

Alertas tempranas de inundaciones costeras

por Val Swail¹, Sarah Grimes², Paul Pilon², Ray Canterford³, Curtis Barrett⁴ y Yuri Simonov⁵



Las inundaciones costeras ocurren a lo largo de los litorales vulnerables. La combinación de mareas de tempestad –habitualmente asociadas a ciclones tropicales o tempestades extratropicales– y olas, con inundaciones fluviales en distintos estados de la marea, origina frecuentemente grandes pérdidas de vidas. Se estima que en los últimos 200 años murieron ahogadas al menos 2,6 millones de personas debido a inundaciones costeras causadas por mareas de tempestad (Dilley y otros, 2005). A pesar de ello, en la mayoría de los países con costas vulnerables está creciendo en estas el número de asentamientos humanos, y los niveles de desarrollo de la pesca, el turismo y otras infraestructuras. Esto expone a un mayor número de personas al riesgo, lo que ha llevado a una preocupación aún mayor por las inundaciones costeras.

También se están produciendo cambios en las cuencas hidrográficas por la ocupación de llanuras inundables y el uso de la tierra, y las modificaciones de la escorrentía resultantes pueden agravar las mareas de tempestad oceánicas, las olas extremas, etc. Las mareas de tempestad vienen acompañadas a menudo por lluvias intensas, dando lugar al desbordamiento de ríos y empeorando aún más las inundaciones locales. La elevación global del nivel del mar también contribuye a aumentar la vulnerabilidad.

Estos factores ponen de relieve la creciente amenaza de la población, especialmente en las zonas costeras, evidenciando la necesidad de contar con sistemas de alertas de inundaciones costeras que reflejen adecuadamente los distintos peligros y sus interacciones. La Comisión Técnica Mixta OMM/COI (Comisión Oceanográfica Inter-gubernamental de la UNESCO) sobre Oceanografía y Meteorología Marina (CMOMM) y la Comisión de Hidrología de la OMM (CHi) decidieron trabajar juntas para hacer frente a esta amenaza. En 2009 iniciaron el

Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras para hacer frente a los desafíos en materia de seguridad de la población costera y para aumentar la resiliencia mediante la mejora, a nivel nacional y regional, de los sistemas de predicción y avisos de inundaciones costeras.

Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras

Este Proyecto fue único a la hora de facilitar el diseño y el desarrollo de un sistema integral de alerta y avisos de inundaciones costeras causadas por múltiples factores. Se centró en la alerta temprana en zonas costeras y cuencas sometidas a los efectos de ciclones tropicales y mareas de tempestad, a la fuerte acción de oleajes de origen distante, a efectos varios de mareas y a episodios de inundación fluvial.

Esta iniciativa y sus subproyectos se diseñaron para mejorar la seguridad de las comunidades en riesgo, una de las principales prioridades de la OMM. La CMOMM y la CHi, en cooperación con numerosos expertos e instituciones afines, han facilitado principalmente la predicción precisa y oportuna de inundaciones costeras desde el punto de vista del nivel total del agua y su interacción con los entornos fluviales y las comunidades vulnerables. El marco de modelización utilizado se describe en el Plan de Ejecución de este Proyecto (OMM, 2017a), donde se pone de manifiesto la complejidad de reflejar los peligros locales y sus interacciones.

Solo un número limitado de organismos nacionales ejecutan simultáneamente modelos de mareas de tempestad, olas e hidrológicos acoplados a sistemas de predicción costera, y prácticamente ninguno de ellos se encuentra en países en desarrollo. Por tanto, el Proyecto de demostración se diseñó para dar apoyo a los organismos nacionales en el desarrollo y uso de productos de predicción operativa relacionándolos con los programas de gestión de inundaciones costeras y con otras comunidades de usuarios afines, lo que requirió de una amplia formación en el uso de estos productos en diferentes situaciones hidrometeorológicas de riesgo.

El Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras facilitó el desarrollo y la aplicación de servicios de alertas por inundaciones costeras debidas

-
- 1 Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático de Canadá
 - 2 Secretaría de la OMM
 - 3 Experto en peligros naturales, Australia
 - 4 Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
 - 5 Servicio Federal Ruso de Hidrometeorología y Vigilancia del Medio Ambiente (RosHydromet)

a fenómenos hidrológicos y oceanográficos resultantes de episodios hidrometeorológicos intensos. El objetivo era establecer y mantener un sistema de predicción fiable que informara en el proceso de toma de decisiones para la gestión de inundaciones costeras mediante:

- la identificación de las necesidades nacionales y locales, en particular las de los usuarios finales;
- el fomento de la plena participación de todas las partes interesadas;
- la ejecución de sistemas operativos de predicción y aviso de inundación costera de extremo a extremo;
- el desarrollo de la cooperación transversal entre las diferentes disciplinas científicas y las comunidades de usuarios;
- la construcción de plataformas de comunicación entre científicos, predictores y gestores de desastres involucrados en la gestión de inundaciones costeras;
- la transferencia de tecnología a los países participantes;
- la formación especializada de técnicos, predictores y gestores de desastres.

Subproyectos del Proyecto de demostración

Se emprendieron cuatro subproyectos independientes y diferenciados: Bangladesh (finalizado en 2017), Caribe (finalizado en 2018), Indonesia (finalizado en 2019) y Fiji (finalización prevista para finales de 2019). Cada uno de ellos tenía su propio conjunto de mecanismos de forzamiento, lo que, unido a los distintos grados de capacidad y estructuras de gestión de emergencias de cada país, los hacía únicos. El éxito de su aplicación puso de manifiesto que los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) pueden mejorar y coordinar las predicciones y los avisos de inundaciones costeras. Los detalles de la ejecución se describen en los informes finales de los subproyectos (OMM, 2017b, 2018, 2019).

Bangladesh

La costa de Bangladesh está sujeta a grandes mareas de tempestad, desbordamientos de ríos e impactos de mareas. La ancha plataforma continental, la batimetría

poco profunda, la compleja morfología costera y la gran amplitud de las mareas entre las costas oriental y occidental son factores conocidos para la generación de mareas de tempestad altas de gran duración. En promedio, cada año se forman entre cinco y seis ciclones tropicales en esta región.

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) identificó a Bangladesh como el país más vulnerable del mundo a los ciclones tropicales y a las mareas de tempestad asociadas. Además, el país tiene tres grandes sistemas fluviales que lo atraviesan: el Brahmaputra, el Ganges y el Meghna. La combinación del caudal de estos grandes sistemas fluviales con mareas de tempestad, que pueden superar los 10 m de altura sobre el nivel medio del mar, puede dar lugar a inundaciones costeras catastróficas. Por lo tanto, Bangladesh fue seleccionado, con la conformidad de su Servicio Meteorológico Nacional, como el primer subproyecto del Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras en 2009. La financiación fue proporcionada por la Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

Se actualizó el modelo de marea de tempestad del Servicio Meteorológico del Japón (JMA) para incorporar datos de olas y de mareas en la predicción del nivel total de agua estimado. Se parametrizaron los datos hidrológicos e hidrodinámicos de los caudales fluviales para su entrada en el sistema de predicción. La información sobre ciclones se alimentó desde el Centro Meteorológico Regional Especializado, el Centro conjunto de alerta de tifones y el Sistema regional integrado de alerta temprana multirriesgos para África y Asia. Se utilizó el Sistema de alerta temprana de crecidas Delft-FEWS. Los datos de batimetría –fundamentales para el sistema de alerta– provenían de diferentes fuentes, considerándose más idóneos los de la Armada de Bangladesh. Los datos del modelo digital del terreno son fundamentales para la modelización de la inundación costera y en este caso se utilizaron los de la Autoridad Topográfica de Bangladesh. Esto ilustra algunos de los tipos de colaboración necesarios, desde datos hasta modelos, para el establecimiento con éxito de un sistema de predicción de inundaciones costeras.

Antes de decidir el diseño de un sistema de alerta temprana de extremo a extremo basado en los impactos, se consideraron una serie de requisitos de integración y operatividad. Entre ellos figuraba la elección en algunos casos de una modelización simplificada (caso de la modelización de caudales fluviales) con el fin de mantener

el ordenador funcionando un tiempo razonable para el suministro de pronósticos en plazos de entrega que permitieran una respuesta eficaz, con alertas de al menos 12 a 24 horas de antelación. El objetivo no era cambiar procedimientos de gestión de desastres o disposiciones del país, sino mejorar y ayudar en la toma de decisiones para los procedimientos que ya estaban en marcha. Se trataba de proporcionar un sistema que respondiera mejor a las necesidades de Bangladesh y de las partes locales interesadas.

Marea de tempestad (m) producida por el ciclón FANI a lo largo de la costa bangladesí

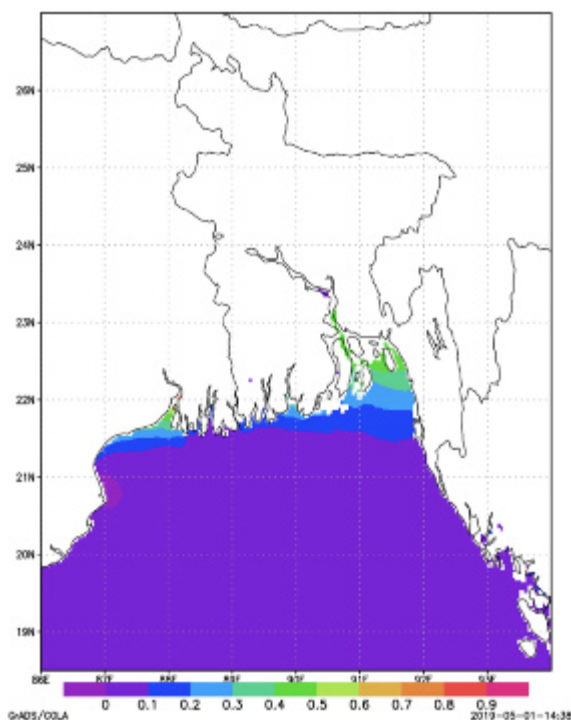


Figura 1. Inundación costera pronosticada durante el ciclón Fani, el 1 de mayo de 2019, utilizando el sistema de predicción de inundaciones costeras desarrollado por el subproyecto bangladesí del Proyecto de demostración. Fuente: Cortesía de Qamral Hassan (Servicio Meteorológico de Bangladesh) y Bapon Fakhruddin (Tonkin Taylor).

Desde que el sistema entró en vigor se ha reducido el número de víctimas (26 en 2016 y 2 en 2017) en comparación con los miles que hubo en los episodios de 1998 y 2007. La mejora de la alerta temprana ha ayudado a la toma de decisiones locales, contribuyendo de este modo al éxito global de Bangladesh en la reducción de riesgos de desastre por inundaciones costeras. Puede que algún episodio futuro devaste el país, pero es muy evidente que este subproyecto del Proyecto de demostración ha

sido un éxito. El sistema ya está siendo utilizado por el Servicio Meteorológico de Bangladesh, con un ejemplo reciente, el del ciclón Fani en mayo de 2019, como se muestra en la figura 1.

Indonesia

En términos de inundación costera, Indonesia es única por la vulnerabilidad de sus comunidades costeras. Un archipiélago con casi 100 000 km de costa sujeta a inundaciones catastróficas causadas por un conjunto de amenazas que actúan individual o simultáneamente: mareas altas, lluvias intensas, desbordamiento de ríos, anomalías en la altura de la superficie del mar y olas oceánicas. Incluso las sutiles variaciones de presión y viento pueden causar olas de 0,5 m, que pueden afectar a las tierras bajas. Otro factor único y que complica las inundaciones costeras en Indonesia es la gran subsidencia en zonas urbanas, a menudo más de 25 cm por año, unida al desarrollo, cada vez mayor, de la zona costera. Estos aspectos pueden aumentar la vulnerabilidad con el tiempo.



Inundación costera en Semarang (Indonesia), interrumpiendo el tráfico e inundando los edificios en la ciudad.

Muchos organismos han colaborado en el establecimiento de un sistema satisfactorio de predicción de inundaciones costeras en Indonesia. El acuerdo del subproyecto indonesio, firmado en 2017, incluía cinco instituciones: el Centro de Meteorología Marítima de la Agencia de Meteorología, Climatología y Geofísica de Indonesia (BMKG), el Centro de Investigación y

Desarrollo de Recursos Hídricos del Ministerio de Puerperas, la Dirección de Utilización Costera y de Pequeñas Islas, el Centro de Control Geodésico y Geodinámico de la Agencia de Información Geoespacial, y la Dirección de Preparación.

Se integraron las salidas de diversos sistemas de predicción costera en el Sistema de alerta temprana de crecidas Delft-FEWS, incluyendo el modelo Delft 3D (hidrodinámico) para mareas de tempestad, el modelo de olas WAVEWATCH III® de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA) de los Estados Unidos de América aplicado por la BMKG para las aguas costeras indonesias, además de otros modelos nacionales e internacionales, incluyendo modelos operativos de predicción de anomalía de la superficie del mar y de marea global de la Oficina de Meteorología de Australia.

Es importante señalar que la BMKG tiene un gran potencial en predicción con personal muy preparado y procedimientos bien establecidos. Esto permitió un mayor avance del sistema así como una mejor sostenibilidad. La principal financiación del proyecto también provino de la BMKG, cuya capacidad y aptitud mejoraron decisivamente con el Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras. El subproyecto se completó en enero de 2019 y en abril del mismo año se puso en marcha un nuevo programa operativo nacional para la predicción de las inundaciones costeras en Indonesia.

Caribe

Cada año, durante la temporada de huracanes, del 1 de junio al 30 de noviembre, los ciclones tropicales representan una amenaza para La Española, una isla que comprende dos países: la República Dominicana y Haití. Desde 1851, más de 150 ciclones tropicales se han situado en un radio de 300 km alrededor de la isla, provocando vientos fuertes, mareas de tempestad altas, grandes olas, lluvias intensas e inundaciones fluviales. Antes del subproyecto caribeño del Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras, la República Dominicana y Haití no disponían de planificación ni preparación para el auxilio en la gestión de emergencias por mareas de tempestad e inundaciones costeras. Esto también ocurre en otros países del Caribe.

En lo que respecta al diseño y ejecución del proyecto, el Centro Meteorológico Regional Especializado de la OMM en ciclones tropicales y el Centro Nacional de Huracanes de la NOAA hicieron las principales contribuciones

técnicas en colaboración con el Grupo de dirección del Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras y otras organizaciones. La USAID proporcionó la financiación. En el Equipo nacional de coordinación había expertos, predictores y gestores de desastres de diversos organismos de la República Dominicana. Se incluyó a Haití en los programas y en varias reuniones para que sus expertos también pudieran hacer un uso informado de los productos para emitir alertas e influir en la respuesta a la emergencia.

El enfoque de modelización costera del subproyecto caribeño del citado Proyecto de demostración fue diferente al utilizado en los subproyectos anteriores. En lugar de ejecutar un modelo completo de marea de tempestad en tiempo real acoplado con un modelo de olas, que consumía mucho tiempo de ordenador, se utilizó el enfoque del Centro Nacional de Huracanes de Miami que puede ejecutarse en un ordenador personal. Esto implicaba obtener salidas para varias categorías de huracanes y las diferentes trayectorias que podrían tocar tierra en La Española, utilizando el modelo de la marea de tempestad asociada con el huracán sobre mar, lago, y tierra (conocido como SLOSH, por sus siglas en inglés). Se ejecutaron con un superordenador todos los escenarios posibles de intensidad, velocidad y dirección de propagación (aproximadamente unos 10 000) y se corrió un modelo de olas superpuesto a la salida del modelo de marea de tempestad para representar el nivel de agua alcanzado por la acción y la elevación de las olas.

Estas ejecuciones del modelo SLOSH crearon un conjunto de envolturas máximas de agua y estimaciones de los niveles máximos de las envolturas. Un elemento crítico fue el uso de un modelo digital del terreno proporcionado por el satélite alemán TanDEM-X, con una rejilla de 12 m de resolución. Se utilizó esta rejilla de alta resolución porque la alternativa era de una resolución mucho peor, inservible para su uso en las ejecuciones de un modelo de marea de tempestad. Los datos de la batimetría eran datos de haz simple utilizados para los modelos de tsunamis.

Las predicciones resultantes están disponibles casi instantáneamente, lo que deja más tiempo para la preparación de avisos y la comunicación con los servicios de emergencias. Este sistema es tan sensible que también permite la actualización de instrucciones y avisos en caso de que cambien los parámetros de la tempestad.

El proyecto de demostración se completó en diciembre de 2018 y ha estado operativo durante la temporada de huracanes del Atlántico en 2019. El trabajo continúa en



Comunidad del Pacífico (SPC), 2011

Inundación de centros turísticos a lo largo de la Costa de Coral de Viti Levu (Fiji), causada por la mar de fondo que se acerca desde el sur.

la fase posterior a la demostración para establecer relaciones entre las predicciones de mareas de tempestad y las de crecida fluvial, estas últimas elaboradas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Este trabajo también considerará el efecto de las predicciones de las mareas de tempestad sobre las condiciones de las crecidas fluviales, las cuales están influenciadas predominantemente por las intensas lluvias que acompañan a las tormentas tropicales.

Fiji

Fiji comprende más de 330 islas del Pacífico de las cuales solo 110 están permanentemente habitadas. Las dos islas principales, Viti Levu y Vanua Levu, representan el 87 % de la población, con casi 850 000 habitantes. Aproximadamente el 75 % de la población de Fiji vive en las costas de Viti Levu.

La localización de Fiji la hace vulnerable a los ciclones tropicales, que originan peligrosas y dañinas mareas de tempestad en zonas costeras significativamente poco

profundas de la plataforma continental, especialmente en la costa noroeste de Viti Levu, donde se encuentran las ciudades de Nadi y Lautoka. La costa sur de esta isla no tiene plataforma continental, ni está sujeta a mareas de tempestad impulsadas por el viento, pero se ve afectada por la mar de fondo de largo recorrido proveniente de zonas tan meridionales como Australia y Nueva Zelanda.

En Fiji, los ciclones tropicales pueden venir acompañados de largos periodos de lluvias intensas, causando inundaciones en forma de crecidas repentinas o desbordamientos fluviales. Cuando se producen desbordamientos fluviales con mareas de tempestad, la inundación resultante puede ser mucho más grave que si estos fenómenos ocurren por separado, lo que subraya la importancia de combinar la modelización fluvial con la de oleaje. Un ejemplo de ello es el caso de Nadi, una ciudad costera que puede experimentar extensas y dañinas inundaciones que dan lugar a la pérdida de vidas.

Este subproyecto del Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras se concentró en la isla

principal, Viti Levu, y en particular en dos zonas con población y actividad económica importantes: la Costa de Coral en el extremo sur de la isla y la costa noroeste cercana a Nadi. Fue financiado por la Agencia Coreana de Cooperación Internacional y la Administración Meteorológica de Corea. La aplicación de Fiji es un sistema de sistemas, con tres componentes distintos:

- a) la costa sur, expuesta a inundaciones causadas por olas de mar de fondo generadas en lugares distantes;
- b) las costas NW y NE, expuestas predominantemente a mareas de tempestad (incluidas las debidas a ciclones tropicales);
- c) el desbordamiento fluvial, en principio concentrado en la cuenca del río Nadi.

Las inundaciones causadas por la mar de fondo que se aproxima desde el sur, en combinación con las mareas altas, pueden dar lugar a inundaciones graves y perjudiciales con repercusiones en la Costa de Coral, donde hay una importante vía de transporte y hoteles turísticos. En lugar de ejecutar en tiempo real un complejo modelo de olas de alta resolución, el sistema de predicción obtiene los resultados de cientos de escenarios posibles de altura, periodo y dirección de la mar de fondo, lo que permite disponer de unos resultados rápidos y utilizar un ordenador personal estándar. Las alertas se emiten con 48 horas de antelación y los avisos se dan con un plazo de 24 horas. La fase preoperativa ha generado con éxito alertas tempranas precisas para algunos episodios importantes en la costa sur.

Para abordar las mareas de tempestad en las pendientes costeras del NW y NE de Viti Levu, el JMA aplica un modelo de marea de tempestad que se concentra particularmente en esta isla pero que abarca también al resto de las islas Fiji. Este modelo está en pruebas desde 2018 y se espera que esté plenamente operativo para la temporada de ciclones de 2019-2020.

El río Nadi puede desbordarse con relativa rapidez, en 2 a 4 horas, después de las lluvias intensas que pueden acompañar a ciclones y tormentas tropicales. Para contribuir a resolver la necesidad de alertas tempranas por inundaciones fluviales, el subproyecto ha incorporado un sistema de alerta de inundación de llanuras inundables del Nadi. Para proporcionar orientación a los predictores, el sistema utiliza una lógica de decisión en árbol basada en conocimientos expertos, con datos observados y previstos de lluvia, niveles de

mareas de tempestad y condiciones hidrológicas río arriba. Esto permite la emisión de alertas y avisos de posibles inundaciones en un entorno complicado de oleaje fluvial.

Todos los componentes del Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras para Fiji se han aplicado en modo preoperativo. Se preveía que la fase de demostración, incluida la transferencia a la plena capacidad operativa, se completara a finales de 2019.

Proyectos recientes

La OMM encargó una revisión independiente del Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras (Barrett y Canterford, 2018) que proporcionara una evaluación exhaustiva del innovador concepto de los proyectos de demostración con conclusiones y recomendaciones. La revisión confirmó que los subproyectos demostraron con éxito la capacidad de realizar predicciones y avisos basados en impactos para inundaciones costeras cuando hay complejas combinaciones de mecanismos de forzamiento. También se concluyó que se obtendrían beneficios extendiendo y mejorando los planteamientos de estos Proyectos de demostración a otros países en desarrollo vulnerables.

Por ejemplo, el subproyecto de Fiji ha ofrecido un modelo excelente para su aplicación a otros entornos de islas pequeñas en el Pacífico Sur, mientras que el caso de La Española se puede adaptar fácilmente a otras islas del Caribe. La aplicación de Bangladesh podría extenderse a otros países en torno al golfo de Bengala, y el estudio de Indonesia, que se centró en las ciudades de Yakarta y Semarang, podría aplicarse en otros lugares de Indonesia o en los países vecinos.

La Decimotava Reunión del Congreso Meteorológico Mundial aprobó las principales conclusiones y recomendaciones de la revisión y eliminó la designación de "demostración" para crear un nuevo programa: Iniciativa de Predicción de Inundaciones Costeras. Esta Iniciativa se ajusta al concepto de Sistema de Alerta Temprana Multirriesgos (MHEWS) impulsado en el Marco de Sendái para la Reducción del Riesgo de Desastres. Por tanto, se buscarán sinergias cuando sea posible, incluso con procesos de alerta temprana de tsunamis.

La conclusión con éxito del Proyecto de demostración de predicción de inundaciones costeras ha puesto de manifiesto el valor de diseñar sistemas de alerta

temprana con flexibilidad para representar la inundación de diferentes orígenes. Durante la última década, la dedicación de los Miembros trabajando con sus socios en los países participantes así como de la CMOMM, la CHI y muchos otros expertos, ha demostrado el valor de un sistema innovador de alerta temprana y de la colaboración interdisciplinaria a escala internacional por el bien mayor de la seguridad pública.

Referencias

Barrett, C. y R. Canterford, 2018. Assessment Report, Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project (CIFDP). Geneva, World Meteorological Organization.

Dilley, M., R. S. Chen, U. Deichmann, A. L. Lerner-Lam, M. Arnold, J. Agwe, P. Buys, O. Kjevstad, B. Lyon y G. Yetman, 2005. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. *Disaster Risk Management Series*, No. 5. Washington, DC, World Bank.

Organización Meteorológica Mundial (OMM) / World Meteorological Organization (WMO), 2017a. Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project Implementation Plan. Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology Technical Report No. 64. Geneva.

—, 2017b. Final Report of the Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project (CIFDP) for Bangladesh. Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology Technical Report No. 95. Geneva.

—, 2018. Final Report of the Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project (CIFDP) for Caribbean. Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology Technical Report No. 96. Geneva.

—, 2019. Final Report of the Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project (CIFDP) for Indonesia. Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology Technical Report No. 97. Geneva.