

Tendencias climáticas de las inundaciones costeras severas en áreas de Cuba

Ida Mitrani-Arenal*, Oscar O. Díaz-Rodríguez, Alejandro Vichot-Llamo, Ivette Hernández-Baños, Axel Hidalgo-Mayo, Evelio García-Valdés y José Alejandro Rodríguez-Zas

Instituto de Meteorología., Regla, La Habana, Cuba, E-mail: ida.mitrani@insmet.cu

Recibido: abril 26, 2012	Aceptado: mayo 28, 2012
--------------------------	-------------------------

RESUMEN

Se presenta un análisis del comportamiento de las inundaciones costeras y sus posibles tendencias climáticas en tres áreas del perímetro costero cubano, a partir de datos de archivo del Instituto de Meteorología, del Instituto de Planificación Física y de testimonios de diversas procedencias. Se describen los eventos meteorológicos que generan estas inundaciones en territorio cubano. Se muestran las tendencias de la temperatura superficial y del máximo de salinidad al final del Siglo XX, favorables al aumento del poder destructivo de los ciclones tropicales, determinadas con información procedente de expediciones oceanográficas realizadas en aguas cubanas. Se identifican las zonas más sensibles al cambio climático previsto, tanto por las propiedades de la estructura termohalina como por el comportamiento de las inundaciones costeras.

Palabras clave: Inundaciones costeras, estructura termohalina, huracanes

The climate tendencies of the hardest coastal flooding on Cuban areas

ABSTRACT

An analysis of the coastal flooding behavior and its possible climate trends in three areas of Cuban coastal perimeter is presented, using data archive information from the Institute of Meteorology, the Institute of Physical Planning and some testimonies from different sources. The weather events that have generated these floods in Cuban territory are described. The surface temperature and salinity maximum trends at the end of the XX Century, favorable to increase the tropical cyclone power, were determined using oceanographic expedition data, obtained in deep waters around Cuba. The most sensitive areas to expected climate changes were identified, both by the properties of the thermohaline structure as the coastal flooding behavior.

Key words: coastal flooding, thermohaline structure, extremal events

1. Introducción

En respuesta a la preocupación estatal acerca de las afectaciones que pudieran ocasionar las inundaciones costeras en Cuba en el futuro, especialistas cubanos se han referido a la identificación de las zonas más afectadas por estos fenómenos y cuáles serían las más sensibles al cambio climático previsto. Los principales resultados aparecen en las publicaciones de PNUD (1998), Mitrani et al. (2001), Mitrani y Díaz (2008) e Hidalgo (2011).

Las zonas costeras serían las más afectadas por el cambio climático global, en especial las pequeñas islas, que incluyen buena parte de los ecosistemas más productivos de la tierra y proveen más del 90 % de los recursos pesqueros capturados mundialmente. Los ecosistemas naturales que protegen las costas han sido generalmente degradados por la acción del hombre, ocasionando la pérdida de las arenas de las playas, la tala de los manglares y el deterioro o destrucción de los arrecifes coralinos, entre otros. Ya desde la década de los 90 del Siglo XX, se

apuntaba que la combinación del ascenso global del nivel del mar (1-2 mm./año) y las actividades humanas, han provocado la retirada de la línea de costa en numerosas regiones del mundo, en los últimos 500 años (IGBP, 1993). Las más recientes evaluaciones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2007), indican un aumento del nivel del mar entre 15 y 65 cm. para el año 2100, de continuar aumentando la temperatura planetaria por incremento en la concentración de los gases de invernadero.

Cuba se encuentra entre las naciones que más se afectarían por el incremento del nivel del mar, tomando en cuenta su condición insular, su configuración físico- geográfica y la existencia de zonas bajas en gran parte de su perim costero. Estudios recientes indican una tendencia lineal de crecimiento del nivel del mar entre 0 y 0,214 cm/año en las costas cubanas (Hernández et al. 2010), valores que son cercanos al escenario mínimo de IPCC (2007), pero no deben descartarse los cambios desfavorables que generaría la ocurrencia del peor escenario.

Teniendo presente las ideas antes expuestas, en el presente texto se pretende exponer algunas particularidades del comportamiento de las inundaciones costeras en tres áreas del perim costero cubano y de los eventos meteorológicos que las generan, con énfasis en los casos de gran severidad, así como las características de la estructura termohalina que contribuyen al incremento del peligro que ofrecen esos fenómenos. Los resultados obtenidos, pueden ser de utilidad para la elaboración de planes de contingencia a largo plazo y para la adecuada planificación de acciones de manejo integrado en las costas.

Se incluye un breve análisis acerca de algunas características de la estructura termohalina y posibles tendencias en aguas aledañas al Archipiélago Cubano, que pueden favorecer a la intensificación de los sistemas meteorológicos que generan inundaciones costeras en el área de estudio.

2. Materiales y métodos

Según se muestra en la Fig. 1, la región de interés es el Archipiélago Cubano, con énfasis en tres áreas, señaladas en rojo: el Malecón Habanero, las costas del Golfo de Batabanó y el tramo Gibara-Guardalavaca. Se muestra además, por medio de puntos, la localización de las estaciones oceanográficas cuya información fue utilizada para el análisis de los parámetros principales de la estructura termohalina.

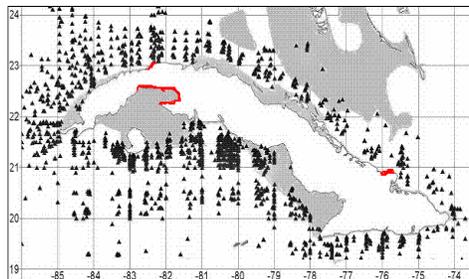


Fig. 1: Áreas de interés, señaladas en rojo, y distribución de las estaciones realizadas por 53 cruceros, en 1966-2000.

En el informe del PNUD (1998) aparecen identificados los patrones de circulación atmosférica que generan inundaciones costeras en Cuba. En el presente texto, los autores consideraron oportuno incluir, a modo de ilustración, algunos ejemplos de eventos notables ocurridos en los últimos 30 años. Para ello, se utilizaron imágenes de los archivos de reanálisis de la National Oceanographic and Atmospheric Administration, disponibles libremente en sus páginas NOAA-NOMAD (2012). Las descripciones de los huracanes tomados como ejemplo, provienen del sitio web del National Hurricane Center y de los Resúmenes de Temporada elaborados en el Instituto de Meteorología y conservados como material de archivo.

Para el análisis de las series de eventos meteorológicos peligrosos, que generan sobreelevación del nivel del mar con inundaciones costeras, se utilizó la información de archivo del Instituto de Meteorología, así como algunos testimonios recogidos por compañeros del Instituto de Planificación Física que aparecen en trabajos realizados anteriormente por (Mitrani et al. 2001, Hernández y García 2011), con inclusión de la búsqueda realizada por Hidalgo (2010). Todos los testimonios recogidos por encuestas populares, prensa escrita, tradiciones etc., fueron cuidadosamente cotejados por los autores con los datos de los archivos del INSMET. Después de analizar todos los

testimonios de inundaciones, hubo que desechar los casos de inundaciones débiles, porque la información no es confiable en períodos anteriores a 1965, año de la fundación del Instituto de Meteorología.

De los tramos costeros del Malecón Habanero y Gibara-Guardalavaca, se incluyeron para el análisis todas las inundaciones que pudieron ser clasificadas como moderadas y fuertes en los períodos 1901-2011 y 1950-2011; de las costas del Golfo de Batabanó, solo se analizaron las fuertes, registradas en el período 1911-2011. Por primera vez se logró recopilar series de más de 100 años para las provincias occidentales; con respecto a la del tramo Gibara-Guardalavaca, no existe ningún antecedente anterior a Hidalgo (2010), co-autor del presente trabajo.

En el Centro de Meteorología Marina (CMM) del INSMET, se utiliza una clasificación de las inundaciones en dependencia de la altura de ola (PNUD, 1998). Esto es muy conveniente para el área del Malecón Habanero, cuya forma acantilada es favorable a las inundaciones por rompiente de oleaje pero en opinión de los autores del presente texto no es un criterio muy conveniente en otras áreas donde la plataforma insular ancha y los fondos bajos favorecen el predominio de otros tipos de sobre elevación del nivel del mar (surgencia, arrastre del viento). En el caso particular del Malecón Habanero, la clasificación específica además el alcance horizontal por la calle Línea del Vedado (Juantorena et al., 2000), de manera que las inundaciones severas son las generadas por olas con más de 5 m de altura significativa y se extienden hasta la calle Línea por G, las moderadas, con alturas de ola significativa entre 4 y 5 m llegan hasta la calle Calzada y las ligeras, con olas de menos de 4 m, hasta la calle 3ra. En la revisión de los testimonios acerca de los eventos registrados en la cronología utilizada en el presente texto, fue posible apreciar que los causantes de las inundaciones fuertes, ocasionaron en algunos puntos de las costas habaneras alturas del nivel de las aguas en el entorno de 2 m o más, mientras que los correspondientes a inundaciones moderadas, suelen provocar inundaciones con alcance vertical ente 1 y 2 m. En el área del Malecón Habanero, esto se ha observado en la calle 3ra del Vedado.

Por otra parte, existen los criterios de peligro establecidos por especialistas del INSMET y del IPF para cada tipo de evento que genera la inundación, que incluyen los diversos niveles de severidad, la forma de la configuración costera y la posible sobre elevación del nivel del mar, determinada mediante simulación numérica con respecto a la cota topográfica de 0,5 m sobre el nivel medio del mar, según se refiere en PNUD (1998) y Mitrani et al. (2008). Partiendo de las ideas planteadas en estos trabajos, a favor de la dimensión vertical de la inundación como criterio de severidad, los autores del presente texto consideraron razonable la clasificación de las inundaciones en las otras dos áreas de estudio, acorde con los alcances verticales de las aguas descritos en los testimonios recopilados y también con los resultados obtenidos con los modelos, por los especialistas participantes en los proyectos PNUD (1998) y Mitrani et al. (2008).

Con la finalidad de establecer un criterio lo más homogéneo posible, en el presente trabajo se consideraron como inundaciones fuertes a las que presentaron un alcance vertical en algunos puntos de la zona costera, igual o por encima de los dos m y moderadas, a las que alcanzaron entre uno y dos m, de manera que el conjunto de inundaciones severas se corresponde con todos los casos en que el alcance vertical fue mayor de 1 m, según obra en la documentación de archivo del CMM/INSMET. Es válido aclarar que en Cuba no se cuenta con instrumental de medición en las áreas que sufren las peores inundaciones del perim costero cubano, por lo cual en el servicio meteorológico cubano tradicionalmente se ha estimado el valor de el alcance vertical por la marca de agua en obstáculos cercanos a la línea costera, conservada en el lado contrario a la dirección del desplazamiento de la masa de agua (Comunicación personal del Lic. Reynaldo Casals Taylor, Investigador Agregado del INSMET). No es un método muy exacto, pero permite tener una idea aproximada de la severidad de la inundación en cada caso.

Los datos oceanográficos para ilustrar el curso anual de la temperatura superficial en aguas profundas y del máximo de salinidad, así como su distribución espacial, fueron tomados de las series HIDROMET y GEOCUBA¹, descritas por Mitrani y Díaz (2004, 2008) y Mitrani et al. (2008).

El área de estudio se localiza entre los 87° y 73°W y entre los 25° y 18°N (**Fig. 1**). Se recopilaron los datos hidrometeorológicos procedentes de al menos 54 cruceros realizados en los mares cercanos a Cuba desde 1966 hasta el 2000, por especialistas del Centro de Investigaciones Pesqueras (CIP), del Instituto de Oceanología (IDO), del

¹ La base de datos HIDROMET fue elaborada en 1994 por los especialistas del Instituto de Meteorología Isidro Salas García, Jesús Dole Chávez e Ida Mitrani Arenal, y por Benigno Hernández de la Torre, del Centro de Investigaciones Pesqueras. Los datos de GEOCUBA fueron recopilados por la MSc. Jarmila de la Empresa GEOCUBA en el 2005, mientras que la revisión y elaboración en el 2006 estuvo a cargo de la Dra. Ida Mitrani Arenal, el MSc. Oscar Onoe Díaz Rodríguez y el Lic. Israel Borrajero Montejo, especialistas del Centro de Física de la Atmósfera del INSMET.

Instituto de Meteorología (INSMET) y de la Empresa GEOCUBA, a distancias de hasta 200 Km. de la línea costera, en ocasiones con la colaboración de especialistas de la ex URSS, incluyéndose además los resultados de la expedición Yuca II a bordo del buque mexicano "Justo Sierra". Se realizaron 7614 estaciones; las observaciones incluyen datos de temperatura y salinidad en los niveles estándar. Para el presente trabajo, se utilizaron las observaciones desde superficie hasta entre 300 m de profundidad. En las **Tab. I** (ver pág. 84) y **II** se listan los barcos, las fechas y las coordenadas de comienzo y final. En la **Tab. III**, se aprecia que la precisión en las mediciones de temperatura del agua, coincide en todos los casos hasta la primera cifra decimal y con respecto a la salinidad, hasta la segunda, por lo que la muestra puede considerarse uniforme para los órdenes de magnitud de 10^{-1} y 10^{-2} respectivamente.

Tabla II: Cruceros de la base de datos HIDROMET. En la cuarta columna, la primera latitud y la primera longitud se refieren a al punto de comienzo, mientras que la segunda latitud y la segunda longitud se refieren al punto de terminación de las observaciones

#	Buque	Inicio	Terminación	ZONA GEOGRÁFICA
1	BIZIR	30-06-86	7-07-86	21.23-21.00°N; 84.93-85.33°W
2	BIZIR	16-08-86	31-08-86	20.56-21.00°N; 79.00-80.50°W
3	BIZIR	16-07-86	25-07-86	21.62 °N; 85.68°W
4	BIZIR	31-08-86	8-09-86	21.00°N, 80.5°W
5	MALTSEVO	30-10-86	24-11-86	21.73-23.63°N; 84.50-82.35°W
6	MALTSEVO	29-11-86	3-12-86	23.50-23.00°N; 84.53-83.20°W
7	STRELES	23-01-87	30-01-87	22.11-23.20°N; 84.95- 82.42°W
8	STRELES	20-02-87	1-03-87	22.11-22.33°N;84.95-84.23°W
9	STRELES	31-01-87	11-02-87	23.20°N;84.00°W
10	ULISES	6-12-87	15-12-87	21.93-21.55°N;83.68-81.00°W
11	ULISES	24-08-95	27-08-95	21.87-22.60°N; 84.97-84.35°W
12	ULISES	1-02-96	21-02-96	21.85-22.37°N;84.98-77.65°W
13	ULISES	14-09-96	22-09-96	22.12-21.85°N; 76.98-84.98°W
14	ULISES	8-02-97	18-02-97	21.83-21.82°N;84.87-76.98°W
15	ULISES	3-09-98	18-09-98	21.87-21.32°N; 84.95-84.52°W
16	ULISES	15-05-99	3-06-99	23.67-23.50°N-81.12-81.77°W
17	ULISES	1-12-00	8-12-00	20.25-21.03°N;74.07-79.50°W

Tabla III: Métodos de mediciones de la temperatura del agua y la salinidad, utilizadas en 53 cruceros realizados en aguas aledañas a Cuba en 1966- 2000

Buques y periodo de trabajo	Mediciones de temperatura	Precisión en °C	Mediciones de salinidad	Precisión en psu
Expediciones Cuba-URSS antes de 1970	Termómetros reversibles en Botellas Nansen	± 0.02	En laboratorio, con muestras de las botellas Nansen	±10 ⁻³
Expediciones Cuba-URSS desde 1970	Sonda-batómetros automatizados	± 0.01	Sonda-batómetros automatizados	±10 ⁻³
Buque “Ulises” hasta 1993	Termómetros reversibles en Botellas Nansen	± 0.02	Salinómetro con muestras de las botellas Nansen	±10 ⁻³
Buque “Ulises” desde 1996 Buque mexicano “Justo Sierra”	CTD	± 0.01	CTD	±10 ⁻³

Es preciso aclarar que los datos mostraron una gran irregularidad tanto espacial como temporal, por lo que hubo que acudir a algunos procedimientos para mitigar el efecto de esta irregularidad. Según lo publicado por Mitrani y Díaz (2008), las particularidades de los perfiles verticales de temperatura y salinidad en las aguas aledañas a Cuba, son semejantes para todas las áreas, por lo cual es posible incluir todos los datos en un solo grupo, con el mismo curso anual. Para apreciar los cambios ocurridos durante el período estudiado, se consideró lo más adecuado tomar como punto de cambio, el señalado para la temperatura planetaria para el Siglo XX, según se describe en el texto de Jones y Palutikov (2005), de manera que fue posible comparar el curso anual promedio 1966-2000 con los cursos anuales promediados para 1966-1980 y 1981-2000.

Con los datos de todos los cruceros, se elaboraron además los mapas anuales de la temperatura superficial y del máximo de salinidad, localizado entre los 150 y 300 m. A la información procedente de los cruceros cubanos, se añadieron los datos del World Ocean Atlas (2009), disponible libremente en INTERNET. El mapa-base en proyección Mercator, procede del Atlas GEBCO (2009), en cuya documentación se expresa que los datos correspondientes al Archipiélago Cubano fueron entregados al grupo GEBCO por la Empresa GEOCUBA. Las matrices de datos oceánicos se procesaron con el sistema Ocean Data View, versión 4.4.4 sobre Linux (ODV, 2010), también disponible de forma libre.

Aunque existen muchas imágenes en INTERNET acerca de los parámetros de la estructura termohalina, la resolución más fina que muestran es de 1 grado de latitud (111 Km. aproximadamente), como es el caso del “World Ocean Atlas” (WOA-NOAA, 2009), mientras que la mayor parte de la información utilizada en el presente trabajo, procede de estaciones realizadas en aguas cubanas a distancias en el entorno de la décima parte de un grado (11 Km.), por lo que en las aguas profundas cercanas a las costas de Cuba, se muestran más detalles de los que pudiera dar el WOA de forma independiente..

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de las inundaciones costeras en Cuba

Sobre el territorio cubano, el régimen habitual de los vientos está conformado básicamente por la influencia los "alisios". La velocidad media es de 2,8 m/s, mientras que en la dirección predominante es de 3.8 m/s (Vega et al., 1990). Como resultado, habitualmente hay condiciones de buen tiempo. Este régimen normal, con frecuencia se ve alterado por eventos tropicales (huracanes, tormentas, depresiones, ondas tropicales) y extratropicales (sistemas frontales, bajas extra tropicales). Otras causas identificadas han sido las hondonadas no pre-frontales, la acción combinada de altas y bajas presiones, las trombas marinas y los tornados.

Habitualmente, las inundaciones costeras en Cuba son causadas por eventos meteorológicos severos. Aunque se conoce la existencia de una zona sísmica activa en la región oriental del país, en toda la historia de la nación cubana no se cuenta con testimonios de ocurrencia de inundaciones significativas por tsunamis. Todos los casos de inundaciones de gran severidad de que se tiene noticia, se han generado bajo la influencia de factores meteorológicos. La peculiar configuración geográfica de la Isla de Cuba, alargada y con amplias zonas de plataforma insular, favorecen el alcance vertical del nivel del mar por el efecto amplificador del fondo marino. Las inundaciones costeras de mayor significación son producidas por los ciclones tropicales, siguiéndoles en severidad los sistemas frontales y los vientos de región sur asociados a las bajas extra tropicales; las zonas más afectadas son las costas correspondientes a las provincias occidentales (Mitrani et al. 2001). Estos fenómenos generan los vientos más intensos de la región y las mayores alteraciones del nivel del mar en la zona costera (Vega et al., 1990, Mitrani et al. 2001). Por otra parte, ocasionalmente la acción combinada de centros de altas y bajas presiones genera vientos del primer cuadrante que producen inundaciones en la zona correspondiente al norte de las provincias orientales, destacándose el tramo costero comprendido entre Gibara y Guardalavaca (Hernández 2003, Hidalgo 2010). A modo de ilustración, a continuación se describen patrones de circulación que caracterizaron a diversos sistemas generadores de notables inundaciones en las áreas de estudio del presente trabajo.

El huracán "Juan", de 1985

Provocó la inundación más prolongada de que se tiene noticia en la Ciudad de La Habana. Nunca se acercó a las costas cubanas, pero al estacionarse en la costa sur de los Estados Unidos, los intensos vientos del noroeste, con largo fetch (alcance del viento)² y persistencia de más de 72 horas, produjeron la formación de intensas marejadas que alcanzaron las costas habaneras en forma de mar de leva. Este huracán se originó en la región central del Golfo de México y alcanzó la categoría de huracán de moderada intensidad en la tarde del 27 de Octubre. El día 28 a las 1200 UTC (7 a. m., hora local) su centro se encontraba muy próximo al Estado de Louisiana, dando comienzo a un movimiento errático con descripción de dos lazos en un largo período de tiempo que osciló entre la madrugada del 28 de Octubre y la tarde del día 29. Su peculiar trayectoria (**Fig. 2 a**) provocó que su centro permaneciera en las cercanías de esta área hasta el día 30 de octubre, en el entorno de las 00 UTC (7 p. m., hora local) (**Fig. 2 b**). Este lento desplazamiento, unido al extenso campo bórico que cubría casi totalmente el área del Golfo de México, dio lugar a que se formaran las zonas generadoras de intenso oleaje. Las olas afectaron al litoral en forma de mar de leva con alturas de 4 a 6 m. En la Calle 3ra, del Vedado, el alcance vertical alcanzó 2 m y se extendió hasta la Calle Línea. Se reportó la entrada del mar en zonas bajas de los Municipios Playa, Habana del Este y Centro Habana. Se afectaron las zonas de Guanabo, Bauta y Santa Fé. Se cerró el Túnel de la Bahía. (NHC 1986, Mitrani et al. 1994, 1999, 2008).

² El término fetch procede del idioma inglés y sirve para designar al alcance del viento, distancia sobre la cual el viento puede considerarse más o menos constante en velocidad y dirección. Dada la brevedad del mencionado vocablo, su uso está ampliamente difundido en los textos hispanos, según se muestra en la abundante bibliografía disponible en INTERNET.

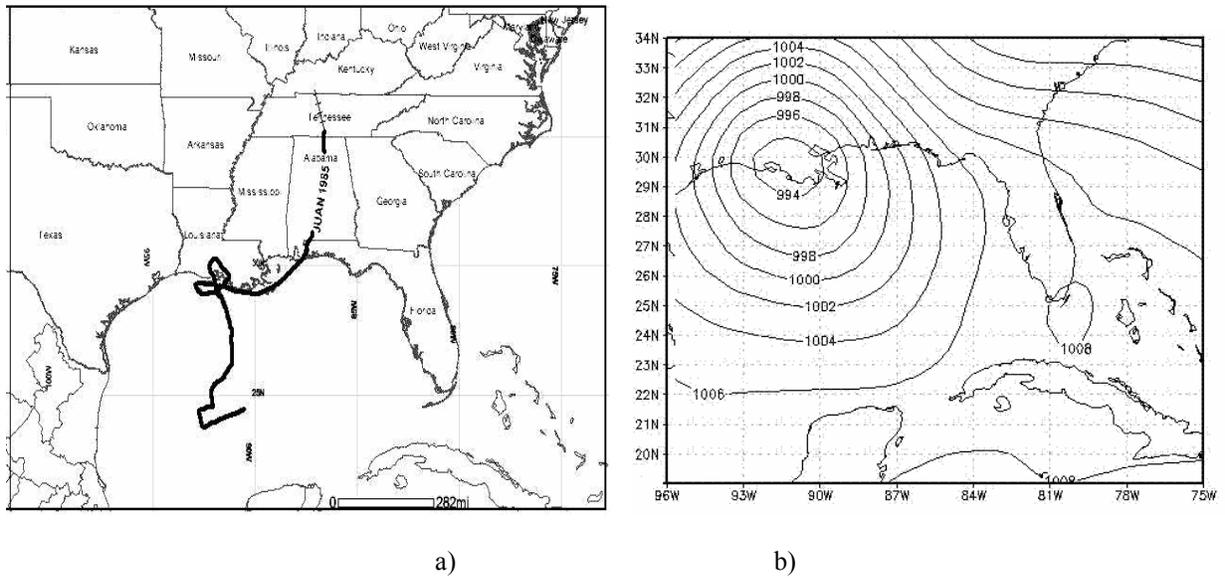


Fig. 2 (a): Trayectoria del huracán “Juan” del 1985 y (b) campo bórico del 30/10/1985, a las 00 horas UTC (7 p.m., hora local)

El huracán “Charley” del 2004

Después de atravesar el Caribe, se acerca al Golfo de Batabanó con rumbo norte noroeste y penetra en Cuba por Playa Cajío a las 4:30 UTC (12:30 a.m., hora local de verano) del 13 de agosto del 2004, saliendo por el oeste de la ciudad de La Habana a las 06 UTC (2 a.m., hora local de verano), donde se reportaron vientos de más de 54 m/s. Permaneció sobre territorio nacional apenas dos horas y media. En las Fig. 3 a, b se muestran la trayectoria y el campo bórico característicos del momento de la inundación, (Pasch et al. 2004). El alcance vertical del nivel del mar en Playa Cajío fue de 2.5 m (Ballester y Rubiera 2005; Mitrani et al. 2008); de las casas del lugar, solo quedó en pie el consultorio médico. El fondo marino, muy bajo y casi plano, favoreció la inundación principalmente por surgencia de huracán, con algún aporte de rompiente de oleaje y de la marea astronómica, cuyo valor en la zona es menor de 0.2 m (ICH, 1989).

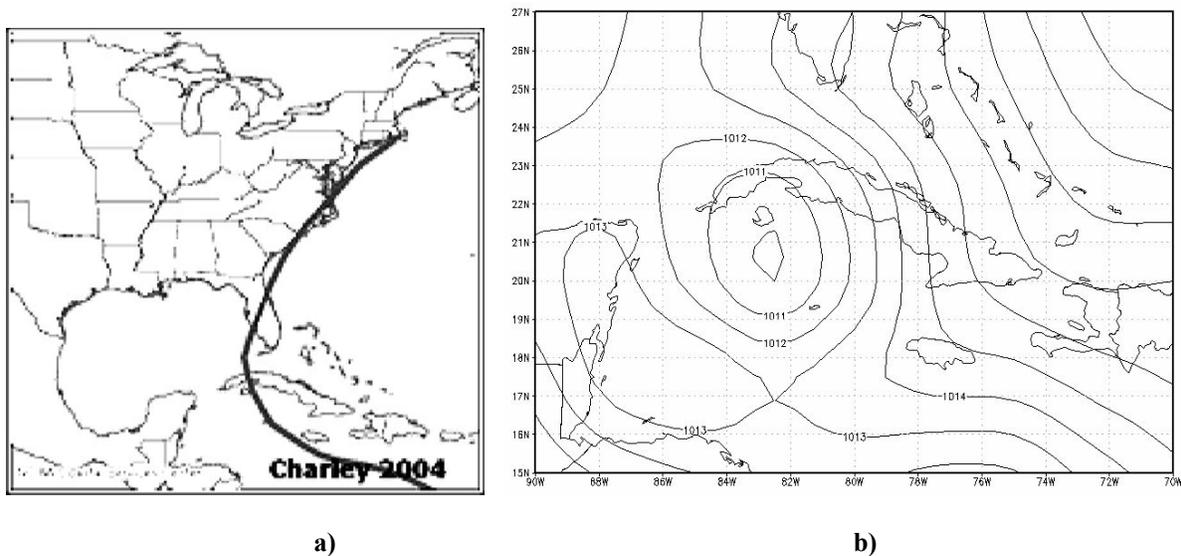


Fig. 3 (a): Trayectoria del huracán “Charley” del 2004 y (b) campo bórico del 13/08/2004, a las 00 horas UTC 7 p.m., hora local)

El huracán "Wilma" del 2005

Hasta el presente, es el más intenso de que se tiene noticia en el hemisferio occidental. Nunca tocó tierra cubana, según se aprecia en su trayectoria (Fig. 4a). Sin embargo, generó en la Ciudad de la Habana una de las inundaciones más destructivas y con las mayores pérdidas económicas de que se tiene noticia para la ciudad, según refirió el periódico Granma por aquellos días. A su paso por el Caribe, ocurrieron inundaciones en zonas bajas de la costa sur del territorio cubano, que fueron particularmente notables el 21 de octubre de 2005 en las costas del Golfo de Batabanó (Pasch et al., 2006; Ballester y Rubiera, 2006). Después de su recurva sobre la Península de Yucatán, en el litoral de Ciudad de La Habana los días 23 y 24 ocurrieron grandes marejadas que produjeron acumulación de agua por rompiente de oleaje. Al combinarse con el efecto de la surgencia de huracán y el llenante de la marea astronómica, el alcance vertical total estuvo entre 1 y 2 m, con mayor o menor valor en algunos puntos, en dependencia de la configuración costera y topografía del terreno. Según se refiere en el Resumen de Temporada de Ballester y Rubiera (2006), en los bajos de Santa Ana del reparto Santa Fe, las aguas alcanzaron 2,5 m de altura. La inundación duró hasta la mañana del día 25 y en algunos puntos, hasta la tarde. El patrón de circulación que favoreció la inundación se muestra en la Fig. 4 b

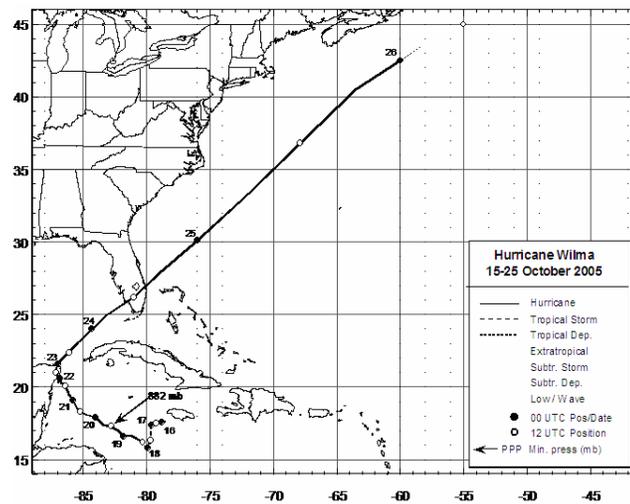
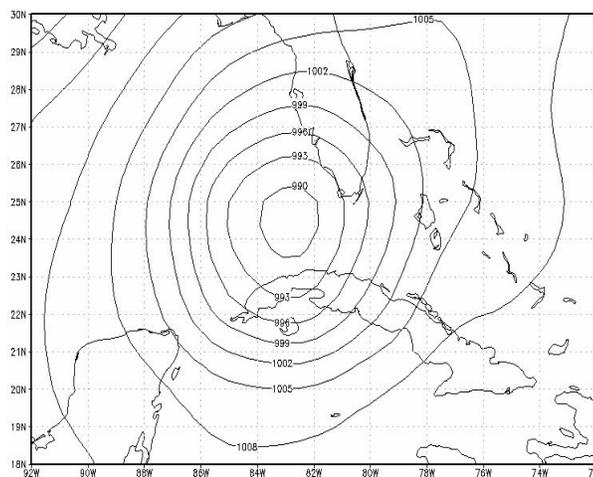


Fig. 4 (a): Trayectoria del huracán "Wilma" del 2005



b)

Fig. 4 (b): Campo bórico del 24/10/2005 a las 06 horas UTC (1am, hora local)

Baja extratropical del 13 de marzo de 1993

Al final de la mañana de ese día, se inició una severa inundación en zonas bajas de la costa noroccidental incluyendo el Malecón Habanero, originada por una baja extratropical la cual se formó el día 12, desarrollándose bruscamente en el noroeste del Golfo de México (Mitrani et al. 1994). Empezó un movimiento rápido al Este y Nordeste, alcanzando el estado de oclusión en menos de 24 horas al Noroeste de la Península de la Florida. Es de destacar que el estado de oclusión es un fenómeno poco frecuente por debajo de los 30° N, lo que demuestra el rápido desarrollo de esta baja, la cual el día 12, a las 1800 UTC (1 p. m., hora local) ya contaba con una presión mínima central de 969 hPa. Horas más tarde, la circulación del área delantera de esta baja (Fig. 5 a), favorece la intensificación de los vientos de región sur, de más de 12 m/s generaron severas inundaciones en las inmediaciones del Golfo de Batabanó por arrastre del viento, a la manera descrita por Mitrani et al. (2001).

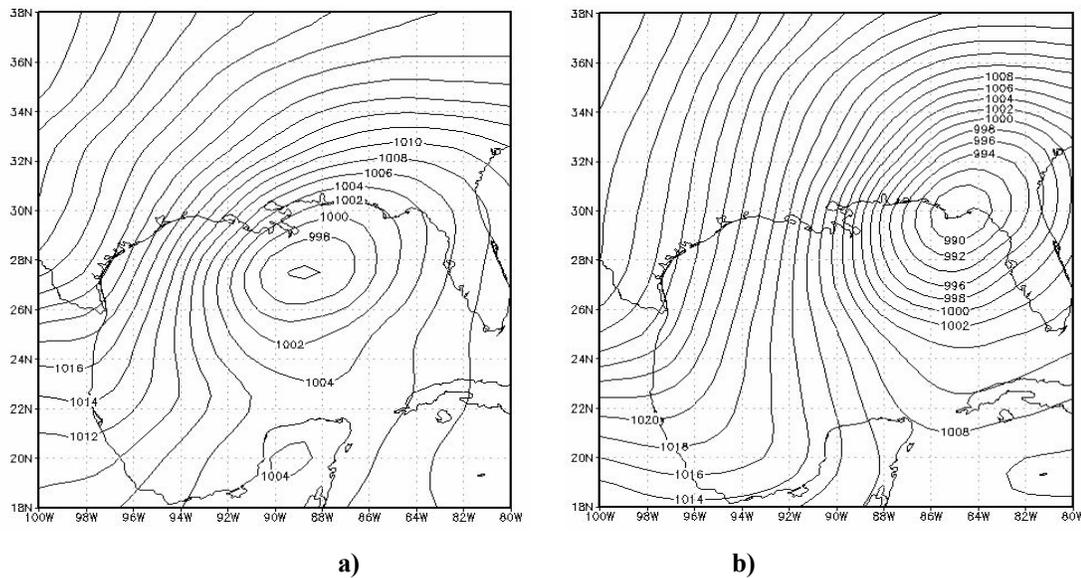


Fig. 5 (a): Circulación de la baja extratropical del 13 marzo de 1993 a las 00 horas UTC, con afectación por arrastre de los vientos de región sur en el Golfo de Batabanó y (b) con afectación por mar de leva provocado por vientos del noroeste en La Habana a las 06 UTC (1 a.m., hora local).

El día 13, a las 0600 UTC (1 a.m., hora local), la baja se encontraba aproximadamente entre los 30° N y los 83° W (Extremo Noroeste de la Florida) (Fig. 5b). Los vientos de región Noroeste, de 90 Km/h (25.2 m/s) en su sector izquierdo, comenzaron a afectar la mitad oriental del Golfo de México (Este de 90°), dando lugar a la formación de una zona generadora de oleaje entre los 25° y 30° N y los 85° y 90° W aproximadamente. Las olas se desplazaron desde el área en forma de mar de leva, afectando el litoral 12 horas después. A su vez la baja comenzó a moverse al Nordeste, ocasionando que su extenso campo bórico interactuara con el anticiclón continental y se produjeran vientos entre 40 y 60 Km/h (11.2-16.8 m/s). Durante este proceso también se incrementaron las zonas generadoras de oleaje hasta quedar limitada por la costa Norte de la Región Occidental de Cuba. El fetch adquirió su máximo valor, originándose nuevos trenes de olas de viento, las cuales al combinarse con el mar de leva existente hicieron que se incrementaran y se prolongara la inundación hasta el día 14. Las olas alcanzaron alturas entre 4 y 6 m. A su paso por Cuba, Estados Unidos y Canadá, dejó cuantiosos daños y pérdidas por lo que fue denominada “La tormenta del Siglo”.

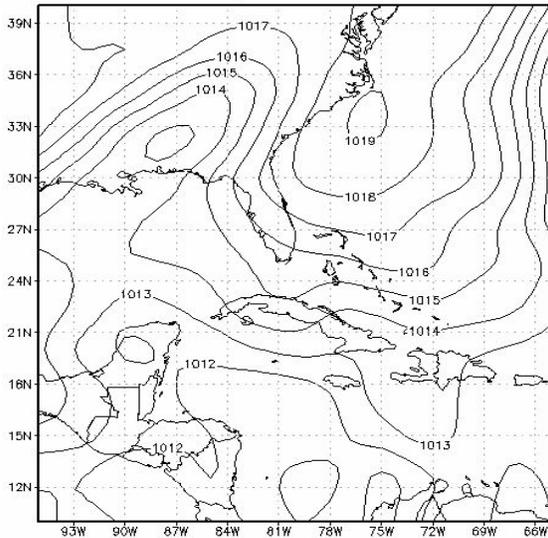
3.2 Las combinaciones de sistemas de altas y bajas presiones

Estos generan inundaciones de gran severidad en zonas costeras de las provincias orientales. Según lo señalado por PNUD (1998), Hernández (1998) e Hidalgo (2010), se pueden identificar los siguientes patrones sinópticos:

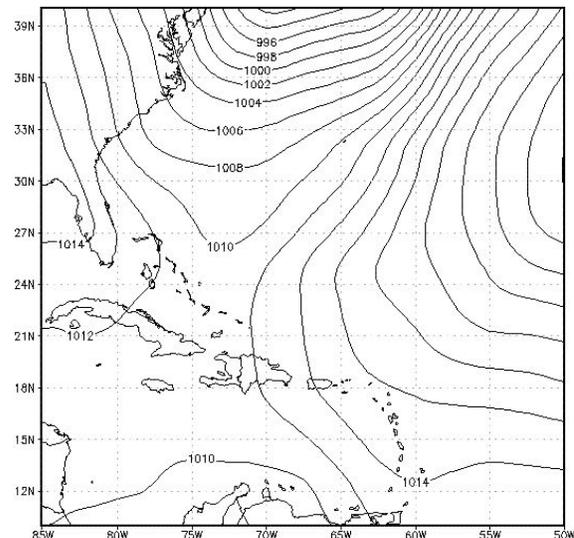
- Un centro de altas presiones se localiza sobre el océano, en las cercanías de la costa oeste de los Estados Unidos y otro de bajas presiones en la zona central del Atlántico, ambos entre los 30 y los 40° N. El territorio cubano se encuentra por completo bajo la influencia de la circulación anticiclónica. La inundación

costera es generada por los vientos de la periferia del anticiclón (**Fig. 6 a**).

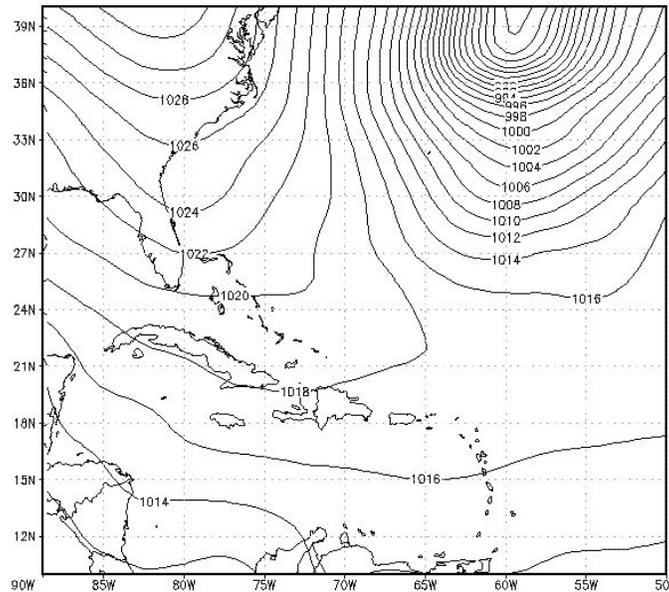
- El centro de altas presiones se localiza sobre el continente y el de bajas presiones en las cercanías de las costas continentales, en latitudes medias sobre el Atlántico. La inundación es generada por los vientos de la periferia del anticiclón continental (**Fig. 6 b**).



a) 13/10/1982 06 UTC (2 a.m., hora local de verano)



b) 22/03/1998 12 UTC (7 a.m., hora local)



c) 17/03/2008 06 UTC (1 a.m., hora local)

Fig. 6: Patrones sinópticos de las combinaciones de sistemas de altas y bajas presiones, que generan inundaciones costeras en la región nororiental de Cuba.

- El centro de altas presiones se localiza sobre tierra y el de bajas presiones sobre el Atlántico; en la periferia de ambos centros el gradiente bórico aumenta, por lo cual el viento se intensifica. La inundación costera es generada por los vientos de región norte, asociados a un frente frío (**Fig. 6 c**).

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo auspició entre 1994 y 1997 el proyecto multidisciplinario denominado "Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las Inundaciones Costeras, Prevención y Reducción de su Acción Destructiva" (PNUD, 1998). En el marco de este proyecto se realizó una investigación para detectar los asentamientos poblacionales que han sido afectados por inundaciones costeras y se elaboró una primera versión del mapa de asentamientos poblacionales que reportaron inundaciones en el Siglo XX. Posteriormente, este mapa fue actualizado en el 2001 y en el 2007 por especialistas del IPF y del INSMET³, durante la ejecución de otros dos proyectos, dirigidos por especialistas del INSMET e incluidos en las publicaciones de Mitrani et al. 2001, Mitrani et al. 2008. La última actualización es la que aparece en la Fig. 7, incluye todo el Siglo XX más el Siglo XXI hasta el año 2006. No se registraron nuevos asentamientos reportando inundaciones.

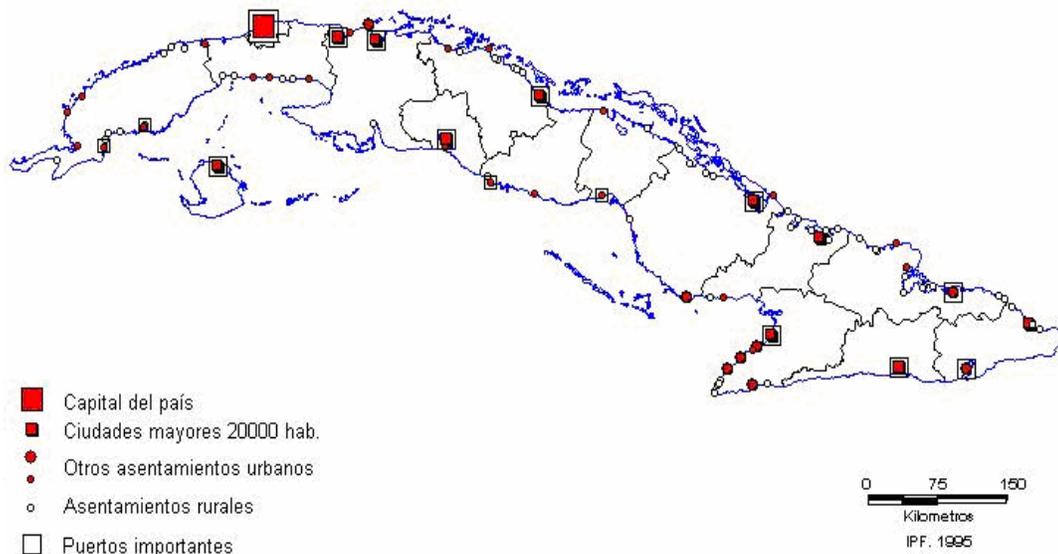


Fig. 7: Localidades donde se han reportado inundaciones costeras en Cuba, período 1901- 2006

3.3 Tendencias de la frecuencia e intensidad de las inundaciones costeras

A continuación se muestran las tendencias observadas en las inundaciones por entrada del mar en tierra, en los diferentes tramos costeros estudiados. En la Fig. 8 se muestran la ocurrencia de las inundaciones moderadas y fuertes, generadas por sistemas frontales (líneas azules) y huracanes (líneas rojas), en el Malecón Habanero y las líneas de tendencia para cada tipo de caso, en el período 1901-2011. Obsérvese que ambas tendencias son hacia el aumento, si bien la de los sistemas frontales es más marcada, acorde con lo expresado por Pérez et al. (2011). También es posible apreciar una alternancia de períodos más activos y menos activos. Se aprecia además la particularidad de que los huracanes pueden generar en algunos años hasta dos inundaciones de gran severidad.

³ Este mapa fue elaborado por los siguientes especialistas: Lic. Isidro Salas García y Dr. Rafael Pérez Parrado, del INSMET ; el Lic. Carlos Rodríguez Otero y la Lic. Ada Luisa Pérez, del IPF

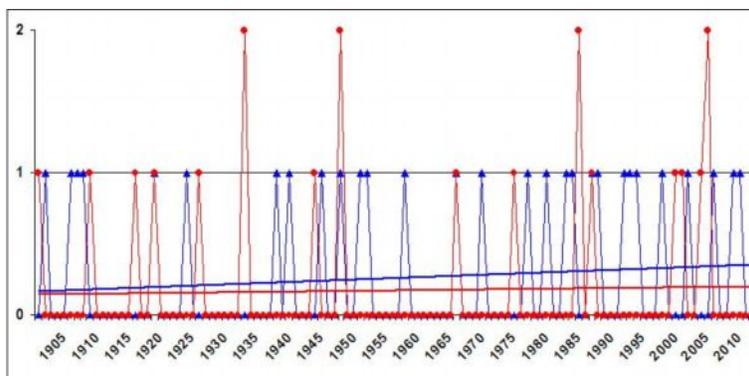


Fig. 8: Ocurrencia de inundaciones moderadas y fuertes en el Malecón Habanero en el período 1901-2011

Las particularidades del referido comportamiento de las inundaciones se ven mejor al organizarlos por décadas, según se muestra en la **Fig. 9**, donde además de la tendencia lineal, fueron incluidas tendencias polinómicas de quinto grado, que muestran con más claridad la alternancia de los períodos de actividad.

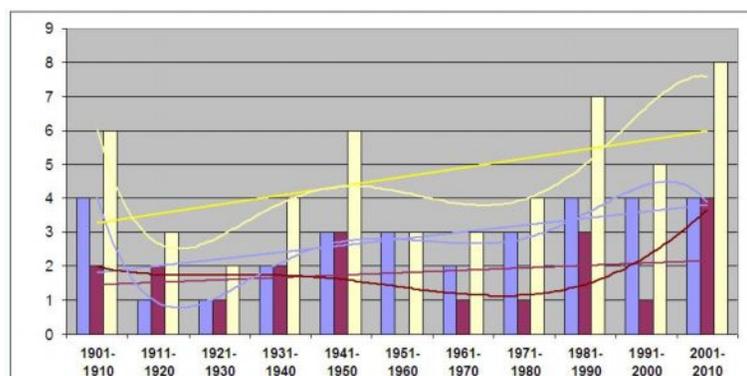


Fig. 9: Ocurrencia de inundaciones moderadas y fuertes en el Malecón Habanero por décadas (1901-2011) y sus tendencias lineales y polinómicas

Púrpura: Huracanes Azul: Sistemas frontales Amarillo: Todos los casos

Los polinomios de quinto orden utilizados, mostraron coeficientes de correlación del 84% y del 60% para las tendencias de ocurrencia de inundaciones por sistemas frontales y ciclones tropicales respectivamente, y del 74 % para el total, lo cual significa que con una aproximación aceptable, es posible percibir tendencias crecientes en la ocurrencia de las inundaciones severas por todas las causas, con alternancia en los picos de actividad, entre 30 y 40 años. También se observa que el comportamiento de las inundaciones por ciclones tropicales y sistemas frontales puede presentar una alternancia contraria de manera que en etapas de alza de los sistemas frontales hay depresión en los huracanes y viceversa. Aquí se manifiesta la influencia del evento ENOS, que inhibe la formación de huracanes en el Atlántico (Hernández y García 2011) al mismo tiempo que acerca a la zona central de las bajas extratropicales hacia bajas latitudes en el Golfo de México, lo cual conduce al fortalecimiento de los “Sures” y de los vientos del Noroeste, de modo que se incrementan las inundaciones en ambas costas de las provincias occidentales (Mitrani et al. 2001).

En las **Figs. 10 y 11**, se muestran las tendencias de los tramos aledaños al Golfo de Batabanó y Gibara-Guardalavaca. Obsérvese también la tendencia hacia el aumento en la ocurrencia de las inundaciones, también en estos casos.

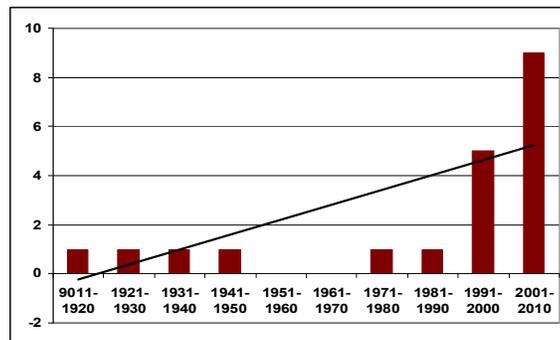


Fig. 10: Tendencia de las inundaciones costeras fuertes, en el tramo costero aledaño al Golfo de Batabanó, en 1901- 2011, por décadas

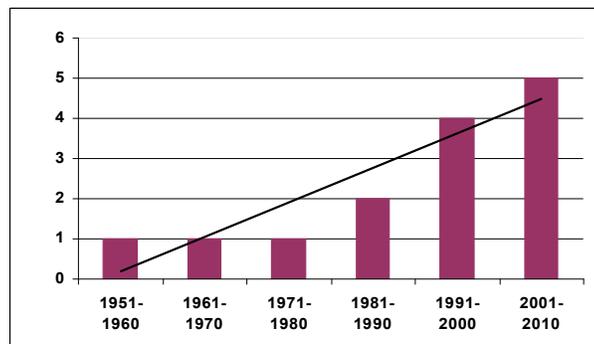


Fig. 11: Tendencia de las inundaciones moderadas y fuertes ocurridas en el tramo Gibara-Guardalavaca entre 1960 y 2010

En las tres series, se observa una coincidencia de períodos de baja ocurrencia de inundaciones entre 1951 y 1970, en coincidencia con una etapa de enfriamiento planetario y debilitamiento de todos los sistemas de la circulación atmosférica y oceánica planetaria.

3.3 Parámetros de la estructura termohalina que favorecen al aumento de las inundaciones

En las últimas tres décadas ha habido un aumento de temperatura planetaria, y en particular, en las aguas aledañas a Cuba, se aprecia un aumento de temperatura y salinidad en las aguas superficiales y sub-superficiales, (Mitrani y Díaz, 2008), en correspondencia con los observado por Curry et al. (2003). Esta situación conduce al incremento de la energía térmica dentro del océano, disponible para el desarrollo de los sistemas atmosféricos. Según lo argumentado por Anthes et al. (2006), el incremento de la temperatura y la salinidad ocasionan cambios en la circulación atmosférica y oceánica, que favorecen la intensificación de los transportes de humedad desde los sub-tropicos hacia altas latitudes; estos afectan a la Oscilación Multidecadal del Atlántico, uno de los mecanismos más influyentes en la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales. Los parámetros que mejor reflejan esta situación, son la temperatura superficial oceánica (Tso) y el máximo de salinidad (Smax), localizado en las aguas profundas entre los niveles de 150 y 300 m.

En las Figs. 12 a, b se muestran los cursos anuales promedio de los parámetros antes mencionados para los años 1966-2000, así como los promedios para 1966-1980 y 1981-2000. Considerando el punto de cambio en 1980, acorde con las apreciaciones hechas para la temperatura planetaria por Jones y Palutikov (2005), se observa que los valores promediados para los años posteriores a 1980, son mayores o iguales a la media.

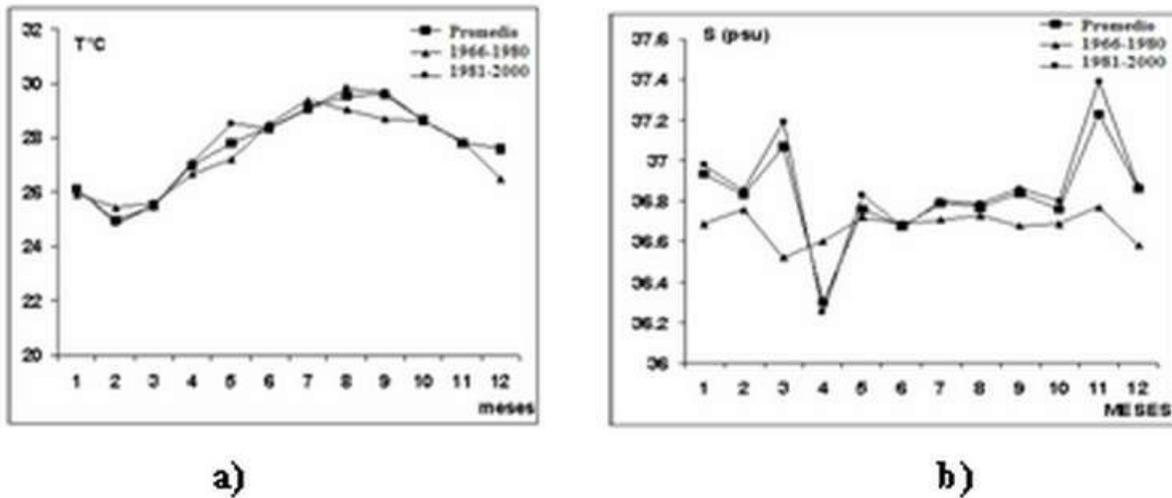


Fig. 12 : (a) Curso anual de la temperatura de la superficie marina y (b) del máximo de salinidad en aguas profundas aledañas a Cuba.

Como consecuencia, la capacidad de acumular calor en el mar aumenta, se profundiza la capa homogénea con temperaturas mayores de 26°C (Mitrani et al. 2008), conduciendo al incremento en la formación y el poder destructivo de los ciclones tropicales.

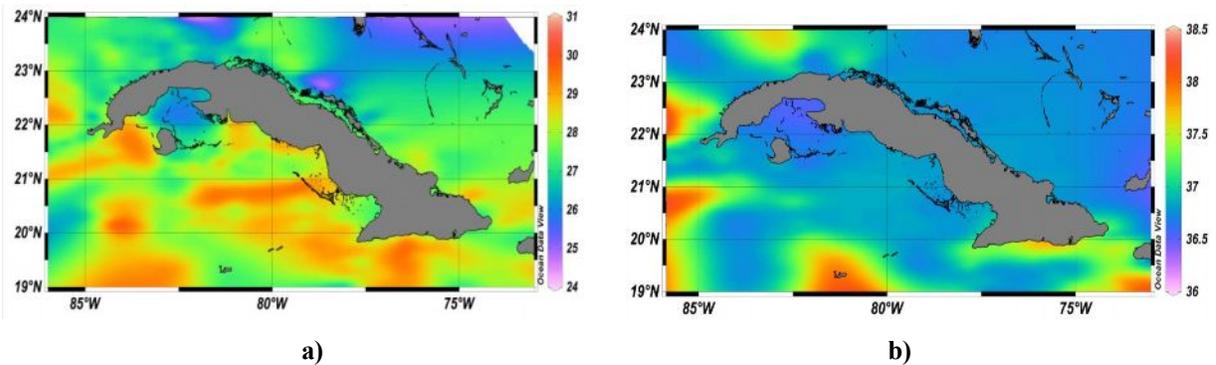


Fig. 13: (a) Distribución de Tso y Smax en aguas aledañas a Cuba (promedio anual 1966-2000)

Por otra parte, los máximos de Tso y Smax, se observan en las cercanías de ambas costas de la región occidental de Cuba (Mitrani et al. 2008) lo que hace de estas áreas las zonas más sensibles al incremento de las inundaciones costeras por el cambio climático previsto (Fig. 13 a, b).

Conclusiones

Se presenta una tendencia al aumento en la ocurrencia de las inundaciones en las costas de Cuba en el Siglo XX y los años transcurridos del Siglo XXI, aún cuando se manifiesta una alternancia de periodos de alta y baja actividad en la ocurrencia de estos eventos, que se corresponde con el aumento en frecuencia e intensidad del paso de los sistemas tropicales y extratropicales sobre el territorio nacional, sobre todo en los últimos 10 años.

Las zonas más sensibles al cambio climático previsto son las costas norte y sur de las provincias occidentales, al encontrarse la región sometida a la mayor afectación por huracanes, frentes fríos, sures y donde se localizan los valores máximos de salinidad y temperatura de las aguas adyacentes a Cuba, que favorecen al incremento en la frecuencia y el poder destructivo de los ciclones tropicales.

Se recomienda mejorar las bases de datos oceánicas, incorporando en lo posible, los registros de boyas instaladas en las cercanías de las aguas cubanas y la información digitalizada de imágenes de satélite.

Referencias

- Anthes R., R. W. Corell, G. Holland, J. W. Hurrell, M. C. MacCracken, K. E. Trenberth (2006):** Huricanes and Global Warming-Potencial Linkages and Consequences, Comments, Bulletin of the American Meteorological Society, 623-628
- Ballester M. y Rubiera J., (2005):** “Resumen de la temporada ciclónica del 2004”, Archivos del Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología, La Habana, (en soporte digital).
- Ballester M. y Rubiera J., (2006):** “Resumen de la temporada ciclónica del 2005”, Archivos del Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología, La Habana, (en soporte digital).
- Curry R., Dockson B., Yashaev I. (2003):** “A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades” Nature, Vol. 426, 826:829
- GEBCO (2009):** Digital Bathymetry Atlas, Published by the British Oceanographic Data Centre, under the joint auspices of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographical Organization, with founding provided by the Environment Research Council. (Digital support)
- Hernández I., E. García (2011):** “Inundaciones en la Ciudad de La Habana por sistemas frontales y su relación con ENOS. Influencia sobre la costa”, Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología, SOME CUBA -2011, en soporte digital, INSMET, La Habana, ISBN 978-959-7167-20-4
- Hernández, N. (2003):** Estudios Hidrometeorológicos de los Mares Adyacentes a Baracoa en Guantánamo, INSMET/CITMA, Tesis de Maestría en Ciencias Meteorológicas. La Habana, Cuba, 66 pp.
- Hernández M., o. Marzo, A. Acanda (2010):** Tendencia lineal del nivel del mar en algunas localidades del Archipiélago Cubano, Serie Oceanológica, No. 7, ISSN 2072-800x, consultado el 1 de junio del 2011, disponible en <http://oceanología.redciencia.cu/articulos>
- Hidalgo A. (2010):** ‘Características de las inundaciones costeras en el área Gibara- Playa Guardalavaca, Ciencias, Revista Trimestral, enero-marzo 2010, Año 15, Holguín, 1:9
- ICH. (1989):** Derrotero de las costas de CUBA Región Marítima del Norte y Sur. Tomo 1 y 2. Instituto Cubano de Hidrografía, La Habana. 432 pp.
- IGBP (1993): Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone, Science Plan. Global Change, Report No. 25, Edited by P M Holligan and H de Boois, Stockholm, 53 pp.**
- IPCC (2007):** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland. pp. 104
- Jones P.D., Palutikof J. (2005):** “Global temperature record” Climatic Research Unit, consultado el 18 de marzo del 2010, disponible en <http://www.uea.ac.uk>
- Juantorena Y., I. Mitrani, P. Beauballet (2000):** “Las inundaciones por oleaje en el Malecón Habanero con el escenario actual y el previsto por posible cambio climático” Boletín SOMETCUBA, Vol. 6, No. 2, consultado el 6 de junio del 2012, disponible en <http://www.met.inf.cu>
- Mitrani I., L. Díaz, P. Pérez, J. González (1994):** Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón Habanero, Informe de Resultado Científico, Biblioteca INSMET, 38 pp
- , **Vega R., Pérez Parrado R., Salas I., (1999):** "Particularidades de la aplicación de la información meteorológica en el manejo de las costas de Cuba" Revista Cubana de Meteorología, Vol. 6, No. 1, 38:42
- , **R. Pérez, O. García, I. Salas, Y. Juantorena, M. Ballester y P. Beauballet, (2001):** "The coastal floods in the Cuban territory, the most sensitive areas and the possible impact of the climate change" Proceeding of the 2001 Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community, Río de Janeiro, Brasil, 6-8 octubre 2001. Disponible en: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/openmeeting/1mtg/01info.html>

- , **O. Díaz (2004)**: "Relationship between the thermal vertical structure and tropical cyclone activity on Cuban waters" *Revista de Ciencias Marinas*, Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California, Vol 30, N 2, 3:7
- , **Díaz O. O., Borrajero I., Bezanilla A., Morales A., Viamontes J., Pérez J. (2006)**: "Particularidades de la interacción océano-atmósfera y las tendencias climáticas en aguas cubanas", *Compendio de Resultados Científicos del PRCT "Análisis y pronósticos del Clima Terrestre y Espacial*, Edición del 2008, en soporte digital, ISBN: 978-959-300-001-7
- , **Díaz O. (2008)**: "Particularidades de la estructura termohalina y sus tendencias en aguas Cubanas" *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 14, No. 1 54:73
- y **colectivo de autores (2008)**: "Atlas Oceanográfico de las Aguas Cubanas", *Compendio de Resultados Científicos del PRCT "Análisis y pronósticos del Clima Terrestre y Espacial*, Edición del 2008, en soporte digital, ISBN: 978-959-300-001-7
- , **O. O. Díaz Rodríguez, A. Pérez., R. Cangas, O. E. Pérez (2009)**: "La estructura termohalina de las aguas adyacentes a Cuba y la evolución de los ciclones tropicales en el periodo 1966-2000" *Memorias del VII Congreso Ibero-Americano de Ciencias del Mar ColacMARCUBA 2009*, en soporte digital, ISBN 978-959-300-005-5
- PNUD (1998)**: "Desarrollo de la técnicas de predicción y las inundaciones costeras, prevención y reducción de su acción destructiva" *Informe Técnico del Proyecto Cuba/94/003*, auspiciado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, Editora del Instituto de Planificación Física, La Habana, 200 pp.
- NHC (1985)**: Hurricane "Juan", 27 October - 4 November 1985, *Tropical Cyclone Report*, National Hurricane Center, consultado el 5 de abril del 2012, disponible en [http:// www.nhc.gov](http://www.nhc.gov)
- NOAA - NOMAD3 (2012)**: National Oceanic and Atmospheric Administration/ Operational Model Archive Distribution System, consultada el 5 de marzo del 2012, disponible en <http://nomad3.ncep.noaa.gov/>
- ODV (2010)**: Ocean Data View, version 4.4.4, Linux-i386, consultado el 22 de marzo del 2012, disponible en <http://odv.awi.de>
- Pasch R. J., D. P. Brown, E. S. Blake (2004)**: Hurricane Charley, 9-14 August 2004, *Tropical Cyclone Report*, National Hurricane Center 18/10/2004, consultado el 5 de abril del 2012, disponible en [http:// www.nhc.gov](http://www.nhc.gov)
- Pasch R. J., E. S. Blake, H. D. Cobb III, D. P. Roberts (2006)**: Hurricane Wilma, 5-25 October 2005, *Tropical Cyclone Report*, National Hurricane Center, consultado el 5 de abril del 2012, disponible en [http:// www.nhc.gov](http://www.nhc.gov)
- Pérez Suárez R., C. Fonseca, B. Lapinel, C. González, E. Planos, V. Cutié, M. Ballester, M. Limia, R. Vega (2011)**: "Segunda Evaluación de las Variaciones y Tendencias del Clima en Cuba". II Congreso Internacional de Cambio Climáticos de la VIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana, Cuba, 4- 8 de julio de 2011, en soporte digital, ISBN 978-959-300-018-5, 15 pp.
- Vega R., M. E. Sardiñas, M. E. Nieves, A. Centella (1990)**: "Análisis estadístico - climatológico del régimen de la velocidad máxima del viento en Cuba" *Informe Final de Resultado Científico*, INSMET, 60 pp.
- WOA-NOAA (2009)**: "World Ocean Atlas", National Oceanographic and Atmospheric Administration - National Ocean Data Center, consultado el 6 de mayo del 2012, disponible en el web site: www.nodc.noaa.gov/oc5/woa09/

Anexos

Tabla I: Cruceros de la base de datos HIDROMET. En la cuarta columna, la primera latitud y la primera longitud se refieren a al punto de comienzo, mientras que la segunda latitud y la segunda longitud se refieren al punto de terminación de las observaciones

#	Buque	Inicio	Terminación	ZONA GEOGRÁFICA
1	STRELES	18-05-66	12-08-66	21.33-21.83°N ; 85-85.10°W
2	STRELES	22-01-67	24-09-67	21.33 - 21.83°N ; 85-85.10°W
3	PETO	31-01-67	28-02-67	Bojeo a Cuba
4	XIPHIAS	19-07-67	28-07-67	21.59°N ; 83.43°W
5	STRELES	15-01-68	16-10-68	21.5-22°N ; 85-86°W
6	SARDINA	15-05-68	30-06-68	Bojeo a Cuba
7	XIPHIAS	27-05-68	01-06-68	21.38-22.05°N; 81.56-81.32°W
8	XIPHIAS	01-07-68	17-07-68	22.00°N ; 81,32°W
9	ANTAR	11-10-68	02-12-68	Bojeo a Cuba
10	STRELES	13-02-69	14-10-69	21.50°N ; 85.00°W
11	XIPHIAS	11-04-69	17-04-69	21.50°N ; 85.00°W
12	XIPHIAS	05-08-69	14-08-69	21.5°N; 83.2W
13	STRELES	02-01-70	05-04-70	21.8-21.3°N-85.1-86.0°W
14	XIPHIAS	20-01-70	06-02-70	21.53-22-34°N, 81.27-83.42°W
15	XIPHIAS	10-03-70	22-03-70	22.9-22.5°N ; 83.17-81.52°W
16	STRELES	28-01-71	16-02-71	21.66-24.35°N; 82.35-85.5W
17	FOTON	04-11-71	24-11-71	Bojeo a Cuba
18	MAKAIRA	10-04-72	23-04-72	20.09-21.07°N; 77.40-79.33°W
19	SARDINA	04-08-72	06-09-72	Bojeo a Cuba
20	MAKAIRA	19-08-72	28-08-72	21.30-20.45°N; 79.00-79.50°W
21	MAKAIRA	03-02-73	19-02-73	19.47-21.30°N; 77.48-79.50°W
22	MAKAIRA	09-04-73	21-04-73	20.45°N-79.00°W
23	MAKAIRA	19-06-73	02-07-73	19.47 -2130°N; 77.48-7950°W
24	PRIBOI	05-09-81	26-09-81	20.17°N-84.20°W
25	MALTSEVO	01-06-86	24-06-86	Bojeo a Cuba
26	MALTSEVO	03-07-86	10-07-86	22.01-23.34°N; 77.20 -86.06°W
27	MALTSEVO	24-07-86	05-08-86	19.40 -23.16°N; 75.00-82.21°W
28	MALTSEVO	01-10-86	10-10-86	Bojeo a Cuba
29	MALTSEVO	29-11-86	08-12-86	20.24-24.11°N; 82.00-86.06°W
30	ULISES	14-07-88	07-08-88	19.14-21.35°N;77.21-84.55°W
31	ULISES	22-10-88	16-11-88	19.29-21.30°N ;77.27 -84.14°W
32	ULISES	13-02-89	21-02-89	21.06-22.05°N; 79.34-81.32°W
33	ULISES	15-06-89	20-10-89	19.30-21.47 °N; 83.35-84.55°W
34	ULISES	29-07-89	01-09-89	19.29-22.13°N; 78.14-81.01°W
35	JUSTO SIERRA	04-11-89	26-11-89	19.20-21.90 °N; 73.80-86.60°W
36	BUGAEV	27-11-89	26-12-89	20.46-21.05°N; 79.40-81.05°W
37	ULISES	01-04-93	13-04-93	21.43-20.97°N; 82.90-82.22°W