

# Taponamiento del río Grijalva

Desde los primeros meses de 2007, se manifestó un enfriamiento sostenido del océano Pacífico, corroborado en septiembre cuando el Centro de Predicción del Clima de la National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) declaró la presencia del fenómeno de La Niña. Los años en que se presenta este fenómeno, el régimen de precipitación es superior al normal y frecuentemente extraordinario en cantidad, en las regiones de la costa sur del Golfo de México. Por ello, no fueron extraños los acontecimientos de octubre de 2007, cuando el frente frío número 4 y la tormenta tropical Noel, en el mar Caribe, provocaron lluvias sin precedente en los estados de Chiapas y Tabasco en el sureste de México (fig 1). En tres días cayó el 30% del agua que se registra en el país durante un año.

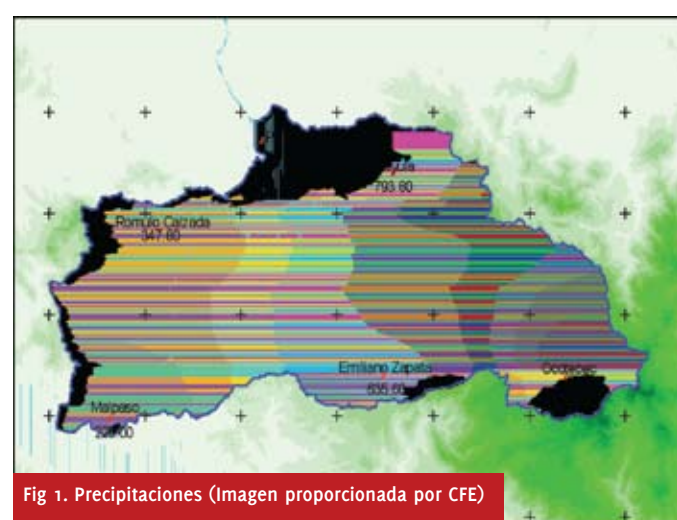


Fig 1. Precipitaciones (Imagen proporcionada por CFE)

A causa de las extraordinarias precipitaciones hubo un enorme deslave que obstruyó por completo el río Grijalva, el segundo río más caudaloso de México. La geología regional se caracteriza por rocas sedimentarias (lutitas y areniscas) depositadas en estratos que buzan hacia el río en el sitio de San Juan de Grijalva. Se infiere que las precipitaciones causaron la elevación del nivel freático y posiblemente una subpresión

en algunos estratos, lo cual contribuyó a reducir la fricción efectiva en la superficie de falla y a desestabilizar el volumen de rocas que se deslizó, causando que varias decenas de millones de metros cúbicos de tierra cayeran sobre el Grijalva provocando una ola de más de 50 m de altura que hizo desaparecer al poblado de San Juan de Grijalva.

En esta ocasión además de las inundaciones y del deslizamiento de la tierra había que considerar también el funcionamiento del sistema hidroeléctrico del río Grijalva donde se encuentran instaladas cuatro centrales hidroeléctricas de CFE: Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas, con capacidad instalada de 4800 Mw, aproximadamente 10% del total nacional (fig 2).

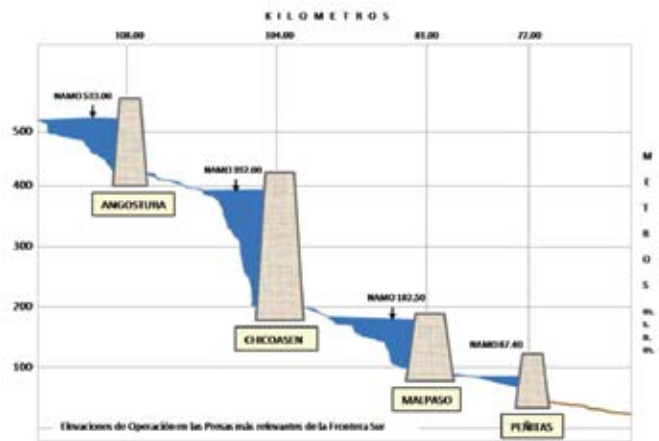


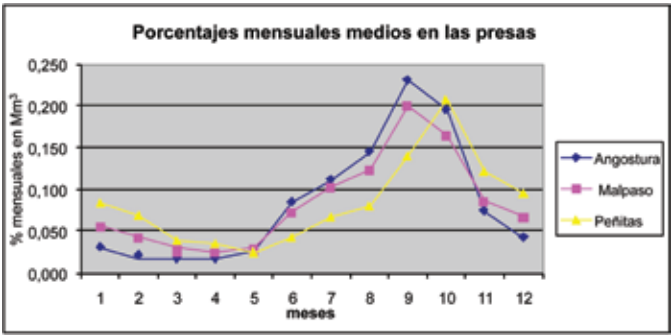
Fig 2. Ubicación de las presas Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas

Con el deslizamiento se formaron dos vasos de almacenamiento, uno aguas arriba y otro aguas abajo del caído. Al suspenderse el paso del agua y formarse estos dos almacenamientos, el nivel del vaso superior empezó a aumentar provocando el gran riesgo de que, al fallar el caído, el agua almacenada en el vaso superior, fluyera en corto tiempo hacia el vaso inferior y obligara a descargar caudales muy gran-

des por el vertedor de la presa Peñitas o, peor aún, pusiera en riesgo la cortina de esta presa. Adicionalmente, el almacenamiento de agua en el vaso superior ocasionaría que se inundara la planta de generación de la presa Malpaso.

A partir del 30 de octubre de 2007, se puso en marcha un operativo de emergencia para enfrentar los efectos del desbordamiento de los ríos.

Para mitigar el riesgo, el 5 de noviembre se suspendió la operación de las centrales hidroeléctricas Malpaso, Chicoasén y La Angostura, lo que disminuyó las aportaciones al vaso superior. Era posible sostener esta medida hasta que las presas no llegaran a sus niveles máximos extraordinarios (NAME), lo cual dependía de las aportaciones durante noviembre, diciembre y enero, final de la época de lluvias del ciclo 2007. La fig 3 consigna los datos históricos de la distribución porcentual de volúmenes de escurrimiento en promedios mensuales de ingreso a las presas, de 1959 a 2007, y que para noviembre, diciembre y enero los gastos de entrada a Peñitas son relativamente grandes, lo cual implicaba mayores riesgos de desbordamiento.



**Fig 3. Distribución porcentual de volúmenes de ingresos mensual promedio en el sistema hidroeléctrico río Grijalva de 1959 a 2007**

El vaso superior del “caído” recibía aportaciones del río Tzimbac y cuencas vecinas, así como de Malpaso, por las turbinas o por su vertedor de demasías. A partir del 4 de noviembre, se trataron de evitar tanto la turbinación como el vertido, pero la posibilidad de lograrlo dependía de los escurrimientos de entrada a Malpaso procedentes de la Angostura y de su cuenca propia. La variable aleatoria de la magnitud de estos escurrimientos contribuía a la incertidumbre en la toma de decisiones.

El vaso inferior se extendió aguas abajo hasta la presa Peñitas. Las entradas a este vaso provenían del río Sayula y las posibles transferencias controladas o incontroladas a través

del tapón. Esta situación implicaba, por un lado, peligro de inundación para las poblaciones situadas aguas arriba del caído y, por otra, un riesgo muy alto para la seguridad de la presa Peñitas y las poblaciones asentada aguas abajo de la presa, y en la llanura tabasqueña (fig 4).



**Fig 4. Zona del caído (CFE)**

El primer reto era garantizar la seguridad de las poblaciones, evitando un rompimiento violento de las presas que podría inundar más de 300 poblados incluyendo Villahermosa, Cárdenas y Huimanguillo además de otras poblaciones.

El segundo reto era continuar la operación normal del sistema eléctrico nacional a pesar de carecer del 10 % proveniente de esas presas.

Inmediatamente, la CFE conformó un equipo de expertos de todo el país que determinó que la mejor solución era construir un canal que cruzara el derrumbe y permitiera pasar al agua de manera controlada. Para realizar esto fue necesario construir una infraestructura gigante donde más de 700 personas trabajaran 24 h al día con el fin de sacar adelante uno de los proyectos de ingeniería más precisos y riesgosos en tiempo record. En una semana se montó una estructura de construcción que, en condiciones normales, requiere cuatro meses para su levantamiento.

Simultáneamente, personal del Centro Nacional de Control de Energía de la Ciudad de México reorganizó el despacho del sistema eléctrico nacional para poder seguir brindando el servicio eléctrico con normalidad a los más de cien millones de mexicanos.

Organizar la excavación representó un esfuerzo sin precedente, por la cantidad de equipo que hubo que transportar al

lugar, utilizando embarcaciones especiales proporcionadas por PEMEX —126 máquinas en total: tractores, retroexcavadoras, carros articulados, camiones de volteo, motoconformadoras, vibrocompactadores, perforadoras ranger, dragas, remolcadores, cargadores, pipas de combustible, chalanes y chalán cisterna—. En esta etapa, las máquinas trabajaron día y noche hasta mover 1 080 568 m<sup>3</sup> de material. La coordinación del personal de construcción y administración de la obra se instaló donde no existía previamente infraestructura alguna. El equipo de trabajo con personal de CFE, empresas constructoras, consultores e investigadores constituyó el elemento principal para lograr con éxito la labor.

Tras 44 días de trabajo, se construyó un canal de 50 m de profundidad y 800 m de largo —con plantilla a la cota 95 y ancho de plantilla de 15 m— cuya excavación permitió el flujo de agua entre los vasos (fig 5).

### TRANSFERENCIA DE VOLÚMENES EN LOS DOS VASOS

El curso del río Grijalva se restableció el 18 de diciembre, a pesar de que la hipótesis original había cambiado al conocerse el material del fondo, que fue más resistente a la erosión de lo previsto. Capacidad, estrategia, logística, ingeniería y tecnología lograron restituir el cauce del río y garantizar así la seguridad del sistema hidroeléctrico del Grijalva y las poblaciones cercanas.

Los análisis probabilísticos en los que participó en forma destacada el II UNAM conceptualizaron la solución del problema en tres etapas:

- La primera, del 4 de noviembre al 18 de diciembre, cuando el principal reto consistía en restablecer la comunicación entre los vasos superior e inferior en condiciones de seguridad al término de la temporada de lluvias de 2007, para lo cual se hizo un canal de transferencia.
- La segunda, del 20 de noviembre al 15 de marzo, amplió el canal de transferencia mediante una excavación controlada, para complementar así la erosión natural causada por el escurrimiento.
- Finalmente, la tercera buscó dar al canal la capacidad necesaria para permitir las extracciones en Malpaso y establecer condiciones de seguridad para las lluvias de 2008. En esta tercera etapa fue necesario continuar los trabajos de excavación, por la lentitud observada en el proceso de erosión natural. Al mismo tiempo se aseguró la estabilidad de los bloques y taludes para resistir escurrimientos por futuras lluvias extraordinarias.

Durante la primera etapa, el II UNAM analizó los transitorios que originaría la posible ruptura del caído. Para la modela-



Fig 5

ción física del tapón, se construyeron dos modelos físicos de la zona, que fueron útiles para observar, cualitativamente, los efectos de la ruptura del bordo formado por el deslizamiento en San Juan de Grijalva. También se identificaron los riesgos de fallas del talud en el canal excavado.

Adicionalmente, se realizaron modelaciones matemáticas para obtener los hidrogramas que se generarían ante una ruptura súbita del tapón para diferentes almacenamientos en los vasos superior e inferior, considerando distintos tiempos de falla entre 8 y 24 horas. Se usaron dos modelos: uno con la simulación de un flujo no permanente unidimensional en el cauce, entre el deslizamiento y la cortina de la central Peñitas, y otro, sobre la transferencia de volúmenes entre los dos vasos. Además, se hicieron modelos físicos del tránsito de la onda de ruptura a través del canal, para corroborar los resultados de los modelos matemáticos.

La simulación del flujo no permanente se hizo para estimar el tiempo de traslado de la onda generada por el rompimiento súbito del tapón y determinar los posibles niveles en el vaso de almacenamiento de Peñitas, ya que la ruptura del caído ocasionaría un brusco incremento del nivel del agua. Esto se hizo para garantizar que la elevación del agua se mantuviera dentro de los intervalos de seguridad de operación de la presa Peñitas.

En la segunda etapa, el Instituto de Ingeniería trabajó de manera conjunta con la CFE, monitoreando con detalle la erosión provocada por el flujo en el canal y el comportamiento mismo del flujo, para identificar principalmente su evolución en el tiempo y la localización de la sección de control que se



Fig 5

presentaba desde la salida del canal hacia aguas arriba (erosión regresiva), debido al material heterogéneo del tapón.

La erosión regresiva resultó más lenta de lo previsto porque hubo mayor resistencia que la supuesta en los modelos, lo que obligó a ampliar el canal de conexión a una plantilla de 30 m, con el fin de aumentar el gasto de transferencia e iniciar el desfogue de Malpaso y la Angostura, cuyos almacenamientos en esas fechas eran mayores que los recomendados. En esta etapa se calibraron los modelos de flujo para estimar el gasto de transferencia en el canal con diferentes perfiles longitudinales del fondo y distintos anchos de plantilla. En esas fechas el riesgo de falla era por las lluvias extraordinarias de finales de la temporada de lluvias 2007.

La tercera etapa de participación del II UNAM consistió en reducir los almacenamientos de las presas Angostura y Malpaso hasta niveles de seguridad y control (curvas guía) y mantener el sistema en condiciones seguras de operación en la temporada de lluvias de 2008.

A partir de la información recopilada sobre el funcionamiento del canal, el II UNAM realizó modelaciones matemáticas para estimar su comportamiento con diferentes anchos y a diferentes elevaciones de plantilla. Se llevaron a cabo modelaciones matemáticas para estimar la superficie libre del agua (SLA) y las velocidades en el canal. Se elaboró también un modelo físico para corroborar los resultados obtenidos y observar el comportamiento del canal. Se estimó que, para alcanzar la capacidad de control requerida en el sistema de presas para junio de 2008, era necesario realizar descargas sostenidas de 1 400 m<sup>3</sup>/s de abril a junio de ese año.

Lograr transferir este gasto requería bajar la elevación de la plantilla, y esto implicaría problemas para los procesos constructivos y el movimiento del material respectivo, ante la incertidumbre de que ocurrieran posibles escurrimientos importantes y la premura al realizar los trabajos.

Para aumentar la capacidad de conducción, de manera paralela al funcionamiento del canal, se realizaron obras de ensanchamiento del mismo. Con este fin, se diseñó una ataguía que permitiera la excavación en seco y se estimó el tiempo disponible para que la interrupción del flujo no provocara el peligro de sobrepasar las capacidades del vaso superior o de Malpaso. El Instituto aplicó un modelo probabilístico de los escurrimientos y uno físico del cierre y destrucción de la ataguía.

El 6 de mayo de 2008 el funcionamiento del canal fue hidráulicamente satisfactorio, con gasto de 1 352 m<sup>3</sup>/s, en un aforo a las 18:30 h, elevación aguas arriba de 90.43 msnm y elevación aguas abajo de 87.61 msnm. Las excavaciones para abatir los taludes en el canal del río Grijalva alcanzaron 532 279 m<sup>3</sup>, y el gran total de movimiento de tierras fue de 1 909 653 m<sup>3</sup>.

### LECCIONES APRENDIDAS

- El análisis de ingeniería y la evaluación de un proyecto es el pilar fundamental sobre el que se basa el éxito o fracaso del mismo.
- El trabajo con un grupo multidisciplinario, no solo enriquece al proyecto, si no que hace su ejecución más eficiente, pero siempre que haya un líder o cabeza del trabajo. Todas y cada una de las cabezas que participaron en este proyecto tuvieron la inteligencia de evaluar, proyectar y ejecutar exitosamente cada una de las piezas para conseguir el fin común.
- La consistencia en las decisiones motivó la búsqueda de las mejores opciones, el seguimiento estricto del proceso, y la revisión de las capacidades y adecuaciones de los recursos disponibles, que en general se subestimaron en un principio. Todo ello fue clave para conseguir un excelente resultado.
- Siempre y en todo lugar, la comunicación transparente entre las dependencias constituyó un elemento fundamental para lograr los fines propuestos.

Por parte del Instituto de Ingeniería participaron los doctores Fernando J González Villarreal, Ramón Domínguez Mora, Óscar A Fuentes Mariles y los maestros Víctor Franco, con el apoyo de Juan Javier Carrillo Sosa, Faustino De Luna Cruz, Guadalupe E. Fuentes Mariles, Maritza L Arganis Juárez, Juan José Pérez Gavilán E, Santiago Loera Pizarro, Jorge Arturo Ávila Rodríguez y del grupo de becarios de la Coordinación de Hidráulica. 🧑‍🔧