

La IMPORTANCIA
de la HIDROMETEOROLOGÍA
en el ENTORNO
ECONÓMICO - SOCIAL



Editado por:
MARINA HERRERA PANTOJA

Los sistemas de alerta temprana en el contexto de adaptación al cambio climático global

Michel Rosengaus Moshinsky

*Bosque de Zapopan No. 20, La Herradura, CP 52784 México, D-F.
Correspondencia: mickvos@prodigy.net.mx*

RESUMEN

Las medidas de adaptación a estas nuevas condiciones climáticas se consideran ya ineludibles. Sin embargo, a pesar de esta expectativa, el grado de definición de la frecuencia e intensidad de estos eventos extremos en el clima futuro es aún muy pobre y la incertidumbre aún demasiado alta para muchas de las tomas de decisiones necesarias. ¿Dedicamos nuestros esfuerzos locales a prepararnos mejor para tormentas severas más frecuentes y más intensas, o hacia prepararnos mejor para intervalos de sequía más frecuentes, más prolongados y más intensos? ¿Nos preparamos mejor para enfrentar ondas de calor, o fenómenos invernales? No resulta fácil decidir hacia donde deben dirigirse los recursos para adaptación, simplemente, porque hasta ahora somos incapaces de definir con precisión esta condición futura. ¿Debemos pues esperar a que esta correcta definición ocurra antes de actuar? o ¿debemos dedicar todos nuestros recursos para adaptación a las condiciones medias del clima futuro? La respuesta a estas dos preguntas es: no es necesario ni esperar ni orientar todo hacia las condiciones medias. La acción natural es incrementar nuestra preparación ante ellos a través de Sistemas de Alerta Temprana (SAT's) que, en su momento, nos permitan contar con intervalos de tiempo suficiente para tomar las acciones preventivas que permitan enfrentar dichos fenómenos extremos con un mínimo de daños a la vida, a la propiedad y a la actividad humana. Este trabajo describe las características esenciales de los SAT's, tomados como herramientas prácticas de adaptación al cambio climático global.

PALABRAS CLAVE: cambio climático, sistemas de alerta temprana, adaptación, eventos extremos, desastres.

INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático del sistema de Naciones Unidas, ha estado trabajando ya por décadas, primero tratando de definir si el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero por las actividades del hombre moderno están produciendo un calentamiento global, luego tratando de identificar cuáles serían las manifestaciones de este cambio climático global, CCG, (más allá del evidente incremento en la temperatura media de la atmósfera terrestre), identificando que medidas de mitigación (entendidas como aquellas que reducen o limitan la producción de gases de efecto invernadero) serían las más efectivas y finalmente buscando recomendaciones para adaptarse a las condiciones climáticas cambiantes que, al menos, el próximo siglo nos depara. El presente trabajo se encuentra en el ámbito de identificación de las manifestaciones del CCG y en el de las medidas de adaptación razonables.

Por supuesto, la definición misma del clima, como las condiciones medias o comunes de la atmósfera y su influencia sobre los océanos, los continentes, la vida y los hielos del planeta, nos hace pensar inmediatamente en que el Cambio Climático Global producirá cambios en estas condiciones medias, por ejemplo en la temperatura media anual, la precipitación acumulada anual, el nivel medio del mar, etc. En este contexto, la sociedad sí puede identificar, al menos en forma cualitativa, las medidas de adaptación que debe tomar, por ejemplo, el uso de cultivos más afines a temperaturas mayores y precipitaciones menores, el dejar de desarrollar las zonas de la franja costera que en el futuro quedarán permanentemente o frecuentemente inundadas por el mar, etc.

Pero resulta que los fenómenos extremos, también son parte del clima de un cierto sitio y también serán afectados de alguna manera por el CCG, por ejemplo, la frecuencia de las tormentas severas, la severidad y duración de ondas de calor o de frío, etc. Aunque los 23 modelos de circulación general actuales en los que las conclusiones del IPCC están fuertemente apoyadas, carecen de las resoluciones de cálculo adecuadas para simular las condiciones del clima futuro en el contexto de fenómenos extremos, sí resultan consensos cualitativos de que muchos de estos fenómenos pudieran tener intensidades mayores (es decir más extremas que las actuales) e incremento en sus frecuencias de presentación. Esto ha producido un cierto grado de perplejidad en la sociedad, al ser

informada que, por ejemplo, por un lado la precipitación acumulada anual será menor, pero por otro lado las tormentas capaces de producir inundaciones y daños serán más frecuentes y por otro lado más que cuando caigamos en condiciones de sequía, éstas serán de mayor severidad y duración. Bajo este tipo de información, la sociedad tendería a la inmovilidad, simplemente porque las medidas de adaptación para una de las condiciones futuras que le han anunciado parecerían ser opuestas a las medidas de adaptación adecuadas para otra de las condiciones que le han anunciado. Si a estos aumentamos el hecho de que, hasta ahora las proyecciones sobre eventos extremos son relativamente cualitativas y que tienen un alto grado de incertidumbre, la sociedad no orienta recursos y esfuerzos específicos, ni a un extremo ni al otro.

¿Existen pues medidas de adaptación al CCG, en el contexto de fenómenos extremos, que sí le resulten razonables a la sociedad y que sí puedan empezar a tomarse de inmediato, que sí resulten robustas aún bajo las condiciones de incertidumbre actuales? Es la tesis de este trabajo que los llamados **Sistemas de Alerta Temprana** (en breve SAT's) son medidas de adaptación al CCG que cumplen con estas condiciones.

EXPECTATIVAS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Si uno juzgara lo que el IPCC estima serán las más importantes manifestaciones del CCG exclusivamente a través de los medios masivos de comunicación, la percepción sería que la mayor frecuencia e intensidad de extremos climáticos es la parte más importante. Visto desde el punto de vista de los medios de comunicación, suena lógico, ya que son precisamente los eventos extremos los que son noticia, los que llaman la atención de nuevos radioescuchas, televidente, lectores y hasta internautas. Pero si uno se adentra en el 4º Informe del IPCC (ver IPCC 2007, Parry *et al.*, 2007 y Solomon *et al.*, 2007) de inmediato identifica que, aunque los eventos extremos son mencionados claramente, de ninguna manera se trata de la parte medular del documento. El grado de definición de lo que se espera en términos de eventos extremos es mucho menor que el que el IPCC se aventura a establecer con respecto a las condiciones medias o típicas del clima futuro. En el contexto de los extremos, el IPCC expresa casi únicamente la dirección en la que se espera el cambio, y los fundamentos generales en los que esta conclusión se basa.

Inclusive, bajo el esquema de certidumbre que el IPCC utiliza, las probabilidades de ocurrencia de eventos extremos esperada es planteada más bien como media.

El clima futuro, fundamentado tanto en el análisis de los registros históricos que hasta ahora se tienen, como en las capacidades de simulación futura que los modelos numéricos actuales tienen, será uno en que, por supuesto, los valores medios cambian paulatinamente, pero estas condiciones medias provendrán de oscilaciones en las que los valores extremos serán más frecuentes, es decir un clima en que las condiciones se mantendrán más tiempo en los extremos de ambos lados que lo que lo han hecho en el clima pasado, de tal manera que las condiciones medias tengan ese cambio paulatino. En el caso específico de precipitaciones pluviales sobre latitudes como la de México, a pesar de que se prevén láminas anuales menores a las actuales, también se prevé que dicha lámina estará concentrada en un menor número de tormentas al año que las que actualmente ocurren. Esto, por supuesto, implica también una mayor probabilidad de inundaciones que las que ocurren actualmente. Todo esto en términos cualitativos, la parte cuantitativa permanece como una incógnita.

También se proyectan condiciones de sequía más frecuentes (el extremo opuesto al de inundaciones), ondas de calor de mayor duración y de mayor intensidad y la posibilidad de que los huracanes de mayor intensidad (los de categoría IV y V en la escala Saffir-Simpson) aumenten con respecto al número actual (aún cuando el número total de ciclones tropicales pudiera sufrir un leve decremento). Dado que la capacidad destructiva de los ciclones tropicales está fuertemente sesgada hacia los de mayor intensidad, la proyección de incremento en la capacidad de producción de daños por ciclones tropicales es significativa algunos autores proponiendo valores de 1 orden de 30% mayores a la actual. El mayor contenido de vapor de agua en la atmósfera que el actual, hace posible que todos los fenómenos productores de lluvia (por ejemplo convección espontánea por calentamiento del suelo, frentes fríos, forzamiento orográfico, circulaciones monzónicas, brisas de mar y tierra, etc.) pudieran producir mayores precipitaciones pluviales que las típicas en la actualidad. En este sentido, lo que el IPCC estima es que tendremos que adaptarnos a clima que, sí, tiene incrementos o decrementos paulatinos en sus condiciones medias, pero que permanecerá más tiempo en los extremos que lo que lo

hace actualmente. Esta necesidad de adaptarse a condiciones extremas, pero opuestas, hace el proceso de toma de decisiones al respecto todavía más difícil.

EL ABANICO DE POSIBILIDADES DE ACCIÓN

Exploremos las posibilidades de acciones específicas para adaptarse a un clima con tormentas severas más intensas y/o más frecuentes, que naturalmente tendrán mayor probabilidad de producir inundaciones destructivas en zonas pobladas. Supongamos que en las condiciones actuales el cauce del río junto con las posibles obras de protección contra inundaciones actuales puedan manejar los caudales con un período de retorno de 25 años sin generar peligro para la población. Aquí es necesario establecer que el período de retorno de diseño de dichas obras (25 años) se calculó, en su momento, con un clima de tormentas severas y de inundaciones basado en el registro histórico de las precipitaciones y/o de los caudales, bajo la hipótesis de que dicho clima permanecería constante. Por supuesto, a este período de retorno, se le asocia un caudal en el río, conocido con bastante certidumbre. Bajo condiciones de cambio climático global se esperaría que la distribución de probabilidad de los caudales sobre el río se deslizará hacia los mayores valores, produciendo que el caudal de diseño se rebase estadísticamente con mayor frecuencia que una vez cada 25 años. Pero bajo el nivel de certidumbre de las proyecciones actuales, no podemos establecer ni cuál será el nuevo caudal correspondiente al período de retorno de 25 años, ni como irá evolucionando de ahora al final del siglo XXI.

La intuición natural de la sociedad será el incrementar las obras de protección (por ejemplo los bordos de protección marginales al cauce del río), digamos a los valores capaces de manejar un caudal que la muestra histórica mostraba tendría un período de retorno mayor a 25 años, digamos como ejemplo ilustrativo 50 años. Esto con el ánimo de mantener el nivel de seguridad de la población al mismo nivel que el actual, es decir que estadísticamente la población sufriera daños por inundación solamente en promedio una sola vez cada 25 años. Aquí la hipótesis de trabajo es que las nuevas condiciones del clima generarían caudales en el río cada 25 años que con la muestra histórica original hubiesen sido calculados como con período de retorno de 50 años (recuerde que la relación entre caudales y período de retorno es altamente no lineal, duplicar el período de

La importancia de la hidrometeorología en el entorno económico-social

retorno de ninguna manera significa solo duplicar el caudal correspondiente). ¿Conoce el lector algún lugar en el mundo, no importando qué tan desarrollado esté, que cuente con los datos y proyecciones climáticas del futuro como para poder definir, aunque sea de forma aproximada, el caudal que corresponderá al periodo de retorno de 25 años, 10, 20, 50, 75 y 100 años a futuro? Probablemente ¡NO!

La inversión para incrementar las dimensiones de los bordos marginales, ciertamente, sería muy significativa y en muchos aspectos no sería una medida robusta (es decir, una que se comportara bien aún bajo condiciones que rebasan a las condiciones de diseño, una que fallara benévolamente al ser rebasada, una que no incrementa el peligro sobre la población al rebasarse estas condiciones de diseño). El clima, incluyendo las distribuciones de probabilidad de las tormentas severas y de los caudales que producen, iría cambiando suavemente de las condiciones actuales a las condiciones finales del siglo XXI. Pero, ¿cuánto tiempo tendríamos para finalizar la totalidad de las obras requeridas para lograr el propósito que se manifiesta en el párrafo anterior?, ¿sería tan urgente como tener que terminar en los próximos 10 años o podríamos extender las obras a lo largo de los próximos 90 años? Lo que es seguro es que las decisiones para amarrar el esquema de financiamiento tendrían que ser inmediatas. ¿Conoce el lector a alguna institución financiera que estuviera dispuesta a crear dicho esquema bajo las condiciones de incertidumbre que se tiene al respecto? Probablemente ¡NO!

Lo anterior, aún sin tomar en cuenta que, los mismos *tomadores de decisiones* pertinentes para el incremento en la altura y robustez de los bordos marginales a lo largo del río arriba descritos, estarían sujetos simultáneamente a presiones para tomar medidas de adaptación al cambio climático para una mayor escasez promedio de agua y para afrontar exitosamente sequías más prolongadas que las características del pasado. ¿A qué dedicará dicho tomador de decisiones los recursos, de seguro limitados, que tendrían disponibles para adaptación a cambio climático? Es más probable que los dedique a adaptación a las condiciones medias del clima que a la atención del previsto incremento en las condiciones extremas, esto tanto porque son más fáciles de comprender para él (y de explicar a la sociedad), como porque su proyección tiene mayor certidumbre.

Si la medida estructural de proteger a la población, incrementando las dimensiones de los bordos marginales, contra inundaciones producidas por caudales más altos sobre el cauce, es difícil de tomar, porque es costosa, porque no es robusta, porque se tiene gran incertidumbre sobre las dimensiones necesarias, porque se tiene gran incertidumbre sobre el tiempo disponible para implementarla, etc., ¿existe otra medida racional que le permita a la población reducir el riesgo adicional que el clima futuro le traerá?

Pues una de las medidas de adaptación más razonables para dicha población sería la de implementar un Sistema de Alerta Temprana contra inundaciones, uno que le notificara a dicha población sobre condiciones inminentes de desbordamiento del cauce con suficiente oportunidad para permitir tomar acciones que saquen a la población en peligro de la franja crítica y que minimicen los daños a bienes muebles en la zona. Por un lado es altamente probable que su costo de implementación y de operación sea órdenes de magnitud menor al de la medida estructural de incrementar los bordos marginales. Es robusta en términos de no incrementar el peligro sobre la población en caso de su falla o funcionamiento no óptimo. Por otro lado es útil para muchas diversas magnitudes de eventos de inundación, es decir su efectividad no depende de un caudal de diseño específico. Más aún, sus parámetros de alertamiento pueden irse modificando a lo largo del tiempo, ajustándose a las condiciones climáticas (y de mantenimiento de los bordos marginales ya existentes, de la cuenca, de invasión o estrangulamiento del cauce, de posibles nuevas obras aguas arriba de la población, etc., etc.). Si este SAT permite, además, alertar a la población sobre otros peligros, ya sean éstos producto o estén modificados por el CCG o no, qué mejor. Estos podrían incluir, inclusive, disponibilidad a corto plazo de agua para la población, establecimiento probable de una condición de sequía, etc.

LOS SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA

De acuerdo a los criterios de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011) los Sistemas de Alerta Temprana deben tener necesariamente los siguientes cuatro elementos:

- 1) La capacidad de detectar, monitorear y pronosticar la amenaza
- 2) Análisis previo del riesgo asociado con la amenaza sobre la que se alerta
- 3) La comunicación oportuna de una alerta oficial al respecto de la amenaza inminente
- 4) La implementación del plan de acción predeterminado para la magnitud y tiempo de arribo de la amenaza

En meteorología, hidrología y climatología operativas tendemos a pensar que el SAT completo es únicamente el componente en el inciso (1), quizá en algunos casos adheridos del componente en el inciso (3). En la visión de la OMM, esto no es suficiente. Un peligro detectado, monitoreado y hasta pronosticado, si no es comunicado oportunamente a todos los involucrados, no constituye por sí mismo un SAT. Aun cuando sea comunicado a todos los involucrados, si los mismos no conocen que pasos específicos deben tomar para enfrentar la emergencia, no se trata de un verdadero SAT. El sistema es uno completo que va "*de principio a fin*" (en inglés denominado "*end to end*").

Tendemos a pensar en un SAT como un sistema, exclusivamente en tiempo real, pero una gran parte del trabajo no se realiza en tiempo real, sino con mucha anticipación al arribo de la amenaza. El análisis de riesgo del inciso (2) resulta esencial para poder colocar a la amenaza presente en contexto, para poder decidir qué tanta afectación negativa ofrece a la población. Y es importante la consideración de "*análisis de riesgo*" vs "*análisis de peligro*". El peligro es solamente una de las componentes del riesgo. Un "*análisis de riesgo*" debe incluir a las otras dos componentes: la vulnerabilidad y la exposición. Una red de medición capaz de medir una cierta amenaza (por ejemplo lluvias muy fuertes en la cuenca aguas arriba del punto de interés) y un sistema de procesamiento que permita pronosticar el peligro (por ejemplo un *modelo lluvia-escurrimiento* en la cuenca) no constituye un verdadero SAT, si no cuenta con este marco de referencia para ubicar la amenaza presente en el contexto histórico de este tipo de peligro y en el contexto de la vulnerabilidad y exposición al mismo. El plan de acción requerido en el inciso (4) es también un trabajo previo a que se presente el peligro, solo su ejecución es una tarea de tiempo real. Inclusive los incisos (1) y (3) implican mucho trabajo que no es de tiempo real, desde la instalación de los equipos, hasta su

mantenimiento y pruebas continuas. Un número importante de fallas en SAT's en México se han dado precisamente por el hecho de que este trabajo rutinario y continuo no se realiza en forma consistente, siendo la manifestación del peligro (no alertado) la primera noticia de que el sistema de detección, monitoreo, pronóstico o comunicación no funciona como estaba diseñado.

Observe que será muy común que un SAT sea una responsabilidad multi-institucional, pues es rara la organización que tiene como sus responsabilidades la totalidad del trabajo "*de principio a fin*". Es también muy probable que las instituciones involucradas pertenezcan a diferentes niveles de gobierno, federal, estatal, municipal o comunitario. En el contexto que nos ocupa, es frecuente que en un SAT estén involucradas diferentes partes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), tanto a nivel central como de sus oficinas regionales y estatales, así como alguno de los niveles de Protección Civil, federal y/o estatal y/o municipal. Bajo esta realidad, mantener a un SAT funcionando a lo largo de un largo intervalo (su vida útil o más) no es trivial. Todo tipo de personal de las instituciones participantes va cambiando en el tiempo y mantenerlos a todos conscientes de sus responsabilidades y bien coordinados es una tarea difícil. Otro punto importante en términos de los SAT's multi-institucionales es el mantener a todas las instituciones informadas y conscientes del SAT completo "*de principio a fin*" y de las consecuencias de su participación en el SAT, no solamente en su eslabón de la cadena, sino en el resultado final. Es común que algunas instituciones se visualicen a sí mismas como "*informando en un solo sentido*", es decir reciben datos, procesan los mismos y alertan a la siguiente institución responsable en la cadena. Los SAT's funcionan mejor cuando la información es "*en ambos sentidos*". Por ejemplo CONAGUA informa a Protección Civil sobre las amenazas hidrometeorológicas, pero Protección Civil informa a CONAGUA sobre las vulnerabilidades y exposiciones (y como van cambiando en el tiempo). Esta comunicación bidireccional no ocurre en forma automática, debe estar *alambrada* en el diseño del SAT.

Observe que de acuerdo a estos componentes, los SAT's no están restringidos a fenómenos cuyos peligros se pueden detectar solo con minutos (p.ej. inundaciones repentinas), horas (p.ej. inundaciones en cuencas medianas) o días (p.ej. ciclones tropicales) de anticipación. En la descripción dada caben SAT's orientados a establecimiento de condiciones de sequía, manifestación de condiciones de El Niño, establecimiento de condiciones invernales muy frías, etc., etc. Por supuesto, el tiempo de respuesta de un SAT está íntimamente ligado con la anticipación con la que la amenaza se puede detectar y por lo tanto con el tiempo disponible para tomar las acciones necesarias. Un SAT diseñado para alertar sobre probables condiciones de El Niño, no requiere responder en minutos u horas, sino en días o semanas. Un SAT diseñado para inundaciones repentinas sí debe responder muy ágilmente.

Tampoco es necesario que los equipos y procesamientos necesarios sean para uso exclusivo del SAT. Muchas componentes de las redes de medición pueden ser utilizadas con múltiples propósitos. Más aún, la tendencia actual (incluyendo en ello a la propia OMM) es que los SAT's pueden volverse más efectivos si están diseñados para "multi-amenazas", es decir si sus componentes (todos o solamente los pertinentes a cada tipo de amenaza) son compartidos. Una de las ventajas de los SAT's multi-amenaza es que su operación se verifica frecuentemente con los fenómenos más comunes, lo que aumenta su fiabilidad ante fenómenos distintos con muy altos periodos de recurrencia. Por ejemplo, las boyas instrumentadas para el caso de tsunamis (que miden el desplazamiento de la superficie libre con sensores de presión en el fondo del mar, pero los transmiten satelitalmente a través de una boya en la superficie), pueden ser utilizadas con ventaja para el caso de ciclones tropicales, no solamente para marea de tormenta, sino inclusive para otros de sus efectos destructivos si las mismas boyas contienen sensores meteorológicos y de oleaje. En este ejemplo, los sistemas de telecomunicaciones satelitales estarían siendo probados en casos reales con mucho mayor frecuencia por el paso de ciclones tropicales que por el paso de tsunamis.

Lo mismo es cierto en el caso de SAT's diseñados para fenómenos con escalas que afectan a más de una comunidad, municipio, etc. Pueden presentarse economías de escala si los sistemas involucrados sirven a más de una comunidad, municipio, país, etc.

Por ejemplo, si tenemos dos poblaciones sobre el mismo río, "A" aguas arriba, y "B" aguas abajo, no resultaría muy inteligente que la red de pluviógrafos en la cuenca correspondiente a "A" no fueran parte también de un SAT diseñado para inundaciones en "B", ya que la cuenca de "A" es también parte de la cuenca de "B". Tampoco sería muy eficiente que países individuales en el Caribe intentaran construir SAT's puramente nacionales para fenómenos cuya escala rebasa por mucho la extensión de cada uno de los países (p.ej. tsunamis, ciclones tropicales, etc.).

Una de las formas de aumentar la fiabilidad de un SAT es a través de la redundancia, por ejemplo, no depender de un solo punto de medición o de un solo tipo de medidor, no depender de un solo sistema de comunicación de la alerta, etc. Un SAT contra inundaciones sería más fiable si no dependiera exclusivamente de mediciones de nivel en el cauce aguas arriba, y si no dependiera exclusivamente de mediciones aisladas de lluvia en la cuenca. Sería más fiable si la alerta se comunica a más de un solo punto en la población que será afectada. Por supuesto, en sistemas redundantes, se hace extremadamente importante que la información y la alerta sean congruentes en todos los casos. Estudios de psicología de desastres muestran que, lo primero que un alertado hace al recibir la alerta, es buscar confirmación de la misma. Actúa al respecto si obtiene confirmación, tiende a no actuar (o a seguir buscando confirmación) cuando no la obtiene.

Finalmente, los SAT's deben tener embebido en su diseño, el hecho de que la mayor parte de la información en la que se basa tiene cierto grado de incertidumbre y que por lo tanto, un alertamiento, ni será 100% certero en la magnitud del evento ni tiempo de arribo de las condiciones peligrosas y que en el extremo puede resultar en un cierto número de falsas alarmas. Los operadores y usuarios del SAT deben estar conscientes de esta posibilidad y comunicarla con claridad. Los SAT's están fundamentados en el hecho de que es mucho más grave el no alertar sobre un fenómeno destructivo que sí ocurrió, que alertar falsamente sobre un fenómeno que, a la postre, no resultó peligroso. Por supuesto, el balance correcto entre la ocurrencia de uno y otro tipo de error, es una de las partes artísticas del diseño. Una elevada frecuencia de *falsas alarmas* va en detrimento del propio SAT, ya que, a la hora buena, la población pudiera no reaccionar a la alerta emitida de acuerdo al plan.

La importancia de la hidrometeorología en el entorno económico-social

EJEMPLOS DE SISTEMAS DE ALERTAS TEMPRANA

A pesar de no tratarse de un fenómeno de carácter hidrometeorológico, presentamos como prototipo de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) el que actualmente existe para tsunamis en la cuenca del Océano Pacífico, aunque actualmente extendiéndose también al Océano Índico y al Mar Caribe, esto a pesar de que en muchos países (por ejemplo específicamente México) la última de las cuatro componentes presentadas arriba, no está implementada todavía.

La primera componente, la de la *capacidad de detectar, monitorear y pronosticar la amenaza* está implementada a través de diversas redes de medición multinacionales. La primera de ellas es la de la red internacional de sismógrafos que detectan las ondas sísmicas que se propagan a través de la corteza terrestre segundos después de que un sismo ocurre, la segunda de ellas es la red de sensores y boyas instrumentadas orientadas a la detección de tsunamis, las más importantes para México son las colocadas, mantenidas y operadas por el National Weather Service (NWS) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los EUA y que son conocidas con los acrónimos de DART y DART II. Los sensores de presión al pie del anclaje de las boyas, en profundidades de unos 6,000 m, detectan el desplazamiento de las ondas largas del tsunami en la superficie y lo comunican (vía ondas sónicas) a la boya correspondiente en la superficie. Éstas a su vez lo transmiten a diversos centros preestablecidos vía satélites que también opera la NOAA. La red internacional de mareógrafos costeros también transmite sus mediciones a estos centros especializados (el más importante para México ubicado en Hawaii). Al recibir la información de los sismógrafos, en el Centro de Alertamiento del Pacífico contra Tsunamis (PTWC en inglés) se ubica el epicentro del mismo y se estima su intensidad. Se envía una alerta preliminar sobre la posibilidad de un tsunami a los países con costas en la cuenca de interés. Se inicia el cálculo de los tiempos de llegada del posible tsunami a diversos puntos preestablecidos sobre la costa de la cuenca oceánica de interés. Al detectarse el paso del tsunami sobre las boyas DART, se identifica la amplitud de las ondas y en su caso se confirma el alertamiento de la presencia de un tsunami propagándose sobre el océano de interés. Estos alertamientos llegan a los sitios costeros en riesgo con unas horas a minutos de anticipación, de acuerdo a las distancias entre el epicentro y el punto costero de interés.

La componente de *análisis previo del riesgo asociado con la amenaza sobre la que se alerta* se encuentra implementada precisamente en el PTWC en el que, con base en información histórica objetiva y modelación, expertos califican si el sismo pudo haber producido un tsunami. Sin este marco de referencia, no podría juzgarse si el sismo actual representa un peligro por tsunami para la costa de la cuenca oceánica en cuestión.

La componente de la *comunicación oportuna de una alerta oficial al respecto de la amenaza inminente* está implementada en las diversas comunicaciones de datos crudos y procesados que ya se ha descrito, por ejemplo de los sensores de presión en el fondo a las boyas DART y de éstas al satélite y de éstos al PTWC, y además en las comunicaciones preestablecidas del PTWC a las autoridades que cada país haya designado para recibir las alertas de tsunami.

La cuarta componente, la de la *implementación del plan de acción predeterminado para la magnitud y tiempo de arribo de la amenaza* se encuentra implementada en muchas comunidades costeras, por ejemplo en las costas de Alaska, las costas de Hawái, la costa occidental de Canadá y costa occidental de los EUA. La automatización del alertamiento varía de comunidad a comunidad, pero en todos los casos, la población local cuenta con instrucciones precisas sobre cómo será alertado y qué debe hacer con precisión en caso de tsunami. Ésta es la componente que, en realidad, aún no está bien implementada en México. Las autoridades de Protección Civil locales toman diversas acciones dependiendo del caso, pero no está sistematizado en forma general a lo largo de la costa mexicana.

Así pues, vemos en este SAT un alto grado de sofisticación tecnológica, la integración de diversas redes de medición, una coordinación internacional importante, una buena capacidad de pronóstico del peligro (en este caso vía en análisis de propagación del tsunami), el uso de telecomunicaciones adecuadas al fenómeno del que se trata y, en muchos casos, planes específicos de acción bien conocidos por la población. El SAT final tiene el potencial de salvar decenas de miles de vidas humanas en un solo evento crítico.

Otros SAT's más meteorológicos-hidrológicos son aquellos diseñados e implementados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y, en general, operados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en diversas comunidades muy vulnerables (p.ej. Motozintla, Tapachula, Monterrey, Tijuana, etc.). Están basados en redes de sensores de precipitación pluvial y nivel del agua en el arroyo o río, su transmisión inmediata a un Centro Operativo, el cálculo del nivel de riesgo de inundación en dicho Centro y, en su caso, el alertamiento local a las autoridades competentes y a través de ellos a la población en general. Estos SAT's proporcionan alertamientos con un horizonte del orden de unos minutos a algunas horas, dependiendo de las características de la cuenca y de la tormenta en específico. Si a estos SAT's, basados únicamente en detección en tiempo real de los antecesores de un posible desastre por inundación, se les antepone un sistema de pronóstico cuantitativo de la lluvia (por ejemplo con un modelo numérico de área limitada), las autoridades que son alertadas podrían contar con pre-alertamientos sucesivos inclusive varios días en avance de la ocurrencia de la posible tormenta productora del desastre. Contando con estos pre-alertamientos las autoridades correspondientes podrían acelerar de manera significativa la respuesta de la población implementando su plan de acción, cuando el alertamiento final se diera. Hoy en día se trabaja en un sistema de este tipo para muchas cuencas en Chiapas, acoplado modelación numérica, estimación de lluvia en tiempo real vía satélite, monitoreo en tiempo real de lluvia vía radar meteorológico y redes de medición puntuales dentro de las cuencas. Todavía no se puede decir que haya alcanzado el status de un verdadero SAT.

LA METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA OPERATIVAS EN EL CONTEXTO DE SAT'S

De alguna manera, en muchas de las actividades de la meteorología y climatología operativas se encuentran embebidos los principios de los Sistemas de Alerta Temprana. De alguna manera la estructura de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) está asociada a una especie de SAT global sobre fenómenos atmosféricos. 188 diferentes países y territorios miembros de la OMM le aportan datos en tiempo real que se concentran en unos cuantos Centros Mundiales de Pronóstico Numérico y que los utilizan

para proyectar posibles condiciones peligrosas futuras a horizontes que empiezan a alcanzar los 14 días. Los resultados de estos modelos numéricos se redistribuyen a los diferentes países miembros que a su vez los utilizan como guías muy importantes en sus pronósticos oficiales de carácter nacional. En forma similar la red de satélites ambientales operados por unos cuantos países del globo, hacen disponibles sus productos en forma muy amplia y en tiempo real, lo que permite monitorear fenómenos potencialmente peligrosos aun estando éstos lejos todavía de zonas terrestres con mediciones de otro tipo. De alguna manera el propio IPCC, hospedado físicamente en el edificio de la OMM en Ginebra, Suiza, es una especie de SAT orientado a alertar sobre un fenómeno de peligro para la humanidad que se irá cerniendo sobre esta a lo largo de los próximos 100 años.

Cuando pensamos en los servicios meteorológicos y climatológicos usuales, se puede identificar claramente la implementación decreciente de las componentes (1) a (4) de un SAT antes descrita. Las redes de detección y monitoreo son parte intrínseca del sistema, así como las capacidades de procesamiento y de pronóstico. Son el pan de todos los días de los servicios meteorológicos y climatológicos usuales hoy en día. En cuanto a la segunda componente, la de la de análisis de riesgo, es la razón fundamental por la que recopilamos, ordenamos, almacenamos y distribuimos datos meteorológicos, pero muchos de los análisis necesarios ya no se realizan "en casa".

El advenimiento de herramientas como el Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN) con su requerimiento de colocar en contexto histórico y probabilístico el peligro ocurrido recientemente, empiezan a empujar a las instituciones encargadas de estos servicios en la dirección de operar como un SAT formal. Ya para la tercera componente, la de comunicar en forma oportuna a los potenciales afectados la amenaza que sobre ellos se cierne, empieza a haber divergencias contra lo que se diseñaría en un SAT formal. Por un lado, se depende muy fuertemente de los medios masivos de comunicación, que introducen un cierto retraso en la notificación y un cierto grado de interpretación intermedia de la información.

Por otro lado, los encargados de los servicios meteorológicos y climatológicos no siempre cuentan con el detalle geográfico que sería ideal para alertar directamente a los potenciales afectados (y solamente a ellos). Pero en muchos países desarrollados ya

La importancia de la hidrometeorología en el entorno económico-social

empiezan a repararse estas desviaciones de un SAT, utilizando mecanismos de comunicación que, a la vez son directos y que permiten delimitar el alertamiento a la zona que en realidad está en riesgo, además de ser capaces de entregar la alerta con gran oportunidad. Donde las instituciones a cargo de los servicios meteorológicos y climatológicos ya no intervienen de manera preponderante, es en la cuarta de las componentes, la de la elaboración y en su momento la implementación del plan de acción correspondiente para la amenaza en sí y para el nivel de alertamiento recibido. Esto porque, tradicionalmente, la comunicación ha sido unidireccional, de las instituciones que brindan estos servicios a las áreas de protección civil, pero no viceversa. En pocas ocasiones se toma en cuenta en forma objetiva y cuantitativa los aspectos de vulnerabilidad y exposición al transferir unidireccionalmente las alertas hacia los organismos encargados de la implementación de las medidas de protección (por cierto, tampoco en términos de la segunda componente al evaluar el riesgo).

Es la tesis de este trabajo, que debemos cambiar paulatinamente nuestro paradigma, del tradicional del que provienen los servicios meteorológicos y climatológicos, al paradigma de un Sistema de Alerta Temprana, para múltiples amenazas. Que siempre ubiquemos lo que generamos en el contexto de un SAT "*de principio a fin*" asegurándonos de que será útil porque:

- será suficientemente preciso en cuanto a la amenaza,
- será suficientemente oportuno el alertamiento,
- será suficientemente delimitado geográficamente,
- será suficientemente no ambiguo,
- el efecto le llegará a los afectados potenciales por la amenaza y, por qué no,
- los afectados potenciales por la amenaza sabrán que hacer específicamente al recibir el alertamiento.

Esto siempre hubiese sido útil. Pero bajo la amenaza de Cambio Climático Global, son su proyectado efecto sobre los eventos extremos, se hace todavía más atractivo. De hecho se convierte en una de las mejores formas de "*hacer adaptación*" bajo las condiciones de incertidumbre bajo las que tenemos que actuar en el presente.

CONCLUSIONES

Se han discutido y correlacionado entre sí dos conceptos que no se encuentran frecuentemente en el mismo documento: el Cambio Climático Global con énfasis en las proyecciones sobre los eventos extremos y los Sistemas de Alerta Temprana.

Se ha mostrado que invertir en Sistemas de Alerta Temprana es una medida racional de adaptación al cambio climático global en cuanto a eventos extremos. Nos permite protegernos de ellos, sin necesidad de realizar inversiones titánicas en medidas estructurales que pudieran resultar o no resultar eventualmente útiles, esto debido a la fuerte incertidumbre que aún reina en el contexto de los eventos extremos. Se ha mostrado que se trata de una medida *robusta* que funciona bien para diversos rangos de valores que los eventos extremos futuros alcancen (y que no conocemos con precisión actualmente).

Se ha propuesto que es benéfico para una sociedad el estructurar sus servicios meteorológicos y climatológicos bajo el paradigma de un Sistema de Alerta Temprana multiamenza y "de principio a fin".

REFERENCIAS

IPCC, 2007. *Cambio Climático 2007: Informe Síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R. K. y Reisinger, A. (directores de publicación)]. IPCC, Ginebra, Suíza, 104 págs.

Solomon S.D., Qin M., Manning Z., et al. 2007: *Resumen Técnico, Cambio Climático 2007, Base Física de la Ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos, 73 págs.

Parry M.L., Canzini O.F. et al. 2007: *Resumen Técnico, Cambio Climático 2007: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Aportes del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 41 págs.

WMO. 2011. Página web del Programa de Reducción de Riesgos de Desastre de la Organización Meteorológica Mundial: <http://www.wmo.int/pages/prog/drr/>. Citada el 10 de mayo de 2011.