

## Anexo 2

### I. Nombre del Proyecto de Investigación

Desarrollo de un sistema de pronóstico operacional de eventos extremos basado en modelos numéricos de predicción de las condiciones meteorológicas, de oleaje y marea de tormenta, incluyendo la evaluación del desempeño de los modelos y la determinación de incertidumbres.

### II. Requisitos de elegibilidad técnicos y administrativos

#### a) Elegibilidad técnica:

Actualmente es evidente la necesidad de contar con pronósticos confiables sobre la ocurrencia de fenómenos naturales perturbadores que puedan ocasionar daños a las poblaciones en general y, en particular, a aquellas que son más vulnerables. El sistema de pronóstico numérico operativo de eventos extremos que se desarrollará, proporcionará información complementaria a los tomadores de decisiones sobre regiones en peligro por eventos meteorológicos extremos, oleaje y marea de tormenta en el corto plazo. El sistema proporcionará información, en forma expedita, sobre regiones que puedan verse afectadas por precipitaciones extremas, vientos intensos, oleaje y sobre-elevación del nivel del mar debido a marea de tormenta.

Con base en los pronósticos generados por el sistema propuesto, se proporcionarán elementos adicionales a las autoridades correspondientes para que puedan indicar a la población las medidas adecuadas que deben tomar para protegerse en caso de que la región en donde viven se vea amenazada por un fenómeno natural de características adversas que ponga en riesgo su integridad física y la de sus bienes. La información podrá ser transmitida oportunamente a los estados y municipios para que se tomen medidas preventivas encaminadas a reducir pérdidas y daños asociados a los impactos de estos fenómenos naturales extremos.

Por otra parte, es muy importante evaluar el desempeño de los modelos numéricos y determinar la calidad de los pronósticos que generan, para lo cual es fundamental contar con buena información derivada de distintas fuentes, como pueden ser redes de monitoreo atmosférico y del océano, radares, satélites, etc. Esta tarea no es trivial y puede resultar muy complicada si se quiere verificar el desempeño de un modelo para pronosticar fenómenos de escala espacial y temporal muy pequeñas. En este sentido, el presente proyecto de investigación servirá para aplicar técnicas novedosas para la evaluación de los modelos de pronóstico y para la estimación de las incertidumbres asociadas.

Para la ejecución del Proyecto, el CENAPRED contará con el apoyo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA-UNAM), el cual cuenta con un cluster de 152 núcleos con 15 nodos, 4 de ellos de 16 núcleos y

*[Handwritten signatures and initials in blue and green ink]*

11 de ellos de 8 núcleos, más el sistema de escritura Lustre y el nodo maestro, todo interconectado por un switch infiniband. El grupo Interacción Océano-Atmósfera (IOA) del CCA-UNAM, cuenta además con 6 servidores de procesamiento y dos de almacenamiento. En el cluster del CCA se llevarán a cabo las pruebas del sistema hasta su instalación en el hardware específico del sistema de pronóstico y algunos desarrollos se llevarán a cabo en los servidores del grupo IOA.

**b) Elegibilidad administrativa:**

Conforme a lo señalado en el oficio de solicitud, el CENAPRED, como instancia técnica-científica de la Coordinación Nacional de Protección Civil se encuentra plenamente acreditado e identificado ante los órganos decisorios del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) y su Representante Legal cuenta con las atribuciones necesarias a fin de garantizar la adecuada ejecución del mismo.

El objetivo del Proyecto de Investigación se apega a lo establecido en la fracción VI del artículo 48 de las ROFOPREDEN, el cual señala que la Subcuenta proporcionará financiamiento para "Investigaciones aplicadas al desarrollo y mejoramiento de tecnología para la prevención y mitigación de riesgos".

**III. Monto del financiamiento con cargo a la Subcuenta de Investigación del FOPREDEN**

\$ 15,142,856.00 (Quince millones ciento cuarenta y dos mil ochocientos cincuenta y seis pesos 00/100 M.N.)

**IV. Términos de referencia del Proyecto de Investigación:**

**a) Objetivo General del Proyecto de Investigación**

Desarrollar un sistema de pronóstico numérico operativo de las condiciones meteorológicas, de oleaje y marea de tormenta cuyas estimaciones sean evaluadas de manera satisfactoria, que incluya un sistema de visualización de las simulaciones numéricas que sea amigable para el usuario.

**b) Objetivos Específicos del Proyecto de Investigación**

1. Elegir, configurar e implementar cada uno de los modelos que conformarán el sistema de pronóstico numérico.
2. Determinar las características del hardware para correr los modelos y adquirir el equipo necesario.
3. Seleccionar las variables y generar los productos gráficos más adecuados que sirvan de complemento y apoyo a los pronosticadores y tomadores de decisiones, para lo cual se creará un sitio web que permita el despliegue de la información con diferentes navegadores y sistemas operativos.
4. Evaluar el desempeño de cada uno de los modelos del sistema.

5. Estimar las incertidumbres asociadas a los distintos pronósticos e implementar un identificador de eventos extremos para variables como precipitación, temperatura, viento, oleaje y nivel del mar.

6. Automatizar el sistema de pronóstico operativo.

c) Descripción detallada del escenario de peligro, vulnerabilidad y/o riesgo que se debe estudiar o resolver, a través de la ejecución del Proyecto de Investigación

El territorio mexicano se ve afectado año con año por diversos fenómenos hidrometeorológicos que provocan tanto pérdida de vidas humanas como importantes pérdidas económicas por los daños materiales a bienes e infraestructura. Entre esos fenómenos están las lluvias torrenciales asociadas a ciclones tropicales o a sistemas convectivos locales o de mesoescala, que pueden generar inundaciones, desbordamiento de ríos, deslaves, avalanchas de lodo y desprendimiento de rocas y árboles.

Los ciclones tropicales son sistemas caracterizados por un centro de baja presión que presentan nubes organizadas en bandas espirales y vientos cercanos a la superficie que giran en sentido ciclónico alrededor de dicho centro. Estos sistemas afectan al territorio mexicano año con año tanto por las costas del Pacífico como por el Golfo de México y el Mar Caribe. Según la intensidad de sus vientos máximos sostenidos un ciclón tropical puede considerarse como depresión (< 61 km/h), tormenta (62-118 km/h) o huracán ( $\geq$  119 km/h). De los estados costeros del Pacífico mexicano es Baja California Sur (BCS) el que se ve afectado con mayor frecuencia por el impacto de ciclones tropicales, seguido por el estado de Sinaloa. Sin embargo, prácticamente todos los estados del litoral del Pacífico son susceptibles de verse afectados por estos fenómenos en cada temporada, no únicamente por las lluvias intensas sino también por los fuertes vientos, el oleaje y la marea de tormenta que pueden generar. Por el litoral del Golfo de México y Mar Caribe los estados más afectados son Tamaulipas, Veracruz y Quintana Roo.

En los últimos 40 años se generaron, en promedio, alrededor de 16 ciclones tropicales por temporada en la cuenca del Pacífico tropical oriental, con un promedio de entre 2 y 3 entradas a tierra por año por las costas mexicanas, mientras que en la cuenca del Atlántico norte se generaron en promedio 11 ciclones por temporada, de los cuales entre 1 y 2 impactan directamente a México. Sin embargo, debemos mencionar que la variabilidad en la generación de estos fenómenos entre una temporada y otra es muy grande en ambas cuencas oceánicas y que las afectaciones pueden producirse no solamente cerca de la costa sino hasta varios cientos de kilómetros tierra adentro.

Entre los fenómenos recientes más devastadores podemos mencionar el huracán Odile, que afectó grandes áreas de la península de Baja California (BC) en Septiembre de 2014, en particular al estado de BCS. En la Figura 1 se muestra el pronóstico de precipitación acumulada a 120 horas a partir de las 00:00 horas del 13 de Septiembre de

*[Handwritten signatures and initials in blue and green ink]*

2014, generado con el modelo numérico de circulación atmosférica conocido como WRF y que ha sido implementado en el CCA-UNAM para el territorio mexicano y zonas adyacentes. En esta figura se observa la gran cantidad de precipitación acumulada en la península de BC asociada con el paso del huracán Odile. En la Figura 2 se muestra el campo de viento cerca de la superficie y los contornos de presión reducida al nivel del mar pronosticados con el modelo mencionado para las 20:00 hrs del 14 de Septiembre de 2014, en donde se observa la circulación ciclónica y la baja presión asociadas al huracán.

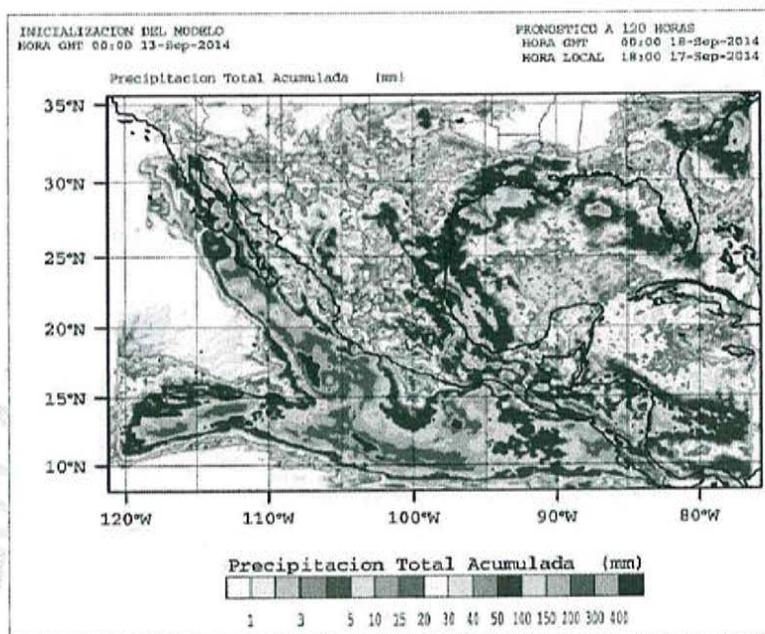


Figura 1. Pronóstico de precipitación acumulada a 120 horas a partir de las 00:00 hrs del 13 de Septiembre de 2014, generado con el modelo atmosférico WRF (CCA-UNAM).

*[Handwritten signatures and initials in blue and green ink]*

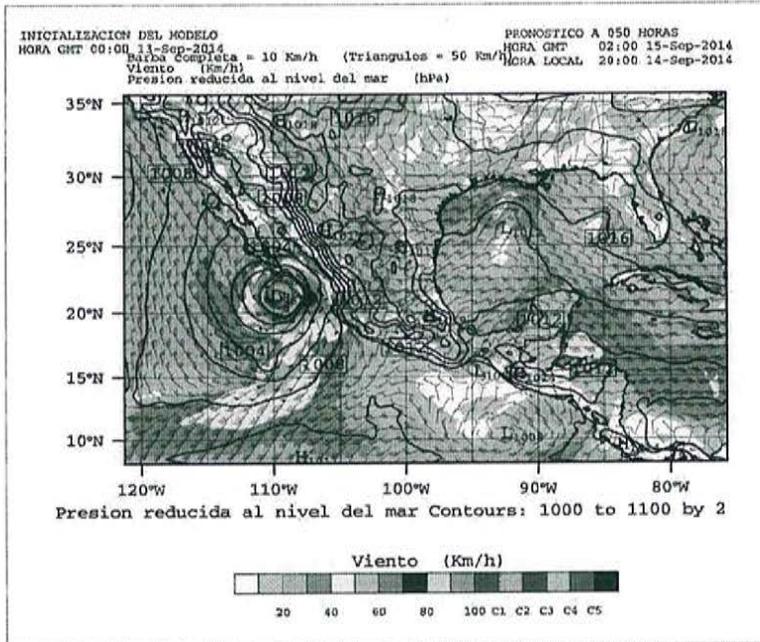


Figura 2. Campo de viento cerca de la superficie y contornos de presión reducida al nivel del mar pronosticados para las 20:00 hrs del 14 de Septiembre de 2014 con el modelo atmosférico WRF (CCA-UNAM).

Debe señalarse que la intensidad de un ciclón tropical no es necesariamente proporcional al daño que pueda producir. En ocasiones, la combinación de diferentes sistemas, su trayectoria y lento desplazamiento, favorecen el transporte de grandes cantidades de humedad hacia el territorio mexicano. Este fue el caso de la tormenta tropical Manuel por el océano Pacífico y el huracán Ingrid de categoría uno por el Golfo de México, que en Septiembre de 2013 provocaron lluvias intensas en gran parte de la República Mexicana, en particular sobre los estados costeros de Guerrero, Chiapas, Oaxaca, Tamaulipas, Veracruz y Tabasco, pero también sobre estados del centro como Hidalgo y Puebla, dejando miles de damnificados y varias decenas de muertos.

Otros de los efectos relacionados con los ciclones tropicales son el oleaje intenso y la marea de tormenta. Eventos recientes, como la marea de tormenta asociada al huracán Katrina en Agosto de 2005, que provocó alrededor de 2000 decesos y daños materiales por más de 100 mil millones de dólares en el área de Nueva Orleans, o la asociada al huracán Sandy en Octubre de 2012 que afectó las costas de Nueva York y provocó decenas de fallecimientos y pérdidas materiales por más de 30 mil millones de dólares, muestran la capacidad destructiva de este fenómeno. La marea de tormenta consiste en la sobre-elevación del nivel del mar por encima de su nivel medio o de su nivel de marea astronómica, lo cual provoca inundaciones que, asociadas con el fuerte oleaje, pueden ser muy destructivas.

Además de los ciclones tropicales, otros fenómenos que causan serias afectaciones en distintos sectores sociales y económicos son los 'nortes'. Estos eventos, que afectan principalmente a la región nororiental del país y a los

*[Handwritten signatures and initials in blue and green ink]*

estados costeros del Golfo de México (tanto cerca de la costa como mar adentro), producen lluvias muy fuertes y vientos intensos que pueden generar oleaje superior a los 6 metros de altura. Entre las actividades que se ven más seriamente afectadas por los 'nortes' podemos mencionar las actividades marítimas, agropecuarias y de turismo, así como las operaciones navales, aéreas, de generación de electricidad y de extracción y producción de petróleo. Las características atmosféricas de gran escala asociadas a estos fenómenos los hacen predecibles con varios días de anticipación, por lo cual los modelos de predicción del tiempo son de gran utilidad para tomar las previsiones correspondientes y mitigar el efecto adverso que pudieran ocasionar.

Por otra parte, el complejo relieve del territorio mexicano favorece el desarrollo de grandes tormentas convectivas con alto potencial de precipitación (no necesariamente vinculadas con ciclones tropicales), las cuales provocan desastres tanto en las regiones montañosas como en las planicies hacia donde escurre gran cantidad de agua. Por su escala espacial y temporal relativamente menor, estos eventos son más difíciles de pronosticar, pero la información proporcionada por el sistema de pronóstico, como por ejemplo sondeos virtuales, humedad en toda la columna de aire e índices de estabilidad, ayudan al meteorólogo a identificar zonas con alta probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos. En un futuro, con la información de radares de alta resolución asimilada a los modelos numéricos, también de alta resolución, se podrá pronosticar en el corto plazo (1 a 6 horas) el desarrollo de estos eventos.

En la actualidad, los modelos numéricos de predicción tanto de la atmósfera como del océano se han vuelto una herramienta fundamental para los tomadores de decisiones y encargados de la protección civil. Dichos modelos utilizan la información de las condiciones actuales proporcionada por instrumentos de medición ubicados sobre la superficie terrestre (en tierra y mar), así como de radiosondas y satélites meteorológicos, entre otros. En particular, las mejoras hechas a los modelos regionales han permitido avances significativos en la predicción de la trayectoria e intensidad de ciclones tropicales. Sin embargo, junto con las incertidumbres asociadas a la resolución de las ecuaciones que usan los modelos, la poca densidad y mala calidad de las observaciones que los alimentan afectan la precisión de las estimaciones. Cabe mencionar también que los errores en las predicciones numéricas crecen con el tiempo de pronóstico. Por ello, es fundamental llevar a cabo una evaluación de los pronósticos con el objeto de asociarles cierto grado de confiabilidad.

d) **Características de los entregables que se espera obtener como resultado de la ejecución del Proyecto de Investigación**

1. Descripción del sistema de pronóstico numérico operacional para eventos extremos de las condiciones meteorológicas, de oleaje y marea de tormenta y de su validación.

Handwritten signatures and initials in blue and green ink, including a large signature and several smaller initials.

1.1. Documento con la descripción detallada del sistema de pronóstico, incluyendo las características de cada uno de los modelos elegidos, los criterios que se siguieron para su elección, las configuraciones utilizadas, incluyendo resolución horizontal y vertical, parametrizaciones, condiciones iniciales y de frontera. Se describirán con detalle las características del sitio web de visualización, de los productos gráficos que generará el sistema y su importancia y uso para los operadores. Entre las variables y productos que se generarán para el pronóstico meteorológico están: la presión reducida al nivel medio del mar, la intensidad y divergencia de los vientos, radiosondeos virtuales, altura geopotencial y precipitación acumulada, entre otros. Para el modelo de oleaje: altura significativa, dirección de ola y swell; y para el modelo de marea de tormenta se generará el pronóstico de la altura sobre el nivel medio del mar. También se describirán las características del sistema, hardware y software, y se describirán los flujos de información y la automatización del mismo.

1.2. Documento en donde se describan las bases teóricas de la validación de los pronósticos y de los métodos que se usarán para determinar su incertidumbre.

## 2. Implementación de los modelos e integración del sistema.

2.1. Implementación de los modelos WRF, WWIII y ADCIRC en un equipo de cómputo de alto rendimiento.

Para el pronóstico de las condiciones meteorológicas se implementará una configuración del modelo Weather Research and Forecasting (WRF), en su última versión, con las siguientes características: un dominio que cubrirá de 120°W a 75°W y de 10°N a 35°N, pudiendo ser aún mayor; resolución de 21 km en la horizontal y al menos 27 niveles en la vertical; un anidamiento para el centro de México que cubrirá de 106°W a 94°W y de 15°N a 22°N, pudiendo ser mayor, con una resolución horizontal de 7 km. Esta configuración incluirá los desarrollos previos con que cuenta el sistema de pronóstico del CCA-UNAM y los que se alcancen antes de la entrega, incluyendo la actualización de la capa con información de uso y cobertura de suelo. Para las condiciones iniciales y de frontera se tomarán las salidas del modelo Global Forecast System (GFS).

Para el pronóstico de oleaje se implementará el modelo Wave Watch III en su última versión cubriendo 3 dominios (dos de ellos anidados): Caribe y Golfo de México, Océano Pacífico y Pacífico Mexicano. El dominio que cubre el Golfo de México y Mar Caribe abarcará de 100°W a 75°W y de 10°N a 35°N. El dominio del Océano Pacífico cubrirá todo ese océano y tendrá una resolución de 1°, y el dominio del Pacífico Mexicano, que estará anidado al del Océano Pacífico, tendrá una resolución de 21 km. Los forzamientos por viento y presión

para el dominio del Golfo de México y Mar Caribe y para el Pacífico Mexicano se tomarán del modelo WRF y los vientos y anomalías de presión atmosférica para el dominio del Océano Pacífico se tomarán del modelo GFS. Las resoluciones podrán ser mayores.

Para el pronóstico de marea de tormenta se implementará el modelo Advanced Circulation Model (ADCIRC) en dos dominios: uno para el Golfo de México y Mar Caribe (noroccidental únicamente) y el otro para el Pacífico Mexicano. Para los forzamientos se utilizarán los vientos y la presión obtenidos del pronóstico meteorológico realizado con el modelo WRF. Para las condiciones de frontera se incluirá la marea astronómica a partir de la base TPX0.

2.2. Integración de los modelos de pronóstico en un sistema automatizado. El sistema de pronóstico contará con los equipos de cómputo para llevar a cabo las corridas de los modelos y para su visualización. Estos serán dos servidores o un cluster y un servidor.

### 3 Evaluación del desempeño de los pronósticos, determinación de incertidumbres e implementación del sistema de visualización.

3.1. Análisis del desempeño de los modelos con base en un período de pruebas. Se correrán pronósticos para años anteriores comparando contra observaciones para evaluar el desempeño de los pronósticos y se realizarán los ajustes correspondientes.

3.2. Se implementará e integrará al sistema un estimador de la incertidumbre de los pronósticos para determinadas variables y un identificador de eventos extremos.

3.3. Sistema de visualización de la información. Para ello se construirá un portal web, con las especificaciones más rigurosas para sitios en Internet, que permita el despliegue de la información con diferentes navegadores y sistemas operativos sin la necesidad de algún controlador adicional, como por ejemplo Flash. El portal se desarrollará en una plataforma LAMP (Linux-Apache-MySQL-PHP) y se implementará en un servidor de visualización que formará parte del sistema de pronóstico.

3.4. Se desarrollará e impartirá un curso de capacitación para el personal que estará encargado de operar el sistema de pronóstico..

#### e) Forma y medio en que deberán ser entregados los resultados del Proyecto de Investigación

Los entregables incluyen reportes presentados en formato digital e impreso y el sistema de pronóstico que incluye todos los desarrollos y los equipos de cómputo necesarios para su configuración.

Handwritten signatures and initials in blue, green, and black ink, including a large signature and the number '2'.

f) **Plazo máximo para el desarrollo del Proyecto de Investigación;**

18 meses, a partir del inicio del Proyecto de Investigación.

g) **Programa de la ejecución del gasto del Proyecto de Investigación**

Se adjunta programa.

h) **Calendario de entrega de reportes**

A más tardar el último día hábil de los meses 3, 6, 9, 12 y 15, en función de la fecha de inicio del Proyecto de Investigación.

i) **Criterios considerados para la evaluación del Proyecto de Investigación**

1. El sistema debe incluir los pronósticos meteorológicos, de oleaje y de marea de tormenta.
2. El sistema de visualización de los pronósticos debe ser amigable, de rápido acceso y permitir obtener información posprocesada de los pronósticos que faciliten el análisis de los especialistas.
3. Compatibilidad de la información entregada con la plataforma del Atlas Nacional de Riesgos y del Sistema Nacional de Alertas.

Handwritten signatures and initials in blue and green ink, including a large signature and several smaller initials.