recursos Naturales

SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES



ANEXO I

CUENCA DEL RIO LEMPA – ESTACIONES HIDROMETEOROLOGICAS Y EMBALSES



Ministerio de Medio Ambiente e
y Recursos Naturales

SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES





Ministerio de Medio Ambiente e
y Recursos Naturales

SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES



ANEXO II

HIDROGRAMAS HURACÁN MITCH

COMENTARIOS DE LOS HIDROGRAMAS:

- ▶ Al pie de cada hidrograma aparece la nota **..SQIN 1 hour (1998-05-01 01 to 1999-01-01 00)**. Esto representa el caudal simulado instantáneo del río en períodos de 1 hora. Entre paréntesis se muestra la fecha y hora de inicio de la simulación y fecha y hora de finalización.
- ▶ La línea de color **rojo** en lo hidrogramas representa el caudal simulado en cada uno de los segmentos, incluyendo influjos a los embalses.
- ▶ La línea de color **azul** en los hidrogramas representa el caudal total descargado de las Centrales hidroeléctricas.
- ▶ Los archivos de datos horarios de los hidrogramas se presentan en el Anexo III.
- ▶ El eje de las abscisas (eje de tiempo) varía de escala dependiendo de la duración de la crecida.

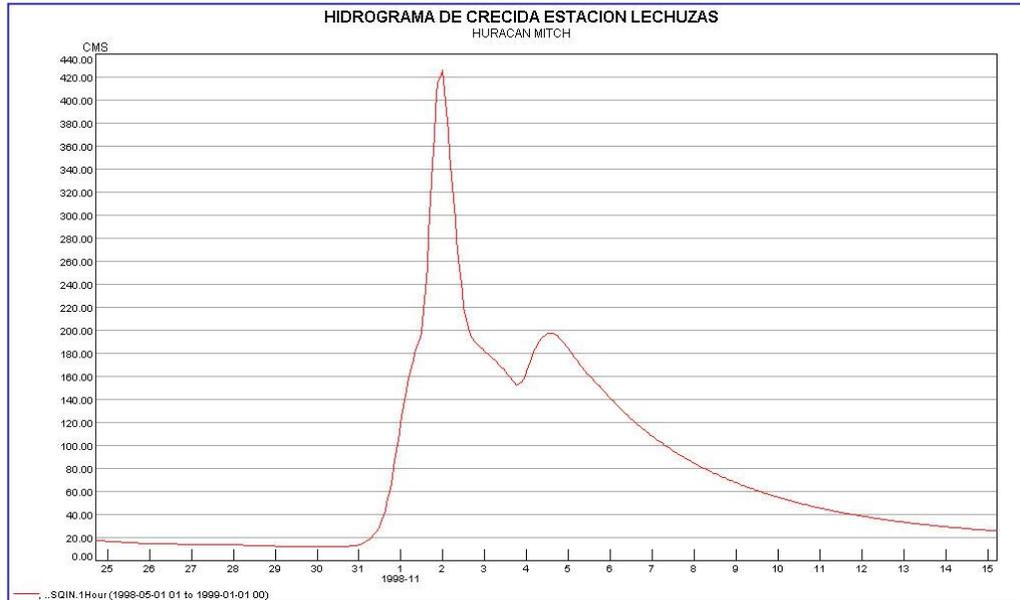


Figura I.1. Hidrograma de crecida
Segmento *Lechuzas*

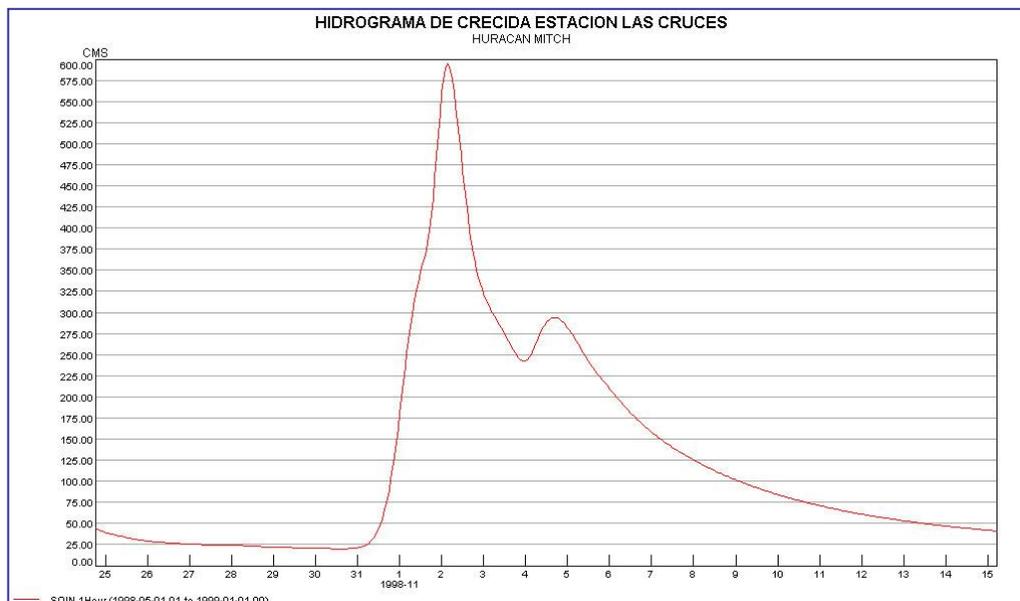


Figura I.2. Hidrograma de crecida
Segmento *Las Cruces*

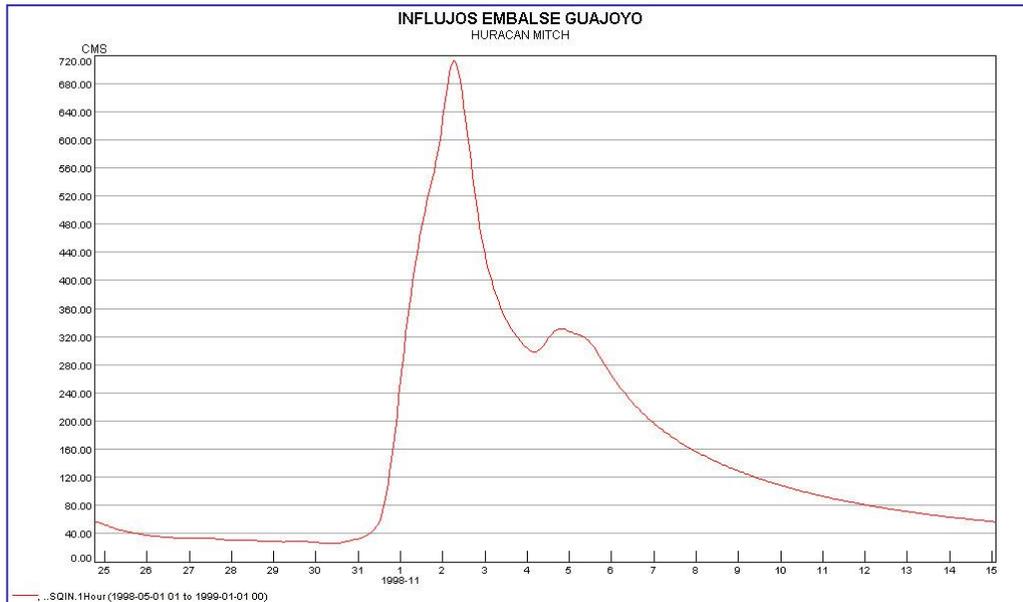


Figura I.3. Hidrograma de crecida
Influjos al *embalse Guajoyo*

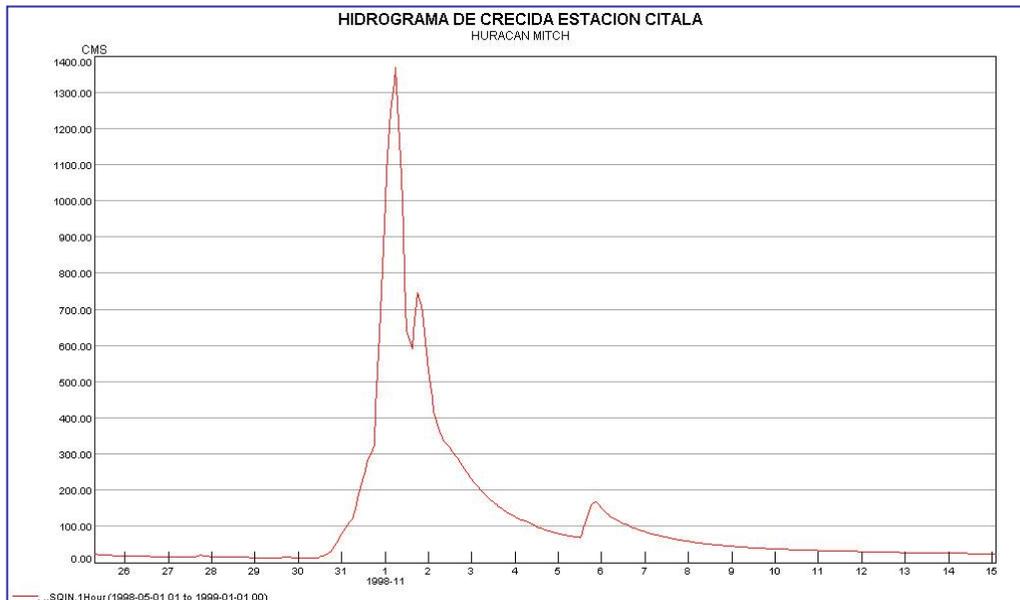


Figura I.4. Hidrograma de crecida
Segmento *Citalá*

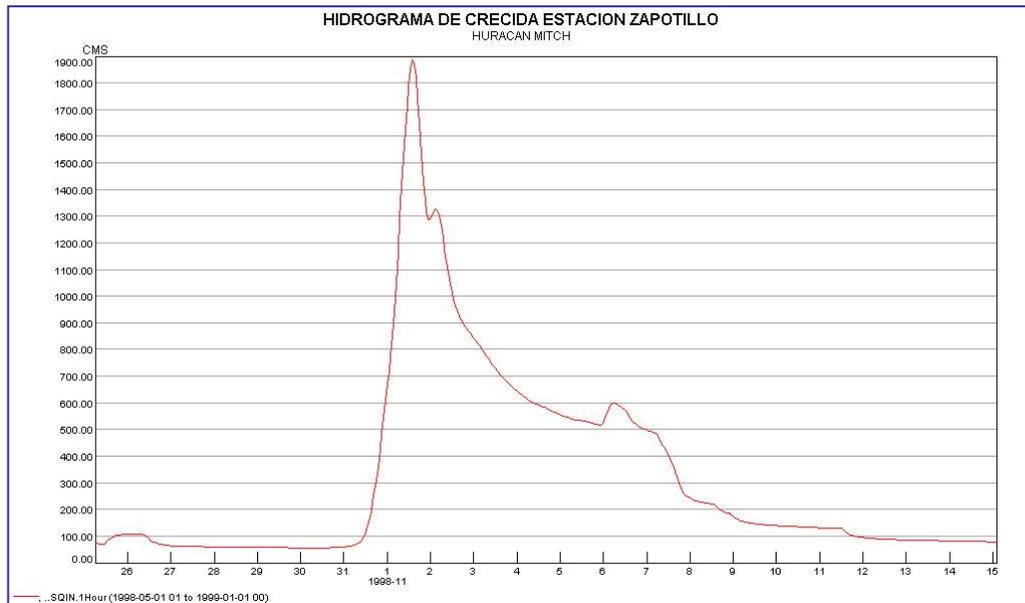


Figura I.5. Hidrograma de crecida
Segmento *Zapotillo*

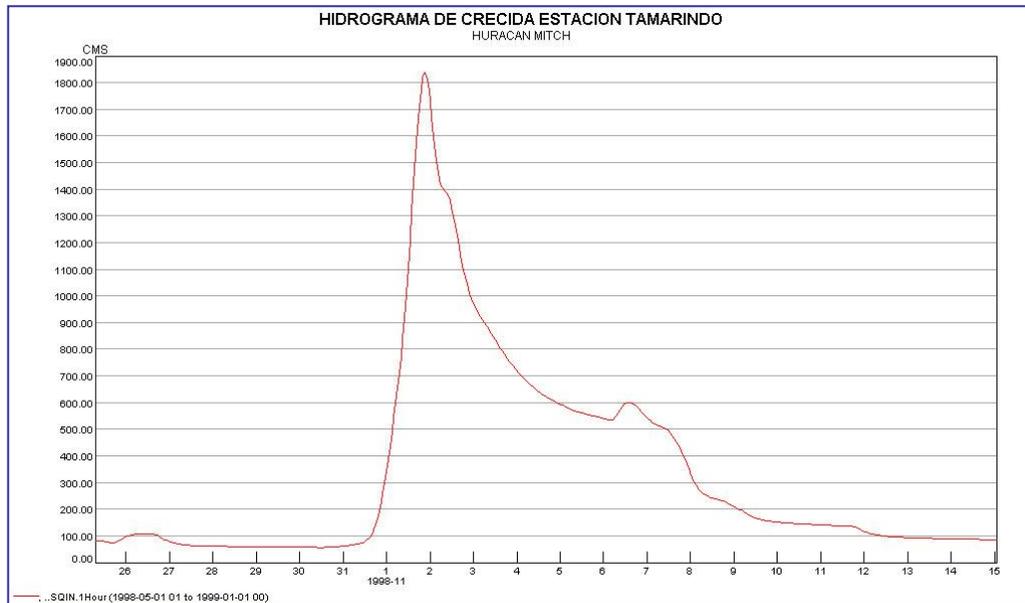


Figura I.6. Hidrograma de crecida
Segmento *Tamarindo*

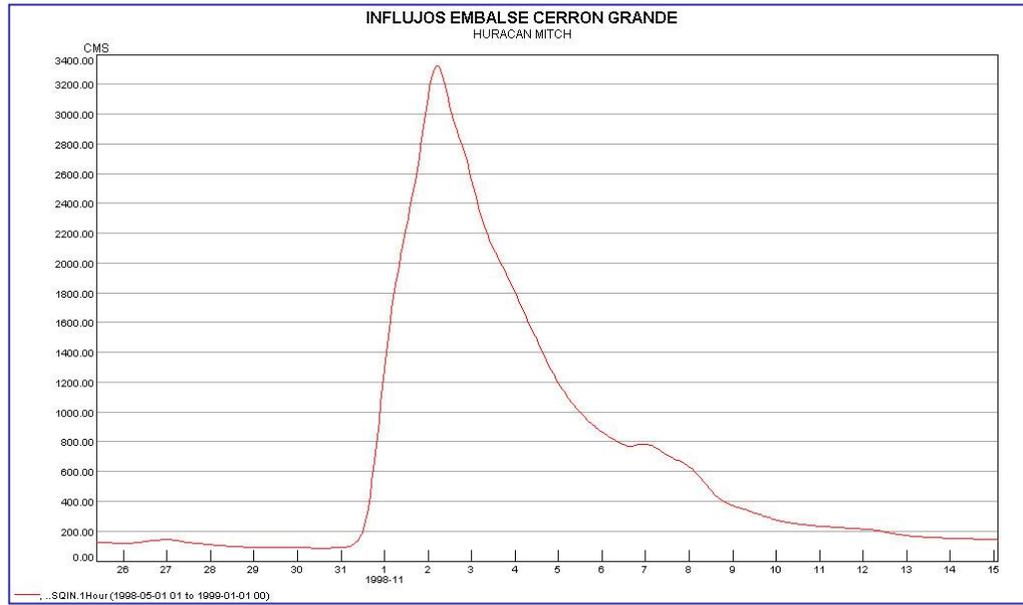


Figura I.7. Hidrograma de crecida
Influjos al *embalse Cerrón Grande*

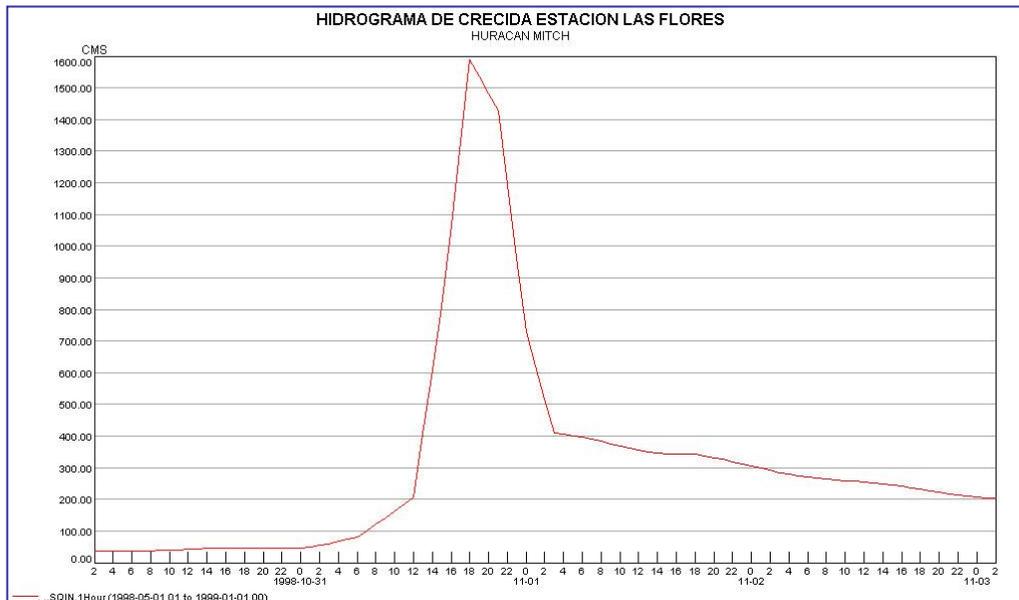


Figura I.8. Hidrograma de crecida
Segmento *Las Flores*

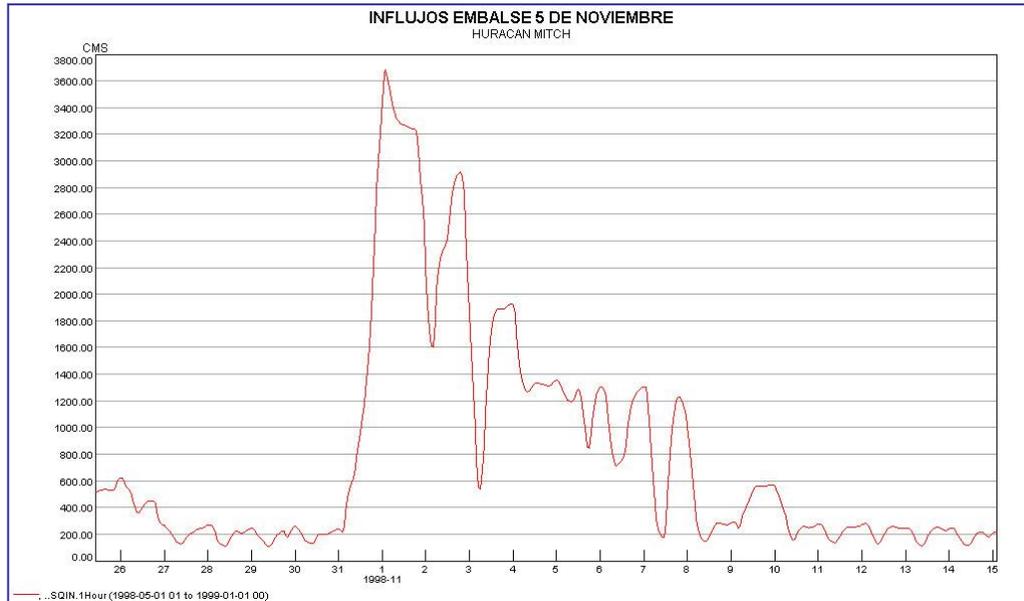


Figura I.9. Hidrograma de crecida
Influjos al *embalse 5 de Noviembre*

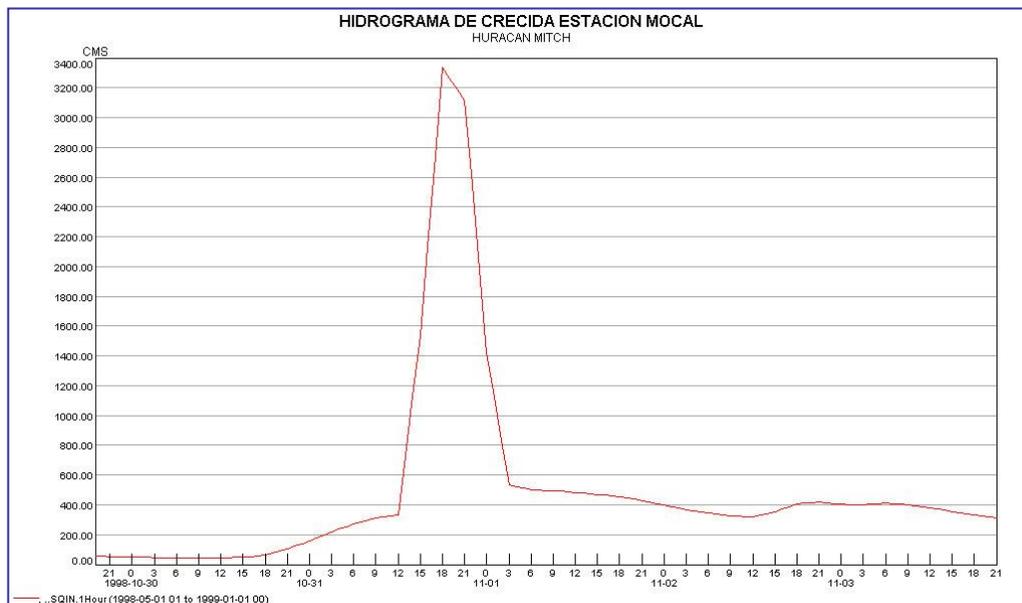


Figura I.10. Hidrograma de crecida
Segmento *Mocal*

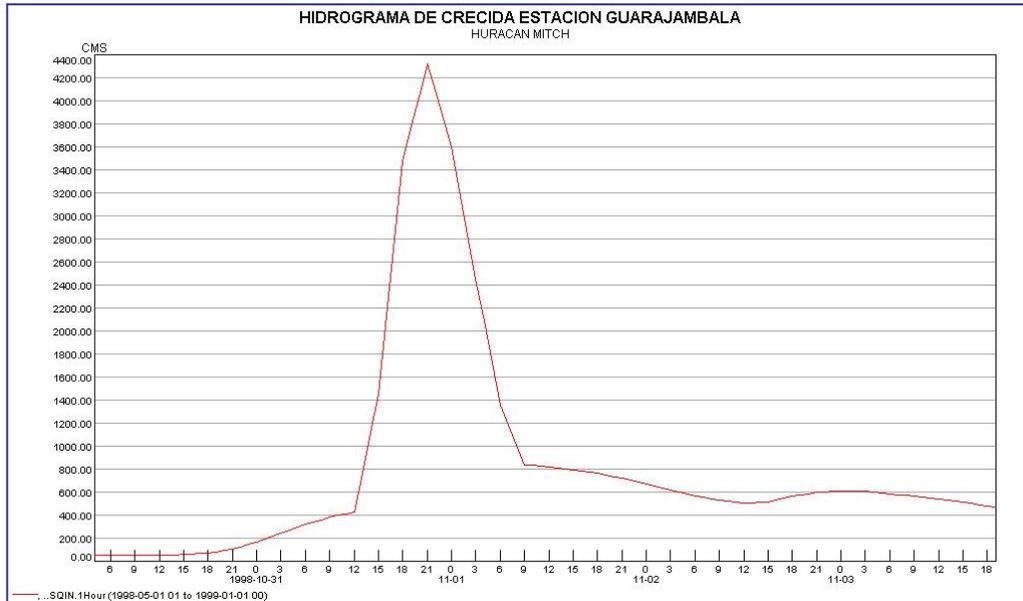


Figura I.11. Hidrograma de crecida
Segmento *Guarajambala*



Figura I.12. Hidrograma de crecida
Segmento *San Gregorio*

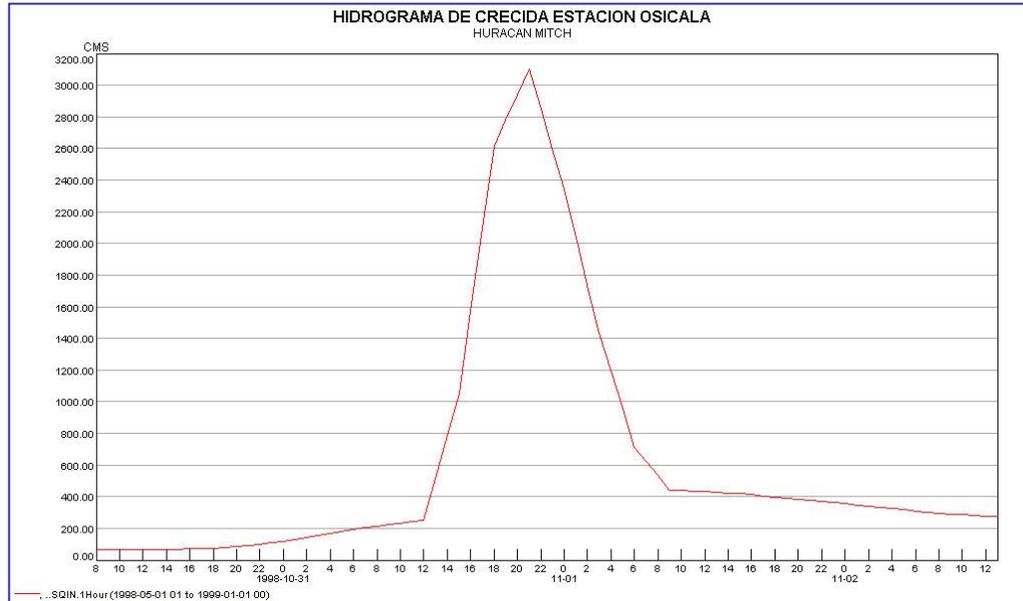


Figura I.13. Hidrograma de crecida
Segmento *Osicala*

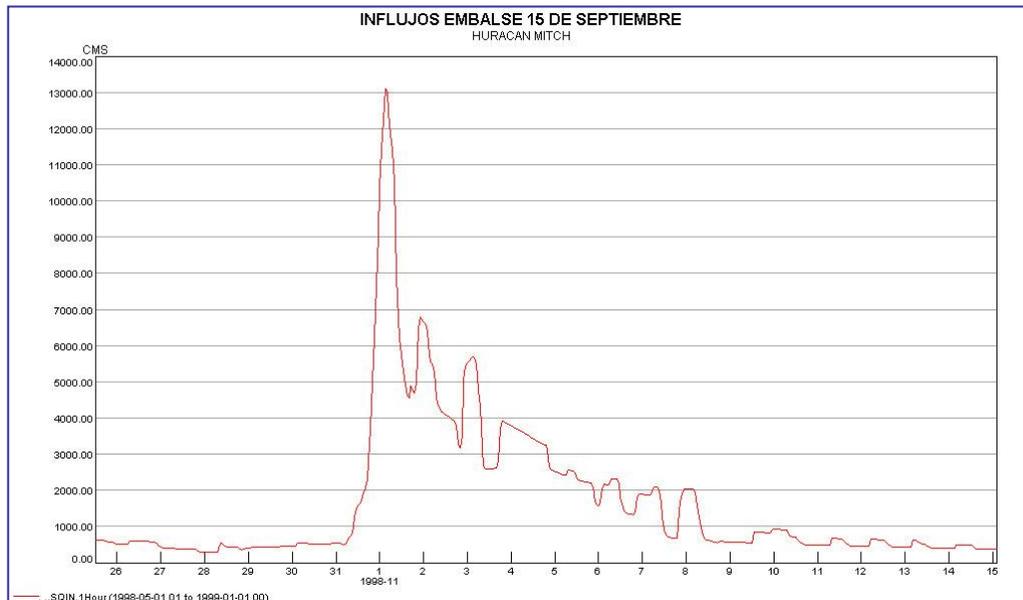


Figura I.14. Hidrograma de crecida
Influjos *embalse 15 de Septiembre*

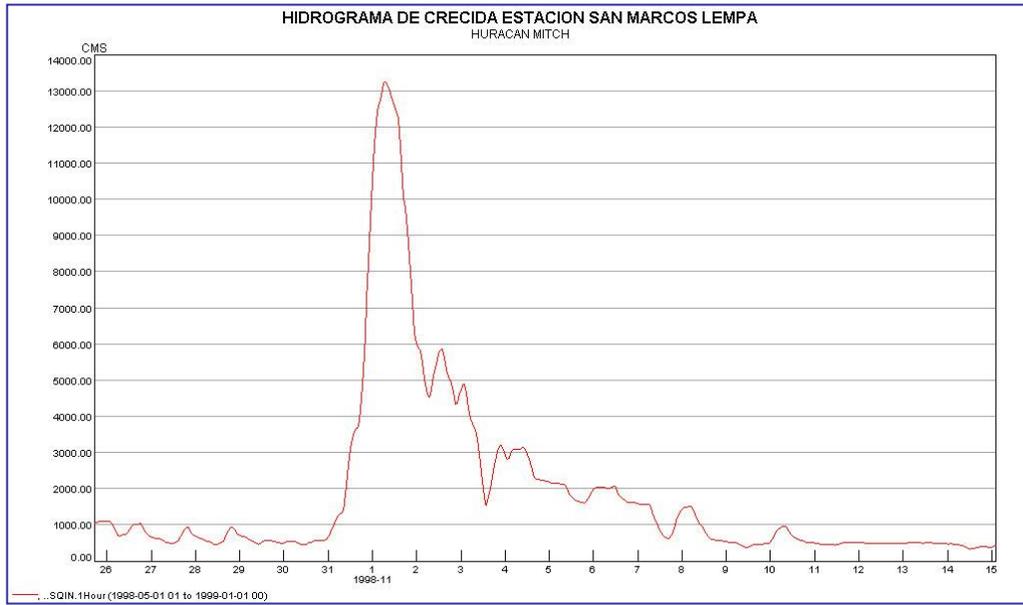


Figura I.15. Hidrograma de crecida
Segmento *San Marcos*

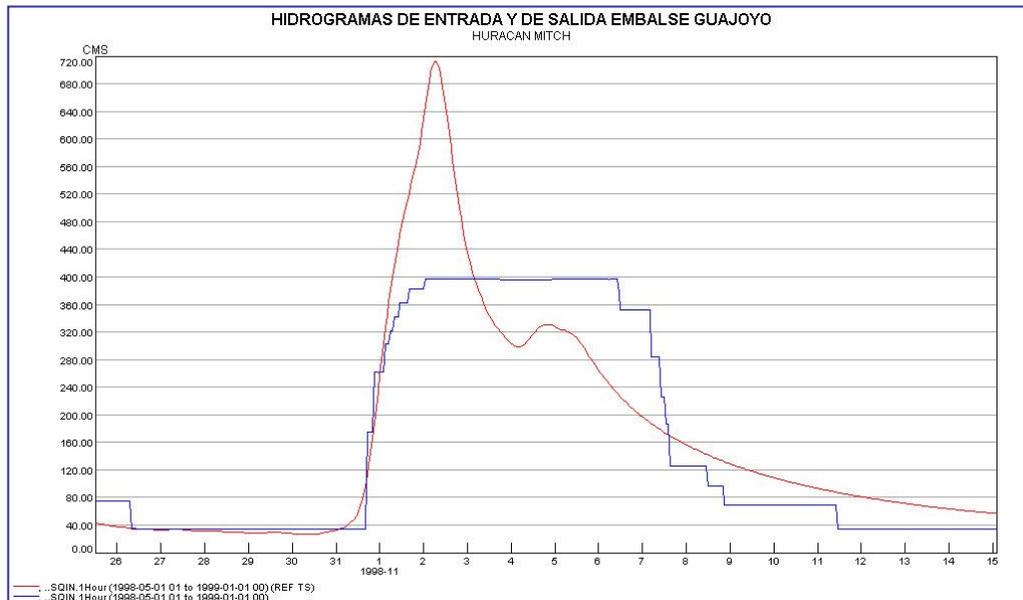


Figura I.16. Hidrograma de crecida
Comparativo entradas-salidas *embalse Guajoyo*

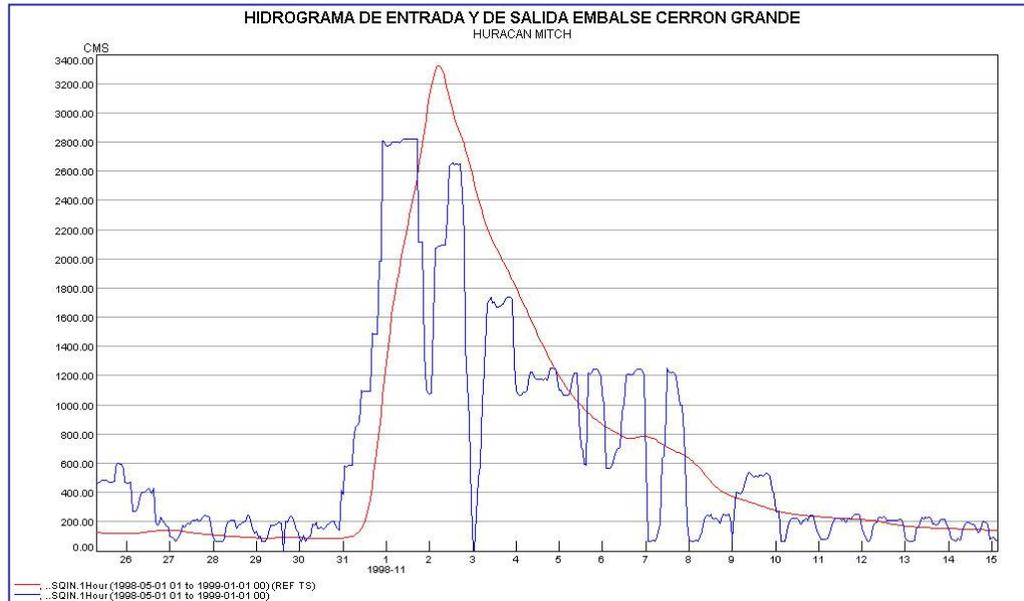


Figura I.17. Hidrograma de crecida
Comparativo entradas-salidas *embalse Cerrón Grande*

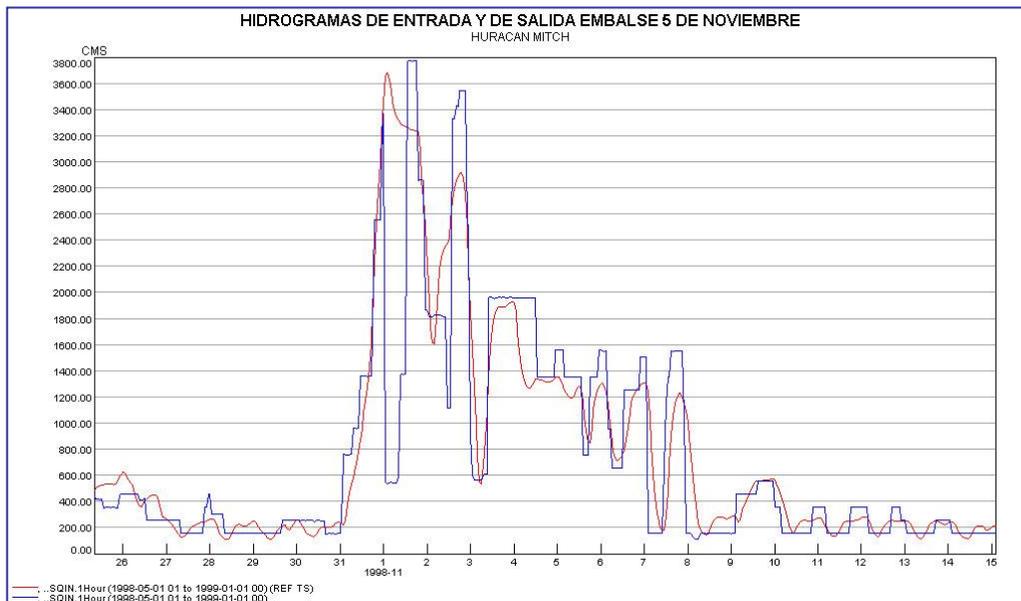


Figura I.18. Hidrograma de crecida
Comparativo entradas-salidas *embalse 5 de Noviembre*

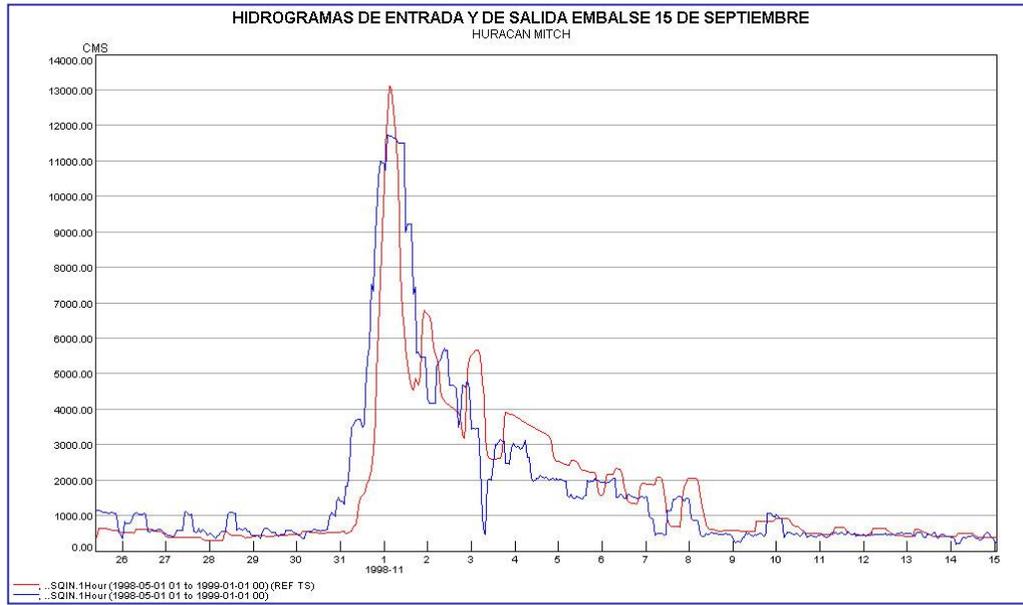


Figura I.19. Hidrograma de crecida
Comparativo entradas-salidas *embalse 15 de Septiembre*



Ministerio de Medio Ambiente e
y Recursos Naturales

SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES



ANEXO III

PARAMETROS DE CONFIGURACION DEL SISTEMA NWSRF PARA RECONSTRUCCION DEL HURACAN MITCH

PRINCIPALES PARÁMETROS DEL MODELO SACRAMENTO RECONSTRUCCIÓN DEL HURACÁN MITCH

SEGMENTO	PX- ADJ	PE- ADJ	UZTWM	UZFWM	UZK	ZPERC	LZSK	LZPK	LZTWM	LZFMS	LZFPW
LECHUZAS	1.005	1.000	60.0	93.0	0.200	50.0	0.060	0.0020	154.0	101.0	161.0
CRUCES	1.000	1.000	70.0	85.0	0.390	75.0	0.140	0.0050	215.0	100.0	250.0
GUAJOYO	0.983	1.000	59.0	82.0	0.370	60.8	0.110	0.0040	196.0	104.0	240.0
CITALA	1.000	1.000	50.0	80.0	0.382	43.0	0.100	0.0020	240.0	112.0	450.0
ZAPOTILLO	0.986	1.000	59.0	82.0	0.368	60.8	0.110	0.0035	196.0	104.0	240.0
TAMARINDO	0.998	1.000	59.0	82.0	0.368	60.8	0.110	0.0035	196.0	104.0	240.0
CERRON	0.990	1.000	35.0	70.0	0.500	75.0	0.150	0.0050	175.0	50.0	100.0
FLORES	0.980	1.000	59.0	82.0	0.370	60.8	0.110	0.0035	196.0	104.0	240.0
5DENOVIEMBRE	0.928	1.000	59.0	82.0	0.368	60.8	0.110	0.0030	196.0	104.0	240.0
MOCAL	0.958	1.000	59.0	82.0	0.368	61.0	0.110	0.0035	196.0	104.0	240.0
GUARAJAMBALA	0.946	1.000	59.0	82.0	0.368	61.0	0.110	0.0035	196.0	104.0	240.0
SANGREGORIO	0.979	1.000	59.0	82.0	0.368	60.8	0.110	0.0030	196.0	104.0	240.0
OSICALA	1.030	1.000	59.0	82.0	0.368	61.0	0.110	0.0035	196.0	104.0	240.0
15DESEPT	0.979	1.000	59.0	82.0	0.368	60.8	0.110	0.0030	196.0	104.0	240.0
SANMARCOS	1.000	1.000	59.0	82.0	0.368	61.0	0.110	0.0035	196.0	104.0	240.0

- PX-ADJ: Factor de ajuste para la precipitación
PE-ADJ: Factor de ajuste para la demanda de ET
UZTWM: Capacidad de la zona superior de agua de tensión (mm)
UZFWM: Capacidad de la zona superior de agua libre (mm)
UZK: Tasa de desalojo de agua libre en la zona superior
ZPERC: Tasa máxima de precolación
LZSK: Tasa de desalojo diaria de agua libre suplementaria (fracción)
LZPK: Tasa de desalojo diaria de agua libre primaria (fracción)
LZTWM: Capacidad de la zona inferior de agua de tensión (mm)
LZFMS: Capacidad de la zona inferior de agua libre suplementaria (mm)
LZFPM: Capacidad de la zona inferior de agua libre primaria (mm)