



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

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA REGULACIÓN DE FLUJOS
EXTRAORDINARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO (PRESA PUJAL-
COY)

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

PRESENTA:
ALEJANDRA AMARO LOZA

TUTOR PRINCIPAL
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MAYO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Echávez Aldape Gabriel
Secretario:	Dr. Fuentes Mariles Óscar
Vocal:	Dr. Pedrozo Acuña Adrián
1er. Suplente	Dr. Domínguez Mora Ramón
2do. Suplente	Dr. Pozos Estrada Óscar

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS

DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

Agradecimientos

En mi formación académica:

A mi Alma Máter la Universidad Nacional Autónoma de México, por la evocación del espíritu que me compromete como egresada a formar parte de la transformación de la raza cósmica.

Al Instituto de Ingeniería y Posgrado de Ingeniería, que se distinguen por los méritos de sus investigadores y profesores; son referencia icónica en mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme otorgado su patrocinio a través del sistema de becas de posgrado.

A mi mentor favorito, el Dr. Adrián Pedrozo quien ha encaminado y guiado mi odisea académica, elogio su notable trabajo que ha sido una lección persuasiva de constancia personal.

A mis queridos compañeros del Instituto de Ingeniería, Juan Pablo, César, Miguel, Raúl, Irving, Pedro, Edgar y Monique con quienes compartí entrañables momentos en el cubículo. En las circunstancias cotidianas encontré la amistad incondicional: gracias Ariadna, Diana Carolina, Abril, Diana Edith y Mireille.

En mi vida personal:

A Dios por la oportunidad de empezar cada día, porque su presencia se manifiesta en cada espacio, las personas y experiencias que me permiten cumplir sus propósitos.

Especialmente a mis padres, porque su amor es mi sustento, desbordo en gratitud por el hogar que me regalaron, sus enseñanzas son eco en mi alma.

A Gerardo, mi alma gemela, porque era necesario emprender diferentes caminos y volver a estar juntos para compartir el mismo. Mi fuerza siempre provino de la fe en nuestro amor.

Resumen

La mayoría de las ciudades en el mundo se localizan en las planicies o en las costas. El hecho de que el desarrollo de los asentamientos humanos se establezca a lo largo de los ríos resulta más beneficioso para el hombre, con ventaja sobre cualquier otro lugar porque las llanuras de inundación proveen de tierras fértiles para la agricultura y la ganadería, abastecen de agua dulce y la urbanización es más fácil en terreno plano.

Algunos de los peores desastres naturales en la historia han sido en las llanuras fluviales, tal es el caso de estudio, donde las inundaciones han sido parte de la historia de la Cuenca Baja del río Pánuco, como resultado de eventos ciclónicos que provocan aumentos en los ríos y se prolongan por varios días. Se estiman que son 5 eventos de inundaciones significativos en la cuenca del río Panuco, entre 1933 y 2011, con inundaciones catastróficas en 1955, 1976, 1993 y 2011. El evento de 1955, la peor inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco devastó la infraestructura portuaria, ocasionó daños en las viviendas, otras obras de infraestructura como carreteras e instalaciones industriales en Tampico y Altamira.

A fin de determinar la reducción de los efectos de inundación, se evaluará el funcionamiento de una presa mediante la modelación matemática. Los resultados de la simulación de modelos hidráulicos se pueden utilizar para producir mapas de inundación que los funcionarios o la población pueden usar para evaluar el riesgo de inundaciones.

Abstract

Most of the cities in the world are located in the flood plains or on coasts. The fact that the development of human settlements along large rivers has often been more beneficial than elsewhere is contributed to a set of additional location advantages for development: flood plains in the lower reaches provide fertile land for agriculture and livestock, access to fresh water and ease of development of flat land.

Some of the worst natural disasters in history have been the river floods, such as the case of study, where floods have been part of the history of the Panuco River Basin, significant floods result from cyclonic rainfall events that cause raises on rivers and extend for days. About 5 significant flood events occurred on the Panuco River between 1933 and 2011, with catastrophic flooding in 1955, 1976, 1993 and 2011. The 1955 event, the worst flooding on the Lower Panuco Basin devastated the port infrastructure, caused damage to housing, other infrastructure as roads and industrial facilities in Tampico and Altamira.

In order to determine the reduction flooding, will be evaluated the operation of a dam through a mathematical modeling. Simulation results from hydraulic models can be used to produce inundation maps that community officials or the general population can use to evaluate their flood risk.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	11
Objetivos.....	12
Organización del Trabajo	12
CAPÍTULO 1. PERSPECTIVA GLOBAL DE LAS INUNDACIONES	14
1.1 Bases conceptuales sobre las inundaciones	18
1.1.1 Causas y tipos de inundaciones	18
1.2 Efecto del cambio climático a nivel mundial.....	22
1.2.1 Causas del cambio climático.....	23
1.2.2 Efectos del cambio climático.....	24
CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO	27
2.1 Ubicación de la Cuenca del Río Pánuco.....	27
2.2 Características físicas de la zona de estudio.....	29
2.2.1 Hidrografía.....	29
2.2.2 Fisiografía.....	33
2.2.3 Clima.....	34
2.2.4 Precipitación.....	37
2.2.5 Evapotranspiración.....	38
2.2.6 Escurrimiento.....	39
2.3 Eventos de inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco.....	40
2.3.1 Evento de 1933.....	40
2.3.2 Evento de 1955.....	41
2.3.3 Evento de 1976.....	44
2.3.4 Evento de 1993.....	44
2.3.5 Evento de 2011.....	45

CAPÍTULO 3. PRESA PUJAL-COY	48
3.1 Antecedentes de la Presa Pujal-Coy	50
3.1.1 Descripción del Plan Maestro	51
3.1.2 El Proyecto Pujal-Coy	53
3.2 Situación actual sobre el proyecto de la Presa Pujal-Coy	56
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	59
4.1 Modelo hidrodinámico bidimensional.....	60
4.1.1 Descripción del módulo hidrodinámico	60
4.2 Puesta a punto del modelo numérico.....	69
4.2.1 Malla de modelación.....	70
4.2.2 Condiciones de Frontera	72
4.3 Validación del modelo con el evento Arlene, 2011.....	80
4.3.1.1 Resultados del evento Arlene 2011	82
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	84
5.1 Condiciones Actuales	85
5.1.1. Escenario de inundación con un gasto asociado a un $Tr= 100$ años.....	85
5.1.2. Escenario de inundación con un gasto asociado a un $Tr=500$ años.....	88
5.2 Escenario de inundación con la regulación de flujos extraordinarios con la Presa Pujal-Coy	91
5.2.1 Simulación de escenarios asociados a un $Tr= 100$ años con el funcionamiento de la Presa Pujal-Coy	93
5.2.2 Simulación de escenarios asociados a un $Tr= 500$ años con el funcionamiento de la Presa Pujal-Coy.....	97
5.3 Comparación de resultados	101
5.3.1 Profundidad Total del Agua.....	101
5.3.2 Áreas de inundación	106
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	108
REFERENCIAS	111

Lista de Figuras

FIGURA 1. 1 EVENTOS DE INUNDACIÓN EN TODO EL MUNDO, CORRESPONDIENTE AL PERIODO DE 1970-2011 (EM-DAT, 2011).....	15
FIGURA 1. 2 INUNDACIÓN OCURRIDA EN LA CUENCA DEL RÍO ELBA, ALEMANIA (AIR, 2011).....	16
FIGURA 1. 3 UNA MUJER CAMINA CON EL AGUA HASTA EL NIVEL DEL PECHO, LA INUNDACIÓN CORRESPONDE AL EVENTO DE INUNDACIÓN DEL 2011, EN BANGKOK, TAILANDIA. (CITIES & FLOODING, 2011).	16
FIGURA 1. 4 UN ENFOQUE COMUNITARIO PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE INUNDACIÓN (ICE, 2012).....	17
FIGURA 1. 5 EL AGUA QUE PRECIPITA FLUYE SOBRE EL TERRENO HASTA LLEGAR A RÍOS Y LAGOS (AGUA DE ESCORRENTÍA), PERO OTRA PARTE SE INFILTRA, CUANDO LLUEVE, O DESDE LOS RÍOS Y LAGOS. (GEÓLOGOS SIN FRONTERAS, 2012)	19
FIGURA 1. 6 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MORFOLOGÍA DE UN RÍO (SANFORD, J. A., 1998).....	20
FIGURA 1. 7 PRINCIPALES MECANISMOS POR LOS QUE SE GENERA LA PRECIPITACIÓN	21
FIGURA 1. 8 INUNDACIÓN COSTERA DEBIDO A LA MAREA DE TORMENTA (NOAA HURRICANE REASERCH DIVISON, 2010).....	22
FIGURA 1. 9 CAMBIO EN EL FORZAMIENTO RADIATIVO ENTRE 1750 Y 2005 SEGÚN LAS ESTIMACIONES DEL IPCC.....	23
FIGURA 1. 10 A) EMISIONES ANUALES MUNDIALES DE GEI ANTROPÓGENOS ENTRE 1970 Y 2004. B) PARTE PROPORCIONAL DE DIFERENTES GEI ANTROPÓGENOS RESPECTO A LAS EMISIONES EN 2004, EN TÉRMINO DE CO ₂ . C) PARTE PROPORCIONAL DE DIFERENTES SECTORES EN LAS EMISIONES TOTALES DE GEI ANTROPÓGENOS EN 2004, EN TÉRMINOS DE CO ₂ . (CAMBIO CLIMÁTICO 2007: INFORME DE SÍNTESIS, 2007)	24
FIGURA 1. 11 PROYECCIONES DEL CALENTAMIENTO EN SUPERFICIE OBTENIDAS DE UN MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL ATMÓSFERA-OCÉANO: LAS LÍNEAS DE TRAZO CONTINUO REPRESENTAN PROMEDIOS MUNDIALES MULTIMODELO DEL CALENTAMIENTO EN SUPERFICIE (RESPECTO DEL PERÍODO 1980-1999. (CAMBIO CLIMÁTICO 2007: INFORME DE SÍNTESIS, 2007).....	25
FIGURA 1. 12 CAMBIOS DE LA PRECIPITACIÓN RELATIVOS PERIODO 2090-2099, RESPECTO DEL PERIODO 1980-1999. LOS PERIODOS DE DICIEMBRE-FEBRERO (IZQ.) Y DE JUNIO A AGOSTO (DER.). LAS ÁREAS EN BLANCO REPRESENTAN LOS LUGARES EN QUE MÁS DE UN 66% DE LOS MODELOS COINCIDEN CON EL SIGNO DEL CAMBIO, Y LAS ÁREAS PUNTEADAS REPRESENTAN LOS LUGARES EN QUE MÁS DE UN 90% DE LOS MODELOS CONCUERDAN EN EL SIGNO DEL CAMBIO. (CAMBIO CLIMÁTICO 2007: INFORME DE SÍNTESIS, 2007)	26
FIGURA 2. 1 EN EL PANEL SUPERIOR SE MUESTRA LA UBICACIÓN DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA DEL PÁNUCO EN LA REPÚBLICA MEXICANA; EN EL PANEL INFERIOR (IZQUIERDA) LAS DIVISIONES DE LAS CUENCAS, LA ZONA DE ESTUDIO SE UBICA EN EL RECUADRO (A LA DERECHA).....	28
FIGURA 2. 2 PANEL SUPERIOR: SISTEMA DE DRENAJE DE LA REGIÓN DEL PÁNUCO. PANEL INFERIOR: ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LOS PRINCIPALES RÍOS DE LA CUENCA DEL RÍO PÁNUCO. LOS PUNTOS ROJOS INDICAN LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS QUE SE UBICAN EN LA CUENCA.....	30

FIGURA 2. 3 EL RÍO PÁNUCO EN SU ÚLTIMO TRAMO MUESTRA NUMEROSOS MEANDROS Y PENDIENTE SUAVE. RECONOCIMIENTO AÉREO DE LA ZONA DE ESTUDIO (PEDROZO, 2011).....	31
FIGURA 2. 4 SISTEMA LAGUNAR DEL RÍO TAMESÍ (AL NORTE) Y DEL RÍO PÁNUCO (AL SUR).....	32
FIGURA 2. 5 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES CON RESOLUCIÓN A CADA 15 METROS DE LA REGIÓN DEL PÁNUCO (INEGI, 2014).....	33
FIGURA 2. 6 RASGOS FISIGRÁFICOS DE LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL PÁNUCO (CONABIO, 2014).....	34
FIGURA 2. 7 TIPOS DE CLIMAS EN LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL PÁNUCO (CONABIO, 2014).....	35
FIGURA 2. 8 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL PÁNUCO (CONABIO, 2014).....	38
FIGURA 2. 9 EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL PÁNUCO (CONABIO, 2014).....	39
FIGURA 2. 10 INUNDACIÓN EN 1933. TAMPICO, TAMAULIPAS	40
FIGURA 2. 11 NIVELES REGISTRADOS EN LA ESTACIÓN BOMBAS PARA EN LOS EVENTOS DE 1933 Y 1955 ...	42
FIGURA 2. 12 VISTA AÉREA, LA ZONA CUBIERTA COMPLETAMENTE POR EL AGUA EN LA PLAZA “HIJAS DE TAMPICO”, EL PRIMER PISO DE LA CASA GARZA, MERCADOS, ENTRE OTROS LUGARES. INUNDACIÓN DE 1955.....	43
FIGURA 2. 13 LA INTENSIDAD DE LA MAGNITUD DE LA INUNDACIÓN, UNIÓ A LA LAGUNA DEL CARPINTERO Y PÁNUCO, LOS MUELLES CASI 3 M. BAJO EL AGUA, LOS BARCOS CASI ENCIMA DE LOS MUELLES, EL EDIFICIO DE LA MARINA CUBIERTO POR EL AGUA EN SU PRIMER PISO, AL IGUAL QUE LAS BODEGAS DE ADUANA Y FERROCARRIL.....	43
FIGURA 2. 14 PANEL SUPERIOR: TRAYECTORIA DE LA TORMENTA TROPICAL ARLENE DESDE EL 29 DE JUNIO AL 1 DE JULIO. PANEL INFERIOR: NIVELES DE PRECIPITACIÓN GENERADOS EN 24 HORAS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO (CONAGUA, 2011)	46
FIGURA 2. 15 VIVIENDAS ANEGADAS POR EL DESBORDAMIENTO DEL RÍO PÁNUCO, EN VERACRUZ (EL UNIVERSAL, 2011).....	47
FIGURA 2. 16 LOS MUNICIPIOS DE EL MANTE Y SOTO LA MARINA, DE TAMAULIPAS, FUERON DECLARADOS EN EMERGENCIA POR LA TORMENTA TROPICAL ARLENE (CONEXIÓN TOTAL, 2011)	47
FIGURA 3. 1 ESQUEMA DE SOSTENIBILIDAD Y LOS ASPECTOS QUE CONSIDERA LOS PROYECTOS	49
FIGURA 3. 2 UBICACIÓN DE LAS SUBCUENCAS DEL PLAN MAESTRO	52
FIGURA 3. 3 ESQUEMA DE LAS ETAPAS QUE INTEGRAN EL PLAN MAESTRO PARA EL DESARROLLO DE LA CUENCA DEL RÍO PÁNUCO PROPUESTO POR LA EXTINTA SARH, 1980.	53
FIGURA 3. 4 OBRAS DE LA PRIMERA FASE (GONZÁLEZ-VILLAREAL, 2010)	54
FIGURA 4. 1 ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA APLICADA PARA LA EVALUACIÓN DE FLUJOS EXTRAORDINARIOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO.....	59
FIGURA 4. 3 HIDROGRAMAS DE LOS GASTOS DE DISEÑO DE LOS RÍOS TAMESÍ (PANEL IZQUIERDO) Y PÁNUCO (PANEL DERECHO).....	73
FIGURA 4. 5 HIDROGRAMAS DE LOS GASTOS DE DISEÑO DEL RÍO PÁNUCO ASOCIADO A LOS PERIODOS DE RETORNO DE 500 Y 100 AÑOS. EN COLOR NARANJA SE INDICA LA CURVA DEL GASTO QUE SE INGRESA A LA ESTACIÓN DE LAS ADJUNTAS, RESULTADO DE SUMAR LOS GASTOS DE LA ESTACIÓN OLIVO (CURVA VERDE) Y LA DESCARGA DE LA PRESA PUJAL-COY (CURVA ROSA)	75
FIGURA 4. 6 HIDROGRAMAS DE DISEÑO CORRESPONDIENTES A LAS ESTACIONES PUJAL Y BALLESMI.....	80

FIGURA 4. 7 LAS LLUVIAS MÁXIMAS ACUMULADAS EN MM EN 24 HORAS REGISTRADAS EL DÍA 30 DE JUNIO FUERON DE 348.8 MM EN EL RÍO TAMESÍ Y 231 MM EN EL RÍO PÁNUCO (CFE-GEIC-HIDROMETEOROLOGÍA, 2011)	81
FIGURA 4. 8 PANEL IZQUIERDO: IMAGEN SATELITAL DEL DÍA 7 DE JULIO DE 2011 (NASA/GSFC, RAPID RESPONSE). PANEL DERECHO: IMAGEN OBTENIDA A PARTIR DE LA SIMULACIÓN CON MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA MISMA FECHA Y CON EL HIDROGRAMA DEL 50%.	83
FIGURA 5. 1 INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO CON UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.....	86
FIGURA 5. 2 PUNTOS DE ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE SUPERFICIE	87
FIGURA 5. 3 INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO CON UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS.....	89
FIGURA 5. 4 PUNTOS DE ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE SUPERFICIE	90
FIGURA 5. 5 INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO CON UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS, Y CON LA REGULACIÓN DE LA PRESA CON UNA DESCARGA DE 1000 M ³ /S.....	94
FIGURA 5. 6 INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO CON UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS, Y CON LA REGULACIÓN DE LA PRESA CON UNA DESCARGA DE 1500 M ³ /S.....	96
FIGURA 5. 7 INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO CON UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS, Y CON LA REGULACIÓN DE LA PRESA CON UNA DESCARGA DE 1000 M ³ /S.....	98
FIGURA 5. 8 INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PÁNUCO CON UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS, Y CON LA REGULACIÓN DE LA PRESA CON UNA DESCARGA DE 1500 M ³ /S.....	100
FIGURA 5. 9 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E HIDRÁULICAS DE UN CANAL	102
FIGURA 5. 10 COMPARACIÓN DE LA PROFUNDIDAD TOTAL DEL AGUA UBICADA SOBRE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN DEL RÍO PÁNUCO Y TAMESÍ, SIMULANDO LOS ESCENARIOS CON EL TR=100 AÑOS	104
FIGURA 5. 11 COMPARACIÓN DE LA PROFUNDIDAD TOTAL DEL AGUA UBICADA SOBRE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN DEL RÍO PÁNUCO Y TAMESÍ, SIMULANDO LOS ESCENARIOS CON EL TR=500 AÑOS	106

Lista de Tablas

TABLA 2. 1 CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE CLIMAS EN LA REGIÓN DEL PÁNUCO.....	36
TABLA 2. 2 CICLONES TROPICALES QUE AFECTARON A LA CUENCA BAJA DEL PÁNUCO EN 1955 (ATLAS NACIONAL DE RIESGOS)	41
TABLA 2. 3 CICLÓN TROPICAL QUE AFECTÓ A LA CUENCA BAJA DEL PÁNUCO EN 1976 ((ESTIMACIÓN DEL GASTO POR LA SRH, 1961).....	44
TABLA 2. 4 CICLÓN TROPICAL GERT EN 1993 Y LOS EFECTOS EN EL RÍO TAMESÍ ((ESTIMACIÓN DEL GASTO POR LA SRH, 1961)	45
TABLA 3. 1 DATOS DEL PROYECTO DE LA PRESA PUJAL-COY.....	57
TABLA 3. 2 DATOS HIDROMÉTRICOS	57
TABLA 3. 3 DATOS DEL VASO.....	57
TABLA 3. 4 DATOS DE LA CORTINA	57
TABLA 3. 5 DATOS DEL DIQUE	58
TABLA 3. 6 DATOS DEL VERTEDOR	58
TABLA 4. 1 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS UTILIZADAS EN LA ESTIMACIÓN DEL GASTO DE DISEÑO	76
TABLA 5. 1 COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE SUPERFICIE (METROS) OBTENIDOS CON MODELO 1D (CRUZ-QUIROZ, 2012) Y MODELO 2D	87
TABLA 5. 2 COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE SUPERFICIE (METROS) OBTENIDOS CON MODELO 1D (CRUZ-QUIROZ, 2012) Y MODELO 2D	90
TABLA 5. 3 COMPARACIÓN DE LA PROFUNDIDAD TOTAL DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE REFERENCIA DEL RÍO PÁNUCO Y TAMESÍ, UBICADOS SOBRE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN PARA EL ESCENARIO CON EL TR=100 AÑOS	103
TABLA 5. 4 COMPARACIÓN DE LA PROFUNDIDAD TOTAL DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE REFERENCIA DEL RÍO PÁNUCO Y TAMESÍ, UBICADOS SOBRE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN PARA EL ESCENARIO CON EL TR=500 AÑOS	105
TABLA 5. 5 COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE INUNDACIÓN OBTENIDOS A PARTIR DE LAS SIMULACIONES	107

INTRODUCCIÓN

“Los secretos del agua... en efecto, no es con violencia como se pueden hurtar sus secretos, sino con amor; con esa comprensión que se deriva de una larga convivencia con ella, tan larga que ni la vida de un individuo, ni la de muchas generaciones, es suficiente. Hay que atesorar todo lo que la humanidad ha venido aprendiendo, a veces a costa suya, dejándose sorprender; otras, al intentar precaverse, realizando observaciones, ensayos, cálculos...”

*Enzo Levi
El agua según la ciencia (1989)*

En recientes décadas, alrededor del mundo se han incrementado de manera alarmante los eventos hidrometeorológicos, en frecuencia e impacto. Los ciclones tropicales (huracanes, tifones), deslizamientos de taludes e inundaciones –todos los riesgos relacionados con el agua- que ha devastado a millones de personas.

Por supuesto, que no es posible controlar las fuerzas de la naturaleza, no se puede evitar que un ciclón tropical tome tierra en determinado sitio, pero es posible intervenir en los ríos a través de la construcción de estructuras, que coadyuven moderadamente, nunca de manera total, a controlar los efectos de las inundaciones.

El almacenamiento del agua es una alternativa para el control de inundaciones, la construcción de presas permite distribuirla en la época y en los sitios que se requieren, reduciendo los daños aguas abajo. Son las autoridades operadoras de las presas a quienes les corresponde reducir la vulnerabilidad aguas abajo de la estructura, para ello se debe contar con una política de operación óptima de la obra de excedencias, se tiene como precedente el análisis de la presa Pujal-Coy (Bolaños, 2013).

Como se ha citado a Enzo Levi, la comprensión del agua lleva años, tal es el caso de la cuenca en estudio del río Pánuco que comenzó a analizarse a partir de las inundaciones de 1955, desde entonces han pasado los años y generaciones de especialistas intentando dar solución al problema de las inundaciones.

Actualmente se tienen herramientas tecnológicas como la modelación numérica de flujos de inundación. En la cuenca baja del río Pánuco se han evaluado algunas medidas estructurales, se tienen como antecedentes el estudio con un modelo unidimensional (Pedrozo et al, 2011) y (Cruz-Quiroz, 2012) en los cuales se concluyó que la alternativa de la Presa Pujal-Coy reflejó un mayor beneficio entre todas las evaluadas.

Objetivos

Analizar el funcionamiento hidrodinámico de la Cuenca Baja del Río Pánuco con los gastos de que provienen de los ríos Pánuco y Tamesí asociados a los periodos de retorno de 100 y 500 años, esto permite estimar los efectos de inundación en la planicie.

Posteriormente se evaluará la eficiencia que aporta la presa reguladora Pujal-Coy con diferentes políticas de operación de la obra de excedencias.

De modo que los escenarios que se obtendrán para los $T_r=100$ y 500 años:

- Sin considerar la presa
- Para las descargas máximas de la presa Pujal-Coy 1) $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y 2) $Q= 1500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Organización del Trabajo

Capítulo 1. Perspectiva global de las inundaciones

Para introducir al tema de las inundaciones se presentan las bases conceptuales, como las causas y tipos de inundaciones. También se ha considerado el efecto del cambio climático, el cual se hace más evidente a nivel mundial, sus efectos se manifiestan dentro del ciclo hidrológico como sequías e inundaciones

Capítulo 2. Zona de estudio

De la zona de estudio se describen algunas características físicas, como la hidrografía, fisiografía, clima, precipitación, evapotranspiración y escurrimiento que pertenecen a la Región Hidrológica del Pánuco número 26, en la que se tienen definidas tres zonas: altiplano, sierra, baja o planicie.

Desde el años de 1933 se tienen registros de inundaciones con graves consecuencias, una de las más devastadoras de la cuenca baja del río Pánuco es la ocurrida en 1955, a partir de esta inundación se comenzaron a formalizar los estudios. Las siguientes inundaciones históricas que se refieren a la cuenca son los eventos de 1976, 1933 y el más reciente en el 2011.

Capítulo 3. Presa Pujal-Coy

En cierta medida, las inundaciones pueden ser eventos que pueden ser sobrellevados, con alternativas estructurales como las presas. El proyecto de la presa Pujal-Coy propuesto en la década de los setentas, con la finalidad de aumentar la producción agrícola y ayudar al control de las inundaciones en la Cuenca del Pánuco. Recientemente se ha planteado retomar este proyecto y por ello será de gran utilidad la evaluación hidráulica aguas abajo de la presa, para estimar el efecto de la presa.

Capítulo 4. Metodología

La metodología refiere a dos partes complementarias, la primera al modelo hidrodinámico en dos dimensiones y algunas bases teóricas de su funcionamiento, y la segunda a la puesta a punto del modelo, la generación de la malla, las condiciones de frontera tomando como base los resultados en el estudio de avenidas (Mandujano, 2011) y la validación con el evento de inundación por la tormenta tropical Arlene (Pedrozo et al, 2012).

Capítulo 5. Resultados

En este capítulo se presentan los mapas de inundación en condiciones sin presa, para los periodos de retorno de 100 y 500 años, también se comparan los niveles de superficie obtenidos con el modelo 2D respecto al anterior 1D. Posteriormente se evalúa el funcionamiento de la presa, a partir de los mapas de inundación con los dos tipos de descarga de la presa $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$

Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Por último se realiza una conclusión general de los resultados y las aportaciones logradas en el estudio. También se mencionan aspectos que se deben continuar en otros estudios.

CAPÍTULO 1. PERSPECTIVA GLOBAL DE LAS INUNDACIONES

El agua es un recurso natural renovable, pero limitado. De acuerdo con la Asamblea General de las Naciones Unidas en el año 2003, se ha manifestado que la disponibilidad del agua dulce es uno de los problemas más importantes a los que enfrenta la humanidad en el presente, y la situación se tornará más crítica en un futuro.

La escasez del agua puede generar el riesgo de conflictos entre las naciones, tal es el caso de Israel y Palestina que dependen de los mismos acuíferos para el suministro de agua. De acuerdo con algunas investigaciones (Wolf, et al., 2006) los límites entre muchos países justamente están denotados por los cuerpos de agua, donde aproximadamente el 40% de la población se asienta en cuencas fluviales, compartidas por más de un país. En México, un claro ejemplo es el río Grande/Bravo compartida al norte con Estados Unidos de Norteamérica.

La relación entre el agua y la lucha contra el problema del hambre es inherente, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2008) plantea que la seguridad alimentaria se basa en estrategias como el aumento de la superficie cultivable y el incremento de la intensidad del cultivo, siendo el eje central la disponibilidad del agua. Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2007) señala que al garantizar el acceso al agua y a instalaciones sanitarias adecuadas, independientemente de sus condiciones de vida se habrá ganado una importante batalla contra todo tipo de enfermedades. Sin dejar de mencionar que el consumo de agua se destina para llevar a cabo las actividades económicas, como es el caso la generación de energía y el desarrollo de la industria.

Con lo anterior, se confirma que el agua es el elemento esencial para la conservación de toda forma de vida. Por ello, la historia de la humanidad se ha asentado alrededor del agua, siendo el factor determinante para el desarrollo de las poblaciones.

Pero, ¿qué sucede cuándo la abundancia de los recursos hídricos se convierte en una amenaza?...Resulta paradójico que el agua sea indispensable para la vida y el desarrollo, y que al mismo tiempo pueda destruir lo que se encuentra a su alrededor.

Desde la perspectiva mundial, las inundaciones son los desastres que ocurren con mayor frecuencia, generando impactos sociales-económicos que superan cuantiosamente a todos los desastres naturales. Las inundaciones representan más del 40% de los desastres

naturales (Ohl y Tapsell, 2000). De acuerdo con los datos que de la Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT, 2011) los eventos de inundación en el 2010 fueron responsables de la pérdida de más 8,000 vidas humanas y provocaron afectaciones a cerca de 180 millones de personas. En la Figura 1.1 se muestra la frecuencia de inundaciones en el mundo, de acuerdo con el aumento de la frecuencia de las inundaciones, se intensifica el tono azul.

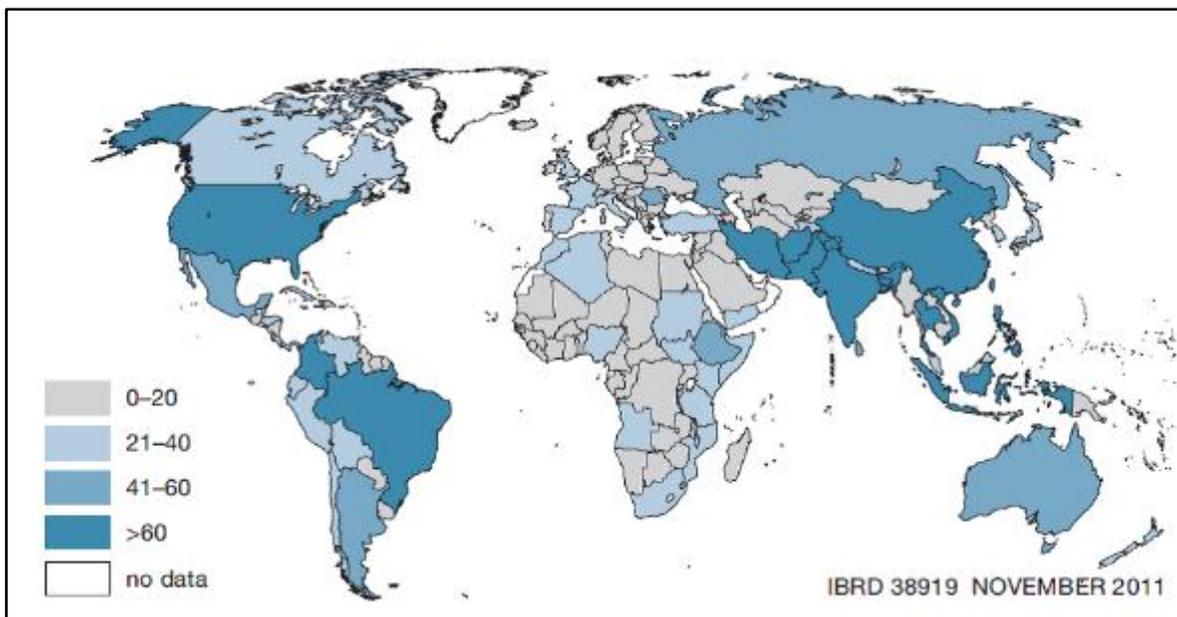


Figura 1. 1 Eventos de inundación en todo el mundo, correspondiente al periodo de 1970-2011 (EM-DAT, 2011)

Se advierte que el riesgo de inundación va en aumento en las zonas urbanizadas, que muestran una expansión e incremento en la densidad de población (ICFM5, 2011).

El caso de Europa en el siglo XXI ha sido marcado por las inundaciones devastadoras; en agosto de 2002, una inundación épica en Alemania, en la cuenca del río Elba (Ver Figura 1.2), causando pérdidas aseguradas de más de € 1.80bn. Más tarde, entre los años 2005 y 2006, un embate de inundaciones dañó grandes sectores de Baviera. El verano de 2007, fue el más lluvioso en el Reino Unido, las compañías aseguradoras pagaron aproximadamente £3 mil millones en más de 165 mil demandas de seguro contra inundaciones por el tiempo que había pasado.



Figura 1. 2 Inundación ocurrida en la cuenca del río Elba, Alemania (AIR, 2011)

En el 2010 se produjeron inundaciones altamente destructivas, tal es el caso de la inundación acaecida en el mes de septiembre en Pakistán; a finales del mismo año se presentaron inundaciones en Australia, Sudáfrica, Sri Lanka y Filipinas. A principios del año 2011 ocurrieron los deslizamientos de tierra en la región de Serrana, Brasil; y en marzo, a lo largo del río Mississippi se generó un terremoto inducido a partir del tsunami acontecido en la costa noreste de Japón; otros eventos de inundación suscitados en el 2011, en la costa este de los Estados Unidos (como consecuencia del huracán Irene), Pakistán y Tailandia. (Cities & Flooding, 2011). En la Figura 1.3 muestra la afectación de inundaciones en Bangkok, Tailandia ocurridas en el 2011.



Figura 1. 3 Una mujer camina con el agua hasta el nivel del pecho, la inundación corresponde al evento de inundación del 2011, en Bangkok, Tailandia. (Cities & Flooding, 2011).

Es posible que aumente el riesgo de inundaciones debido a muchos factores, tales como los cambios demográficos, los cambios de uso del suelo, la variabilidad y el cambio climático, condiciones tecnológicas y socioeconómicas, el desarrollo industrial, la expansión urbana y la construcción de infraestructura en las zonas inundables, así como asentamientos humanos no planificados en las llanuras aluviales (ONU-EIRD Comité Científico y Técnico, 2009).

En la actualidad el manejo del riesgo de inundación incluye el enfoque contra las inundaciones (conviviendo con las inundaciones), que ha sustituido al enfoque más tradicional de defensa contra las inundaciones (luchando contra las inundaciones). En la Figura 1.4 se muestra un diagrama sobre el manejo integral de las inundaciones.

Este nuevo enfoque tiene como objetivo minimizar las pérdidas humanas, económicas y ecológicas de las inundaciones extremas y, al mismo tiempo, desarrollar beneficios sociales, económicos y ecológicos (por ejemplo, UNESCO-IFI: Iniciativa Internacional sobre Inundaciones).



Figura 1. 4 Un enfoque comunitario para la Gestión Integral del Riesgo de Inundación (ICE, 2012)

De manera inmediata se pierden vidas humanas como consecuencia de los eventos de inundación, siendo una situación modificable por reducir o aumentar, según las medidas de gestión de riesgos que se lleven a cabo. Lo cual resulta alentador, sobre todo para los países en vías de desarrollo donde las inundaciones tienen un impacto desproporcionado en los sectores con mayor grado de pobreza.

En algunos casos, las acciones ligadas a la gestión de riesgos de inundación resultan menos costosas que las pérdidas económicas generadas por un desastre. Por tal motivo es conveniente estudiar y reflexionar sobre los aspectos más significativos en el tema de las inundaciones.

1.1 Bases conceptuales sobre las inundaciones

A fin de establecer las bases conceptuales, y debido a los múltiples estudios científicos que intentan explicar el fenómeno de las inundaciones; la definición oficial de inundación, de acuerdo con el glosario internacional de hidrología (OMM-UNESCO, 1974) se define como: “el aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”, el nivel normal es la elevación de la superficie del agua que no provoca daños.

En este trabajo se considera al término de inundación, como se presenta en el recuadro (CENAPRED, 2007)

Inundación

Se considera inundación al evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay. Y generalmente produce daños en la población, la agricultura, la ganadería y la infraestructura.

1.1.1 Causas y tipos de inundaciones

Las inundaciones generalmente se deben a una combinación de los fenómenos extremos meteorológicos e hidrológicos, como las abundantes precipitaciones y las avenidas extraordinarias.

Sin embargo, es necesario tener en mente que la configuración del paisaje natural sin la presencia del hombre, mantenía un equilibrio: el agua que llovía en las zonas montañosas bajaba por los cauces e inundaba las zonas bajas, para luego volver a su estado inicial. Posterior a la aparición del hombre, se desarrollaron asentamientos humanos en las zonas aledañas a los cuerpos de agua. (Cities & Flooding, 2011).

Las clasificaciones de las inundaciones varían y se basan en combinación con las fuentes que la generan, las causas y los impactos.

Con base al origen, las inundaciones pueden caracterizarse en general como:

- Inundaciones fluviales (generadas por río)
- Inundaciones pluviales
- Inundaciones costeras
- Inundaciones por fallas de sistemas artificiales.

Inundaciones fluviales

Una inundación fluvial se produce cuando el caudal de las avenidas generadas en una cuenca supera la capacidad del cauce (desbordamiento). Los desbordamientos son un evento de lluvias fuertes o continuas que sobrepasan la capacidad de absorción del suelo y la capacidad de carga de los ríos. (Leopold et al., 1964)

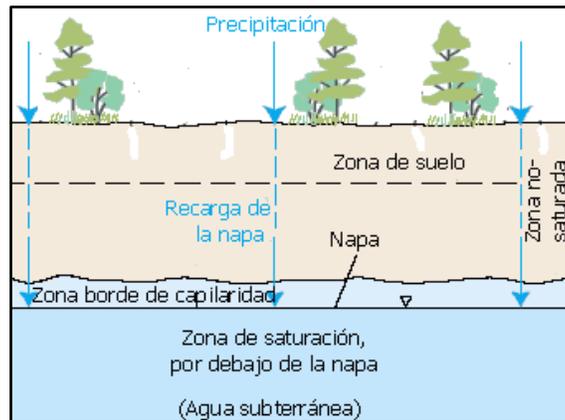


Figura 1.5 El agua que precipita fluye sobre el terreno hasta llegar a ríos y lagos (agua de escorrentía), pero otra parte se infiltra, cuando llueve, o desde los ríos y lagos. (Geólogos sin fronteras, 2012)

Por tanto, se produce el rebase del nivel normal del cauce e inunda tierras adyacentes, conocidas como llanuras de inundación, en la Figura 1.6 se muestran en color gris. En términos hidrológicos, está mejor definida como una forma de terreno sujeta a inundaciones periódicas por un río principal. Una llanura de inundación se define como una franja de tierra relativamente plana, junto a un río y que se desborda de las aguas durante las crecidas (Leopold et al., 1964)

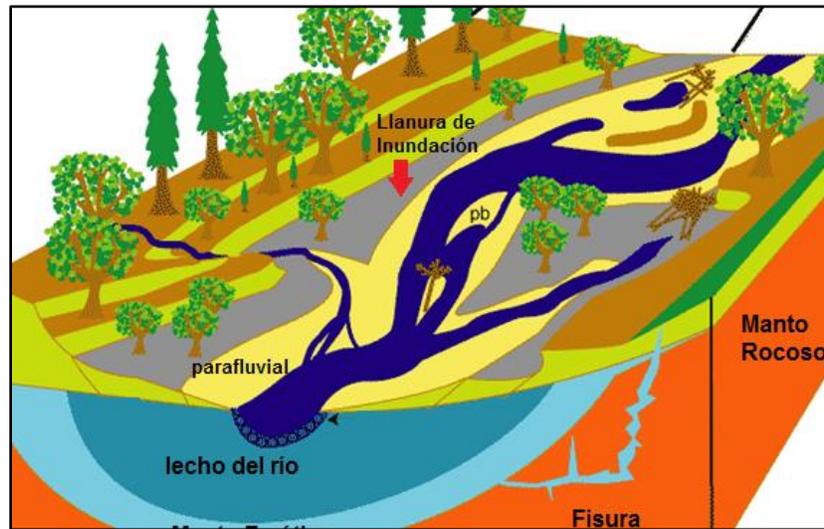


Figura 1. 6 Sección transversal de la morfología de un río (Sanford, J. A., 1998)

El volumen que escurre sobre el terreno a través de los cauces, se incrementa con el área de aportación de la cuenca, por lo que las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con más desarrollo (longitud) o que lleguen hasta las planicies costeras.

Inundaciones pluviales

Son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días. La principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna otra parte (por ejemplo de la parte alta de la cuenca).

A estos fenómenos se suman el efecto ejercido por las cadenas montañosas (lluvia orográfica), además del convectivo, que ocasiona tormentas de corta duración y poca extensión, pero muy intensas (lluvias convectivas). Se muestra un diagrama de los mecanismos de precipitación en la Figura 1.7.



Figura 1. 7 Principales mecanismos por los que se genera la precipitación

Inundaciones costeras

Las inundaciones costeras se originan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno.

La marea de tormenta es generada por los vientos de los ciclones tropicales sobre la superficie del mar y por la disminución de la presión atmosférica en el centro de estos meteoros (Ver Figura 1.8). Por su parte, el oleaje en el océano puede ser provocado por diferentes factores; sin embargo, su causa más común es el viento. La suma de los efectos de ambos fenómenos, puede causar importantes estragos. En el fascículo de Ciclones Tropicales (Jiménez, *et al*, 2003), puede encontrarse más información al respecto

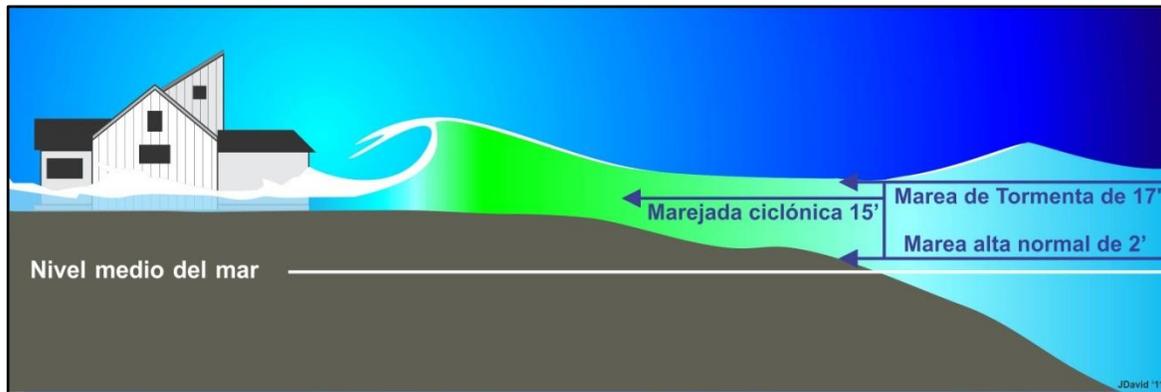


Figura 1. 8 Inundación costera debido a la marea de tormenta (NOAA Hurricane Reaserch Divison, 2010)

Inundaciones por falla de infraestructura hidráulica

Existe una causa que puede generar una inundación, aún más grave que las antes mencionadas: si la capacidad de las obras destinadas para protección es insuficiente, la inundación provocada por la falla de dicha infraestructura será mayor que si no existieran obras. Eventualmente, dichas obras pueden presentar fallas en su funcionamiento hidráulico debido a diferentes factores:

1. Diseño Escaso
2. Mala operación
3. Falta de mantenimiento o término de la vida útil de la obra.

1.2 Efecto del cambio climático a nivel mundial

En la primera sección de este capítulo, se describieron las causas, los efectos y tipos de inundaciones. En esta sección se hace referencia a un proceso llamado cambio climático y que tiene efecto en las inundaciones.

El cambio climático es un factor importante que aumenta el riesgo de inundaciones. La intensidad y la frecuencia de las lluvias torrenciales se intensifican notablemente, tal como se evidenció en Taiwán (2009) y en Japón (2011). (ICFM5, 2011).

Por tal motivo, se ha conformado el Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC (por sus siglas en inglés) fundado con el propósito de evaluar la información científica, técnica y socioeconómica relevante para la comprensión del riesgo del cambio climático inducido por el hombre.

El IPCC ha establecido la definición de cambio climático (Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, 2007)

Definición de Cambio Climático (IPCC)

- Es una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más).
- El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras.

1.2.1 Causas del cambio climático

A partir de la publicación del Segundo Informe de Evaluación del IPCC, se ha mejorado el análisis de datos de corrientes y paleoclimas, la evaluación de la calidad de datos, la comparación entre diferentes datos han conducido a una mayor comprensión para del cambio climático.

El cambio climático se produce como resultado de la variación interna y los factores externos (naturales y antropogénicos). El término «forzamiento radiativo» ha sido utilizado por el IPCC con el sentido específico de una perturbación externa impuesta al balance radiativo del sistema climático de la Tierra, que puede conducir a cambios en los parámetros climáticos. (Climate Change 2001: The Scientific Basis)

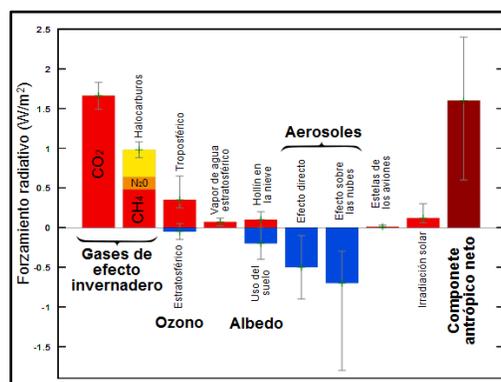


Figura 1. 9 Cambio en el forzamiento radiativo entre 1750 y 2005 según las estimaciones del IPCC.

Las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004 (Figura 1.11). El dióxido de carbono (CO_2) es el GEI antropógeno más importante. Sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004. La disminución a largo plazo de las emisiones de CO_2 por unidad de energía suministrada invirtió su tendencia a partir del año 2000.

Los aumentos de la concentración mundial de CO_2 se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra. Es *muy probable* que el aumento observado de la concentración de CH_4 se deba predominantemente a la agricultura y a la utilización de combustibles de origen fósil. (Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, 2007)

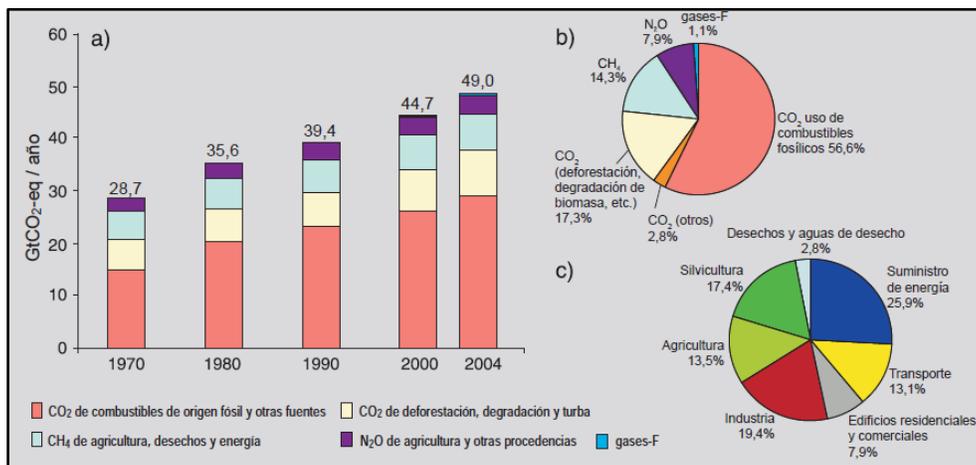


Figura 1. 10 a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004. b) Parte proporcional de diferentes GEI antropógenos respecto a las emisiones en 2004, en término de CO_2 . c) Parte proporcional de diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO_2 . (Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, 2007)

1.2.2 Efectos del cambio climático

El calentamiento proyectado para el siglo XXI apunta a unas pautas geográficas similares, con independencia del escenario, a las observadas en los últimos decenios. Se espera un calentamiento máximo sobre tierra firme y en la mayoría de las latitudes septentrionales altas, y mínimo sobre el Océano Austral (cerca de la región antártica) y sobre el norte del Atlántico Norte, en continuidad con las tendencias recientes observadas como en la Figura 1.11 (Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, 2007)

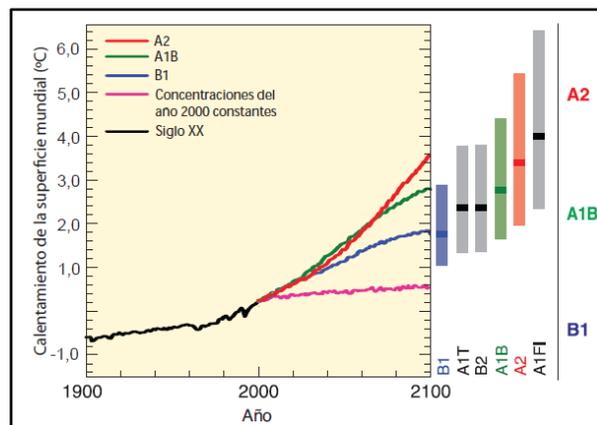


Figura 1. 11 Proyecciones del calentamiento en superficie obtenidas de un modelo de circulación general atmósfera-oceano: Las líneas de trazo continuo representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie (respecto del período 1980-1999). (Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, 2007)

Según una franja de modelos, es probable que en el futuro los ciclones tropicales (tifones y huracanes) sean más intensos, con máximos más intensificados de la velocidad del viento y mayor quebundancia de precipitaciones intensas, todo ello vinculado al constante aumento de la temperatura superficial de los mares tropicales.

Es muy probable que aumente la precipitación en latitudes altas, y probablemente disminuya en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales, aproximadamente como en un 20% (Figura 1.12).

Además, la dilatación térmica por sí sola originaría un aumento de nivel del mar de 0,3 a 0,8 m de aquí a 2300 (respecto de 1980-1999). La dilatación térmica proseguiría durante muchos siglos, debido al tiempo necesario para transportar calor hacia las capas profundas del océano.

Las costas estarían expuestas a mayores riesgos, y en particular a la erosión, por efecto del cambio climático y del aumento de nivel del mar. Este efecto se vería exacerbado por la creciente presión ejercida por la presencia humana sobre las áreas costeras. De aquí al decenio de 2080 padecerían inundaciones todos los años por efecto del aumento de nivel del mar muchos millones de personas más que en la actualidad. La población afectada sería máxima en los grandes deltas de baja altura y alta densidad de población de Asia y África, en tanto que las islas pequeñas serían especialmente vulnerables. (Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, 2007)

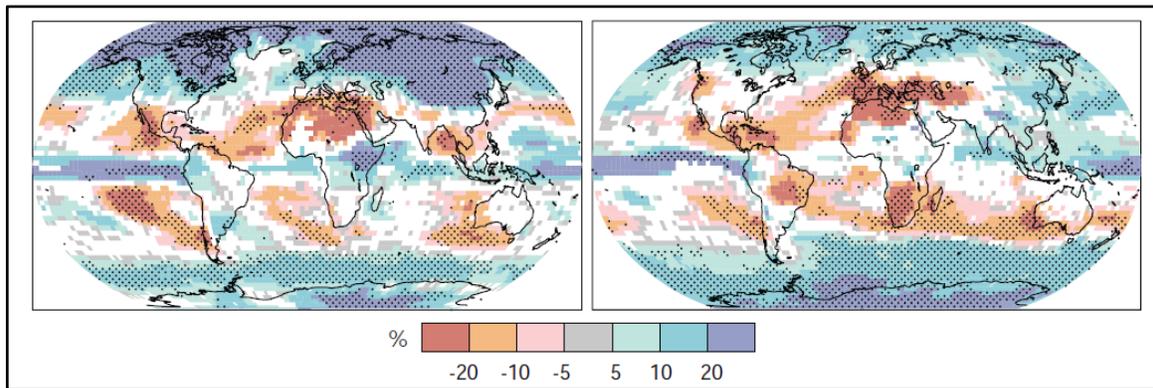


Figura 1. 12 Cambios de la precipitación relativos periodo 2090-2099, respecto del periodo 1980-1999. Los periodos de diciembre-febrero (izq.) y de junio a agosto (der.). Las áreas en blanco representan los lugares en que más de un 66% de los modelos coinciden con el signo del cambio, y las áreas punteadas representan los lugares en que más de un 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio. (Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, 2007)

En esta época de incremento de riesgo, se presentan nuevas oportunidades a la comunidad científica, como la oportunidad de equilibrar los estilos de vida con el ambiente. Se tiene la oportunidad para avanzar en la ciencia y hacer uso racional del conocimiento científico. La reducción del riesgo de desastres reduce los daños que de otro modo podrían impedir la continuidad del desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental

El intercambio de información a escalas local, regional, nacional e internacional es un elemento esencial del proceso de gestión del riesgo de inundación. Con eventos internacionales relacionados al riesgo de inundación, tales como la Primera Conferencia del Riesgo de Desastres (Beijing, 2011), el Sexto Foro Mundial del Agua (Marsella, 2012), Rio +20 (Rio de Janeiro, 2012), el Riesgo de Inundaciones (Rotterdam, 2012) y la 3^a Conferencia Mundial sobre Reducción de Desastres (Japón, 2015). (ICFM5: Final Statement, 2011).

CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO

La Cuenca del río Pánuco constituye una de las principales cuencas del país, tanto por su extensión como por el hecho de que abarca de manera artificial a la Cuenca de México, a través del cauce principal, el río Pánuco, lleva a cabo su drenaje hacia el Golfo de México. En este capítulo se describen las características físicas más importantes de la Cuenca del Pánuco que dan origen a los eventos de inundación en la parte baja (conocida como la Cuenca Baja del río Pánuco). Ella está sujeta a la influencia de fenómenos meteorológicos, y por su configuración física, la hidrografía, climatología y otros aspectos se relacionan de forma particular con el ciclo del agua.

2.1 Ubicación de la Cuenca del Río Pánuco

En la vertiente oriental de México se localiza la Región Hidrológica 26 del Río Pánuco, entre las coordenadas 19° y 24° de la latitud norte y 97°45' y 101°20' de longitud oeste.

Se encuentra limitada por tres regiones hidrológicas, al *norte* con la del Río Soto La Marina, al *sur* con la Cuenca del Río Tula, al *este* por la Cuenca Laguna Morales-San Andrés, el Golfo de México y la región hidrológica Norte de Veracruz y al *oeste* limita con las regiones hidrológicas el Salado y Lerma Santiago. (CNA, 1994).

La región del río Pánuco comprende en una superficie de 84,956 km² (la cuarta más grande del país), atraviesa las entidades de: Hidalgo, Querétaro, Estado de México, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz. En la Figura 2.1 se muestra la ubicación en el mapa de México.

La zona de estudio en el río Pánuco, se fijó a partir de Ciudad Valles, San Luis Potosí donde se plantea ubicar la presa, hasta la desembocadura en el río en el Golfo de México. En el panel inferior derecho de la Figura 2.1 se indica la zona de estudio entre las cuencas del Pánuco y Tamesí.

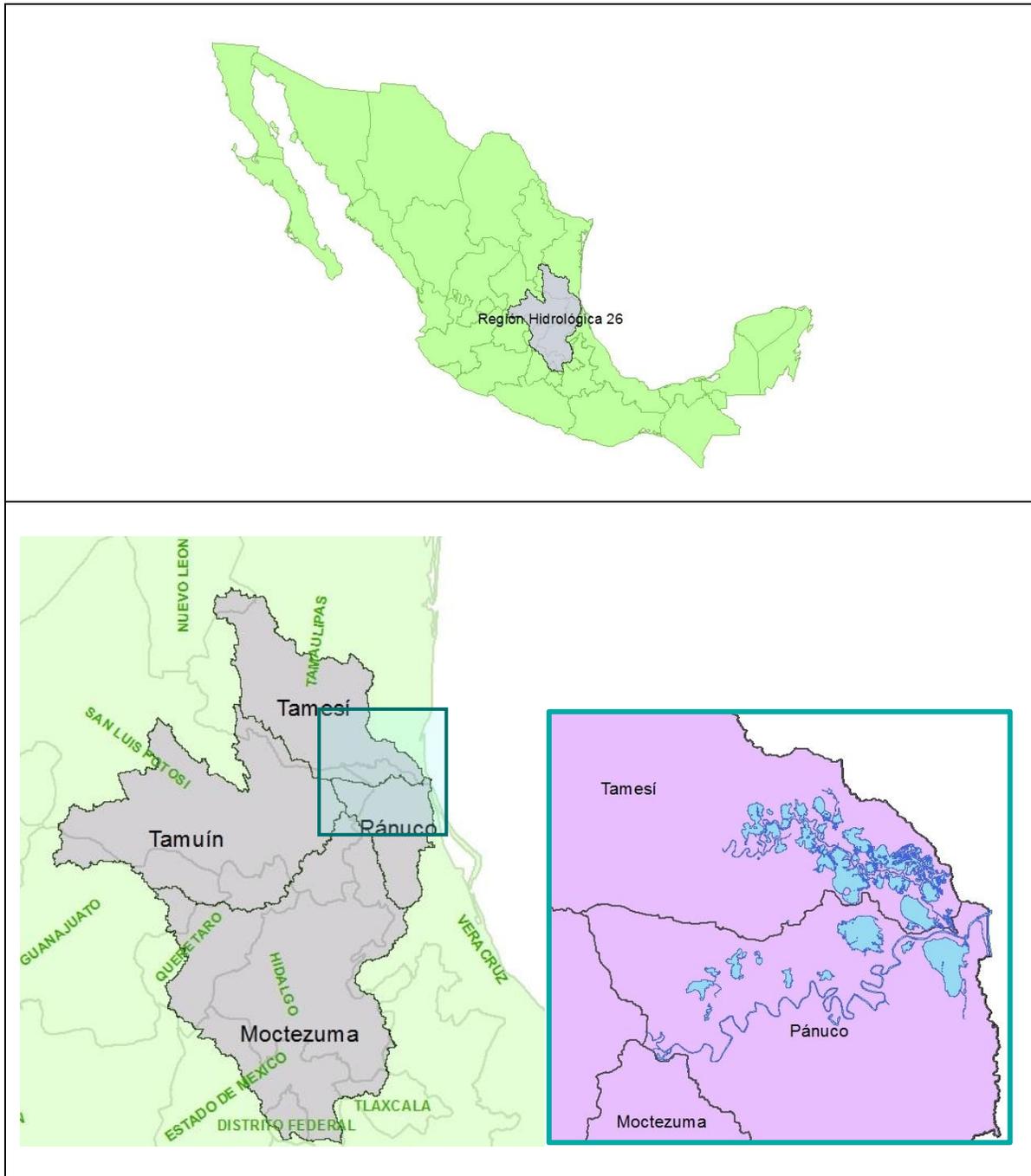


Figura 2. 1 En el panel superior se muestra la ubicación de la región hidrológica del Pánuco en la República Mexicana; en el panel inferior (izquierda) las divisiones de las cuencas, la zona de estudio se ubica en el recuadro (a la derecha)

La mayor parte de la zona de estudio se encuentra en el estado de Veracruz (abarcando las porciones norte), la parte sureste que corresponde al Estado de Tamaulipas, finalmente, la porción suroccidental, corresponde al Municipio de Cd. Valles en el Estado de San Luis Potosí.

2.2 Características físicas de la zona de estudio

La Cuenca del río Pánuco es una región una de las más abundantes del país, por el volumen de sus escurrimientos que le otorgan el quinto lugar a nivel nacional con 73,549 Mm³ al año (CONAGUA, Región IX Golfo Norte). Presenta una gran diversidad en cuanto a las características físicas (fisiografía, clima, vegetación, etc.), debido a su gran tamaño. Pero resulta espacialmente de difícil control y aprovechamiento de aguas.

Dentro de la Cuenca del río Pánuco se definen tres regiones:

1. Zona del Altiplano, con poca precipitación en donde el recurso agua es escaso y debe propiciarse la reducción de pérdidas en sus diferentes usos, rehusarse en industrias y reciclarse para aprovechamiento aguas abajo
2. Zona de la Sierra, fuerte precipitación, sin grandes consumos de agua pero factible su aprovechamiento en generación de energía eléctrica
3. Zona Baja o Planicie Costera, con gran potencial para desarrollos urbanos-industriales y de riego, pero está sujeta al embate de las inundaciones provocadas por las avenidas originadas por fenómenos meteorológicos en la Cuenca. La contribución económica de la cuenca, se debe en parte a los escurrimientos en la zona baja de la cuenca que permiten el desarrollo de la agricultura. Además en la región del Golfo de México se extrae la mayor parte del petróleo que produce el país.

2.2.1 Hidrografía

El cauce principal de la cuenca tiene su origen en el río Tepeji o San Jerónimo, controlado por las presas del Taxhima y Requena, donde cambia su nombre a *río Tula* (Ver Figura 2.2). Su formación se localiza en el Cerro de la Bufo dentro del Estado de México, a una elevación de 3,800 metros.

La corriente se dirige hacia el norte, hasta la población de Ixmiquilpan, Hidalgo, a partir de esta población cambia su curso al noroeste hasta su confluencia con el río San Juan del Río, a una elevación de 1640 m, donde cambia su nombre a *río Moctezuma*, se muestra en la

Figura 2.2, y su rumbo al norte-noreste, que conserva hasta la confluencia del río Extóraz. En este tramo es donde comienza su inserción en la Sierra Madre Oriental, denotando una topografía accidentada e intensificándose a medida que desciende la corriente.

Desde la confluencia del río *Tempoal* hasta la del río *Tampaón*, el río Moctezuma sigue un rumbo norte-noroeste discurriendo por una topografía suave, en que las máximas elevaciones no exceden los 150 m. A partir de la confluencia del río Tampaón, que ocurre a la elevación aproximada de 20 m. el río Moctezuma recibe el nombre de río Pánuco, se puede ubicar la transición en la Figura 2.2. El río Pánuco continúa su curso con un rumbo general este-noreste hasta su desembocadura en el Golfo de México, aguas abajo de la ciudad de Tampico, Tamaulipas.

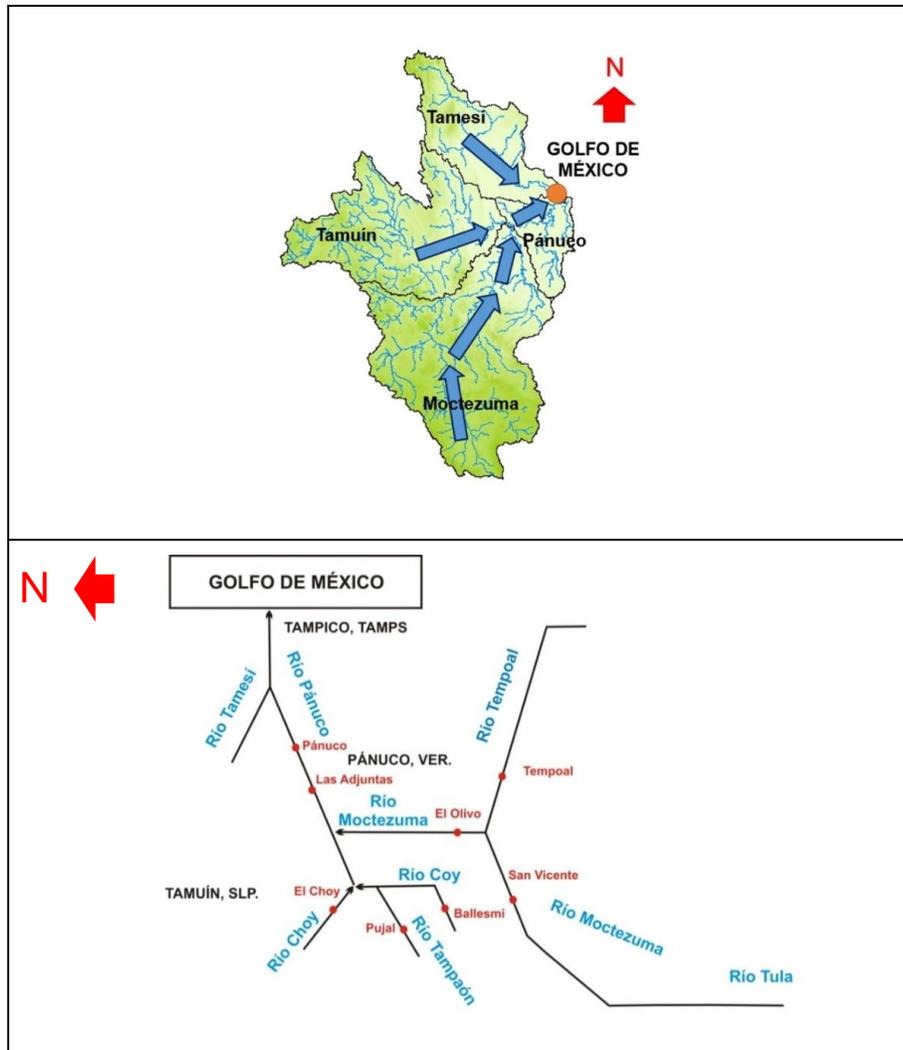


Figura 2. 2Panel superior: Sistema de drenaje de la región del Pánuco. Panel Inferior: Esquema simplificado de los principales ríos de la Cuenca del río Pánuco. Los puntos rojos indican las estaciones hidrométricas que se ubican en la cuenca

Para la descripción hidrográfica de la Cuenca Baja del río Pánuco, se ejemplifica con la analogía de un árbol de tronco corto con importantes ramificaciones, con un tronco principal una longitud de aproximadamente 180 km. Con un desnivel en época de estiaje de 7 metros, por tanto la pendiente estimada es de $S=0.00004$ y en época de crecientes el desnivel puede ser hasta de 23 m. para una pendiente $S=0.00013$.

Este último tramo del cauce principal –río Pánuco- se caracteriza por ser de pendientes suaves, con numerosos meandros y lagunas marginales de considerable extensión, alojadas en depresiones que en muchos casos tienen su lecho por abajo del nivel del mar (Ver Figura 2.3). Estas lagunas son alimentadas por los escurrimientos del río Pánuco, sirviendo como vasos reguladores durante las crecientes.

El sistema lagunar predomina hacia la margen izquierda, contándose entre las más importantes, las de Orilla Grande, Cerro Paz o Las Margaritas, Tamós y Chairel; en margen derecha la única de importancia es la de Pueblo Viejo, frente a la de Chairel, en las vecindades de Tampico, Tampaulipas.

El río Pánuco recibe por su margen izquierda, 16 km antes de su desembocadura al Golfo de México, las aportaciones del río Tamesí.



Figura 2. 3 El río Pánuco en su último tramo muestra numerosos meandros y pendiente suave. Reconocimiento aéreo de la zona de estudio (Pedrozo, 2011)

2.2.1.1 Río Tamesí

El río Tamesí, que también se conoce como río Guayalejo (hacia aguas arriba), es el afluente más importante del río Pánuco, tiene sus orígenes en el estado de Nuevo León pero la mayoría de su cuenca se localiza en el estado de Tamaulipas y en su parte baja drena una pequeña porción del estado de Veracruz. Su rumbo general es sureste y confluye por la margen izquierda al río Pánuco, ligeramente aguas arriba de Tampico, Tamaulipas. En el último tramo se caracteriza por tener diversos meandros, rodeado por lagunas de escasa profundidad que funcionan como vasos reguladores de los escurrimientos, especialmente en época de creciente. Tales lagunas y pantanos drenan la mayoría de los pequeños afluentes de este tramo, después de pasar sus escurrimientos, ya regularizados.

Las principales lagunas se muestran en la Figura 2.4 son: la Salada, Jopoy, Joselito, Quintero, Tortuga, Campayán, Mayorazgo y Chairel, esta última comprendida entre los ríos Pánuco y Tamesí, ligeramente aguas arriba de la ciudad de Tampico, frente a laguna de Pueblo Viejo.

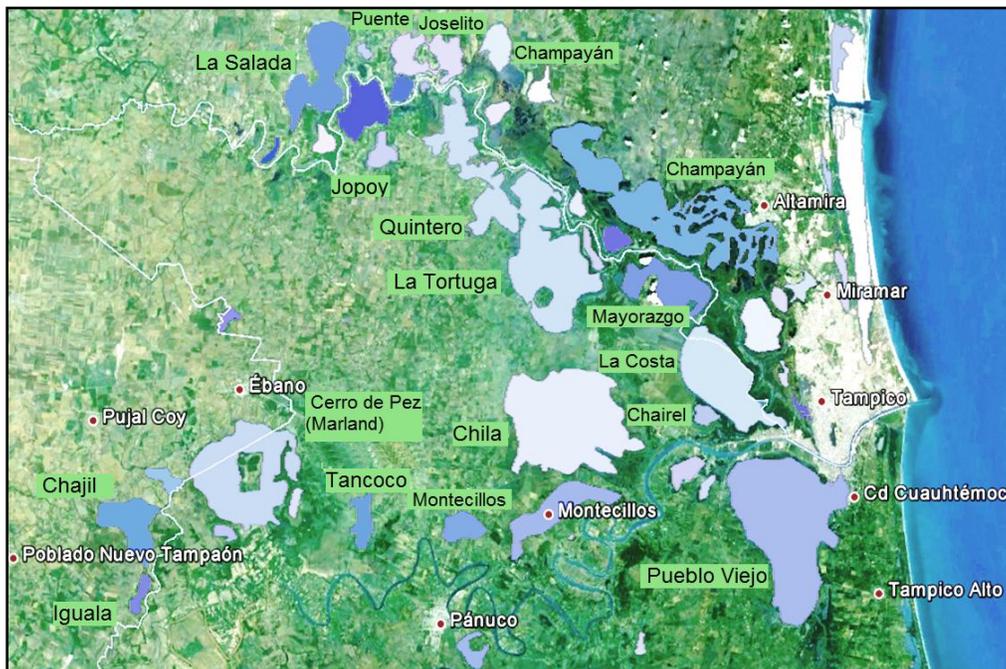


Figura 2. 4 Sistema Lagunar del río Tamesí (al norte) y del río Pánuco (al sur)

2.2.2 Fisiografía

La Cuenca del río Pánuco configurada por importantes sistemas orográficos como la Sierra Madre Oriental, drenada por el río Guayalejo desde Zaragoza, Nuevo León, hasta el sureste de Tulancingo, Hidalgo; donde se localizan los orígenes del río Metztitlán, zona en que la sierra se une a las estribaciones de la Cordillera Neovolcánica, límite austral de la Cuenca del Pánuco.

Las elevaciones de la Sierra Madre Oriental, dentro de la cuenca, oscilan notablemente. Tiene alturas máximas de 3,800 metros en el parteaguas común en el río Lerma y Valle de México y de 3,600 metros en los orígenes del río Tamesí o Guayalejo, descendiendo paulatinamente hasta elevaciones de 250 m en la zona de la confluencia de los río Verde y Santa María. La falda oriental de esta Sierra, baja bruscamente hacia la llanura costera. (INE, 1984). En la Figura 2.5 se muestran las elevaciones en toda la región del Pánuco, atravesando por las tres zonas: Altiplano, Sierra y la Planicie.

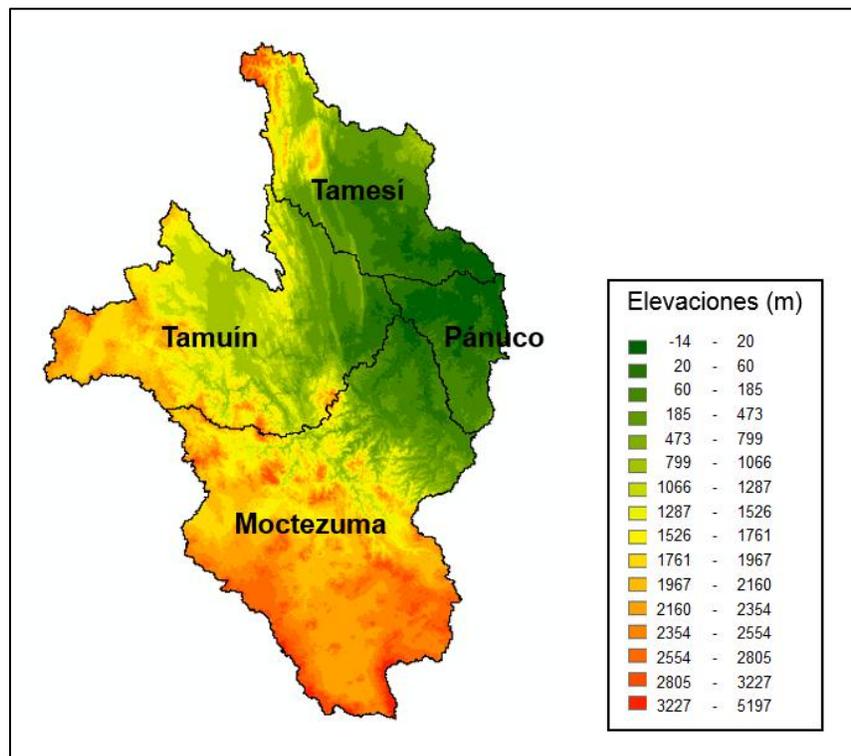


Figura 2.5 Modelo Digital de Elevaciones con resolución a cada 15 metros de la región del Pánuco (INEGI, 2014)

Las condiciones geológicas de esta parte son responsables de las características topográficas en la Cuenca Baja del río Pánuco.

En la región de la Cuenca Baja del río Pánuco, se encuentran sedimentos que fueron depositados en mares similares al actual Golfo de México predominantemente progresivos hasta llegar a la actual línea de costa. Esta parte de la cuenca, corresponde a la Llanura del Golfo de México, integrada claramente por una costa de emersión, con los siguientes rasgos que se muestran en la Figura 2.6:

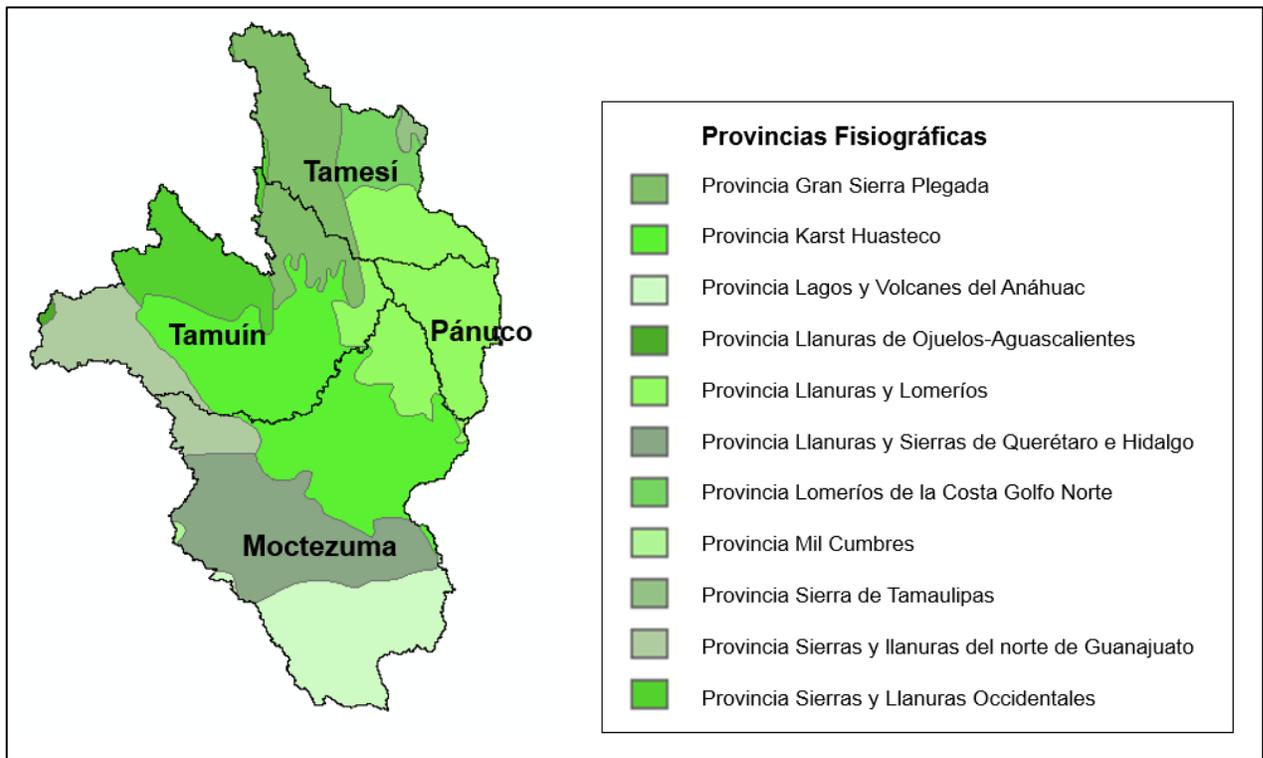


Figura 2. 6 Rasgos fisiográficos de la región hidrográfica del Pánuco (CONABIO, 2014)

2.2.3 Clima

De acuerdo con la clasificación de climas de Köppen modificada, en la Cuenca del río Pánuco se presentan básicamente los tipos de climas que se muestran en la Figura 2.7 y que se describen en la Tabla 2.1, con variantes y su distribución sigue prácticamente igual dirección al desarrollo de la cuenca.

La cuenca del río Pánuco está situada geográficamente en una posición tal que se ve constantemente expuesta a los embates de los ciclones tropicales que se generan en las Antillas, en el Atlántico Ecuatorial y en el Golfo de México. La tendencia de estos ciclones es de desplazarse hacia el poniente, con propensión a recurvar en dirección norte.

Así mismo, las condiciones naturales que afectan la distribución climática de esta la Cuenca del Pánuco, como las llanuras amplias entre las sierras, que condicionan una variedad térmica desde semifríos en las partes altas, hasta los cálidos; y de los muy secos a los subhúmedos. (INE, 1984)

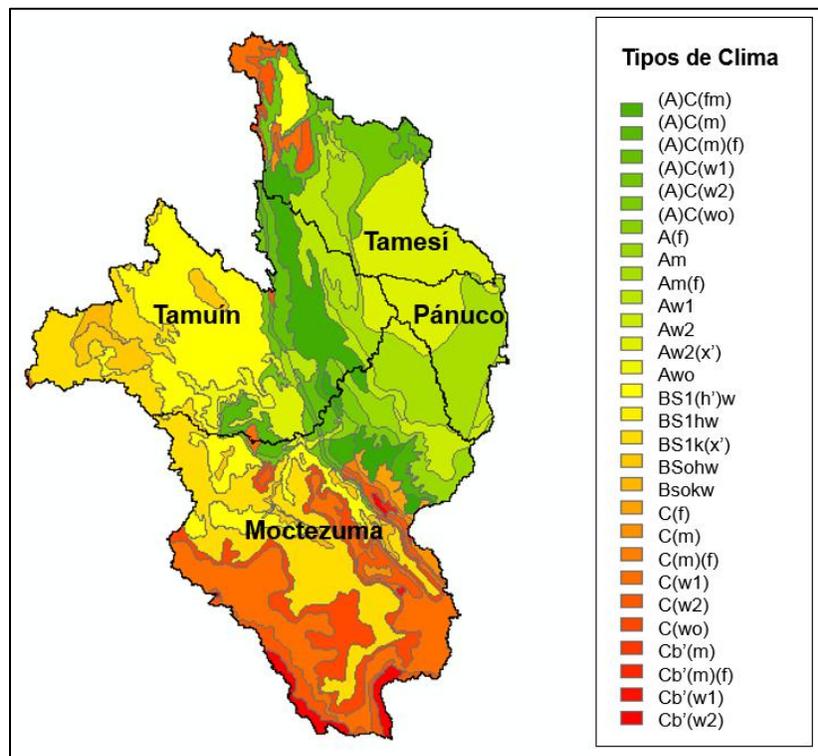


Figura 2. 7 Tipos de climas en la región hidrográfica del Pánuco (CONABIO, 2014)

Simulación numérica de la regulación de flujos extraordinarios en la Cuenca Baja del río Pánuco (Presa Pujal-Coy)

(A)C(fm)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
(A)C(m)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
(A)C(m)(f)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
(A)C(w1)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
(A)C(w2)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
(A)C(wo)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
A(f)	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
Am	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
Am(f)	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
Aw1	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
Aw2	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
Aw2(x')	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
Awo	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
BS1(h)w	Semiárido Cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
BS1hw	Semiárido, Semicálido, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
BS1k(x')	Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C.
BSohw	Árido, Semicálido, temperatura entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
BSokw	Árido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C.
C(f)	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
C(m)	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
C(m)(f)	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
C(w1)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
C(w2)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
C(wo)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
Cb'(m)	Semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C; temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
Cb'(m)(f)	Semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
Cb'(w1)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
Cb'(w2)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.

Tabla 2. 1 Características de los tipos de climas en la región del Pánuco.

2.2.4 Precipitación

En la cuenca del río Pánuco, como en la mayor parte del país, se tiene un régimen de lluvia de verano y otoño que abarca, desde mayo hasta octubre. Los tipos de circulación atmosférica que originan el régimen de lluvia general son los vientos alisios y la lluvia regional por los monzones y ciclones tropicales.

Con la entrada de los vientos alisios a finales de abril y en mayo, comienzan las primeras lluvias de verano; al establecerse este sistema de vientos se produce los monzones, que provocan un aumento notable en la precipitación del mes de junio. Durante los meses de julio y principios de agosto, prevalecen las lluvias ocasionadas por los monzones hasta que, a finales del verano y principios del otoño (agosto y septiembre) se presentan los ciclones tropicales, causando un gran incremento en la precipitación principalmente de septiembre, mes que en la mayoría de las estaciones meteorológicas estudiadas registra el valor más alto de precipitación media mensual. Asimismo, la mayor parte de las estaciones meteorológicas analizadas presenta canícula, es decir, una baja de precipitación debida a la ocurrencia de los ciclones tropicales.

La distribución superficial actual de la precipitación media anual en la cuenca del río Pánuco muestra que las precipitaciones más altas se presentan en la cuenca media del río Pánuco, correspondiente a la parte baja de la Sierra Madre Oriental.

Estas precipitaciones son de tipo orográfico provocadas por la entrada de masa de aire muy húmedas que al verse obligadas a ascender por la Sierra, depositan su gran contenido de humedad antes de llegar a las partes más altas de la misma. Se muestran las isoyetas de precipitación en la Figura 2.8 que alcanzan alturas que varían entre los 1,200 y más de 2,500 mm. En la llanura costera las lluvias son ciclónicas, varían entre menos de 600 y 1,200 mm y en la Cuenca de México, de mayor altitud, y las partes más altas de la Sierra Madre Oriental, entre menos de 600 y más de 1,300.

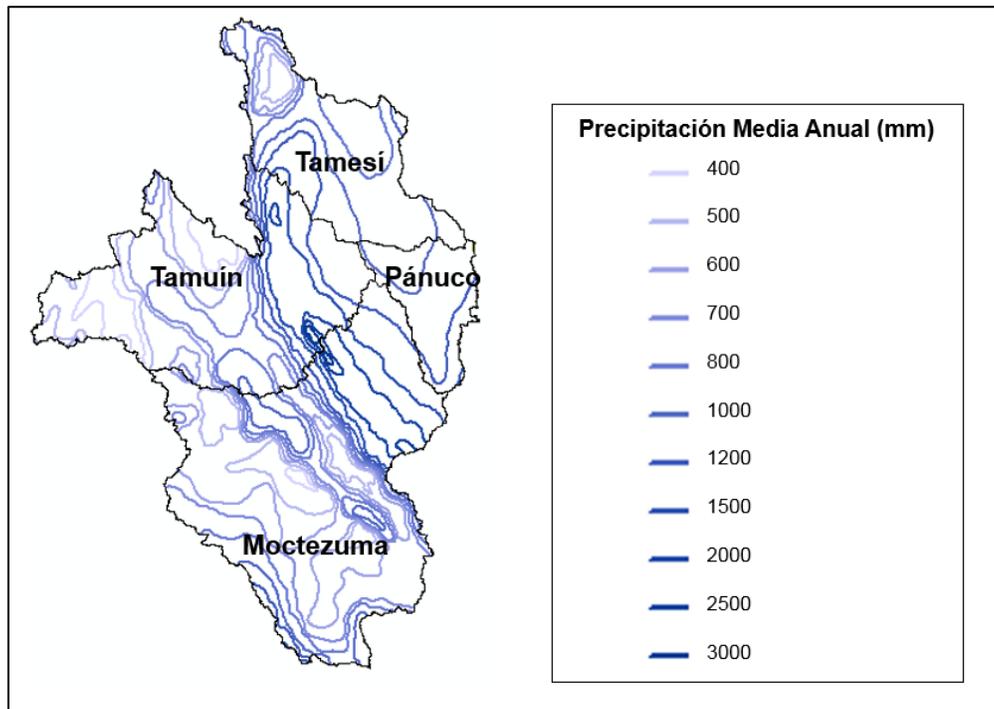


Figura 2. 8 Precipitación media anual en la región hidrográfica del Pánuco (CONABIO, 2014)

2.2.5 Evapotranspiración

Como se sabe, la evapotranspiración es la fase que representa la pérdida de agua en el ciclo hidrológico, y abarca la mayor parte del agua proveniente de la precipitación.

La distribución de la evapotranspiración real media anual en la cuenca del Pánuco se genera según con la cantidad de lluvia precipitada y con la capacidad del poder evaporante de la atmósfera; por esta razón la altura de la evapotranspiración es mayor en la vertiente de la Sierra Madre Oriental y en la llanura costera, donde se registran altas temperaturas y lluvias abundantes. En la parte alta de la Sierra, en la Altiplanicie y en la Cuenca de México las temperaturas más bajas y la precipitación menos abundante dan lugar a una menor evapotranspiración. En tales condiciones la evapotranspiración real media anual de esta cuenca alcanza 646.6 mm.

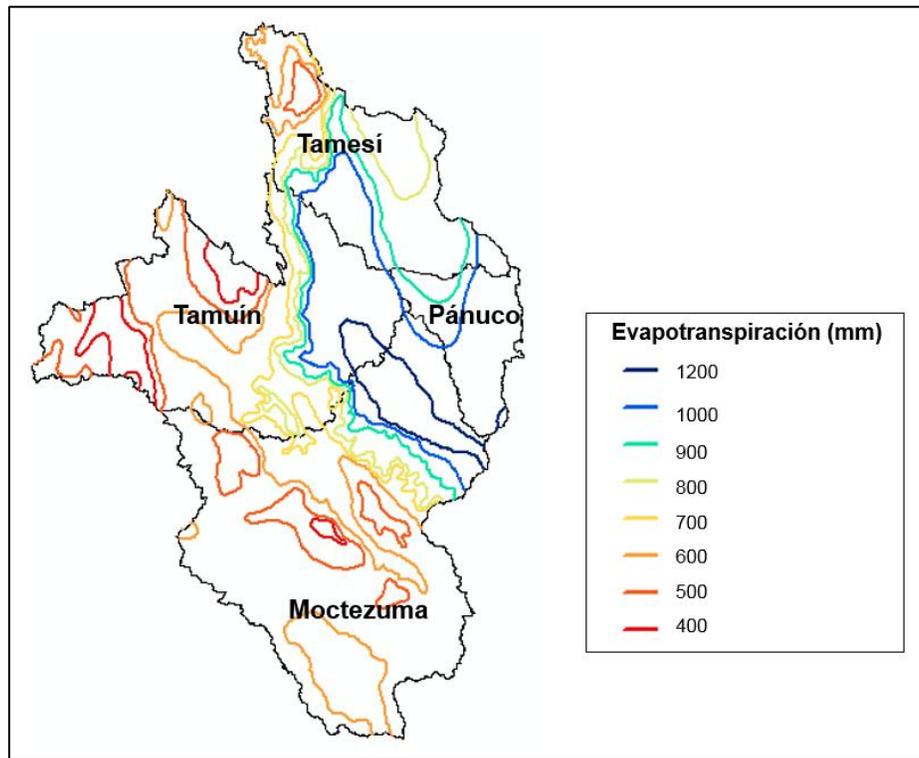


Figura 2. 9 Evapotranspiración en la región hidrográfica del Pánuco (CONABIO, 2014)

2.2.6 Esguerrimiento

De manera general el esguerrimiento en la red fluvial de la cuenca del río Pánuco presenta dos periodos: uno seco de noviembre a mayo y otro húmedo de junio a octubre, es decir las estaciones de estiaje y de avenidas respectivamente. En ellos se refleja la dependencia que tiene el esguerrimiento e la precipitación.

En general, el mes que inicia la época de lluvias, en este caso mayo, se adelanta al mes de inicio de la época de avenidas, junio, debido a que, como se sabe, las primeras lluvias satisfacen la humedad del suelo y una vez saturado, cuando se estabiliza la época de lluvia y la infiltración se hace constante, comienza el esguerrimiento.

2.3 Eventos de inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco

Las grandes crecientes de los ríos Pánuco y Tamesí confluyen en la planicie Baja del Pánuco, donde se han producido inundaciones cíclicas que ponen en riesgo a los pobladores de la zona conurbada de Tampico-Ciudad Madero-Altamira, en Tamaulipas y en Pánuco y Pueblo Viejo en Veracruz, afectando las viviendas, las áreas de producción y en consecuencia, limitando el desarrollo. A ello debe sumarse el ingreso de precipitación por la incidencia de fenómenos meteorológicos.

Con base a la descripción de las características físicas de la zona de estudio, se puede comprender las causas que producen las inundaciones en la Cuenca Baja del Pánuco. En esta sección se presenta una breve reseña del registro histórico de algunas de las inundaciones catastróficas como las de 1933, 1955, 1976, 1993 y 2011.

2.3.1 Evento de 1933

En el año de 1933 el puerto de Tampico sufrió dos eventos continuos de ciclones, el 15 de septiembre y el 24 de septiembre, después se generó una gran inundación que afectó a toda la ciudad. En esos momentos el Comité Pro-damnificados se encargó de los fondos en la Comisión Ejecutiva de haciéndose cargo de los dineros.



Figura 2. 10 Inundación en 1933. Tampico, Tamaulipas

2.3.2 Evento de 1955

Las graves inundaciones que ocurrieron en septiembre y octubre de 1955 fueron causadas por la secuencia de tres ciclones, que afectaron intensamente la cuenca del Río Pánuco: Gladys, Hilda, y Janet. En la Tabla 2.2, se muestra las fechas y los efectos producidos por la terna de huracanes.

Todo inició a partir del mes de junio cuando se acabaron las lluvias en la zona, que habían aumentado el caudal de ríos y lagunas. Agravándose la situación, cuando llegó el huracán Gladys, aunque se disolvió en el Golfo de México produjo grandes precipitaciones pluviales, provocando inundaciones en las partes bajas de Tampico.

El evento comenzó en la madrugada del 19 de septiembre, PEMEX informaba que el ciclón entraría en pocas horas a Tampico, el huracán Hilda entró a tierra por esta ciudad alcanzando vientos superiores a los 270 km/h, arrasando a su paso los poblados de las tres Huastecas Tamaulipeca, Veracruzana y Potosina. En pocas horas Hilda azotó el puerto, los buques, chalanes, lanchas y todo tipo de embarcaciones sufrieron grandes pérdidas, siendo algunas de ellas arrastradas por la corriente hasta Las Escolleras o hasta alta mar. Al terminar la embestida del huracán Tampico se quedó sin comunicación y sin energía eléctrica viéndose afectadas sus instalaciones industriales y portuarias.

El 29 de septiembre aun cuando la población no se recuperaba por la embestida del Huracán Hilda, el Huracán Janet entró a tierra por Tuxpan, Veracruz, disolviéndose al chocar con la Sierra Madre Oriental, descargando gran cantidad de agua sobre la cuenca de los Ríos Pánuco, Pantepec y sus afluentes, aumentando su cauce.

Ciclón	Fecha	Efectos
Gladys	1 al 6 de septiembre	Precipitaciones fuertes en la zona montañosa de Tempoal, provocando inundaciones en las llanuras bajas.
Hilda	20 al 22 de septiembre	Con impacto directo sobre el puerto de Tampico, el centro del ciclón pasó sobre esa población. Vientos con grandes velocidades y fuertes lluvias
Janet	29 de septiembre	Desbordamiento de algunos ríos, aislando las poblaciones de Tampico, Cd. Madero, Tamaulipas; y Pánuco, Veracruz

Tabla 2. 2 Ciclones tropicales que afectaron a la Cuenca Baja del Pánuco en 1955 (Atlas Nacional de Riesgos)

Debido a la saturación precedente, originada por las lluvias producidas por Gladys e Hilda, el nivel que se ascendió en Tampico a cota de 3.30 msnm, en la Figura 2.11 se indican los niveles. (CNA, 1994)

El último huracán que se registró fue Janet, la cresta del nivel máximo de inundación alcanzó 5.85 msnm en el Puerto de Tampico. (Ver Figura 2.11)

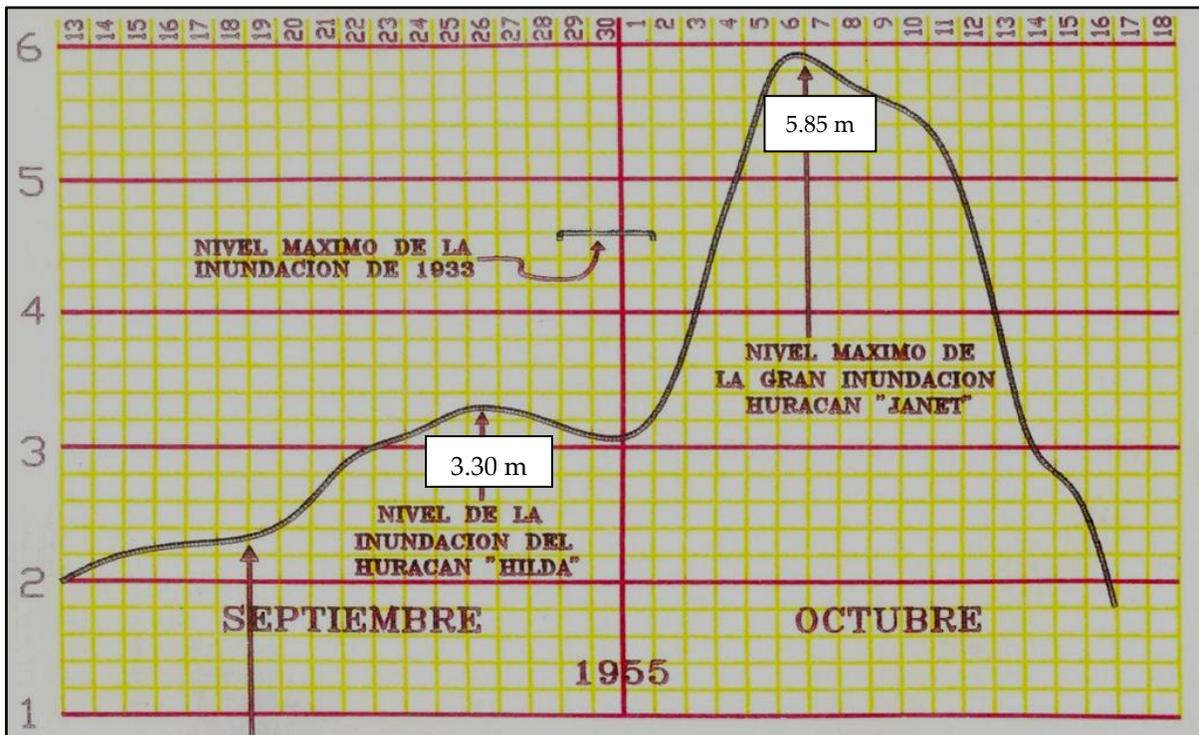


Figura 2. 11 Niveles registrados en la Estación Bombas para en los eventos de 1933 y 1955

A causa de esta inundación, la infraestructura carretera quedó anegada en totalidad, y prácticamente la ciudad aislada. La Figura 2.12 muestra la vista aérea de la ciudad de Tampico donde el agua cubrió completamente varios negocios y la Plaza Las Hijas de Tampico; de forma similar se muestra en la Figura 2.13 los efectos de las inundaciones en la zona cercana al Puerto de Tampico, que fue de tan grande magnitud que se unieron la lagunas del Carpintero y el río Pánuco.



Figura 2. 12 Vista aérea, la zona cubierta completamente por el agua en la Plaza "Hijas de Tampico", el primer piso de la Casa Garza, mercados, entre otros lugares. Inundación de 1955



Figura 2. 13 La intensidad de la magnitud de la inundación, unió a la Laguna del Carpintero y Pánuco, los muelles casi 3 m. bajo el agua, los barcos casi encima de los muelles, el edificio de la Marina cubierto por el agua en su primer piso, al igual que las bodegas de aduana y ferrocarril.

2.3.3 Evento de 1976

La avenida de 1976 se registra como la máxima avenida que ha tenido el río Tamesí, alcanzado una cota máxima de 35 m (cota crítica de 28 m) la estación Magiscatzin (SARH, 1987). A pesar de que no se presentara la avenida extraordinaria en el río Pánuco, la combinación de las dos crecientes a la altura de Tampico provocó inundaciones aledañas al cauce, en la zona conurbada de la colonia Morelos, así como la Congregación Anáhuac, Veracruz. (CNA, 1994). En la Tabla 2.3 se muestra el gasto que se generó en el río Tamesí

Ciclón	Fecha	Gasto Máximo (m ³ /s)	Efectos
Naomi	25 al 30 de octubre	±5,147	Precipitaciones fuertes en la zona montañosa de Tempoal, provocando inundaciones en las llanuras bajas.

Tabla 2.3 Ciclón tropical que afectó a la Cuenca Baja del Pánuco en 1976 ((Estimación del gasto por la SRH, 1961)

2.3.4 Evento de 1993

La Cuenca Baja del río Pánuco estuvo nuevamente expuesta al riesgo por inundación, con la llegada del huracán Gert en 1993, que generó aumento en las avenidas de todos los ríos de la zona, que afectaron principalmente a San Vicente, Tamuín, en San Luis Potosí; Ciudad Mante, Altamira, Tampico en Tamaulipas; Tempoal, El Higo, Pánuco, Moralillo y Congregación Anáhuac en Veracruz.

De los efectos provocados por el huracán Gert, el río Tampaón alcanzó el máximo nivel histórico en Tamuín y el bordo de protección estuvo a punto de fallar, algunas colonias estuvieron a punto de evacuarse por deficiencias en los bordos que las protegen, una de ellos a 3 kilómetros aguas arriba de la ciudad. (CONAGUA, 1996)

Por lo anterior, y tomando en cuenta el corto plazo en que pueden ocurrir los fenómenos meteorológicos similares o aún mayores, la Comisión Nacional del Agua realizó los diversos trabajos con la finalidad de mejorar las obras de protección contra inundaciones del Río Pánuco, en las zonas conurbadas de la Cuenca Baja del Pánuco.

Asociado a la presencia del huracán Gert, se registró la máxima avenida que ha tenido el río Tamesí, alcanzado una cota crítica de 35 m. (Cota crítica de 28 m) en la estación Magiscatzin (SARH, 1987). En la Tabla 2.4 se muestra el gasto que se registró en el río Tamesí

Ciclón	Fecha	Gasto Máximo (m ³ /s)	Efectos
Gert	14 al 21 de septiembre	±5,836	Se registró la máxima avenida que ha tenido el río Tamesí

Tabla 2. 4 Ciclón tropical Gert en 1993 y los efectos en el río Tamesí ((Estimación del gasto por la SRH, 1961)

2.3.5 Evento de 2011

La tormenta tropical Arlene, la primera de la temporada de huracanes del Océano Atlántico, llegó el 28 de junio al suroeste del Golfo de México. Arlene se dirigió hacia 440 km al este-sureste de Tampico, con vientos de 65 km/h. El 30 de junio por la madrugada Arlene alcanzó su máximo potencial con vientos de 100 km/h al norte de Tuxpan, en Veracruz. (CONAGUA, 2011)

La tormenta tropical Arlene provocó un gran aumento en las precipitaciones, se tiene el registro en: Tamesí, Tamps., 348.8mm; Tierra Blanca, S.L.P., 309.4mm; Pánuco, Ver. 231.5mm; San Miguel Atlalilco, Mor., 186.5mm. Tuvo una duración de 51 horas, tiempo en el que recorrió una distancia aproximada de 550km a una velocidad promedio de 11km/h. (CONAGUA, 2011)

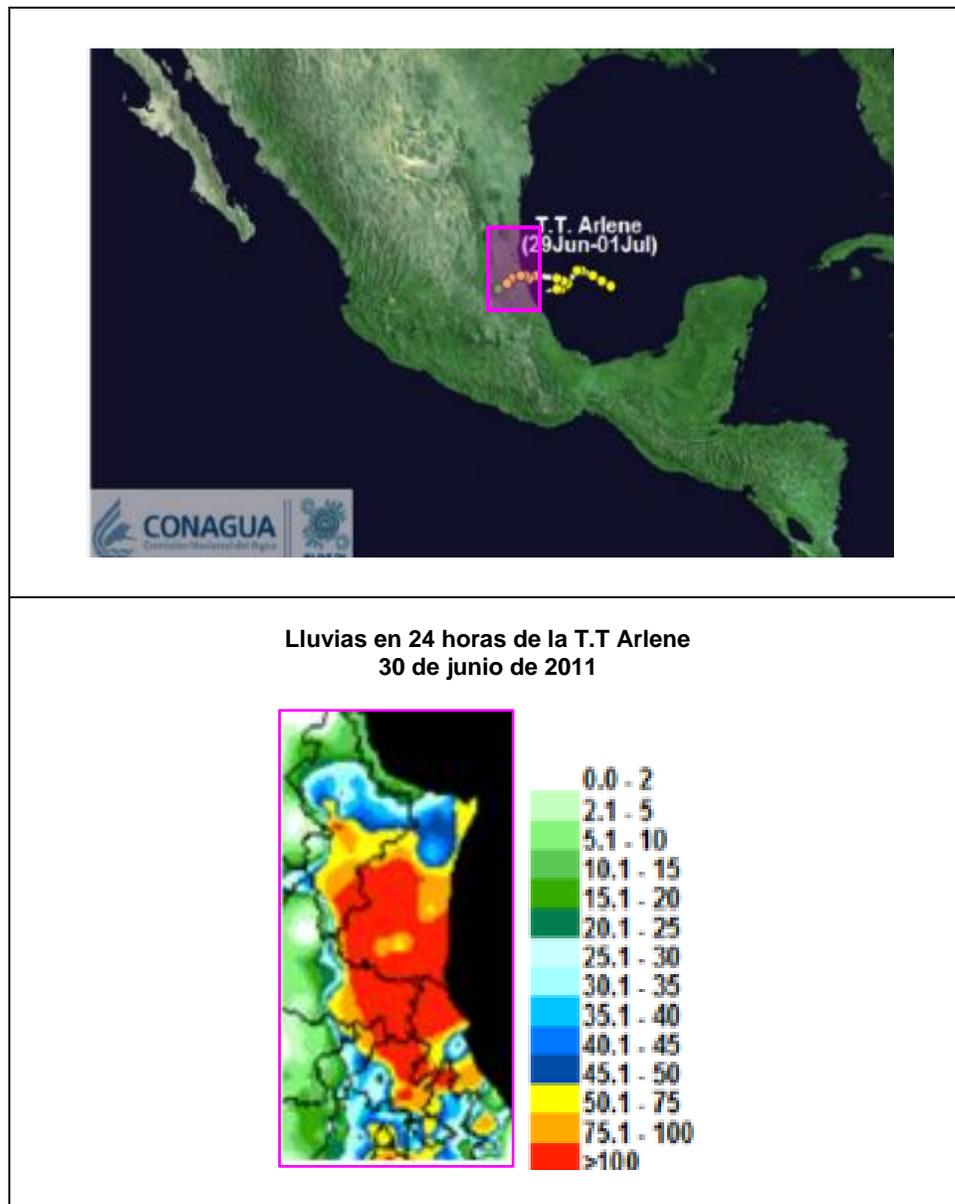


Figura 2. 14 Panel Superior: Trayectoria de la Tormenta Tropical Arlene desde el 29 de junio al 1 de julio. Panel Inferior: Niveles de precipitación generados en 24 horas en la Cuenca Baja del río Pánuco (CONAGUA, 2011)

En consecuencia, se presentaron afectaciones en la zona conurbada de Tampico las colonias ubicadas en la margen derecha de la Laguna Carpintero, Ciudad Madero y Altamira, en Tamaulipas (El Universal, 2011). En San Luis Potosí ocurrieron deslaves en los municipios de Ébano y San Martín Chalchicuátla, y algunas carreteras fueron cerradas por los derrumbes (Protección Civil SLP, 2011)



Figura 2. 15 Viviendas anegadas por el desbordamiento del río Pánuco, en Veracruz (El Universal, 2011)



Figura 2. 16 Los municipios de El Mante y Soto La Marina, de Tamaulipas, fueron declarados en emergencia por la tormenta tropical Arlene (Conexión Total, 2011)

CAPÍTULO 3. PRESA PUJAL-COY

La construcción de presas tiene gran relevancia y trascendencia que las hace destacar por encima de cualquier tipo de grandes obras y construcciones: demandan enormes cantidades de horas de trabajo de investigación, diseño y planeación, en los más diversos campos de la ingeniería, su realización exige la movilización de ingentes cantidades de hombres, materiales, maquinaria, equipos y, consecuentemente, recursos de inversión; su conclusión modifica en forma definitiva el entorno natural de la cuenca donde se insertan. (Ferrando-Bravo, 2004)

A pesar de su contribución a satisfacer necesidades importantes de la humanidad, las presas de grandes dimensiones han sido muy cuestionadas desde hace más de 20 años. La impugnación alcanzó tal intensidad que dos organizaciones de perfil muy disímulo, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y el Banco Mundial, decidieron en 1997 auspiciar conjuntamente la creación de la llamada Comisión Mundial sobre Presas (World Commission on Dams, 2000), con la encomienda de examinar la controversia desde bases objetivas y clarificar los puntos en debate con participación de impugnadores, defensores y expertos en temas relacionados con estas obras (Reséndiz-Núñez, 2004).

Los impugnadores de las grandes presas sostienen que los efectos sociales y ambientales negativos en algunas de estas obras han rebasado sustancialmente los beneficios; los daños principales que se señalan son: 1) desalojo del embalse a miles de familias que resultan al margen de los beneficios del proyecto; 2) destrucción de grandes extensiones de ecosistemas en el embalse y en las zonas por desarrollar aguas abajo; 3) excedencia en los costos de construcción previstos y agravio de la deuda externa de los países cuando solicitan créditos internacionales para financiar las obras y 4) distribución no equitativa los beneficios de los proyectos.

En el fondo la cuestión de las grandes presas en el desarrollo tiene que ver con dos asuntos de enorme importancia. Uno de ellos es tan antiguo como la humanidad, pues se refiere a la justicia, a la distribución de costos y beneficios cuantiosos (Thomas, 2001). El otro asunto es, por el contrario, novedoso, pues llegó a la palestra internacional hace al menos dos décadas: la *sostenibilidad* del desarrollo.

A fin de precisar ideas, se debe considerar los pasos necesarios para analizar si un proyecto de presa es sostenible. El concepto de desarrollo sostenible, y la sostenibilidad

como criterio para selección de proyectos, fueron propuestos por la Comisión Mundial sobre Ambiente y Desarrollo (1987). La propia Comisión definió como desarrollo sostenible aquel que usa recursos naturales de modo que se satisfagan las necesidades humanas de la actualidad sin disminuir las oportunidades de generaciones futuras.

Para aplicar el concepto de sostenibilidad en las presas, es necesario fijar las fronteras del sistema ecológico y social a considerar. Es indispensable considerar que las fronteras del sistema abarcan la cuenca hidrológica completa, y casi siempre mucho más allá, pues los efectos de un proyecto de estos suelen llegar a una región. Delimitando el sistema, procede evaluar el conjunto de presas y proyectos alternativos en la cuenca, a fin de considerar los efectos recíprocos entre ellos y seleccionar con visión integral, la mejor expectativa de sostenibilidad. Para cada conjunto alternativo de proyectos habría que hacer entonces una lista de sus posibles efectos ambientales, sociales y económicos (Reséndiz-Núñez, 2004).

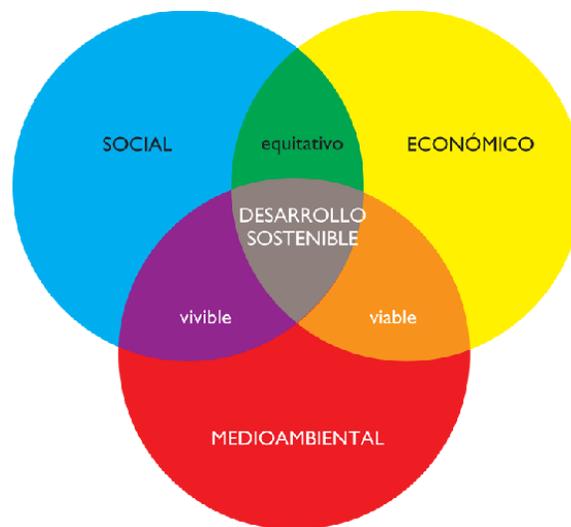


Figura 3. 1 Esquema de sostenibilidad y los aspectos que considera los proyectos

La mitigación de los daños ambientales de una presa está limitada por la dinámica de los ecosistemas y por el costo. Sin embargo, se puede conseguir la rentabilidad en la protección y mejoramiento de la cuenca, comenzando con acciones para reducir la erosión del suelo antes del llenado del embalse; esto tiene tres efectos altamente deseables: 1) preservar o recuperar la diversidad de los ecosistemas; 2) conservar o incrementar la tasa de recarga de los acuíferos subterráneos y 3) prolongar la vida útil y aumentar la rentabilidad de la presa por disminución de la tasa de azolvamiento del vaso (Reséndiz-

Núñez, 2004). Cada uno de estos beneficios tiene alto valor económico, ambiental y social, y el costo puede ser bajo si consigue la cooperación de las comunidades rurales beneficiadas.

3.1 Antecedentes de la Presa Pujal-Coy

La construcción de presas seguirá sirviendo para el bienestar de las sociedades humanas, y por tanto puede preverse que en un futuro se continuarán construyendo más. Sin embargo, deberán ser debidamente evaluadas, con base a los criterios de seguridad y dentro de un marco sustentable.

Entre los fines de construcción de presas se consideran principalmente:

- Asegurar el agua para consumo humano
- Irrigación para la agricultura
- Generación de electricidad, evitando así la quema de combustibles
- Control de inundaciones
- Diversos como la acuacultura o de recreación.

Una presa puede diseñarse de modo que cumpla diversos propósitos, en zonas áridas la agricultura sería imposible sin la irrigación basada en el almacenamiento de grandes cantidades de agua. En algunos países casi toda la producción agropecuaria depende de ello. Incluso donde la precipitación anual es abundante puede ser indispensable para almacenar el agua si las lluvias se concentran en un solo periodo anual. (Laris-Alanís, 2004)

Las diversas necesidades de la Cuenca del río Pánuco podrían satisfacerse con la construcción de un sistema de presas, principalmente por la ocurrencia de grandes crecientes. Por lo que respecta al control de inundaciones, se han realizado diversas propuestas hasta ahora como son: bordos, diques, acondicionamiento y rectificación del cauce en la parte baja de la cuenca, canales de alivio, y de pequeñas presas.

Durante la gestión de la Secretaría de Recursos Hidráulicos se erigieron obras hidráulicas de todo tipo y tamaño, se podría denominar como la época de oro de la construcción de obras hidráulicas en México (Guerrero-Villalobos, 2004). El programa de la SRH en lo que a la construcción de presas en la Cuenca del río Pánuco, es bastante extenso, programando un sistema de estructuras en la parte alta y media de la cuenca para aprovechamiento de local, al mismo tiempo que se regularizaría en la zona baja

Las obras del Pujal-Coy integran el conjunto de obras hidráulicas para la Cuenca Baja del río Pánuco, concebidas como “el sistema de riego más grande y moderno en América

Latina”, con un potencial de irrigación cercano a las 700 mil hectáreas, de ahí su importancia continental, nacional y regional.

La idea original de esta obra fue concebida por el general Lázaro Cárdenas, pero se iniciaría hasta la década de los setentas. Ello, después de un largo enfrentamiento entre el Estado y diversos grupos ganaderos, estos últimos resistentes a la pérdida de sus grandes extensiones de tierra, a partir de 1975 en el gobierno de Luis Echeverría mediante un decreto presidencial se expropiaron 72,000 hectáreas a los propietarios de los estados de Veracruz, Tamaulipas y Veracruz. (Aguilar-Robledo, 1991). Con ello se daría inicio a uno de los proyectos más ambiciosos.

3.1.1 Descripción del Plan Maestro

El sitio del proyecto se encuentra dentro de la Cuenca del río Pánuco, asumiendo como ejes a los principales ríos tributarios del Pánuco, se han considerado las siguientes subcuencas:

- a) Tamesí
- b) Tamuín-Tampaón
- c) Chicayán-Pánuco
- d) Moctezuma-Tempoal.



Figura 3. 2 Ubicación de las subcuencas del Plan Maestro

El proceso que se plantea en el Plan Maestro de la extinta SARH en 1976, se divide en cuatro etapas que al concluirse se habrá beneficiado a numerosas poblaciones que integran a las subcuencas.

Al ejecutarse las primeras tres etapas se tendrá bajo riego alrededor de 700,000 hectáreas, además de tener controlado casi en su totalidad el problema de las inundaciones provocadas por avenidas con periodos de retorno de 100 años, a lo largo del recorrido de los afluentes del río Pánuco por planicie costera hasta su desembocadura en el mar, en virtud de las diversas obras destinadas, como parte de sus propósitos, a captar y regularizar o encauzar los escurrimientos provocados en época de avenidas.

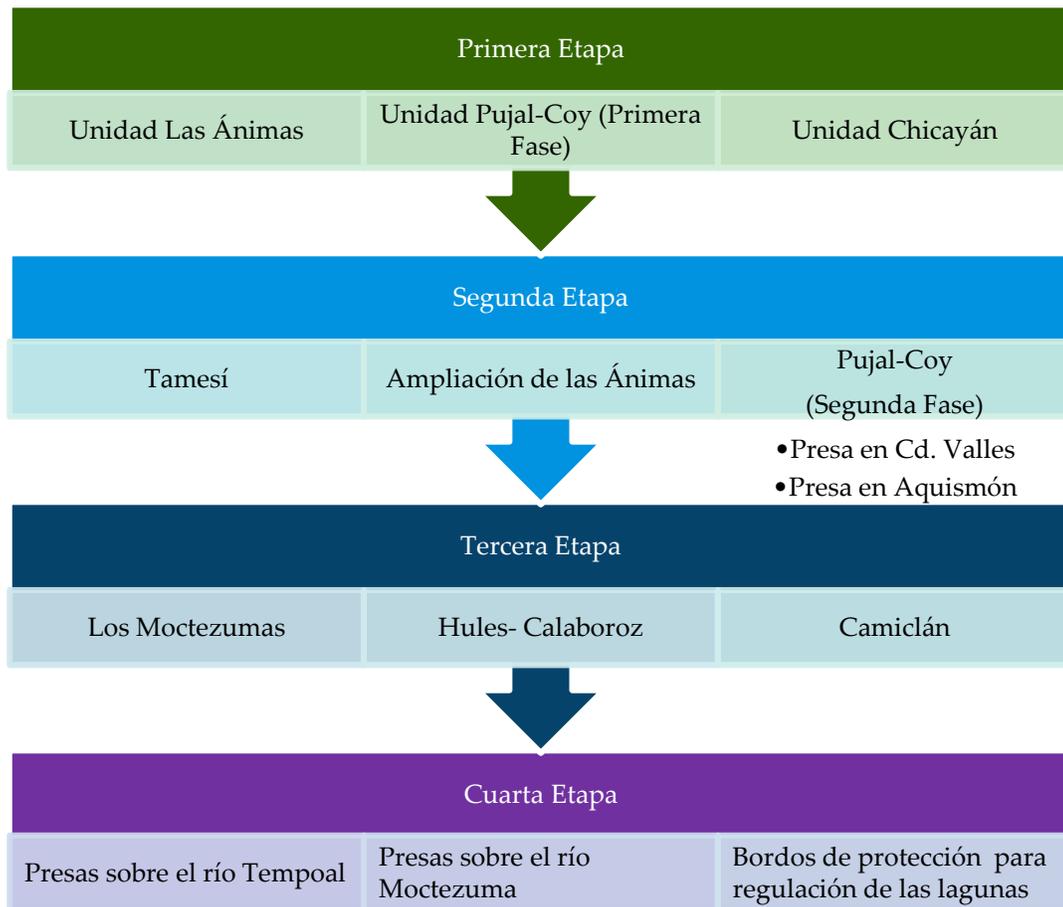


Figura 3. 3 Esquema de las Etapas que integran el Plan Maestro para el desarrollo de la Cuenca del río Pánuco propuesto por la extinta SARH, 1980.

De tal forma, la cuarta etapa de las obras de infraestructura en la Cuenca Baja del Pánuco incluye las obras protección contra las avenidas, se desarrollará parcialmente con cada una de las tres que anteceden.

3.1.2 El Proyecto Pujal-Coy

El Proyecto Pujal-Coy impulsado como el proyecto más importante dentro de las obras de infraestructura de riego de la Cuenca del río Pánuco, tanto por magnitud y diversidad de obras que lo integran, abastecerá de servicios para la población y favorecerá al control de inundaciones. De acuerdo con las características económicas, como tipo de producción y disponibilidad de recursos de la región se definieron en el proyecto Pujal-Coy. La región del Pánuco dedicada (poco más de 120,000 ha) a la ganadería, a pesar del gran potencial

agrícola, es por ello que se planteó la oportunidad de convertirla en la mayor región de cultivo. (González-Villareal, 2010)

3.1.2.1 Obras de la Primera Fase de Pujal-Coy

De acuerdo con el proyecto ejecutado la zona factible de riego son 72,000 ha que se localizan en dos unidades de riego: la Unidad Ébano-Barrote de 38,000 ha y la Unidad Tulillo-Chapaco de 34,000 ha. La habilitación de los terrenos seleccionados para riego, requiere de trabajos de desmonte y nivelación.

La construcción de la totalidad de las obras que comprende la Primera Fase del proyecto afectará 6,036 ha. Las obras de captación y regulación afectaron 171 ha, que se aprovechaban con pastos naturales. En la zona de riego, integrada por canales, drenes, caminos y obras complementarias, se afectará 5, 856 ha.



Figura 3. 4 Obras de la primera fase (González-Villareal, 2010)

3.1.2.2 Obras de la Segunda Fase Pujal-Coy

El Proyecto Pujal Coy en su segunda fase se inició en 1978 con el objetivo de alcanzar una superficie de riego de 230,000 ha. Además considera la construcción de la presa Pujal-Coy para aumentar la superficie irrigable y conectarse con el distrito de riego en operación, eliminando el bombeo de la planta “El Porvenir”; además la presa se proyecta para regular las crecientes del río Tampoán, al reducir considerablemente el gasto máximo de descarga y atenuar las inundaciones río abajo, se considera que podría equiparse con una central hidroeléctrica y permitiría asegurar el abastecimiento futuro de agua potable a las poblaciones de la región, así como restituir el caudal ecológico del río, afectado por los aprovechamientos existentes.

- Presa en la zona de Pujal-Coy

Una de las obras más importantes que se tenían como objetivo era la construcción de las presas sobre los ríos Tampaón y Coy para que reducir los efectos de las inundaciones. Como cualquier presa, las dimensiones dependen de los volúmenes aportados por el río y de las demandas energéticas que requiere el sistema al plantear la opción de generación de energía. Entre las características que se determinaron son la altura y el tipo de la cortina definidos por los estudios topográficos, geológicos e hidráulicos que son las aportaciones y las demandas que definen el proyecto. A medida que se realizaban los estudios, también se realizaban diversas propuestas para la Presa Pujal-Coy.

3.2 Situación actual sobre el proyecto de la Presa Pujal-Coy

La Presa Pujal-Coy es la obra de control de avenidas de la Cuenca del río Pánuco más importante dentro de las alternativas que se han planteado para prevenir inundaciones. Con la construcción de la presa regularizaría las avenidas del río Tampaón (uno de los afluentes más caudalosos del río Pánuco), el área que controlaría es de 23,373 km², el 29% de la cuenca total del río Pánuco. (González-Villareal, 2010)

El segundo objetivo de la presa es el riego agrícola por gravedad, del orden de 140 mil hectáreas o más, dependiendo del plan de cultivos; que incorporaría las 72 mil hectáreas actuales de la zona de riego por bombeo de “el Porvenir”, permitiendo su mayor aprovechamiento. (INDISA, 2009).

De acuerdo con los datos del proyecto ejecutivo elaborado por la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, se presentan la información general del proyecto.

Localización. La Presa Pujal-Coy se localizará en el Estado de San Luis Potosí, justo en donde termina la zona de la Cuenca Media del Pánuco y donde inicia la Planicie Costera o Cuenca Baja del Río Pánuco, en la confluencia del Río Valles con el Río Tampaón captando también los escurrimientos del Río Coy.

- **Datos del Proyecto**

Capacidad Total del Vaso al N.A.M.E.	7,280 Millones de m ³
Capacidad muerta al umbral de las tomas	190 Millones de m ³
Capacidad para Azolves	250 Millones de m ³
Capacidad Útil para Riego	2,760 Millones de m ³
Capacidad a la Cresta de la Obra de Control y Excedencias	2,900 Millones de m ³
Capacidad al Nivel de Conservación	3,337 Millones de m ³
Capacidad para Control de Avenidas a 2,000 m ³ /s	2,865 Millones de m ³
Capacidad para Manejo de Avenidas a Gastos Mayores	1,038 Millones de m ³
Elevación Aproximada del Fondo del Cauce	29.00 m
Elevación del Umbral de las Obras de Toma	39.10 m
Nivel Mínimo de Operación de las Tomas a su Gasto de Diseños (N.A.Mín.)	44.00 m
Elevación de la Cresta de la Obra de Control y Excedencias	55.80 m
Nivel de Conservación (N.A.M.O.)	57.56 m
Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias	69.00 m
Bordo Libre	3.00 m

Simulación numérica de la regulación de flujos extraordinarios en la Cuenca Baja del río Pánuco (Presa Pujal-Coy)

Elevación de la Corona	72.00 m
Altura Aproximada de la Presa Sobre el Lecho del Río	44.00 m
Gasto de Diseño de la Obra de Toma Margen Izquierda (Desc. Al Canal de Riego)	150 m ³ /s
Gasto de Diseño de la Obra de Toma Margen Izquierda (Desc. Al Río)	60 m ³ /s
Gasto de Diseño de la Obra de toma Margen Derecha	62 m ³ /s
Gasto de Diseño de la Obra de Control y Excedencias	11,000 m ³ /s
Gasto de Diseño de la Obra de Desvió	8,000 m ³ /s
Longitud del Tajo de Unión entre los Vasos Pujal y Coy	4.66 Km
Volumen de Excavación del tajo de Unión entre los Vasos Pujal y Coy	2.78 Millones de m ³
Capacidad Máxima de Descarga de la Estructura de Control	13,430 m ³ /s
Longitud Neta de la Cresta Vertedora Controlada	140.00 m

Tabla 3. 1 Datos del proyecto de la Presa Pujal-Coy

- **Datos complementarios**

Volumen de escurrimiento medio anual-Tampaón (estación Pujal)	5,782.2 millones de m ³
Volumen de escurrimiento medio anual-Coy (estación Ballesmi)	950.6 millones de m ³
Volumen de escurrimiento total anual	6,732.8 millones de m ³
Gasto de la avenida máxima ocurrida en el río Tampaón (estación Pujal)	8000 m ³ /s
Gasto de la avenida máxima ocurrida en el río Coy (estación Ballesmi)	456 m ³ /s

Tabla 3. 2 Datos hidrométricos

Área cubierta por el embalse hasta la elevación	386.50 km ²
Profundidad media del embalse	19 m

Tabla 3. 3 Datos del vaso

Altura máxima sobre cimentación	52m
Longitud total por la corona	5.76 km
Longitud sección gravedad	514.5 m
Volumen de material impermeable	3.445 millones de m ³
Volumen de grava y arena limpia filtros y drenes	4.227 millones de m ³
Volumen de grava y arena limpia en respaldos	1.989 millones de m ³
Volumen de enrocamiento	2.042 millones de m ³

Tabla 3. 4 Datos de la cortina

Altura máxima de dique sobre la cimentación	47 m
Longitud total por la corona	11.48 km
Volumen de material impermeable	20.4 millones de m ³
Volumen de grava y arena limpia	4 millones de m ³
Volumen de enrocamiento	4.972 millones de m ³

Tabla 3. 5 Datos del dique

Gasto máximo de la avenida de diseño	25,000 m ³ /s
Gasto máximo de la avenida normativa	8,500 m ³ /s
Ancho del tanque amortiguador	161 m
Longitud del tanque amortiguador	79 m
Elevación del fondo del tanque amortiguador	19 m
Compuertas radiales de B=20 m X A=12.50 m	7 m

Tabla 3. 6 Datos del vertedor

Con la información disponible de la Presa Pujal-Coy y la información hidrológica actualizada se simularán las avenidas asociadas a dos periodos de retorno $Tr=100$ y 500 año, y se evaluará el comportamiento aguas abajo de la Cuenca del río Pánuco con la regulación presa.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología que se utilizó para evaluar la regulación de flujos extraordinarios en la Cuenca Baja del Pánuco, adaptando un modelo matemático que analiza el flujo bidimensional. El estudio considera dos partes complementarias, la primera se refiere al modelo hidrodinámico en dos dimensiones, algunas bases teóricas de su funcionamiento, y la segunda a la puesta a punto del modelo: la generación de la malla, las condiciones de frontera, y la validación con el evento de inundación inducido por la tormenta tropical Arlene ocurrido en el 2011 (Pedrozo et al., 2012). El esquema de trabajo de la metodología se muestra en la Figura 4.1.

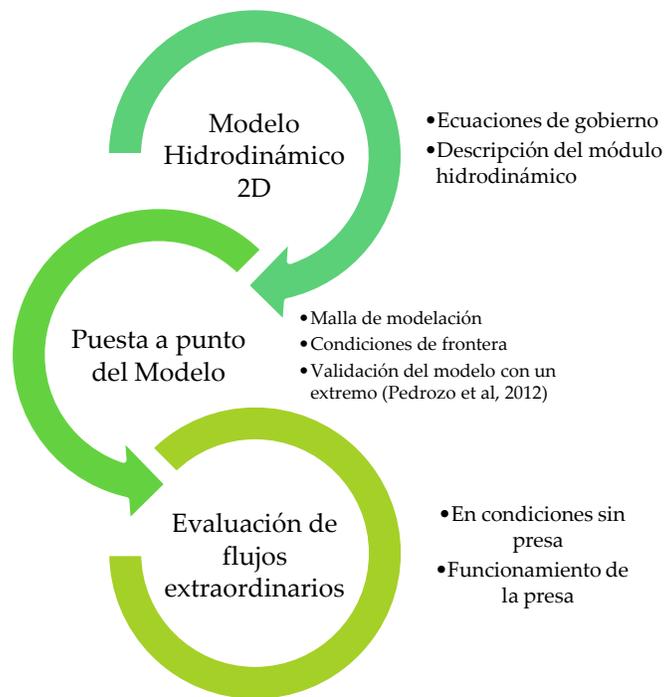


Figura 4. 1 Esquema de la metodología aplicada para la evaluación de flujos extraordinarios en la Cuenca Baja del río Pánuco

4.1 Modelo hidrodinámico bidimensional

La primera parte de la metodología plantea la adaptación de un modelo matemático, basado en la solución numérica de las ecuaciones promediadas de Reynolds (Reynolds averaged Navier-Stokes equations) en dos dimensiones. Asumiendo la hipótesis de incompresibilidad, suposiciones de flujo de Boussinesq y presión hidrostática. Por lo tanto, el modelo consiste de ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, temperatura, salinidad, y densidad, y tiene un esquema de cierre de turbulencia.

El modelo utilizado para hacer las simulaciones numéricas en la Cuenca Baja del río Pánuco es el MIKE 21-FM, desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (DHI). Este modelo utiliza un mallado flexible y ha sido desarrollado para ambientes oceanográficos, costeros, y estuarinos (DHI, 2009a). Es bien sabido que el sistema de modelado ha sido utilizado en diversos estudios de inundación en el mundo.

La discretización espacial de las ecuaciones primitivas se realiza utilizando un método de volumen finito de celda centrada. El dominio espacial se discretiza mediante la subdivisión del continuo en elementos/celdas que no se traslapan. En el plano horizontal se utiliza una malla no estructurada, cuyos elementos pueden ser triángulos o cuadriláteros. (DHI, 2009a)

4.1.1 Descripción del módulo hidrodinámico

El modelo MIKE 21 Flow Model FM, diseñado por DHI, es un sistema dinámico que está compuesto por los módulos siguientes:

- Hidrodinámico (HD).
- Transporte de sedimentos cohesivos y no-cohesivos (MT y ST).
- Módulo de propagación de oleaje (SW).
- Calidad de aguas y componente biológico (EcoLab).

El módulo hidrodinámico (HD), es usado para simular la variación de los niveles de agua y flujos sujetos a una variedad de forzamientos y condiciones de frontera en el área costera. El modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes con promedio de Reynolds en dos dimensiones, considerando la hipótesis de incompresibilidad e implicando suposiciones de flujo de Boussinesq y presión hidrostática.

Entre los parámetros que comprende el módulo hidrodinámico son: la solución técnica, inundación y secado de celdas, densidad, viscosidad turbulenta, resistencia en

el fondo, efecto Coriolis, condiciones de viento, cobertura de hielo, potencial de marea, radiación de onda, fuentes, estructuras, condiciones iniciales, condiciones de frontera, acoplamiento y resultados. (DHI, 2009b)

4.1.1.1 Ecuación local de continuidad

El modelo hidrodinámico MIKE 21 está fundamentado en las ecuaciones incompresibles, con la aproximación de Reynolds basada en la descomposición de las variables de flujo en su valor medio, conocida como las ecuaciones RANS: Reynolds Average Navier- Stokes, con la aplicación de la hipótesis Boussinesq y de presión hidrostática para la resolución del sistema (DHI, 2009a).

Las aproximaciones de Boussinesq sugieren que se pueden despreciar las variaciones de densidad en el fluido excepto en el término de gravedad donde aparece el producto densidad y la gravedad.

Respecto a la suposición de presión hidrostática, el cálculo en el dominio es predominantemente horizontal lo que supone que las aceleraciones verticales son despreciables frente a la aceleración de la gravedad. Esta hipótesis se ha sido probada incluso en el caso de flujos propagándose sobre fondos con apreciables irregularidades (Koutitas, 1987), caso que se puede dar en un estuario, por ejemplo, al pasar el flujo de la zona de la canal a una zona somera que se está inundando por acción de la marea.

La ecuación local de continuidad está determinada por

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (4.1)$$

Y las dos ecuaciones horizontales de momento para la componente x y y son:

En dirección x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{I}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{I}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_x S \quad (4.2)$$

En dirección y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{I}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{I}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_x S \quad (4.3)$$

Donde; x, y, z son coordenadas espaciales cartesianas; t tiempo; η elevación de la superficie; d profundidad de reposo; h profundidad total; u, v, w componentes de velocidad en la dirección x, y y z ; $f=2\Omega\text{sen}\varphi$ es el parámetro de Coriolis; (Ω velocidad angular y φ la latitud geográfica); g aceleración por la gravedad; ρ densidad del agua; S magnitud de la descarga de los puntos de referencia; s_{xx}, s_{yx}, s_{yy} componentes del tensor radiación; ν_t viscosidad turbulenta vertical; ρ_a presión atmosférica; ρ_0 referencia de referencia del agua y u_s, v_s la velocidad a la cual el agua es descargada al medio ambiente.

Los términos del esfuerzo horizontal se obtienen de la relación de gradiente de esfuerzo:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (4.4)$$

$$F_u = F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) \quad (4.5)$$

Así las variables se determinan:

$$H = \eta + h \quad (4.6)$$

$$S_{xx} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho u^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \quad (4.7)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho v^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \quad (4.8)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 \rho uv dz dt \quad (4.9)$$

4.1.1.2 Solución técnica: discretización espacial e integración en el tiempo

Los aspectos que determinan el tiempo de simulación y la precisión de los resultados son tres: la discretización espacial, el tiempo de integración y las condiciones de frontera. Por el momento se hará referencia a los dos primeros.

Discretización espacial

La discretización espacial de las ecuaciones está basada en el método de volumen finito. En el caso bidimensional los elementos pueden ser polígonos de forma arbitraria. Sin embargo, en este caso se consideró elementos triangulares únicamente. (DHI, 2009a)

Considerando la forma general de las ecuaciones

$$\frac{\partial U}{\partial t} = G(U) \quad (4.10)$$

Para ajustar la técnica de solución de las ecuaciones, el modelo ofrece dos opciones: una orden inferior y otra de orden superior, siendo la primera de menor precisión pero computacionalmente más eficiente. El tipo de discretización espacial que se eligió es de orden inferior.

Integración en el tiempo

Para simulaciones bidimensionales hay dos métodos de integración en el tiempo.

El primero consiste en un método de orden inferior y el segundo en un método de orden superior. El método de orden inferior, utilizado en este trabajo corresponde al método explícito de Euler de primer orden (DHI, 2009a)

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G(U_n) \quad (4.11)$$

Donde Δt es el intervalo de paso de tiempo. El método de orden superior utiliza un método Runge Kutta de segundo orden de la forma

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G(U_n) \quad (4.12)$$

$$U_{n+\frac{1}{2}} = U_n + \frac{1}{2} \Delta t G(U_n) \quad (4.13)$$

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G\left(U_{n+\frac{1}{2}}\right) \quad (4.14)$$

Por tanto para la configuración del modelo se utilizó la integración de orden inferior con un valor mínimo de 0.01 segundos y máximo de 120 s, siendo que el valor real del

paso de tiempo empleado en los cálculos se basa en la condición de CFL (Cartesian coordinates the Courant-Friedrich-Levy), en el caso del modelo se estableció el valor de 0.8.

4.1.1.3 Inundación y secado de celdas

El enfoque para el tratamiento del problema de las fronteras en movimiento (frentes de inundación y desecación) está basado en el trabajo de Zhao et al. (1994) y Sleigh et al (1998). Cuando las profundidades son pequeñas, el problema es reformulado, y sólo cuando las profundidades son muy pequeñas, los elementos/celdas son eliminados de los cálculos. La reformulación se realiza fijando los flujos de momento a cero y tomando únicamente los flujos de masa en consideración.

La profundidad de cada elemento/celda es monitoreado y los elementos son clasificados como secos, parcialmente secos, o mojados. Además las caras de los elementos son monitoreados para identificar las fronteras inundadas.

Una cada de un elemento se define como inundada si los siguientes dos criterios se satisfacen: Primero, la profundidad del agua a un lado de la cara debe ser menor que la profundidad de tolerancia, h_{dry} , y la profundidad del agua en el otro lado de la cara debe ser mayor que la profundidad de tolerancia, h_{flood} . Segundo, la suma de la profundidad en reposo en el lado por el cual la profundidad del agua es menor que h_{dry} y la elevación de la superficie en el otro lado debe ser mayor que cero.

Un elemento está seco si la profundidad del agua es menor que la profundidad de tolerancia, h_{dry} , y ninguna de las caras de elemento son fronteras de inundación. El elemento es eliminado de los cálculos.

Un elemento está parcialmente seco si la profundidad del agua es mayor que h_{dry} y menor que una profundidad de tolerancia, h_{wet} , o cuando la profundidad es menor que h_{dry} y una de las caras del elemento es una frontera de inundación. Los flujos de momento se fijan a cero y únicamente los flujos de masa son calculados.

Un elemento está mojado si la profundidad del agua es mayor que h_{wet} . Tanto los flujos de momento como los flujos de masa son calculados.

La profundidad de mojado, h_{wet} , debe ser mayor que la profundidad de secado, h_{dry} , y la profundidad de inundación, h_{flood} , debe satisfacer

$$h_{dry} < h_{flood} < h_{dry}$$

(4. 15)

Los valores por defecto son $h_{dry} = 0.005$ m, $h_{flood} = 0.05$ m, y $h_{wet} = 0.1$ m. Cabe notar que para valores muy pequeños de la profundidad de tolerancia, h_{wet} , pueden ocurrir altas velocidades de flujo poco realistas en la simulación y causar problemas de estabilidad.

4.1.1.4 Densidad

La densidad está en función de la salinidad y temperatura. Para este estudio se ha seleccionado el modo barotrópico, lo que significa que la temperatura y la salinidad (TS) son constantes y la densidad no se modificará durante la simulación. Cuando la densidad se considera que es una función de la temperatura y/o salinidad (modo baroclínica), la ecuación de transporte para la temperatura y / o salinidad debe ser resuelto. La solución de estas ecuaciones se activa automáticamente y la densidad se actualiza desde los campos de TS.

4.1.1.5 Viscosidad turbulenta

La viscosidad turbulenta le permite a la ecuación de momento considerar el esfuerzo laminar y esfuerzo de Reynolds (turbulencia). Estas pueden ser especificadas de tres maneras en el MIKE 21-FM:

- 1) Sin viscosidad turbulenta
- 2) Con viscosidad turbulenta constante (m²/s)
- 3) Con viscosidad turbulenta utilizando la formulación Smagorinsky

Smagorinsky en 1963 propuso expresar el transporte de flujo de masa a diferentes escalas (subáreas de la malla de cálculo), relacionando la viscosidad turbulenta horizontal a una longitud característica. Esto es dividir el área total de cálculo y asignarle un valor de turbulencia a cada sub-área, como se puede observar en la Ecuación 4.16:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4. 16)$$

Donde, c_s es el coeficiente de Smagorinsky, l es una longitud característica y la tasa de deformación está dada por la Ecuación 4.17:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (4.17)$$

El coeficiente de Smagorinsky puede ser constante o variante en el espacio, y se puede variar en el rango de 0.1 a 0.28 (DHI, 2009a). Se debe tener en cuenta que al usar la formulación de Smagorinsky se incrementa el tiempo de cómputo (DHI 2009c; DHI 2009d). En este estudio se utilizó un coeficiente de Smagorinsky constante de 0.28.

Empleando la formulación de Smagorinsky se debe indicar un mínimo y un máximo valor para viscosidad turbulenta.

4.1.1.6 Resistencia de fondo

La resistencia de fondo puede no considerarse o ser calculada usando el esfuerzo de fondo, y puede ser definida por el número de Chezy o por el número de Manning, puede ser de tipo constante o variando en el dominio.

El esfuerzo de fondo τ_b está determinado por la Ley de Fricción Cuadrática:

$$\frac{\tau_b}{\rho_0} = c_f \bar{u}_b |\bar{u}_b| \quad (4.18)$$

Donde c_f es el coeficiente de arrastre, \bar{u}_b es la velocidad de flujo sobre el fondo y ρ_0 la densidad del agua.

El coeficiente de arrastre con el número de Manning se determina con la ecuación:

$$c_f = \frac{8}{(Mh^{1/6})^2} \quad (4.19)$$

Donde h es la profundidad total de agua, M es el número de Manning

El rango de valores del número de Manning es de 20-40 $m^{1/3}/s$, de no contarse con información del fondo, el valor sugerido es de 32 $m^{1/3}/s$.

4.1.1.7 Efecto de Coriolis

El efecto Coriolis puede seleccionarse en tres modos diferentes:

- 1) Sin fuerza de Coriolis.
- 2) Constante en el dominio. En este modo del dominio, se debe indicar una latitud de referencia (en grados)
- 3) Variante en el dominio. Al elegir una fuerza de Coriolis variante en el dominio se debe dar su correspondiente información geográfica contenida en la malla. Para caso de este estudio se ha indicado el modo variante.

4.1.1.8 Condiciones de viento

El efecto del viento se puede especificar bajo tres formas diferentes:

- 1) Constante
- 2) Variante en el tiempo y constante en el dominio. La magnitud y la dirección varían durante el periodo de simulación, pero es el mismo sobre el área de modelación.
- 3) Variante en el tiempo y el dominio. La magnitud y la dirección varían durante el periodo de simulación y sobre el área de modelación.

Nota: en nuestro estudio no se consideró el esfuerzo del viento.

4.1.1.9 Cobertura de hielo

Los efectos de la cobertura de hielo pueden tomarse en cuenta en cuatro diferentes formas

- 1) Sin cobertura
- 2) Especificando la concentración de hielo
- 3) Especificando el espesor de hielo
- 4) Especificando la concentración y el espesor de hielo

En ausencia de cobertura de hielo, se ha seleccionado la primera opción.

4.1.1.10 Condiciones de viento

El potencial de marea es una fuerza generada por las variaciones en gravedad debidas al movimiento relativo de la Tierra, la Luna y el Sol que actúan en todo el dominio computacional. El formado de datos del potencial de marea se puede especificar en el cuadro de diálogo que contiene once parámetros (M_2 , O_1 , S_2 , K_2 , N_2 , K_1 , P_1 , Q_1 , M_m , M_f y S_{sa}) o desde un archivo. Para el estudio se exceptuó el potencial de marea.

4.1.1.11 Precipitación-Evaporación

En algunas aplicaciones la precipitación es importante para el flujo, este se puede incluir en la simulación la precipitación se puede incluir de tres formas diferentes.

- 1) Sin precipitación. Este fue el parámetro seleccionado en el estudio
- 2) Especificando la precipitación
- 3) Red de precipitación

La red de precipitación es la precipitación menos la evaporación. La evaporación puede seleccionarse en tres formas diferentes.

- 1) Sin evaporación. Esta fue la selección que se realizó en el estudio.
- 2) Especificando la evaporación
- 3) Calculando la evaporación

4.1.1.12 Tensores de radiación

Los componentes del tensor de radiación se pueden incluir en la lectura de los valores de un archivo de datos o directamente a partir de una simulación acoplada.

Si requieren en la simulación, esto se realiza mediante un archivo de datos, con los tres componentes del tensor radiación S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} (m^3/s^2) divididos por la densidad del agua. El archivo que contienen los tensores de radiación puede obtenerse a partir de los modelos de olas como MIKE 21 SW, MIKE 21 NSW o PMS MIKE 21.

En la opción que permite seleccionar el tipo de tensor de radiación se localizan dos opciones:

- 1) Sin tensor de radiación
- 2) Especificando el tensor de radiación

Como nuestro estudio no consideró el tensor de radiación, la primera opción se ha seleccionado.

4.1.1.13 Fuentes

Los efectos de los ríos, las entradas y salidas de las de plantas generadoras deben ser incluidos en la simulación, utilizando la opción de fuentes, esto se debe especificar como constante o variable en el tiempo. Para esta opción no se ha ingresado ninguna fuente.

4.1.1.14 Estructuras

La dimensión horizontal de las estructuras es generalmente mucho menor que el tamaño del elemento utilizados en la malla del dominio. Por lo tanto, el efecto de las estructuras se modela mediante una técnica inferior a la malla (el flujo que rodea una estructura se modela considerando el nivel del agua aguas arriba y aguas abajo). Se pueden ingresar cinco tipos de estructuras:

- 1) Vertederos
- 2) Alcantarillas
- 3) Compuertas
- 4) Muelles
- 5) Turbinas

La simulación numérica que refiere a la evaluación de la Presa Pujal-Coy se efectúa sin introducir alguna estructura. La evaluación se realiza desde el ingreso de las condiciones de frontera, a partir de los hidrogramas resultantes de la presa. En los siguientes apartados se explica la puesta a punto del modelo numérico.

4.2 Puesta a punto del modelo numérico

La primera etapa de la puesta a punto del modelo numérico es la asimilación de la información de campo, a fin de obtener una malla numérica. Cabe aclarar que la malla que se utiliza para la modelación de flujos extraordinarios regulados por la presa Pujal-Coy, es la misma que se obtuvo en el proceso que se ha llamado validación.

4.2.1 Malla de modelación

La topografía o elevación del terreno es el dato clave para la modelación de flujos de inundación, considerando que las pendientes naturales del terreno determinan la ruta del flujo, por tal motivo, se necesitan datos de gran precisión y resolución espacial.

Como han señalado diversos investigadores, la aplicación de herramientas como la percepción remota para obtener información topográfica, ofrece la ventaja de abarcar datos espacialmente distribuidos de manera rápida en grandes extensiones (Schultz, 1998; Bates et al., 1997; Bates, 2004). Entre las alternativas que se consideran para adquirir información precisa son: la estereofotogrametría (Baltsavias, 1999; Lane, 2000; Westaway et al., 2003), la altimetría láser o LiDAR (Krabill et al, 1984; Gomes-Pereira y Wicherson, 1999) y la interferometría de radares de apertura sintética (Hudson et al., 2003). Dentro de estas grupo de opciones se ha utilizado la última, la Misión Topográfica de Radar por sus siglas en inglés SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), principalmente porque su resolución es adecuada para terrenos planos (Sanders, 2007) como la Cuenca Baja del río Pánuco, además de la disponibilidad para su descarga gratuita (Rabus et al, 2003).

La definición de la malla con la información topográfica es la primera etapa de la puesta a punto del modelo numérico. En la Figura 4.2 se muestra la batimetría y las elevaciones utilizadas para la construcción de la malla y el cálculo hidrodinámico del sistema. La información batimétrica del río y las lagunas fue proporcionada por las autoridades del puerto de Tampico. El área delimitada del modelo matemático abarca los cauces de los ríos Tamesí y Pánuco, desde la Estación de las Adjuntas hasta la desembocadura del Golfo de México, que incluyen las lagunas de la Salada, Tortuga, Champayán, Mayorazgo y Chairel en el río Tamesí, y de Chila y Pueblo Viejo en el río Pánuco.

La malla es el resultado de la discretización numérica de la información de elevaciones y profundidades para la zona de estudio que abarca las dos subcuencas del río Tamesí y Pánuco. La malla está compuesta por elementos triangulares de diferentes tamaños para cauce, lagunas y elevaciones. En el panel inferior de la Figura 4.2 se puede apreciar que en los cauces de ambos ríos se eligió la malla más detallada, conteniendo elementos con una superficie máxima de 400 m², mientras que para las zonas cercanas al cauce o planicies de inundación se utilizaron elementos de máximo 900 m² y para las demás elevaciones 1600 m². (Rodríguez-Rincón et al., 2012).

Simulación numérica de la regulación de flujos extraordinarios en la Cuenca Baja del río Pánuco (Presa Pujal-Coy)

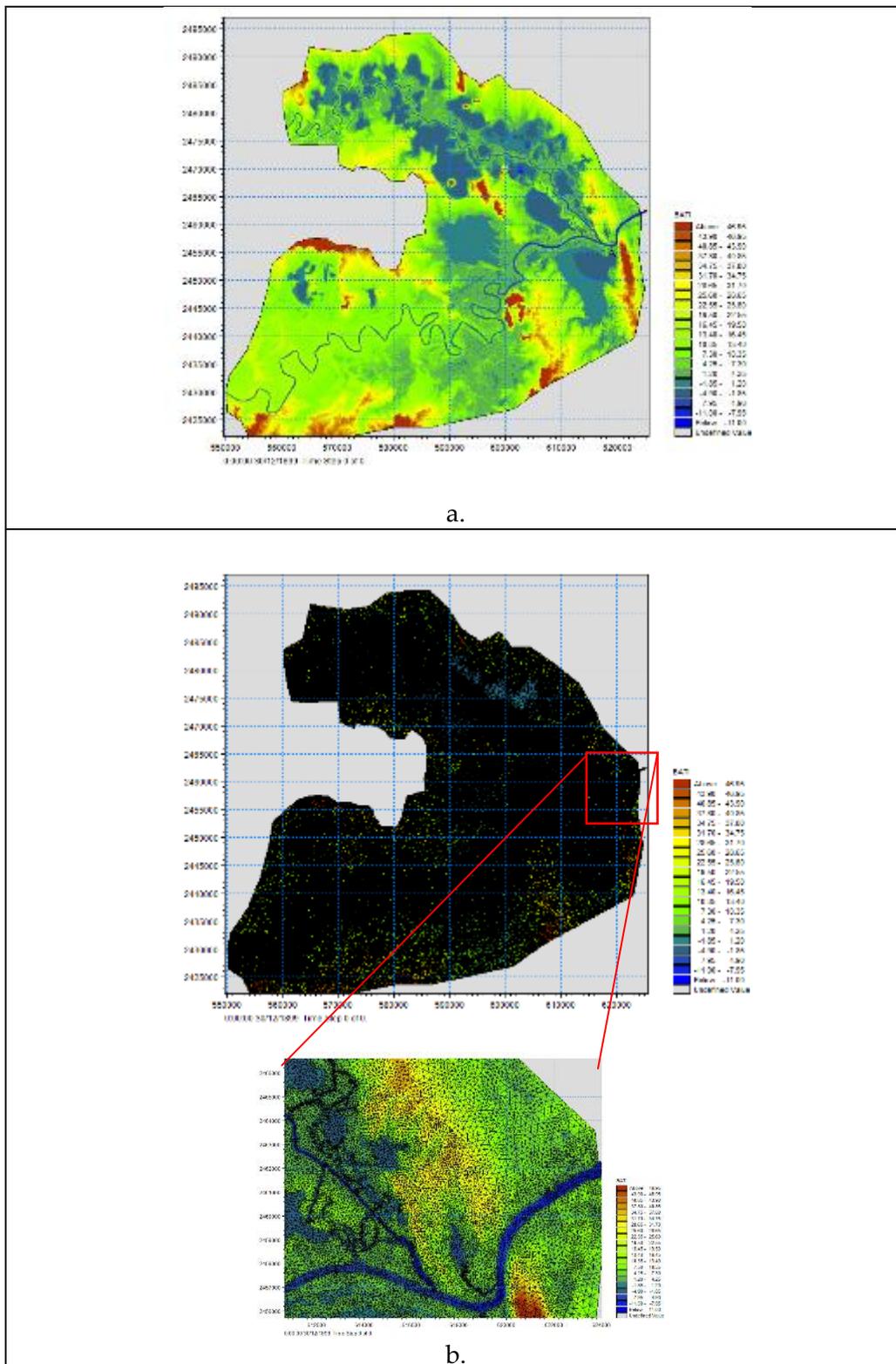


Figura 4. 2 a. Elevaciones/profundidades en el dominio de cálculo; b. Malla flexible con elementos de resolución variable, acercamiento en la zona de confluencia de los ríos Pánuco y Tamesí

4.2.2 Condiciones de Frontera

En esta sección se presentan los principales forzamientos que inducen un efecto en el comportamiento de los flujos. Las condiciones de fronteras son de suma importancia al implementar modelos hidrodinámicos, pues la solución al interior del modelo depende fundamentalmente de la calidad de la información utilizada.

Después de definir la malla, se determinan los principales forzamientos que dominan el flujo, ubicados en:

- 1) La desembocadura del río Pánuco al Golfo de México.
- 2) El ingreso de caudal del río Pánuco (principal afluente).
- 3) El ingreso de caudal del río Tamesí.

Las acciones combinadas de estos procesos fluviales y marinos determinan en gran medida el problema de las inundaciones.

4.2.2.1 Desembocadura del río Pánuco al Golfo de México

El proceso de drenaje consiste en la evacuación de las aguas, hacia su base de equilibrio, generalmente en el mar. De acuerdo con Leopold (1994), los ríos tienden a regularizar, en el espacio y a través del tiempo, el gasto que ingresa al sistema de manera dispersa y aleatoria. Si los ingresos localizados de energía tuviesen que ser disipados íntegramente in situ, concentrarían en el lugar procesos intensos de erosión y transporte que deformarían los canales. Esas deformidades, multiplicadas en el tiempo y aleatoriamente dispuestas en el espacio, impedirían que el drenaje se organizara como sistema. En ese caso, el drenaje no puede comenzar a organizarse mientras el sistema no logre dispersar el gasto de la energía que ingresa de manera puntual.

De acuerdo con esto sólo se considera la descarga libre al Golfo de México. La descarga libre en la desembocadura del río Pánuco implica que el nivel del mar no sufre efecto de sobre elevación por la incidencia de la marea de tormenta, inducida por frentes fríos o tormentas tropicales, sobre la costa. Esta condición permite escurrir al río Pánuco de la manera más hidráulicamente eficiente que las condiciones del terreno permitan.

4.2.2.2 Ingreso de caudal de los principales afluentes

En la Cuenca Baja del río Pánuco ocurren inundaciones de tipo fluvial, las inundaciones fluviales son procesos naturales que se han producido periódicamente y que han sido la causa de la formación de las llanuras, tierras fértiles donde tradicionalmente se ha desarrollado la agricultura.

Aunque las crecidas de en los ríos no pueden prevenirse, un buen desempeño de estructuras de control como la construcción de presas, puede reducir en gran medida los daños posibles a la población, para ello es necesario la estimación de las avenidas.

Con el fin de estimar la inundación que se generaría sin la construcción de la presa, es decir, en condiciones actuales, se muestran en la Figura 4.3 los hidrogramas que se ingresan a partir de la Estación de las Adjuntas en el río Pánuco (panel izquierdo) y para el río Tamesí (panel derecho). Los gastos de mayor magnitud son los del río Pánuco, respecto al río Tamesí los caudales son menores, probablemente por los cuerpos de agua que se encuentran a ambas márgenes del río.

Es importante tener en cuenta que los escurrimientos dentro de la cuenca pueden ser generados por la exposición a fenómenos hidrometeorológicos, trenes de eventos consecutivos, similar a la ocurrencia de la Gran Inundación en el año 1955 por el efecto intensificado de las tres tormentas tropicales Gladys, Hilda y Janet. Con este propósito en esta sección se utilizan los hidrogramas de diseño resultantes del análisis hidrológico realizado en el proyecto (Domínguez et al, 2010). De acuerdo con los resultados del (Domínguez et al, 2010), existe poca probabilidad de que una avenida con un periodo de retorno dado, se presente de forma simultánea en ambos ríos (Pánuco y Tamesí). Así, consideramos el caso más probable de que se presenten las avenidas en ambos ríos de forma no simultánea.

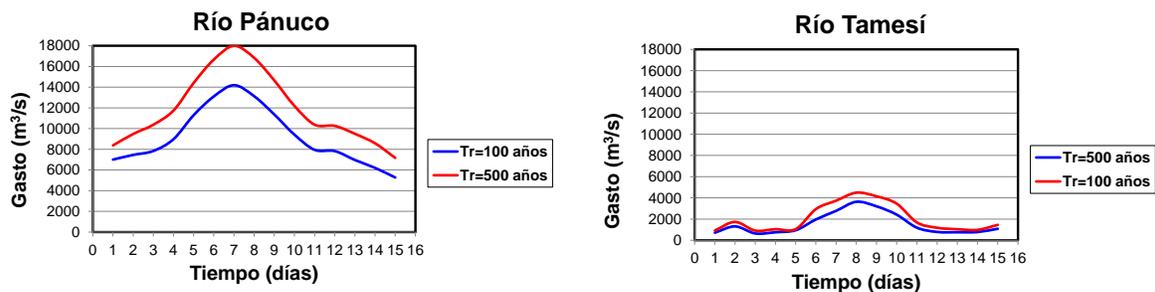


Figura 4. 3 Hidrogramas de los gastos de diseño de los ríos Tamesí (panel izquierdo) y Pánuco (panel derecho)

4.2.2.3 Gastos de diseño regulados por la Presa Pujal-Coy

El esquema de cálculo de los hidrogramas utilizados para el río Pánuco se muestra en la Figura 4.4, partiendo de los gastos individuales, el primero es el caudal regulado por la Presa Pujal-Coy (Q_{presa}), y el segundo proviene de la estación Olivo (Q_{olivo}), la suma de ambos es el que se ingresa en la Estación de las Adjuntas (Q_{suma}).

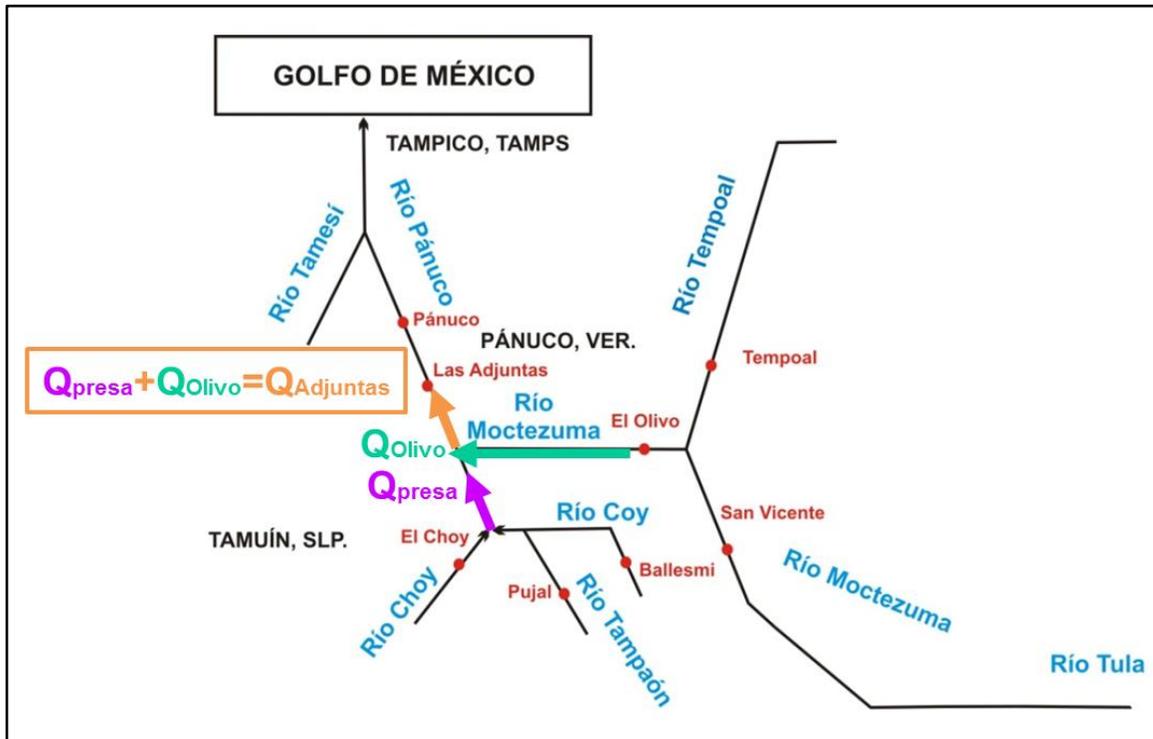


Figura 4. 4 Esquema de los gastos que se ingresan a la Estación de las Adjuntas (flecha naranja) que pertenece al río Pánuco, obtenido a partir de la suma entre los gastos de la Estación Olivo (flecha rosa) y el gasto regulado por la Presa Pujal-Coy (flecha verde)

Es importante analizar las avenidas de la Cuenca Baja del río Pánuco, dado que se encuentra en constante riesgo de inundación por el caudal que llevan los cauces, principalmente por el río Pánuco, generados a partir de las precipitaciones. En la Figura 4.5 se muestran los hidrogramas que se utilizaron en la modelación de flujos extraordinarios, el que se ha ingresado en la condición de frontera para el río Pánuco es el Q_{suma} (color naranja), que se obtiene al sumar el que proviene de la Estación El Olivo Q_{olivo} (color verde) con el hidrograma de gastos regulados por la presa Q_{presa} (color rosa).

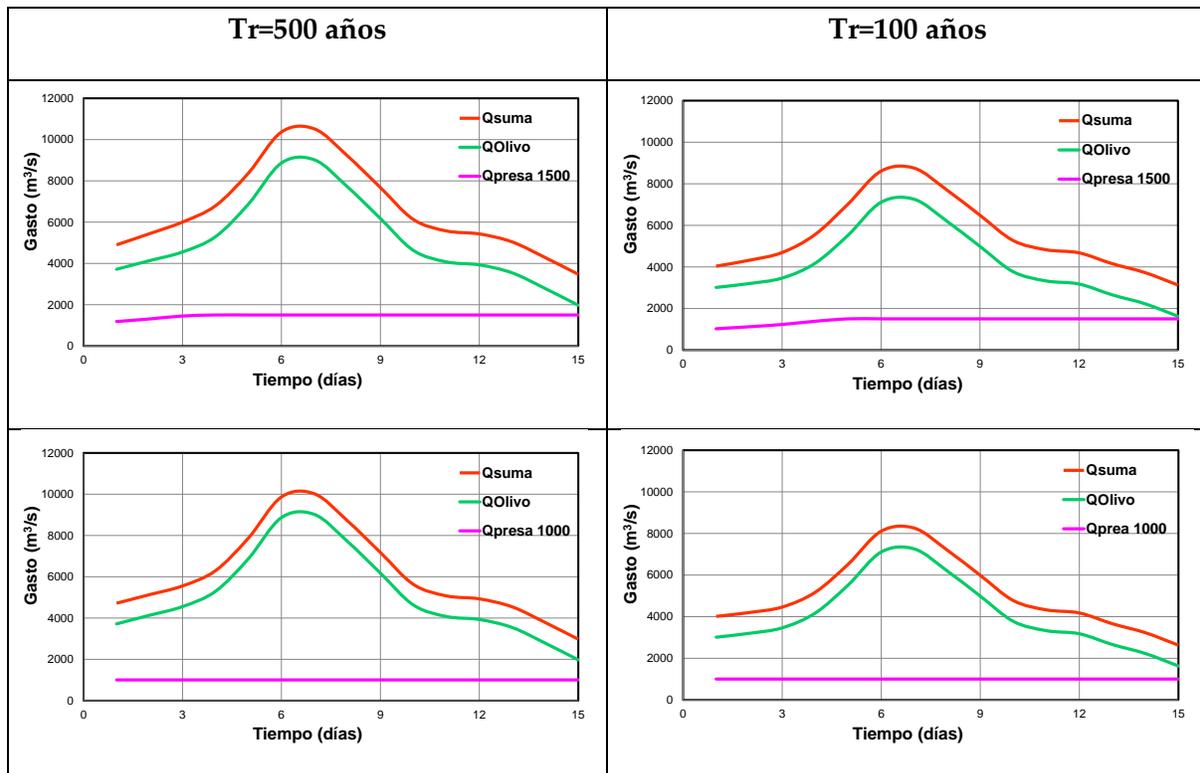


Figura 4. 5 Hidrogramas de los gastos de diseño del río Pánuco asociado a los periodos de retorno de 500 y 100 años. En color naranja se indica la curva del gasto que se ingresa a la Estación de las Adjuntas, resultado de sumar los gastos de la Estación Olivo (curva verde) y la descarga de la Presa Pujal-Coy (curva rosa)

Estimación de avenidas de diseño

Con el objetivo de determinar la probabilidad de ocurrencia de los caudales máximos registrados y definir las condiciones de diseño de las obras para diferentes periodos de retorno, se realizó un análisis estadístico de las avenidas históricas ocurridas en la cuenca, que considera la probabilidad de no simultaneidad de los gastos y volúmenes máximos (Domínguez-Mora, 2010)

A continuación se describen los pasos y consideraciones para la estimación de avenidas de diseño de la Cuenca Baja del río Pánuco, que se realizaron en una tesis previa “Bajo Pánuco, Avenidas de Diseño” (Mandujano-García, 2011)

1. A partir de la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) del Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua, se obtuvieron los registros de gastos máximos diarios en cada una de las estaciones hidrométricas que se muestran en la Tabla 4.2 ubicadas en la zona de planicie de la cuenca.

Estación	Clave	Corriente
Tempoal	26248	Tempoal
Pujal	26272	Tampaón
Choy	26278	Choy
El Olivo	26387	Tempoal
San Vicente	26415	Moctezuma
Tamuín	26224	Tampaón
Ballesmi	26241	Coy
Las Adjuntas	26255	Pánuco
Pánuco	26424	Pánuco

Tabla 4. 1 Estaciones hidrométricas utilizadas en la estimación del gasto de diseño

- La calidad de la información se verificó con una comprobación aritmética , en la cual la suma de las entradas debería corresponder a la magnitud de las salidas (Mandujano-García, 2011)

$$Q_{entrada} = Choy + Pujal + Ballesmi \quad Q_{salida} = Tamuín$$

$$Q_{entrada} = San Vicente + Tempoal \quad Q_{salida} = Olivo$$

$$Q_{entrada} = Olivo + Tamuín \quad Q_{salida} = Adjuntas$$

$$Q_{entrada} = Adjuntas \quad Q_{salida} = Pánuco$$

La suma de los gastos de entrada $Q_{entrada}$, se comparó con los gastos de salida Q_{salida} , por medio de un factor, $factor = Q_{salida}/Q_{entrada}$ la media del factor resultó de 1.14, se considera como un valor aceptable para la calidad de la información; los registros se compararon para los años en común, el intervalo de años es de 1973 a 1999.

- Una vez verificada la calidad de los registros, se obtuvieron los eventos máximos anuales para duraciones de 1 a 15 días, debido a las características de la cuenca, los eventos de larga duración son los que mayor impacto tienen sobre la región. El objetivo principal del *análisis de frecuencias* es relacionar la probabilidad de ocurrencia de un evento (periodo de retorno) y su magnitud, mediante el uso de funciones de probabilidad, de forma que se pueda estimar cada cuánto una variable supera una determinada magnitud. (Mandujano-García, 2011).

Los datos se ajustaron a una función de probabilidad tipo Gumbel, por ser una distribución de probabilidad desarrollada para el análisis de valores extremos como gastos máximos y mínimos (Aparicio, 2010). Una vez identificado el comportamiento de las muestras se realizó el análisis de frecuencias con el programa AX (elaborado por el CENAPRED). La función de densidad de probabilidad de la distribución Gumbel está dada por la Ecuación 4.16.

$$F(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[- \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) - e^{-\left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right)} \right] \quad (4.20)$$

Donde x es un evento con periodo de retorno T .

La función de distribución de probabilidad de x está dada por $f(x) = \exp \left[-e^{-\left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right)} \right]$, α y β son los parámetros de la función y se estiman como:

$$\alpha = \frac{1.2825}{S} \quad (4.21)$$

$$\beta = \tilde{x} - 0.45S \quad (4.22)$$

Donde \tilde{x} es la media de los datos y S su desviación estándar.

Con los eventos estimados para las duraciones de uno a quince días, es posible definir las avenidas de diseño para periodos de retorno de 2 hasta 10,000 años.

4. A partir de los resultados de los ajustes de la distribución Gumbel, se analiza el periodo de retorno de interés. Se considera a cada evento como gasto promedio (Q_{medio}) de cada duración. A partir de los gastos promedio, se obtienen los gastos de cada día ($Q_{\text{individual}}$). Tomando en cuenta que el primer gasto individual será igual al gasto promedio de un día, los gastos individuales se obtienen con la ayuda de la expresión

$$Q_{ind} = n * Q_{Medio n} - \left(\sum_{i=1}^{n-1} Q_{individuali} \right) \quad (4.23)$$

Donde n es el número del gasto individual a obtener, i es el contador de los gastos individuales. Cada gasto individual, será el gasto medio de un día cualquiera, por lo tanto la duración del hidrograma de la avenida de diseño será de 15 días. El hidrograma de la avenida de diseño se genera a partir de los gastos individuales obtenidos. Al colocar el gasto de mayor magnitud al centro, este valor corresponde al pico del hidrograma y a los lados se colocan alternando los gastos individuales.

En la tesis “Bajo Pánuco, Avenidas de Diseño” (Mandujano-García, 2011) se notó que al calcularse las avenidas de diseño para una duración de 15 días, el hidrograma correspondiente a la estación Pánuco, la rama descendente no bajó por completo; por ello se consideró adecuado emplear *métodos regionales* para la generación de evento de diseño. Este método resulta conveniente cuando se presenta la falta de registros continuos y suficientemente largos, debido a que el análisis de frecuencias puede ser poco confiable si se realiza por separado, sobre todo cuando el análisis es para periodos de retorno grandes.

Un aspecto importante para el *análisis de frecuencias*, es la disponibilidad de información, para contar con estimaciones más certeras se debe contar con bases de datos más largas, tomando en cuenta que la probabilidad de ocurrencia de avenidas, es la extrapolación basada en los datos.

Entre los aspectos por considerar en el análisis regional, es que las poblaciones con gastos máximos en varios sitios de la región tengan características similares. La identificación de regiones homogéneas se comprueba con la prueba de Fisher.

La prueba de Fisher define si dos conjuntos forman parte de la misma población por medio de sus varianzas. Para la comparación se utiliza su cociente, se asigna como numerador a la mayor entre ellas, si el cociente se encuentra dentro del valor límite de la distribución de la probabilidad de Fisher, se acepta.

Al considerarse que si los máximos anuales de cada estación se dividen entre sus promedios, la varianza de la nueva muestra es igual al cuadrado del coeficiente de variación. A continuación se muestra el procedimiento para ejemplificar el procedimiento.

1. Determinación de los coeficientes de variación de las muestras de cada una de las estaciones. Para el caso de las estaciones de Pujal

Estación Pujal: $CV_{pujal} = 0.64906$

Estación Tempoal: $CV_{Ballesmi} = 0.54027$

2. Comparación entre los coeficientes de variación para definir a cual corresponde el subíndice 1 y 2.

$$CV_{pujal} > CV_{Ballesmi} \rightarrow CV_{pujal} = CV_1 \text{ y } CV_{Ballesmi} = CV_2$$

3. Los coeficientes variación se dividen y el resultado se eleva al cuadrado

$$\left(\frac{CV_1}{CV_2}\right)^2 = \left(\frac{0.64906}{0.54027}\right)^2 = 1.4433$$

En todos los caso se realizó el mismo procedimiento, de ahí que se dedujeran varios escenarios de regionalización, tomando en cuenta la cercanía de los valores de los coeficientes. Si los cocientes cocientes $(CV_1/CV_2)^2$, se encuentran dentro de los límites de la distribución F, se puede afirmar que no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis de pertenencia de una región y se le acepta (Domínguez Ramón et al, 1981).

El análisis se realizó en dos regiones, la región 1 integrada por las estaciones: Choy, Olivo, Ballesmi, Tamuin y Adjuntas; la región 2 constituida por: Tempoal, Pujal y San Vicente. Los resultados mostraron que la estación Pánuco no pertenece a ninguna de las dos regiones.

Después de definirse las regiones, se inició el proceso de regionalización con el método *estación-año*, en el cual se toman los datos existentes de las estaciones y se integran en una única muestra. Para la generación de una muestra grande y única, se dividen todos los datos de cada una de las estaciones entre la media de la misma. La muestra se ordena de mayor que menor, y ésta se dibuja en papel Gumbel con la idea de observar el comportamiento.

La identificación del comportamiento de los datos en una distribución Gumbel se realizaron mediante el software AX, a partir de estos se obtuvieron los eventos para los distintos periodos de retorno. Con los resultados extrapolados de la región pueden obtenerse los eventos para cada estación (Ver hidrograma en la Figura 4.6), multiplicando los eventos regionales por la media de los datos de la estación que se requiera analizar.

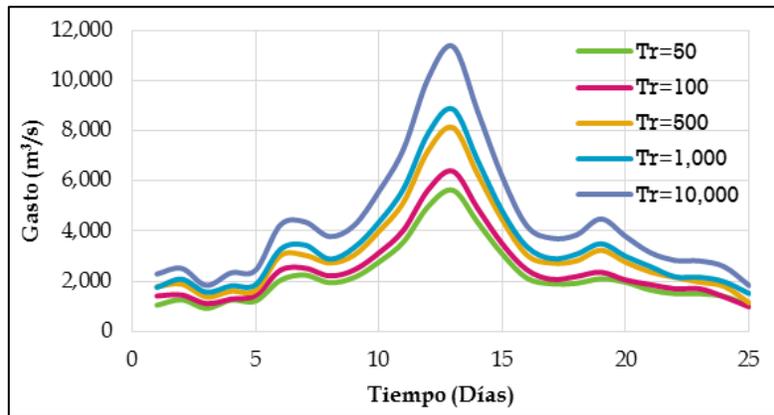


Figura 4. 6 Hidrogramas de diseño correspondientes a las estaciones Pujal y Ballesmi

4.3 Validación del modelo con el evento Arlene, 2011.

En el 2011 se registró una importante inundación que afectó a la Cuenca del Pánuco, el evento se generó por la tormenta tropical Arlene, entre los días 1 y 3 de julio.

De acuerdo con los datos de la Comisión Federal de Electricidad, el 28 de junio, Arlene fue la primera tormenta tropical del año generada a 340 km del norte de Veracruz en el Golfo de México, con una velocidad inicial de 15 km/h. La máxima precipitación acumulada fue de 113.2 mm en el Puerto de Tampico y 150 mm en la zona de la Huasteca, Veracruz. La tormenta tropical tocó tierra el 30 de junio, produciendo torrencial y escurrimiento en el área comprendida en la Cuenca Baja del río Pánuco (CFE, 2011). El registro de escurrimiento máximo acumulado en 24 horas fue de 348.8 mm en el Río Tamesí y 231 mm en el río Pánuco; la persistencia y la magnitud de la precipitación causaron daños severos en la región. En la Figura 4.7 se muestran el mapa de precipitación del día 30 de junio de 2011, durante el paso de la tormenta tropical Arlene.

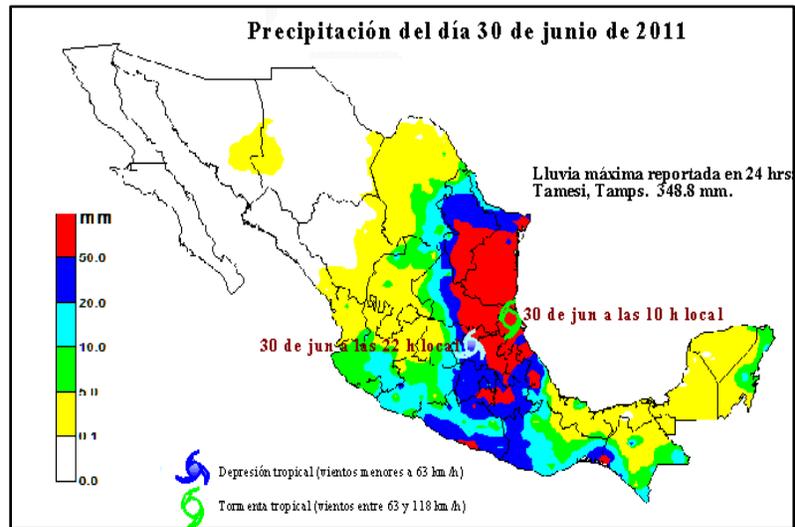


Figura 4. 7 Las lluvias máximas acumuladas en mm en 24 horas registradas el día 30 de junio fueron de 348.8 mm en el Río Tamesí y 231 mm en el río Pánuco (CFE-GEIC-Hidrometeorología, 2011)

Para caracterizar el evento se han combinado los datos de precipitación de alta calidad con un modelo numérico bidimensional (Pedrozo et al, 2012). El trabajo de Pedrozo además de reproducir el evento mediante la metodología, estudia las incertidumbres hidrológicas en la identificación de áreas propensas a inundación.

De modo que el estudio comprende de una metodología integrada por mediciones de precipitación en campo, un modelo hidrológico para la estimación de lluvia-escorrentía en la cuenca, y la modelación hidrodinámica de los flujos de inundación a través de un modelo bidimensional. Los datos de precipitación corresponden a las estaciones hidrometeorológicas automáticas instaladas por la Comisión del Agua Nacional (CONAGUA).

La incidencia de este fenómeno contribuyó en la estimación del nivel de exposición de la cuenca. Las imágenes captadas por la NASA, se muestran en la Figura 4.8, posterior a la ocurrencia de la tormenta tropical muestran una inundación severa (NASA, GSFC, Rapid Response).

4.3.1.1 Resultados del evento Arlene 2011

La Figura 4.8 en el panel izquierdo presenta la imagen de satélite correspondiente al 7 de julio de 2011, después de que la T. T Arlene ha pasado por la zona. Como se aprecia en la figura, las afectaciones en la cuenca baja del río Pánuco son severas. Por otra parte, en el panel derecho se muestran los resultados de la simulación del mismo día.

Las áreas más probables de inundación se visualizan al sur del dominio, y a la margen derecha del río Pánuco. En la zona de la laguna Marland y la confluencia entre los ríos Pánuco y Tamesí, muestran que existe una diferencia entre la imagen real y la resultante del modelo estimado probabilísticamente con el hidrograma del 50%, por tanto esta región presenta alto nivel de exposición debido a la proximidad con la confluencia entre los dos ríos, sugiere que las pequeñas poblaciones localizadas en dicha región podrían encontrarse en situación de riesgo de inundación. La comparación indica que el modelo numérico es capaz de reproducir la zona afectada con cierta confiabilidad. Sin embargo, se registran también pequeñas diferencias en la parte sur del dominio de cálculo donde el área afectada es mayor a la registrada en la imagen del evento real.

El trabajo de estimación probabilística de mapas de inundación para el evento de Arlene en el año 2011 (Pedrozo et al, 2012) permite validar el modelo matemático que se empleará para la simulación numérica de la regulación de los flujos extraordinarios en la Cuenca Baja del río Pánuco, que básicamente presenta la misma metodología en lo que se refiere a la puesta en punto del modelo, que comprende los datos de elevación que provienen de la misma fuente del SRTM, así como los valores de la rugosidad en el cauce y la llanura de inundación. Se consideran que el estudio realizado por Pedrozo et al, en el 2012 ha sido una aportación que favorece la caracterización de inundaciones en la región.

Como criterio general de aceptabilidad, el modelo debe ser capaz de proveer resultados que demuestran un acuerdo cuantitativo satisfactorio con las imágenes disponibles. El modelo se validó verificando que se lograron reproducir las manchas de inundación, en particular la ocurrencia de los desbordamientos en los mismos.

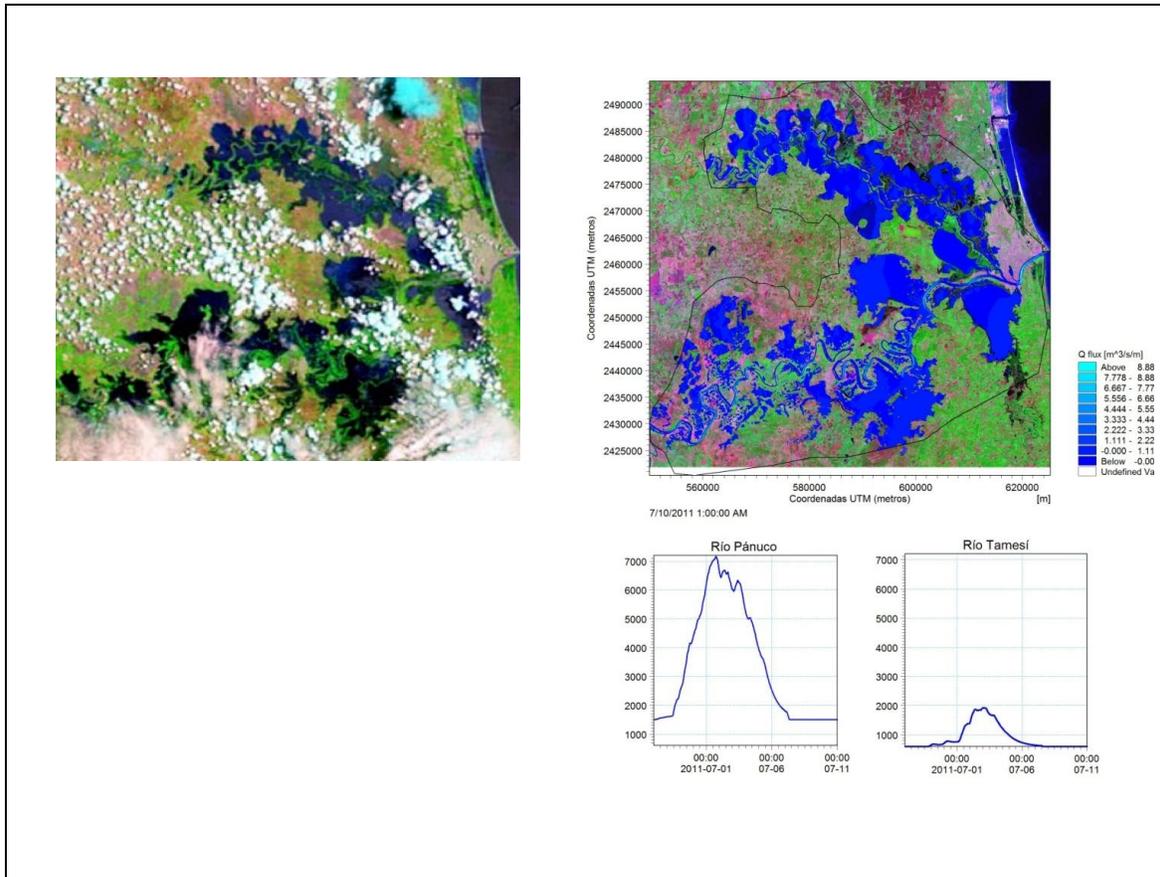


Figura 4. 8 Panel izquierdo: Imagen satelital del día 7 de julio de 2011 (NASA/GSFC, Rapid Response). Panel derecho: Imagen obtenida a partir de la simulación con modelo hidrodinámico para la misma fecha y con el hidrograma del 50%.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

La Cuenca Baja del Pánuco es una región con una fisiografía dominante de grandes llanuras aluviales y salinas, que junto con el vasto sistema lagunar (CSVA, 2001), está sujeta a inundaciones. En términos geomorfológicos, el espacio sobre el que se asienta, tiene un origen acumulativo fluvial (López-Blanco et al., 2006). Esta región se caracteriza por tener pendientes mínimas, y que por el tipo de sedimentos finos, estos son acarreados y depositados en otras épocas, lo que convierte en una región idónea para actividades agrícolas por la fertilidad de los suelos.

Sin embargo, la mayor zona conurbada y con potencial económico, localizada en las costas del Golfo de México, presenta inundaciones del tipo fluvial que pueden tener mayor permanencia que las que ocurren en la Cuenca Media del Pánuco, porque al tener menor pendiente, se reduce la capacidad del drenaje, adicionalmente el arrastre de sedimentos disminuye el tirante en ambos ríos, Pánuco y Tamesí.

Es una realidad que no es únicamente la constitución natural de la Cuenca Baja del río Pánuco que ha propiciado la generación de inundaciones, existen diversas razones, como los asentamientos humanos en las proximidades a las márgenes de los ríos. Entre las poblaciones urbanas asentadas cerca de los ríos se encuentran las ciudades de: Tampico, Madero y Altamira en Tamaulipas; Pánuco, en Veracruz; Pujal-Coy, Cd. Valles y Ébano, en San Luis Potosí en la región aguas arriba del río Pánuco.

En países como Estados Unidos, los estudios de seguros contra inundaciones se basan en mapas que muestran las zonas inundadas para avenidas con diferentes periodos de retorno, siendo el máximo analizado hasta de 500 años, dado que el monto del seguro se toma en cuenta la localización de los bienes materiales con respecto a los límites de esas zonas, y a la altura que en ellas alcance el agua. (Maza-Álvarez, 1997). También en Japón les ha funcionado para desarrollar un programa que ha hecho entender a la comunidad sobre la vulnerabilidad, las estrategias y los roles que juegan en el manejo del riesgo de inundaciones (MLIT, 2003). Los mapas de inundación son de uso importante para el manejo del riesgo de inundación, para la aplicación de medidas estructurales y no estructurales.

5.1 Condiciones Actuales

El objetivo principal del estudio es analizar el funcionamiento hidrodinámico de la Cuenca Baja del río Pánuco, de modo que se han determinado los mapas de inundación en relación con los periodos de retorno de 100 y 500 años. Para cumplir este objetivo se evaluó mediante la modelación matemática bidimensional.

Luego de identificar las zonas inundables, se presentan los resultados a partir de la simulación numérica de la regulación de flujos extraordinarios mediante la Presa Pujal-Coy con los mismos periodos de retorno pero con dos diferentes descargas en la presa.

5.1.1. Escenario de inundación con un gasto asociado a un $T_r= 100$ años

La predicción del funcionamiento de los ríos Pánuco y Tamesí con el tránsito de los gastos asociados a un periodo de retorno de 100 años se muestran en la Figura 5.1, en la cual se advierte que la mayor inundación se concentra en la zona de la Estación de las Adjuntas donde los niveles de superficie alcanzan un poco más de 18 metros, y conforme se avanza con dirección hacia la desembocadura los niveles de superficie disminuyen. La zona alrededor de laguna de Marland, al término del tránsito de la avenida queda cubierta de agua con niveles de superficie de 12 a 13.5 metros.

Avanzando en el sentido hacia aguas abajo se observa que el río Pánuco se ha desbordado hacia ambos márgenes en la zona de la Estación de Pánuco, los niveles de superficie ascienden hasta 9 y 10.5 m. Entre más se aproxima el río Pánuco a la desembocadura es posible distinguir que los niveles de superficie disminuyen, al sur de la zona (entre la Estación de Pánuco y el municipio de Pueblo Viejo) los niveles de superficie permanecen entre 7.5 y 9 m. Los niveles de superficie son menores entre las lagunas de Chairel y Pueblo Viejo entre 6 y 7.5 m, estos cuerpos lagunares retienen de manera natural el caudal, además que sirven para el suministro de agua potable de las poblaciones de Tampico y Pueblo Viejo.

Al final del recorrido del río Pánuco, notoriamente se ha distribuido el flujo, en la zona de la desembocadura, los niveles de superficie obtenidos varían de aguas arriba hacia aguas abajo entre 3 y 1.5 m. A pesar de que se observa el rebase en la capacidad de almacenamiento de los cuerpos lagunares del río Tamesí, los niveles de superficie miden entre 4.5 y 6.5 m, esto indica que de cierta forma moderan el nivel de inundación.

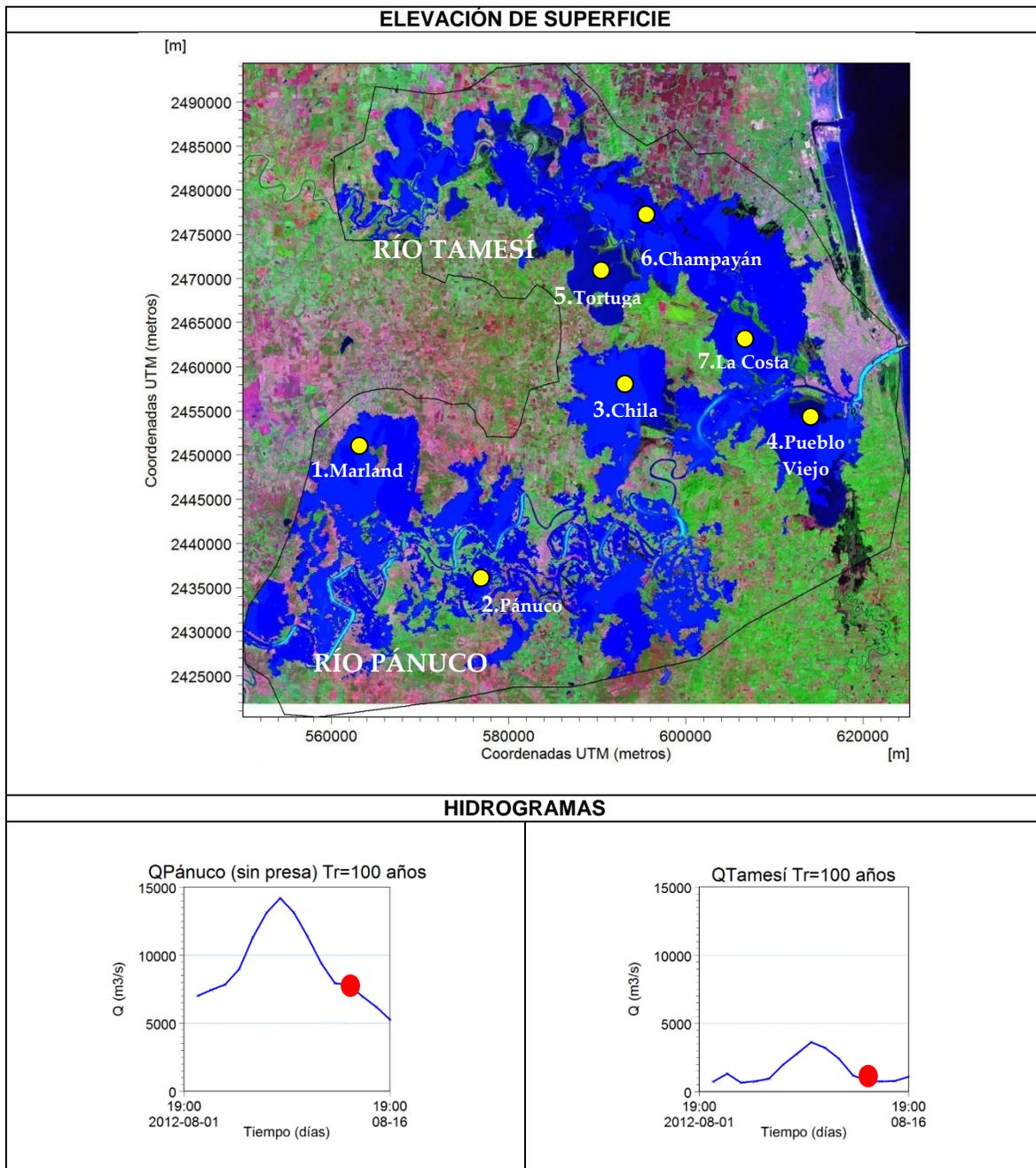


Figura 5. 1 Inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco con un periodo de retorno de 100 años

Los mapas de inundación que se han mostrado son resultado de las simulaciones del modelo 2D (Figura 5.1), tiene mayores ventajas que el 1D, aunque el realizado por Cruz-Quiroz en el 2012 proporcionó buenos resultados, es preferible utilizar un modelo 2D en las planicies de inundación porque conforme se reduce la pendiente en la zona de estudio, los resultados se apartan de la realidad.

Comparación de resultados entre modelos 1D y 2D con $Tr=100$ años

Los resultados de las simulaciones se refieren a los niveles de superficie a lo largo de los ríos Pánuco y Tamesí, en la Tabla 5.1 se comparan los niveles de superficie obtenidos con los modelos 1D y 2D, para ambos casos se utilizaron los mismos hidrogramas de entrada para los ríos, con un periodo de retorno de 100 años, en los mismos puntos de análisis que se muestran en la Figura 5.2.

De acuerdo con la Tabla 5.1 la mayor diferencia en el río Pánuco es en la Estación Pánuco de 1.4 metros, los demás valores se asemejan. En el río Tamesí los valores de nivel de superficie se aproximan, aunque menos en la zona lagunar que varía 2.65 metros.

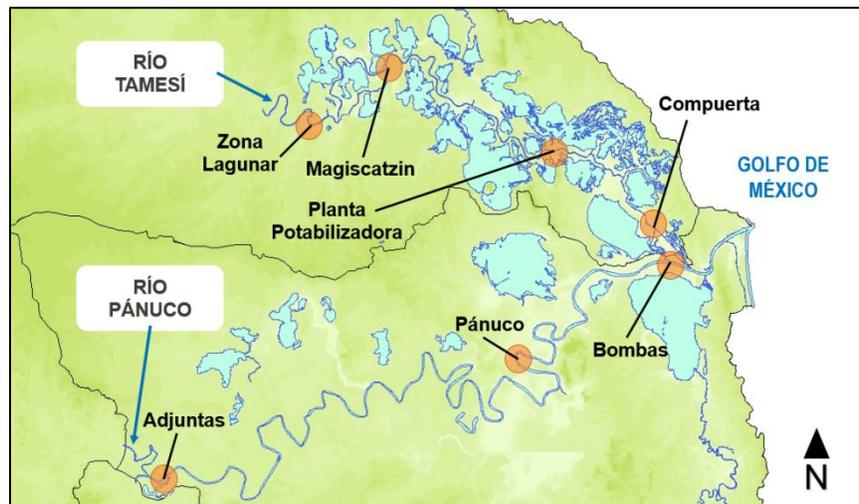


Figura 5. 2 Puntos de análisis de los niveles de superficie

<i>Modelo</i>		<i>Modelo 1D</i>	<i>Modelo 2D</i>
<i>Periodo de Retorno</i>		<i>Niveles de Superficie (m)</i>	
		Tr= 100 años	
<i>Río Pánuco</i>	Adjuntas	18.87	18.67
	Pánuco	11.63	10.2
	Bombas	3.02	3.67
<i>Río Tamesí</i>	Zona Lagunar	9.65	7
	Magiscatzin	5.05	5.3
	Planta Potabilizadora	3.86	3.67
	Compuerta	3.02	3.67

Tabla 5. 1 Comparación de los Niveles de Superficie (metros) obtenidos con modelo 1D (Cruz-Quiroz, 2012) y modelo 2D

5.1.2. Escenario de inundación con un gasto asociado a un $Tr=500$ años

Conforme a la información histórica de la Cuenca Baja del Pánuco (González-Villareal, 2010), algunas de las áreas urbanas, se ubican en altos topográficos, con excepción de la población Tamuín, en San Luis Potosí, en la creciente de 1955 se inundó en su totalidad; otras poblaciones como Pánuco, Tempoal y El Higo sufrieron inundaciones parciales en un área muy reducida en su zona urbana, la principal afectación fue en las vías de comunicación.

En el sitio de las Adjuntas se registró un nivel de 22.08 m. en el año de 1955, el evento de 1975 produjo inundación pero con niveles de superficie menores de 18.28 m. En la población de Pánuco el nivel alcanzó de 9.04 m en el año de 1955, y de manera similar en 1975, el nivel registrado fue de 9.12 m. Por la elevación del agua registrada en la Estación Adjuntas de 22.08 m se estima que la avenida del río Pánuco en la estación es de 10,000 m^3/s que corresponde a un periodo de retorno de 500 años. (CONAGUA, 1994)

Por medio de la simulación se ha determinado que el área inundable con niveles de superficie más altos corresponde a la Estación de las Adjuntas, en la Figura 5.3 se muestran los valores de niveles de superficie se ubican entre 16.5 y poco más de 19.5 m, en comparación con el evento de inundación de 1955 ocurrido en la Cuenca Baja del Pánuco, el evento histórico superó a la simulación por aproximadamente 2.5 m. En esta comparación con el evento de 1955, se identifica otro sitio de análisis, la estación Pánuco el rango de niveles de superficie por $Tr=500$ años, que se obtuvo en la simulación es entre 10.5 a 12 m, y conforme al registro histórico el nivel de superficie fue de 9.12 m, la diferencia entre el evento histórico y el simulado puede ser de 1.38 a 2.88 m. Se observa en el comportamiento del sistema la variación de los niveles de superficie, disminuye conforme se aproxima a la desembocadura, entre la población de Pánuco y Montecillos la elevación de superficie disminuye hasta un nivel máximo de 9 m y un nivel mínimo 10.5 m. Al avanzar hacia aguas abajo, el sistema lagunar del Pánuco que incluye a las lagunas de Chairel y Pueblo Viejo sufren un desbordamiento, se indican niveles de superficie entre 6 y 7.5 m. En el último tramo del río Pánuco, en la desembocadura los niveles de superficie son menores entre 3 y 4.5 metros.

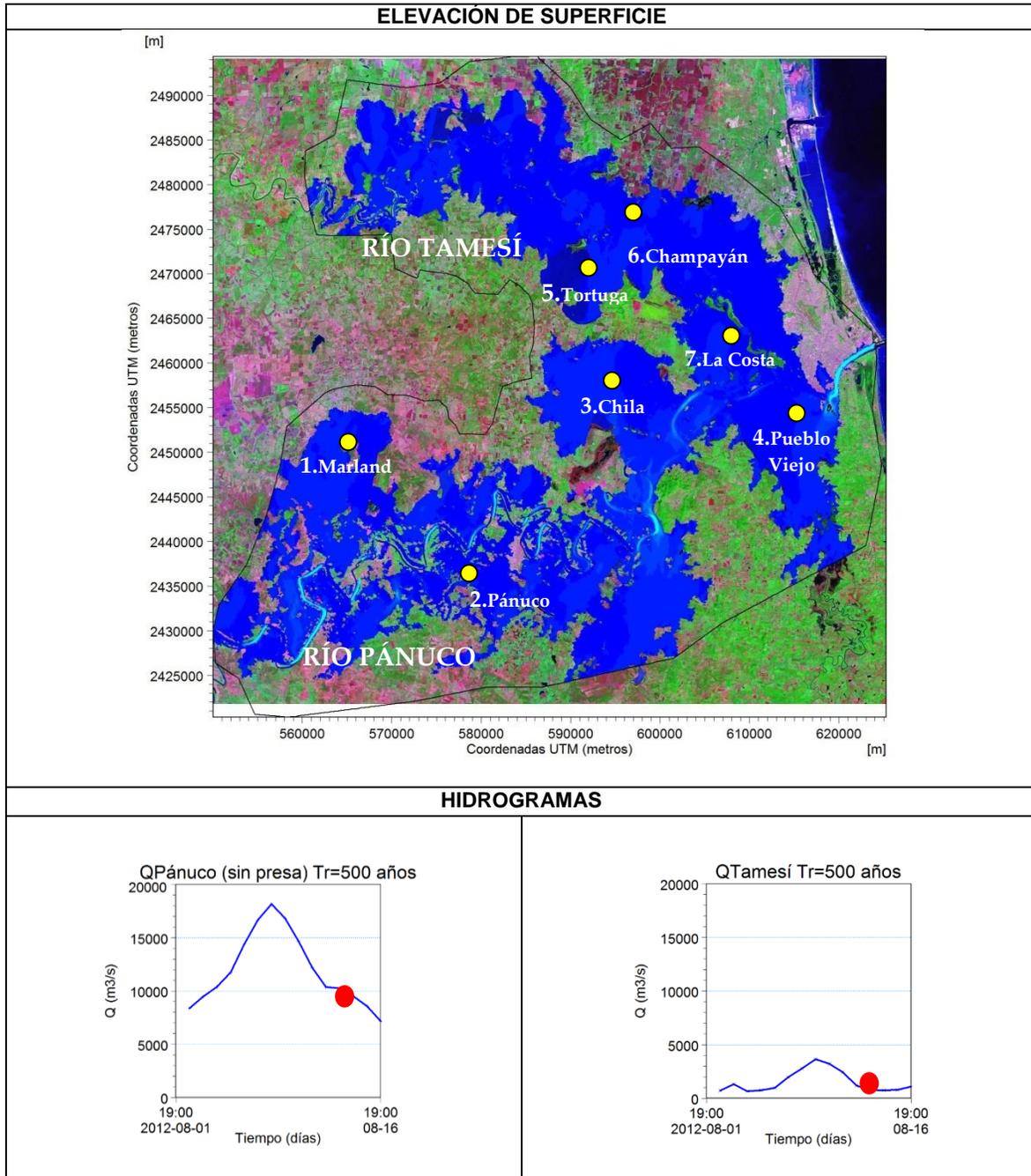


Figura 5. 3 Inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco con un periodo de retorno de 500 años

Comparación de resultados entre modelos 1D y 2D con $Tr=500$ años

También se estimaron los niveles de superficie con el gasto asociado al periodo de retorno de 500 años con el modelo unidimensional y el bidimensional en los puntos de medición de la Figura 5.4. En la Tabla 5.2 se han comparado los niveles de superficie entre ambos modelos, en el río Pánuco existe una diferencia notable en la Estación Bombas de 1.59 metros, sin embargo la diferencia en las otras estaciones es menor. Para el caso del río Tamesí se reportaron más variaciones en la Zona Lagunar (1.93 m), la Estación Magiscatzin (1.36 m) y en la Compuerta (1.26 m). Esto hace suponer que se debe a la complejidad del sistema lagunar del río Tamesí que ha sido simplificado en el 1D como estructuras laterales vertedoras, en cambio en el 2D las lagunas se han configurado con los datos batimétricos.

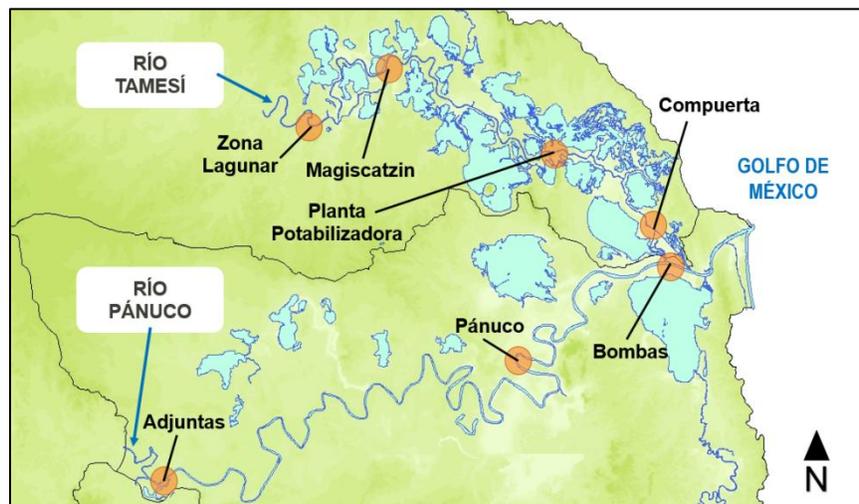


Figura 5.4 Puntos de análisis de los niveles de superficie

<i>Modelo</i>		<i>Modelo 1D</i>	<i>Modelo 2D</i>
<i>Periodo de Retorno</i>		<i>Niveles de Superficie (m)</i>	
		Tr= 500 años	
<i>Río Pánuco</i>	Adjuntas	20.2	20
	Pánuco	12.94	12
	Bombas	3.71	5.3
<i>Río Tamesí</i>	Zona Lagunar	10.63	8.7
	Magiscatzin	5.64	7
	Planta Potabilizadora	4.57	5
	Compuerta	3.74	5

Tabla 5.2 Comparación de los Niveles de Superficie (metros) obtenidos con modelo 1D (Cruz-Quiroz, 2012) y modelo 2D

5.2 Escenario de inundación con la regulación de flujos extraordinarios con la Presa Pujal-Coy

Con el propósito de reducir la magnitud del riesgo de inundación por el tránsito de grandes gastos, como indicaron los resultados en condiciones actuales asociados a periodos de retorno de 100 y 500 años, se han planteado algunas alternativas para el control de inundaciones.

En la Cuenca del río Pánuco se han realizado diversos estudios contra inundaciones, pasando por diferentes soluciones estructurales, como la construcción de presas y bordos longitudinales, derivación de cauces, construcción de canales, por mencionar algunas.

Entre las medidas estructurales que recientemente han sido evaluadas, se tiene el estudio con un modelo unidimensional (Pedrozo et al, 2011) son:

- Canal de alivio del río Pánuco hacia la laguna Tamiahua.
- Canal de interconexión entre las lagunas de Chila y La Tortuga.
- Canal de alivio del río Pánuco hacia el Golfo de México junto con la interconexión entre las lagunas de Chila y La Tortuga.
- Canal de alivio del río Tamesí hacia el Golfo de México.

De manera similar, como parte de una tesis de maestría (Cruz-Quiroz, 2012) se evaluaron algunas otras alternativas para el control de inundaciones de la Cuenca Baja del río Pánuco como:

- Presa Pujal-Coy
- Canal de alivio del río Pánuco y Tamesí hacia el Golfo de México junto con la Presa Pujal-Coy

En los estudios anteriores con el modelo numérico 1D (Pedrozo et al, 2011; Cruz-Quiroz, 2012), en régimen permanente y no permanente, se concluyó que la alternativa de la Presa Pujal-Coy reflejó un mayor beneficio entre todas las evaluadas, se observó un mejor desempeño en el río Pánuco que en Tamesí, y también que los niveles de superficie disminuían en la cercanía a la confluencia entre ambos ríos.

A partir del estudio realizado por Cruz-Quiroz en el 2012, se ha retomado la alternativa de la construcción de la presa en el sitio de Pujal-Coy. Para ello se ha realizado un conjunto de simulaciones con un modelo bidimensional, que permite identificar con mayor precisión el comportamiento hidrodinámico de la cuenca. Por otra parte, el modelo

bidimensional con alta resolución, basado en las ecuaciones RANS se ha logrado representar cada vez mejor el complejo ambiente fluvial como el de la Cuenca Baja del río Pánuco.

La construcción de una presa es una alternativa para el control de inundaciones, se diseña para que los gastos máximos que salen a través de la obra de excedencias sean menores que los gastos máximos de entrada al vaso. La avenida de diseño depende de un periodo de retorno, que permite estimar la probabilidad de que sea superada durante la vida útil de la obra.

Como cualquier proyecto de ingeniería civil, la vida útil de una presa se selecciona conforme a la relación con su costo y los beneficios que aportará durante un periodo de tiempo determinado, sin importar que la obra pueda durar más. Entre los factores que se deben tomar en cuenta para la selección de obras, de acuerdo con el Manual para el control de inundaciones (CONAGUA, 2011) son:

- Las consecuencias de falla de obra, sobre todo en pérdidas humanas,
- La vida real esperada de la obra y no únicamente la vida útil económica,
- El costo del incremento de la seguridad, en ocasiones, al incrementar el periodo de retorno, el aumento en el gasto de diseño

Si se desea tener una obra de protección casi total contra las inundaciones, para evitar daños a las propiedades localizadas cerca del cauce por donde escurre la avenida, se necesitan obras muy costosas, al evitar que la creciente exceda la capacidad de la estructura, implica construir obras grandes. (Fuentes-Mariles, 1997).

El costo del beneficio que proporciona una presa generalmente no se cuantifica en los estudios de factibilidad de presas y generación eléctrica o riego. Esta función de control depende de la relación entre el volumen de la avenida y el volumen en el vasos que hay entre los niveles de aguas máximas ordinaria (NAMO) y de aguas máximas extraordinarias (NAME) denominado volumen para regulación de avenidas, volumen de control. (Maza-Álvarez, 1997).

Por último, en lo que respecta los periodos de retorno de las obras, en el presente estudio se han considerado los de 100 y 500 años, el proceso de estimación de avenidas de diseño están señalados en el Capítulo 4 de la Metodología, en la sección 4.2.2.3 *Gastos de diseño regulados por la Presa Pujal-Coy*.

5.2.1 Simulación de escenarios asociados a un $Tr= 100$ años con el funcionamiento de la Presa Pujal-Coy

La base para estimar que las obras hidráulicas minimicen los efectos de inundación es ubicar las zonas inundables con el mayor detalle posible y posteriormente evaluar que disminuyan los efectos en la cuenca de estudio. Con los mapas de inundación se han definido las áreas potencialmente afectadas por las inundaciones en la cuenca baja del río Pánuco, mediante la modelación 2D con los periodos de retorno de 100 y 500 años. De manera similar se mostrarán los efectos de regulación que genera la presa para dos tipos de descargas 1) $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y 2) $Q= 1500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Regulación de la Presa Pujal-Coy con descarga $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$

El escenario de inundación que se encuentra en la Figura 5.5 corresponde a la simulación con el periodo de retorno de 100 años y con una descarga de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ en la Presa Pujal-Coy, a esto se añade el gasto que proviene de la Estación El Olivo.

El efecto regulador de la presa disminuye los niveles de superficie en la zona de la Estación de las Adjuntas, sin embargo la mancha de inundación es amplia; en la Figura 5.2 se indicó que el nivel de superficie era un poco más de 18 metros para el $Tr=100$ años, ahora los valores se han reducido por el funcionamiento de la presa hasta 16.5 metros. Avanzando en sentido aguas abajo, cerca del municipio Ébano, S. L. P, donde está la laguna de Marland se ha atenuado la mancha de inundación.

El tipo de cuerpo de agua como las lagunas puede retener de manera similar que una presa, se comprueba con la mancha de inundación disminuida que se ha formado en el sistema lagunar del río Tamesí, también se observa que el sistema lagunar ha respondido de forma eficiente al tránsito de avenidas regulado con la descarga en la presa $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$. El sistema lagunar del río Tamesí tiene la capacidad de contener la inundación a partir de la zona de confluencia entre ambos ríos y hacia aguas arriba del río Tamesí, en las lagunas de Chairel, la Costa, Mayorazgo y Champayán; esto favorece a que la inundación afecte en menor medida a la ciudad de Altamira.

A pesar de que el menor desbordamiento ocurre en el tramo final del río Pánuco, el efecto de la regulación de la presa con $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ se refleja en la mancha de inundación que ha disminuido, al sur de la laguna de Pueblo Viejo, lo cual indica que la laguna ha logrado confinar el gasto (regulado).

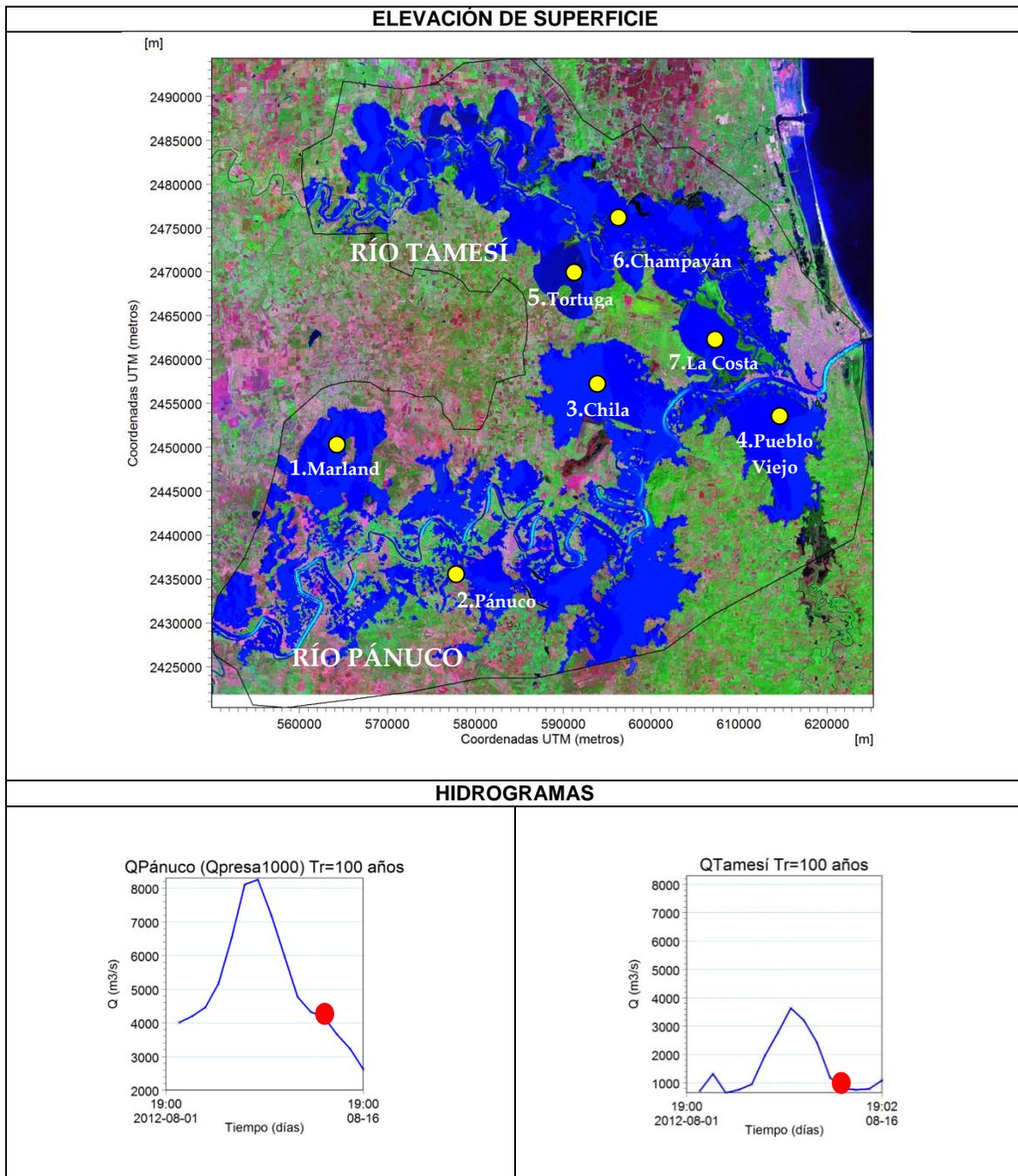


Figura 5. 5 Inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco con un periodo de retorno de 100 años, y con la regulación de la presa con una descarga de 1000 m³/s

Regulación de la Presa Pujal-Coy con descarga $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$

En las condiciones de descarga de la presa con un gasto de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, los valores del nivel de superficie son mayores que en el escenario con la descarga de la presa de $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ para el periodo de retorno de 100 años.

Es de interés apreciar en la Figura 5.5 que la mayor concentración del agua ocurre en la Estación de las Adjuntas, como también ha sucedido en los escenarios anteriores, sin embargo la presa logra disminuir la mancha de inundación y los niveles en la superficie de agua.

Se identifica un área de desbordamiento persistente en todos los escenarios, a causa de que las pendientes tendidas que propician la acumulación de agua. Los mapas que se han mostrado advierten el riesgo de inundación en el municipio de Pánuco en Veracruz para el periodo de retorno de 100 años, incluso con la regulación de la presa.

A medida que se avanza en dirección aguas abajo del río Pánuco, en la proximidad de la Laguna Pueblo Viejo, hacia el sur, la mancha de inundación se ha disminuido, lo cual tiene correspondencia con el resultado anterior (gasto regulado a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$). Analizando este último tramo del río Pánuco, donde discurre la confluencia con el río Tamesí, se observa que el efecto de las inundaciones es mínimo.

El sistema lagunar asentado sobre la cuenca baja del río Tamesí genera una red de almacenamiento natural que colabora de manera importante en el de drenaje del río, y con la descarga regulada de la presa $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ favorece a que disminuyan los desbordamientos en las lagunas de Chairel, la Costa, Mayorazgo y Champayán.

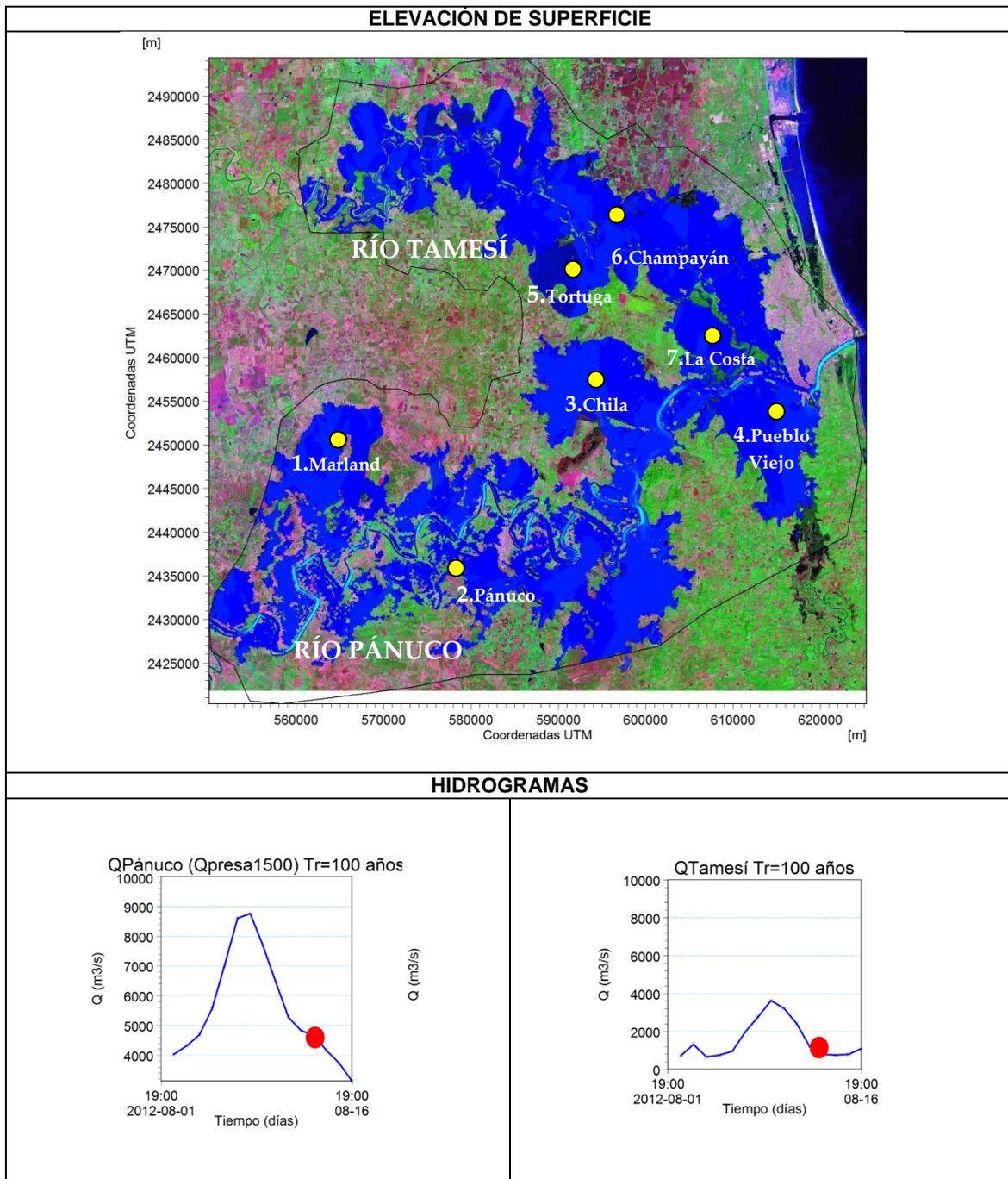


Figura 5. 6 Inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco con un periodo de retorno de 100 años, y con la regulación de la presa con una descarga de 1500 m³/s

5.2.2 Simulación de escenarios asociados a un $T_r= 500$ años con el funcionamiento de la Presa Pujal-Coy

De acuerdo con la simulación que se mostró en la Figura 5.3, con las predicciones hidrológicas del periodo de retorno de 500 años, se obtuvo la mancha de inundación más extendida, es decir el escenario más desfavorable. Es por ello que se debe analizar la eficiencia de la presa Pujal-Coy, de modo que retarde y atenúe el gasto pico aguas abajo del río Pánuco. Si bien, la atenuación de la inundación depende de la capacidad de almacenamiento disponible de la presa con relación a la magnitud de la avenida y del criterio de operación de la obra de excedencias.

Con el fin de evaluar la respuesta ante la avenida asociada a un periodo de retorno de 500 años, se simularon dos escenarios con dos tipos de descargas en la presa de $Q=1000$ y 1500 m^3/s respectivamente, cabe aclarar que a este gasto se añade el que proviene de la Estación El Olivo. Se consideró para toda modelación, la misma condición de entrada en el río Tamesí.

Regulación de la Presa Pujal-Coy con descarga $Q=1000$ m^3/s

El funcionamiento hidráulico ha sido evaluado mediante el análisis bidimensional, tomando como condición inicial una descarga en la presa $Q=1000$ m^3/s , además el gasto que proviene de la Estación El Olivo.

Los niveles de superficie de agua alcanzados en el inicio de la Estación de las Adjuntas comprende la zona que resulta mayormente afectada por el propio paso de la crecidas, pero con la descarga regulada se observa en la Figura 5.6 disminuye la mancha de inundación que se e en ambas márgenes del río Pánuco.

Como se ha detectado en los escenarios anteriores, y aún con la regulación de la presa, el desbordamiento del río Pánuco se desplaza hacia el municipio de Pánuco, Veracruz. Por otro lado, también se presentan inundaciones donde la laguna de Marland.

El funcionamiento de la presa controla el gasto del río Pánuco, evitando inundaciones severas en las zonas que se ubican hacia aguas abajo, es a partir de la laguna de Chila y en la confluencia entre los ríos Pánuco y Tamesí hasta la desembocadura, en donde se visualiza el mayor beneficio para la población de Tampico y Cd. Madero en Tamaulipas.

Asimismo, se confirma la efectividad del sistema lagunar del río Tamesí que aliviado por la regulación de los flujos de la presa, resiste los desbordamientos que en condiciones sin presa afectan a la población de Altamira en Tamaulipas.

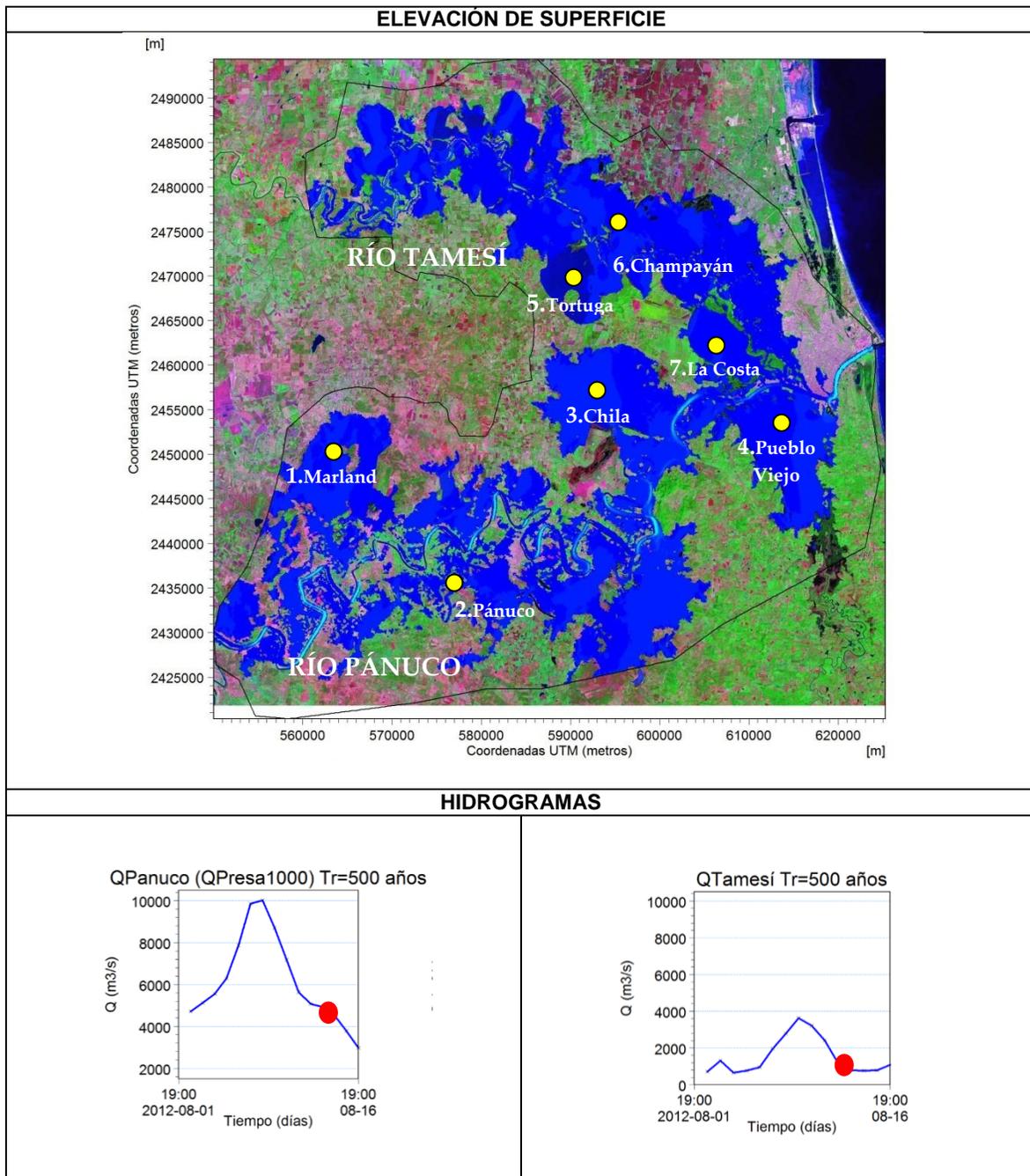


Figura 5. 7 Inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco con un periodo de retorno de 500 años, y con la regulación de la presa con una descarga de 1000 m³/s

Regulación de la Presa Pujal-Coy con descarga $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$

En la simulación final para el periodo de retorno de 500 años con la descarga de la presa regulada a $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ se obtuvo el escenario que se muestra en la Figura 5.7, donde en la zona de las Adjuntas coincide la mancha de inundación con la descarga de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, pero con los niveles de superficie mayores.

La propagación de la inundación es mayor que el inicio de las Adjuntas, en comparación con otros sitios del río Pánuco, y conforme se aleja hacia aguas abajo, los desbordamientos se moderan. Se muestra el abatimiento de una porción considerable de la mancha de inundación, adyacente al sur de laguna de Pueblo Viejo es similar que en la descarga con $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$

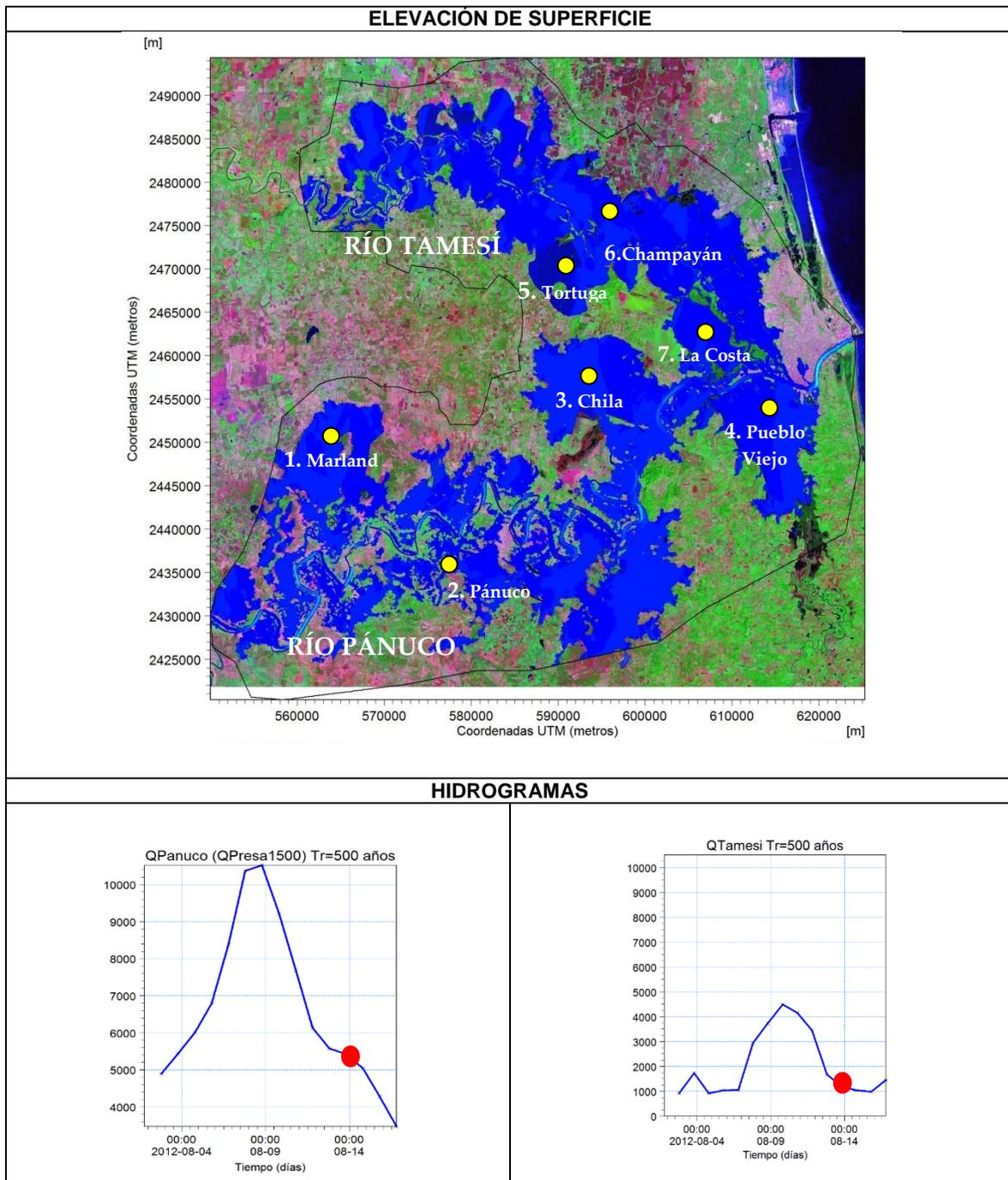


Figura 5. 8 Inundación en la Cuenca Baja del río Pánuco con un periodo de retorno de 500 años, y con la regulación de la presa con una descarga de 1500 m³/s

5.3 Comparación de resultados

La simulación en condiciones actuales permitió estimar los efectos de regulación en la planicie del Pánuco y Tamesí. De modo que al transitar los gastos asociados a los periodos de retorno de 100 y 500 años, se observa en los mapas de inundación ocurren los desbordamientos, desde el inicio del río Pánuco (dentro del dominio) y van disminuyendo hasta llegar al tramo final del río. En el río Tamesí, además del volumen de los escurrimientos por cuenca propia, se añaden a partir de la confluencia los que provienen del río Pánuco.

Con la intención de evaluar el efecto de las inundaciones y el desempeño de la presa, se han considerado dos parámetros de comparación: la profundidad total del agua y el área de inundación.

5.3.1 Profundidad Total del Agua

Anteriormente en la descripción de los escenarios de simulación se tomó como referencia los niveles de superficie de agua, los cuales son los datos de elevaciones referidas a un mismo punto. En tanto que la tabla de comparación (Tabla 5.3) se ha considerado el parámetro de profundidad total del agua.

Las propiedades hidráulicas de un canal natural por lo general son muy irregulares. En algunos casos pueden hacerse suposiciones empíricas razonablemente consistentes con las observaciones. El ancho y profundidad regularmente aumentan aguas abajo del río a medida que se unen los caudales de los tributarios. La profundidad de flujo, es la distancia vertical desde el punto más bajo de la sección del canal hasta la superficie libre.

En los canales naturales sucede siempre que la mayor profundidad se ubica en el centro de la sección transversal. Esto se debe a que en el interior de la corriente rebotan los flujos que provienen de las riberas opuestas, producen grandes ondas que golpean el fondo y terminan excavándolo. Por tanto la máxima profundidad de agua se ubica debajo de la mayor corriente. En la Figura 5.9, la profundidad total del agua se indica con el término *depth*, en el modelo numérico se designa como *total water depth*, pero significa lo mismo.

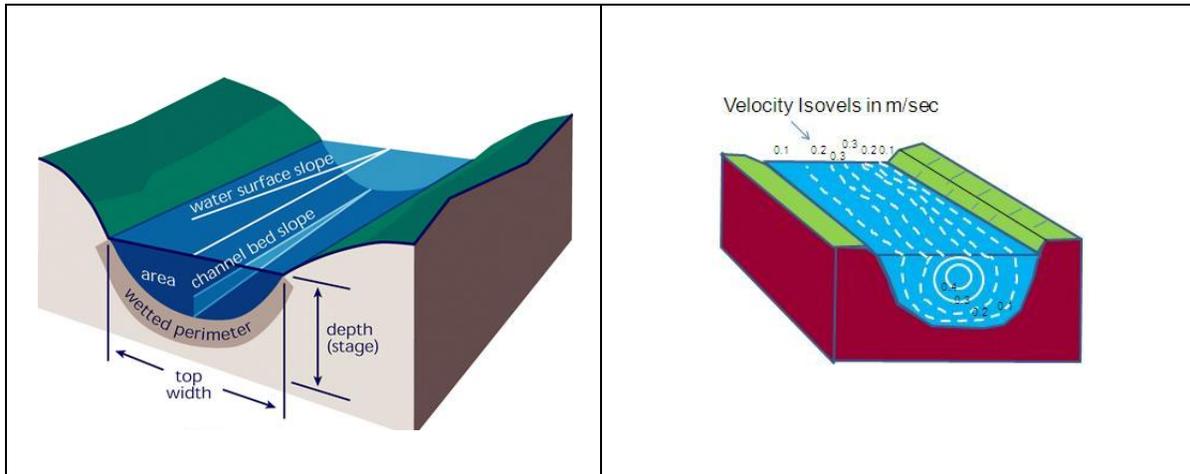


Figura 5. 9 Características geométricas e hidráulicas de un canal

La profundidad total del agua que se ha registrado en la Tabla 5.3 es la que se ubica en la planicie fluvial, al centro de los cuerpos lagunares perennes e intermitentes que al presentarse una avenida quedan cubiertos de agua. El análisis de los escenarios de simulación en términos de la profundidad total del agua, se midió en cuatro puntos de referencia situados en la planicie del río Pánuco, donde se ubican algunos de los cuerpos lagunares. Del mismo modo se procedió en tres cuerpos lagunares del río Tamesí. Esta comparación corresponde a los escenarios simulados con el periodo de retorno de 100 años. Los puntos de referencia se han señalado con un círculo amarillo en los mapas de inundación.

Periodo de Retorno		Tr=100 años		
		Sin presa	Descarga de la presa	
Escenario de Simulación	Sin presa		Q=1500 m ³ /s	Q=1000 m ³ /s
		Punto de Referencia	Profundidad Total del Agua (m)	
Río Pánuco	(1) <i>Marland</i>	14.87	13.5	12.63
	(2) <i>Pánuco</i>	3.85	2.46	2.34
	(3) <i>Chila</i>	6.92	5.74	4.39
	(4) <i>Pueblo Viejo</i>	7.69	6.15	5.86
Río Tamesí	(5) <i>Tortuga</i>	6.36	5.79	5.27
	(6) <i>Champayán</i>	6.36	5.79	5.27
	(7) <i>La Costa</i>	7.69	6.32	5.57

Tabla 5. 3 Comparación de la profundidad total del agua en los puntos de referencia del río Pánuco y Tamesí, ubicados sobre las manchas de inundación para el escenario con el Tr=100 años

El punto de referencia (1) *Marland* se encuentra alejado de la margen izquierda del río Pánuco, se localiza en una unidad geomorfológica constituida por una llanura de baja inundación y por tanto la profundidad total del agua es de 14.87 m, la mayor obtenida en todos los puntos de registro, y aunque se regule con la presa disminuye hasta la profundidad de 12.63 m. El punto de referencia (2) *Pánuco*, es una depresión ubicada en la margen derecha del río Pánuco que durante casi todo el año no tiene actividad fluvial, y de presentarse un evento extremo como el de Tr=100 años, los escurrimientos del río Pánuco se canalizan hasta esta área deprimida, formando un cuerpo lagunar intermitente, la profundidad total del agua que se registra sin presa es de 3.85 metros. De regularse con la presa, la profundidad total del agua podría disminuir hasta 2.34 metros.

En los cuerpos lagunares perennes del río Tamesí (3) *Chila* y (4) *Pueblo Viejo* los valores de profundidad total de agua se registran entre 6.92 y 7.69 metros, con la regulación de la presa disminuyen la profundidad del agua, con la descarga de la presa Q=1500 m³/s convergen entre 5.74 y 6.15 m; y con la regulación de la presa Q=1000 m³/s 4.39 y 5.86 metros. En la gráfica de barras de la Figura 5.9 se observa que los valores de la profundidad total de agua en los cuerpos lagunares (5) *La Tortuga* y (6) *Champayán* son iguales y (7) *La Costa* en condiciones normales se obtiene una profundidad total del agua de 7.69 metros, con la regulación de la presa se ubican en un rango de 6.32 m hasta 7.92 metros.

El entendimiento del proceso de hidrodinámico se apoya en los mapas inundación y se confirma con esta gráfica que indica que el descenso máximo de la profundidad total del agua se produce con la descarga de la presa $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$, como se observa en la Figura 5.10, la mitigación que se produce con esta descarga puede ser de 1.5 hasta 2 metros. Si bien, también la regulación con la descarga $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ disminuye la profundidad total del agua pero el decremento máximo es de 1.49 metros.

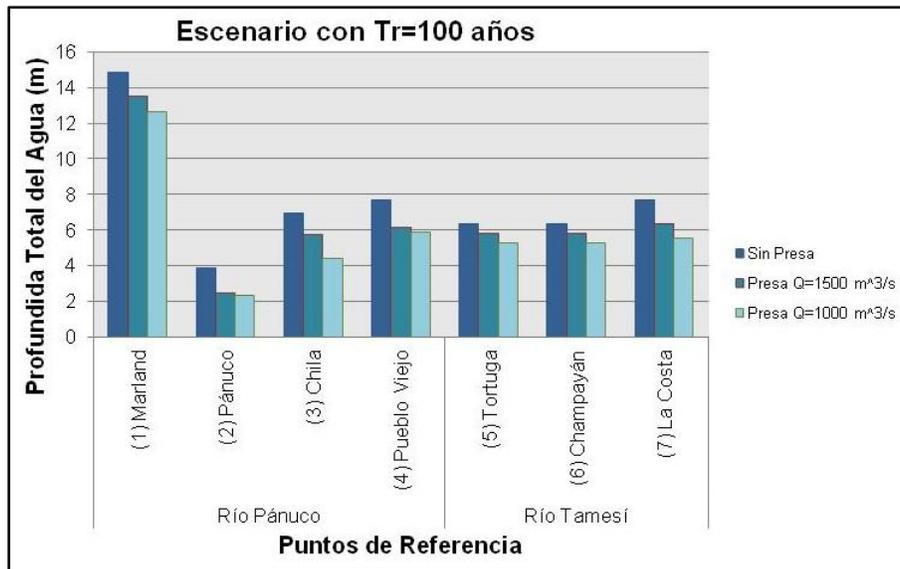


Figura 5. 10 Comparación de la profundidad total del agua ubicada sobre las manchas de inundación del río Pánuco y Tamesí, simulando los escenarios con el $Tr=100$ años

A partir del modelo matemático se ha extraído información valiosa como los mapas de inundación para realizar pronósticos de la magnitud y las zonas de desbordamientos. Otra variable de comparación es la profundidad total del agua, en la Tabla 5.4 muestra los valores en los escenarios con el $Tr=500$ años, en la primera columna se indican los valores en el régimen de caudal natural, en las siguientes columnas se considera la reducción de las avenidas con la presa.

Los escenarios de inundación responden al aumento del caudal con el $Tr=500$ años. En donde es más notable el ascenso de la profundidad total del agua, comparado el $Tr=100$ años es en (1) *Marland* se eleva de 14.87 m a 15.40 y (4) *Pueblo Viejo*, de 7.69 a 8.20 metros. En los demás puntos de referencia sobre la llanura del río Pánuco el aumento máximo de la profundidad total del agua fue aproximadamente de medio metro.

En los cuerpos lagunares situados en la proximidad del río Tamesí: (5) *Tortuga*, (6) *Champayán* y (7) *La Costa* se obtuvo un rango de profundidad total del agua entre 7.18 m hasta 8.44 metros, y se minimizan con la regulación de la presa $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$, pero sobre todo con la descarga $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$. También se verifica que en comparación a los escenarios de inundación para un $Tr=100$, la profundidad total del agua ha aumentado.

Periodo de Retorno		Tr=500 años		
Escenario de Simulación	Sin presa	Descarga de la presa		
		Q=1500 m ³ /s	Q=1000 m ³ /s	
Punto de Referencia		Profundidad Total del Agua (m)		
Río Pánuco	(1) <i>Marland</i>	15.40	13.95	13.00
	(2) <i>Pánuco</i>	4.28	3.85	3.24
	(3) <i>Chila</i>	7.92	6.15	5.84
	(4) <i>Pueblo Viejo</i>	8.20	6.41	6.36
Río Tamesí	(5) <i>Tortuga</i>	7.18	6.92	5.60
	(6) <i>Champayán</i>	7.18	6.92	5.60
	(7) <i>La Costa</i>	8.44	6.67	7.13

Tabla 5. 4 Comparación de la profundidad total del agua en los puntos de referencia del río Pánuco y Tamesí, ubicados sobre las manchas de inundación para el escenario con el $Tr=500$ años

De la información que se muestra en la gráfica de la Figura 5.11, aun cuando el gasto sea regulado por la presa, es muy probable que existan grandes profundidades totales de agua como en (1) *Marland*. En los cuerpos lagunares como (3) *Chila*, (4) *Pueblo Viejo* y (7) *La Costa*, sin presa se produce tirantes cercanos a 8 m, y con la regulación de la presa es notable el beneficio, sobre todo la laguna de Chila y Pueblo Viejo donde disminuyen hasta 2 metros. Puesto que no es posible alcanzar una protección completa, se deben considerar aceptable la disminución de las profundidades totales de agua.

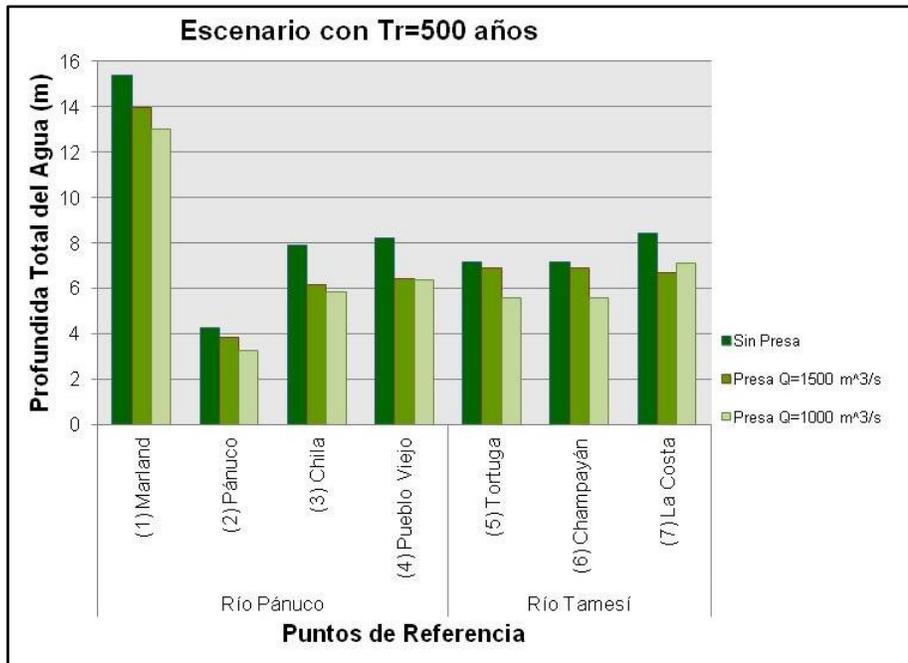


Figura 5. 11 Comparación de la profundidad total del agua ubicada sobre las manchas de inundación del río Pánuco y Tamesí, simulando los escenarios con el Tr=500 años

5.3.2 Áreas de inundación

El área de la cuenca baja del río Pánuco como se ha referido al principio, se caracteriza por un relieve escaso y acumulativo tipo fluvial, así como la presencia de numerosas lagunas del río Tamesí y zonas sujetas a inundación en la planicie. Comprende una superficie de 5,040 km². El área que ocupan los ríos Pánuco y Tamesí con sus respectivos sistemas lagunares es de 584.27 km², representa el 11.6% del dominio.

El análisis de resultados de los mapas de inundación se ha realizado con las herramientas GIS que recientemente se han incorporado en el modelo matemático.

El área inundada cuando se transita el gasto asociado a un periodo de retorno de 100 años es 1305.27 km², con la regulación de la presa Pujal-Coy con la descarga de 1500 m³/s se obtiene un área inundada de 1087.75 km², es decir que la mancha de inundación disminuyó 217 km² (17%). Con la descarga de la presa de 1000 m³/s se produce una mancha de inundación de 1047.67 km², la diferencia entre este escenario de regulación y sin presa es de 257.6 km² (20%).

La mancha de inundación más extensa, se produce al transitar el gasto asociado al periodo de retorno de 500 años, con una superficie inundada de 1437.11 km². Con la regulación de la presa con una descarga de 1500 m³/s la mancha de inundación alcanza 1280.23 km², de modo que alivio que se produce es de 156.88 km² (11%), con la descarga de 1000 m³/s se tienen mejores resultados y la mancha de inundación que resulta es de 1175.27 km², esto significa que la diferencia alcanzada con la presa es de 261.84 km² (18%).

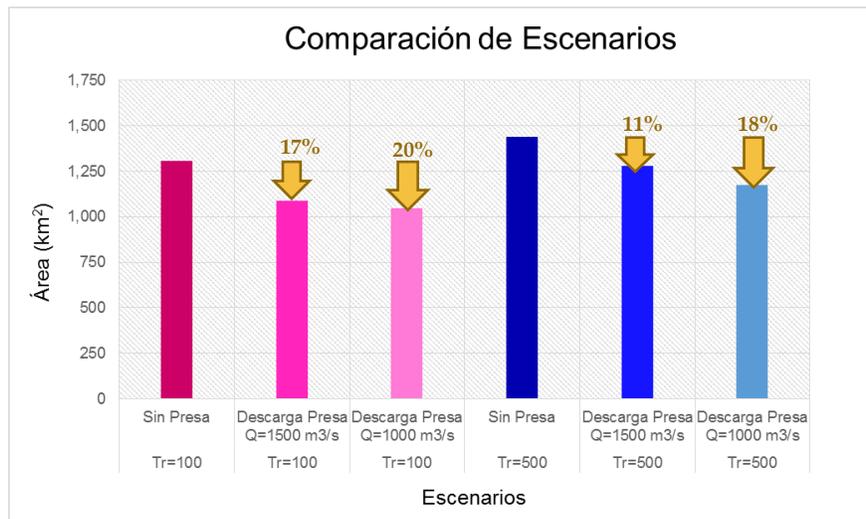


Tabla 5. 5 Comparación de las áreas de inundación obtenidos a partir de las simulaciones

De acuerdo con la Tabla 5.3 con el gasto asociado al periodo de retorno de 100 años, la descarga regulada de la presa con un gasto de 1500 m³/s se produce una mancha de inundación menor, pero la regulación con el gasto de 1000 m³/s reduce sólo un poco (3%).

Asimismo, con el gasto asociado al periodo de retorno de 500 años, la mancha de inundación más pequeña se generó con la regulación de 1000 m³/s.

De tal forma que el gasto desalojado en la obra de excedencias, tiene la función de regular el gasto, atenuar el pico del hidrograma, permitiendo que el drenaje sea paulatino, se determinó que los escenarios de inundación con menor superficie inundada corresponden a las simulaciones con la descarga de la presa Pujal-Coy con la regulación mínima de 1000 m³/s.

La Cuenca Baja del río Pánuco es propensa a inundaciones, por su posición geográfica está sujeta a la influencia ciclónica en el Golfo de México, y también por el incremento del régimen hidrológico del río Pánuco y en ocasiones por el Tamesí.

Es por ello, que la Cuenca Baja del río Pánuco es base de estudio para adquirir conocimiento sobre el tema de las inundaciones, y a partir de este conocimiento surge la necesidad de colaborar en la solución de este problema.

El objetivo de esta tesis fue evaluar el funcionamiento hidrodinámico de la Cuenca Baja del río Pánuco aplicando un modelo bidimensional para los periodos de retorno 100 y 500 años y posteriormente obtener los escenarios con el funcionamiento de la Presa Pujal-Coy.

Las conclusiones a las que se llegaron son:

- El funcionamiento del sistema en condiciones sin presa, advierte que la mayor inundación se concentra en la zona de la Estación de las Adjuntas, el área alrededor de la laguna Marland queda cubierta de agua y conforme se avanza con dirección hacia la desembocadura los niveles de superficie disminuyen. A pesar de que el menor desbordamiento ocurre en el tramo final del río Pánuco, en las lagunas de Chairel y Pueblo Viejo se producen desbordamientos. También se observó el rebase en la capacidad de almacenamiento las lagunas del río Tamesí, aunque el río Tamesí pertenece a otra subcuenca, tiene confluencia con el río Pánuco antes de la desembocadura y este caudal modifica el funcionamiento del sistema lagunar. La mancha de inundación más extensa se generó con el gasto asociado al periodo de retorno de 500 años.
- De manera similar se evaluaron los efectos de regulación que genera la presa para dos tipos de descargas 1) $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y 2) $Q= 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ con los periodos de retorno de 100 y 500 años.
 - El efecto regulador de la presa disminuye los niveles de superficie de agua en la zona de la Estación de las Adjuntas, sin embargo la mancha de inundación sigue siendo amplia. Avanzando en sentido aguas abajo, cerca del municipio Ébano, S. L. P, donde está la laguna de Marland se ha atenuado la mancha de inundación. En la proximidad de la Laguna Pueblo Viejo, hacia el sur, la mancha de inundación se ha disminuido, si es más notable la diferencia entre los escenarios que no consideran la presa. El sistema lagunar del río Tamesí

genera una red de almacenamiento natural que colabora de manera importante en el drenaje del río, y con la descarga regulada de la presa favorece a que disminuyan los desbordamientos en las lagunas de Chairel, la Costa, Mayorazgo y Champayán.

- Respecto a la política de operación en la obra de excedencias, se determinó que los escenarios de inundación con menor superficie inundada corresponden a las simulaciones con la descarga mínima de la presa Pujal-Coy de 1000 m³/s en ambos periodos de retorno.

Como alternativa de control, conviene que las presas se sigan construyendo, aceptando que provocan un cambio en el régimen hidrológico de la corriente, produce impactos importantes en el ambiente y en las poblaciones aguas abajo, se puede utilizar un mapa de inundación para predecir los escenarios que se generen, de acuerdo con la variación de la política de operación en la obra de excedencia. También es conveniente promover estudios en la presa sobre los fenómenos meteorológicos e hidrológicos, el transporte y depósito de sedimentos, la interacción ecológica (flora-fauna), y el entorno social.

Un enfoque integrado de gestión de riesgo de inundaciones requiere una combinación óptima de medidas estructurales y no estructurales como la reglamentación del uso de la tierra, la predicción y alerta de avenidas o el uso de ecosistemas naturales, cumplen una función importante al limitar los efectos negativos de las avenidas en el medio ambiente y, por consiguiente, deben ser consideradas como opciones fundamentales y como medidas tanto independientes como complementarias.

Actualmente, estudios destinados a la gestión del riesgo de inundaciones, señalan que para mejorar los sistemas de predicción se deben reducir las incertidumbres asociadas a la modelación numérica (Demeritt et al, 2007; Bao et al. 2011). La incertidumbre en los resultados de los modelos hidráulicos se debe principalmente al limitado conocimiento de las condiciones de frontera en el sistema, la topografía, los niveles de agua y la rugosidad de la zona de estudio (Beven, 2011).

La reducción de la incertidumbre, para lo cual se consideran a todos los procesos naturales como un sistema integral, desde la atmósfera hasta el tránsito de la avenida en un cauce dado (Demeritt et al., 2007; Bao et al. 2011). De esta manera, la calidad de los pronósticos meteorológicos, el comportamiento de la cuenca como el uso del suelo y la caracterización de los flujos, entre otros; son un factor clave para la correcta predicción de las inundaciones (Pappenberger et al, 2005; Demeritt et al., 2007). En el Instituto de Ingeniería se está implementando el uso de ensambles meteorológicos para la predicción de inundaciones.

Recomendaciones

La desembocadura del río Pánuco podría encontrarse bajo la influencia de la dinámica sedimentaria, debido a la acción del oleaje, corrientes de marea, la aportación de ambos ríos Tamesí y Pánuco, además de la extracción de material para las actividades en los puertos de Altamira y Tampico; habría que efectuar un análisis donde se tomen en cuenta todos los factores que intervienen en la dinámica de sedimentos, para posteriormente predecir el efecto de retención de sedimentos asociados a las diferentes políticas de operación de la presa Pujal-Coy que puedan llegar a alterar el régimen fluvial del Pánuco.

La necesidad de implementar los caudales ecológicos con su frecuente variabilidad del régimen de flujo y de sedimentos tiene que tenerse en cuenta de manera apropiada en las etapas de diseño y ejecución de las obras de control de, en un esfuerzo por lograr un equilibrio dinámico bajo nuevos regímenes de flujo y de sedimentos.

Referencias

Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México, Volumen 2, (2009). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Instituto Nacional de Ecología.

Aguilar-Robledo M., (1991). “Los avatares de un proyecto regional: el caso de PujalCoy”. La modernización del sector agropecuario. Cuauhtémoc González Pacheco, Compilador. México: Instituto de Investigaciones Económicas, U.N.A.M., pp. 66-96. ISBN 968-36-2167-8.

AIR Worldwide, (2011). The AIR Inland Flood Model for Germany.
<http://www.air-worldwide.com/Publications/Brochures/The-AIR-Inland-Flood-Model-for-Germany/>
[Consultada en agosto de 2012]

Aparicio- Mijares. F. J., (2010). Fundamentos de hidrología de superficie, Ed. Limusa

Atlas Nacional de Riesgos, 2012. Riesgos Hidrometeorológicos, Huracanes, Ciclones Tropicales
http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=75
[Consultada en octubre de 2012]

Banco Mundial, 2012. México: Lidera agenda sobre mitigación y adaptación al cambio climático
<http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/BANCOMUNDIAL/NEWSSPANHISH/0,,contentMDK:23056213~menuPK:1074645~pagePK:34370~piPK:34424~theSitePK:1074568,00.html>
[Consultada en agosto de 2012]

Bao, H.-J., Zhao, L.-N., He, Y., Li, Z.-J., Wetterhall, F., Cloke, H. L., Pappenberger, F., Manful, D., (2011), Coupling en-semble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjiang model for flood forecast. European Geosciences Union (EGU); Journal of Hydrology 375 pág 613–626.

Baltasavias, E.P., (1999). A comparison between photogrammetric and laser scanning, ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing, 54 (2-3), 83-94.

Bates PD., Horritt MS., Smith C., Mason D., (1997). Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling. *Hydrological Processes* 11: 1777–1795.

Bates PD., (2004). Remote sensing and flood inundation modelling. *Hydrological Processes* 438 18: 2598–2597.

Beven II, J.L., (2011). Tropical Cyclone Report, Tropical Storm Arlene. (AL012011). 28 June– 1 July 2011. National Hurricane Center. NOAA.

Beven, K.J, Leedal, D., McCarthy, S., Lamb, R., Hunter, N., Keef, C., Bates, P., Neal, J. and Wicks, J. , (2011). Framework for Assessing Uncertainty in Fluvial Flood Risk Mapping. FRMRC Research Report SWP1.7

Beven, K.J., (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology* 3230 (1-2), 18-36.

Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, (2007). Bernstein L., Bosch P., Canziani O., Chen Z., Christ R., Davidson O., Hare W., Saleemul H., Karoly D., Kattsov V., Kundzewicz Z., Liu J., Lohmann U., Manning M., Matsuno T., Menne B., Metz B., Mirza M., Nicholls N., Nurse L., Pachauri R., Palutikog J., Parry M., Qin D., Ravindranath N., Reisinger A., Ren J., Riaji K., Rosenzweig C., Rusticucci M., Schneider S., Sokona Y., Solomon S., Stott P., Stouffer R., Sugiyama T., Swart R., Tirpak D., Vogel C., Yohe G., Resumen para responsables de políticas. Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC

CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres, (2007). Serie Fascículo de Inundaciones

CFE- GEL, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Centro Meteorológico (2011). Resumen de daños al sector eléctrico nacional por Ciclones Tropicales, Temporada, 2011

Cities and Flooding, (2011). A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century. The World Bank

Climate Change 2001: The Scientific Basis, (2001). Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A., Contribution of Working Group I to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Cluckie, I.D., Xuan, Y., Wang, Y., (2006). Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilising short-range rainfall prediction. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* 3, 3211–3237.

CNA, Comisión Nacional del Agua, (1994); Estudio de las avenidas y de las obras de protección y defensa para reducir los daños causados en las inundaciones en los Ríos Pánuco y Tamesí. México, CONAGUA.

CNA, Comisión Nacional del Agua, (1994); Agenda del agua 2030. México, CONAGUA.

CNA, Comisión Nacional del Agua, (1994); Estudio de las avenidas y de las obras de protección y defensa para reducir los daños causados en las inundaciones en los Ríos Pánuco y Tamesí. México,

Conexión Total, 2011. Noticias del Clima. 52 mil casas en riesgo de inundaciones
<http://climanoticias.blogspot.com/2011/05/52-mil-casas-en-riesgo-de-inundaciones.html>

Comisión Nacional del Agua, CNA -INDISA, (1994); Estudio de las avenidas y de las obras de protección y defensa para reducir los daños causados en las inundaciones en los Ríos Pánuco y Tamesí

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, (1996); Obras de protección y defensa en la Cuenca Baja del río Pánuco. San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, (1998); Carta de regiones hidrológicas administrativas y de los estados. México, D.F.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, (2011); Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2011. Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua., (2011). Capítulo 2 del Manual para el control de inundaciones

Cruz-Quíroz, A.C., (2012). Alternativas para el control de inundaciones de la Cuenca Baja del río Pánuco. Tesis de Maestría en Hidráulica, Facultad de Ingeniería.

CSVA, Consejo del Sistema Veracruzano del Agua. (2001). "Programa Hidráulico Preliminar".
Programa Hidráulico Estatal

Demeritt, D., Cloke, H., Pappenberger, F., Thielenc, J., Bar-tholmesc, J., Ramos, M.E., (2007). Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecast-ing, *Environmental Hazards*, 7, 115–127.

DHI, Danish Hydraulic Institute, (2009), “MIKE 21 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module”, Scientific documentation pp.9-20, 39-41

DHI, Danish Hydraulic Institute, (2009), “MIKE 21 Flow Model FM, Hydrodynamic module”, User Guide, pp.13, 33-73

Domínguez-Mora, R., Carlóz, G.T., (1981). Análisis Estadístico, Capítulo A.1.6 del Manual de Diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad

Domínguez-Mora, R., Esquivel G. G., Mendez A. B., Mendoza R. A., Arganis J. M. L., Carrizosa E. E., (2008). Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 978-607-2-00316-3.

Domínguez Mora, R., Arganis Juárez, M.L., Carrizosa Elizondo, E., Mandujano García, K.P., (2010); Capítulo 1. Análisis Hidrológico, Estudio para el control de avenidas en la Cuenca Baja del río Pánuco para prevenir inundaciones en la parte correspondiente de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Estado de México, Hidalgo, San Luis Potosí y Querétaro. Coordinación de Hidráulica, IIUNAM.

EM-DAT., (2011). OFDA/CRED International Disaster Database, Universite Catholique de Louvain, Brussels

<http://www.cred.be/emdat>

[Consultada en agosto de 2012]

El Universal., (2011). Rescatan a 360 personas atrapadas en Tamaulipas

<http://www.eluniversal.com.mx/notas/777056.html>

[Consultada en octubre de 2012]

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Water Reports., (2008). “Coping with water scarcity, an action framework for agriculture and food security”

Ferrando-Bravo G., (2004). Prólogo “La Fuerza del Agua”, Presas de América Latina, (2004). Fundación ICA

Flood Resilience and Urban Flood Management, (2010). Vulnerability to Coastal Flooding

http://www.floodresiliencgroup.org/frg/index.php?option=com_content&view=article&id=54:vulnerabilitycoastal&catid=7:news
[Consultada en agosto de 2012]

Fuentes-Mariles O. A., Franco V., (1997). Instituto de Ingeniería, UNAM. Capítulo 3 del Manual de Ingeniería de Ríos. Estudio hidrológico para obras de protección.

Geólogo sin fronteras

<http://www.geologossinfronteras.org/El%20Agua.html>
[Consultada en agosto de 2012]

Guerrero-Villalobos G., (2004). Visión Histórica de la Ingeniería Hidráulica en México, "La Fuerza del Agua", Presas de América Latina, (2004). Fundación ICA

González-Villareal, F.J., Carrillo-Sosa J.J., INDISA., (2010). Estudio para el control de avenidas en la Cuenca del río Pánuco para prevenir inundaciones en la parte correspondiente de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Estado de México, Hidalgo, San Luis Potosí y Querétaro. Capítulo 2: Planteamiento de solución (Concepción integral-revisión de esquemas alternativos). Coordinación de Hidráulica, IIUNAM

González-Villareal, F.J., Carrillo-Sosa J.J., Lorda-Andrade J.A., Macías-Nava S., Cuadra-Ramírez J., (2010). Estudio para el control de avenidas en la Cuenca del río Pánuco para prevenir inundaciones en la parte correspondiente de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Estado de México, Hidalgo, San Luis Potosí y Querétaro. Capítulo 5: Revisión de la factibilidad de ampliación de los distritos de riego. Coordinación de Hidráulica, IIUNAM.

Hudson, P.F., Colditz, R.R., (2003). Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Pánuco basin, Mexico, *Journal of Hydrology*, Volume 280, Issues 1-4, 229-245, doi:10.1016/S0022-1694(03)00227-0.

ICE, Institution of Civil Engineers, (2012). A community approach to Integrated Flood Risk Management.
http://www.ice.org.uk/getmedia/cd009b5b-7267-418e-865e-d67abd310278/54b_v02_as.aspx
[Consultada en agosto de 2012]

ICFM5: Final Statement, (2011). 5th International Conference on Flood Management (ICFM5) Tokyo, Japón.

INDISA, Ingeniería para el Desarrollo Integral, S.A de C.V, 2009., Propuesta de una planeación general para proteger contra inundaciones a la Cuenca Baja de los río Pánuco y Tamesí.

INE, Instituto Nacional de Ecología, 1984., Selección de sitios apropiados para el establecimiento de confinamientos controlados en las cuencas del río Pánuco y Lerma

Jiménez M. E., Matías L.R., Fuentes O.M., Secretaría de Gobernación-CENAPRED, (2003). Serie. Fascículos de Ciclones Tropicales

Krabill, W.B., Collins, J.G., Link, L.E., Swift, R.N. and Butler, M.L. (1984), Airborne laser topographic mapping results. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50, 685-694.

La Jornada, 2011. El Pánuco rebasó su escala crítica este fin de semana <http://www.jornada.unam.mx/2011/07/11/estados/031n1est>

Laris-Alanís E., (2004). Retos del Siglo XXI. "La Fuerza del Agua", Presas de América Latina, (2004). Fundación ICA

Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P., (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman, San Francisco, California, USA.

Leopold, Luna B., (1964). *A view of the River*. Harvard University Press. Cambridge, MA.

López Blanco, J. and Aragón González, R. (2006). "Identificación de las áreas propensas a inundación a partir del conocimiento geomorfológico: El río Pánuco". *Proyectos Académicos*, Instituto de Geografía UNAM, México.

Levi E., (1989). *El agua según la ciencia*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Mandujano-García, K.P., (2011). *Bajo Pánuco, Avenidas de Diseño*. Tesis de Maestría en Hidráulica, Facultad de Ingeniería.

Maza-Álvarez J. A., Franco V., (1997). Instituto de Ingeniería, UNAM. Capítulo 15 del Manual de Ingeniería de Ríos. Obras de protección para control de inundaciones.

MLIT (2003). *Flood Hazard Map Manual for Technology Transfer*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Tokyo.

NOAA Hurricane Research Division, (2010).
http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A8_esp.html
[Consultada en agosto de 2012]

Ohl C, Tapsell S., (2000). Flooding and human health: the dangers posed are not always obvious. *British Medical Journal* 321(7270):1167–1168.

ONU-EIRD Comité Científico y Técnico, (2009). Reducción del riesgo de desastre mediante la ciencia: cuestiones y medidas. Informe del Comité Técnico de la EIRD

OMM/UNESCO, (1974), “Glosario hidrológico internacional”, WMO/OMM/BMO, No. 385, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza.

OMS, Organización Mundial de la Salud y UNICEF, (2007). La meta de los ODM relativa al agua potable y el saneamiento: El reto del decenio para zonas urbanas y rurales
http://www.wssinfo.org/fileadmin/user_upload/resources/1198255419-JMP_06_es.pdf

Pappenberger, F., Beven, K. J., Hunter, N. M., Bates, P. D., Gouweleeuw, B. T., Thielen, J., and de Roo, A. P. J., (2005). Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 381- 393, doi:10.5194/hess-9-381-2005.

Pedrozo Acuña, A., Amaro Loza, A., Cruz Quiroz, A.C., (2010); Capítulo 3.A Informe con la descripción del esquema del sistema simplificado de drenaje superficial a estudiar, Estudio para el control de avenidas en la Cuenca Baja del río Pánuco para prevenir inundaciones en la parte correspondiente de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Estado de México, Hidalgo, San Luis Potosí y Querétaro. Coordinación de Hidráulica, IIUNAM.

Pedrozo Acuña, A., Amaro Loza, A., Cruz Quiroz, A.C, Laverde Barajas, M.A., Rodríguez Rincón, J.P., (2011); Capítulo 3.C Informe con la descripción de las soluciones planteadas a un nivel de gran visión para los periodos de retorno de 5, 10, 20,100, 500 y 1000 años en condiciones actuales para flujo permanente Coordinación de Hidráulica, IIUNAM.

Pedrozo-Acuña, A., Rodríguez-Rincón J.P., Arganis-Juárez M., Domínguez-Mora R. & González-Villareal F.J., (2012). Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: Pánuco river, México. *Hydrological Processes*

Protección Civil San Luis Potosí, (2011), Lluvias debilitan estructuras.
http://proteccioncivilslp.blogspot.com/2011_07_01_archive.html
[Consultada en octubre de 2012]

Proyecto Monterrey VI, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, 2012, Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Regional.

Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. and Bamler, R., 2003. The shuttle radartopography misión –a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57 (4), 241-262.

Reséndiz-Núñez D., (2004). Grandes Presas y Desarrollo Sostenible. “La Fuerza del Agua”, Presas de América Latina, (2004). Fundación ICA

Rodríguez-Rincón, J.P., Pedrozo-Acuña, A., Domínguez Mora, R., Reeve, D.E., Cluckie, I., (2012). Probabilistic estimation of flood maps: An ensemble approach. *FloodRisk2012*, The 2nd European Conference on FLOODrisk Management. Rotterdam. P.B.

Sanders B.F., (2007), “Evaluation of on line DEMs for flood inundation modelling”, *Advances in wáter resources*, 30, 1831-1843

Sanford, J. A., (1998). Rivers in the landscape: introduction to the special issue on riparian and groundwater ecology. *Freshwater Biology*, 40: 402-406
<http://www.drunelladesigns.com/river.htm>
[Consultada en agosto de 2012]

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, (SARH, 1980), Subsecretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Irrigación, Comisión de Estudios de la Cuenca del río Pánuco. Proyecto de Riego y Control de Avenidas Pujal-Coy 2da. Fase, S.L.P, Tamps. y Ver. Volumen I y II

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, (SARH, 1987); Memoria de la Comisión de Estudios de la Cuenca del Río Pánuco, 1958-1986. México, SARH.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, (SARH, 1987); Memoria de la Comisión de Estudios de la Cuenca del Río Pánuco, 1958-1986. México, SARH.

Schultz G.A., 1988. Remote sensing in hydrology. *Journal of Hydrology* 100: 239–265.

Sleigh, P.A., Gaskell, P.H., Bersins, M. and Wright, N.G. (1998). An unstructured finite-volume algorithm for predicting flows in rivers and estuaries, *Computers & Fluids*, Vol. 27, No. 4, 479-508.

Smagorinsky, J., (1963), J. General Circulation Experiment with the Primitive Equations, *Monthly Weather Review*, 91, No.3 pp 99-164.

USDA-SCS. (1985). *National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology*. Washington, D.C.: USDA-SCS.

Thomas E., (2001). "Large dams: global rethink", *International Power Generation*, pp. 16-18, Surrey, Inglaterra.

Wolf, A., Yoffe, S., Giordano, M., (2003). "International waters: identifying basins at risk". Oregon State University, American Association for the Advancement of Science, Washington, DC, USA, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka

World Commission on Dams, (2000). *Dams and Development: a New Framework for Decision Making* Earthscan Publication Ltd, London.

World Comission on the Environment and Development, (1987). *Our Common Future*, Oxford University Press.

Zhao, D.H., Shen, H. W., Tabios, G.Q., Tan, W.Y. and Lai, J.S. (1994). Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1994, 120, No. 7, 833-863.